

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BRUNA APARECIDA LAMARI**

**AVALIAÇÃO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE MODIFICADO COM SILANOS  
EM PASTA DE CIMENTO PORTLAND**

**CURITIBA**

**2023**

**BRUNA APARECIDA LAMARI**

**AVALIAÇÃO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE MODIFICADO COM SILANOS  
EM PASTA DE CIMENTO PORTLAND**

**Evaluation of superplasticifying additive modified with silanes in portland  
cement paste**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Dr. César Augusto Casagrande

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BRUNA APARECIDA LAMARI**

**AVALIAÇÃO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE MODIFICADO COM SILANOS  
EM PASTA DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16 de junho de 2023

---

Professor César Augusto Casagrande  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Professor Adauto José Miranda de Lima  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Professor Wellington Mazer  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todos os Orixás e especialmente a minha mãe Oxum que sempre me iluminou e cuidou dos meus caminhos durante este percurso, me mostrando que todos os meus sonhos seriam possíveis de realizar, mesmo os mais distantes e inimagináveis. *Ora yê yê ô! Salve mamãe Oxum!*

Ao meu orientador prof. Dr. César Augusto Casagrande pela paciência, dedicação e conhecimento ao me ajudar a desenvolver este trabalho.

Aos professores Dr. Adauto José Miranda de Lima, Dr. Arthur Medeiros, Dra. Lidiane Fernanda Jochem e Dr. Wellington Mazer pelos comentários e avaliações os quais foram muito proveitosos para a evolução deste trabalho.

Ao técnico de laboratório Felipe Peretto por sempre estar de prontidão e disposto a ajudar na realização de todos os ensaios relevantes ao trabalho.

Aos meus pais, Maria Rosangela de Oliveira e Sebastião da Penha Lamari, por todos os sacrifícios que fizeram para minha educação e por acreditarem que eu seria capaz quando ninguém acreditou. Suas palavras de encorajamento, compreensão e motivação desempenharam um papel significativo no meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha noiva Talyta Taéser Delboni Reis, por todos os sins que disse desde o começo da nossa história e aceitar seguir essa jornada comigo sendo minha companheira e o amor da minha vida, obrigada por todo apoio e por ter me aturado nos momentos mais difíceis, e também pelos momentos felizes que passamos juntas.

À Mãe Maria de Oxóssi (*in memoriam*), Maria Moreira Plefka, que dedicou toda a sua vida para cuidar de seus filhos e que deu sentido a minha jornada, quando mais precisei a senhora estava lá. Minha mãe, sou sua caçula, e todas as vezes que olho para o céu me pergunto se a senhora está se orgulhando dos meus feitos aqui na Terra.

## RESUMO

Este trabalho tem como tema central o estudo em relação ao desempenho dos silanos nas matrizes cimentícias com o intuito de diminuir a quantidade do uso de aditivo superplastificante através da utilização de silanos. Para isso, foram produzidas pastas com relação água/cimento de 0,186 e realizado a substituição de aditivos superplastificantes à base de éster de policarboxilato pelos silanos viniltriétoxissilano (VTES), o n-(2-aminoetil)-3-aminopropiltrimetoxissilano (APTMS) e o metacriloxipropiltrimetoxissilano (MCPTMS), em quantidades de 20% e 40%, em pastas de cimento Portland. A massa específica aparente, o teor de ar incorporado, o mini-slump e a cinética de hidratação (avaliada por calorimetria isotérmica até 48 h) das pastas foram determinados no estado fresco. Assim, no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão e flexão (7 e 28 dias), massa específica aparente e absorção por imersão das pastas. Os resultados mostraram que a substituição de 20% e 40% de VTES e APTMS diminuiu consideravelmente a trabalhabilidade e aumentou o teor de ar das pastas em relação à referência. Em contrapartida, a incorporação de 20% e 40% de MCPTMS não afetou significativamente essas propriedades. A adição de silano, para todas as amostras analisadas, teve efeito retardador no processo de hidratação, o retardo máximo verificado teve pico de hidratação em aproximadamente 36 h para o sistema de 40% MCPTMS e o retardo mínimo de 11 h para o sistema 20 % VTES. A substituição de 20% e 40% por qualquer um dos silanos reduziu progressivamente a resistência à tração na flexão tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Na resistência à compressão, assim como na resistência à tração na flexão houve uma diminuição nos resultados quando comparados a referência, exceto para o MCPTMS, aos 7 e 28 dias. Na absorção por imersão, todas as amostras apresentaram elevadas porcentagens de absorção e índice de vazios quando comparados a referência.

Palavras-chave: silanos, VTES, APTMS, MCPTMS, superplastificante, aditivo.

## ABSTRACT

The central theme of this work is the study of the performance of silanes in cementitious matrices in order to reduce the amount of superplasticizer additive use through the use of silanes. For this, pastes with a water/cement ratio of 0.186 were produced and the replacement of superplasticizer additives based on polycarboxylate esters by vinyltriethoxysilane silanes (VTES), n-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) and methacryloxypropyltrimethoxysilane (MCPTMS), in amounts of 20% and 40%, in Portland cement pastes. Apparent specific mass, incorporated air content, mini-slump and hydration kinetics (evaluated by isothermal calorimetry up to 48 h) of the pastes were determined in the fresh state. Thus, in the hardened state, the compressive and flexural strength tests (7 and 28 days), apparent specific mass and absorption by immersion of the pastes were carried out. The results showed that the substitution of 20% and 40% of VTES and APTMS considerably reduced the workability and increased the air content of the pastes in relation to the reference. In contrast, the incorporation of 20% and 40% of MCPTMS did not significantly affect these properties. The addition of silane, for all analyzed samples, had a delaying effect on the hydration process, the maximum delay verified had a hydration peak in approximately 36 h for the 40% MCPTMS system and the minimum delay of 11 h for the 20% system VTES. The replacement of 20% and 40% by any of the silanes progressively reduced the flexural tensile strength at both 7 and 28 days. In the compressive strength, as well as in the tensile strength in flexion, there was a decrease in the results when compared to the reference, except for the MCPTMS, at 7 and 28 days. In immersion absorption, all samples showed high percentages of absorption and voids index when compared to the reference.

Keywords: silanes, VTES, APTMS, MCPTMS, superplasticizer, additive.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Classificação geral dos silanos .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2 – Esquema idealizado das etapas de silanização.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3 - Eficácia do silano relacionado aos substratos inorgânicos .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 - Classificação dos aditivos .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 5 - Monômero de um policarboxilato .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 6 - Esquema de uma molécula de policarboxilato.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 7 - Flocculação e dispersão.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 8 - Programa experimental .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9 - Estruturas moleculares dos silanos.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 10 - Tronco de cone para ensaio de mini-slump.....</b>	<b>29</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Silanos estudados .....	15
Tabela 2 - Requisitos para aditivo redutor de água .....	21
Tabela 3 - Composição das pastas de cimento .....	25
Tabela 4 - Especificação CPV - ARI .....	26
Tabela 5 - Especificações dos silanos .....	27
Tabela 6 - Resultado dos ensaios de espalhamento.....	36
Tabela 7 - Resultados de absorção por imersão .....	47

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Execução do ensaio de mini-slump .....	29
Fotografia 2 - Equipamento utilizado para o ensaio de calorimetria .....	32
Fotografia 3 - Ensaio de tração na flexão.....	33
Fotografia 4 - Ensaio de resistência à compressão .....	34
Fotografia 5 - Ensaio de absorção por imersão .....	35
Fotografia 6 - Superfície de fratura das pastas aos 7 dias de hidratação .....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado dos ensaios de espalhamento médio .....	37
Gráfico 2 - Resultado dos ensaios de massa específica aparente no estado fresco .....	38
Gráfico 3 - Resultado dos ensaios de teor de ar aprisionado no estado fresco	38
Gráfico 4 - Resultados da calorimetria isotérmica das pastas.....	40
Gráfico 5 - Resultado de resistência à tração na flexão .....	42
Gráfico 6 - Resultado de resistência à compressão .....	43
Gráfico 7 - Massa Especifica aparente no estado endurecido .....	48
Gráfico 8 - Teor de ar incorporado e absorção por imersão no estado endurecido .....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.1.1	Objetivos Geral.....	13
1.1.2	Objetivo Específico.....	13
1.1.3	Justificativa .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Silanos</b> .....	<b>14</b>
2.1.1	Classificação dos silanos .....	14
2.1.2	Interação dos silanos.....	15
<b>2.2</b>	<b>Aditivos</b> .....	<b>18</b>
2.2.1	Superplastificantes .....	20
<b>2.3</b>	<b>Pasta de cimento Portland</b> .....	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>26</b>
3.2.1	Cimento .....	26
3.2.2	Silanos.....	27
3.2.3	Aditivo Superplastificante .....	28
3.2.4	Água .....	28
<b>3.3</b>	<b>Ensaio</b> .....	<b>28</b>
3.3.1	Trabalhabilidade .....	28
3.3.2	Massa específica aparente no estado fresco .....	29
3.3.3	Teor de ar .....	30
3.3.4	Calor de hidratação .....	31
3.3.5	Resistência à tração na flexão.....	32
3.3.6	Resistência à compressão axial .....	33
3.3.7	Massa específica aparente no estado endurecido.....	34
3.3.8	Absorção por imersão .....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio no estado fresco</b> .....	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio no estado endurecido</b> .....	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

<b>APÊNDICE A - TESTE T-STUDENT .....</b>	<b>56</b>
---	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

O silano é um dos principais reagentes a base de silício ainda pouco explorado pela indústria da construção civil, mas apresenta um grande potencial para melhorar a trabalhabilidade e aumentar as resistências mecânicas dos compósitos de matriz cimentícia.

Sendo um reagente químicos constituído principalmente por átomos de silício como elemento principal e unidos covalentemente a átomos de hidrogênio, normalmente, apresentam dois tipos de reatividade na mesma molécula: uma polar e outra apolar. Essas moléculas são referenciadas por um grupo hidrolisável, por exemplo alcóxi ( $C_xH_yO$ ), e um grupo funcional, por exemplo amina ( $-NH_2$ ) e vinil ( $-C = C$ ) (BRINKER e SCHERER, 1990; ZHU e VAN OOIJ, 2003).

De acordo com Maranhão e Loh (2010), o silano é o mais simples da família dos silicones, possui característica transparente e de baixa viscosidade. As suas moléculas são caracterizadas por serem pequenas (entre 10 e 25 ângstrom –  $10^{-10}m$ ) o suficiente para penetrar em substratos poucos porosos. Dessa forma, apresentam um menor consumo de material em granitos e concretos. Entretanto, volatizam em torno de 40% da sua massa inicial, pois fazem parte do grupo dos alcóxi.

A utilização parcial do composto N-[3-(trimetoxissilil)propil]anilina (TMSPA) pode acelerar a hidratação e melhorar as estruturas de poros em pasta de cimento endurecida, a resistência mecânica se torna maior com 3 dias de idade devido a estes fatores, de acordo com He, Zhang e Hooton (2017), no estudo sobre superplastificantes a base de policarboxilato em que o composto ácido acrílico foi parcialmente substituído por 3-(trimetoxissilil)propilmetacrilato (TMSPMA).

A adição parcial de silanos à base de amino, vinil e epóxi em argamassas comuns apresenta melhora significativa na resistência à flexão e à compressão nas idades de 7 dias e 28 dias pela adição do reagente. Desta forma, quando adicionado silano à base de epóxi em argamassas de alta resistência é notório um aumento nas resistências à compressão (30%), à tração (38%) e no módulo de elasticidade (13%) em comparação a argamassa de controle, constataram Feng *et al.* (2016) sobre os efeitos de silanos e derivados de silano na hidratação do cimento e propriedades mecânicas de argamassas.

A melhora da trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto utilizando microssílica tratada com silano foi avaliada por Xu e Chung (1999), os quais verificaram que a trabalhabilidade das argamassas aumenta devido a interação intermolecular da microssílica pela água. O fortalecimento da ligação entre sílica e cimento gera um aumento na resistência à tração de 31% e à compressão de 27%, além de um aumento significativo na resistência à flexão, no teor de umidade e na massa específica.

Portanto, neste trabalho buscou-se analisar como três tipos de silanos (a base de amino, vinil e epóxi) se comportam em interação com um aditivo superplastificante na matriz cimentícia.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivos Geral

Avaliar o efeito da substituição de aditivo superplastificante pelo composto químico silano em pastas de cimento Portland.

### 1.1.2 Objetivo Específico

- Avaliar o efeito da substituição do aditivo superplastificante por silanos em pastas de cimento Portland nas propriedades do estado fresco e endurecido.
- Avaliar o efeito da substituição do aditivo superplastificante na cinética de hidratação de pastas de cimento Portland.

### 1.1.3 Justificativa

O presente estudo tem o objetivo comparativo entre a substituição do aditivo superplastificante por três tipos de silanos em porcentagens diferentes (20% e 40%), empregados na produção de pastas de cimento Portland. Este estudo possui o intuito de diminuir a quantidade do uso de aditivos superplastificantes, visto que na atualidade há grandes incertezas relacionadas aos efeitos, se torna necessário um estudo aprofundado em relação ao desempenho do silano em matrizes cimentícias.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Silanos

Os silanos possuem um esqueleto molecular pequeno, com diâmetro de  $1,0 \times 10^{-6}$  a  $1,5 \times 10^{-6}$  mm, são hidrorrepelentes, incolores e encontram-se na sua forma química como alcoxissilano. Por seu tamanho ser reduzido, são muito voláteis auxiliando na eficácia de penetração mesmo que seja em um substrato mais denso (BATISTA, 1998).

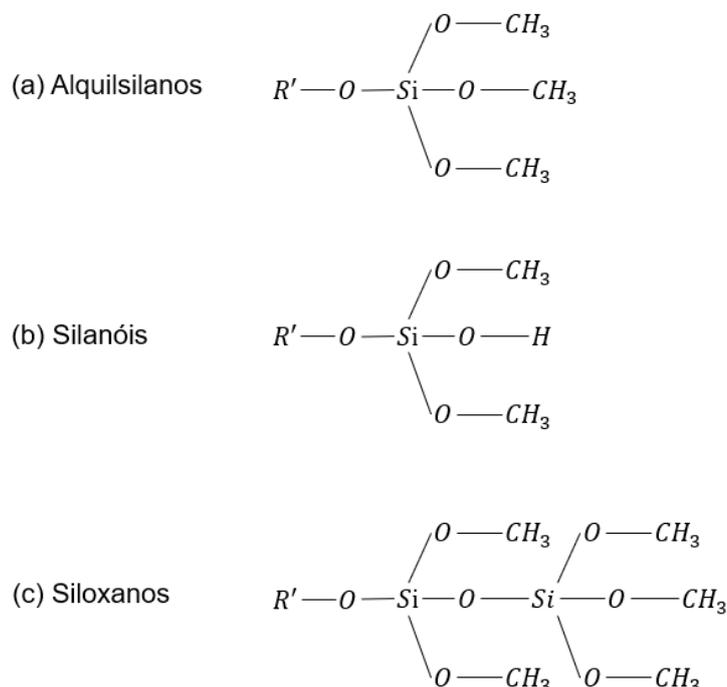
No decorrer do ano de 1940, foi constatada a eficiência do silano como agente de ligação, quando combinado com compósitos de poliéster reforçados com fibra de vidro (Dow Corning, 2005).

Deste modo, no século seguinte a Gelest (2006) divulgou em seu catálogo que existem mais de 420 tipos de silanos diferentes, os quais são empregados para aumentar as propriedades mecânicas (flexão e compressão) dos compósitos, melhorar a adesão, aumentar a dispersão de pigmentos e minerais, imobilizar catalisadores, ligar biomateriais. A empresa informa que o tamanho das cadeias formadas e os elementos constituintes dependem para cada tipo de silano, por isso cada silano se comporta de maneira diferente.

Segundo Silva (1995), os produtos hidrofóbicos à base de silano têm como um dos seus principais efeitos dificultar ou bloquear a absorção de água do concreto, não formam película superficial e nem alteram a cor do substrato. Dependendo da porosidade e da umidade, sua aplicação deve ter uma penetração acima de 10 mm, sendo apropriado para fachadas verticais.

#### 2.1.1 Classificação dos silanos

A classificação do silano é realizada de acordo com as moléculas e radicais de maior interesse, sendo: alquilssilanos, silanóis e siloxanos. Os alquilssilanos são correspondentes aos alcanos, ou seja, um carbono ligado à quatro grupos de alcóxi, mas com a substituição do átomo de carbono por átomos de silício (Figura 1a). Os silanóis são derivados do silano em que uma hidroxila está ligada a um átomo de silício, apresentando maior reatividade com as partículas de silano (Figura 1b). Os siloxanos são caracterizados pela ligação entre silício e oxigênio, bem semelhante a um éter, como exemplo na Figura 1c (MENEZES, 2015).

**Figura 1 - Classificação geral dos silanos**

Fonte: Adaptado Casagrande (2017)

De acordo com Casagrande (2017), inicialmente os silanos são nomeados pela sigla do grupo organofuncional, em sequência do grupo intermediário ligado, caso exista, ao silício, posteriormente a sigla dos grupos alcóxi, por exemplo: grupo funcional-intermediário-alcoxissilano. Os tipos de silanos frequentemente estudados estão sendo apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Silanos estudados**

Nome do silano	Fórmula química	Grupo funcional
Viniltrióxissilano	$C_2H_3SiO_3(C_2H_5)_3$	$-CH = CH_2$
Aminoetilaminopropiltrimetoxissilano	$C_5N_2H_{13}SiO_3(CH_3)_3$	$-CH_2 - CH_2 - CH_2 - NH - CH_2 - CH_2 - NH_2$
Propiltrimetoxissilano	$C_3H_7SiO_3(CH_3)_3$	$-CH_2 - CH_2 - CH_3$
Aminopropiltrimetoxissilano	$NH_2C_3H_6SiO_3(CH_3)_3$	$-CH_2 - CH_2 - CH_2 - NH_2$
Tetraetoxissilano	$SiO_4(C_2H_5)_4$	$-H_2C - CH_3$
Tetrametoxissilano	$SiO_4(CH_3)_4$	$-CH_3$

Fonte: Brinker e Scherer (1990)

### 2.1.2 Interação dos silanos

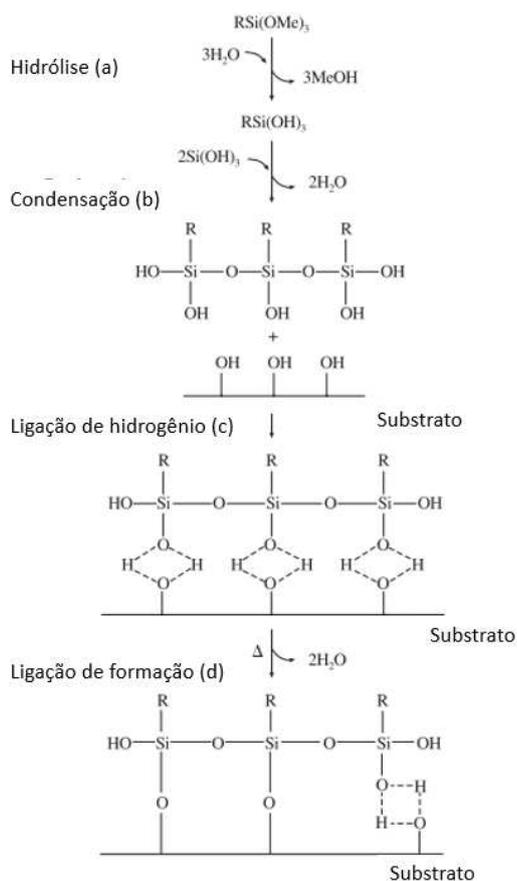
A composição da estrutura dos silanos possui dois centros reativos diferentes: um contém grupos alcóxi que hidrolisa e forma grupos silanóis que são capazes de condensar ou reagir quando existe a presença de caulim ou sílica e o

outro contém grupo do tipo amino, epóxi, vinil ou mercapto, o qual reage com a matriz polimérica (SILVA,1995).

Segundo Plueddemman (1991), podem acontecer ligações covalentes entre a superfície acoplada e os grupos silanóis (Si-OH), este procedimento é chamado de mecanismo de acoplamento. Desta forma, Arkles (2011) afirmou que pode ser dividida em quatro partes a formação da ligação entre o substrato inorgânico e o silano, quando se trata de silicatos provenientes da hidratação do cimento e sílica com materiais cimentícios.

Sendo assim, com a hidrólise (Figura 2a) dos três grupos hidrolisáveis ocorre a etapa da condensação, onde ocorre a formação dos oligômeros siloxanos (Figura 2b), os quais se ligam aos grupos OH dos substratos, através de ligações de hidrogênio (Figura 2c), contudo, as ligações de hidrogênio são transformadas em ligações covalentes com a liberação de moléculas de água, ocorrendo a cura ou a secagem (Figura 2d). Apesar destas reações terem sido descritas de forma sequencial, estas também podem ocorrer de maneira simultânea.

**Figura 2 – Esquema idealizado das etapas de silanização**



Fonte: Arkles (1977)

Desta forma, a reação química do componente silano depende do substrato ao qual está associado. A efetividade entre a ligação química do silano com o substrato inorgânico sílica, presente no cimento Portland, é considerado excelente, conforme a Figura 3.

**Figura 3 - Eficácia do silano relacionado aos substratos inorgânicos**

<b>SUBSTRATOS</b>	
<b>EXCELENTE</b>	Sílica
	Quartzo
	Vidro
	Alumínio (AlO(OH))
	Silicato de Alumínio (ex: Argilas)
	Silicones
<b>BOM</b>	Cobre
	Estanho (SnO)
	Talco
	Óxidos Inorgânicos (ex: $Fe_2O_3$ , $TiO_2$ , $Cr_2O_3$ )
	Aço, Ferro
	Asbestos
	Níquel
	Zinco
<b>FRACO</b>	Chumbo
	Mármore, Cal ( $Ca_2CO_3$ )
	Sulfato de Cálcio ( $Ca_2SO_4$ )
	Baritina ( $Ba_2SO_4$ )
<b>RUIM</b>	Grafite
	Negro de carbono

Fonte: Adaptado de Arkles (2011) *apud* Santos (2016).

Os grupos de amina e alcóxido possuem moléculas de aminosilano altamente polares que exibem fortes interações químicas com as matrizes cimentícias. Svegl, Suput-Strupi e Skrlep (2008) avaliaram a influência dos aminosilanos nas propriedades macroscópicas da pasta de cimento. Os autores verificaram que o efeito dos silanos APTES e AEAPTES em propriedades de pasta e argamassa de cimento fresca aumentam a trabalhabilidade, diminuem a relação água/cimento ( $a/c$ ), retardam o processo de hidratação. Nas propriedades de pasta e argamassa de cimento endurecida aumentam a resistência à compressão após 28 dias de cura (em torno de 5% em relação a referência) e aumentam a resistência à flexão após 28 dias de cura (em torno de 20% em relação a referência).

Conforme Kampouris e Papaspyrides (1987), os silanos se tornaram muito explorados como agentes de acoplamento em sistemas envolvendo cargas minerais

e termoplásticos, diferente de como era no início, onde eram usados em compósitos de termofixos com fibra de vidro. Estes materiais podem reagir tanto com o material orgânico quanto com o polímero e são chamados de silanos monoméricos.

## 2.2 Aditivos

Há muitos anos os romanos acrescentavam clara de ovo e sangue (albumina), leite ou banha aos concretos para ajudar no melhoramento da trabalhabilidade das misturas. Na história, segundo Coutinho (1997), a utilização de aditivos é mais antiga que o próprio cimento, o uso da mistura descrita acima pode ser constatado em várias obras históricas. Conforme relatado por Pedroso (2009), as obras do Coliseu, Panteão e os Aquedutos foram construídos utilizando uma mistura de cinza vulcânica com cal hidratada que endurecia com a adição de água, era acrescentando também gordura e sangue animal como aditivos para incorporação de ar na mistura.

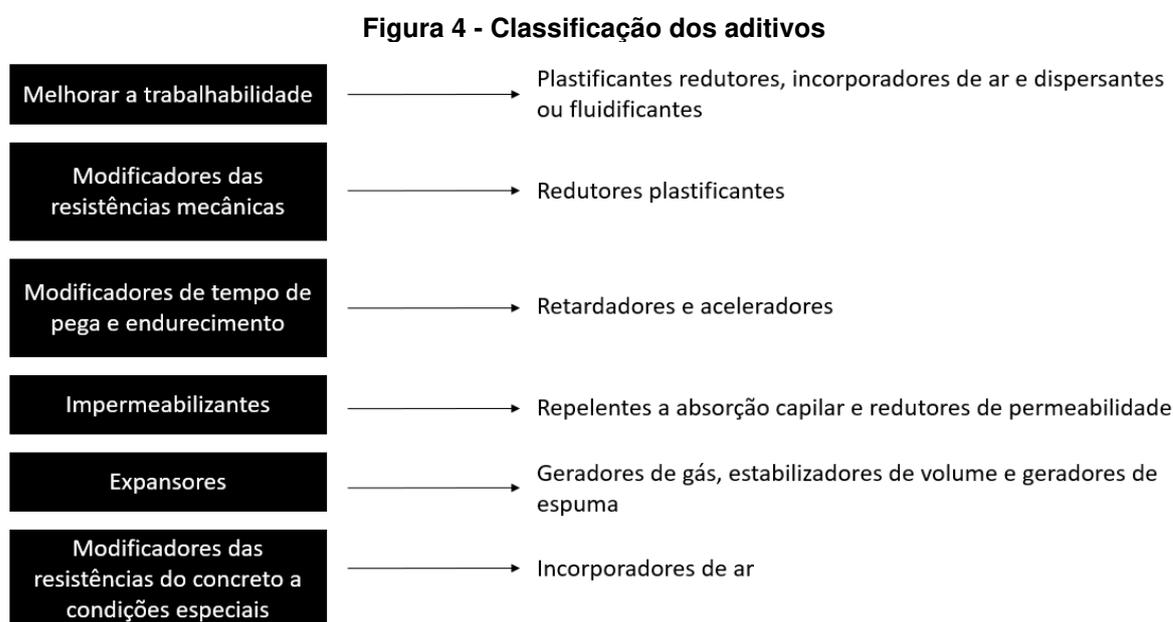
Os aditivos são definidos de acordo com a norma brasileira NBR 11768 (ABNT, 2019) como materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura, em uma quantidade não superior aos 5%, são chamados de aditivos e possuem a função de alterar as propriedades da mistura no estado endurecido ou no estado fresco.

Entretanto, para a “*American Society for Testing and Materials*” (Sociedade Americana para Testes e Materiais), ASTM C125-21 (ASTM, 2021), os aditivos são definidos como qualquer material que não seja água, agregado ou cimento, que são adicionados à dosagem do concreto antes ou durante o preparo.

Para Bauer, Noronha e Bauer (2000), o estudo de aditivos busca um produto capaz de introduzir todas as qualidades, bem como evitar todos os defeitos do concreto. Desta forma, os aditivos químicos atuam frequentemente nas propriedades reológicas do concreto e alteram as reações de hidratação do cimento, melhoram a trabalhabilidade, modificam a viscosidade, atuam na retenção de água, aceleram ou retardam o tempo de pega, controlam o desenvolvimento de resistências mecânicas, intensificam a resistência à ação do congelamento, diminuem a fissuração térmica, atenuam as consequências do ataque por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão de armadura, conforme apresentado no manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central do Instituto Brasileiro de Impermeabilização (2015).

Entretanto, Neville (1997) afirmou que não é possível compensar a falta de qualidade dos materiais adicionados a mistura do concreto ou argamassa com a utilização de aditivos. E Petrucci (1998) apontou que os aditivos não podem corrigir um defeito pertencente ao concreto/argamassa referente a uma dosagem incorreta ou colocação mal feita, por exemplo: nenhum impermeabilizante poderá sanar as deficiências de um concreto mal proporcionado e poroso.

Na Figura 4, observa-se resumidamente como os aditivos são classificados baseado nas suas causas e efeitos.



Fonte: Adaptado de Bauer (1994)

Os aditivos podem ser classificados de acordo com sua finalidade:

- Aceleradores: diminuem o tempo de início de pega e aumentam a resistência à compressão nas primeiras idades, entretanto, as resistências finais podem ser reduzidas (BAUER, 1994);
- Retardadores: atrasam o tempo de início de pegar, postergando o endurecimento da pasta e conservando a massa em estado plástico durante um maior período de tempo (BAUER, 1994);
- Incorporadores de ar: incorporam minúsculas bolhas esféricas de ar, distribuídas uniformemente dentro do concreto (argamassa), o sistema de microbolhas de ar é estável, melhoram a plasticidade, a coesão, a retração e aumentam a impermeabilidade (KLOSS, 1996);

- Expansores: causam uma determinada expansão do concreto, para casos em que se queira preencher algum vazio, ou para compensar a retração da pasta de cimento (DUQUE, 2018);
- Plastificantes: reduzem a quantidade de água necessária na preparação do concreto (argamassa) gerando uma melhor trabalhabilidade, o aumento da resistência do concreto, a diminuição da retração, a melhora da coesão e da homogeneidade (KLOSS, 1996);
- Superplastificantes: considerados redutores de água de alta eficiência, atuam de forma semelhante aos plastificantes, apresentam um poder maior de redução no teor de água (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Tendo em vista que a influência deste aditivo na matriz cimentícia está ligada ao tema principal do trabalho, o mesmo será amplamente discutido na sequência deste trabalho.

### 2.2.1 Superplastificantes

Os redutores de água do tipo superplastificantes são os aditivos mais utilizados nas misturas de concreto na atualidade, sendo cerca de 800.000 toneladas anualmente. Utilizados para controlar a trabalhabilidade em concretagens estruturais e na redução do fator água/cimento das misturas. (FLAT, ROUSSEL e CHESSEMAN, 2012).

Em meados do fim dos anos 60, os aditivos superplastificantes foram usados pela primeira vez em concreto (tanto na Alemanha quanto no Japão), já no período dos anos 80 foram crescendo as suas dosagens, objetivou-se o aumento da fluidez de concretos e posteriormente foi introduzido em misturas com a finalidade de reduzir a quantidade de água. Desde então, os fabricantes desse produto começaram a investir em uma fiscalização mais exigente da matéria-prima, ocasionando uma melhora no teor de pureza e resultando em aditivos com propriedades elevadas para a função a ser aplicada, sendo hoje um composto imprescindível na mistura de concretos (AÏTCIN, 2000; HARTMANN, 2002).

Os aditivos químicos superplastificantes são mencionados na NBR 11768-1 (ABNT 2019) como redutores de água tipo 2 (RA2) e retratados por proporcionar elevada redução no consumo de água nos concretos, quando comparado com aditivos plastificantes (redutores de água tipo 1 – RA1), sem modificar sua

consistência, proporcionam aumento significativo no abatimento e na fluidez do concreto, sem alterar o consumo de água. Em conformidade com a Norma Brasileira, os superplastificante redutores de água tipo 2 (RA2) também pode apresentar função de aditivo redutor de água tipo 2/Acelerador (RA2-A), produto que combina os efeitos de um aditivo superplastificante e os efeitos de um aditivo acelerador de pega; e redutor de água tipo 2/Retardador (RA2-R), produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador de pega. É possível observar na Tabela 2, os requisitos principais para os aditivos RA2, RA2-R e RA2-A.

**Tabela 2 - Requisitos para aditivo redutor de água**

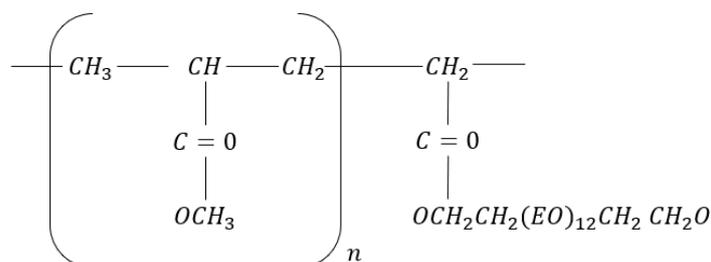
Tipos de aditivos	Siglas	Mínima redução de água %	Aumento do teor de ar %	IM Calculado a partir da resistência a compressão			Tempo de pega min	
				1 dia	7 dias	28 dias	Início	Fim
Redutor de água - Tipo 2	RA2	≥ 15,0	≤ 2,0	-	≥ 1,15	≥ 1,20	≥ 30	≤ 90
Redutor de água - Tipo 2 Retardador de pega	RA2-R	≥ 15,0	≤ 2,0	-	≥ 1,15	≥ 1,20	≥ 90	≤ 240
Redutor de água - Tipo 2 Acelerador de pega	RA2-A	≥ 15,0	≤ 2,0	≥ 1,4	≥ 1,10	≥ 1,10	≤ 30	-

Fonte: ABNT NBR 11768-1 (2019)

Os aditivos superplastificantes são conhecidos por serem redutores de água de alta eficiência e tensoativos, seu uso é capaz de aumentar a fluidez sem aumentar o teor de água, ou reduzir o teor de água mantendo uma mesma consistência do concreto fresco. Além disso, esses aditivos são modificações, sais ou derivados de polissacarídeos, ácidos lignossulfônicos e ácidos carboxílicos hidroxilados ou qualquer combinação desses três, com ou sem outros constituintes secundários (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Dransfield (2000), o funcionamento dos superplastificantes partem do efeito estéreo que pode ser definido como a separação das partículas de cimento Portland a partir da introdução de cadeias poliméricas longas, essas partículas permanecem separadas, bloqueando o processo de hidratação e permitindo que se prolongue o comportamento reológico das pastas, as propriedades dos aditivos são influenciadas pelo comprimento de sua cadeia e pelo número de reações em uma cadeia de aditivo (Figura 5).

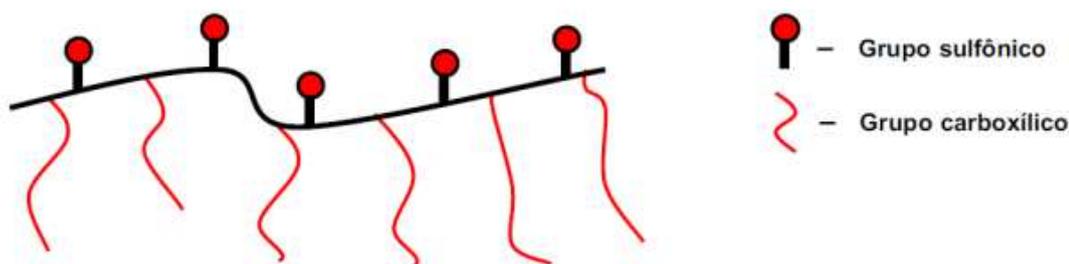
**Figura 5 - Monômero de um policarboxilato**



Fonte: Ramachandran *et al.* (1998)

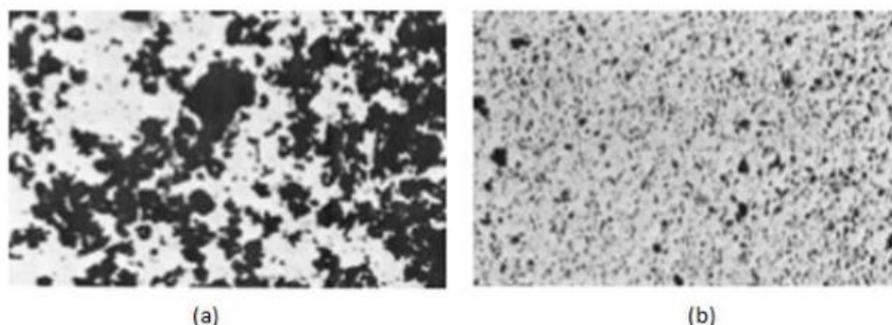
Os efeitos na dispersão e de floculação das partículas de cimento são produzidos pelo comprimento da cadeia principal desses polímeros (OHTA, SUGIYAMA e TANAKA, 1997) de acordo com a Figura 6.

**Figura 6 - Esquema de uma molécula de policarboxilato**



Fonte: Adaptado de Leidhodi e Acrivos (2000)

Os efeitos proporcionados pelos aditivos redutores de água impactam no aumento da resistência nas primeiras idades, quando comparados com uma mistura sem o aditivo e mantida a mesma relação água/aglomerante (a/ag), conforme relatado por Neville e Brooks (2010), a dispersão dos aditivos na matriz cimentícia, resulta em uma grande superfície de contato do cimento exposta à hidratação, sendo assim, a resistência a longas idades também pode aumentar devido a melhor distribuição do cimento disperso. Dessa forma, os sítios de floculação da mistura contendo apenas cimento e água (a) e a dispersão proporcionada pela inserção do aditivo superplastificante (b), é mostrado na Figura 7.

**Figura 7 - Flocculação e dispersão**

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Nas últimas décadas Pagé e Spiratos (2000) observaram que quando acrescentada microssílica ao concreto, a mesma é aprimorada pela presença de aditivos plastificantes, uma vez que para assegurar a trabalhabilidade adequada ao concreto, é imprescindível uma quantidade considerável de água. Desta forma, é notória a importância e a necessidade dos aditivos superplastificantes para alguns tipos de concretos com adições minerais.

Acrescentando teores de 10, 15 e 20% de microssílica em concretos de alto desempenho, Silva, Silva e Silva (2020) constataram que as amostras produzidas com o teor de 15% de microssílica apresentaram o melhor resultado de resistência à compressão (76,7 MPa) Os autores afirmaram que a utilização do aditivo superplastificante foi essencial para alcançar esse resultado devido à alta trabalhabilidade e a relação água/aglomerante relativamente baixa.

A utilização de aditivo superplastificante em conjunto com silanos, tem atraído a atenção de pesquisadores para obter-se um novo aditivo com efeitos potencializados, através da reação das moléculas de silano com o aditivo em um ambiente quimicamente controlado.

O efeito da substituição parcial de um superplastificante por silanos nas propriedades frescas e endurecidas de pastas de cimento Portland, foi avaliado por Casagrande *et al.* (2020) utilizando três silanos tetraetoxissilano (TEOS), 3-glicidoxipropiltrimetoxissilano (GPTMS) e aminoetilaminopropiltrimetoxissilano (AEAPTMS) que substituíram um superplastificante à base de éster de policarboxilato nas quantidades de 25% e 50%, as pastas foram produzidas com um fator a/c de 0,20. Os resultados apresentaram que para a substituição de 25% de ambos os compostos ocorreu um aumento na trabalhabilidade e uma diminuição no teor de ar das pastas (em relação a referência). Entretanto, para as substituições de

50% de GPTMS e AEAPTMS houve um aumento no teor de ar e diminuição da trabalhabilidade das pastas e na substituição utilizando 50% de TEOS não foi observada nenhuma mudança significativa na trabalhabilidade.

Em sequência, conforme os autores, verificou-se que através da calorimetria isotérmica ocorreu uma redução na indução das pastas por TEOS, ocasionando um atraso no período de aceleração em até 53 horas em comparação à referência. Além disso, foi ampliado o calor acumulado até 120 horas em todos os teores de silano estudados, atingindo valores 11% superiores à referência. Assim, a incorporação de TEOS não alterou de forma significativa a resistência à compressão, mas aumentou progressivamente a resistência à flexão, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Desta forma, verificou que para a resistência à compressão das pastas contendo GPTMS e AEAPTMS foi encontrada a mesma tendência em relação a compressão, porém, ocorreu a diminuição da resistência à flexão devido ao aumento dos teores de substituição. Por fim, foi comprovado que à medida que o teor de TEOS aumentou a dureza de 7 e 28 dias das pastas também aumentou, enquanto nenhuma tendência clara foi encontrada para GPTMS e AEAPTMS.

### **2.3 Pasta de cimento Portland**

A pasta de cimento pode ser definida como a mistura de um ou mais aglomerantes e água, como é mencionado por Kloss (1996). Desta forma, a pasta com índice de consistência normal é preparada com uma quantidade de água suficiente, apresenta propriedade reológica constante, é utilizada para a verificação de duas importantes características do cimento Portland: tempo de pega e instabilidade de volume devido à cal livre (BORJA, 2013).

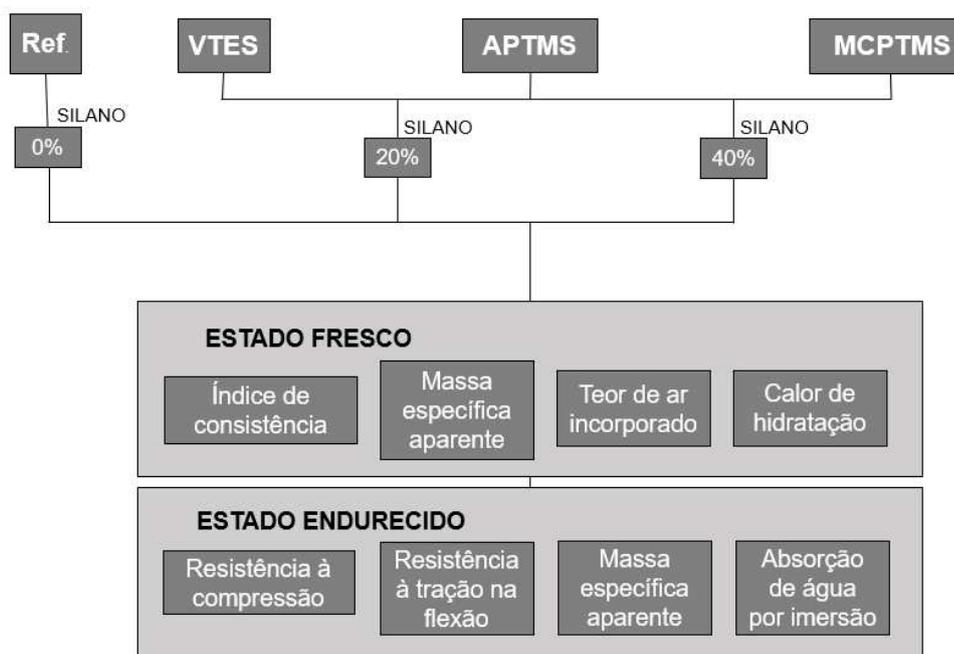
De acordo com Diamond (1980), a pasta de cimento Portland é uma reunião heterogênea de filmes, partículas, microcristais e elementos sólidos, ligados por uma massa porosa, contendo, em seu estado original, espaço com soluções e alguns vazios.

Desta forma, Gomes (2005) apontou que os espaços vazios podem ser classificados em duas espécies: relativamente grandes, na maioria de forma esférica, contendo ar e revestimentos internamente por uma camada fina de hidróxido cálcio; e pequenos poros capilares, representando espaços remanescentes entre grãos do cimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No programa experimental está prevista a utilização de três tipos de silanos: o viniltriétoxissilano (VTES), o n-(2-aminoetil)-3-aminopropiltrimetoxissilano (APTMS) e o metacrilóxiopropiltrimetoxissilano (MCPTMS) para substituição parcial do aditivo superplastificante em porções de 20 e 40% (em massa) para a produção de pastas cimentícias. Serão realizados ensaios no estado fresco de trabalhabilidade, massa específica aparente e calor de hidratação. No estado endurecido serão realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e absorção de água por imersão. O processo experimental será realizado conforme apresentado no fluxograma da Figura 8 e a composição das pastas cimentícias que serão produzidas está apresentado na Tabela 3.

Figura 8 - Programa experimental



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 3 - Composição das pastas de cimento

Mistura	Cimento	Água	Silano	Superplastificante
REFERÊNCIA	1	0,186	0%	100%
VTES 20%	1	0,186	20%	80%
VTES 40%	1	0,186	40%	60%
APTMS 20%	1	0,186	20%	80%
APTMS 40%	1	0,186	40%	60%
MCPTMS 20%	1	0,186	20%	80%
MCPTMS 40%	1	0,186	40%	60%

Fonte: Autoria própria (2023)

As pastas foram produzidas com relação água/cimento de 0,186 e 1% de aditivo redutor de água (superplastificante). Para as amostras com silanos, o aditivo superplastificante será substituído parcialmente por um dos silanos na fração de 20% e 40%, para compor o total de 1% em relação à massa de cimento, como a referência.

### 3.1 Análise estatística

Com a finalidade de comparar os valores médios obtidos entre os ensaios, utilizou-se o Teste de Hipótese (*t-student*), considerando a distribuição bicaudal e nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software Excel.

### 3.2 Materiais

#### 3.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), selecionado por apresentar alto teor de clínquer, minimizando os efeitos colaterais de outras adições e por apresentar a peculiaridade de atingir uma alta resistência já nos primeiros dias de aplicação. Na Tabela 4 são apresentadas as características do CP V conforme o fabricante.

**Tabela 4 - Especificação CPV - ARI**

CP V - ARI	Especificações
<b>Físicos</b>	
Tempo de início de pega (min)	170
Tempo de fim de pega (min)	210
Expansibilidade a quente (mm)	0
Resistência à compressão - 1 dia (MPa)	26,2
Resistência à compressão - 3 dia (MPa)	40
Resistência à compressão - 7 dia (MPa)	45,5
Resistência à compressão - 28 dia (MPa)	54,4
Resíduos inslúveis (%)	0,53
Perda ao fogo (%)	3,12
<b>Químicos</b>	
Trióxido de enxofre (%)	2,71
Alumina (%)	4,45
Sílica (%)	19,08
Oxido de ferro (%)	2,78
Cal (%)	62,39
Óxido de magnésio (%)	3,13

Fonte: Fabricante (2022)

### 3.2.2 Silanos

As propriedades dos silanos utilizados são apresentados na Tabela 5.

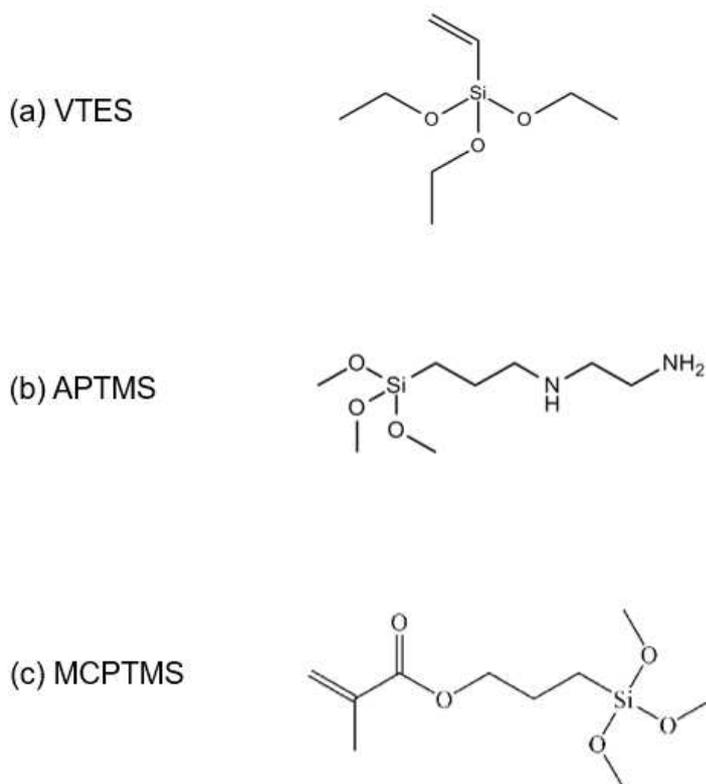
**Tabela 5 - Especificações dos silanos**

	VTES	APTMS	MCPTMS
Pureza (%)	97	97	97
Ponto de ebulição (°C/mmHg)	160-161	140	N/A
Densidade (g/mL)	0,903	1,019	1,045
Ponto de inflamação (°C)	44	300	N/A
Umidade específica (m <sup>2</sup> /g)	412	358	N/A

Fonte: Fabricante (2006)

Na Figura 9 tem-se as representações das estruturas moleculares dos silanos estudados.

**Figura 9 - Estruturas moleculares dos silanos**



Fonte: Gelest (2006)

### 3.2.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo químico utilizado no estudo possui função superplastificante de terceira geração, é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução água, tornado o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. De acordo com o fabricante (2021), deve ser utilizado nas proporções de dosagens entre 0,2% a 1,0% sobre o peso do cimento.

O aditivo utilizado atende requisitos da norma brasileira NBR 11768-1 (ABNT, 2019) tipo P – plastificante e SP – super plastificante e da norma americana ASTM C494 (ASTM, 2019), tipo A – redutor de água e F – redutor de água de elevado desempenho. É um superplastificante que é compatível com todos os tipos de cimento Portland. O fabricante sugere que seja adicionado durante o processo de mistura do concreto, de preferência juntamente à água de amassamento. O tempo de mistura deve ser suficiente para permitir a total dispersão dos aditivos e a nítida observação de seu efeito plastificante.

### 3.2.4 Água

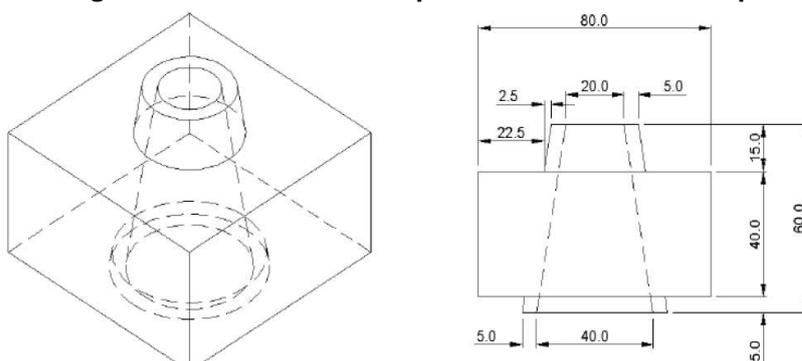
Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento pública de Curitiba, conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) os ensaios para este insumo são dispensáveis.

## 3.3 Ensaio

### 3.3.1 Trabalhabilidade

Para quantificar o efeito redutor de água de um aditivo, dentre as diversas formas de processos propostos, foi utilizado o método de Kantro (1980) para avaliar o efeito do aditivo sobre o cimento, sem a interferência dos agregados de forma simples e fácil. Este método compreende o preenchimento de um molde tronco-cônico (Figura 10) com a pasta de cimento Portland sobre uma placa de vidro nivelada horizontalmente.

**Figura 10 - Tronco de cone para ensaio de mini-slump**



Fonte: Monte (2003)

Após a elevação do mini-slump e consequente espalhamento da mistura, calcula-se a média de três diâmetros medidos, obtendo-se, então, o espalhamento equivalente. Na Fotografia 1 é possível observar a execução do ensaio de mini abatimento.

**Fotografia 1 - Execução do ensaio de mini-slump**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.3.2 Massa específica aparente no estado fresco

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT, 2005) após o preparo da argamassa, será introduzida, com uma colher ou concha (sutilmente), porções de argamassa no recipiente cilíndrico calibrado, formando três camadas de alturas parecidas. Desta forma, em cada uma dessas camadas formadas, ocorrerá a aplicação de 20 golpes ao longo do perímetro, estes correspondem à entrada e à saída da espátula (vertical). Finalizado o golpeamento, deveram ser efetuadas três quedas do recipiente com altura próxima de 3 cm (com intuito de não deixar vazios entre a argamassa e parede do recipiente), o recipiente

deverá ser arrasado com o auxílio da espátula. Após, será obtido a massa do recipiente contendo a argamassa, vazio e determinado o seu volume, calculado a massa específica aparente da argamassa conforme a Equação 1.

$$d = \left( \frac{m_c - m_v}{v_r} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$d$  é a densidade de massa da pasta no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$m_c$  é a massa do recipiente cilíndrico contendo a pasta de ensaio, em gramas (g);

$m_v$  é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas (g);

$v_r$  é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ).

### 3.3.3 Teor de ar

O ar incorporado pode ser definido como uma somatória do ar que não foi eliminado durante o processo de adensamento das pastas e concretos e, também, aquele que é adicionado através de aditivos incorporadores de ar, de acordo com a norma técnica NBR 9833 (ABNT, 2008). Contudo, se torna necessário um monitoramento do teor de ar no controle da qualidade do concreto, possuindo a finalidade de identificar teores de vazios de ar ou de verificar limites máximos e mínimos desejáveis de ar incorporado.

O ensaio de massa específica aparente possibilita determinar o teor de ar incorporado na pasta a partir da massa específica da pasta avaliada e da massa específica da pasta sem vazios (Equação 2).

$$A = 100 \times \left( 1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$A$  é o teor de ar incorporado na pasta, em porcentagem (%);

$d$  é a densidade da pasta, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$d_t$  é a densidade teórica da pasta, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), calculada pela equação 3:

$$d_t = \left( \frac{M_c + M_{ag} + M_{adt} + m_{sil}}{\frac{M_c}{\mu_c} + \frac{M_{ag}}{\mu_{ag}} + \frac{M_{adt}}{\mu_{adt}} + \frac{m_{sil}}{\mu_{sil}}} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:  $M_c$  é a massa do cimento, em gramas (g);

$M_{ag}$  é a massa da água, em gramas (g);

$M_{adt}$  é a massa de aditivo, em gramas (g);

$M_{sil}$  é a massa de silano, em gramas (g);

$\mu_c$  é a massa específica real do cimento, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{ag}$  é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{adt}$  é a massa específica do aditivo, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

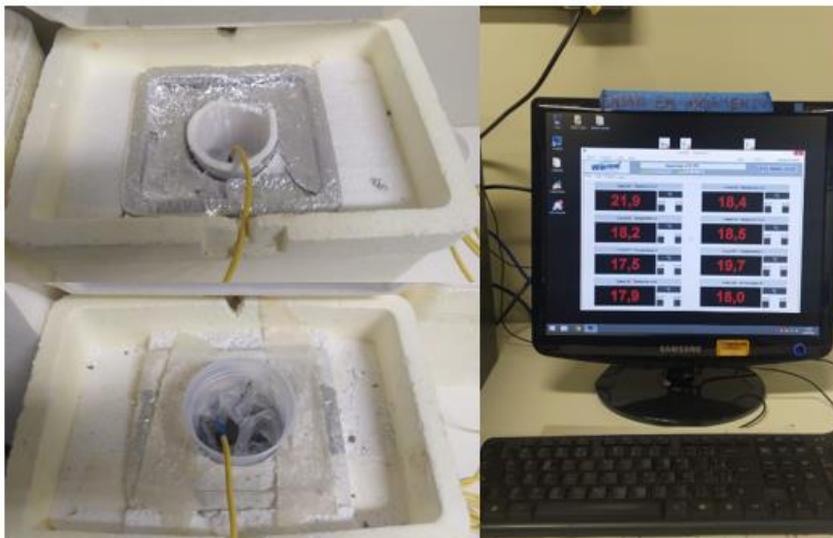
$\mu_{sil}$  é a massa específica do silano, em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

### 3.3.4 Calor de hidratação

Uma técnica que vem sendo utilizada para monitorar a cinética de hidratação e quantificar os produtos de hidratação, de acordo com Quarcioni (2008), é a calorimetria de condução isotérmica, conhecida por quantificar o calor liberado na hidratação do cimento através do monitoramento do fluxo de calor da pasta.

O ensaio foi realizado por meio de um calorímetro semi-adiabático, experimental, composto por cadinhos de isopor dentro de uma caixa térmica. Os dados serão coletados por meio de uma sonda termopar tipo K e coletados por um aquisitor de dados universal (Fotografia 2).

**Fotografia 2 - Equipamento utilizado para o ensaio de calorimetria**



Fonte: A autoria própria (2023)

### 3.3.5 Resistência à tração na flexão

O ensaio foi realizado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005) utilizando 3 corpos de provas de dimensões 4 x 4 x 16 cm por idade. Para determinação à tração na flexão o corpo de prova é colocado em uma prensa de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga, desta forma, é aplicada uma carga de  $50 \pm 10$  N/s até à ruptura da peça, conforme apresentado na Fotografia 3 e utiliza-se a Equação 4 para obter a resistência à tração na flexão.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (\text{Equação } 4)$$

Onde:

$R_f$  é a resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

$F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

$L$  é a distância entre os suportes, em milímetros (mm).

**Fotografia 3 - Ensaio de tração na flexão**



Fonte: Autoria própria (2023)

Para cada amostra foram realizados pelo menos 3 corpos de prova e após o ensaio de cada será gerado dois novos corpos de prova que serão utilizados para realização do ensaio de resistência à compressão.

### 3.3.6 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão depende da relação água/cimento, o ensaio será realizado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005) utilizando 6 corpos de provas por idade resultantes do ensaio de tração na flexão.

Os corpos de prova são colocados no dispositivo de carga de modo que a parte rompida não fique em contato com os dispositivos de apoio e com o dispositivo de carga. Assim, é aplicado uma carga de  $500 \pm 50$  até que ocorra a ruptura conforme descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005) e mostrado na Fotografia 4.

**Fotografia 4 - Ensaio de resistência à compressão**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.3.7 Massa específica aparente no estado endurecido

O ensaio foi realizado conforme determinado na NBR 13280 (ABNT, 2005) utilizando 3 corpos de prova 4 x 4 x 16 cm na idade de 28 dias por mistura e serão verificadas as medições da largura, altura e comprimento dos corpos de prova e a massa para determinar a massa específica aparente.

### 3.3.8 Absorção por imersão

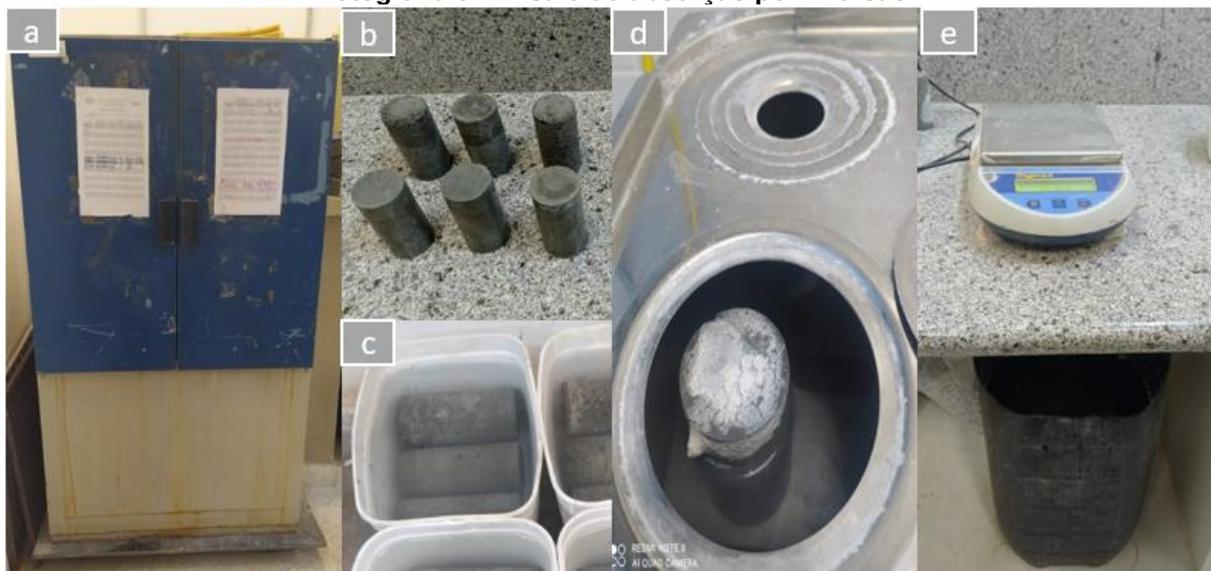
O ensaio de absorção de água por imersão é descrito pela NBR 9778 (ABNT, 2012) e definido com um processo no qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, obtém-se a massa específica saturada.

Assim, ocorrerá a verificação das massas de cada corpo de prova para então, serem encaminhados para a secagem em estufa que estará com uma temperatura de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , até que se obtenha a constância de massa (a). Após isso, os corpos de prova serão resfriados ao ar à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e, então será determinado sua massa seca (b). Por fim, o resfriamento dos corpos de prova, neste processo, estes deverão ser imersos durante o período de 72 horas, para depois serem pesados obtendo a massa específica saturada (c).

Completada a etapa de saturação, coloca-se a amostra dentro do equipamento "Banho Maria" que progressivamente será levada a ebulição e ficará

por um período de 5 horas (d). A seguir, deixa-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Determinar e registrar a massa saturada imersa em água após fervura com auxílio da balança hidrostática (e). Retirar a amostra da água, enxugá-la com pano úmido. Determinar e registrar sua massa satura em água após imersão e fervura.

**Fotografia 5 - Ensaio de absorção por imersão**



Fonte: Autoria própria (2023)

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ensaio no estado fresco

Os ensaios de espalhamento foram realizados em temperatura e umidade relativa constante, os resultados de espalhamento, estão apresentados na Tabela 6 e no Gráfico 1.

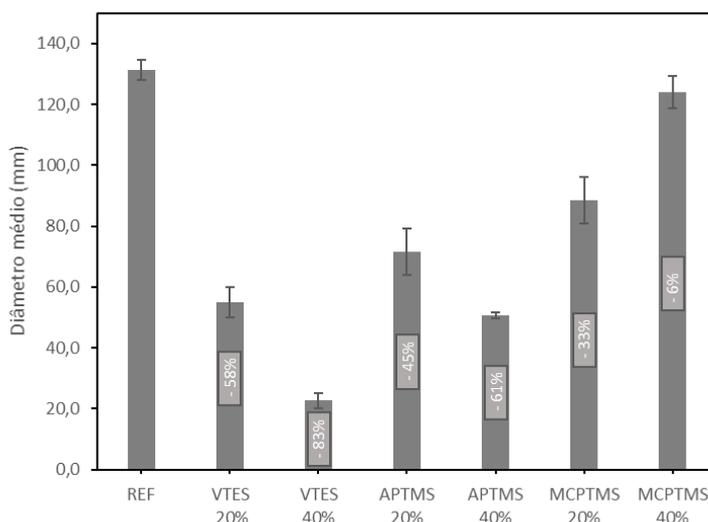
**Tabela 6 - Resultado dos ensaios de espalhamento**

<b>Traço</b>	<b>Φ1 (mm)</b>	<b>Φ2 (mm)</b>	<b>Φ3 (mm)</b>	<b>Φmédio (mm)</b>
REF	135	129	130	131,3
VTES 20%	60	50	55	55,0
VTES 40%	20	23	25	22,7
APTMS 20%	70	65	80	71,7
APTMS 40%	50	52	50	50,7
MCPTMS 20%	80	90	95	88,3
MCPTMS 40%	120	122	130	124,0

Fonte: A autoria própria (2023)

A Tabela 6 apresenta os resultados de espalhamento para os traços de referência e com adição dos três tipos de silanos VTES, APTMS e MCPTMS.

Obteve-se um diâmetro médio de 131,3 mm para a referência, com isso, observa-se que para o VTES com a maior porcentagem de silano 40 %, obteve-se o menor diâmetro médio de 22,7 mm (diminuição de 83 % em relação a referência) e para a porcentagem de 20 % de VTES, obteve-se diâmetro médio 55,0 mm (diminuição de 58 % em relação a referência). Para os sistemas baseados em APTMS, observou-se diminuição de 45 % e 61 %, para as dosagens de 20 % e 40 %, respectivamente, em relação ao diâmetro médio da referência. Conforme análise por t-student, estes resultados são considerados estatisticamente diferentes em relação à referência.

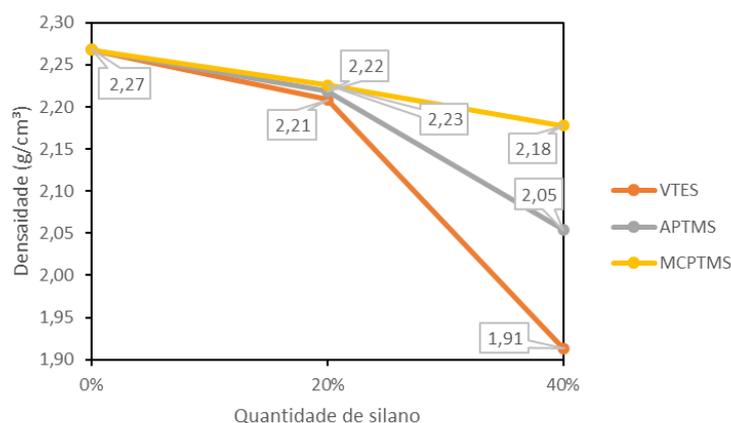
**Gráfico 1 - Resultado dos ensaios de espalhamento médio**

Fonte: Autoria própria (2023)

Entretanto, para o MCPTMS 40 % obteve-se diâmetro médio mais próximo da referência, considerado estatisticamente equivalente à referência conforme teste t-student, de 124,0 mm e para 20 % houve uma diminuição de 33 % (88,3 mm) em relação a referência.

Quando o silano é usado como substituto de aditivos plastificantes, ele pode não possuir o mesmo grau de propriedades plastificantes. Os silanos são geralmente usados como promotores de adesão, agentes de reticulação ou modificadores de superfície, em vez de plastificantes primários. Embora possam melhorar certos aspectos do desempenho do material, eles podem não fornecer o mesmo nível de aprimoramento da trabalhabilidade que os plastificantes tradicionais.

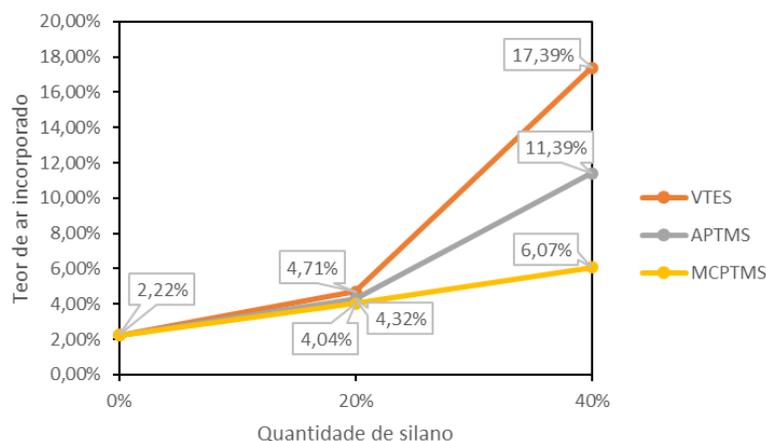
No Gráfico 2 apresentam-se os resultados de densidade obtidos a partir do ensaio de massa específica aparente no estado fresco e o Gráfico 3 apresenta os resultados para o teor de ar aprisionado das pastas no estado fresco. A densidade e o teor de ar aprisionado médios da amostra de referência foram respectivamente 2,27 g/cm<sup>3</sup> e 2,22 %.

**Gráfico 2 - Resultado dos ensaios de massa específica aparente no estado fresco**

Fonte: Autoria própria (2023)

Desta forma, a massa específica aparente no estado fresco dos silanos VTES, APTMS e MCPTMS na quantidade de 20 % tiveram valores próximos considerados estatisticamente equivalentes à referência, conforme teste t-studen, sendo 2,21 g/cm<sup>3</sup>, 2,22 g/cm<sup>3</sup> e 2,23 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, apontando uma diminuição inferior 3 % na densidade em relação a referência em ambos os casos.

Contudo, para a quantidade de 40% de silano houve-se maiores variações em relação aos silanos utilizados e a referência, a maior diminuição foi encontrada para o VTES de quase 16 % (1,91 g/cm<sup>3</sup>), em seguida, para o APTMS de quase 10 % (2,05 g/cm<sup>3</sup>) e por fim a menor variação foi para o MCPTMS de 4 % (2,18 g/cm<sup>3</sup>) conforme análise por t-student, estes resultados são considerados estatisticamente diferentes em relação à referência.

**Gráfico 3 - Resultado dos ensaios de teor de ar aprisionado no estado fresco**

Fonte: Autoria própria (2023)

A substituição de 20 % e 40 % do superplastificante por silano, em todos os casos, aumentou o teor de ar das pastas. Contudo, utilizando-se 20 % de silano (VTES, APTMS e MCPTMS) o aumento de ar incorporado foi inferior a 2,50 % em comparação a referência, apresentaram resultados que são estatisticamente considerados maiores conforme análise t-student.

Entretanto, e o aumento do teor nos silanos VTES, APTMS e MCPTMS em 40 % resultou em maiores teores de ar incorporador, sendo 17,39 %, 11,39 % e 6,07 % respectivamente, considerados estatisticamente diferentes à referência. Essa tendência de aumento do teor de ar com o aumento do teor de silano também foi relatada por Svegl, Suput-Strupi e Skrlep (2008).

Por tanto, os maiores valores de teor de ar incorporado apresentaram os menores valores de densidade, pois, a presença das bolhas de ar interfere na estrutura, por serem mais leves, tornam a estrutura da pasta menos densa, em concordância com Alves (2002) que afirma o aumento do teor de ar, ocorre diminuição da densidade de massa pela formação de microbolhas de ar no seu interior, provocando maior facilidade de manuseio.

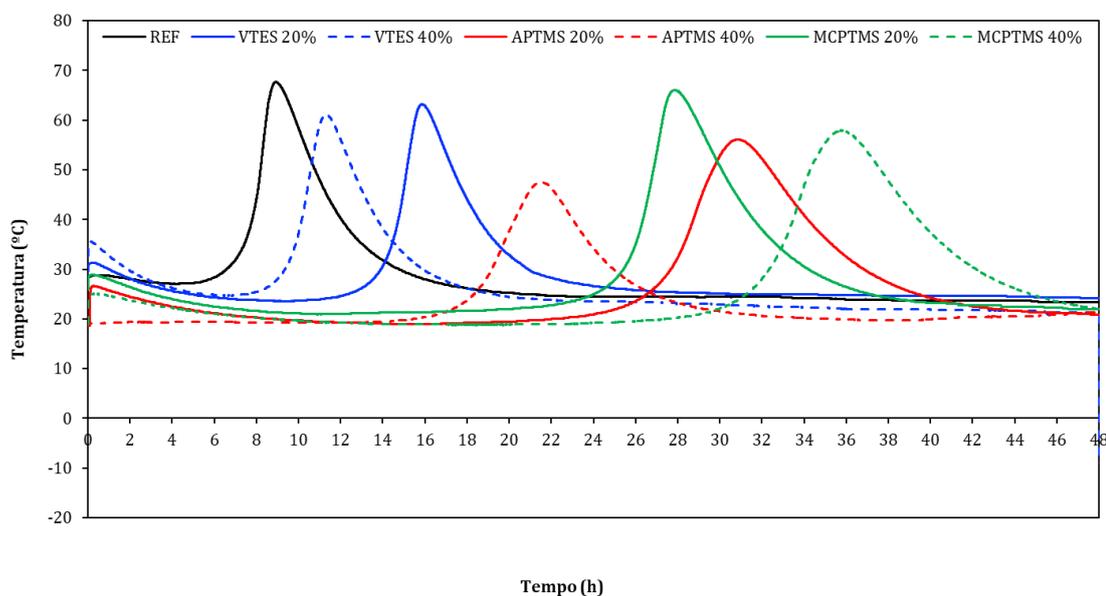
A molécula de silano não é solúvel em água nos primeiros momentos, e não apresenta reatividade imediata com os compostos cimentícios após sua adição, como ocorre com os aditivos superplastificantes. Sendo assim, a redução da densidade das pastas com o aumento do teor dos silanos pode ser derivada de sua natureza apolar. Além disso, o VTES possui quatro grupos com potencial de hidrólise, enquanto APTMS e MCPTMS possuem respectivamente um grupo amina e um grupo epóxi em seus grupos funcionais, o que pode levar a diferentes velocidades de reação em comparação ao VTES. Esse efeito resulta em cinética de baixa reatividade, conforme apresentado por Collodetti, Gleize e Monteiro (2014).

Portanto, ambos os efeitos citados resultam em menores quantidades de superplastificante disponíveis para dispersar as partículas de cimento, resultando em uma pasta mais consistente conforme verificado nos testes de mini-slump. Com isso, a saída do ar é dificultada, resultando em menores densidades.

O calor de hidratação refere-se ao calor liberado quando a água reage com o cimento para formar compostos químicos, principalmente hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), que contribuem para o endurecimento e o desenvolvimento da resistência do concreto. O calor de hidratação é um parâmetro importante na construção de concreto, pois influencia vários fatores, como cura, fissuração térmica

e desempenho geral do concreto. No Gráfico 4 é apresentado a relação entre o tempo e a quantidade de calor liberada durante o processo de hidratação das pastas no período de 48 horas de ensaio.

**Gráfico 4 - Resultados da calorimetria isotérmica das pastas**



Fonte: Autoria própria (2023)

Inicialmente, ocorre um rápido aumento do calor de hidratação, o pico de calor inicial, causado pelas reações exotérmicas entre os compostos do cimento e a água. Após, a liberação de calor diminui gradualmente ao longo do tempo à medida que as reações de hidratação progridem, o período dormente ou de indução, a duração varia-se dependendo do tipo de silano e a quantidade utilizada. Posteriormente, ocorre um período de evolução acelerada de calor, o pico de calor principal, derivado das reações de hidratação em andamento. Após o pico de calor principal, a taxa de liberação de calor começa a diminuir, entrando na fase de desaceleração, ocorrendo a diminuição das reações de hidratação e a redução geral do calor de hidratação. O fim do processo é indicado pela estabilidade na liberação de calor.

No Gráfico 4, para todas as amostras analisadas verificou-se efeito retardador, em relação a referência. Além disso, foi observou-se uma relação inversa entre a porcentagem de incorporação de silano e o pico de calor principal. A presença de silanos também influenciou significativamente a duração do período de indução, que está associado à presença de etringita, precipitação de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e formação de C-S-H (SCRIVENER, JUILLAND e MONTEIRO, 2015)

A referência apresentou pico de hidratação equivalente em ~9 h com temperatura de 67,7 °C. Enquanto, os sistemas VTES, APTMS e MCPTMS com dosagem de 20% atingiram picos de hidratação em ~16 h, ~31 h e ~28 h, respectivamente. Para os sistemas VTES, APTMS e MCPTMS com dosagem de 40%, os picos de hidratação ocorreram em ~11 h, ~22 h e ~36 h, respectivamente.

Em relação ao calor liberado no pico de hidratação, o sistema com dosagem de 20 % de MCPTMS apresentou a temperatura mais próxima da referência, medindo 66 °C (redução de 2,5 %). Seguiu-se o sistema VTES com dosagens de 20 % e 40 %, que liberou temperaturas de 63,2 °C (redução de 6,6 %) e 61,1 °C (redução de 6,6 %), respectivamente. Os sistemas contendo dosagens de 40 % e 20 % de APTMS, bem como dosagens de 40 % de MCPTMS, apresentaram os menores valores de calor liberado, medindo 47,6 °C (redução de 29,7 %), 56,1 °C (redução de 17,1 %) e 57,9 °C (redução de 14,5 %), respectivamente.

Para o MCPTMS é possível atribuir a função de retardo da hidratação do sistema com o aumento do teor de silano. Entretanto, para o VTES e APTMS as tendências verificadas foram diferentes, ao aumentar o teor de silano o período de aceleração voltou ao tempo semelhante ao da pasta de referência.

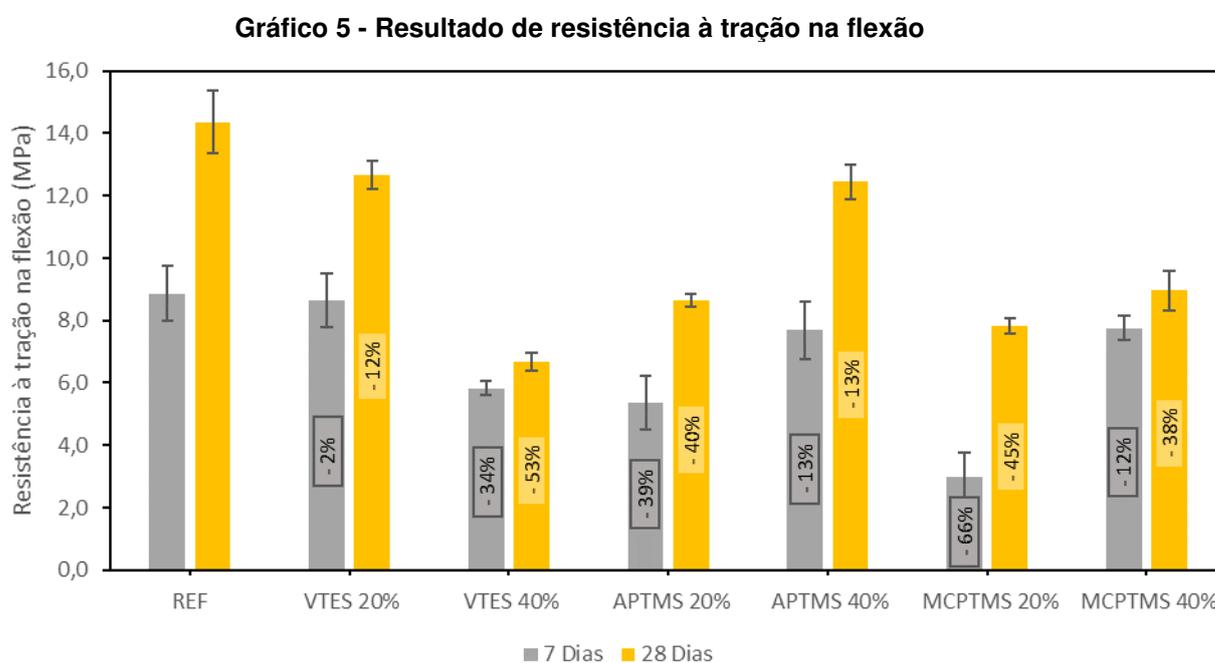
Sendo assim, quando os silanos VTES e APTMS são adicionados ao sistema, interagem com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  presentes na solução. E também, interagem com o cimento e a superfície do C-S-H (hidrato de silicato de cálcio), que é o principal componente dos materiais cimentícios. Essas interações entre os silanos e os vários componentes podem ter impacto no processo de hidratação. Um efeito observado é a diminuição do grau de saturação de C-S-H e Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) na fase aquosa. Em outras palavras, a quantidade de C-S-H e Portlandita que pode ser formada e dissolvida na água é reduzida.

Esse fenômeno foi relatado por vários estudos, incluindo Kong, Liu e Wang (2015), Colodetti, Gleize e Monteiro (2014) e Feng, Le, Wang e Xhang (2016). Esses estudos observaram que à medida que a quantidade de silano aumenta, há uma diminuição correspondente no nível de saturação de C-S-H e Portlandita na fase aquosa. Isso sugere que os silanos têm influência na formação e estabilidade desses compostos, podendo afetar o processo geral de hidratação e as propriedades resultantes dos materiais cimentícios.

## 4.2 Ensaio no estado endurecido

O rompimento dos corpos de prova para todos os sistemas analisados foi realizado em 7 e 28 dias. A resistência à tração na flexão média da amostra de referência para 7 dias atingiu 8,9 MPa e para 28 dias 14,4 MPa, já para a compressão média da amostra de referência para atingiu 52,6 MPa e 82,1 MPa, respectivamente.

No Gráfico 5 observa-se os resultados de tração na flexão e o Gráfico 6 apresenta os resultados para compressão média.



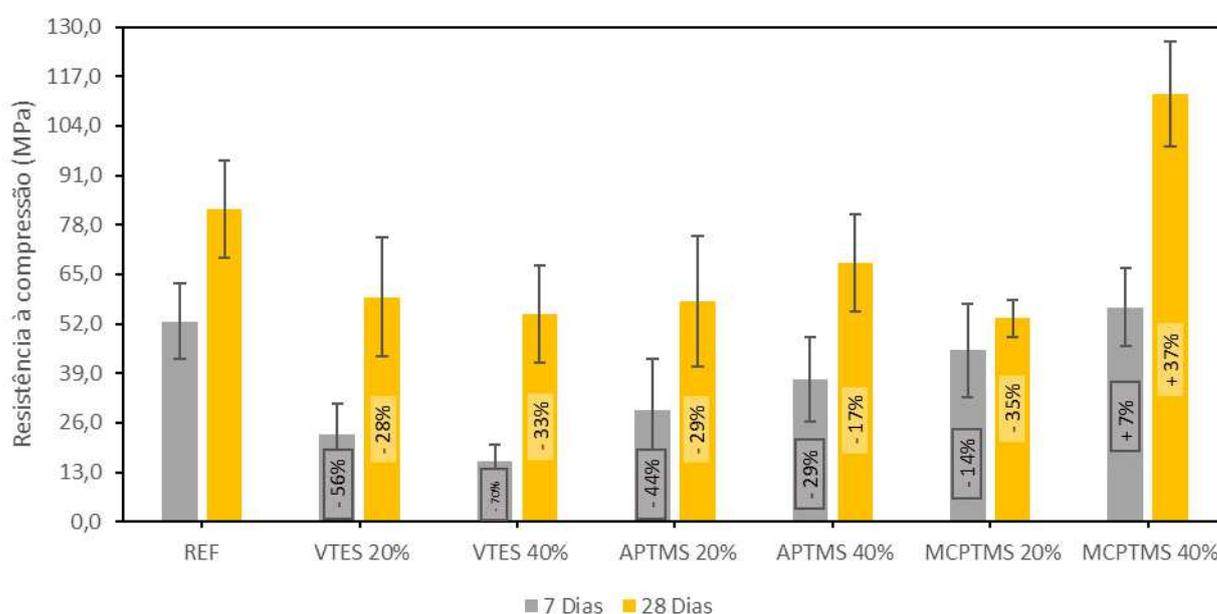
Fonte: Autoria própria (2023)

No gráfico 5, é notório a perda na resistência média de todas as amostras aos 7 e 28 dias. Aos 7 dias, o sistema com adição de 20 % de MCPTMS apresentou a maior redução na resistência a tração na flexão de 66 % em relação a referência equivalente a 3,0 MPa. Por sua vez, os sistemas com adição de 40 % de VTES e 20 % APTMS indicaram uma redução inferior a 34 % e 39 % em relação a referência equivalente a 5,8 e 5,4 MPa, respectivamente, são estatisticamente diferentes à referência, pela análise *t-student*. Os sistemas que apresentaram resultados estatisticamente equivalentes a referência conforme análise são: 20 % VTES apresentou redução de 2 % na resistência média, equivalente a 8,7 MPa, os sistemas com 40 % de APTMS e MCPTMS que apresentaram redução nas

resistências a tração na flexão média em 13% e 12%, respectivamente em relação à referência equivalente a 7,7 e 7,8 MPa.

Aos 28 dias, verificou-se para o sistema com 20 % de VTES e 40 % APTMS uma redução de 12 % e 13% na resistência média, quando comparado ao sistema de referência, os quais atingiram resistência equivalente a 12,7 e 12,4 e MPa respectivamente, o sistema 20 % VTES é estatisticamente equivalente à referência enquanto o sistema 40 % APTMS é estatisticamente diferentes à referência. Para os demais sistemas, encontrou-se uma redução entre 38 % e 53 % em relação a referência.

**Gráfico 6 - Resultado de resistência à compressão**



Fonte: Autoria própria (2023)

No gráfico 6, a maior parte das amostras teve redução na resistência em comparação a referência aos 7 dias. Os sistemas com adição de VTES 20 % e 40 % apresentaram a maior redução na resistência a compressão de 56 % e 70 % em relação a referência equivalente a 23,0 e 16,0 MPa, respectivamente. Por sua vez, os sistemas com adição de 20 % e 40 % de APTMS indicou uma redução de 44 % e 29 % em relação a referência equivalente a 29,4 e 37,5 MPa, respectivamente. O sistema de 20 % MCTPMS (redução de 14 % equivalente a 45,0 Mpa), enquanto o sistema com 40 % de MCPTMS apresentou resistências a compressão média à ligeiramente superior de 7 %), equivalente a 56,3 Mpa, ambos os sistemas apresentaram resultados estatisticamente equivalentes em relação a referência pela análise *t-student*.

Aos 28 dias, o sistema com 40 % de APTMS apresentou resultado estatisticamente equivalente a referência pela análise *t-student*, sendo uma redução média de 17 % comparado ao sistema de referência com resistência de 68,0 e MPa. Entretanto, o sistema com 40 % de MCPTMS apresentou resistências a compressão superior de 37 % equivalente a 112,5 Mpa.

No entanto, para os demais sistemas, encontrou-se uma redução entre 28 % e 35 % em relação a referência.

No ensaio de resistência à flexão, a amostra possui uma alta sensibilidade à qualidade da matriz e ao ar aprisionado, enquanto no ensaio de compressão, quando submetida à compressão, a matriz é capaz de transmitir tensões através das microfissuras (FIGUEIREDO, 2011).

As amostras de VTES apresentaram resultados estatisticamente semelhantes a referência, em ambas as idades estudadas. Enquanto as amostras de 40 % APTMS e MCPTMS apresentaram semelhança apenas nos 7 dias. Para as demais amostras não foram encontradas melhorias nas propriedades de resistências flexão na tração. Isto pode ser explicado através dos resultados apresentados nos ensaios de propriedades no estado fresco: as pastas apresentaram perdas na trabalhabilidade e altos teores de ar aprisionado comparado com a referência. Portanto, está diretamente relacionado à perda nas propriedades mecânicas, como também verificado por Svegl, Suput-Strupi e Skrlep (2008).

Quando um material cerâmico é submetido ao ensaio de tração à flexão, a tensão se concentra nas extremidades dessas trincas, aumentando a probabilidade de se propagarem e crescerem, resultando em um baixo comportamento mecânico como esperado para um material livre de defeitos (GRIFFITH, 1920).

Em relação as pastas de cimento Portland, onde há ar incorporado distribuído pelo material, é possível prever que este material apresenta uma baixa resistência à flexão, devido a porosidade existente. Este efeito ocorre devido ao excesso de ar aprisionado no material, como verificado nas amostras. Assim, as perdas nas propriedades mecânicas podem ser atribuídas ao ar aprisionado dos materiais. Isso fica mais evidente quando correlacionado com o calor cumulativo liberado (medido pela calorimetria).

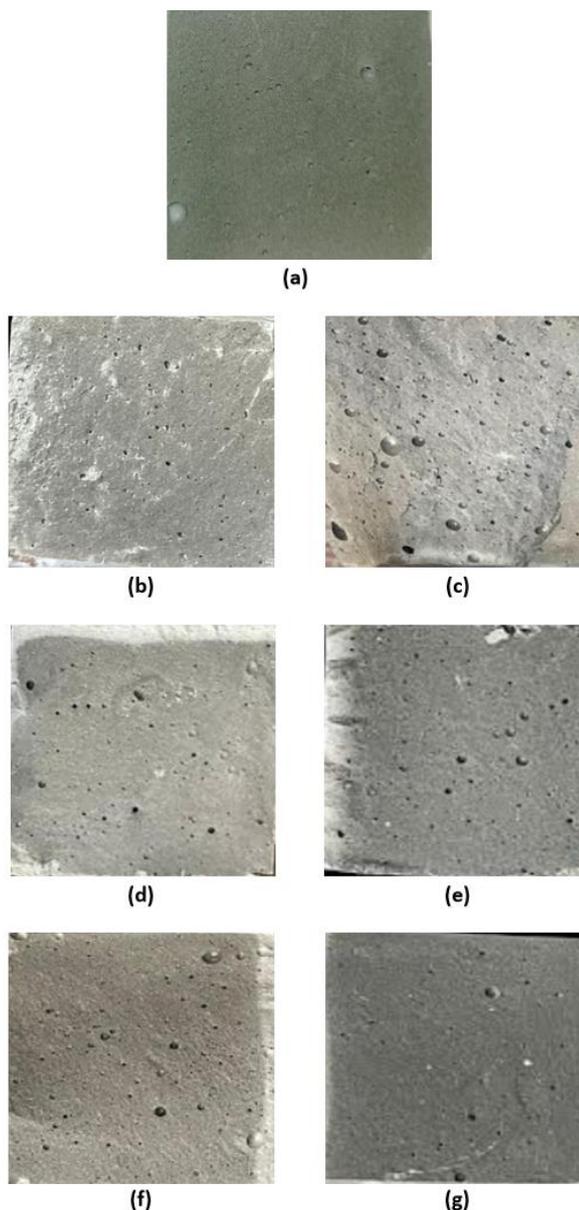
Uma pasta à base de cimento Portland, possui uma alta capacidade de suportar tensões de compressão, conforme observa-se o alto valor de resistência obtidos neste trabalho. Para as amostras de VTES E APTMS, obteve-se resultado

superior a 50 MPa em 28 dias, mesmo que abaixo da resistência de referência. Desta forma, ao comparar os resultados de 28 dias dos ensaios de compressão com os resultados de 7 dias foi possível notar que todas as amostras analisadas tiveram um comportamento semelhante, esses resultados podem ser justificados pela porosidade semelhante das amostras com menor grau de hidratação do cimento, limitando a evolução das propriedades mecânicas.

Com a evolução da hidratação, a amostra com MCPTMS com menos ar aprisionado e trabalhabilidade apresentou maior potencial para suportar carga, resultando o maior valor médio de resistência à compressão aos 28 dias, superior a 110 MPa, de acordo com o esperado.

Sendo, uma hipótese em relação ao menor desempenho obtido nas amostras com silano, observa-se o ar aprisionado nas superfícies fraturadas mostradas na Fotografia 6, estas superfícies de fratura foram obtidas nas amostras aos 7 dias.

**Fotografia 6 - Superfície de fratura das pastas aos 7 dias de hidratação**



Fonte: Autoria própria (2023)

Referência em (a); VTES 20% em (b); VTES 40% em (c); APTMS 20% em (d); APTMS 40% em (e); MCPTMS 20% em (f); MCTMS 40% em (g).

Observa-se na Fotografia 6 (a) que a referência apresenta pequenas bolhas de ar aprisionadas, semelhante às observadas nas amostras com 20% de VTES, APTMS e MCPTMS, respectivamente na Fotografia 6 (b), Fotografia 9 (d) e Fotografia (f). Essa característica aumenta o potencial de um material mais resistente.

As fraturas mais interessantes são observadas nas Fotografias (c) e (e), que evidenciam o efeito do silano na mistura, essas amostras possuem em sua

composição 40% de substituição, é notório as grandes bolhas de ar aprisionadas que podem ser observadas na superfície da fratura, justificando o menor desempenho mecânico e a gravidade específica dessas amostras.

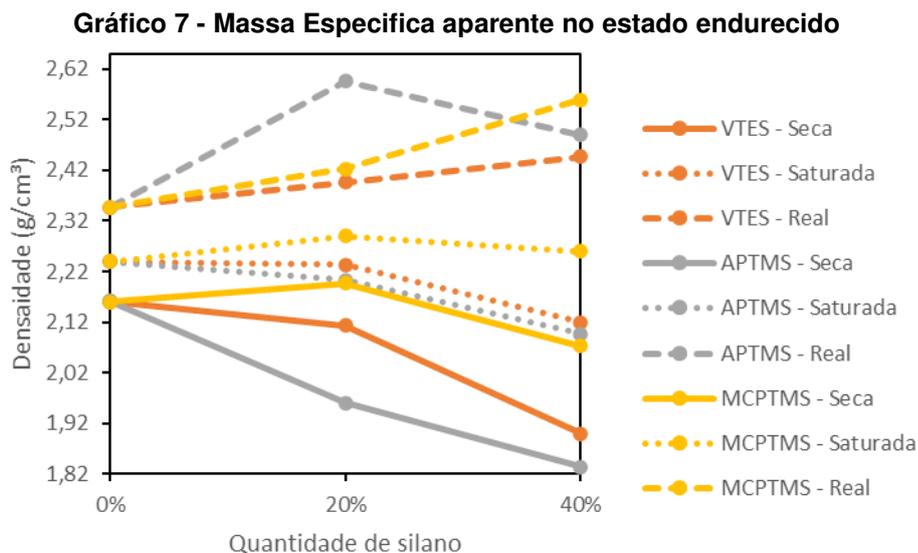
Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão estão apresentados na Tabela 7 e o índice de vazios e suas massas específicas estão apresentados nos Gráficos 7 e 8.

**Tabela 7 - Resultados de absorção por imersão**

Traço	Absorção	Índice de vazios	$\mu$ amostra seca (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ amostra saturada (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ real (g/cm <sup>3</sup> )
REF	3,63%	7,84%	2,16	2,24	2,35
VTES 20%	5,58%	11,78%	2,11	2,23	2,40
VTES 40%	11,61%	21,89%	1,90	2,12	2,45
APTMS 20%	12,48%	24,46%	1,96	2,20	2,60
APTMS 40%	14,38%	26,37%	1,83	2,10	2,49
MCPTMS 20%	4,27%	9,34%	2,20	2,29	2,42
MCPTMS 40%	9,07%	18,83%	2,07	2,26	2,56

Fonte: Autoria própria (2023)

A massa específica seca de uma amostra representa a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra. Nessa massa estão inclusos os poros permeáveis e impermeáveis. Na tabela 7 e no Gráfico 7, é possível perceber que apenas o sistema com 20 % de MCPTMS apresentou ligeiramente um aumento na massa específica seca em relação à de referência, resultado estatisticamente equivalente a referência conforme a análise *t-student*, porém todos os outros sistemas apresentaram uma redução em relação a referência. Isso ocorre, devido ao volume dos corpos de prova terem sido mantidos, as massas deles se alteraram com o acréscimo de silano.



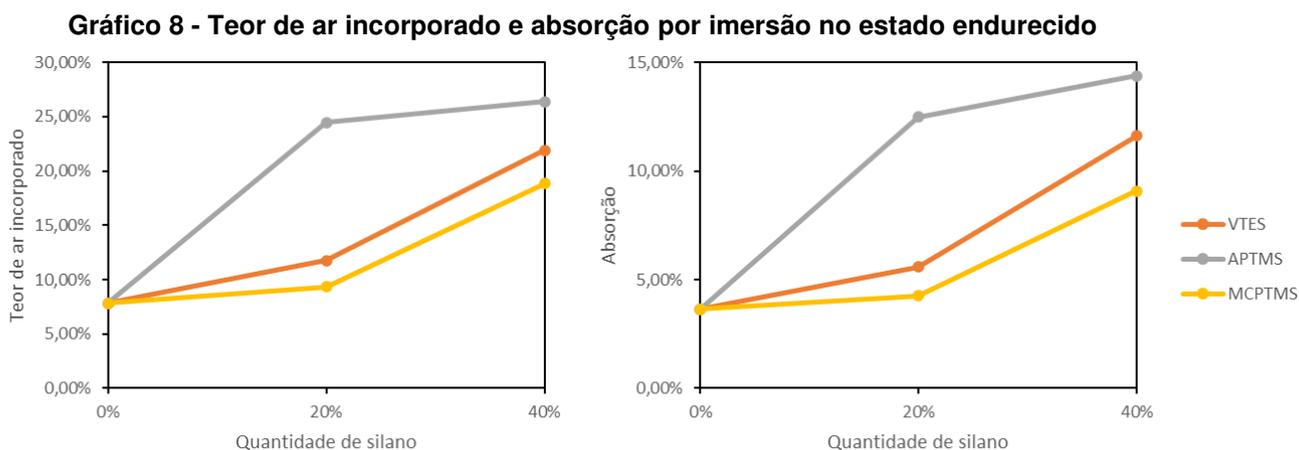
Desta forma, a massa específica seca média da amostra de referência obtida foi de 2,16 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, a massa específica aparente dos silanos VTES e MCPTMS na quantidade de 20 % tiveram valores próximos, sendo 2,11 g/cm<sup>3</sup> e 2,20 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, para o MCPTMS na quantidade de 20 % o resultado é estatisticamente equivalente a referência, conforme análise. Contudo, para a quantidade de 50% de silano houve-se maiores variações em relação aos silanos utilizados e a referência, a maior diminuição foi encontrada para o APTMS de 15 %, em seguida, para o VTES de quase 12 % e por fim um aumento para o MCPTMS de 4 %.

A massa específica saturada de uma amostra representa a relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Os sistemas com VTES e APTMS apresentaram uma redução na massa específica saturada em relação à de referência. Entretanto, os sistemas compostos por MCPTMS apresentaram ligeiramente um aumento de inferior a 2 %.

Sendo assim, a massa específica seca média da amostra de referência obtida foi de 2,24 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, a massa específica aparente dos silanos VTES e APTMS na quantidade de 20 % tiveram valores próximos, sendo 0,3 % e 2 % inferiores a referência respectivamente, para o MCPTMS na quantidade de 20 % houve um aumento de 2 % de densidade em relação a referência. Contudo, para a quantidade de 40% de silano houve-se maiores variações em relação aos silanos utilizados e a referência, a maior diminuição foi encontrada para o APTMS de 5 %,

em seguida, para o VTES de quase 6 % e por fim um aumento para o MCPTMS de inferior a 1 %.

Conforme apresentado no Gráfico 8, percebe-se uma relação direta entre o índice de vazios e a absorção dos corpos de prova. Portanto, os ensaios de absorção de água e índice de vazios estão associados à porosidade total da argamassa endurecida.



Fonte: Autoria própria (2023)

Desta forma, absorção média da amostra de referência obtida foi de 3,63 %. Entretanto, a absorção dos sistemas VTES e MCPTS na quantidade de 20 % tiveram valores próximos, sendo 5,58 % e 4,27 % respectivamente, os resultados conforme a análise *t-student* é semelhante a referência. Contudo, para a os sistemas de APTMS 20 % e 40 % encontraram-se os maiores aumentos de absorção sendo 244 % e 296 % em relação a referência. Para os sistemas VTES e MCPTS na quantidade de 40 % também encontrou-se um aumento de 220 % e 150 % respectivamente, em relação a referência.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou as alterações nas propriedades frescas e endurecidas de pastas de cimento com a substituição parcial do superplastificante pelos silanos VTES, APTMS e MCPTMS. Com base nos resultados obtidos, pode se tirar as seguintes conclusões:

- Quando os aditivos superplastificantes são reduzidos em substituição dos silanos, observou-se que a trabalhabilidade das pastas foi prejudicada, a mistura se torna mais rígida, menos fluida ou mais difícil de manusear. As amostras apresentaram redução de peso específico com as adições de silanos, com isso, o ar aprisionado aumentou, A presença do ar incorporado interfere na estrutura, por serem mais leves, apresentando uma matriz menos densa;
- Para todas as amostras analisadas verificou-se que a adição de silanos teve efeito retardador no processo de hidratação em relação à amostra referência, no entanto, as tendências de retardamento variaram dependendo do tipo de silano utilizado. Para o MCPTMS observou-se retardo no processo de hidratação com o aumento do teor de silano, enquanto para o VTES e o APTMS ao aumentar o teor de silano houve uma aceleração na hidratação da pasta quando comparada a primeira dosagem de 20 %. Esse fenômeno pode ser atribuído à saturação, indicando que pode haver uma concentração ideal entre as dosagens estudadas;
- Quando utilizado MCPTMS, houve tendência de aumento da resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias, enquanto quando utilizado VTES ou APTMS, observou-se tendência de redução dessas propriedades independentemente da idade do teste, principalmente para substituição de 40%. Esses efeitos podem ser atribuídos ao ar aprisionado verificado no estado fresco e confirmado por imagens da superfície da fratura.

## REFERÊNCIAS

- AITCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.
- ALVES, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125-21**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 494**: Standard Specification for Chemical admixtures for concrete. West Conshohocken, PA, 2019.
- ARKLES, B. **Hydrophobicity**: Hydrophilicity and Silane Surface Modification, 84 p. 2011.
- ARKLES, B. **Silicon Esters**. **Encyclopedia of Chemical Technology**, v. 22, n. Fourth Edition, pp. 69–81, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BATISTA, M. **Siloxanos & silanos – Prefeitos hidrorrepelentes para toda situação**. Revista Recuperar, v. 23, p. 14-19, 1998.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**, 5.ed. Rio de Janeiro: ABDR Afiliada, 1994. v.1.

BAUER, L. A. F.; NORONHA, M. A. A; BAUER, R. J. F. Uso de aditivos no concreto. In: BAUER, L.A.F (org). **Materiais de Construção**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BORJA, E. V. **Ensaio com cimentos**, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, 2013. Apresentação do Power Point. Disponível em: <  
<https://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/materiais-de-construcao/ensaios-com-cimento>>. Acesso em: 26/04/2022.

BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. **Sol-Gel Science: The physics and chemistry of sol-gel processing**. San Diego: Academic Press. 1990.

CASAGRANDE, C. A. **Desempenho de microfibras de aço funcionalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras**. 2017. 267 p. Tese de doutorado — Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CASAGRANDE, C. A.; JOCHEM, L. F.; ONGHERO, L.; MATOS, P. M.; REPETTE, W. L.; GLEIZE, P. J. P. **Effect of partial substitution of superplasticizer by silanes in Portland cement pastes**, Journal of Building Engineering, v. 29, 2020.

COLLODETTI, G.; GLEIZE, P. J. P.; MONTEIRO, PJM. **Explorando o potencial do nano-SiO<sub>2</sub> modificado na superfície do siloxano para melhorar as propriedades de hidratação das pastas de cimento Portland**, Construir Mater, v.54, 99-105, 2014.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**, vol 1, 610 p. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.

DIAMOND, S. **Cement Pastes: Rheology, Evolution of the Properties and Structure**. IN: International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, v. 4, p. 113-123, 1980.

DOW CORNING. **Guide to Silane Solutions from Dow Corning**. Dow Corning Corporation. From no. 26-1328-01. United States of America, 2005.

DRANSFIELD, J.M. **Tendências modernas no uso e desenvolvimento de aditivos para concreto**. São Paulo. Instituto de Engenharia de São Paulo, Ago, 2000. Palestra Técnica. São Paulo. 2000.

DUQUE, Elisandro Pinheiro. **Aditivos para concreto**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 11, Vol. 07, pp. 14-24 Novembro de 2018.

FELEKOGLU, B. **Comportamento reológico do microconcreto auto-compactável**, Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 39 (2014) 1471–1495.

FENG, H.; LE, H.T.N.; WANG, S.; ZHANG, M.H. **Effects of silanes and silane derivatives on cement hydration and mechanical properties of mortars**. Construction and Building Materials. v. 129, pp. 48–60, 2016.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese de Livre Docência – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. **Concrete: An eco material that needs to be improved**. Journal of the European Ceramic Society, v. 32, n. 11, p. 2787-2798, 2012.

GELEST. **Silicion Compounds: Silanes & Silicones**; Gelest Inc. (Catalog): Morrisville, Pennsylvania, 2006.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento portland com adições do copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida - estudo da interface fibra-matriz**. 2005. 221 p. Tese de doutorado — Universidade São Paulo, São Paulo, 2005.

GRIFFITH, A. A. **The Phenomena of Rupture and Flow in Solids**. Philosophical Transactions, Series A, Vol. 221, pp. 163 -198, 1920.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarbolxilatos destinados a concreto de cimento Portland**. 2002. 210 f. Dissertação de mestrado – Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HE, Y.; ZHANG, X.; HOOTON R. D. **Effects of organosilane-modified polycarboxylate superplasticizer on the fluidity and hydration properties of cement paste**. Construction and Building Materials, v. 132, pp. 112–123, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO (IBI). **Manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central**. 1.ed. São Paulo, 2015.

KAMPOURIS, E. M.; PAPASPYRIDES, C. P. **The Influence of Fiber Pretreatment on the Mechanical Properties of Nylon 6,6 Asbestos Composites**. Interfacial Coating of Asbestos Fibers With a Thin Film of Nylon 6,6. Applied Polymer, v.33, pp. 41-49, 1987.

KANTRO, D. L. **Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test**. Cement, Concrete. and Aggregates, CCAGDP, v. 2, n. 2, pp. 95-102, 1980.

KLOSS, C. L. **Materiais para construção**, 2. Ed. pp. 228. Curitiba: Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 1996.

LEIGHTON, D.; ACRIVOS, A. **The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions**, J Fluid Mech, n. 181 p. 415-439, 1987.

MARANHÃO, F.; LOH, K. U. **O uso de hidrofugantes em materiais de construção porosos**. Techne: Revista de Tecnologia da Construção, v. 155, pp. 4-7, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2ª Edição, São Paulo: IBRACON, 2014.

MENEZES, T. L. **Revestimentos a base de silanos nanoestruturados para a proteção a corrosão em aço galvanizado**. 2015. 178 p. Tese (Programa de Pós-graduação de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MONTE, R. Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

OHTA, A.; SUGIYAMA, T.; TANAKA, Y. **Fluidizing mechanism and application of polycarboxylate based superplasticizers**. In: canmet/aci international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Proceedings. p. 359-378, Paris: V. M. Malhotra. 1997.

OLIVEIRA, H. M. O. Cimento Portland. In: BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985. 342 p.

PAGÉ, M.; SPIRATOS, N. **The role of superplasticizers in the development of environmentally-friendly concrete**. CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development. Vancouver, BC, Canada 2000.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. REVISTA CONCRETO Ano XXXVII | Nº 53 Jan. • Fev. • Mar. | 2009

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. São Paulo. Globo, 1998.

PLUEDDEMANN, E. P. **Adhesion Trough Silane Coupling Agents**. Journal of Adhesion Science and Technology - J ADHES SCI TECHNOL, v. 5, pp. 831-842. United States of America, 1991

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland : estudo em pasta**. Tese de doutorado — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M.; JOLICOEUR, C.; SPIRATOS, N. **Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete Paperback**, Ottawan: Materials Technology Laboratory, CANMET, 1998.

SANTOS, W. F. **Tratamento superficial dos agregados reciclados de RCD com hidrofugantes**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016

SCRIVENER, K. L., JUILLAND, P., MONTEIRO P.J.M. **Avanços na compreensão da hidratação do cimento Portland**, Cement Concr. No. 78 (2015) p 38–56.

SILVA, G. F.; SILVA, C. F.; SILVA, G. J. **Concreto de alto desempenho utilizando agregados disponíveis na região de Patos de Minas** – No. 58, p. 57-64 Revista de Engenharia Civil – Patos, Minas Gerais, 2020.

SILVA, M. S. **Influência de agentes de acoplamento silano nas propriedades de compósitos polipropileno/atapulgita**. 1995. 111 p. Dissertação de mestrado — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

Svegl, F.; Suput-Strupi, J.; Skrlep, L.; Kalcher, K. **The influence of aminosilanes on macroscopic properties of cement paste** Cement and Concrete Research, v. 38, pp. 945–954, 2008.

XU, Y.; CHUNG, D.D.L. **Improving the workability and strength of silica fume concrete by using silane-treated silica fume**. Cement and Concrete Research, v. 29, pp. 451-453, 1999.

ZHU, D.; VAN OOIJ, W. J. **Corrosion protection of AA 2024-T3 by bis-[3-(triethoxysilyl)propyl]tetrasulfide in sodium chloride solution**. Corrosion Science, v. 45, n. 10, pp. 2177–2197, 2003.

## **APÊNDICE A - TESTE T-STUDENT**



Análise t-student - Trabalhabilidade

	VTES 20%	REF
Média	131,33	55,00
Variância	10,33	25,00
Observações	3	3
Variância agrupada	17,67	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	22,2424	
P(T<=t) uni-caudal	1,21E-05	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	2,42E-05	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	22,2424	< 2,7764
	$(H_0) =$	Rejeitada
	$(H_a) =$	Aceita

VTES 20%  $\neq$  REF

	VTES 40%	REF
Média	131,33	22,67
Variância	10,33	6,33
Observações	3	3
Variância agrupada	8,33	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	46,1034	
P(T<=t) uni-caudal	6,62E-07	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	1,32E-06	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	46,1034	< 2,7764
	$(H_0) =$	Rejeitada
	$(H_a) =$	Aceita

VTES 40%  $\neq$  REF

	APTMS 20%	REF
Média	71,67	131,33
Variância	58,33	10,33
Observações	3	3
Variância agrupada	34,33	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-12,4715	
P(T<=t) uni-caudal	1,19E-04	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	2,38E-04	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764	< -12,4715 < 2,7764
	$(H_0) =$	Rejeitada
	$(H_a) =$	Aceita

APTMS 20%  $\neq$  REF

	APTMS 40%	REF
Média	50,67	131,33
Variância	1,33	10,33
Observações	3	3
Variância agrupada	5,833	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-40,9055	
P(T<=t) uni-caudal	1,07E-06	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	2,13E-06	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764	< -40,9055 < 2,7764
	$(H_0) =$	Rejeitada
	$(H_a) =$	Aceita

APTMS 40%  $\neq$  REF

	MCPTMS 20%	REF
Média	88,33	131,33
Variância	58,33	10,33
Observações	3	3
Variância agrupada	34,333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-8,9879	
P(T<=t) uni-caudal	4,24E-04	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	8,48E-04	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2

-2,7764 < -8,9879 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 20%  $\neq$  REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	124,00	131,33
Variância	28,00	10,33
Observações	3	3
Variância agrupada	19,1667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-2,0515	
P(T<=t) uni-caudal	5,48E-02	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	1,10E-01	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2

-2,7764 < -2,0515 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita

**MCPTMS 40% = REF**



	MCPTMS 20%	REF
Média	2,22	2,27
Variância	0,0021	0,0013
Observações	3	3
Variância agrupada	0,0017076	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-1,4591	
P(T<=t) uni-caudal	0,1091	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,2183	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < -1,4591 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita

**MCPTMS 20% = REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	2,05	2,27
Variância	0,0053	0,0013
Observações	3	3
Variância agrupada	0,0033028	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-4,5585	
P(T<=t) uni-caudal	0,0052	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0104	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < -4,5585 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**

Análise t-student - Teor de ar incorporado

	VTES 20%	REF	Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Média	0,05	0,02	Hipótese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Variância	1,27E-04	2,43E-04	Hipótese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Observações	3	3	Resultados		
Variância agrupada	0,000184893		t-Static < -ta/2	-2,7764	< 2,2400 < 2,7764
Hipótese da diferença de média	0				
Grau de liberdade	4				
t-Static	2,2400				
P(T<=t) uni-caudal	0,044				
t crítico uni-caudal	2,1318				
P(T<=t) bi-caudal	0,089				
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645			
			<b>VTES 20%</b>	<b>=</b>	<b>REF</b>

	VTES 40%	REF	Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Média	0,17	0,02	Hipótese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Variância	4,56E-04	2,43E-04	Hipótese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Variância agrupada	3	3	Resultados		
Observações	0		t-Static < -ta/2	9,9374	< 2,7764
Hipótese da diferença de média	0				
Grau de liberdade	4				
t-Static	9,9374				
P(T<=t) uni-caudal	0,0003				
t crítico uni-caudal	2,1318				
P(T<=t) bi-caudal	0,0006				
t crítico bi-caudal	2,7764				
			<b>VTES 40%</b>	<b><math>\neq</math></b>	<b>REF</b>

	APTMS 20%	REF	Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Média	0,04	0,02	Hipótese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Variância	1,50E-04	2,43E-04	Hipótese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Observações	3	3	Resultados		
Variância agrupada	0,000196083		t-Static < -ta/2	-2,7764	< 1,5771 < 2,7764
Hipótese da diferença de média	0				
Grau de liberdade	4				
t-Static	1,5771				
P(T<=t) uni-caudal	0,0950				
t crítico uni-caudal	2,1318				
P(T<=t) bi-caudal	0,1899				
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645			
			<b>APTMS 20%</b>	<b>=</b>	<b>REF</b>

	APTMS 40%	REF	Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Média	0,06	0,02	Hipótese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Variância	2,72E-04	2,43E-04	Hipótese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Observações	3	3	Resultados		
Variância agrupada	0,000257254		t-Static < -ta/2	2,9223	< 2,7764
Hipótese da diferença de média	0				
Grau de liberdade	4				
t-Static	2,9223				
P(T<=t) uni-caudal	0,0216				
t crítico uni-caudal	2,1318				
P(T<=t) bi-caudal	0,0431				
t crítico bi-caudal	2,7764				
			<b>APTMS 40%</b>	<b><math>\neq</math></b>	<b>REF</b>

	MCPTMS 20%	REF
Média	0,04	0,02
Variância	3,92E-04	2,43E-04
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000317428	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	1,4480	
P(T<=t) uni-caudal	0,1106	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,2212	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,77645

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < 1,4480 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita  
( $H_a$ ) = Rejeitada

**MCPTMS 20% = REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	0,11	0,02
Variância	9,86E-04	2,43E-04
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000614166	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	4,5426	
P(T<=t) uni-caudal	0,0052	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0105	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
4,5426 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**

Análise t-student - Resistência à tração na flexão - 7 dias

	VTES 20%	REF
Média	8,65	8,86
Variância	0,75	0,79
Observações	3	3
Variância agrupada	1	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-0,2977	
P(T<=t) uni-caudal	0,3904	
t crítico uni-caudal	2,132	
P(T<=t) bi-caudal	0,78073078	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-0,2977 < 2,7764
	$(H_0)$ = Aceita	
	$(H_a)$ = Rejeitada	

**VTES 20% = REF**

	VTES 40%	REF
Média	5,83	8,86
Variância	0,03	0,79
Observações	3	3
Variância agrupada	0	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-5,8007	
P(T<=t) uni-caudal	0,0022	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0044	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-5,8007 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 40%  $\neq$  REF**

	APTMS 20%	REF
Média	5,37	8,86
Variância	0,05	0,79
Observações	3	3
Variância agrupada	0	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-6,6228	
P(T<=t) uni-caudal	0,001	
t crítico uni-caudal	2,132	
P(T<=t) bi-caudal	0,003	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-6,6228 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 20%  $\neq$  REF**

	APTMS 40%	REF
Média	7,69	8,86
Variância	0,84	0,79
Observações	3	3
Variância agrupada	1	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-1,5949	
P(T<=t) uni-caudal	0,0930	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,1860	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-1,5949 < 2,7764
	$(H_0)$ = Aceita	

**APTMS 40% = REF**

	MCPTMS 20%	REF
Média	3,00	8,86
Variância	0,56	0,79
Observações	3	3
Variância agrupada	1	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-8,7399	
P(T<=t) uni-caudal	4,72E-04	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	9,44E-04	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < -8,7399 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 20%  $\neq$  REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	7,76	8,86
Variância	1,61E-01	7,88E-01
Observações	3	3
Variância agrupada	0	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-1,9560	
P(T<=t) uni-caudal	0,0611	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,1221	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < -1,9560 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita

**MCPTMS 40% = REF**

Análise t-student - Resistência à tração na flexão - 28 dias

	VTES 20%	REF
Média	12,66	14,36
Variância	0,21	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	0,617283333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-2,6396	
P(T<=t) uni-caudal	0,0288	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0576	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-2,6396 < 2,7764
	$(H_0) =$ Aceita	
<b>VTES 20% = REF</b>		

	VTES 40%	REF
Média	6,68	14,36
Variância	0,09	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	0,553533333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-12,6316	
P(T<=t) uni-caudal	0,0001	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0002	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-12,6316 < 2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
<b>VTES 40% <math>\neq</math> REF</b>		

	APTMS 20%	REF
Média	8,64	14,36
Variância	0,04	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	1	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4,0000	
t-Static	-9,6004	
P(T<=t) uni-caudal	0,0003	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,000657998	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-9,6004 < 2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
<b>APTMS 20% <math>\neq</math> REF</b>		

	APTMS 40%	REF
Média	12,45	14,36
Variância	0,31	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	0,666033333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-2,8664	
P(T<=t) uni-caudal	0,0228	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0456	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-2,8664 < 2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
<b>APTMS 40% <math>\neq</math> REF</b>		

	MCPTMS 20%	REF
Média	7,83	14,36
Variância	0,07	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	0,543133333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-10,8519	
P(T<=t) uni-caudal	0,0002	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0004	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2

-2,7764 < -10,8519 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 20%  $\neq$  REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	8,97	14,36
Variância	0,40	1,02
Observações	3	3
Variância agrupada	0,711433333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-7,8265	
P(T<=t) uni-caudal	0,0007	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0014	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2

-2,7764 < -7,8265 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**

Análise t-student - Resistência à compressão - 7 dias

	VTES 20%	REF
Média	22,97	52,63
Variância	64,07	97,08
Observações	6	6
Variância agrupada	80,57861333	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-5,7223	
P(T<=t) uni-caudal	0,0001	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0002	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-5,7223 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 20%  $\neq$  REF**

	VTES 40%	REF
Média	15,95	52,63
Variância	19,63	97,08
Observações	6	6
Variância agrupada	58,35746	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-8,3165	
P(T<=t) uni-caudal	4,18E-06	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	8,37E-06	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-8,3165 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 40%  $\neq$  REF**

	APTMS 20%	REF
Média	29,44	52,63
Variância	175,88	97,08
Observações	6	6
Variância agrupada	136,480815	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-3,4389	
P(T<=t) uni-caudal	0,0032	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0063	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-3,4389 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 20%  $\neq$  REF**

	APTMS 40%	REF
Média	37,47	52,63
Variância	124,63	97,08
Observações	6	6
Variância agrupada	110,8591733	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-2,4933	
P(T<=t) uni-caudal	0,0159	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0318	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-2,4933 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 40%  $\neq$  REF**



Análise t-student - Resistência à compressão - 28 dias

	VTES 20%	REF
Média	59,08	79,83
Variância	240,03	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	200,7171267	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-2,5368	
P(T<=t) uni-caudal	0,0148	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0295	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-2,5368 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 20%  $\neq$  REF**

	VTES 40%	REF
Média	54,65	79,83
Variância	161,90	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	161,6523417	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-3,4296	
P(T<=t) uni-caudal	0,0032	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0064	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-3,4296 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 40%  $\neq$  REF**

	APTMS 20%	REF
Média	57,88	79,83
Variância	290,81	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	226,1073733	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-2,5280	
P(T<=t) uni-caudal	0,0150	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0300	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-2,5280 < 2,2281
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 20%  $\neq$  REF**

	APTMS 40%	REF
Média	67,96	79,83
Variância	159,70	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	160,5555267	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-1,6216	
P(T<=t) uni-caudal	0,0680	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,1359	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,2281 <	-1,6216 < 2,2281
	$(H_0)$ = Aceita	

**APTMS 40% = REF**

	MCPTMS 20%	REF
Média	53,47	79,83
Variância	23,57	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	92,48748667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	-4,7463	
P(T<=t) uni-caudal	0,0004	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0008	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$   
 Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
 Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
 t-Static < -ta/2  
 -2,2281 < -4,7463 < 2,2281  
 ( $H_0$ ) = Rejeitada  
 ( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 20%  $\neq$  REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	112,46	79,83
Variância	191,71	161,41
Observações	6	6
Variância agrupada	176,5610467	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	10	
t-Static	4,2533	
P(T<=t) uni-caudal	0,0008	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,0017	
t crítico bi-caudal	2,2281	-2,2281

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$   
 Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
 Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
 t-Static < -ta/2  
 -2,2281 < 4,2533 < 2,2281  
 ( $H_0$ ) = Rejeitada  
 ( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**

Análise t-student - Massa especifica no estado endurecido

	VTES 20%	REF
Média	2,11	2,16
Variância	0,0002	0,0004
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000316667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-3,2118	
P(T<=t) uni-caudal	0,0163	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0325	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-3,2118 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 20%  $\neq$  REF**

	VTES 40%	REF
Média	1,90	2,16
Variância	0,0057	0,0004
Observações	3	3
Variância agrupada	0,00305	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-5,7659	
P(T<=t) uni-caudal	2,24E-03	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	4,49E-03	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-5,7659 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**VTES 40%  $\neq$  REF**

	APTMS 20%	REF
Média	1,96	2,16
Variância	0,0049	0,0004
Observações	3	3
Variância agrupada	0,00265	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-4,7583	
P(T<=t) uni-caudal	0,0045	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0089	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-4,7583 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 20%  $\neq$  REF**

	APTMS 40%	REF
Média	1,83	2,16
Variância	0,0002	0,0004
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000316667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-22,4827	
P(T<=t) uni-caudal	1,16E-05	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	2,32E-05	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	-22,4827 < 2,7764
	$(H_0)$ = Rejeitada	
	$(H_a)$ = Aceita	

**APTMS 40%  $\neq$  REF**

	MCPTMS 20%	REF
Média	2,20	2,16
Variância	3,43E-03	4,00E-04
Observações	3	3
Variância agrupada	0,001916667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	1,0258	
P(T<=t) uni-caudal	0,1815	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,3630	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < 1,0258 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita

**MCPTMS 20% = REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	2,07	2,16
Variância	0,0004	0,0004
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000416667	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	-5,2000	
P(T<=t) uni-caudal	0,003	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,007	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2  
-2,7764 < -5,2000 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**

Análise t-student - Absorção

	VTES 20%	REF
Média	0,06	0,04
Variância	0,0002	0,0001
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000161222	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	1,8777	
P(T<=t) uni-caudal	0,0668	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,1336	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	-2,7764 <	1,8777 < 2,7764
	$(H_0) =$ Aceita	
	<b>VTES 20% = REF</b>	

	VTES 40%	REF
Média	0,12	0,04
Variância	0,0019	0,0001
Observações	3	3
Variância agrupada	0,00099906	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	3,0921	
P(T<=t) uni-caudal	1,83E-02	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	3,65E-02	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	3,0921 <	2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
	<b>VTES 40% <math>\neq</math> REF</b>	

	APTMS 20%	REF
Média	0,12	0,04
Variância	0,0000	0,0001
Observações	3	3
Variância agrupada	5,78417E-05	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	14,2571	
P(T<=t) uni-caudal	0,0001	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,0001	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	14,2571 <	2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
	<b>APTMS 20% <math>\neq</math> REF</b>	

	APTMS 40%	REF
Média	0,14	0,04
Variância	0,0000	0,0001
Observações	3	3
Variância agrupada	6,31417E-05	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	16,5741	
P(T<=t) uni-caudal	3,88E-05	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	7,76E-05	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância	95%	$\alpha = 0,05$
Hipotese Nula	$(H_0)$	= Média1 - Média 2 = 0
Hipotese Alternativa	$(H_a)$	= Média1 $\neq$ Média 2
Resultados		
t-Static < -ta/2	16,5741 <	2,7764
	$(H_0) =$ Rejeitada	
	$(H_a) =$ Aceita	
	<b>APTMS 40% <math>\neq</math> REF</b>	

	MCPTMS 20%	REF
Média	0,04	0,04
Variância	1,60E-04	1,13E-04
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000136697	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	0,6669	
P(T<=t) uni-caudal	0,2707	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,5413	
t crítico bi-caudal	2,7764	-2,7764

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2 -2,7764 < 0,6669 < 2,7764

( $H_0$ ) = Aceita

**MCPTMS 20% = REF**

	MCPTMS 40%	REF
Média	0,09	0,04
Variância	0,0006	0,0001
Observações	3	3
Variância agrupada	0,000379897	
Hipótese da diferença de média	0	
Grau de liberdade	4	
t-Static	3,4204	
P(T<=t) uni-caudal	0,013	
t crítico uni-caudal	2,1318	
P(T<=t) bi-caudal	0,027	
t crítico bi-caudal	2,7764	

Nível de significância 95%  $\alpha = 0,05$

Hipotese Nula ( $H_0$ ) = Média1 - Média 2 = 0  
Hipotese Alternativa ( $H_a$ ) = Média1  $\neq$  Média 2

Resultados  
t-Static < -ta/2 3,4204 < 2,7764

( $H_0$ ) = Rejeitada  
( $H_a$ ) = Aceita

**MCPTMS 40%  $\neq$  REF**