



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FÁBIA KAMILLY GOMES DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DA NANOTECNOLOGIA E DOS AGREGADOS LEVES EM  
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS: uma análise experimental das propriedades físicas,  
mecânicas e acústica**

Recife

2022

FÁBIA KAMILLY GOMES DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DA NANOTECNOLOGIA E DOS AGREGADOS LEVES EM  
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS: uma análise experimental das propriedades físicas,  
mecânicas e acústica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Mareze.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

- A554i Andrade, Fábila Kamilly Gomes de.  
Influência da nanotecnologia e dos agregados leves em argamassas cimentícias: uma análise experimental das propriedades físicas, mecânicas e acústica / Fábila Kamilly Gomes de Andrade. – 2022.  
170 f.: il., figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Mareze.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.  
Inclui referências e apêndices.
1. Engenharia civil. 2. Argamassas leves. 3. Nanotecnologia. 4. Absorção sonora. 5. Resistência mecânica. 6. Nanossílica. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Mareze, Paulo Henrique (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-16

FÁBIA KAMILLY GOMES DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DA NANOTECNOLOGIA E DOS AGREGADOS LEVES EM  
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS: uma análise experimental das propriedades físicas,  
mecânicas e acústica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em 21/12/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Marco Antônio Silva Pinheiro (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Santa Maria

Participação por videoconferência  
Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega (examinadora externa)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Alberto Casado Lordsleem Júnior (examinador externo)  
Universidade de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à Dr<sup>a</sup> Socorro por me fornecer uma formação de base de qualidade tão necessária para que eu chegasse até aqui e à minha mãe por sempre buscar meios para isso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me dar forças para concluir este trabalho em meio a um período difícil, que foi a pandemia da Covid-19;

Agradeço a todos os familiares, amigos e colegas de trabalho, que opinaram, ajudaram nos ensaios ou contribuíram para o desenvolvimento do trabalho;

Ao Centro Universitário UNIFBV Wyden, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/PE) e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS) pela infraestrutura e suporte para a realização dos ensaios.

À Votorantim Cimentos e Supermix Concreteira por fornecer alguns dos recursos materiais necessários para a pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Ancelmo, por todo o apoio e incentivo à conclusão, principalmente nesta reta final.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Paulo Mareze, e ao prof. Dr. Marco Antônio, pelas orientações e por viabilizarem os ensaios de absorção sonora com o tubo de impedância.

Àqueles que contribuíram de alguma forma para o andamento deste trabalho. Muito obrigada!

## RESUMO

O uso de agregados leves em compósitos cimentícios tem sido objeto de estudos experimentais, que visam conhecer os seus desempenhos, bem como otimizar as propriedades físicas, mecânicas e acústicas. Muitos trabalhos afirmam que estes agregados leves têm uma influência na absorção sonora, devido a sua leveza, mas em detrimento da resistência mecânica. Para tal, a nanossílica (nS), composta por nanopartículas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), pode ser uma estratégia para melhorar tais propriedades, viabilizando a incorporação destes agregados em teores maiores e até o aproveitamento de resíduos. Diante deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo geral analisar a influência simultânea da nanossílica em pó dispersa em 10 rpm em solução aquosa e dos agregados leves em argamassas cimentícias. Para tanto, foi necessário realizar um estudo preliminar com 6 argamassas convencionais; seguido de um estudo experimental com 18 argamassas leves que utilizaram como agregados a argila expandida (AE), o pó de serra de madeira compensada (SM) e o poliestireno expandido (EPS), sendo 6 composições para cada agregado; por fim, uma seleção de 5 composições para a realização do ensaio de absorção sonora. Como resultados alcançados, verificou-se que o uso da nanossílica contribuiu para um aumento nas densidades no estado fresco e endurecido, reduzindo o teor de ar incorporado, a absorção de água e o coeficiente de capilaridade, o que pode significar aumento da durabilidade do material. Além disso, o uso de 3% de nS aumentou a resistência à tração na flexão e à compressão axial em pelo menos 88% e 158%, respectivamente. Isto comprometeu a absorção sonora destes compósitos, obtida através do ensaio com tubo de impedância, cujo coeficiente de absorção sonora ponderado não ultrapassou 0,04. Assim, conclui-se que os agregados leves, apesar de leves, não contribuíram para a absorção sonora, pois são necessários teores mais elevados de substituição. Ao mesmo tempo, a nanossílica contribuiu para ganhos na resistência mecânica, viabilizando o uso destes agregados leves em teores mais elevados, permitindo até mesmo o reuso de resíduos e contribuindo para a sustentabilidade.

Palavras-chave: argamassas leves; nanotecnologia; absorção sonora; resistência mecânica; nanossílica.

## ABSTRACT

The use of lightweight aggregates in cementitious composites has been the subject of experimental studies, which aim to know their performance, as well as to optimize the physical, mechanical and acoustic properties. Many researchers said that these lightweight aggregates have got an influence on sound absorption, due to their lightness, but it can damage your mechanical strength. Then, nanosilica (nS), composed of silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) nanoparticles, can be a strategy to improve some properties, enabling the incorporation of these aggregates in higher levels and even the use of wastes. The aim was to analyze the simultaneous influence of powdered nanosilica dispersed at 10 rpm in aqueous solution and lightweight aggregates in cementitious mortars. Therefore, it was necessary to perform a preliminary study with 6 conventional mortars; followed by an experimental study with 18 lightweight mortars that used expanded clay (AE), saw dust waste (SM) and expanded polystyrene (EPS) as aggregates (6 mixtures for each lightweight aggregate); finally, the 5 best compositions were choose for the sound absorption test. As results, the use of nanosilica contributed to an increase in the densities in the fresh and hardened state, decreasing the incorporated-air content, the water absorption and the capillarity coefficient, which indicate to increase in the durability of the material. Furthermore, the use of 3% nS increased the tensile flexural strength and compressive strength by at least 88% and 158%, respectively. Therefore, the sound absorption of these composites was harmed, being obtained through the test with an impedance tube, whose weighted sound absorption coefficient did not exceeded 0.04. Thus, these lightweight aggregates, although of the lightness, did not contribute to the sound absorption, because higher levels of substitution are required. Simultaneously, nanosilica contributed to improve to mechanical strength, enabling the use of these lightweight aggregates at higher levels, even allowing the reuse of waste and gains for sustainability.

Keywords: lightweight mortars; nanotechnology; acoustic absorption; nechanical strength; nanosilica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Poros das argilas expandidas.....	25
Figura 2 –	Principais nanomateriais aplicados em compósitos cimentícios: NTCPM (a); nS (b).....	34
Figura 3 –	NTC sem plastificante em (a) e (b) e com plastificante em (c) e (d) .....	35
Figura 4 –	Reação de produção de C-S-H adicional.....	36
Figura 5 –	Solução de água com nS em diferentes estágios.....	37
Figura 6 –	Refinamento dos poros através de pontes de nucleação com C-S-H secundário.....	40
Figura 7 –	Preenchimento dos vazios com diferentes quantidades de nS.....	41
Figura 8 –	MEV de compósitos cimentícios com e sem nS.....	41
Figura 9 –	Ensaio do tubo de impedância.....	45
Figura 10 –	Tubo de impedância da UFSM/RS.....	45
Figura 11 –	Variação do coeficiente de absorção sonora médio em função da frequência.....	46
Figura 12 –	Fluxograma das etapas do programa experimental.....	47
Figura 13 –	Grupos de materiais empregados.....	48
Figura 14 –	Determinação da massa unitária compactada e solta.....	50
Figura 15 –	Secagem ao ar (a) pesagem do frasco (b) dessecador com cristais de sílica e areia (c) .....	50
Figura 16 –	Curva granulométrica da areia natural.....	52
Figura 17 –	Agregados leves utilizados: argila expandida (a), pó de serra (b) e EPS (c) .....	53
Figura 18 –	Molde cilindro CBR com argila moída (a) Soquete de 4,5 kg (b) ...	53
Figura 19 –	Pré-umedecimento do pó de serra com água e cal (a) e após secagem em estufa (b) .....	54
Figura 20 –	Curva granulométrica da argila expandida.....	56
Figura 21 –	Curva granulométrica do pó de serra.....	57
Figura 22 –	Curva granulométrica do EPS.....	58
Figura 23 –	Curvas granulométricas da areia, da argila expandida, do pó de serra e do EPS.....	58

Figura 24 –	Antes (a) e Depois (b) do ensaio de consistência Flow Table.....	61
Figura 25 –	Relação entre fator a/c e espalhamento para uma relação 1:3 com 1% de aditivo.....	61
Figura 26 –	Dispensor elétrico de 10000 rpm.....	62
Figura 27 –	Efeito visual em função da forma de dispersão.....	63
Figura 28 –	Variáveis do estudo experimental.....	65
Figura 29 –	Curva termodiferencial genérica.....	70
Figura 30 –	Curva termogravimétrica genérica.....	71
Figura 31 –	Ensaio de consistência de mesa Flow Table.....	72
Figura 32 –	Calibração do recipiente em (a) e pesagem do recipiente com a argamassa (b) .....	72
Figura 33 –	Corpos de prova para ensaio de absorção por capilaridade.....	73
Figura 34 –	Ensaio de resistência à tração na flexão (a) e de resistência à compressão axial (b) .....	74
Figura 35 –	Tubo de impedância com porta amostra (1), microfones (2) e fonte sonora (3) .....	75
Figura 36 –	Moldagem dos corpos de prova cilíndricos com EVA.....	76
Figura 37 –	Preparação dos corpos de prova no porta amostra.....	76
Figura 38 –	Componentes do ensaio de absorção sonora com tubo de impedância.....	78
Figura 39 –	Difratograma das pastas cimentícias aos 28 dias.....	79
Figura 40 –	Curva termodiferencial das argamassas convencionais aos 7 dias.....	80
Figura 41 –	Curva termodiferencial das argamassas convencionais aos 28 dias.....	80
Figura 42 –	Curva termogravimétrica das argamassas convencionais aos 7 dias.....	81
Figura 43 –	Curva termogravimétrica das argamassas convencionais aos 28 dias.....	81
Figura 44 –	Teor em porcentagem (%) dos compostos hidratados, portlandita e calcita formada.....	83
Figura 45 –	Consistência nas argamassas convencionais.....	84
Figura 46 –	Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das	

	argamassas convencionais.....	85
Figura 47 –	Relação entre densidade fresca e teor de ar incorporado das argamassas convencionais.....	86
Figura 48 –	Densidade de massa aparente das argamassas convencionais.....	87
Figura 49 –	Relação entre densidade e teor de ar incorporado das argamassas convencionais.....	88
Figura 50 –	Absorção aos 90 min e a densidade aparente das argamassas convencionais.....	89
Figura 51 –	Relação linear entre a absorção por capilaridade aos 90 min e a densidade aparente.....	89
Figura 52 –	Coefficiente de capilaridade e densidade aparente das argamassas convencionais.....	90
Figura 53 –	Relação entre o coeficiente e densidade aparente nas argamassas convencionais.....	90
Figura 54 –	Resistência à tração na flexão das argamassas convencionais.....	91
Figura 55 –	Resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias das argamassas convencionais.....	92
Figura 56 –	Resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas convencionais.....	93
Figura 57 –	Desmoronamento do molde de argamassa no ensaio de consistência.....	95
Figura 58 –	Consistência nas argamassas com argila expandida (AE) .....	96
Figura 59 –	Consistência nas argamassas com pó de serra (SM) .....	96
Figura 60 –	Consistência nas argamassas com poliestireno expandido (EPS) ....	97
Figura 61 –	Densidade fresca das argamassas leves com argila expandida (AE) .....	98
Figura 62 –	Teor de ar incorporado das argamassas leves com argila expandida (AE).....	99
Figura 63 –	Densidade fresca das argamassas leves com pó de serra (SM) .....	100
Figura 64 –	Teor de ar incorporado das argamassas leves com pó de serra (SM) .....	101
Figura 65 –	Densidade fresca das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS) .....	102

Figura 66 –	Teor de ar incorporado das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS) .....	103
Figura 67 –	Densidade endurecida das argamassas leves com argila expandida (AE).....	104
Figura 68 –	Densidade endurecida das argamassas leves com pó de serra (SM) .....	104
Figura 69 –	Densidade endurecida das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS) .....	105
Figura 70 –	Absorção por capilaridade das argamassas leves com argila expandida (AE) .....	106
Figura 71 –	Coefficiente de capilaridade das argamassas leves com argila expandida (AE) .....	107
Figura 72 –	Absorção por capilaridade das argamassas leves com pó de serra (SM).....	107
Figura 73 –	Coefficiente de capilaridade das argamassas leves com pó de serra (SM).....	108
Figura 74 –	Absorção por capilaridade das argamassas leves com EPS.....	108
Figura 75 –	Coefficiente de capilaridade das argamassas leves com EPS.....	109
Figura 76 –	Resistência à tração na flexão das argamassas com argila expandida (AE).....	110
Figura 77 –	Resistência à tração na flexão das argamassas com pó de serra (SM) .....	111
Figura 78 –	Resistência à tração na flexão das argamassas com EPS.....	112
Figura 79 –	Resistência à compressão axial das argamassas com argila expandida (AE) .....	113
Figura 80 –	Resistência à compressão axial das argamassas com pó de serra (SM).....	114
Figura 81 –	Resistência à compressão axial das argamassas com poliestireno expandido (EPS) .....	115
Figura 82 –	Estudo de dosagem da argamassa C06 C2;3%nS.....	118
Figura 83 –	Estudo de dosagem da argamassa C05 20%AE;3%nS.....	119
Figura 84 –	Estudo de dosagem da argamassa C16 1%EPS;3%nS.....	119
Figura 85 –	Estudo de dosagem da argamassa C17 2,5%EPS; 3%nS.....	119

Figura 86 –	Densidade fresca das argamassas selecionadas.....	120
Figura 87 –	Teor de ar incorporado das 5 argamassas selecionadas.....	121
Figura 88 –	Densidades aparentes das 5 argamassas selecionadas.....	122
Figura 89 –	Absorção por capilaridade aos 90 minutos das argamassas selecionadas.....	123
Figura 90 –	Coefficiente de capilaridade das argamassas selecionadas.....	123
Figura 91 –	Resistência à tração na flexão em função do fator a/c.....	124
Figura 92 –	Resistência à compressão axial em função do fator a/c.....	125
Figura 93 –	Curvas médias de absorção sonora.....	126
Figura 94 –	Coefficientes de absorção médios por frequência.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo das composições com argila expandida dos principais autores do estado da arte.....	26
Tabela 2 –	Resumo das composições com agregado vegetal dos principais autores do estado da arte.....	29
Tabela 3 –	Resumo das composições com EPS dos principais autores do estado da arte.....	32
Tabela 4 –	Resumo das composições com nanossílica dos principais autores do estado da arte.....	38
Tabela 5 –	Caracterização do cimento.....	49
Tabela 6 –	Caracterização da areia natural.....	49
Tabela 7 –	Caracterização dos agregados leves.....	55
Tabela 8 –	Caracterização do aditivo plastificante e incorporador de ar.....	59
Tabela 9 –	Dados da nS conforme o fabricante.....	59
Tabela 10 –	Composições analisadas no estudo preliminar.....	62
Tabela 11 –	Procedimento de preparo das argamassas.....	64
Tabela 12 –	Tabela resumo dos ensaios experimentais.....	64
Tabela 13 –	Composições analisadas no estudo experimental com argamassas leves.....	66
Tabela 14 –	Tabela resumo dos ensaios experimentais.....	67
Tabela 15 –	Composições escolhidas.....	68
Tabela 16 –	Tabela resumo dos ensaios experimentais.....	69
Tabela 17 –	Relação dos equipamentos para o ensaio com o tubo de impedância.....	77
Tabela 18 –	Teor de compostos hidratados, portlandita e carbonato de cálcio das argamassas.....	82
Tabela 19 –	Coefficientes de absorção médios por frequência e ponderados.....	127

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	20
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>20</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>23</b>
2.1	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES.....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Agregados de base mineral</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Agregados de base vegetal</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Agregados de base polimérica</b> .....	<b>29</b>
2.2	NANOTECNOLOGIA.....	33
<b>2.2.1</b>	<b>Características dos nanomateriais</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Principais tipos de nanomateriais e cuidados</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Nanossílica (nS)</b> .....	<b>35</b>
2.3	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM NANOMATERIAIS.....	37
<b>2.3.1</b>	<b>Desempenho físico</b> .....	<b>39</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Desempenho mecânico</b> .....	<b>42</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Desempenho acústico</b> .....	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>47</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	48
<b>3.1.1</b>	<b>Cimento Portland (CP)</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Areia natural</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Agregados leves</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Aditivos e adições</b> .....	<b>58</b>
3.2	ESTUDO PRELIMINAR EM ARGAMASSAS CONVENCIONAIS.....	60
<b>3.2.1</b>	<b>Composições</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Preparo das misturas</b> .....	<b>62</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio</b> .....	<b>64</b>
3.3	ESTUDO EXPERIMENTAL EM ARGAMASSAS LEVES.....	65
<b>3.3.1</b>	<b>Composições</b> .....	<b>66</b>

<b>3.3.2</b>	<b>Preparo das misturas.....</b>	<b>67</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Ensaio.....</b>	<b>67</b>
3.4	ESTUDO DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS.....	67
<b>3.4.1</b>	<b>Composições.....</b>	<b>68</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Preparo das misturas.....</b>	<b>69</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Ensaio.....</b>	<b>69</b>
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	69
<b>3.5.1</b>	<b>DRX.....</b>	<b>70</b>
<b>3.5.2</b>	<b>ATD e TG.....</b>	<b>70</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Ensaio de caracterização em argamassas.....</b>	<b>72</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Ensaio mecânico.....</b>	<b>74</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Ensaio acústico.....</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO PRELIMINAR EM ARGAMASSAS CONVENCIONAIS.....</b>	<b>79</b>
4.1	DRX.....	79
4.2	ANÁLISES TÉRMICAS DIFERENCIAL (ATD) E GRAVIMÉTRICA (TG).....	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	84
<b>4.3.1</b>	<b>Consistência.....</b>	<b>84</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Densidade fresca e Teor de ar incorporado.....</b>	<b>85</b>
4.4	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	86
<b>4.4.1</b>	<b>Densidade de massa aparente.....</b>	<b>86</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Absorção e coeficiente de capilaridade.....</b>	<b>88</b>
4.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	90
<b>4.5.1</b>	<b>Resistência à tração na flexão.....</b>	<b>91</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Resistência à compressão axial.....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL EM ARGAMASSAS LEVES.....</b>	<b>95</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	95
<b>5.1.1</b>	<b>Consistência.....</b>	<b>95</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Densidade fresca e Teor de ar incorporado.....</b>	<b>97</b>
5.2	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	103
<b>5.2.1</b>	<b>Densidade de massa aparente.....</b>	<b>103</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Absorção e coeficiente de capilaridade.....</b>	<b>106</b>
5.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	110
<b>5.3.1</b>	<b>Resistência à tração na flexão.....</b>	<b>110</b>

5.3.2	<b>Resistência à compressão axial.....</b>	<b>113</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDO DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS.....</b>	<b>117</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	117
6.1.1	<b>Consistência.....</b>	<b>118</b>
6.1.2	<b>Densidade fresca e Teor de ar incorporado.....</b>	<b>120</b>
6.2	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO.....	121
6.2.1	<b>Densidade de massa aparente.....</b>	<b>122</b>
6.2.2	<b>Absorção e coeficiente de capilaridade.....</b>	<b>122</b>
6.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	124
6.3.1	<b>Resistência à tração na flexão.....</b>	<b>124</b>
6.3.2	<b>Resistência à compressão axial.....</b>	<b>125</b>
6.4	ABSORÇÃO SONORA.....	126
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO.....</b>	<b>140</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NATURAL.....</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA.....</b>	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRA .....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO EPS.....</b>	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE F – CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS COMPOSIÇÕES ANALISADAS.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE G – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS CONVENCIONAIS.....</b>	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE H – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS LEVES.....</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE I – RESULTADOS DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS.....</b>	<b>168</b>
	<b>APÊNDICE J – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA.....</b>	<b>169</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados a contextualização do tema, envolvendo o uso de agregados leves em compósitos cimentícios, bem como o uso da nanotecnologia nestes materiais, visando a melhoria nas suas propriedades. Em seguida, são apresentados os objetivos (geral e específicos) desta pesquisa experimental, concluindo com a estrutura do trabalho.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais, principalmente compósitos cimentícios leves, tem atraído o interesse dos pesquisadores nos últimos anos, pois apresentam algumas vantagens, como por exemplo, a redução do peso próprio e menores custos de produção e transporte (FEDEROWICZ *et al.*, 2021).

Estes materiais alternativos comumente estudados também contribuem para o desempenho acústico das edificações, sendo possível empregar até mesmo resíduos de outras indústrias em substituição à areia natural. Vale ressaltar que é importante avaliar a viabilidade econômica destes novos para o local de utilização, tendo em vista as condições atuais de transporte de produção e a aplicação (CARDOSO; CALLEJAS; DURANTE, 2016; PEDROSO; BRITO; SILVESTRE, 2017; PACHECO *et al.*, 2017).

A indústria do concreto está focada em sustentabilidade e estes compósitos também podem reduzir a extração de agregado natural do leito dos rios e a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera (FEDEROWICZ *et al.*, 2021). Sabe-se que a incorporação de resíduos na matriz cimentícia é uma forma de tornar a construção mais sustentável, a partir da substituição de agregados naturais por materiais reciclados, minimizando os impactos ambientais e reduzindo os custos da construção (MENEZES *et al.*, 2018).

Assim, o uso de agregados leves em compósitos cimentícios pode ser vantajoso, permitindo a economia nas fundações e dos elementos estruturais, bem como para alcançar resultados de isolamento térmico e acústico melhores (SANTOS *et al.*, 2015; CORINALDESI; MAZZOLI; SIDDIQUE, 2016; PASSOS; CARASEK, 2018; MENEZES *et al.*, 2018; FEDEROWICZ *et al.*, 2021). Já é conhecido que a incorporação de menores densidades aos compósitos, tornando-os mais leves, pode contribuir para ganhos na absorção sonora, a partir da inserção de produtos como cânhamo, lima, madeira, borrachas, entre outros (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014; KINNANE *et al.*, 2016; HAACH; CARRAZEDO; OLIVEIRA, 2017; ARENAS *et al.*, 2017a).

Sabe-se também que a leveza destes materiais promove uma baixa resistência estrutural e durabilidade, especialmente quando expostos às condições climáticas adversas, mostrando uma diminuição significativa no seu desempenho ao longo do tempo (CARBAJO *et al.*, 2017; KONÁKOVÁ *et al.*; 2017). Por isso, existe uma limitação no emprego destes materiais.

A medida que a densidade diminui, a resistência também diminui devido a menor capacidade de carga dos agregados leves. Outra razão seria o aumento nos vazios devido aos agregados leves, que são mais porosos (FEDEROWICZ *et al.*, 2021; PONGSOPHA *et al.*, 2022).

Pesquisas recentes em nanotecnologia, que também estuda a inserção de nanomateriais em concretos e argamassas convencionais, têm propiciado a melhoria de algumas propriedades destes compósitos leves com o uso de nanopartículas, como as partículas de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), conhecida como nanossílica (AL-RIFAIE, AHMED, 2016; NIVETHITHA; SRIVIDHYA; DHARMAR, 2016; CAMPOS NETO; GEYER, 2019; FEDEROWICZ *et al.*, 2021).

A nanossílica aumenta a zona de transição intersticial (ZTI), deixando a matriz cimentícia mais densa, o que aumenta a resistência mecânica e a durabilidade e reduz os custos com manutenção (BARBHUIYA *et al.*, 2020). Estudos microestruturais confirmam a relação significativa com a porosidade, o que resulta em concretos menos densos e pouco resistentes (SIKORA *et al.*, 2020).

Alguns autores que avaliaram concretos e argamassas convencionais com nanotecnologia concluíram que é possível alcançar resistências à compressão e à tração até 50% maiores, dependendo do teor de nanomaterial (MARCONDES *et al.*, 2015; HARUEHANSAPONG; PULNGERN; CHUCHEEPSAKUL, 2014; AL-RIFAIE; AHMED, 2016).

Outros autores sugerem o estudo combinado de compósitos cimentícios com agregados leves e nanossílica, avaliando as propriedades frescas, endurecidas, térmicas e acústicas (BARBHUIYA *et al.*, 2020). Lefever *et al.* (2020) afirmam que o uso de agregados leves pode até reduzir as propriedades mecânicas do compósito cimentício devido à formação de macroporos, mas a nanossílica pode ser introduzida na mistura para reverter este efeito, favorecendo as propriedades mecânicas em argamassas. Já em concretos, os resultados experimentais também mostram que as propriedades mecânicas e de transporte de água são melhores, bem como a eficiência da nS é melhor do que a da sílica ativa (SIKORA *et al.*, 2020).

No entanto, ainda há problemas com a dosagem, que precisam ser mais estudados, pois os pesquisadores ainda não alcançaram um balanço entre as propriedades, como a densidade, resistência, rigidez e durabilidade (SIKORA *et al.*, 2020; FEDEROWICZ *et al.*, 2021).

O uso da nanossílica com baixas dosagens em compósitos cimentícios contribui para a formação de novos produtos da hidratação na matriz, aumentando a rigidez da interface entre a pasta e os agregados. Porém, para altas dosagens de nS, os novos produtos de hidratação formados apresentam um volume maior, promovendo tensões internas entre a pasta e o agregado, que reduzem a rigidez anterior. Além disso, o alto custo das nanopartículas pode limitar a aplicação em dosagens altas. Assim, grande parte dos estudos estão limitados para baixas dosagens, entre 3 a 10%, os quais se relacionam aos compósitos cimentícios com agregados leves de alto desempenho (ZHANG *et al.*, 2018).

No geral, poucos trabalhos abordam o uso da nanotecnologia para obter ganhos mecânicos em compósitos cimentícios leves (SINGH; SAXENA; KUMAR, 2018), a fim de viabilizar o uso destes agregados e minimizar os impactos ambientais. Menos estudos abordam uma análise do desempenho térmico ou de resistência a incêndios (BASTAMI; BAGHBADRANI; ASLANI, 2014; RASHAD, 2017; SIKORA *et al.*, 2020), assim como trabalhos que explorem uma análise acústica (BAGHERI; NODOUSHAN; AZIMZADEH, 2022). Apesar de alguns autores mencionarem a relevância desta análise combinada (BARBHUIYA *et al.*, 2020).

Dentro deste contexto, o presente trabalho investigou as propriedades físicas, mecânicas e de absorção sonora de argamassas fabricadas com agregados leves e com a adição de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, tendo em vista que as pesquisas em argamassas ainda são pouco exploradas quando comparadas às pesquisas envolvendo o concreto. O programa experimental analisou, inicialmente, o teor ótimo de nanossílica em função de 2 tipos de cimento (CP II F 40 e CP II E 40) em argamassas convencionais. Buscou-se nesta etapa, portanto, a definição de um teor ótimo baseado no desempenho de propriedades físicas e mecânicas.

Posteriormente, foram escolhidos 3 agregados leves comumente usados na indústria da construção civil para o estudo das argamassas leves, sendo: a argila expandida (AE); o pó de serra de madeira compensada (SM) e o poliestireno expandido (EPS). Estes agregados ainda foram analisados em 3 teores diferentes cada um, sendo 10%, 20% e 30% para a argila expandida; 5%, 7,5% e 10% para o pó de serra; e 1%, 2,5% e 5% para o EPS. Para cada uma destas composições, as análises foram feitas com e sem a presença da nanossílica, usando um teor de 3% de substituição em massa pelo cimento.

Por fim, avaliou-se ainda o coeficiente de absorção sonora de 5 composições selecionadas a partir destes estudos, a fim de identificar ganhos na absorção sonora destes materiais. Estas 5 composições foram selecionadas a partir de uma análise das resistências mecânicas e da consistência obtidas, bem como do teor de agregado leve que deve ser o maior possível a fim de alcançar um maior aproveitamento e absorção sonora.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho, os quais contemplam os principais pontos alcançados.

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência simultânea da nanossílica em pó e de agregados leves em argamassas cimentícias convencionais e leves, a partir de um estudo experimental das principais propriedades físicas, mecânicas e de absorção sonora para uma faixa de frequências usual no tubo de impedância (50-1900 Hz).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para a realização do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos também foram necessários:

- Avaliar a influência de 2 tipos de cimento (sendo um com fíller e outro com pozolana), e a ação sinérgica com a nS aos 28 dias em 3 teores distintos (0%, 1% e 3%), a partir de um estudo preliminar com 6 argamassas convencionais, nas quais foram realizadas as análises térmicas diferencial e gravimétrica (ATD-TG) e a caracterização através de Difractometria de Raios X (DRX) das pastas, a caracterização no estado fresco e endurecido e a medição das resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão axial.
- Avaliar a influência da nanossílica e de agregados leves em argamassas cimentícias, a partir de um estudo experimental com 18 argamassas leves, variando o tipo de agregado leve (AE; SM; EPS) e a proporção destes agregados em substituição à areia (com e sem a nS), nas quais foram realizadas a caracterização no estado fresco e

endurecido e a medição das resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão axial.

- Verificar que a adição de nanossílica em compósitos cimentícios leves pode compensar a redução da resistência nestas argamassas devido a adição de agregados leves.
- Verificar a influência dos agregados leves na absorção sonora de argamassas cimentícias com adição de nanossílica, a partir da escolha de 5 composições das etapas anteriores para a realização do ensaio de absorção sonora com o tubo de impedância, identificando os resultados do coeficiente de absorção sonora ponderado ( $\alpha_w$ );
- Verificar a viabilidade técnica das composições analisadas, recomendando proporções para aplicações na construção civil.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por 8 capítulos, sendo o primeiro destinado à introdução, apresentando a contextualização do tema a que se refere o trabalho, os objetivos (geral e específicos) e a estruturação do trabalho.

O Capítulo 2 compreende a fundamentação teórica, apresentando conceitos relevantes para o entendimento do trabalho, associados ao levantamento do estado da arte em relação aos agregados leves, à nanotecnologia e à acústica de materiais de construção.

O Capítulo 3 contempla o programa experimental, detalhando os materiais, as composições a serem analisadas, bem como os ensaios de caracterização, mecânicos e acústico que compõem o planejamento experimental da pesquisa.

O Capítulo 4 compreende os resultados do estudo preliminar das 6 argamassas convencionais, contemplando os resultados da caracterização através de DRX, ATD-TG, consistência, densidade de massa fresca, teor de ar incorporado, densidade de massa aparente, absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos, coeficiente de capilaridade e das resistências à tração na flexão e à compressão axial.

O Capítulo 5 compreende os resultados do estudo experimental das 18 argamassas leves, contemplando os resultados dos ensaios de consistência, densidade de massa fresca, teor de ar incorporado, densidade de massa aparente, absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos, coeficiente de capilaridade e das resistências à tração na flexão e à compressão axial.

O Capítulo 6 contém a caracterização de 5 composições escolhidas com as consistências ajustadas, bem como os resultados das resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão axial e do coeficiente de absorção sonora.

O Capítulo 7 contempla as considerações finais do trabalho com base nos principais resultados alcançados; assim como no Capítulo 8 são propostas pesquisas futuras para investigação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o levantamento do estado da arte acerca de compósitos cimentícios utilizando agregados leves, dos conceitos que envolvem a nanotecnologia e os benefícios da aplicação na construção civil. A seguir, é apresentado o conceito de argamassa leve e suas características, bem como os principais trabalhos identificados no estado da arte que mencionam os compósitos cimentícios com a incorporação parcial de materiais de menores densidades.

### 2.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES

As argamassas leves são obtidas por diminuição da densidade do material, que deve ser inferior a  $2 \text{ g/cm}^3$  ou  $2000 \text{ kg/m}^3$ , a partir de ar incorporado no seu interior através do uso de aditivos ou de cargas leves como agregados (CARDOSO; CALLEJAS; DURANTE, 2016). A NBR 12655 (ABNT, 2015) também estabelece o valor máximo da massa específica real dos agregados leves de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ .

As principais vantagens dos compósitos leves cimentícios em comparação aos tradicionais são a baixa densidade, a relação resistência/peso elevada, o menor coeficiente de condutividade térmica, melhor desempenho à tração e as características acústicas (SAYADI *et al.*, 2016).

Chen, Yu e Brouwers (2017) afirmam que as estruturas porosas dos materiais favorecem a absorção sonora. Assim como Arenas *et al.* (2017a), que concluíram que o aumento da porosidade contribui satisfatoriamente para esta propriedade, mas com perdas na densidade e na resistência mecânica. Também concluíram que a absorção sonora é variável em função da espessura avaliada.

Os agregados leves também são capazes de produzir concretos ou argamassas com resistências moderadas e até altas, mas dependem do tipo de agregado, da composição e da dosagem da mistura. Esta dosagem consiste na definição das proporções dos materiais constituintes com base em conceitos e propriedades técnico-científicos, fundamentados no uso da argamassa (GOMES *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2018).

Estudos com propostas de misturas entre cimento, areia natural e agregados leves têm sido desenvolvidos para caracterizar e analisar a viabilidade técnica. Assim, a eficiência e a sustentabilidade podem ser otimizadas pelo uso de materiais alternativos de mais baixo custo, materiais reciclados, ou de fontes renováveis. No caso de materiais reciclados, eles ainda

contribuem para o saneamento e a preservação das reservas naturais de matérias-primas, proporcionando economia para as empresas e para o estado (ARRUDA FILHO *et al.*, 2012; CARDOSO; CALLEJAS; DURANTE, 2016; TUTIKIAN *et al.*, 2017).

A seguir, são apresentados trabalhos publicados, envolvendo a inserção de agregados leves nestes compósitos, divididos em 3 grupos: agregados de origem mineral, de origem vegetal e de base polimérica.

### **2.1.1 Agregados de base mineral**

Kim *et al.* (2012) investigaram as características do concreto mais leve, relacionando este material com um alto teor de ar incorporado. Os resultados mostraram que uma quantidade adequada de ar incorporado pode contribuir para o ruído aéreo.

Já Godinho e Branco (2013) compararam a redução do ruído de impacto de diversas soluções de argamassa leve, que continham argila expandida, EPS ou cortiça, com o aumento das espessuras analisadas. Foi registrada uma redução sonora de impacto sensível para todas as soluções, sobretudo nas altas frequências, mas que dependiam, sobretudo, da camada de base ou substrato.

Gomes *et al.* (2015) compararam os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das amostras de concreto leves com resíduo de blocos cerâmicos e de blocos de concreto com EPS. Os resultados obtidos com resíduos de blocos cerâmicos foram superiores aos obtidos com resíduos de EPS.

Passos e Carasek (2018) identificaram um ganho em torno de 60% na resistência à tração na flexão de argamassas com fibras de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita expandida, quando comparada a outras composições com EPS, também testada por estes autores.

Arenas *et al.* (2017b) adicionaram cinza de carvão em concretos para barreiras acústicas, avaliando a granulometria do agregado leve e o coeficiente de absorção sonora obtido através do tubo de impedância. Concluíram que todas os espécimes testados com granulometria do tipo 1 (2,5 mm a 7 mm) alcançaram resultados de coeficientes superiores aos espécimes do tipo 2 (inferior a 2,5 mm), justificando que partículas maiores desenvolvem uma matriz mais porosa; enquanto, as partículas menores preenchem mais a estrutura interna.

Barroca, Nepomuceno e Oliveira (2015) afirmam que a granulometria e o volume dos agregados leves influenciam as propriedades da microestrutura morfológica da argamassa. A

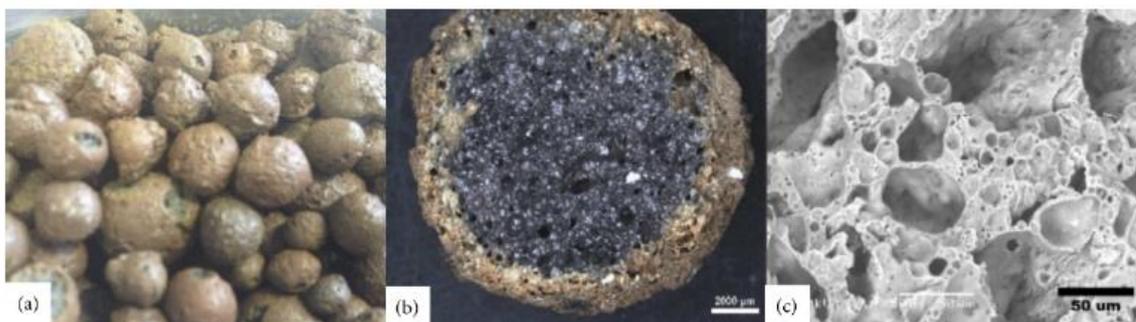
dimensão, a quantidade e a forma dos poros, torna a estrutura porosa de fundamental importância em argamassas leves.

Carbajo *et al.* (2017) avaliaram as propriedades acústicas do concreto, utilizando também a argila expandida. Estes autores trabalharam com painéis vazados de concreto, que já são de aplicação prática e com absorção sonora reconhecida através de perdas viscosas em seus poros e orifícios.

Konáková *et al.* (2017) e Ahmad e Chen (2019) afirmam que a argila expandida também pode reduzir a densidade em concretos, sem perdas significativas na resistência mecânica e ainda com ganhos no desempenho térmico. Inclusive, estes últimos verificaram que o aumento no teor de argila expandida com 10% de sílica ativa pode levar a resistências mais elevadas.

Vale ressaltar que os agregados leves provenientes de argila expandida ou Resíduos de Construção e Demolição (RCD), quando utilizados secos na dosagem de argamassas e concretos, possuem a tendência de absorver água para os seus poros, dando origem a uma interface entre a pasta e os agregados mais densa durante a hidratação do cimento (BARROCA; NEPOMUCENO; OLIVEIRA, 2015; ANGELIM; LINTZ; BARBOSA, 2017). A argila expandida, inclusive, já é usada em concretos estruturais devido à sua estrutura porosa obtida através da queima, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Poros das argilas expandidas



Fonte: Federowicz et a. (2021)

A Tabela 1 traz um resumo das composições dos principais autores que utilizaram a argila expandida como agregado leve, tendo em vista que este trabalho experimental também analisou este agregado.

Conforme a Tabela 1, nota-se que a maioria dos trabalhos pesquisados contemplaram o estudo em concretos, sendo uma minoria em argamassas. Isso se deve à granulometria da argila expandida que excede a dimensão máxima para agregado miúdo, que é de 4,75 mm, segundo

a NBR 17054 (ABNT, 2022). Para utilizar este agregado em argamassas, é necessário inicialmente submeter este material à moagem, a fim de reduzir a sua granulometria.

As relações aglomerante/agregado foram de 1:3, 1:4 e 1:6 aproximadamente, bem como a quantidade de água que dependeu do uso ou não do aditivo. No geral, quando se fez o uso do aditivo plastificante, as relações entre a água e o aglomerante (fator a/c) foram menores, variando entre 0,25 e 1,41.

Tabela 1 - Resumo das composições com argila expandida dos principais autores do estado da arte

Referência	Compósito	Relação aglomerante e agregado	Fator a/c	Tipo de agregado	Teor de agregado leve	Teor de Plastificante
Godinho e Branco (2013)	Argamassa	1:6	0,5	Argila expandida e EPS 2 a 4 mm	100% e 3%	Não utilizado
Barroca, Nepomuceno e Oliveira (2015)	Concreto	1:1:5 <sup>1</sup>	0,68 e 0,91	Argila expandida	25%; 50%, 75% e 100% <sup>1</sup>	Não informado
Konáková <i>et al.</i> (2017)	Argamassa	1:2,96	1,11 a 1,41	Argila expandida < 4,75 mm	33%, 50% e 100% <sup>1</sup>	Não utilizado
Carbajo <i>et al.</i> (2017)	Concreto	1,94:1	0,5	Argila expandida < 8 mm	100% <sup>1</sup>	Não utilizado
Angelim, Lintz e Barbosa (2017)	Concreto	1:1,28:1,6	0,40	Argila expandida < 10 mm	25%, 50%, 75% e 100%	Não informado
Ahmad e Chen (2019)	Concreto	1:1:2,55	0,25	Argila expandida < 10 mm	26% a 49,5%	0,2 a 0,3%

Fonte: A Autora (2022)

<sup>1</sup> Substituição em volume do agregado natural por agregado leve

Alguns trabalhos utilizaram a substituição em volume do agregado natural pela argila expandida, conforme indicado na Tabela 1; porém, considera-se a substituição em massa mais adequada, tendo em vista que a substituição em volume não garante a mesma compactação para cada dosagem. Para os trabalhos com substituição em massa, como Angelim, Lintz e Barbosa (2017) e Ahmad e Chen (2019), as substituições do agregado natural variaram entre 25% e 100%.

Esta Tabela 1 contribuiu para definições feitas na metodologia deste trabalho, principalmente quando relacionadas à relação aglomerante/agregado e ao teor de substituição do agregado natural pelo leve.

### 2.1.2 Agregados de base vegetal

Muitos pesquisadores também estudaram o desempenho de materiais de construção de base vegetal, principalmente como material acústico (PEREZ *et al.*, 2016; CHEN; YU; BROUWERS, 2017; D'ALESSANDRO *et al.*, 2018; PEDROSO; BRITO; SILVESTRE, 2017).

Perez *et al.* (2016) estudaram a capacidade de isolamento acústico de paredes verdes em edifícios, alcançando ganhos em torno de 1 dB para o ruído de tráfego e entre 2 a 3 dB para o ruído rosa, utilizado em ensaios laboratoriais para a medição do isolamento sonoro.

Chen, Yu e Brouwers (2017) avaliaram 3 granulometrias distintas de uma fibra agrícola de miscanthus adicionadas como agregado leve ao concreto, observando um aumento no coeficiente de absorção sonora, principalmente em frequências médias (500 Hz a 1500 Hz). Estes autores também concluíram a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que as fibras com granulometrias entre 2 a 4 mm apresentavam poros mais abertos, o que pode ter contribuído para uma maior absorção sonora.

Arruda Filho *et al.* (2012) avaliaram placas cimentícias sem fibras e com fibras de sisal distribuídas de forma randômica e alinhadas dentro da matriz. Estes autores afirmam que a adição de fibras contribui para a redução da fissuração na matriz de materiais cimentícios, além de aumentar a tenacidade e as resistências à tração e ao impacto. No entanto, tais benefícios dependem da interação entre estes elementos e das características físicas e geométricas.

Chen, Yu e Brouwers (2017) também verificaram diferenças na absorção de água, concluindo que as partículas menores de fibras, devido uma maior superfície específica, absorvem uma maior quantidade de água, o que pode ter contribuído para uma estabilização mais rápida da mistura pasta-agregados. Além disso, quanto maior a substituição parcial do agregado convencional pelo leve, menor é a fluidez, indicando o uso de aditivo superplastificante nos casos de elevadas substituições.

D'Alessandro *et al.* (2018) verificaram que o teor de umidade pode afetar os materiais acústicos com origem vegetal, variando em função do tipo de estrutura: fibroso ou granular. Porém, há aumento do coeficiente de absorção sonora destes materiais a níveis bem satisfatórios (próximo a 1), mas, que ainda são necessários mais estudos nesta área.

Pedroso, Brito e Silvestre (2017) compararam os coeficientes de absorção sonora de diversos materiais comumente usados para melhorar a absorção sonora, como a lâ de rocha e lâ de

vidro de origem mineral, com materiais alternativos, como aglomerado de cortiça, madeira ou fibra de coco, concluindo que estes novos materiais alcançam coeficientes melhores em frequências mais baixas, principalmente em torno de 500 Hz, que é uma frequência usualmente analisada em recintos fechados.

Já Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016) estudaram 3 diferentes tamanhos de resíduos de madeira adicionados em argamassas a base de cimento, concluindo que granulometrias mais finas podem apresentar resultados de resistência à compressão e flexão melhores do que os resultados de composições com granulometrias maiores, para a mesma mistura. Além disso, concluíram que substituições parciais de agregados naturais pela madeira entre 2,5% e 5% apresentam resultados de resistência melhores do que substituições de 10%. No entanto, substituições de 2,5% implicam em argamassas com massa específica superior a  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , o que não apresenta uma diferença significativa de densidade em relação à argamassa sem o agregado leve.

Alguns autores mencionam que a inserção de fibras na matriz cimentícia pode contribuir para ganhos na resistência, sobretudo à tração. O aumento da resistência à tração na flexão pode contribuir significativamente com o aumento da resistência de aderência de argamassas e, por consequência, com o desempenho a longo prazo do revestimento, uma vez que influencia no combate à fissuração (PASSOS; CARASEK, 2018).

A Tabela 2 traz um resumo das composições dos principais autores que utilizaram o pó de serra ou madeira como agregado leve, tendo em vista que este trabalho experimental também analisou este agregado.

Nota-se que a maioria dos trabalhos pesquisados presentes na Tabela 2 contemplaram o estudo em argamassas, sendo uma minoria em concretos. Nestes casos, como o agregado vegetal se apresenta como um pó, na maioria das vezes, torna-se mais provável encontrar trabalhos que contemplem o estudo em argamassas. Além disso, há uma dificuldade na aderência deste agregado à pasta cimentícia, como indicado por Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016), o que reduz a resistência de compósitos aos valores ideais para as argamassas.

Já as relações aglomerante/agregado foram bem diferentes, variando entre 1:2, 1:3, 1:4 e 1:6, assim como a quantidade de água que variou bastante, sendo entre 0,4 e 1,1. O uso do aditivo plastificante foi mais presente nestas composições, tendo em vista que as composições leves com este tipo de agregado necessitam de mais água de amassamento.

Alguns trabalhos também utilizaram a substituição em volume do agregado natural pelo vegetal, conforme indicado na Tabela 2. Devido à semelhança do agregado utilizado por Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016), esta pesquisa experimental considerou como os percentuais de substituição do agregado vegetal utilizados por estes autores como referência.

Tabela 2 - Resumo das composições com agregado vegetal dos principais autores do estado da arte

Referência	Compósito	Relação aglomerante e agregado	Fator a/c	Tipo de agregado	Teor de agregado leve	Teor de Plastificante
Arruda Filho <i>et al.</i> (2012)	Argamassa	1:6	0,4	Fibras de sisal	1%, 1,5% e 2,0%	0,3% a 4,5%
Barroca, Nepomuceno e Oliveira (2015)	Argamassa	1:1:5	0,7 a 1,1	Cortiça	25%, 50%, 75% e 100% <sup>1</sup>	0,8%
Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016)	Argamassa	1:3 e 1:2	0,5	Madeira e Pó de serra	2,5%; 5% e 10%	Não utilizado
Chen, Yu e Brouwers (2017)	Concreto	1:4	0,45	Fibra vegetal	10%, 20% e 30% <sup>1</sup>	0,1%

Fonte: A Autora (2022)

<sup>1</sup> Substituição em volume do agregado natural por agregado leve

Esta Tabela 2 contribuiu para definições feitas na metodologia deste trabalho, principalmente quando relacionadas à relação aglomerante/agregado e ao teor de substituição do agregado natural pelo leve.

### 2.1.3 Agregados de base polimérica

Cintra, Paiva e Baldo (2014) avaliaram 4 composições de argamassas leves com vermiculita, sendo 2 com resíduos de borracha de pneu, concluindo que a adição da borracha contribui para ganhos na resistência mecânica à compressão e aderência sob tração, reduzindo o teor de ar incorporado. No entanto, estes autores não realizaram a análise acústica e térmica destas composições.

Pongsopha *et al.* (2022) compararam amostras com agregado leve e amostras com agregado leve e um derivado da borracha, concluindo que o uso da borracha provocou queda de 10% na densidade, 21,4% na resistência mecânica à compressão e 35% na resistência à tração na flexão, 14% de redução na condutividade térmica; além do aumento do coeficiente de absorção sonora em função da frequência e do teor de agregado leve de 0% a 50%.

Brancher *et al.* (2016) adicionaram policloreto de vinila (PVC) com substituições parciais de 10%, 25% e 50% da areia natural em argamassas cimentícias, obtendo resultados de

resistência à tração na flexão e de compressão superiores para maiores teores de polímeros adicionados. Os autores justificam estes resultados através do melhor empacotamento dos grãos nas amostras, que pode ocasionar resistências maiores, mesmo com menores densidades.

Já Andrade e Guimarães (2017) adicionaram Etileno Acetato de Vinila (EVA), um polímero termo-fixo, em substituição parcial de 5%, 10% e 15% da areia natural em argamassas, comparando os resultados de resistência à compressão aos 28 dias. Estes autores concluíram que a adição de um agregado leve implica em menores resistências do compósito cimentício, mas que ainda pode ser utilizada como argamassas de revestimento, podendo trazer ganhos na absorção sonora em função de menores densidades encontradas. No entanto, a absorção sonora não foi uma propriedade mensurada pelos autores.

Tutikian *et al.* (2017) também avaliaram o EVA em substituições de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da areia natural em argamassas para contrapiso, concluindo que a partir de 60% a perda na resistência mecânica foi mais acentuada e o isolamento sonoro ao ruído de impacto foi atendido apenas com 100% de substituição. Estes autores não analisaram quanto ao ruído aéreo.

Pacheco *et al.* (2017) também substituíram os agregados naturais por EVA, avaliando também o isolamento sonoro ao ruído de impacto. Verificou-se que quanto maior a quantidade de agregado graúdo de EVA, em relação ao agregado miúdo, menor é a massa específica, devido ao maior número de espaços entre partículas maiores. Por consequência, foram obtidos resultados de isolamento melhores. Com este comportamento, o agregado de EVA mantém o efeito pneumático da redução do amortecimento mecânico, mesmo com as superfícies dos grãos em contato com a pasta de cimento.

O poliestireno expandido (EPS), conhecido como Isopor®, também pode ser adicionado em compósitos, conforme afirmam alguns autores. Este polímero é composto por 98% de ar, o que contribuiu satisfatoriamente para um produto mais leve e com propriedades térmicas e acústicas. Além disso, é um material que ocupa bastante volume na disposição do compósito cimentício (MENEZES *et al.*, 2018).

Sayadi *et al.* (2016) também afirmam que o EPS utilizado como agregado leve possui uma maior resistência ao ataque químico de ácidos e álcalis devido ao comportamento inerte que este material apresenta. Porém, é recomendado o uso deste polímero com plastificante – teores até 5 % - para aumentar a trabalhabilidade e evitar a segregação deste com a pasta, já

que o EPS possui natureza hidrofóbica. Passos e Carasek (2018) também falam da utilização de aditivos de base acrílica, a fim de aumentar a adesão do EPS à pasta de cimento.

Os aditivos incorporadores de ar também podem influenciar o comportamento de argamassas com EPS, conforme visto por Ferrándiz-Mas e García-Alcofel (2013), sendo capazes de interromper a continuidade da rede capilar, e assim, reduzir a absorção de água.

Sabe-se também que os concretos leves com EPS com substituições em volume da areia natural sofrem reduções na resistência à compressão, dependendo do volume de EPS. Sayadi *et al.* (2016) também realizaram ensaios de densidade, resistência ao fogo e condutividade térmica em concretos com EPS, concluindo que estas propriedades diminuem na presença do polímero. Os autores não realizaram ensaios acústicos para a caracterização completa do desempenho deste material.

Pczieczech *et al.* (2017) avaliaram argamassas com substituições de 7,5% e 15% do volume de areia natural por EPS, verificando que a consistência e o índice de vazios têm relação direta com o teor de polímero; enquanto, a massa específica e a retenção de água têm relação inversa. Os autores também verificaram uma redução de 26% e 40% na resistência à compressão para 7,5% e 15% de substituição, respectivamente.

Menezes *et al.* (2018) avaliaram amostras de argamassas com substituição de 20% e 40% da areia natural por EPS, observando uma perda média de 25% e 44% na resistência à compressão aos 28 dias, respectivamente. Já em relação as resistências à tração na flexão aos 28 dias, as perdas foram de 18% e de 23%, respectivamente. Estes autores afirmam que o uso deste agregado leve ainda é limitado para argamassas não estruturais, mas que a substituição da areia natural por 20% de EPS representa uma possibilidade sem grandes perdas ao produto final.

A utilização do EPS em substituição parcial à areia natural pode contribuir, consideravelmente, para a redução na densidade de massa, na condutividade térmica e na absorção por capilaridade devido as suas características hidrofóbicas. Assim, altos teores na matriz cimentícia são capazes de aumentar a durabilidade de argamassas e concretos (FERRANDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2013; FERRÁNDIZ-MAS *et al.*, 2014; SAYARDI *et al.*, 2016; PASSOS; CARASEK, 2018).

A Tabela 3 traz um resumo das composições dos principais autores que utilizaram o EPS como agregado leve, tendo em vista que esta pesquisa experimental também analisou este agregado.

Conforme a Tabela 3, nota-se que a maioria dos trabalhos pesquisados também contemplaram o estudo em argamassas, sendo uma minoria em concretos. Nestes casos, é possível adquirir pérolas de EPS com dimensões inferiores a 4,75 mm facilmente no mercado para a produção de argamassas.

Já as relações aglomerante/agregado encontradas foram 1:3 e 1:6 aproximadamente, assim como o fator a/c variou bastante, sendo entre 0,5 e 1,3. O uso do aditivo plastificante também foi mais presente nestas composições, tendo em vista que há uma dificuldade na homogeneidade deste agregado à pasta cimentícia, devido a sua característica hidrófuga, o que promove a segregação deste componente leve à mistura. Assim, conforme indicado por Passos e Carasek (2018), é altamente recomendado o uso de aditivo plastificante para evitar esta segregação.

Tabela 3 - Resumo das composições com EPS dos principais autores do estado da arte

Referência	Compósito	Relação aglomerante e agregado	Fator a/c	Tipo de agregado	Teor de agregado leve	Teor de Plastificante
Ferrandiz-Mas e García-Alcocel (2013)	Argamassa	1:3	0,5	EPS < 3mm	10%, 30%, 50%, 70%	0,8%
Ferrándiz-Mas <i>et al.</i> (2014)	Argamassa	1:3	0,6; 0,75; 1; 1,2; 1,3	EPS < 1mm	60% <sup>1</sup>	0,5% e 0,8%
Menezes <i>et al.</i> (2018)	Argamassa	1:3	0,6	EPS < 4,8 mm	20% e 40%	Não utilizado
Passos e Carasek (2018)	Argamassa mista	1:0,5:6	0,85 e 0,97	EPS < 4,8 mm	80% e 90%	0,13% e 0,20%
Barroca, Nepomuceno e Oliveira (2015)	Concreto	1:1:5	0,91 e 0,97	EPS	25% e 50% <sup>1</sup>	Não informado
Gomes <i>et al.</i> (2015)	Concreto	1:2,52:2,23	0,65	EPS >4,8 mm	100% <sup>1</sup>	Não utilizado

Fonte: A Autora (2022)

<sup>1</sup> Substituição em volume do agregado natural por agregado leve

Com relação aos teores de substituição do agregado natural pelo EPS, os valores apresentados foram considerados bastante elevados para a substituição em massa e, por isso, foram adotados valores de até 5% em substituição, mediante uma verificação experimental no laboratório.

Esta Tabela 3 contribuiu para definições feitas na metodologia deste trabalho, principalmente quando relacionadas à relação aglomerante/agregado e ao teor de substituição do agregado natural pelo leve.

## 2.2 NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia tem propiciado à indústria da construção civil o desenvolvimento de novos produtos, a partir da inserção de nanomateriais (ou nano-estruturas). A seguir, são apresentadas as principais características destes materiais, bem como os principais tipos e o levantamento do estado da arte quanto à aplicação em compósitos cimentícios.

### 2.2.1 Características dos nanomateriais

Estes materiais apresentam pelo menos uma dimensão crítica inferior a 100 nm (na ordem de  $10^{-9}$  metros), podendo variar entre 1 a 100 nm. Por isso, tendem a apresentar propriedades físicas e químicas inteiramente novas e interessantes, preenchendo mais facilmente os vazios de produtos que estejam inseridos (FLORES-COLEN; SOARES; DE BRITO, 2013; DE PAULO; CAETANO; GERALDO, 2015; MARCONDES, 2015; SETIATI, 2017).

Por apresentar escala nanométrica, os nanomateriais também são capazes de aumentar a área superficial, sendo muito mais reativos que os materiais comumente utilizados. Isso traz algumas vantagens em termos de reforço e de eficiência. Estes também absorvem ou liberam calor mais facilmente e a temperatura de fusão tende a ser menor no caso de sólidos (DE PAULO; CAETANO; GERALDO, 2015; LEMES, 2016).

No entanto, quanto maior for a superfície específica, mais água é necessária para as reações de hidratação. Caso contrário, a fluidez da mistura pode ser prejudicada (NOGUEIRA *et al.*, 2018).

### 2.2.2 Principais tipos de nanomateriais e cuidados

Os nanomateriais são tipicamente classificados em 0-D (nanopartículas), 1-D (nanotubos, nanofilamentos e nanofibras), 2-D (nanofilmes e nano-revestimentos), e 3-D (maciço). Esta classificação baseia-se no número de dimensões não confinadas à escala nano (GONÇALVES 2012; FLORES-COLEN; SOARES; DE BRITO, 2013).

As nanopartículas (0-D) e os nanotubos de carbono (1-D) são comumente usados em argamassas e concretos, a fim de obter desempenhos maiores que as argamassas convencionais (FLORES-COLEN; SOARES; DE BRITO, 2013).

As nanopartículas inseridas em argamassas e concretos que vêm sendo estudadas com maior frequência são a nanossílica, a nanopartícula de titânio, a nanoalumina, o nanometacaulino e as nanoargilas. Já os nanotubos de carbono (NTC), os mais usados em compósitos cimentícios

são os de paredes múltiplas (NIVETHITHA; SRIVIDHYA; DHARMAR, 2016; XIAOYU; YINGFANG; HAIYANG, 2018; SOLEYMANI; MAHDIEI; HAERIFAR, 2019; DUART, 2021).

Os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM) e a nanossílica (nS) se destacam em termos de trabalhos já publicados (MEDEIROS *et al.*, 2015; BARBHUIYA *et al.*, 2020). O primeiro apresenta coloração preta (a); enquanto, o segundo é branco (b), conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2 - Principais nanomateriais aplicados em compósitos cimentícios: NTCPM (a); nS (b)

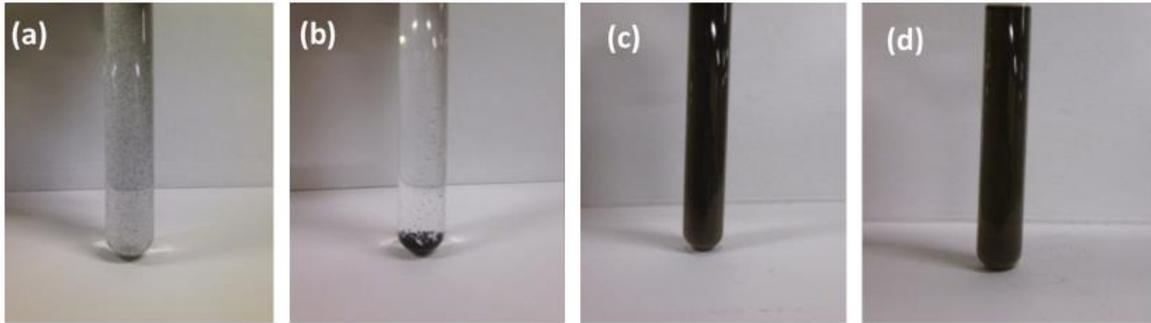


Fonte: (a) Adaptado de Lemes (2016) e (b) Autoria própria (2022)

Os NTCs são materiais hidrofóbicos e, portanto, não podem ser dispersos em água. Para que isso ocorra, é necessário realizar um procedimento inicial de oxidação com ácido sulfúrico e nítrico na proporção 3:1 e, posteriormente, submeter a solução à sonificação por imersão durante 1h (DUART, 2021). Tal técnica exige maiores cuidados em laboratório e equipamentos adequados para manuseio dos ácidos.

Mendoza, Sierra e Tóbon (2013) e Marcondes *et al.* (2015) mostraram que o uso de aditivo superplastificante também auxilia na dispersão do NTC em água com homogeneizador ultrassônico., mesmo após as 24h (Figura 3). Sem o uso do aditivo, o NTC apresenta dificuldade de dispersão (Figura 3a), podendo sofrer decantação após as 24h da mistura com a água (Figura 3b), o que prejudica sua atuação. Já com o uso do aditivo, a solução apresenta melhor dispersão (Figura 3c), mesmo após 24 h (Figura 3d).

Figura 3 - NTC sem plastificante em (a) e (b) e com plastificante em (c) e (d)



Fonte: Mendoza, Sierra e Tóbon (2013)

Os grãos secos de nanossílica (nS) também devem passar por um procedimento de preparação antes de serem inseridos na mistura cimentícia, garantindo a completa dispersão na água de amassamento ou no aditivo. A nanossílica apresenta uma forte tendência à adsorção iônica em meio aquoso, logo a formação de aglomerados é esperada e, por isso, os aditivos plastificantes são indicados para auxiliar na dispersão das partículas em meio aquoso (CAMPOS NETO; GEYER, 2017; NOGUEIRA *et al.*, 2018).

Além da dispersão adequada, Gonçalves (2012) destaca a elevada toxicidade destes nanomateriais e a necessidade de cuidados no manuseio. Quando inaladas, as nanopartículas podem se depositar no sistema respiratório, possibilitando a invasão das células e, assim, alcançar o sistema circulatório e linfático. Também já foram observadas nanopartículas no sistema nervoso central e gânglios. A elevada área superficial torna estas partículas mais ativas e, potencialmente, inflamatórias. Portanto, o seu manuseio exige cuidados que impeçam a inalação, ingestão e/ou o contato direto com estes materiais

### 2.2.3 Nanossílica (nS)

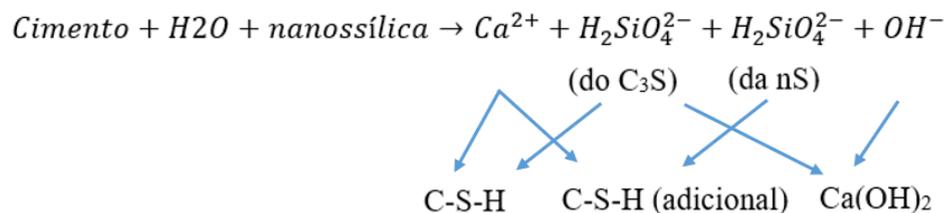
A nanossílica consiste essencialmente de partículas ultrafinas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na forma cristalina (amorfa), sendo considerada um bom material pozolânico a ser adicionado em compósitos cimentícios. Este nanomaterial apresenta dimensões reduzidas entre 10 nm e 50 nm e elevada pureza (99% de  $\text{SiO}_2$ ), o que contribui para a alta capacidade de empacotamento de partículas, reduzindo a permeabilidade de concretos e argamassas (HARUEHANSAPONG; PULNGEN; CHUCHEEPSAKUL, 2014; SONEBI *et al.*, 2015; CAMPOS NETO; GEYER, 2017).

Em geral, o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), na escala micro ou nano, retarda a reação exotérmica do cimento devido às partículas em hidratação estarem mais separadas pela presença da adição mineral e, o fluxo de calor é mais baixo, sendo proporcional ao teor de clínquer presente (CAMPOS NETO; GEYER, 2017). Também podem participar da processo de hidratação para gerar cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) através da reação com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  (HARUEHANSAPONG; PULNGEN; CHUCHEEPSAKUL, 2014).

Sem dúvida, a mais significativa contribuição da nanossílica é a produção do gel de C-S-H secundário, conforme apresenta a Figura 4. O conteúdo de portlandita ou  $\text{Ca(OH)}_2$  no compósito é reduzido através das reações com a nanossílica, formando um produto denso adicional (BARBHUIYA *et al.*, 2020).

Sonebi *et al.* (2015) afirmam que não há consenso no teor de nS ideal para argamassas e concretos, embora se utilize em muitos estudos o teor de 10% sobre o peso do cimento, aproximadamente. Entretanto, Birick e Sarier (2014) afirmam que uma regra prática na dosagem máxima aceitável para nS foi estabelecida como 5% sobre o peso do cimento.

Figura 4 - Reação de produção de C-S-H adicional



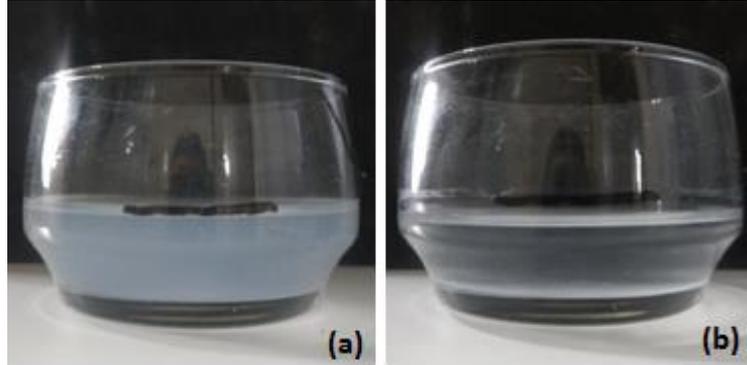
Fonte: Adaptado de Barbhuiya *et al.* (2020)

Mendes, Repette e Reis (2017) indicam um teor ótimo de 0,62% de nanossílica, considerando resistências à compressão e tração na flexão devido ao efeito de empacotamento dos grãos e a reação pozolânica da nanossílica. Já Nogueira *et al.* (2018) avaliaram 2 teores de nanossílica dispersa em policarboxilato (0,2 e 0,4%) em substituição à massa de cimento, verificando que ambos melhoraram as propriedades mecânicas e as características microestruturais dos compósitos cimentícios, mas sem diferenças significativas entre elas.

A nS também pode ser adicionada em dispersão coloidal, que pode absorver parte da água da mistura, reduzindo a consistência das argamassas quando adicionada em teores até 7%; enquanto em teores maiores, a nS não reage, aumentando novamente a consistência da mistura devido à formação dos aglomerados (CAMPOS NETO; GEYER, 2019).

A Figura 5 apresenta um procedimento simples para a verificação deste efeito, que foi observado por Campos Neto e Geyer (2019) e outros autores.

Figura 5 - Solução de água com nS em diferentes estágios



Fonte: A Autora (2022)

Na Figura 5a, o nível de água com nS, foi marcado e o recipiente foi deixado em repouso a temperatura ambiente. Na Figura 5b, após 2 dias, já é possível perceber uma redução evidente no nível de solução e uma deposição de material no fundo do recipiente. Um plástico filme de PVC foi colocado sobre o recipiente para evitar a evaporação da água durante estes 2 dias.

Haruehansapong, Pulngen e Chucheeesakul (2014) e Sonebi (2015) recomendam a adição da nS inicialmente com água e, posteriormente, com o aditivo, agitando-os por um tempo de 1 minuto, a fim de melhorar a dispersão das nanopartículas na água, evitando a formação de aglomerados.

Esta formação de aglomerados, juntamente com o risco de dispersão inadequada, o custo elevado e a não disponibilidade em muitos países, vem limitando a utilização da nanossílica em larga escala na construção. Porém, vale salientar que este nanomaterial pode reduzir o consumo de cimento, o qual é responsável pelo lançamento de CO<sub>2</sub> e que contribui para o aquecimento global. Todos estes aspectos fazem a adição de nanossílica em compósitos uma proposta essencial e sustentável a ser estudada em aplicações futuras na construção (BARBHUIYA *et al.*, 2020).

### 2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM NANOMATERIAIS

A introdução de nanomateriais nas argamassas pode contribuir, a custos aceitáveis de produção, para melhorias ao longo do tempo e em condições reais de serviço destas argamassas. Estas melhorias estão relacionadas ao comportamento mecânico, módulo de

elasticidade, durabilidade, estética e desempenhos térmico e acústico (FLORES-COLEN; SOARES; DE BRITO, 2013).

A Tabela 4 apresenta um resumo das composições dos principais autores que utilizaram a nanossílica em argamassas e concretos. Nota-se que a maioria dos trabalhos pesquisados contemplaram o estudo em concretos, tendo em vista que a principal propriedade analisada com o uso de nanomateriais é a resistência mecânica. Isto propõe uma análise mais profunda de outras propriedades, como as físicas, as quais foram contempladas nesta pesquisa experimental. Além disso, as inúmeras aplicações das argamassas numa obra reforçam a necessidade de se conhecer tais características.

Também se verifica que a relação aglomerante/agregado variou entre 1:1 e 1:5, tendo em sua grande maioria, adotado a relação 1:3, aproximadamente. O fator a/c apresentou uma variação grande, sendo entre 0,25 e 0,65, estando relacionado ao teor de aditivo plastificante.

Tabela 4 - Resumo das composições com nanossílica dos principais autores do estado da arte

Referência	Compósito	Relação Aglomerante Agregados	Fator a/c	Tipo de nS	Teor de nS	Teor de Plastificante
Haruehansapon, Pulngern e Chucheepsakul (2014)	Argamassa	1:2,75	0,65	Em pó de 20 nm	3%; 6%; 9% e 12%	não informado
Al-Rifaie e Ahmed (2016)	Argamassa	1:1; 1:1,5; 1:2; 1:2,5; 1:3	0,34 e 0,4	Em pó	10%	1,4%
Biricik e Sarier (2014)	Argamassa	1:0,77	0,5	Em pó	5% e 10%	1,1%, 2,5%
Mohamed (2015)	Argamassa	1:2,6	0,36	Em pó	0,5% a 10%	não informado
Zanon, Schmalz e Ferreira (2018)	Concreto	1:1,6:1,6	0,4	Estabilizada	0,1%-0,7%	não adicionado
Schwartz e Cassol (2018)	Concreto	1:1,6:1,15	0,46	Estabilizada	0,45% a 1%	não adicionado
Campos Neto e Geyer (2019)	Concreto	1:1,86: 2,59	0,45	Estabilizada	0,28%	não adicionado
Said <i>et al.</i> (2012)	Concreto	1:2:3	0,4	Estabilizada	0%, 3% e 6%	0,40%
Bastami, Baghbadrani e Aslani (2014)	Concreto	1: 1,4: 2,85	0,25	Em pó	0%, 1,5%, 3% e 4%	2% - 4%
Mendes, Repette e Reis (2017)	Concreto	1:0,5:0,5	0,27	Em pó	0,3%;0,6%; 1,2%; 2,5%; 5% e 10%	1,6%

Fonte: A Autora (2022)

Alguns autores utilizaram a nS em pó incorporada a um aditivo plastificante; enquanto outros utilizaram um produto já comercializado no Brasil, conhecido como nanossílica estabilizada. Este nanomaterial se encontra em suspensão coloidal num aditivo plastificante, cujo teor não é informado pelo fabricante. Campos Neto e Geyer (2019) supõem que este teor seja inferior a

10%. Por este motivo, deu-se a preferência à nS em pó, a fim de obter maior controle da dosagem deste componente nas misturas.

A partir da Tabela 4, verifica-se que os teores de nS foram bem distintos (0,3% a 10%), sendo necessário realizar um estudo preliminar de dosagem em argamassas convencionais, a fim de conhecer o comportamento destas misturas. Devido à semelhança da nS utilizada nesta pesquisa experimental com a nanossílica utilizada por Haruehansapon, Pulngern e Chucheepsakul (2014), os teores adotados por estes autores foram utilizados como referência.

Esta Tabela 4 contribuiu para definições feitas na metodologia deste trabalho, principalmente quando relacionadas à relação aglomerante/agregado, bem como o teor de nS e aditivo plastificante.

### **2.3.1 Desempenho físico**

Em compósitos com agregados leves, a nS tem um significativo efeito nas propriedades no estado fresco, podendo aumentar a consistência da mistura, que necessita de mais água e plastificante a fim de manter a fluidez. Isso se deve a elevada área específica do nanomaterial, que requer uma maior quantidade de superplastificante para obter a consistência requerida (MEDEIROS *et al.*, 2015; SIKORA *et al.*, 2020; BARBHUIYA *et al.*, 2020).

Para Sikora *et al.* (2020), dosagens de até 5% de substituição do cimento pela nS promovem um melhor preenchimento e efeito de empacotamento das misturas, reduzindo a porosidade e tornando-as mais densas. Já para as substituições entre 5% e 10%, têm-se uma redução na densidade das misturas devido ao elevado potencial de aglomeração da nS, o que contribui para aumentar a segregação e a viscosidade, deixando uma quantidade maior de vazios (SIKORA *et al.*, 2020).

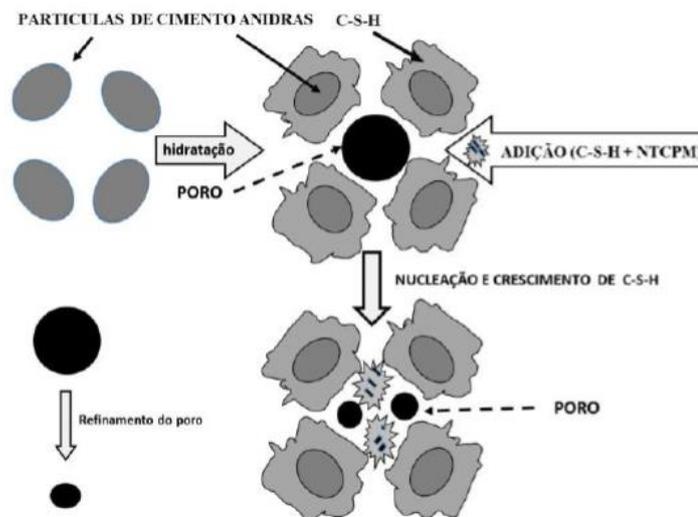
A análise microestrutural de compósitos cimentícios leves com baixas dosagens de nanossílica demonstra que novos produtos da hidratação do cimento são observados na matriz, que contribuem para um aumento na rigidez da interface entre a pasta e os agregados. Porém, para as altas dosagens de nS, os novos produtos de hidratação formados apresentam um volume maior, promovendo tensões internas entre a pasta e o agregado, que reduzem a rigidez anterior (ZHANG *et al.*, 2018).

Em teores adequados, o nanomaterial ou material amorfo pode aumentar o efeito pozolânico e de nucleação, criando pontes de C-S-H secundário entre as partículas de cimento anidras, o

que contribui para um refinamento dos poros, conforme se observa na Figura 6 (MENDES; REPETTE; REIS, 2017; DUART, 2021).

Portanto, a nS acelera a hidratação do cimento através do efeito de nucleação para a formação do C-S-H na matriz. Isto reduz a porosidade pela formação de C-S-H, aumentando a densidade e reduzindo as propriedades de transporte de água como resultado do menor número de vazios. No entanto, quando se excede o teor ótimo de nS, que é em torno de 2% a 3%, as aglomerações de SiO<sub>2</sub> podem aumentar a porosidade novamente, contribuindo para um aumento no coeficiente de capilaridade (ZHANG *et al.*, 2018; SIKORA *et al.*, 2020; FEDEROWICZ *et al.*, 2021).

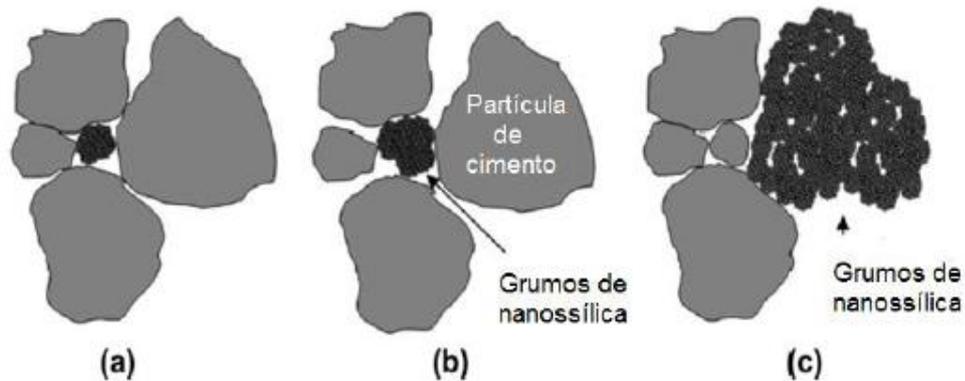
Figura 6 - Refinamento dos poros através de pontes de nucleação com C-S-H secundário



Fonte: Duart (2021)

A Figura 7 mostra a nanossílica preenchendo o vazio entre as partículas de cimento em quantidades distintas. Em (a), a nanopartícula contribui para a compactação e redução da porosidade, aumentando a resistência. Em (b), a nanopartícula aumenta os espaços vazios, consumindo parte da água e prejudicando um pouco da fluidez. Por fim, em (c), a nanossílica está em excesso, formando grumos maiores não hidratados, que comprometem a fluidez e resistência (NOGUEIRA *et al.*, 2018).

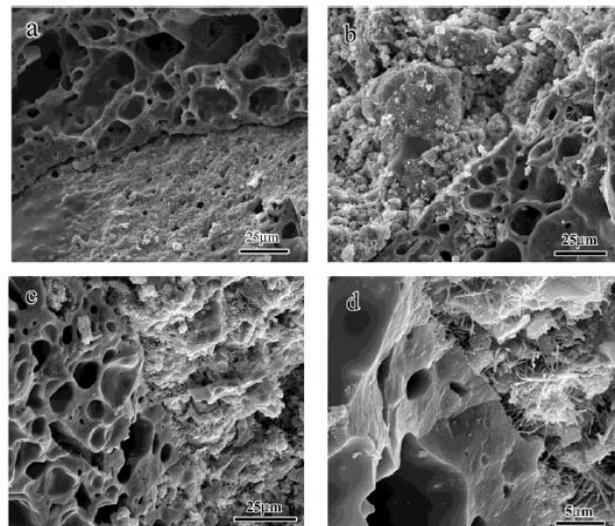
Figura 7 - Preenchimento dos vazios com diferentes quantidades de nS



Fonte: Nogueira *et al.* (2018)

Analisando através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na Figura 8, é possível comparar a porosidade em compósitos cimentícios sem nanopartículas (a), com nanopartículas em baixa dosagem (b), com nanopartículas em alta dosagem (c) e uma ampliação da imagem em (d) dos compósitos com alta dosagem para verificação da interface pasta-agregado. A composição química, obtida a partir de DRX, destes produtos de hidratação contém principalmente Silício (Si), Cálcio (Ca) e Alumínio (Al) (ZHANG *et al.*, 2018).

Figura 8 - MEV de compósitos cimentícios com e sem nS



Fonte: Zhang *et al.* (2018)

Portanto, a nanossilica pode preencher os poros da microestrutura e, conseqüentemente, aumentar a força e a durabilidade, mas até um determinado teor ótimo, já que a interface pasta-agregado fica fragilizada com o maior volume dos aglomerados de nS

(HARUEHANSAPONG; PULNGEN; CHUCHEEPSAKUL, 2014; NIVETHITHA; SRIVIDHYA; DHARMAR, 2016; ZHANG *et al.*, 2018; SIKORA *et al.*, 2020).

### 2.3.2 Desempenho mecânico

Para Sikora *et al.* (2020), concretos com 2% de nS em substituição ao cimento apresentam melhor desempenho mecânico quanto à flexão e à compressão. A partir deste teor, o aumento na quantidade de nS pode trazer problemas com a consistência.

Para Mendes, Repette e Reis (2017), o conteúdo ótimo de nS está compreendido entre 0,6% e 1,2% com ganhos na resistência mecânica à compressão e à tração e o módulo de elasticidade dinâmico. Estes autores perceberam que após 2,5% de nS na mistura, há uma queda nas resistências e no módulo. Já Setiati (2017), obteve ganhos de 12% na resistência à compressão aos 28 dias com 3% de nS em relação à massa de aglomerante.

A dimensão da nanossílica também influencia nas propriedades mecânicas. Sabe-se que uma partícula muito pequena de nS pode preencher mais facilmente os poros da pasta de cimento, aumentando assim a resistência à compressão de argamassas de cimento quando comparada com a Sílica Ativa. Porém, as partículas de nanossílica apresentam tamanhos variados e, quanto menores, podem provocar uma dispersão incorreta na pasta, sendo menos eficazes à atividade pozolânica e o efeito de empacotamento (HARUEHANSAPONG; PULNGEN; CHUCHEEPSAKUL, 2014). Estes autores sugerem as dimensões de 20 nm e 40 nm.

Em argamassas leves com nanossílica, Lefever *et al.* (2020) afirmam que o uso da nS compensa a perda na resistência devido ao agregado leve e que o aumento das propriedades mecânicas é maior dentro dos 7 primeiros dias devido ao efeito de nucleação e a prévia reação pozolânica.

Zanon, Schmalz e Ferreira (2018) avaliaram o efeito da nanossílica (nS) em suspensão coloidal isolada e combinada com a sílica ativa nas propriedades mecânicas, físicas e na durabilidade de concretos. Verificou-se que a nanossílica isolada contribui para um aumento de 8% na resistência à compressão, a partir de 0,5% de substituição; enquanto, que combinada com sílica ativa numa relação de 0,7% de nanossílica para 10% de sílica ativa, contribuiu para um aumento de 11% na resistência. Em relação à resistência à tração diametral, não foram observadas diferenças significativas; enquanto, a absorção por capilaridade só reduziu com o uso combinado. Estes autores justificam o comportamento das amostras com nanossílica

isolada como resultado da sua dispersão em plastificante, indicando que o uso da nanossílica em pó e não dispersa influenciou satisfatoriamente em outros trabalhos.

Schwartz e Cassol (2018) também avaliaram concretos com nanossílica dispersa em plastificante e sílica ativa, concluindo que ambos apresentaram ganhos em relação ao concreto de referência (sem nanomaterial), mas entre si, o efeito da nanossílica na resistência à compressão não foi superior à sílica ativa. Esperava-se, inclusive, que o nanomaterial pudesse causar um incremento ainda maior ao refinar os poros da mistura.

Campos Neto e Geyer (2019) também avaliaram os efeitos de nanossílica em suspensão coloidal, mas em Concretos de Alto Desempenho (CAD), verificando o mesmo incremento de 8% na resistência à compressão com a inserção do nanomaterial; bem como uma redução no tempo e na altura de abatimento.

Alguns autores sugerem o uso da nanossílica em pó, visto que não se sabe o teor deste material disperso no plastificante, pois não é informado pelo fornecedor (ZANON; SCHMALZ; FERREIRA, 2018; SCHWARTZ; CASSOL, 2018; CAMPOS NETO; GEYER, 2019).

### **2.3.3 Desempenho acústico**

O desempenho acústico das edificações ganha interesse e importância especial, já que o ruído interfere diretamente no bem-estar do indivíduo (PEDROSO; BRITO; SILVESTRE, 2017), influenciando na produtividade e na saúde das pessoas.

Para reduzir o ruído, há uma demanda para a aplicação de medidas corretivas em edificações já em uso e para fazer cumprir as regras de construção a fim de atender aos padrões de conforto acústico nas escolas, residências, entre outras (JOHN; THAMPURAN; PREMLET, 2016). O uso de materiais absorventes também é uma forma de controle e, por isso, as propriedades de absorção sonora dos materiais têm sido extensivamente estudadas (BAGHERI; NODOUSHAN; AZIMZADEH, 2022).

Teoricamente, quando a onda sonora encontra a superfície do material poroso, parte do som é refletido, parte do som ultrapassa e o restante é transferido ao material. Esta parcela é transferida pela resistência à fricção entre as moléculas do ar e as paredes dos poros. Assim, a alta porosidade do material provoca mais fricção e as ondas sonoras são convertidas em energia, sendo absorvida pelo material (ARAÚJO *et al.*, 2016; PONGSOPHA *et al.*, 2022).

Por exemplo, é comum o uso de painéis absorventes, a fim de gerar incrementos na absorção sonora e, assim, melhorar as condições de conforto acústico dentro de ambientes fechados, principalmente em salas de reuniões, salas de aula, teatros, cinemas, restaurantes, entre outros. Estes materiais porosos são capazes de converter as vibrações mecânicas em calor através dos poros dentro da matriz (CHEN; YU; BROUWERS, 2017).

Em compósitos cimentícios, o aumento na absorção sonora se deve, parcialmente, à substituição do agregado natural mais denso por um agregado leve menos denso; além da formação de vazios na microestrutura (PONGSOPHA *et al.*, 2022). Assim, a massa específica é inversamente proporcional às características absorvedoras dos materiais, ou seja, quanto menor a massa específica, maior é a capacidade de absorção sonora (CARDOSO; CALLEJAS; DURANTE, 2016).

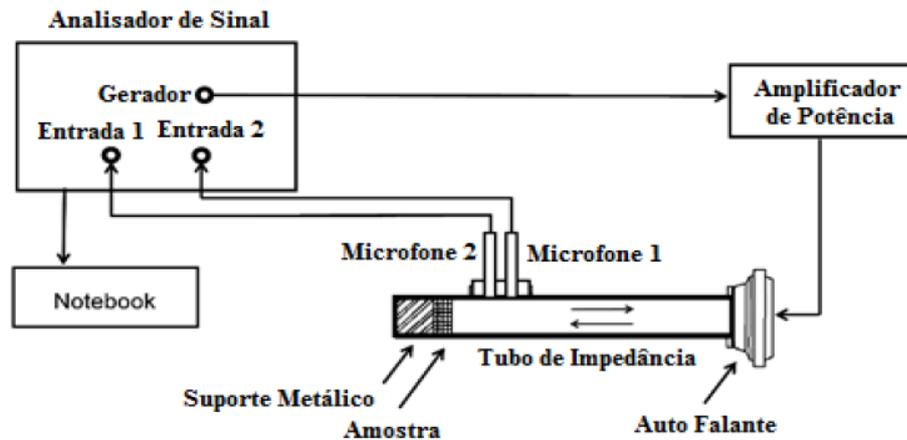
Alguns autores ainda afirmam que as nanopartículas atuam como *filler* nos compósitos cimentícios e criam um caminho tortuoso para a transmissão sonora, aumentando a área de contato. Então, há perda na energia sonora em forma de calor e aumento do coeficiente de absorção sonora (BAGHERI; NODOUSHAN; AZIMZADEH, 2022).

Bagheri, Nodoushan e Azimzadeh (2022) avaliaram compósitos leves com e sem nanoargila, concluindo que o aumento no teor de agregado leve não provoca mudanças perceptíveis no coeficiente de absorção sonora (CAS) para baixos teores de substituição do agregado. Somente a partir de 30% de substituição, verificam-se valores altos no coeficiente, especialmente em 1000 Hz, 1250 Hz, 4000 a 6000 Hz.

O coeficiente de absorção sonora é a fração da energia sonora absorvida por um material e medida por meio de ondas estacionárias no tubo de impedância, variando de 0 a 1, sendo geralmente baixa para o concreto de cimento Portland normal, que varia de 0 a 0,1 na maioria dos casos (CHEN; YU; BROUWERS, 2017).

A melhor maneira de comparar o conforto acústico dos materiais é usando seu coeficiente de absorção sonora (PEDROSO; BRITO; SILVESTRE, 2017). O ensaio do tubo de impedância, conforme preconizado pela norma ISO 10534-2 (ISO, 1998), é uma das formas de se obter experimentalmente o coeficiente de absorção sonora de uma amostra do material, conforme indicado na Figura 9. Durante o ensaio, uma fonte sonora aleatória é capaz de gerar uma onda plana dentro do tubo, a qual propaga-se longitudinalmente no tubo, e então é refletida pelo material localizado no final, resultando em uma onda estacionária. Dois microfones medem a pressão acústica, a partir da qual a absorção é determinada (DRESCH, 2016).

Figura 9 - Ensaio do tubo de impedância



Fonte: Adaptado de Dresch (2016)

Pode-se afirmar que para avaliar o comportamento acústico de um material poroso, o coeficiente de absorção sonora determinado através do tubo de impedância fornece resultados precisos da absorção acústica de painéis em maior escala com a vantagem de exigir pequenos espécimes dos materiais para realizar os testes (ARENAS *et al.*, 2017b).

Deve-se tomar alguns cuidados durante a realização deste ensaio, como por exemplo, na Figura 10, a borda circunferencial da amostra de teste deve ser cuidadosamente selada com parafina, como recomendado pela norma, para garantir um bom ajuste entre a amostra e o tubo. Estas amostras possuem dimensões de 10 cm de diâmetro por 6,5 cm de espessura (DRESCH, 2016; ARENAS *et al.*, 2017b).

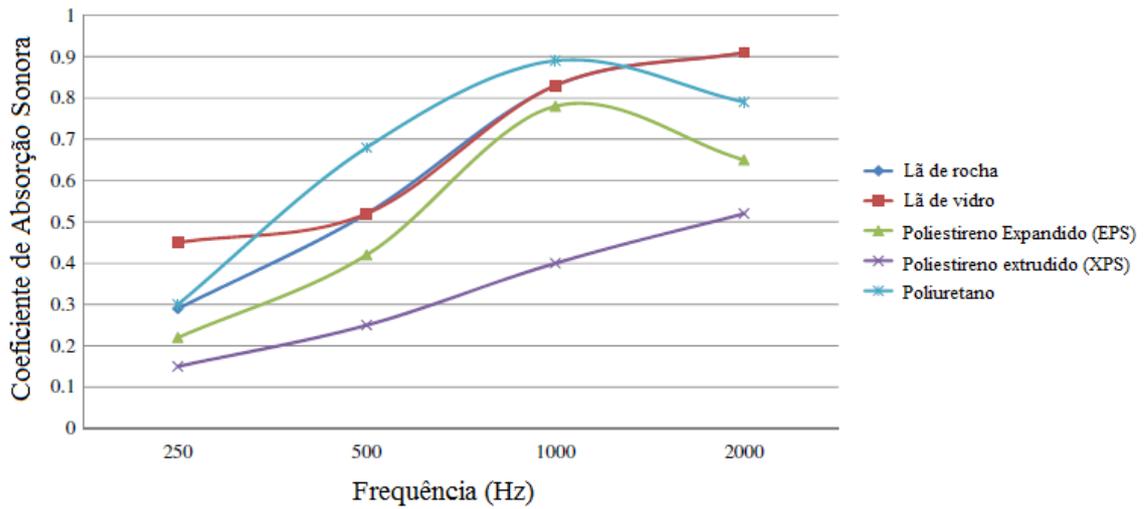
Figura 10 - Tubo de impedância da UFSM/RS



Fonte: Dresch (2016)

A partir deste ensaio, é possível obter uma curva média que relaciona os coeficientes de absorção médios ( $\alpha_m$ ) alcançados por 6 corpos de prova em função da frequência, conforme se observa na Figura 11 (DRESCH, 2016).

Figura 11 - Variação do coeficiente de absorção sonora médio em função da frequência

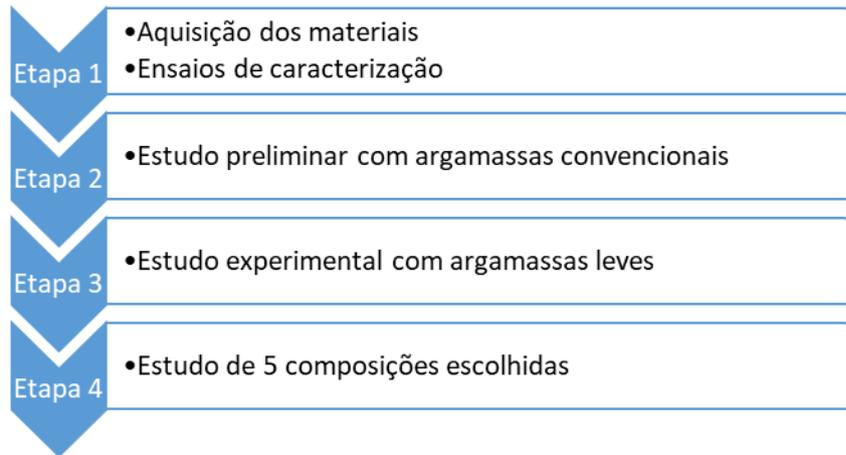


Fonte: Adaptado de Pedroso, Brito e Silvestre (2017)

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda a descrição do programa experimental seguido neste trabalho. De forma objetiva, a Figura 12 apresenta um fluxograma, cujas etapas foram: a aquisição dos materiais necessários; o estudo preliminar com as argamassas convencionais; o estudo experimental com as argamassas leves e o estudo das 5 composições escolhidas.

Figura 12 - Fluxograma das etapas do programa experimental



Fonte: A Autora (2022)

Inicialmente, foi realizada a aquisição dos materiais e a caracterização deles através de ensaios de granulometria, massa unitária, massa específica, entre outros que são detalhados mais adiante.

Em seguida, foi feito um estudo preliminar com 6 composições de argamassas convencionais, variando o tipo de cimento e o teor de nanomaterial em substituição à massa de cimento, cujo objetivo foi conhecer melhor o comportamento destas argamassas quando se altera o aglomerante e os teores de nanossílica na mistura.

A partir da análise anterior, foi desenvolvido um estudo experimental com 18 composições de argamassas leves, sendo utilizados como agregados leves a argila expandida (AE); o pó de serra de madeira compensada (SM) e o poliestireno expandido (EPS) em substituição parcial ao agregado natural. Estes agregados foram definidos por serem de fácil acesso, baixo custo e comumente analisados em estudos experimentais, os quais subsidiaram a escolha dos teores de substituição do agregado natural pelo leve. Neste estudo, as variáveis foram o tipo de agregado leve, as proporções de substituição da areia e a presença ou não da nanossílica.

Por fim, foi realizado um estudo de 5 composições escolhidas de argamassas convencionais e leves, que foram selecionadas de acordo com os resultados de resistência mecânica e

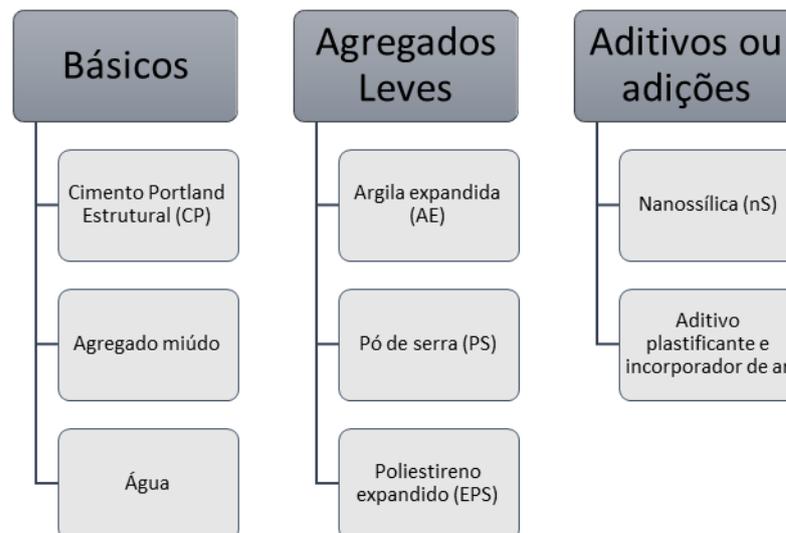
consistência dos estudos anteriores. Além disso, foi priorizado o teor máximo de substituição do agregado leve, visando a otimização do resultado acústico e um maior aproveitamento destes agregados. Nesta etapa, o fator a/c foi uma variável, pois estas composições foram ajustadas quanto à consistência para um espalhamento mínimo de 260 mm e, por isso, novos ensaios de caracterização física e de resistência mecânica foram realizados, assim como o de absorção sonora com o tubo de impedância.

A seguir, são apresentados os materiais utilizados, bem como a sua caracterização que foi realizada através de alguns testes experimentais e de dados obtidos através de fornecedores.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram divididos em 3 grupos: básicos; agregados leves e aditivos/adições, conforme apresenta a Figura 13.

Figura 13 - Grupos de materiais empregados



Fonte: A Autora (2022)

A seguir, são apresentadas as caracterizações dos cimentos, da areia natural, dos agregados leves, do aditivo e da nanossílica. A água foi obtida da Compesa, concessionária da rede de sistema de abastecimento de água fria da cidade de Recife/PE.

#### 3.1.1 Cimento Portland (CP)

Foram utilizados 2 tipos de cimento Portland estruturais: CP II F – 40 e CP II E – 40, denominados neste trabalho de cimentos 1 e 2, respectivamente. Ambos foram obtidos

diretamente com o fornecedor e apresentam a mesma resistência mínima de 40 MPa aos 28 dias, variando as adições (fíller ou escória).

O cimento com adição de fíller foi utilizado apenas no estudo preliminar, pois houve falta deste material no mercado local durante a pesquisa; enquanto, o cimento com adição de escória de alto forno foi utilizado nos estudos com argamassas convencionais e leves.

Na Tabela 5, constam alguns resultados resumidos da caracterização destes cimentos. No Apêndice A, constam os dados detalhados destes ensaios.

Tabela 5 - Caracterização do cimento

Parâmetro	Unidade	CP II F	CP II E	Norma de referência
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,08	3,12	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Teor de água (consistência normal)	%	34%	30%	NBR 16606 (ABNT, 2018)
Tempo de início de pega	Minutos	164	198	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Tempo de fim de pega	Minutos	215	272	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Resistência à compressão axial aos 7 dias	MPa	40,8	36,6	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Resistência à compressão axial aos 28 dias	MPa	49,7	46,5	NBR 7215 (ABNT, 2019)

Fonte: A autora (2022) e Boletins Votorantim Cimentos (2019 e 2022)

O ensaio para a obtenção da massa específica foi realizado pela autora, pois este dado foi usado para a obtenção do teor de ar incorporado. A massa específica do cimento corresponde à média de 2 ensaios realizados com o frasco de Le Chatelier, cuja diferença deve ser inferior a 0,02 g/cm<sup>3</sup>, conforme estabelece a referida norma. Os demais resultados decorrentes de outros ensaios foram obtidos através de especificações do fornecedor.

### 3.1.2 Areia natural

Com relação à areia natural, os resultados dos ensaios realizados para a sua caracterização estão resumidos na Tabela 6. As informações detalhadas de cada ensaio estão no Apêndice B.

Tabela 6 - Caracterização da areia natural

Descrição do ensaio	Resultado	Norma de referência
Massa unitária compactada – método A (kg/m <sup>3</sup> )	1725,34	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa unitária solta – método C (kg/m <sup>3</sup> )	1644,65	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Volume de vazios – método A (%)	28,7	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Volume de vazios – método C (%)	32,1	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,42	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa específica do agregado saturado (g/cm <sup>3</sup> )	2,45	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa específica real do agregado	2,50	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Módulo de finura	2,27	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica (DMC) em mm	2,36	NBR 17054 (ABNT, 2022)

Fonte: A Autora (2022)

Antes da realização dos ensaios, a areia foi previamente lavada, colocada em estufa em temperatura entre 100 a 105 graus celsius por 24 h e, posteriormente, peneirada na peneira de malha 4,75 mm (#4), antes de ser armazenada em recipiente fechado até a sua utilização.

As massas unitárias obtidas através dos métodos A (compactado) e C (solto) correspondem a média de 3 ensaios individuais cada (Figura 14), que não variam mais de 1% em relação à média, conforme recomenda a NBR 16972 (ABNT, 2021).

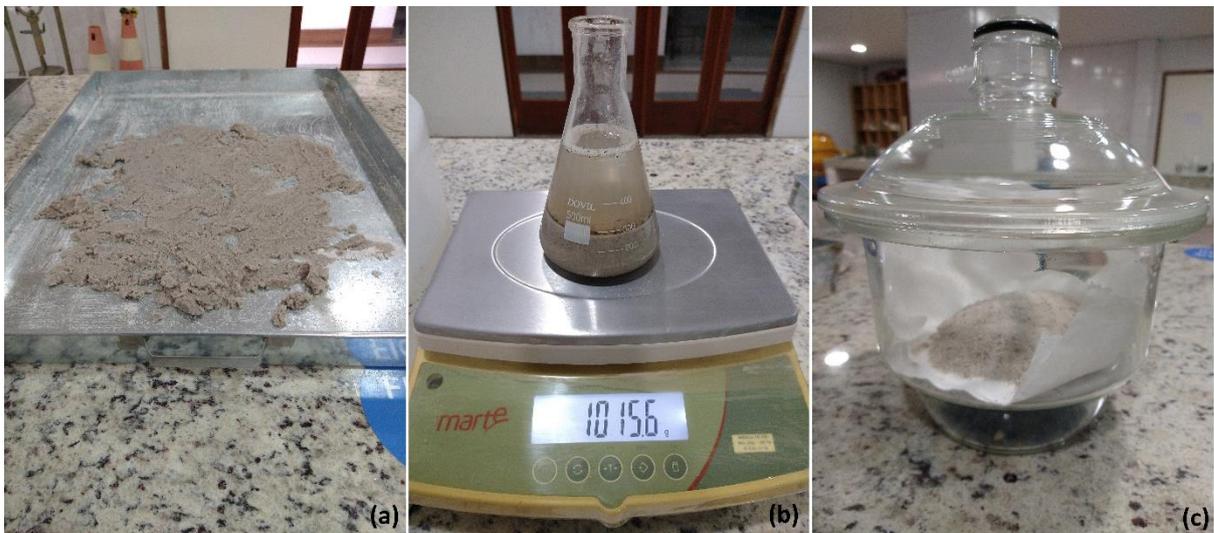
Figura 14 - Determinação da massa unitária compactada e solta



Fonte: A Autora (2022)

Já as massas específicas (Figura 15) do agregado seco, saturado e real correspondem a média de 2 ensaios individuais que não variam mais do 0,02 g/cm<sup>3</sup> entre si, conforme recomenda a NBR 16916 (ABNT, 2021).

Figura 15 - Secagem ao ar (a) pesagem do frasco (b) dessecador com cristais de sílica e areia (c)



Fonte: A Autora (2022)

Na Figura 15a, a amostra está sendo inicialmente seca ao ar para posterior pesagem do frasco de 500 ml com 500g de areia saturada (Figura 15b). Após este procedimento, a amostra seca em estufa foi inserida num dessecador contendo cristais de sílica para alcançar o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente (Figura 15c)

Com as massas unitárias e as massas específicas, foi possível obter o volume de vazios através dos métodos A e B, indicando o esperado, que o estado solto apresenta uma maior quantidade de vazios.

Estes parâmetros são relevantes para a comparação com os parâmetros obtidos dos agregados leves, comprovando a leveza destes últimos e uma maior porosidade através do volume de vazios. Esta porosidade, conforme já mencionado, é importante para as propriedades acústicas.

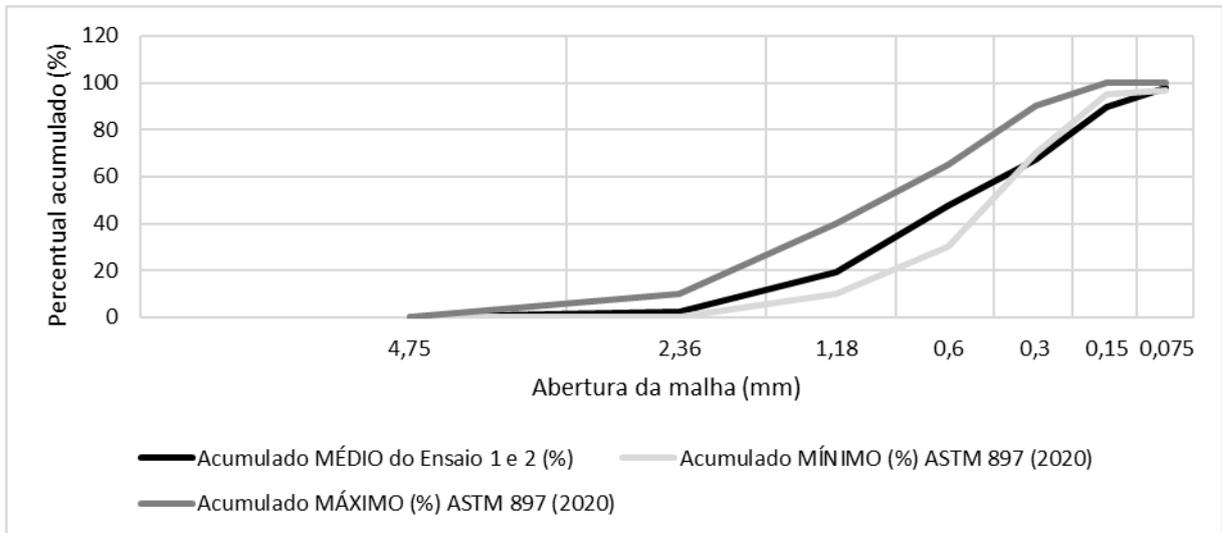
Sabe-se também que o comportamento reológico das argamassas é condicionado, entre outros fatores, pela granulometria dos agregados, podendo contribuir no empacotamento dos grãos e influenciar a trabalhabilidade pelo efeito de rolagem entre as partículas, ou seja, as partículas menores promovem a rolagem entre as maiores (FUKUI *et al.*, 2018).

Por isso, sua análise é relevante e o principal ensaio é o de granulometria por peneiramento, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022). A curva granulométrica média também é obtida através dos resultados de 2 ensaios individuais realizados na areia natural, apresentada na Figura 16 abaixo. Os dados dos ensaios individuais se encontram no Apêndice B.

Tendo em vista que não existem parâmetros normalizados no Brasil para areias visando a produção de argamassas de revestimento, apresentaram-se no gráfico os limites recomendados pela ASTM C 897 (ASTM, 2020) para areias utilizadas em emboços e revestimentos (PASSOS; CARASEK, 2018). Por este motivo, a análise granulométrica não foi realizada em relação a NBR 7211 (ABNT, 2019), que especifica agregados para concretos.

Analisando a Figura 16, verifica-se que a areia utilizada se encontra entre os limites mínimo e máximo até a granulometria de 0,6 mm, referente a peneira de Nº 30. Porém, a partir da granulometria de 0,3 mm, referente a peneira de Nº 50, os percentuais acumulados se aproximam do limite inferior, voltando a estar entre os valores mínimos e máximos na peneira de Nº 200 (0,075 mm).

Figura 16 - Curva granulométrica da areia natural



Fonte: A Autora (2022)

Como as diferenças entre o limite mínimo e os valores obtidos nas peneiras de N° 50 e N° 100 foram inferior a 4%, conforme determina a NBR 17054 (ABNT, 2022), foi adotada como ótima toda a faixa granulométrica. A norma ASTM C 897 (2020) também determina que não mais que 50% deve ficar retido entre duas peneiras consecutivas, o que foi observado, e não mais que 25% deve ficar retido entre as peneiras de N° 50 e 100, sendo obtido 22,6%, aproximadamente. Além disso, o material fino passante na peneira de N° 200 não deve exceder 3%, sendo obtido 1,9%.

A partir deste ensaio, também é possível obter a dimensão máxima característica (DMC), correspondente a peneira de N° 8 (2,36 mm), bem como o módulo de finura (MF), que correspondeu a 2,27. Segundo a ASTM C 897 (2020), a DMC sugere que a areia é fina e que o módulo de finura se encontra dentro da zona ótima para argamassas, que é de 2,05 e 3,05.

### 3.1.3 Agregados leves

Os agregados leves escolhidos são pertencentes a grupos de materiais diferentes. São eles: a argila expandida (AE), inserida no grupo de materiais de origem mineral; o pó de serra de madeira compensada (SM), inserido no grupo de materiais de origem vegetal e o poliestireno expandido (EPS), inserido no grupo de materiais de origem polimérica.

O pó de serra de madeira compensada (Figura 17b) foi obtido através de marceneiros em coleta única, a fim de evitar variações no material; enquanto, a argila expandida (Figura 17a)

e o poliestireno expandido (Figura 17c), este último conhecido como isopor ou EPS, foram adquiridos no mercado de um mesmo fornecedor, cada um.

Figura 17 - Agregados leves utilizados: argila expandida (a), pó de serra (b) e EPS (c)



Fonte: A Autora (2022)

Antes da utilização, os agregados foram passados previamente na peneira de 4,75 mm (# 4), a fim de serem caracterizados como agregado miúdo. Para tanto, foi necessária a quebra da argila expandida para menores dimensões com o soquete de compactação de 4,5 kg. A fim de manter uma padronização, foram dados entre 20-25 golpes a cada novo peneiramento (Figura 18).

Figura 18 - Molde cilindro CBR com argila moída (a) Soquete de 4,5 kg (b)



Fonte: A Autora (2022)

Com relação ao pó de serra, foi realizado o procedimento indicado na Figura 19, de pré-umedecimento com cal hidratada por 24h e posterior secagem em estufa, conforme Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016).

Figura 19 - Pré-umedecimento do pó de serra com água e cal (a) e após secagem em estufa (b)



Fonte: A Autora (2022)

O objetivo deste tratamento prévio foi de alcançar a mineralização do pó de serra, a fim de obter resultados melhores com a aderência à pasta de cimento, conforme observado por Corinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016).

Com relação ao EPS, não foi realizado nenhum tratamento prévio antes dos ensaios, apenas houve uma seleção na sua aquisição, adquirindo as pérolas de poliestireno com o diâmetro médio de 1 mm, segundo dados do fornecedor. A escolha deste diâmetro objetivou melhorar a coesão deste agregado leve à pasta.

Assim como a areia, foram realizados alguns ensaios de caracterização nos 3 agregados leves, cujos resultados finais constam na Tabela 7. Os dados detalhados encontram-se nos Apêndices C, D e E.

As massas unitárias obtidas através dos métodos A (compactado) e C (solto) correspondem a média de 3 ensaios individuais cada, que não variam mais de 1% em relação à média, conforme recomenda a NBR 16972 (ABNT, 2021). Para a compactação do EPS, foram realizadas lateralmente no recipiente, a fim de evitar a perda de material.

Já as massas específicas aparentes do agregado seco e saturado e a massa específica real correspondem a média de 2 ensaios individuais que não variaram mais do 0,02 g/cm<sup>3</sup> entre si, conforme recomenda a NBR 16916 (ABNT, 2021). Neste ensaio, não foi possível fazê-lo com a massa de agregado saturado de 500 g, conforme recomenda esta norma, pois como a argila, o pó de serra e o EPS são mais leves do que a areia natural; esta massa corresponde a um volume que não é possível inserir no frasco de Erlenmeyer de 500 ml. Portanto, foi escolhida uma massa de 100 g para a realização deste ensaio com a argila e o pó de serra e de 30 g para

o ensaio com o EPS. Além disso, o EPS não pôde ser submetido à estufa, alcançando o ponto de fusão e inviabilizando a medição da massa específica do mesmo. Assim, este agregado foi simplesmente submetido à secagem ao ar livre.

Tabela 7 - Caracterização dos agregados leves

Descrição do ensaio	Argila expandida	Pó de serra	EPS	Norma de referência
Massa unitária compactada – Método A (kg/m <sup>3</sup> )	670,8	202,4	38,0	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa unitária solta – Método C (kg/m <sup>3</sup> )	603,9	184,8	36,2	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de vazios – Método A (%)	9,4	38,7	61,9	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de vazios – Método C (%)	18,4	44	99,9	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,74	0,33	0,10	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa específica aparente saturada (g/cm <sup>3</sup> )	1,20	1,14	0,10	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	1,37	1,72	0,10	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Módulo de finura	2,76	2,45	4,98	NBR 17054 (ABNT, 2022)
DMC em mm	2,36	2,36	1,18	NBR 17054 (ABNT, 2022)

Fonte: A Autora (2022)

Percebe-se através da Tabela 7 que as massas unitárias e específicas diminuem, respectivamente, para a argila expandida, o pó de serra e o EPS. Em contrapartida, o índice de vazios aumenta, respectivamente, para estes materiais. O isopor, por exemplo, apresenta um alto índice de vazios, justificado pela presença elevada de ar em sua composição, conforme visto por Menezes et al. (2018), que afirmam que este material é constituído por 98% de ar.

As massas específicas obtidas corroboram a leveza dos agregados, pois para todos é inferior a 1,8 g/cm<sup>3</sup>, conforme estabelece a NBR 12655 (ABNT, 2015).

Com as massas unitárias e as específicas, foi possível obter o volume de vazios através dos métodos A e B, indicando o esperado, que o estado solto apresenta uma maior quantidade de vazios. Além disso, é importante observar que a argila expandida apresenta um teor de vazios inferior aos demais, inclusive, inferior ao teor de vazios da areia natural. Provavelmente, isso se deve a maior quantidade de finos que a argila apresenta, conforme é apresentado a seguir através da curva granulométrica.

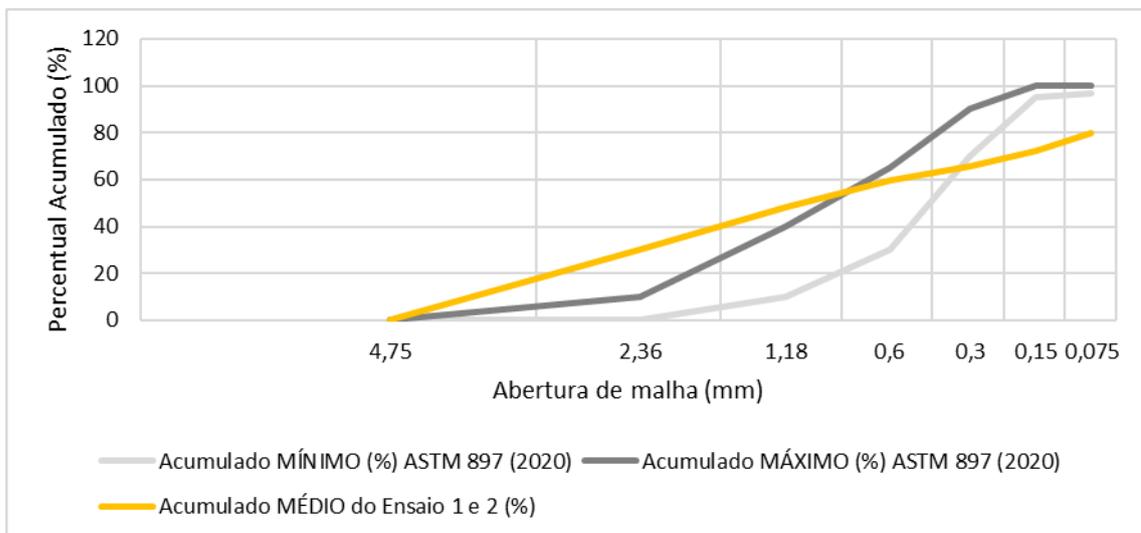
Com relação ao ensaio de granulometria por peneiramento, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), as curvas granulométricas da argila, do pó de serra e do EPS, respectivamente, se encontram nas Figuras 20, 21 e 22, sendo analisadas separadamente.

Analisando a Figura 20, verifica-se que a argila expandida não se encontra entre os limites mínimo e máximo em boa parte da curva granulométrica, com exceção a partir da granulometria de 0,6 mm, referente a peneira de N° 30, até a granulometria de 0,3 mm, referente a peneira de N° 50. Neste caso, o percentual acumulado na peneira de n° 50 não diverge mais que 4%, conforme a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), do limite mínimo.

No entanto, não foram observados percentuais retidos maiores que 50% entre duas peneiras consecutivas, conforme a norma ASTM C897 (ASTM, 2020). Assim como foi observado um percentual retido de 6,3% entre as peneiras de n° 50 e 100, que é inferior ao limite de 25%. Em relação ao material passante, correspondente a 20,3% na peneira de n° 200, excede o limite máximo de 3%, indicando uma quantidade maior de finos para este agregado leve.

Com relação à DMC, este corresponde à peneira de N° 8 (2,36 mm), que é equivalente ao da areia natural. O módulo de finura (MF), no valor de 2,76, também se encontra dentro da zona ótima para argamassas (2,05-3,05), sugerindo que se trata de um agregado fino.

Figura 20 - Curva granulométrica da argila expandida



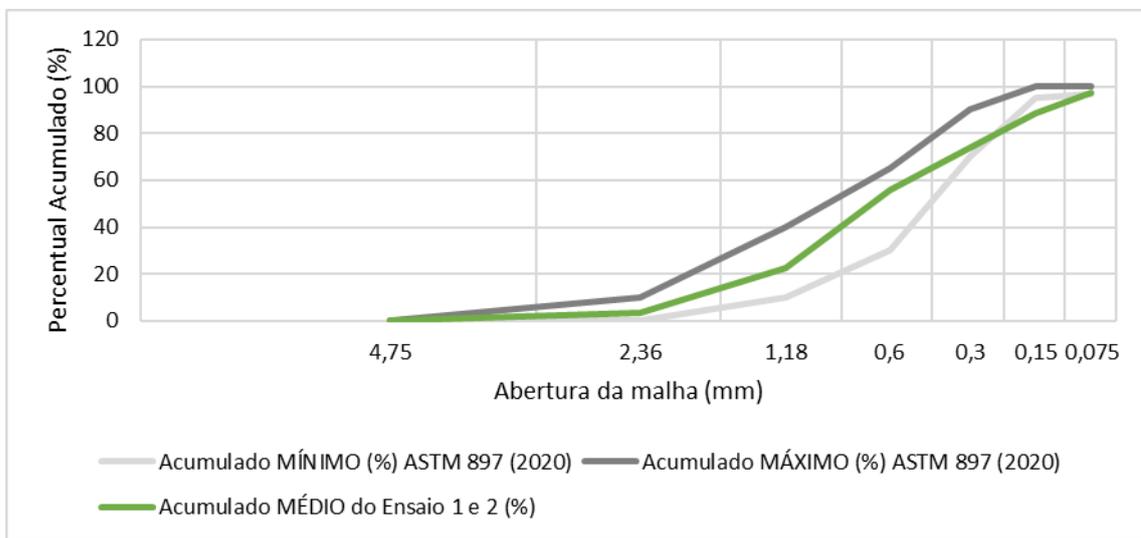
Fonte: A Autora (2022)

Analisando a Figura 21, verifica-se que o pó de serra se encontra entre os limites mínimo e máximo até a granulometria de 0,3 mm, referente a peneira de N° 50. Porém, a partir da granulometria de 0,150 mm, referente a peneira de N° 100, os percentuais acumulados se aproximam do limite inferior, voltando a estar entre os valores mínimos e máximos na peneira de N° 200. Neste caso, o percentual acumulado na peneira de n° 100 diverge mais que 4%, conforme a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), do limite mínimo.

No entanto, não foram observados, na curva granulométrica do pó de serra, percentuais retidos maiores que 50% entre duas peneiras consecutivas, conforme a norma ASTM C897 (ASTM, 2020). Assim como foi observado um percentual retido de 14,9% entre as peneiras de nº 50 e 100, que é inferior ao limite de 25%. Em relação ao material passante, correspondente a 3,7% na peneira de nº 200, excede um pouco o limite máximo de 3%, indicando uma quantidade maior de finos para este agregado leve.

Com relação à DMC, este corresponde a peneira de Nº 8 (2,36 mm), que é equivalente ao da areia natural. O módulo de finura (MF), no valor de 2,45, também se encontra dentro da zona ótima para argamassas (2,05-3,05), sugerindo que se trata de um agregado fino.

Figura 21 - Curva granulométrica do pó de serra



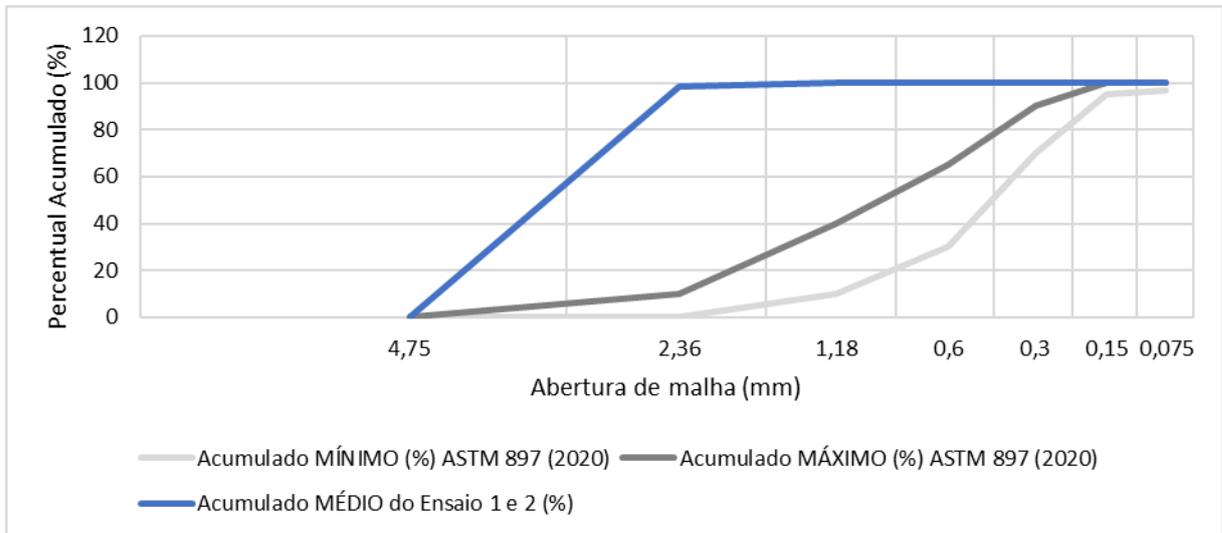
Fonte: A Autora (2022)

Analisando a Figura 22, verifica-se que o EPS não se encontra entre os limites mínimo e máximo em nenhum trecho da curva.

Por se tratar de um produto industrializado, isto já era esperado, pois apresenta um padrão elevado de simetria, caracterizando a granulometria como uniforme. Nota-se que os grãos se limitam à faixa granulométrica entre 2,36 mm e 1,18 mm, estando aproximadamente 95% retido na peneira Nº 16 (1,18 mm).

Com relação à DMC, este corresponde a peneira de Nº 4 (4,75 mm), que diverge da areia natural. O módulo de finura (MF), no valor de 4,98, não se encontra dentro da zona ótima para argamassas (2,05-3,05), sugerindo que se trata de um agregado mais grosseiro.

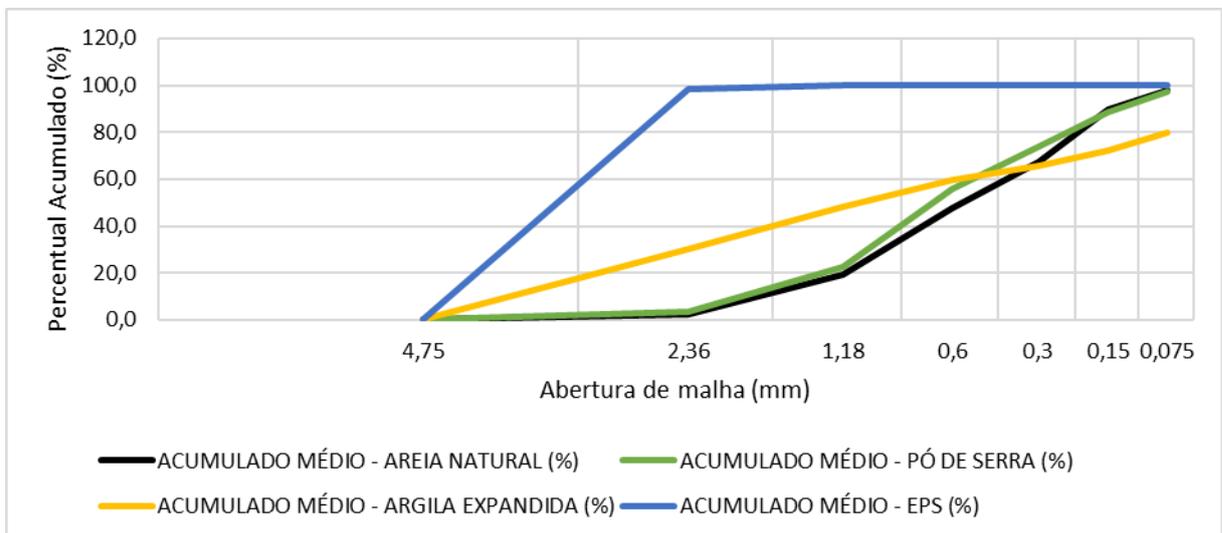
Figura 22 - Curva granulométrica do EPS



Fonte: A Autora (2022)

No geral, analisando a Figura 23, nota-se que a areia natural e o pó de serra apresentam uma distribuição granulométrica mais semelhantes entre si; enquanto a argila expandida apresenta uma graduação mais aberta (com grossos e finos em maior quantidade) e o EPS uma graduação uniforme mais grosseira.

Figura 23 - Curvas granulométricas da areia, da argila expandida, do pó de serra e do EPS



Fonte: A Autora (2022)

### 3.1.4 Aditivos e adições

O aditivo plastificante utilizado é da marca Quartzolit, que também é incorporador de ar e indicado para melhorar a coesão e a consistência de argamassas. A escolha se deu pela disponibilidade do aditivo no mercado e por ser comumente utilizado obras.

Apesar do fabricante recomendar um teor de 0,2% a 0,5%, foi adotado um teor de 1% em massa do cimento, tendo em vista alguns trabalhos experimentais indicados nas Tabelas 1 a 4, que utilizaram valores aproximados. Além disso, entende-se que o uso da nanossílica com elevada área superficial e o uso de agregados leves, como o pó de serra e a argila expandida, podem exigir mais água, a fim de manter uma fluidez de mistura adequada. Por isso, adotou-se um teor maior de aditivo plastificante do que o recomendado pelo fabricante.

Na Tabela 8, seguem as informações referentes ao aditivo, conforme Boletim Técnico do fabricante.

Tabela 8 - Caracterização do aditivo plastificante e incorporador de ar

<b>Base de formulação</b>	Surfactante
<b>Massa específica</b>	1,002 a 1,004 kg/dm <sup>3</sup>
<b>pH</b>	4,5 a 7,5
<b>Teor de sólidos</b>	3 % a 4 %
<b>Compatível com tipo de cimento</b>	CPI, CPII, CPIII, CPIV e CPV
<b>Teor de adição sobre a massa de cimento</b>	0,2% a 0,5%

Fonte: Boletim Técnico Weber Saint-Gobain Produtos Quartzolit (2019)

Quanto ao nanomaterial, trata-se de um produto ainda não comercializado no Brasil e, por isso, foi importado da China devido ao menor custo do produto e rapidez na entrega em relação a outros países fornecedores, como Bélgica e Estados Unidos. Trata-se de um produto comercializado como dióxido de silício em pó com 99% de pureza pela empresa chinesa Jiangsu XFNANO Materials Tech Co. Ltd.. Outros dados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados da nS conforme o fabricante

<b>Características</b>	Nanossílica (nS)
<b>Formato</b>	Esférico
<b>Diâmetro médio</b>	20 nm
<b>Pureza</b>	99%
<b>Área de superfície</b>	145-160 m <sup>2</sup> /g
<b>Aparência</b>	Branca
<b>pH</b>	6-7
<b>Densidade</b>	2,2-2,6 g/ml (25° C)
<b>Solubilidade</b>	Insolúvel

Fonte: Adaptado de XFNANO Materials Tech Co. Ltd.

Conforme apresenta a Tabela 9, a nS é insolúvel em água e, portanto, ressalta-se a necessidade da incorporação do aditivo surfactante de base polimérica. Alguns cuidados também são recomendados pelo fabricante durante a manipulação deste nanomaterial, como a utilização de luvas, óculos e máscara, a fim de evitar o contato com a pele, os olhos e as vias respiratórias, já que este material apresenta toxicidade.

Destaca-se que a escolha da nanossílica em pó foi definida para este trabalho ao invés da nanossílica estabilizada, tendo em visto o maior controle da dosagem, já que a nS em suspensão coloidal comercializada no Brasil não especifica o teor exato deste nanomaterial no aditivo.

## 3.2 ESTUDO PRELIMINAR EM ARGAMASSAS CONVENCIONAIS

Após a aquisição e a caracterização dos materiais constituintes, foi realizado um estudo preliminar em 6 composições de argamassas convencionais, cujo objetivo foi analisar o comportamento destas misturas, variando o tipo de cimento e o teor de nanomaterial.

A seguir, é apresentado o detalhamento destas composições, o procedimento de preparo destas misturas e os ensaios realizados.

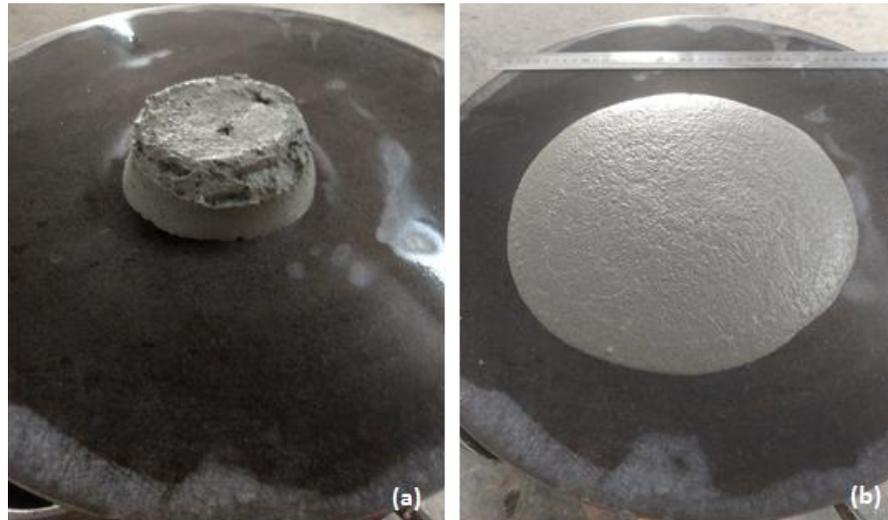
### 3.2.1 Composições

Os cimentos testados foram os cimentos compostos CP II F – 40 e CP II E – 40, denominados de C1 e C2 neste trabalho, respectivamente. Os teores escolhidos de nanomaterial para a análise foram 0%, 1% e 3% em substituição à massa de cimento, definidos com base nas Tabelas 1 a 4.

Vale mencionar que não foram analisados teores maiores de nS, pois compromete a fluidez da argamassa para uma mesma quantidade de água. A razão para não se considerar teores maiores de nS está na verificação que foi feita com 5% deste material, na qual a mistura se apresentou bastante seca no estado fresco para a mesma quantidade de água das outras argamassas, o que inviabilizou a análise neste estudo.

Decidiu-se manter padronizados a relação aglomerante/agregado; a relação água/cimento ou fator  $a/c$  e o teor de aditivo plastificante. A relação aglomerante/agregado escolhida foi de 1:3, já que boa parte dos trabalhos levantados no estado arte utilizam esta mesma relação. Para a determinação do fator  $a/c$ , o ensaio de consistência de mesa *Flow Table* foi realizado numa argamassa de referência 1:3 sem nanomaterial (Figura 24) com 1% de aditivo, a fim de identificar os espalhamentos para as diferentes relações água-cimento, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

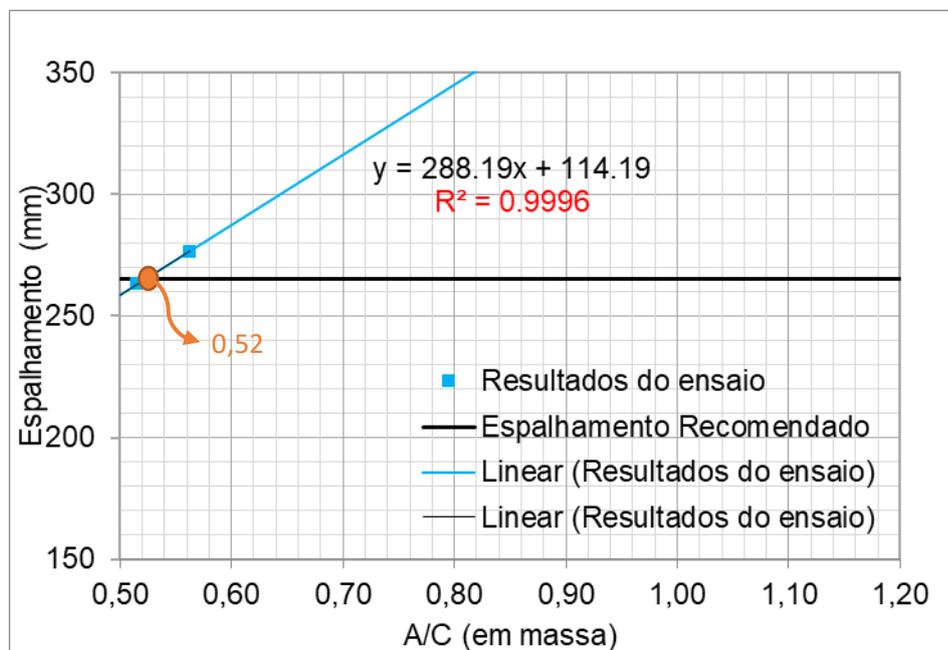
Figura 24 - Antes (a) e Depois (b) do ensaio de consistência *Flow Table*



Fonte: A Autora (2022)

Dessa forma, foi possível obter graficamente este parâmetro para um espalhamento de 265 mm, como recomenda a referida norma. O gráfico da Figura 25 apresenta esta relação gráfica, na qual é possível identificar que este fator a/c para o espalhamento de 265 mm é de 0,52 com  $R^2$  próximo de 1.

Figura 25 - Relação entre fator a/c e espalhamento para uma relação 1:3 com 1% de aditivo



Fonte: A Autora (2022)

Assim, as 6 composições analisadas estão detalhadas na Tabela 10, identificadas pelo tipo de cimento e o teor de nanossílica utilizado.

Tabela 10 - Composições analisadas no estudo preliminar

Argamassas	Tipo de cimento	Nano material	Composição				
			Cimento	Areia Natural	Agregado Leve	Nano material	Aditivo Plastificante
C01 <sub>C1, 0%nS</sub>	CPII F 40	-	1	3	-	0%	1%
C02 <sub>C1, 1%nS</sub>	CPII F 40	nS	1	3	-	1%	1%
C03 <sub>C1, 3%nS</sub>	CPII F 40	nS	1	3	-	3%	1%
C04 <sub>C2, 0%nS</sub>	CPII E 40	-	1	3	-	0%	1%
C05 <sub>C2, 1%nS</sub>	CPII E 40	nS	1	3	-	1%	1%
C06 <sub>C2, 3%nS</sub>	CPII E 40	nS	1	3	-	3%	1%

Fonte: A Autora (2022)

Por se tratar de um estudo inicial, não foram considerados agregados leves, deixando esta análise para o estudo experimental com as argamassas leves.

### 3.2.2 Preparo das misturas

Para o preparo das misturas, a NBR 16541 (ABNT, 2016) estabelece um procedimento padrão para as argamassas dosadas em laboratório. Porém, esta norma não determina o momento de inserção do nanomaterial e do plastificante.

Por isso, o procedimento de preparo das misturas neste trabalho foi adaptado, considerando não apenas a norma, como também os trabalhos de Haruehansapong, Pulngern e Chucheepsakul (2014), Sonebi *et al.* (2015) e Mendes, Repette e Reis (2017).

Também foi considerada a dispersão correta do nanomaterial na água, juntamente com o aditivo, através de um dispersor elétrico de 10000 rpm (Figura 26), a fim de potencializar suas propriedades.

Figura 26 - Dispersor elétrico de 10000 rpm



Fonte: A Autora (2022)

Um teste preliminar foi realizado para a mesma quantidade de materiais (água, nS e aditivo), obtendo resultados visuais distintos. A Figura 27 comprova a diferença visual entre as misturas sem dispersão (Figura 27a), com dispersão manual (Figura 27b) e com dispersão elétrica (Figura 27c) com duração de 1 minuto.

Nota-se a formação de grumos de nS não hidratados na mistura sem dispersão e com dispersão manual, assim como a formação de espuma na mistura que fez o uso do dispersor elétrico devido ao aditivo plastificante. Estas características, conforme já apontado por outros autores no Capítulo 2, podem levar aos melhores resultados nas misturas com dispersão mecanizada.

Figura 27 - Efeito visual em função da forma de dispersão



Fonte: A Autora (2022)

Fukui *et al.* (2018) destacam que o procedimento de mistura pode influenciar no desempenho das argamassas. Estes autores confirmam que a mistura da Água no Pó resulta em um melhor desempenho da trabalhabilidade da argamassa. Em contrapartida, o tipo de mistura Pó na Água não é capaz de desfazer todos os aglomerados de materiais, acarretando na formação de grumos e prejudicando a reologia da pasta. Assim, foi adotada a mistura da água no pó.

Portanto, o preparo das misturas seguiu o seguinte procedimento, conforme se observa na Tabela 11.

No passo 2, o uso do dispersor elétrico somente foi necessário nas misturas com o nanomaterial, conforme visto nos trabalhos de Haruehansapong, Pulngen e Chuchepsakul (2014) e Sonebi *et al.* (2015), que utilizaram o equipamento para melhorar a dispersão da nanossílica e evitar a formação de aglomerados.

Tabela 11 - Procedimento de preparo das argamassas

<b>Procedimento</b>	<b>Descrição</b>
PASSO 1	Foi preparado, no mínimo, material para 2,5 kg somados de areia e cimento (anidros)
PASSO 2	A água (75%), nS e o plastificante foram agitados por 1 minuto no dispersor elétrico (quando for utilizado a nS)
PASSO 3	O material seco (cimento+areia) foi inserido no misturador
PASSO 4	75% da água já com nS (se for o caso) e o plastificante foi adicionada no recipiente misturador nos primeiros 10 s, deixando misturar por 30 s em velocidade baixa
PASSO 5	O misturador foi acionado em velocidade alta por 60s
PASSO 6	Desligou-se o equipamento para raspar o recipiente com espátula e limpar as pás num intervalo de 90 s
PASSO 7	Foram adicionados os 25% restante de água em 10 s e misturado por 60s em velocidade baixa

Fonte: Adaptado de NBR 16541 (ABNT, 2016); Haruehansapong, Pulngern e Chucheepsakul (2014); Sonebi *et al.* (2015); Mendes, Repette e Reis (2017)

### 3.2.3 Ensaios

A Tabela 12 apresenta o resumo dos ensaios realizados, com as respectivas normas de referência e o local de realização.

Tabela 12 - Tabela resumo dos ensaios experimentais

<b>Grupo de ensaio</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Nº de amostras por composição</b>	<b>Nº de composições</b>	<b>Nº total de amostras</b>	<b>Norma de referência</b>	<b>Local de realização</b>
Microestrutural	Difratômetro com Raios X (DRX)	1	3	3	-	LabTag/UFPE
Térmicos	Diferencial (ATD)	1	3	3	-	LTM/UFPE
	Gravimétrico (TG)	1	3	3	-	LTM/UFPE
Caracterização no Estado fresco	Consistência	1	6	6	NBR 13276 (ABNT, 2016)	UFPE
	Densidade de massa fresca	1	6	6	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Teor de ar incorporado	1	6	6	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
Caracterização no Estado endurecido	Absorção de água por capilaridade	3	6	18	NBR 15259 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Densidade de massa aparente	3	6	18	NBR 13280 (ABNT, 2005)	UniFBV
Mecânicos	Resistência à tração na flexão	6	6	36	NBR 13279 (ABNT, 2005)	UniFBV/UFPE
	Resistência à compressão axial	12	6	72	NBR 13279 (ABNT, 2005);	UniFBV/UFPE

Fonte: A Autora (2022)

Os ensaios de caracterização por Difratometria de Raios X (DRX) foram realizados apenas nas pastas, tendo em vista que o agregado miúdo pode promover o aparecimento de picos no gráfico, comprometendo a identificação dos componentes presentes.

Já os ensaios de ATD e TG foram realizados nas argamassas convencionais apenas, não sendo possível a realização nas argamassas leves, pois o ensaio requer temperaturas até 1000°C. Isto pode fundir o EPS ou queimar o pó de serra, comprometendo as condições do cadinho utilizado para a armazenagem do material.

Também foram realizados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, bem como os ensaios de resistência mecânica aos 7 e 28 dias.

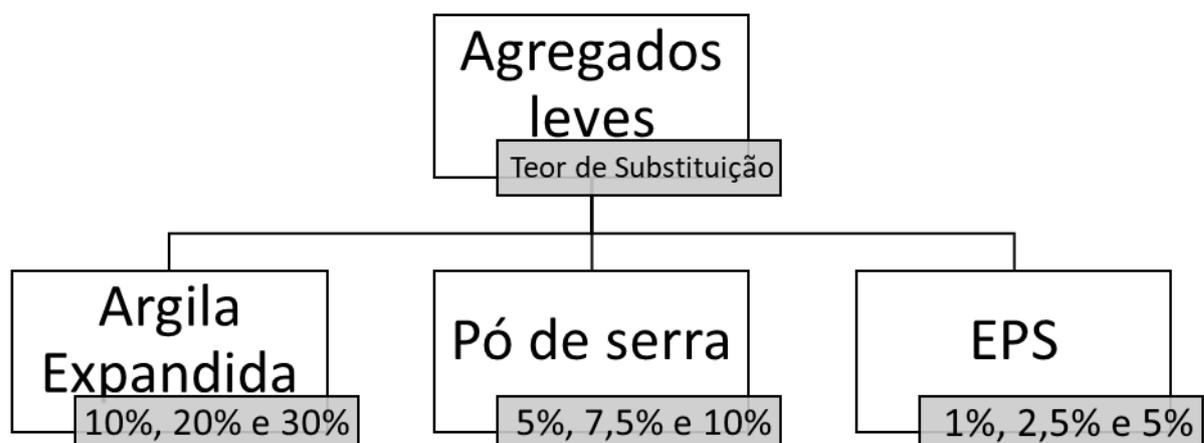
Os detalhes destes ensaios relacionados ao preparo dos moldes, como adensamento e cura, estão descritos ao final deste capítulo no tópico 3.5. Já os resultados estão apresentados no capítulo 4, indicando que o teor de 3% de nS possui resultados mais promissores.

### 3.3 ESTUDO EXPERIMENTAL EM ARGAMASSAS LEVES

Após o estudo preliminar, foi realizado um estudo experimental em 18 composições de argamassas leves, cujo objetivo foi analisar o comportamento destas misturas com agregado leve e com a nanossílica, a fim de verificar a possibilidade de ganhos de desempenho com a nanotecnologia, viabilizando o maior emprego de agregados mais leves.

Alguns parâmetros foram mantidos constantes, como o tipo de cimento e o teor de nanomaterial, que foram definidos com base nos resultados do estudo preliminar. Já as variáveis deste estudo foram: o tipo e as proporções dos agregados leves; bem como a presença ou não da nanossílica (Figura 28).

Figura 28 - Variáveis do estudo experimental



Fonte: A Autora (2022)

Os teores de substituição em massa escolhidos para as argamassas com argila foram de 10%, 20% e 30%, baseados nos trabalhos da Tabela 1. Já para o pó de serra, foram adotados os teores de 5%, 7,5% e 10% com base na Tabela 2. Por último, os teores de substituição por EPS foram de 1%, 2,5% e 5%, tendo como referência a Tabela 3. Portanto, os teores de substituição em massa foram diferentes para cada agregado leve.

Caso os teores fossem mantidos iguais para os 3 materiais, a substituição em massa iria implicar em maiores volumes para o EPS, que apresenta uma massa específica menor. Isso poderia prejudicar a fluidez da mistura e a aderência da pasta nos agregados.

A seguir, é apresentado o detalhamento destas composições, o procedimento de preparo destas misturas e os ensaios realizados.

### 3.3.1 Composições

As composições analisadas estão detalhadas na Tabela 13, identificadas pelo tipo e teor de agregado leve e pelo teor de nS.

Tabela 13 - Composições analisadas no estudo experimental com argamassas leves

Argamassa	Agregado Leve	Proporção				
		Cimento	Areia Natural	Agregado Leve	Nano material	Aditivo Plastificante
C01 10%AE, 0%nS	AE	1	3	10%	0%	1%
C02 20%AE, 0%nS	AE	1	3	20%	0%	1%
C03 30%AE, 0%nS	AE	1	3	30%	0%	1%
C04 10%AE, 3%nS	AE	1	3	10%	3%	1%
C05 20%AE, 3%nS	AE	1	3	20%	3%	1%
C06 30%AE, 3%nS	AE	1	3	30%	3%	1%
C07 5%SM, 0%nS	SM	1	3	5%	0%	1%
C08 7,5%SM, 0%nS	SM	1	3	7,5%	0%	1%
C09 10%SM, 0%nS	SM	1	3	10%	0%	1%
C10 5%SM, 3%nS	SM	1	3	5%	3%	1%
C11 7,5%SM, 3%nS	SM	1	3	7,5%	3%	1%
C12 10%SM, 3%nS	SM	1	3	10%	3%	1%
C13 1%EPS, 0%nS	EPS	1	3	1%	0%	1%
C14 2,5%EPS, 0%nS	EPS	1	3	2,5%	0%	1%
C15 5%EPS, 0%nS	EPS	1	3	5%	0%	1%
C16 1%EPS, 3%nS	EPS	1	3	1%	3%	1%
C17 2,5%EPS, 3%nS	EPS	1	3	2,5%	3%	1%
C18 5%EPS, 3%nS	EPS	1	3	5,0%	3%	1%

Fonte: A Autora (2022)

O tipo de aglomerante utilizado foi o cimento composto CP II E 40 (Cimento 2), bem como o teor de nanossílica escolhido foi de 3% em substituição à massa de cimento. Decidiu-se manter padronizados a relação aglomerante/agregado de 1:3 em massa, o fator a/c de 0,52 e o teor de aditivo plastificante 1% em massa do cimento.

As composições de 1 a 6 apresentam argila expandida; enquanto, as composições 7 a 12 referem-se às misturas com pó de serra e, por último, as composições 13 a 18 correspondem às aquelas com EPS. Para cada substituição da areia natural, foram moldadas composições com e sem nS.

### 3.3.2 Preparo das misturas

O procedimento de preparo foi o mesmo utilizado nas argamassas do estudo preliminar, pois a sequência com a qual os materiais são adicionados à mistura pode influenciar diretamente no comportamento de argamassas no estado fresco e refletir na qualidade do revestimento, conforme mencionado por Fukui *et al.* (2018).

### 3.3.3 Ensaios

A Tabela 14 apresenta o resumo dos ensaios realizados, com o detalhamento das amostras ensaiadas e as respectivas normas de referência, bem como o local de realização.

Tabela 14 - Tabela resumo dos ensaios experimentais

Grupo de ensaio	Ensaio	Nº de amostras por composição	Nº de composições	Nº total de amostras	Norma de referência	Local de realização
Caracterização no Estado fresco	Consistência	1	18	18	NBR 13276 (ABNT, 2016)	UFPE
	Densidade de massa fresca	1	18	18	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Teor de ar incorporado	1	18	18	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
Caracterização no Estado endurecido	Absorção de água por capilaridade	3	18	54	NBR 15259 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Densidade de massa aparente	3	18	54	NBR 13280 (ABNT, 2005)	UniFBV
Mecânicos	Resistência à tração na flexão	6	18	108	NBR 13279 (ABNT, 2005)	UniFBV/UFPE
	Resistência à compressão axial	12	18	216	NBR 13279 (ABNT, 2005);	UniFBV/UFPE

Fonte: A Autora (2022)

## 3.4 ESTUDO DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS

Após os estudos com as argamassas convencionais e com as argamassas leves, foram selecionadas 5 composições para a realização do ensaio de absorção sonora. Este ensaio foi

realizado em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria/RS, necessitando de uma quantidade de amostras significativa por composição, o que exigiu custos associados de material, de mão-de-obra e de transporte para a sua viabilidade. Por isso, este ensaio não foi realizado em todas as composições analisadas.

A seguir, é apresentado os critérios de escolha destas misturas selecionadas, quais foram estas misturas, o procedimento de preparo e os ensaios realizados.

### 3.4.1 Composições

Os critérios de escolha das 5 composições foram os resultados de resistência mecânica e de consistência obtidos nas fases 2 e 3, bem como o teor mais elevado de agregado leve (em se tratando de argamassas leves), tendo em vista que estes agregados podem melhorar a absorção sonora, segundo alguns autores já mencionados no Capítulo 2.

Sabe-se que a resistência mecânica de argamassas para assentamento e para revestimento no Brasil deve atender os requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005), a qual determina valores de resistência à tração na flexão entre 1,5 e 4,5 MPa e valores de resistência à compressão entre 2 MPa e 9 MPa, podendo estar fora destas faixas desde que obedeça ao valor máximo de 1,5 vezes a resistência do bloco utilizado na alvenaria, conforme a NBR 16868-1 (ABNT, 2020). Caso contrário, a alvenaria pode apresentar fissurações. Além disso, a consistência recomendada pela NBR 13276 (ABNT, 2016) é de no mínimo 260 mm. Assim, as composições escolhidas não deveriam estar muito distantes destes valores recomendados.

Dessa maneira, estas misturas selecionadas estão indicadas na Tabela 15, sendo 2 composições de argamassas convencionais do estudo preliminar para fins de comparação e 3 composições com agregados leves do estudo com argamassas leves, totalizando as 5 misturas.

Tabela 15 - Composições escolhidas

Argamassa	Agregado Leve	Proporção				
		Cimento	Areia Natural	Agregado Leve	Nano material	Aditivo Plastificante
C04 C2, 0% nS	-	1	3	0%	0%	1%
C06 C2, 3% nS	-	1	3	0%	3%	1%
C05 20%AE, 3%nS	AE	1	3	20%	3%	1%
C16 1%EPS, 3%nS	EPS	1	3	1%	3%	1%
C17 2,5%EPS, 3%nS	EPS	1	3	2,5%	3%	1%

Fonte: A Autora (2022)

### 3.4.2 Preparo das misturas

O procedimento de preparo foi o mesmo utilizado nos estudos anteriores.

### 3.4.3 Ensaios

A Tabela 16 apresenta o resumo dos ensaios realizados, com o detalhamento das amostras ensaiadas e as respectivas normas de referência, bem como o local de realização.

Tabela 16 - Tabela resumo dos ensaios experimentais

Grupo de ensaio	Ensaio	Nº de amostras por composição	Nº de composições	Nº total de amostras	Norma de referência	Local de realização
Caracterização no Estado fresco	Consistência	1	5	5	NBR 13276 (ABNT, 2016)	UFPE
	Densidade de massa fresca	1	5	5	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Teor de ar incorporado	1	5	5	NBR 13278 (ABNT, 2005)	UniFBV
Caracterização no Estado Endurecido	Absorção de água por capilaridade	3	5	15	NBR 15259 (ABNT, 2005)	UniFBV
	Densidade de massa aparente	3	5	15	NBR 13280 (ABNT, 2005)	UniFBV
Mecânicos	Resistência à tração na flexão	3	5	15	NBR 13279 (ABNT, 2005)	UniFBV/UFPE
	Resistência à compressão axial	6	5	30	NBR 13279 (ABNT, 2005);	UniFBV/UFPE
Acústico	Absorção sonora	6	5	30	ISO 10534-2 (ISO, 1998)	UFPE/UFMS

Fonte: A Autora (2022)

Vale salientar que nas etapas 2 e 3 o fator a/c foi mantido padronizado em 0,52 e algumas destas composições selecionadas apresentaram o espalhamento inferior a 260 mm. Por isso, após a seleção inicial, o fator a/c foi ajustado para cada uma destas composições, a fim de obter o espalhamento mínimo de 260 mm, com exceção da argamassa de referência C04C2,0%NS, que já apresentava um espalhamento de 284 mm. Com um novo teor de água, foi necessário obter novamente os resultados da caracterização física e de resistência mecânica, juntamente com os resultados de absorção sonora, conforme apresenta a Tabela 16.

## 3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A seguir, os ensaios que foram realizados são mais detalhados, considerando a justificativa de realização, o procedimento e detalhes da execução.

### 3.5.1 DRX

O ensaio de difratometria com Raios X se baseia no espalhamento da radiação eletromagnética, provocada pela interação entre o feixe de raio-x incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material através da Lei de Bragg. O resultado deste ensaio é um gráfico que relaciona a intensidade do feixe (counts) e o ângulo de Bragg ( $2\theta$ ), no qual é possível a identificação das fases minerais presentes nas pastas, como a calcita (C), quartzo (Q), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), entre outros.

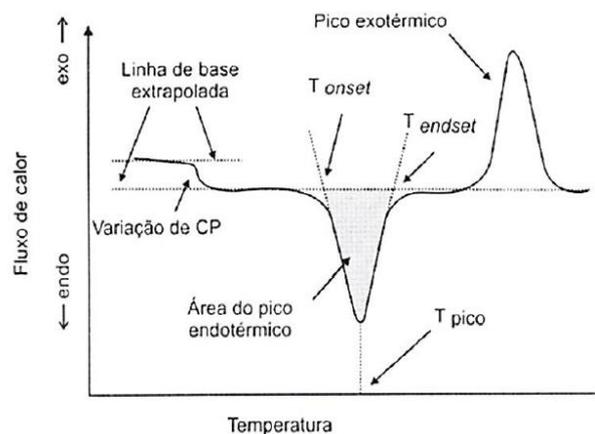
Este ensaio é fundamental para, juntamente com o ATD-TG, verificar a formação de C-S-H nas pastas cimentícias, não sendo possível realizá-lo nas argamassas, tendo em vista que os grãos de areia podem promover picos de quartzo que comprometem o entendimento do gráfico. Por isso, este ensaio foi realizado apenas nas pastas das argamassas convencionais aos 28 dias.

Os difratogramas foram obtidos com o equipamento Bruker D2 Phaser operando com 300 W (30 kV e 10 mA), irradiação Cu- $K\alpha_1$  ( $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$ ); detector Bruker-Lynxeye;  $2\theta = 5-80^\circ$ ; fenda primária: 0,1 mm; passo do goniômetro: 0,0202 °/s; tempo de contagem por passo: 0,575 s do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTAg/UFPE).

### 3.5.2 ATD e TG

A análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG) são técnicas bem consagradas para a análise da decomposição térmica do material, bem como da perda de massa, respectivamente, obtendo gráficos típicos destes testes (Figuras 29 e 30, respectivamente).

Figura 29 - Curva termodiferencial genérica

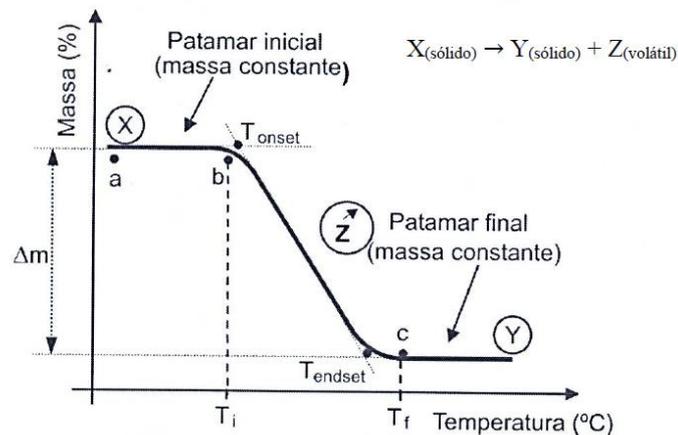


Fonte: Machado e Matos (2007); Barros (2016)

No caso da ATD, o gráfico 29 relaciona o fluxo de calor numa faixa de temperatura, no qual define-se picos endo e/ou exotérmicos decorrentes de reações adversas, como desidratação e oxidação. É relevante que o material seja inerte na faixa de temperatura analisada, não sofrendo modificações físicas, como por exemplo, alcançar o ponto de fusão (BARROS, 2016).

No caso do TG, o gráfico 30 relaciona a perda ou ganho de massa (%) com a variação controlada de temperatura, no qual a perda de massa acontece entre os pontos b e c. A massa perdida é convertida em elemento volátil (BARROS, 2016).

Figura 30 - Curva termogravimétrica genérica



Fonte: Machado e Matos (2007); Barros (2016)

As curvas ATD-TG foram obtidas simultaneamente utilizando o equipamento *Shimadzu* DTH 60, com taxa de aquecimento de 15 °C/min e temperatura máxima de 1000°C. A análise foi realizada em atmosfera inerte de nitrogênio (N<sub>2</sub>) com fluxo constante de 50 ml/min. Empregou-se como amostra de referência a alumina calcinada. O porta-amostra utilizado foi um cadinho de alumina cilíndrico, com diâmetro de 5,0 mm e altura de 2,5 mm. As medidas foram realizadas com aproximadamente 40 mg de cada alíquota.

Vale ressaltar que, nesta pesquisa, as análises térmicas foram realizadas apenas nas argamassas convencionais, pois o EPS e o Pó de Serra não são inertes nas temperaturas analisadas (até 1000°C), podendo fundir ou carbonatar em temperatura inferior, o que compromete o ensaio e danifica o cadinho.

### 3.5.3 Ensaios de caracterização em argamassas

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada através dos ensaios de consistência de mesa *flow table*, densidade de massa fresca e teor de ar incorporado.

A determinação do índice de consistência permite a verificação das condições de fluidez do material fresco. Foram feitas 3 leituras de diâmetro nas argamassas após o espalhamento na mesa, conforme se observa na Figura 31.

Figura 31 - Ensaio de consistência de mesa *Flow Table*



Fonte: A Autora (2022)

Para o ensaio de densidade de massa fresca, obtida através da NBR 13278 (ABNT, 2005), foi utilizado um recipiente cilíndrico com capacidade aproximada de 400 cm<sup>3</sup> e calibrado previamente com água deionizada, conforme a Figura 32a, a fim de descobrir o volume do recipiente.

Figura 32 - Calibração do recipiente em (a) e pesagem do recipiente com a argamassa (b)



Fonte: A Autora (2022)

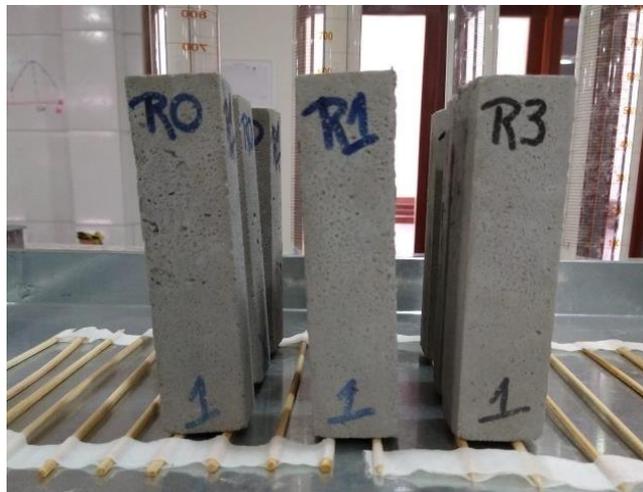
Posteriormente, o recipiente foi esvaziado e preenchido com 3 camadas de argamassa fresca e compactadas com 20 golpes de soquete metálico cada, sendo pesados em seguida (Figura 32b). O teor de ar incorporado pôde ser obtido a partir das densidades de massa fresca, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005) e das massas específicas dos materiais constituintes da argamassa, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021).

Sabe-se que a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar incorporado são parâmetros inversamente proporcionais em argamassas convencionais. O valor da densidade menor pode ser mais favorável, pois sinaliza economia de material; enquanto, maiores teores de ar podem indicar melhoria na trabalhabilidade, embora uma menor resistência mecânica (FUKUI *et al.*, 2018). O teor de ar incorporado também está intimamente associado às características acústicas, pois pode melhorar a absorção sonora dos revestimentos (CHEN; YU; BROUWERS, 2017).

Com relação à caracterização das argamassas no estado endurecido, foram realizados os ensaios de densidade de massa aparente e de absorção de água por capilaridade.

A densidade de massa aparente foi obtida, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), a partir da moldagem de 3 corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm), conforme a Figura 33, que foram preparados em 2 camadas e adensados com 30 golpes em cada. Estes corpos de prova foram curados em tanque com água até completar os 28 dias e secos em estufa por 24h para a aferição das dimensões com um paquímetro em pelo menos 2 locais. Este ensaio tem a finalidade de comparar uma redução na densidade das composições com agregados leves e o valor desta redução.

Figura 33 - Corpos de prova para ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: A Autora (2022)

Já para o ensaio de absorção por capilaridade, conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), também foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para cada composição (Figura 33), sendo adensados e curados da mesma forma que o ensaio anterior.

Os corpos de prova utilizados para a caracterização física no estado endurecido estão apresentados no Apêndice F para fins de comparação do aspecto visual.

### 3.5.4 Ensaio mecânicos

Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram desmoldados com 48h e curados em tanque imerso em água da concessionária de abastecimento, sendo retirados apenas para o rompimento.

A determinação da resistência à tração na flexão e a resistência à compressão axial seguiu as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005) e conforme se observa na Figura 34.

Figura 34 - Ensaio de resistência à tração na flexão (a) e de resistência à compressão axial (b)



Fonte: A Autora (2022)

O rompimento dos corpos de prova foi realizado por meio de uma prensa eletrônica da marca Shimadzu modelo Autograph AGX-V, com célula de carga de 300 kN. A velocidade de carga foi de 50 N/s (tração) e 500 N/s (compressão), conforme estabelecido pela norma de referência.

Para a determinação da resistência à tração na flexão, foram moldados 6 corpos de prova (cp's) prismáticos por composição com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, conforme a norma de referência, sendo 3 cp's para rompimento com 7 dias e 3 cp's com rompimento aos

28 dias. Após a realização deste ensaio, as metades destes corpos de prova foram utilizadas para a realização do ensaio de resistência à compressão axial, totalizando 12 cp's por composição, sendo 6 para 7 dias e 6 para 28 dias.

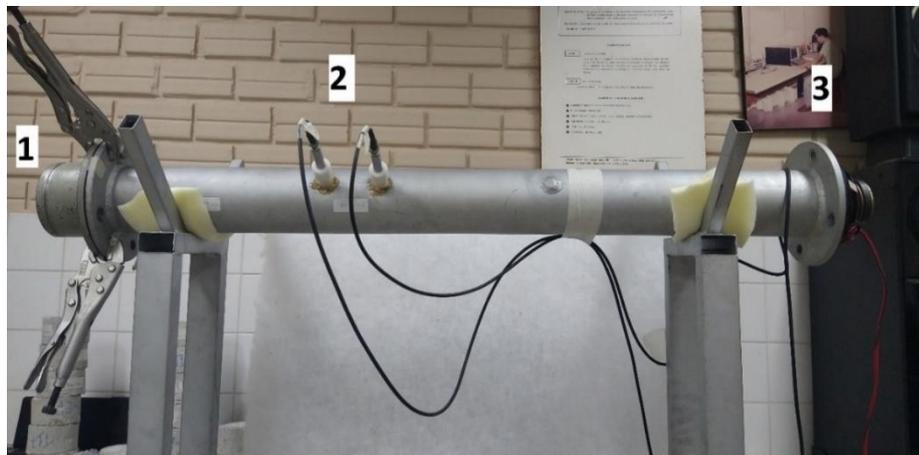
Assim como na caracterização física no estado endurecido, os corpos de prova utilizados para o ensaio de resistência mecânica estão apresentados no Apêndice F para fins de comparação do aspecto visual.

### 3.5.5 Ensaio acústico

O coeficiente de absorção sonora ponderado ( $\alpha_w$ ) foi obtido através do ensaio não destrutivo com tubo de impedância, conforme as recomendações da norma ISO 10534-2 (ISO, 1998), realizado em parceria com o laboratório de acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS).

Na Figura 35, o porta amostra metálico, no qual o corpo de prova é inserido, está indicado em uma das extremidades do tubo, que apresenta cerca de 1 m de comprimento.

Figura 35 - Tubo de impedância com porta amostra (1), microfones (2) e fonte sonora (3)



Fonte: A Autora (2022)

No tubo há 2 microfones, sendo o primeiro posicionado a cerca de 40 cm da amostra e separados entre si por 8 cm. Na outra extremidade, a fonte emite uma onda sonora que percorre o interior do tubo, sendo parte captada pelos microfones e parte absorvida pela amostra analisada.

Foram moldados 6 corpos de prova (cps) cilíndricos para cada composição, totalizando 30 amostras, com dimensões entre 100 a 103 mm de diâmetro e 60 a 63 mm de altura, utilizando

uma forma adaptável feita com Etil Vinil Acetato, conhecido como EVA, conforme se observa na Figura 36.

Os corpos de prova foram desmoldados com 48h e submetidos à cura em tanque com água por 28 dias. Somente após este período, foram retificados em ambos os lados e os ensaios foram realizados.

Figura 36 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos com EVA



Fonte: A Autora (2022)

Na preparação do ensaio, os corpos de prova são inseridos no porta amostras, não devendo existir folgas laterais, sendo ajustados com EVA e vaselina. Além disso, usa-se uma massa modeladora para vedar a interface entre eles, conforme se observa na Figura 37.

Figura 37 - Preparação dos corpos de prova no porta amostra



Fonte: A Autora (2022)

Após esta preparação, pode-se iniciar o ensaio, no qual a fonte sonora emite um ruído branco por 30 s, que é captado por ambos os microfones na posição direta e, posteriormente, na posição inversa. Além disso, a temperatura e umidade do ambiente são parâmetros de entrada.

A relação dos equipamentos se encontra na Tabela 17 abaixo com as respectivas especificações e as funções de cada um.

Tabela 17 - Relação dos equipamentos para o ensaio com o tubo de impedância

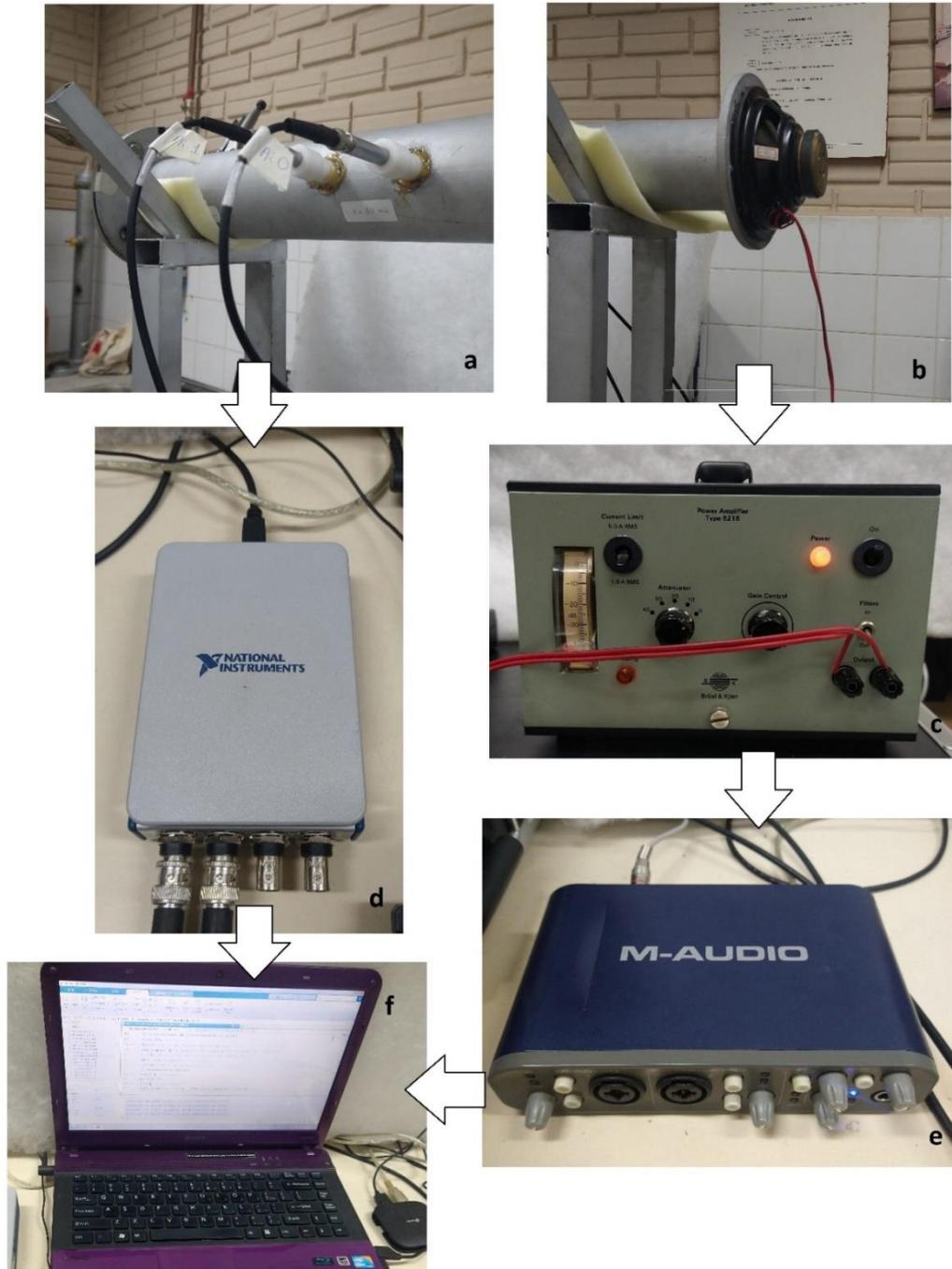
<b>Equipamento</b>	<b>Especificação</b>	<b>Função</b>
a	2 Conjuntos de Microfone TEDs Bruel & Kaer Type 2671	Captar o som em 2 posições (direta e inversa)
b	Fonte sonora	Emitir um ruído branco por 30 s
c	Amplificador de potência Bruel & Kaer Type 5215	Amplificar a capacidade de corrente do sinal aplicado à sua entrada, gerando um sinal sonoro na fonte.
d	Módulo de entrada de som e vibração da série C National Instruments	Proporcionar aquisição de sinais dinâmicos em aplicações de som, oferecendo suporte à ambientes de programação, como o Matlab
e	Interface M-Audio Fast Track Pro	Interface entre equipamentos digitais, possuindo saída USB
f	Notebook	Processar os dados através do software Matlab

Fonte: A Autora (2022)

Na Figura 38 é possível observar a correta montagem entre estas partes, obtendo ao final uma curva que relaciona os coeficientes de absorção sonora ( $\alpha$ ) em função da frequência, variando entre 50 Hz a 1900 Hz, para cada corpo de prova.

Além disso, pode-se escolher as frequências centrais de 4 bandas de oitava, as quais são 250, 500, 1000 e 2000 Hz, para obter um valor médio ( $\alpha_m$ ) dos 6 corpos de prova para cada uma destas frequências. Também é possível obter o coeficiente de absorção ponderado ( $\alpha_w$ ), que é o principal parâmetro para comparação de materiais absorventes, correspondendo à média aritmética dos coeficientes médios destas 4 frequências, arredondados para o múltiplo mais próximo de 0,05.

Figura 38 - Componentes do ensaio de absorção sonora com tubo de impedância



Fonte: A Autora (2022)

#### 4 ESTUDO PRELIMINAR EM ARGAMASSAS CONVENCIONAIS

Este capítulo apresenta os resultados preliminares da caracterização das argamassas convencionais, bem como os resultados de resistência mecânica de corpos de prova prismáticos.

Estes resultados preliminares contribuíram para a definição do tipo de cimento e do melhor teor de nanomaterial nas argamassas leves, tendo em vista que os autores citados no estado da arte (Tabela 4) utilizaram diferentes percentuais de nanossílica (nS) em seus trabalhos.

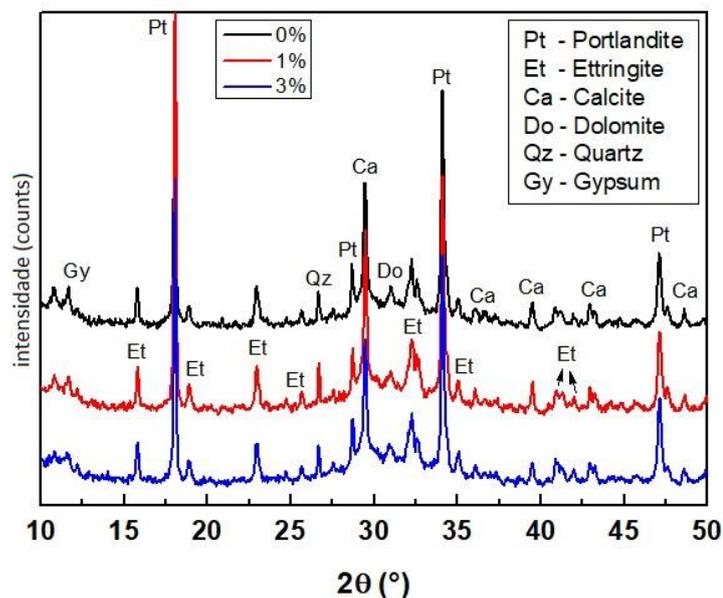
A seguir, é apresentada a caracterização da estrutura cristalina das pastas convencionais; seguida das análises térmicas ATD/TG e dos ensaios nos estados fresco e endurecido. Por fim, os ensaios de resistência mecânica em corpos de prova prismáticos são apresentados.

##### 4.1 DRX

Os difratogramas das pastas com 0%, 1% e 3% de nS aos 28 dias estão apresentados no gráfico da Figura 39, o qual indica picos acentuados de portlandita e de calcita, que são inferiores na pasta com 3% de nS.

Isso também é devido a menor quantidade de cimento nesta pasta, tendo em vista a substituição em massa pela nanossílica, mas a menor quantidade de portlandita e calcita pode indicar maior teor de cristas de C-S-H.

Figura 39 - Difratograma das pastas cimentícias aos 28 dias

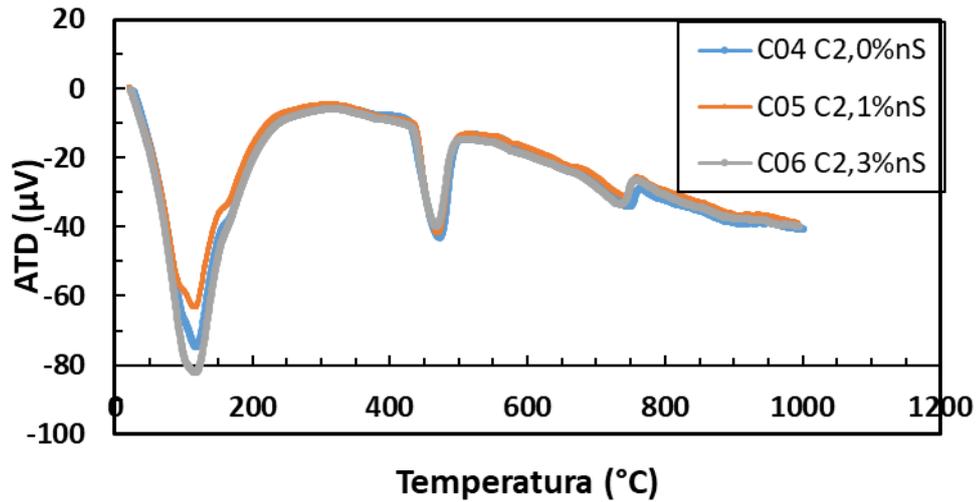


Fonte: A Autora (2022)

## 4.2 ANÁLISES TÉRMICAS DIFERENCIAL (ATD) E GRAVIMÉTRICA (TG)

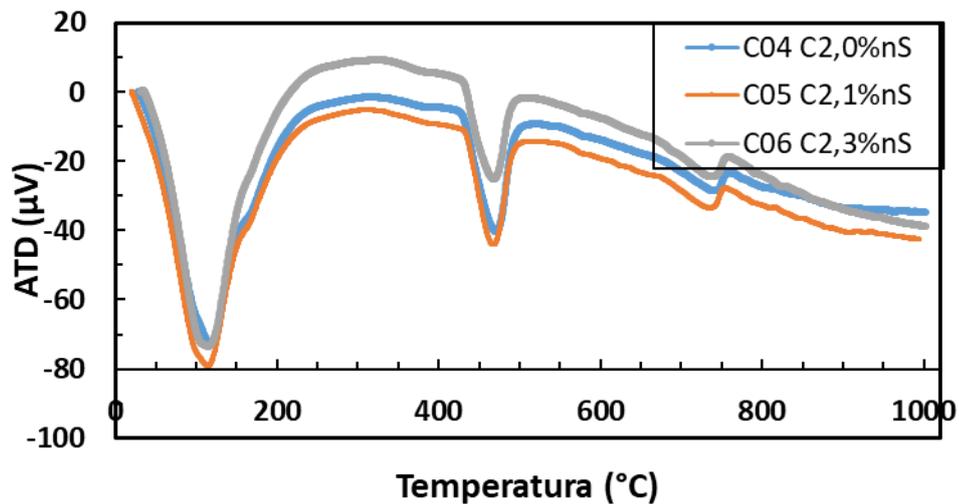
As Figuras 40 e 41 apresentam as curvas termodiferenciais (ATD), associadas às argamassas convencionais C04 C2,0%nS, C05 C2,1%nS e C06 C2,3%nS aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 40 - Curva termodiferencial das argamassas convencionais aos 7 dias



Fonte: A Autora (2022)

Figura 41 - Curva termodiferencial das argamassas convencionais aos 28 dias



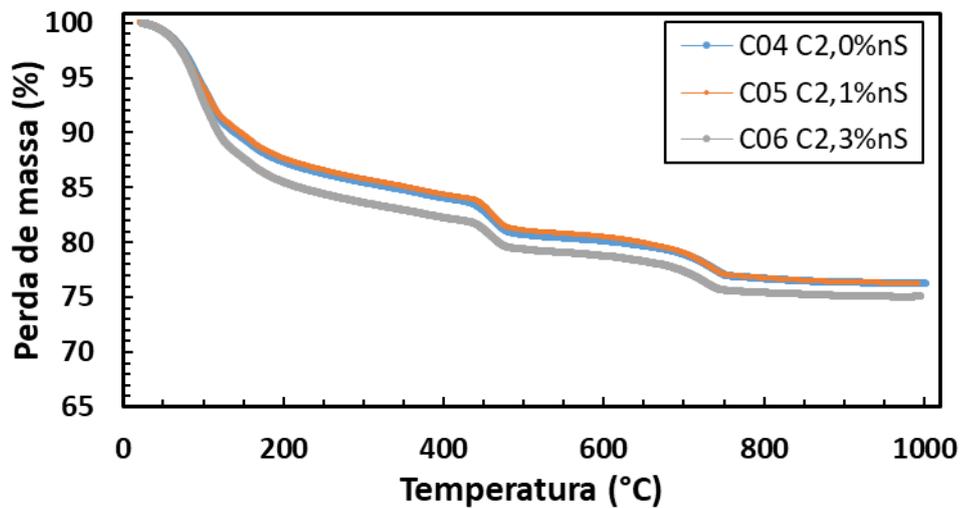
Fonte: A Autora (2022)

Qualitativamente, as curvas ATD indicam que não há uma variação significativa nas temperaturas de decomposição das argamassas, observadas entre 50°C e 200°C e entre 400°C e 500°C. Os picos endotérmicos acontecem aos 115°C e aos 470°C, aproximadamente.

Aos 7 dias, verifica-se que a argamassa com 3% de nS apresenta uma área de pico endotérmico maior entre 50°C e 200°C; enquanto, aos 28 dias, esta mesma argamassa é a que apresenta a menor perda de calor, a partir dos 150°C, aproximadamente. Isto tem relação com a atividade pozolânica mais elevada nesta composição, conforme é discutido a seguir através das curvas termogravimétricas (TG).

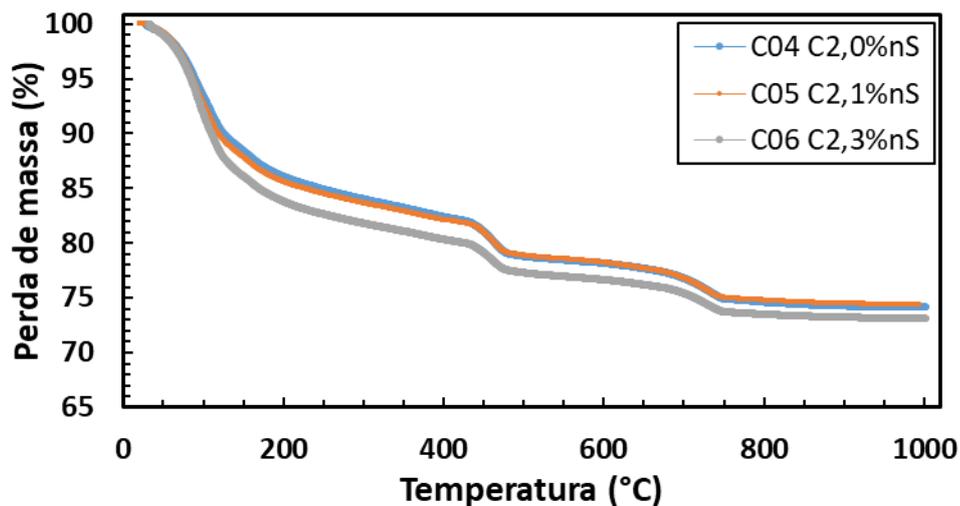
As Figuras 42 e 43 apresentam as curvas TG das argamassas convencionais C04 C<sub>2,0%nS</sub>, C05<sub>C<sub>2,1%nS</sub></sub> e C06 C<sub>2,3%nS</sub> aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 42 - Curva termogravimétrica das argamassas convencionais aos 7 dias



Fonte: A Autora (2022)

Figura 43 - Curva termogravimétrica das argamassas convencionais aos 28 dias



Fonte: A autora (2022)

Observa-se, qualitativamente, uma redução de massa em toda a faixa de temperatura analisada, proveniente da perda da água quimicamente combinada (AQC), da água remanescente do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e da liberação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) volátil dos carbonatos de cálcio dos calcários.

Os termogramas aos 7 e 28 dias apresentam uma perda de massa total em porcentagem em torno de 25% a 27% com queda acentuada entre 450°C e 500°C, sendo maior na argamassa com 3% de nS em toda a faixa de temperatura analisada.

Além disso, a partir das curvas ATD-TG, foi possível obter os teores de compostos hidratados formados, o teor de portlandita remanescente na matriz hidratada e, também, o teor de carbonato de cálcio, indicados na Tabela 18 e conforme Hoppe Filho *et al.* (2017).

Por exemplo, para a argamassa C04  $\text{C}_2, 0\% \text{nS}$ , o teor de água quimicamente combinada (AQC) relacionada à formação de C-S-H e das fases aluminato hidratadas é representado pela perda de massa de 17,99%, ocorrida entre a temperatura inicial do ensaio e 428°C. A água de composição do hidróxido de cálcio, quantificada na faixa de temperatura entre 428°C e 498°C, representou 3,2%. Com o valor deste teor de água, foi possível calcular o teor remanescente de hidróxido de cálcio, conforme Hoppe Filho *et al.* (2017), que foi de 13,16%. O teor de gás carbônico foi quantificado pela perda de massa ocorrida entre 498°C e 1000°C, que corresponde a 4,61%, sendo assim, possível obter o teor de carbonato de cálcio contido na pasta, que foi de 10,46%.

Tabela 18 - Teor de compostos hidratados, portlandita e carbonato de cálcio das argamassas

Argamassa	Descrição	AQC	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual	Fator de normalização
			H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>		
C04 $\text{C}_2, 0\% \text{nS}$	Perda de massa	17,99	3,20	13,16	4,61	10,46	74,20	1,348
	Perda de massa corrigida	24,24	4,31	17,74	6,21	14,09	100,00	-
C05 $\text{C}_2, 1\% \text{nS}$	Perda de massa	18,21	2,91	11,98	4,48	10,18	74,39	1,344
	Perda de massa corrigida	24,48	3,92	16,10	6,03	13,68	100,00	-
C06 $\text{C}_2, 3\% \text{nS}$	Perda de massa	20,00	2,69	11,06	4,19	9,51	73,12	1,368
	Perda de massa corrigida	27,34	3,68	15,13	5,73	13,00	100,00	-

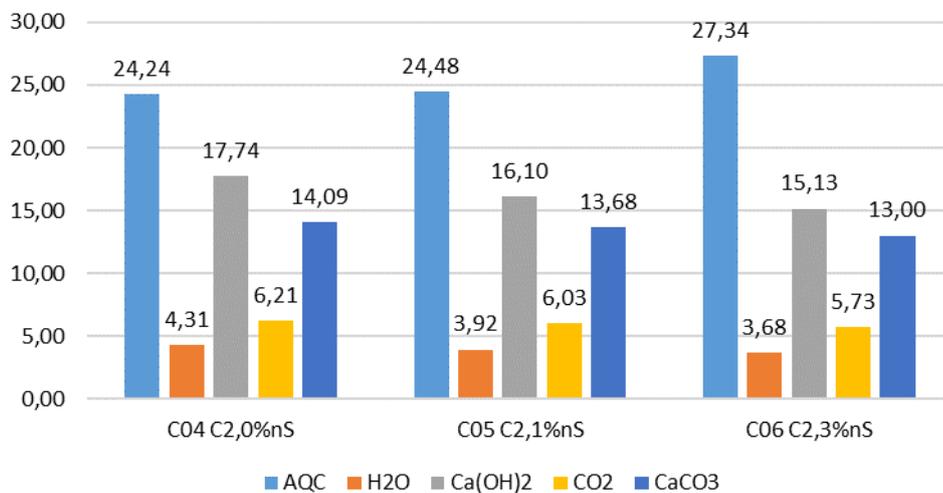
Fonte: Adaptado de Hoppe Filho *et al.* (2017)

Nas argamassas estudadas, de maneira geral, a água combinada volatiliza até 428°C, seguida da água de composição do hidróxido de cálcio (até 498°C) e, por fim, do dióxido de carbono até 1000°C. Ao final do ensaio, o material perdeu entre 25% a 27% da massa, dependendo da composição, restando uma massa residual. Esta perda de massa foi obtida através do gráfico da Figura 43.

Apesar das massas residuais serem próximas, não é possível comparar diretamente, já que os componentes voláteis variaram. Assim, deve-se corrigir as perdas de massa, conforme as recomendações de Taylor (1997), através de um fator de normalização para uma massa residual de 100%. Dessa forma, as perdas de massa foram incrementadas de valor correspondente para uma análise comparativa.

Com base nas informações corrigidas da Tabela 18, o gráfico da Figura 44 evidencia um maior teor de AQC nas argamassas com 3% de nS, proveniente, sobretudo, da hidratação do cimento e da atividade pozolânica. Hoppe Filho *et al.* (2017) afirmam que a presença de partículas finas favorece a nucleação do cimento, precipitando compostos hidratados sobre as partículas de adição e, por consequência, aumento da hidratação.

Figura 44 - Teor em porcentagem (%) dos compostos hidratados, portlandita e calcita formada



Fonte: Adaptado de Hoope Filho *et al.* (2017)

Além disso, observa-se um menor teor remanescente de cal para as argamassas com 3% de nS devido à menor quantidade de cimento e maior quantidade de adição ativa. A menor reserva alcalina também evidencia a capacidade de fixação de cal na formação do C-S-H, resultado da área específica elevada e do caráter amorfo.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

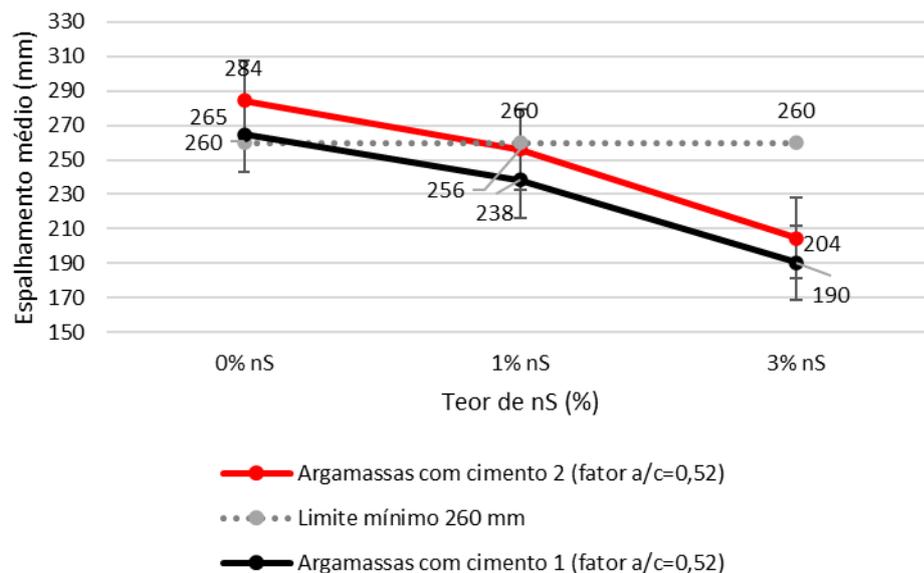
Os resultados dos ensaios de consistência, densidade de massa fresca e teor de ar incorporado são apresentados a seguir, os quais contemplam a caracterização física das composições.

#### 4.3.1 Consistência

As consistências das argamassas estão apresentadas no Apêndice G, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo obtidas através da média de 3 leituras de diâmetro, encontradas após o espalhamento na mesa de consistência.

No gráfico da Figura 45, percebe-se que o espalhamento das argamassas convencionais para ambos os cimentos diminuiu em torno de 28% com o aumento no teor de nS, inclusive, ficando abaixo do espalhamento mínimo recomendado por norma.

Figura 45 - Consistência nas argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

Esta redução é ocasionada pela elevada área específica do nanomaterial, tendendo a consumir mais água a ser adsorvida na superfície das partículas, conforme já foi mencionado por alguns autores no estado da arte. Assim, como o fator a/c e o teor de aditivo foram mantidos padronizados, houve queda no espalhamento e aumento da consistência, sendo necessário ajustar a consistência, posteriormente, para viabilizar a argamassa quanto à trabalhabilidade.

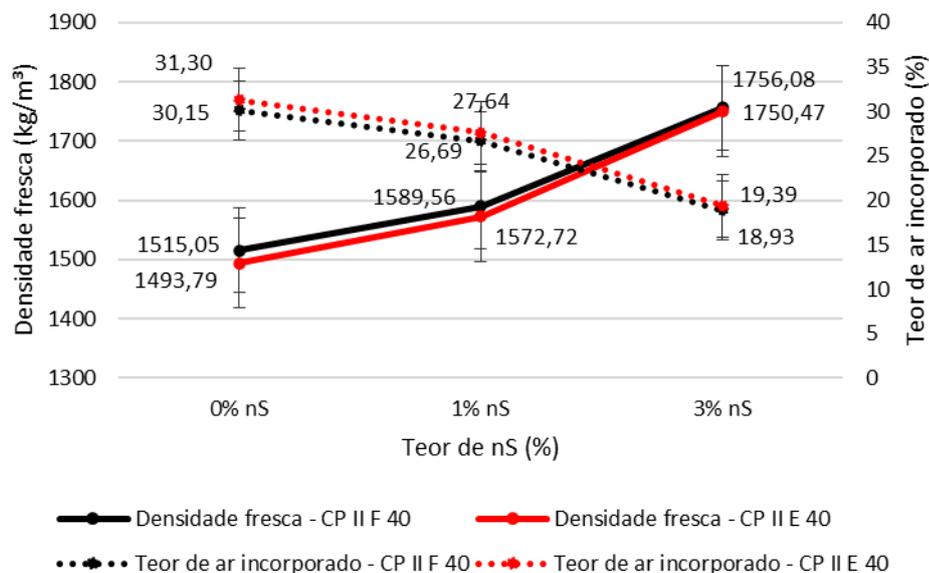
Além disso, as argamassas com o cimento 1 (com fíller) foram menos fluidas quando comparadas às argamassas com o cimento 2 (com escória de alto forno), que podem proporcionar uma melhor trabalhabilidade na execução de serviços com argamassas, como o revestimento de paredes ou assentamento de alvenaria, como já se sabe.

### 4.3.2 Densidade fresca e Teor de ar incorporado

As densidades de massa fresca para cada composição estão apresentadas no Apêndice G, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), sendo obtidas através da relação entre a massa do conjunto de argamassa e do volume do recipiente. Os teores de ar incorporado também são apresentados neste Apêndice, conforme a referida norma, sendo obtidos através da relação entre a densidade fresca ( $d$ ) e a densidade teórica ( $dt$ ).

Estas duas propriedades físicas estão relacionadas no gráfico da Figura 46, no qual é possível perceber que a densidade fresca aumenta em função do aumento do teor de nanossílica; enquanto, o teor de ar incorporado diminui para os cimentos analisados. Sabe-se que o teor de ar incorporado possui uma relação inversa com a densidade de massa fresca em argamassas convencionais, cujos resultados também sugerem uma diminuição nos vazios com a inserção da nanossílica.

Figura 46 - Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

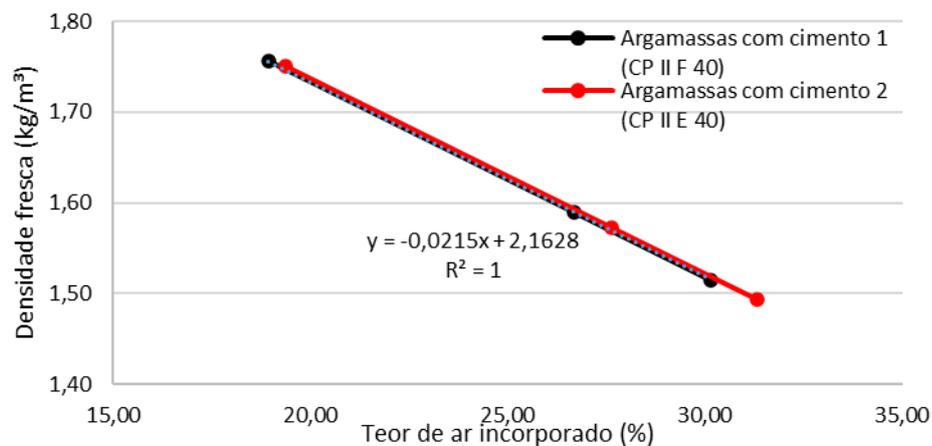
Para ambos os cimentos, a densidade fresca obtida para as composições com 1% de nS foram em torno de 5% maiores do que as argamassas sem nanomaterial; enquanto, as densidades das argamassas com 3% de nS foram em torno de 16% mais elevadas do que as argamassas de referência. Assim, não foi possível evidenciar divergências ne

Já para os teores de ar incorporado, houve reduções de 11,5% e 37%, respectivamente, para as argamassas com 1% e 3% de nS em relação à argamassa sem a nanossílica para ambos os cimentos analisados. No geral, o uso de 3% nS em substituição à massa de cimento promove

um aumento na densidade fresca e uma redução no teor de ar incorporado, que contribuem para o aumento da durabilidade e da resistência. Assim, o efeito da nS nestas duas propriedades físicas é mais evidente quando é utilizado 3% de nanomaterial.

Além disso, foi possível observar que, quando estas propriedades são relacionadas graficamente, apresentam uma relação linear e indiretamente proporcional com  $R^2$  igual 1, conforme se observa no gráfico da Figura 47. Portanto, não se verificam diferenças significativas nestas propriedades em relação ao tipo de cimento utilizado.

Figura 47 - Relação entre densidade fresca e teor de ar incorporado das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Foram realizados os ensaios de densidade de massa aparente e de absorção por capilaridade nas 6 composições convencionais aos 28 dias após a moldagem dos corpos de prova. Neste último ensaio, é possível obter a absorção aos 10 e 90 minutos de exposição à água e o coeficiente de capilaridade (C).

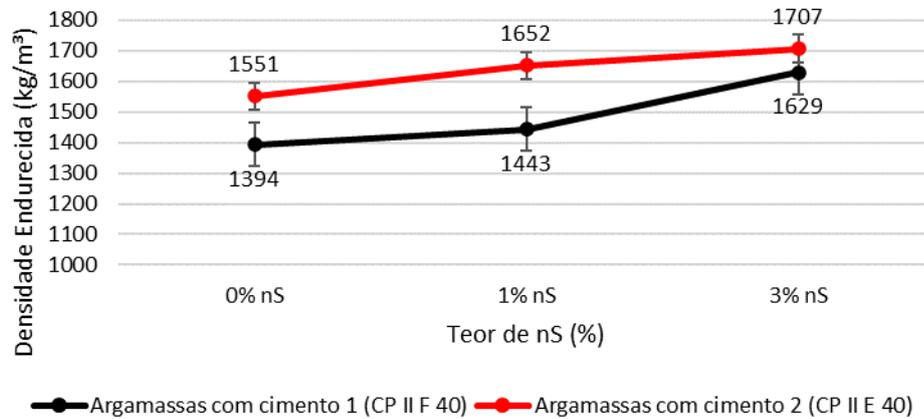
##### 4.4.1 Densidade de massa aparente

As densidades de massa aparente dos 3 corpos de prova para cada traço estão apresentadas no Apêndice G, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), sendo obtidas através da relação entre a massa e o volume das amostras. Para a obtenção deste volume, foram realizadas ao menos 2 leituras para a largura (L), altura (A) e comprimento (C) utilizando um paquímetro.

Com os resultados destas 3 amostras foi possível obter um valor médio, apresentado no gráfico da Figura 48, indicando que há densidades endurecidas diferentes, dependendo do tipo

de cimento. Porém, para ambos, há aumento nesta propriedade, conforme aumenta-se o teor de nanossílica.

Figura 48 - Densidade de massa aparente das argamassas convencionais



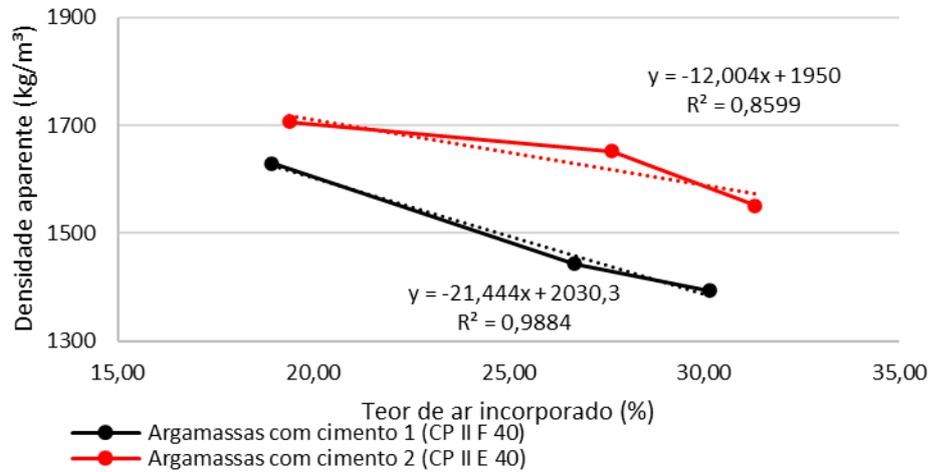
Fonte: A Autora (2022)

Para o cimento 1, a densidade obtida para a composição  $C02_{C1;1\%nS}$  foi em torno de 3,5% maior do que a  $C01_{C1;0\%nS}$ ; enquanto, a densidade da argamassa  $C03_{C1;3\%nS}$  foi em torno de 17% maior do que a argamassa sem nanomaterial. Para o cimento 2, a mistura  $C05_{C2;1\%nS}$  foi 6,5% mais densa do que  $C04_{C2;0\%nS}$ ; enquanto, a composição  $C06_{C2;3\%nS}$  apresentou uma densidade em torno de 10% mais elevada do que a argamassa sem nanomaterial. Assim, o efeito da nS é maior para 3% de nanomaterial.

Quando se compara a densidade aparente com o teor de ar incorporado, verifica-se um comportamento semelhante ao encontrado com a densidade fresca; porém com  $R^2$  menor. Apesar disto, ainda é possível relacionar estas duas propriedades através das relações indicadas no gráfico da Figura 49.

No geral, verifica-se que para ambos os cimentos, as densidades fresca e endurecida aumentaram; enquanto, o teor de ar incorporado diminuiu, como esperado por alguns autores, mas seguindo relações lineares apresentadas com  $R^2$  elevado. Isto facilita a obtenção dessas propriedades físicas de forma calculada e não mais experimental apenas.

Figura 49 - Relação entre densidade e teor de ar incorporado das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

Uma maior quantidade de nanossílica (até 3%) trouxe mudanças físicas interessantes, podendo trazer alterações na matriz cimentícia, influenciando outras propriedades como a absorção por capilaridade e a resistência mecânica, ambas verificadas a seguir.

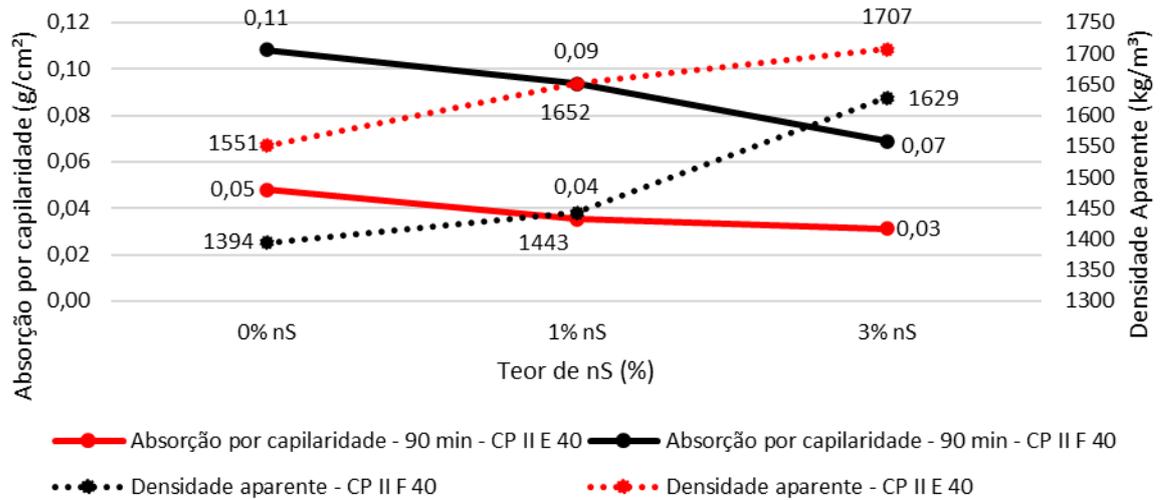
#### 4.4.2 Absorção e coeficiente de capilaridade

Os resultados de absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos dos 3 corpos de prova para cada traço estão apresentados no Apêndice G, conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), sendo obtidos através da relação entre a massa de água e a área da seção. Já o coeficiente de capilaridade (C), foi obtido através da diferença entre as massas nos 2 tempos de medição.

As absorções aos 10 minutos de exposição à água é praticamente a mesma para todos os teores de nanossílica, mas aos 90 minutos há mudanças nestas propriedades, sendo maior nas argamassas com adição de filler (em torno de 36%), conforme se observa na Figura 50. Isto se deve à menor permeabilidade dos cimentos com a escória de alto forno, sendo um comportamento já esperado.

Estes resultados também estão coerentes com os resultados de densidade fresca, de densidade aparente e o de teor de ar incorporado encontrados. Por exemplo, relacionando a absorção por capilaridade à densidade aparente no gráfico da Figura 51, nota-se que a relação entre estas propriedades físicas é inversamente proporcional, ou seja, maiores densidades implicam em menos poros, influenciando assim na absorção por capilaridade.

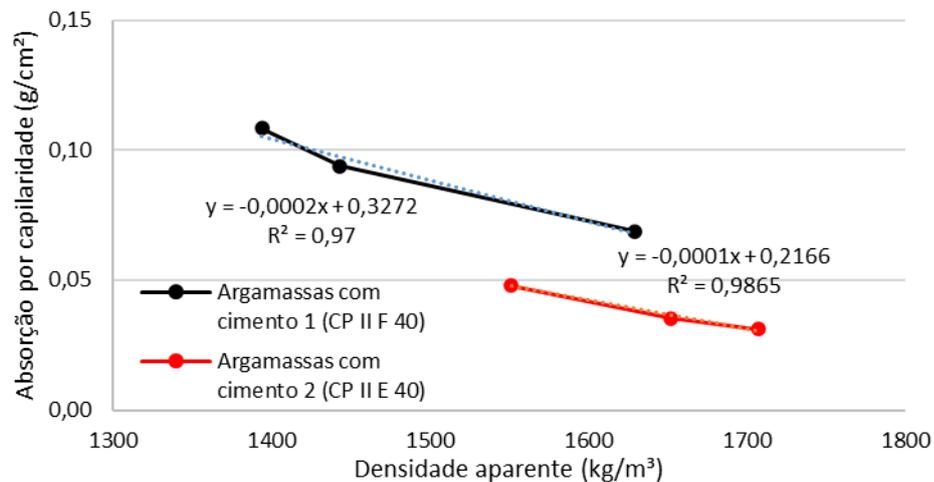
Figura 50 - Absorção aos 90 min e a densidade aparente das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

Também foi possível relacionar graficamente estas propriedades físicas de forma linear, obtendo  $R^2$  próximo a 1 (Figura 51), o que facilita a obtenção de uma propriedade em função da outra.

Figura 51 - Relação linear entre a absorção por capilaridade aos 90 min e a densidade aparente



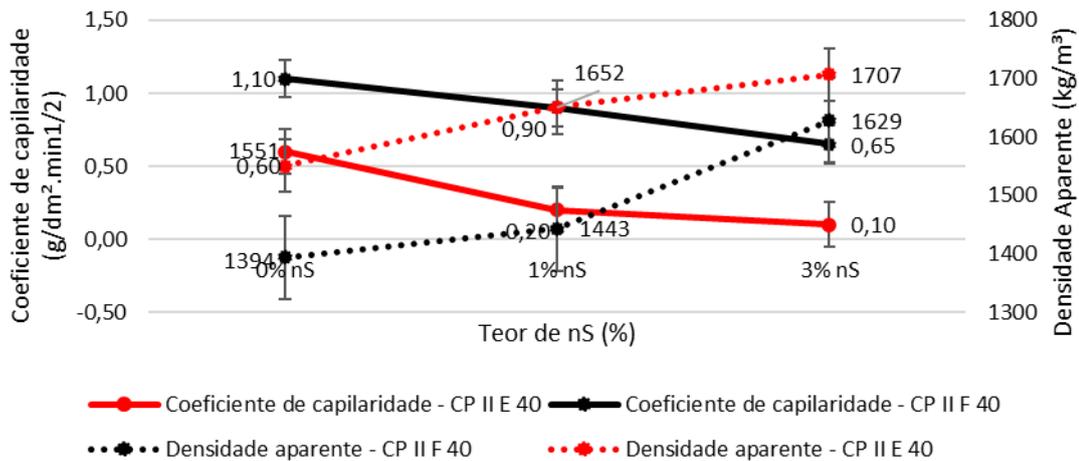
Fonte: A Autora (2022)

Já o coeficiente de capilaridade médio apresenta uma redução de cerca de 41% para as argamassas com o cimento 1 e de 83% para as misturas com o cimento 2, conforme o teor de nanossílica aumenta para 3% (Figura 52).

Estes resultados mostram que o aumento no teor de nS reduz a ascensão capilar da água em argamassas convencionais, o que pode aumentar a durabilidade destes materiais diante das intempéries do meio. Porém, recomenda-se mais ensaios que analisem a composição

mineralógica, principalmente quando expostos à intempéries em diferentes tempos de exposição.

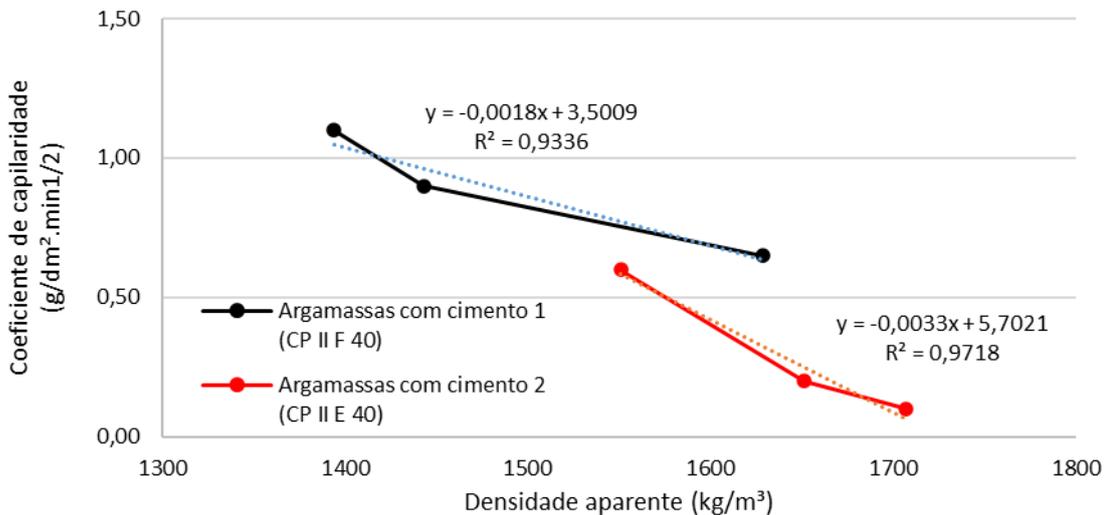
Figura 52 - Coeficiente de capilaridade e densidade aparente das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

O coeficiente de capilaridade também está relacionado de forma linear à densidade aparente (Figura 53), alcançando  $R^2$  também próximo a 1, o que confirma a estreita relação entre estas propriedades físicas.

Figura 53 – Relação entre o coeficiente e densidade aparente nas argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

#### 4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA

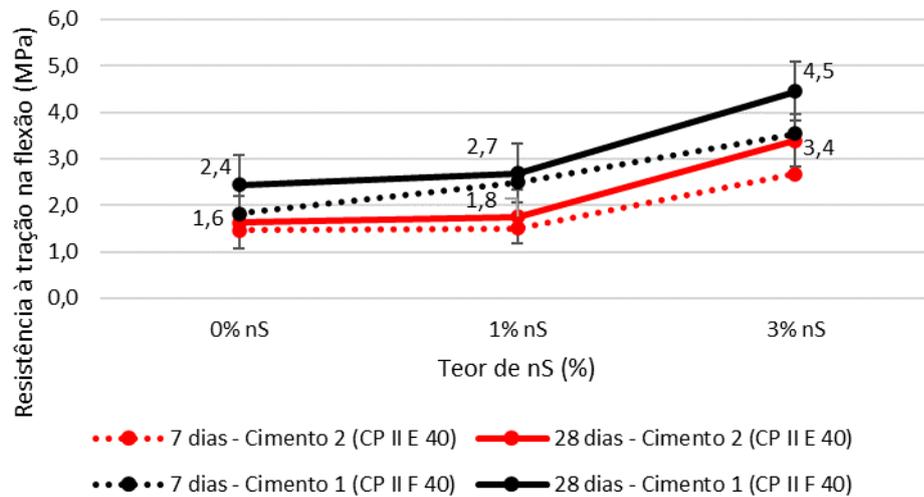
A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão axial das composições analisadas.

#### 4.5.1 Resistência à tração na flexão

O resultado deste ensaio por composição consiste na média dos resultados individuais de 3 corpos de prova (CP) prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm), conforme consta no Apêndice G. Neste ensaio foi avaliado o desvio padrão máximo absoluto, conforme estabelecido na NBR 13279 (ABNT, 2005), que é de 0,3 MPa.

As resistências médias também estão apresentadas no gráfico da Figura 54, no qual se verifica o aumento da resistência à tração na flexão com a inserção de nanossílica na mistura, principalmente com 3% de substituição em massa do cimento.

Figura 54 - Resistência à tração na flexão das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

Para as argamassas com o cimento 1, o ganho na resistência foi maior para 3% de nS, alcançando um aumento de 88%; enquanto, para as argamassas com o cimento 2, o aumento foi de 112,5%, aproximadamente. Quando se compara os resultados alcançados pelos cimentos, o aglomerante CP II F 40 alcançou resultados superiores para os 3 teores de nS, cujos valores foram entre 32% a 50% mais elevados.

Além disso, o ganho na resistência foi maior nos 7 primeiros dias para ambos os cimentos, alcançando quase o valor máximo neste período. A resistência aos 7 dias das argamassas com fíller também superaram a resistência das argamassas com a escória de alto forno, pois esta última adição é uma pozolana, o que retarda o ganho de resistência.

Estas contribuições na resistência mecânica indicam que o uso de nS com 3% de substituição em massa do cimento pode viabilizar o uso de agregados leves em compósitos cimentícios,

tendo em vista que a perda provocada por estes agregados pode ser compensada com o uso do nanomaterial.

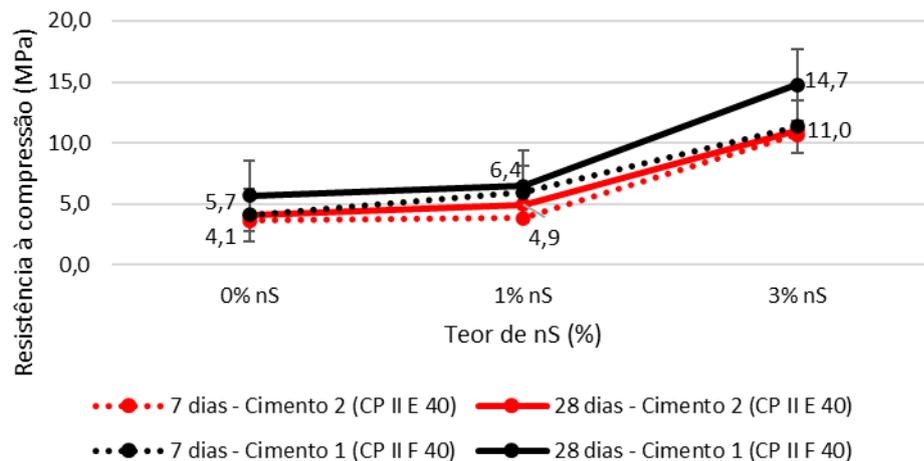
#### 4.5.2 Resistência à compressão axial

O resultado deste ensaio por composição consiste na média dos valores individuais das 6 metades dos 3 corpos de prova (CP) prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) rompidos inicialmente à tração, conforme é apresentado no Apêndice G.

Neste ensaio foi avaliado o desvio padrão máximo absoluto, estabelecido na NBR 13279 (ABNT, 2005), que é de 0,5 MPa. Quando este desvio foi ultrapassado, o resultado individual discrepante em relação à média dos 6 valores foi retirado e uma nova média e desvio padrão foram obtidos com os 5 resultados individuais restantes. Os corpos de prova com os valores descartados estão sinalizados em negrito na Tabela constante no Apêndice G.

Este procedimento é mencionado e recomendado na norma de referência até atingir um desvio padrão inferior a 0,5 MPa com no mínimo 4 resultados individuais. Quando o desvio padrão ainda for superior ao limite máximo, mesmo com 4 resultados individuais, a norma recomenda que o ensaio deve ser repetido com novos corpos de prova. As resistências médias à compressão axial aos 7 e 28 dias estão inseridas no gráfico da Figura 55.

Figura 55 - Resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

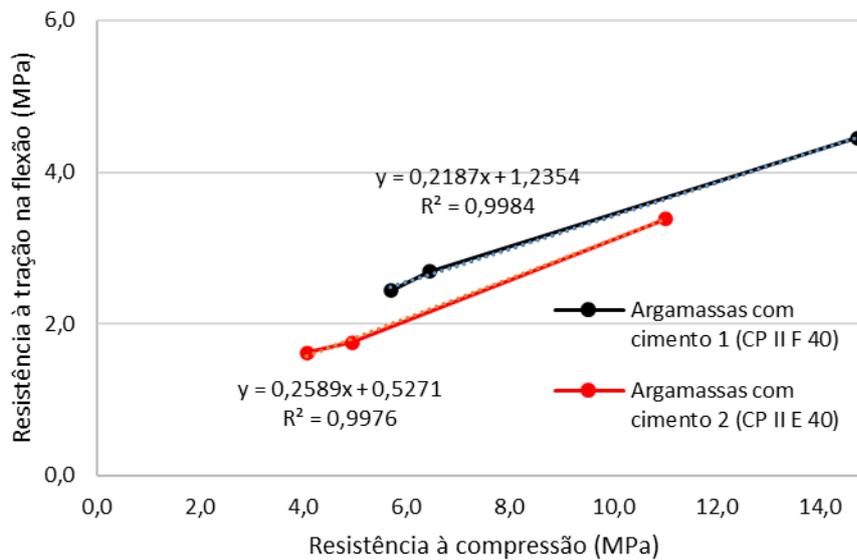
Para as argamassas com cimento 1, o ganho na resistência foi maior para 3% de nS, alcançando um aumento de 158%; enquanto, para as argamassas com o cimento 2, o aumento foi de 168%, aproximadamente. Quando se compara os resultados alcançados pelos cimentos,

o aglomerante CP II F 40 alcançou resultados superiores para os 3 teores de nS, cujos valores variaram entre 30% a 39% mais elevados. Além disso, o ganho na resistência foi superior ao longo dos 7 primeiros dias para ambos os cimentos, alcançando quase o valor máximo neste período.

As argamassas com o cimento 1 apresentam resultados um pouco melhores do que as argamassas com o cimento 2, pois a escória de alto forno é uma pozolana, o que apresenta uma hidratação mais lenta. Pode-se justificar também estas diferenças no cimento através das resistências à compressão axial distintas aos 28 dias, conforme apresenta a Tabela 5. Nela, é possível verificar que o cimento 1 apresenta uma resistência um pouco maior do que a resistência do cimento 2, mas que pode ser ultrapassada em períodos mais longos de avaliação, tendo em vista que a escória de alto forno é uma pozolana de hidratação lenta.

Relacionando as resistências à tração na flexão obtidas no tópico anterior e as resistências à compressão, foi possível obter uma relação linear entre estas propriedades mecânicas com  $R^2$  elevado, o que confirma a linearidade dos dados obtidos experimentalmente (Figura 56).

Figura 56 - Resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas convencionais



Fonte: A Autora (2022)

No geral, tendo em vista os resultados alcançados neste capítulo, verifica-se que 1% de substituição em massa do cimento por nS contribuiu discretamente para a melhoria dos resultados. Em contrapartida, o teor de 3% de nS trouxe mudanças significativas, sendo este o teor indicado para os experimentos com os agregados leves, a fim de otimizar a quantidade de composições.

Entre os aglomerantes, o cimento com a escória de alto forno foi selecionado para os experimentos com os agregados leves, a fim de otimizar as composições e tendo em vista algumas justificativas, descritas abaixo:

- as argamassas convencionais com o cimento 2 apresentaram resistência mecânica inferior às argamassas com o cimento 1 aos 28 dias, mas com possibilidade de aumento, tendo em vista que é uma pozolana, que apresenta uma hidratação mais lenta.
- as argamassas convencionais com o cimento 2 também apresentaram valores menores de absorção e coeficiente de capilaridade, o que indica melhor resistência ao ataque de agentes agressivos, principalmente em argamassas de revestimento.
- Aos 28 dias, as argamassas com o cimento 2 também estavam mais próximas das características físicas de uma argamassa de assentamento e revestimento, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005).
- Por fim, o fornecedor não tinha o cimento 1 disponível na região durante a fase de estudo com os agregados leves, o que restringiu o uso apenas ao cimento 2.

A seguir, são apresentados os resultados alcançados com as argamassas leves, com e sem o uso de nanossílica.

## 5 ESTUDO EXPERIMENTAL EM ARGAMASSAS LEVES

Este capítulo apresenta os resultados das argamassas com os agregados leves, que utilizaram o cimento 2 (CP II E 40) e 3% de nanossílica. Estes parâmetros foram definidos com base nos resultados do estudo preliminar.

Conforme já mencionado na metodologia, foram 18 composições analisadas, sendo 6 com argila expandida (AE), 6 com pó de serra de madeira (SM) e 6 com poliestireno expandido (EPS). A seguir são apresentados a caracterização no estado fresco e endurecido, bem como os resultados de resistência mecânica.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Os resultados dos ensaios de consistência, densidade fresca e teor de ar incorporado são apresentados a seguir, contemplando a caracterização física dos compósitos cimentícios leves.

#### 5.1.1 Consistência

As consistências das argamassas estão apresentadas no Apêndice H, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo obtidas através da média de 3 leituras de diâmetro, encontradas após o espalhamento na mesa de consistência.

Algumas composições, principalmente as que contém o pó de serra, não alcançaram a fluidez necessária para o espalhamento da mistura na mesa de consistência. Na Figura 57, nota-se que nestes casos, houve o desmoronamento ao invés do espalhamento do tronco moldado com argamassa após os 30 golpes da mesa. Por isso, foi considerado um espalhamento nulo quando observada esta situação.

Figura 57 - Desmoronamento do molde de argamassa no ensaio de consistência

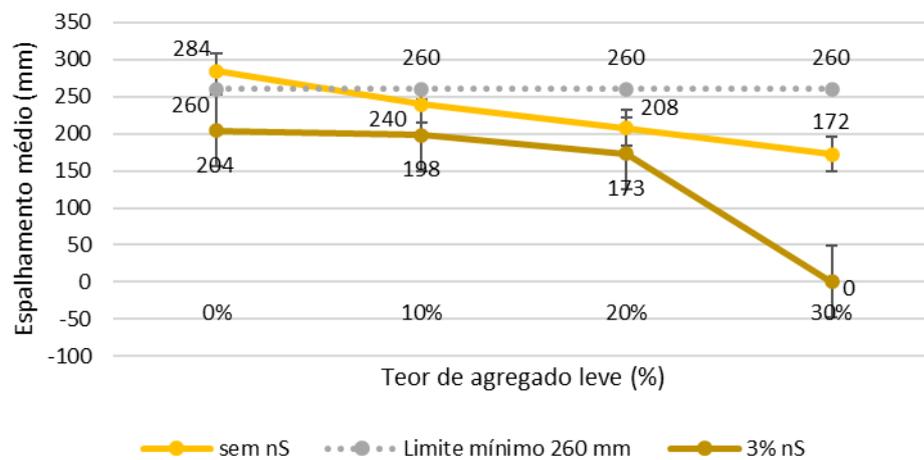


Fonte: A Autora (2022)

Para evitar esta situação, pode-se aumentar a quantidade de água ou aditivo plastificante, melhorando a fluidez da argamassa. No entanto, como foram parâmetros mantidos constantes neste estudo, algumas argamassas apresentaram este desmoronamento.

Com relação às argamassas leves com AE, também houve uma redução de 39% no espalhamento destas misturas com o aumento no teor de substituição do agregado leve, conforme visto no gráfico da Figura 58. Quando as misturas apresentam a nS, esta redução foi em torno de 15% até desmoronar com 30% de agregado leve, inviabilizando a argamassa.

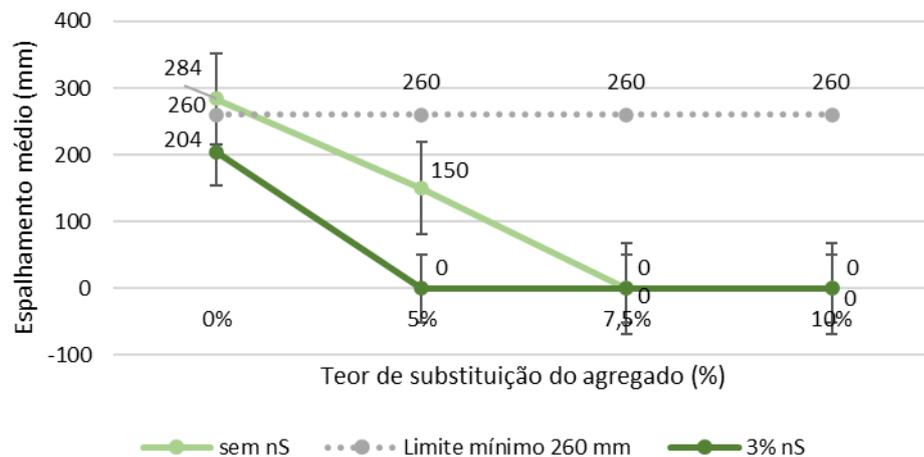
Figura 58 - Consistência nas argamassas com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

Já as argamassas leves com o pó de SM, a Figura 59 indica que estas misturas tiveram sua fluidez prejudicada com o uso do agregado leve e da nanossílica, desmoronando em quase todos os casos.

Figura 59 - Consistência nas argamassas com pó de serra (SM)

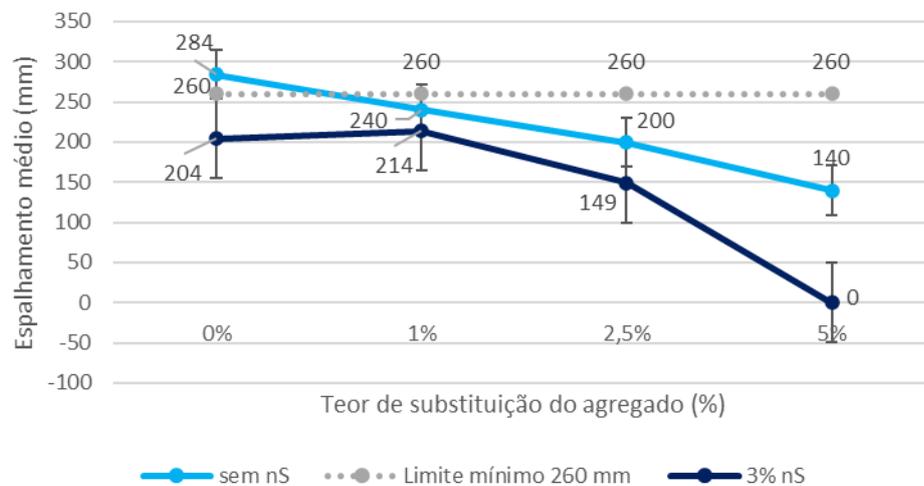


Fonte: A Autora (2022)

O pó de SM é um material que absorve mais água em relação à AE e ao EPS e, por isso, necessita de mais água para manter a fluidez. Como o fator  $a/c$  e o aditivo foram mantidos constantes, não foi possível obter uma fluidez nestas argamassas, o que as inviabiliza.

Por fim, as argamassas com EPS também aumentaram a consistência, reduzindo o espalhamento com o uso do agregado leve e da nS, apresentando um comportamento semelhante às argamassas com AE (Figura 60). Para as composições sem o nS, a redução foi de 29,6% até 2,5% de EPS; enquanto, para as composições com nS, a redução foi de 27%.

Figura 60 - Consistência nas argamassas com poliestireno expandido (EPS)



Fonte: A Autora (2022)

Vale ressaltar que as consistências das argamassas foram diferentes, tendo em vista que o teor de água foi o mesmo, já que não houve mudança no fator  $a/c$  (0,52) e nem no teor de aditivo (1%).

É importante ressaltar que, para que estas argamassas sejam trabalháveis e garantir a aplicabilidade em revestimentos e assentamentos de alvenaria, é importante garantir a consistência mínima recomendada por norma ou valor próximo a este critério, desde que se faça o ajuste no teor de água ou aditivo posteriormente. Por isso, teores acima de 30% de AE, 5% de SM e 5% de EPS foram considerados aceitáveis para possíveis ajustes na consistência.

### 5.1.2 Densidade de massa fresca e Teor de ar incorporado

As densidades de massa fresca e os teores de ar incorporado para cada composição estão apresentados no Apêndice H, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), apresentando

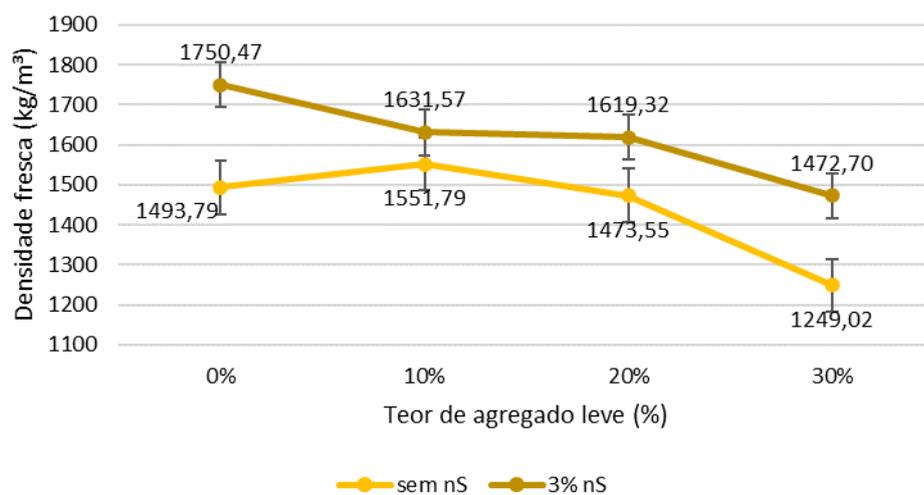
comportamentos diferentes nas argamassas por agregado leve na presença ou não da nanossílica.

As argamassas leves com AE tiveram uma redução na densidade fresca em torno de 16% com o aumento do percentual de agregado leve na mistura, tanto para as argamassas com nanossílica quanto àquelas sem nanomaterial, a partir de uma análise do gráfico da Figura 61. Isto já era esperado, pois a argila expandida apresenta uma massa específica inferior à areia natural, conforme observado na metodologia deste trabalho.

Além disso, verifica-se que as argamassas com o uso de nanomaterial apresentaram densidades frescas mais elevadas para todos os teores de substituição do agregado natural pelo leve, variando entre 5,1% e 17,9%, o que pode indicar um melhor preenchimento dos vazios.

Nas argamassas sem nS, nota-se que a densidade fresca apresenta um teor ótimo com 10% de agregado, cujo resultado foi superior ao de referência (sem agregado leve). Isto significa que a AE, apesar de leve, deixou a argamassa mais densa para este teor de substituição. Isto não ocorreu nas argamassas com 20% e 30% de AE. Já nas argamassas com nS, o comportamento é de redução das densidades com o aumento no teor de AE para todos os valores de substituição analisados, indicando densidades muito próximas com 10% e 20% de agregado leve.

Figura 61 - Densidade fresca das argamassas leves com argila expandida (AE)

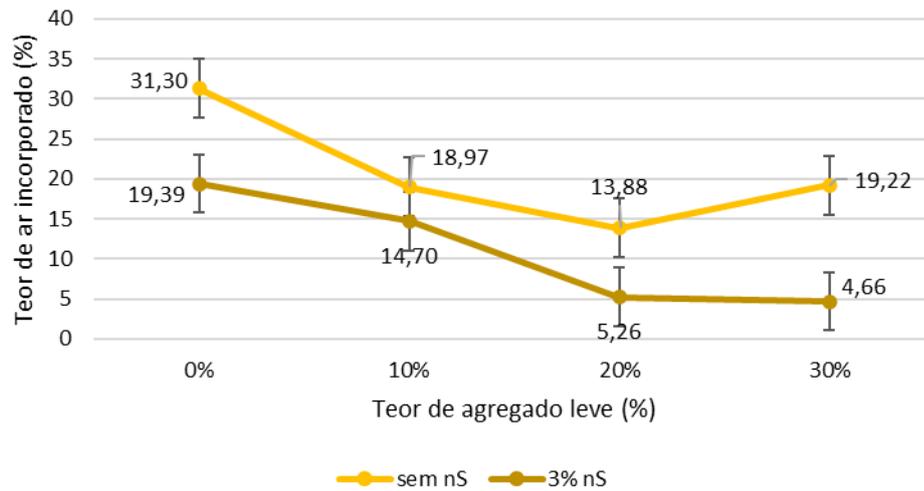


Fonte: A Autora (2022)

Com relação ao teor de ar incorporado destas argamassas com AE, também há uma redução desta propriedade com o aumento do percentual de agregado leve na mistura, sendo de 38,6% para as argamassas sem nanossílica e 76% nas misturas com nanossílica (Figura 62). Isto

significa que a densidade fresca e o teor de ar incorporado possuem uma relação direta, a qual provavelmente é proveniente do percentual de finos da AE, que é bem elevado, conforme observado na curva granulométrica, sendo provável que isto tenha contribuído para o preenchimento dos vazios, principalmente para 10% e 20% de substituição do agregado leve.

Figura 62 - Teor de ar incorporado das argamassas leves com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

Além disso, as argamassas com nanomaterial também apresentaram os teores de ar incorporado menores para todos os percentuais de substituição do agregado natural, variando entre 22,5% e 75,7% de redução dos vazios.

Através da Figura 62 também foi possível fazer algumas observações, como:

- a argamassa convencional C06C2; 3%nS apresenta a mesma quantidade de vazios que a argamassa leve C0330%AE; 0%nS, com 30% de argila expandida e sem a nS, o que confirma que a argila expandida e a nS podem preencher da mesma forma os vazios da mistura. Isto significa que é possível que a AE moída em argamassas possua um desempenho físico semelhante a nanossílica em argamassas, reduzindo custos com no produto final;
- as argamassas com nS também apresentam teores de ar incorporado menores para todos os percentuais de substituição do agregado natural pelo leve. Isto pode favorecer o aumento da resistência mecânica e comprometer a absorção sonora.
- Existe um ponto de inflexão na curva das argamassas sem nS, que é de 20% de AE, no qual o teor de ar incorporado volta a aumentar com a redução da densidade (Figura

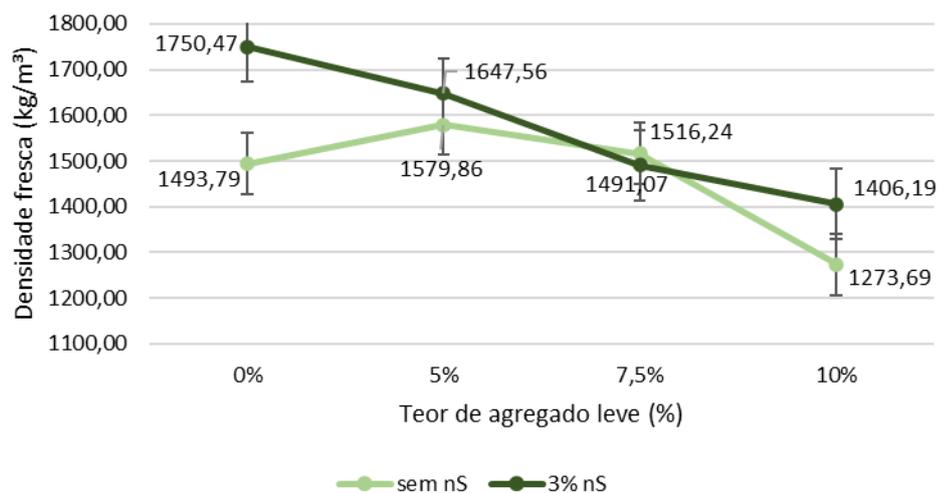
61), apresentando o comportamento esperado com a adição de agregado leve a partir deste valor.

Quanto às argamassas leves com o pó de SM, o gráfico da Figura 63 também indica uma redução esperada na densidade fresca com o aumento do percentual de agregado leve na mistura, sendo de pelo menos 15%. Também se verifica que as argamassas leves com o uso de nanomaterial apresentam densidades frescas mais elevadas, exceto para a argamassa com 7,5% de agregado leve, que apresentou resultados similares com ou sem o uso da nS. Para as demais argamassas leves, o incremento na densidade ficou entre 4,3% e 10,4%.

Através da Figura 63 também foi possível fazer algumas observações, como:

- apenas as composições com 10% de pó de serra apresentam uma densidade fresca inferior em relação à argamassa convencional C01C2;0%nS, que não apresenta nem agregado leve e nem nanossílica;
- o uso de 5% e 7,5% de pó de SM pode aumentar a densidade fresca em relação à argamassa convencional C01C2;0%nS, o que sugere que este material também atua no preenchimento dos vazios devido a sua granulometria desde que se faça o uso da nS;
- Para 7,5% de pó de SM, não há diferenças significativas nas densidades com ou sem a nanossílica.

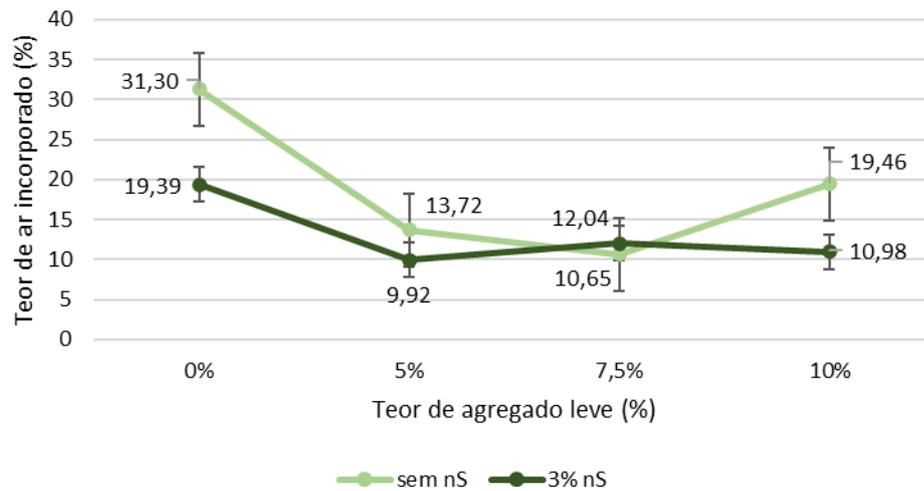
Figura 63 - Densidade fresca das argamassas leves com pó de serra (SM)



Fonte: A Autora (2022)

Os teores de ar incorporado destas argamassas também indicam uma redução inicial no teor de ar incorporado nas misturas com 5% e 7,5% de substituição do agregado natural. Para 10% de substituição, nota-se que o teor apresenta uma tendência ao aumento (Figura 64).

Figura 64 - Teor de ar incorporado das argamassas leves com pó de serra (SM)



Fonte: A Autora (2022)

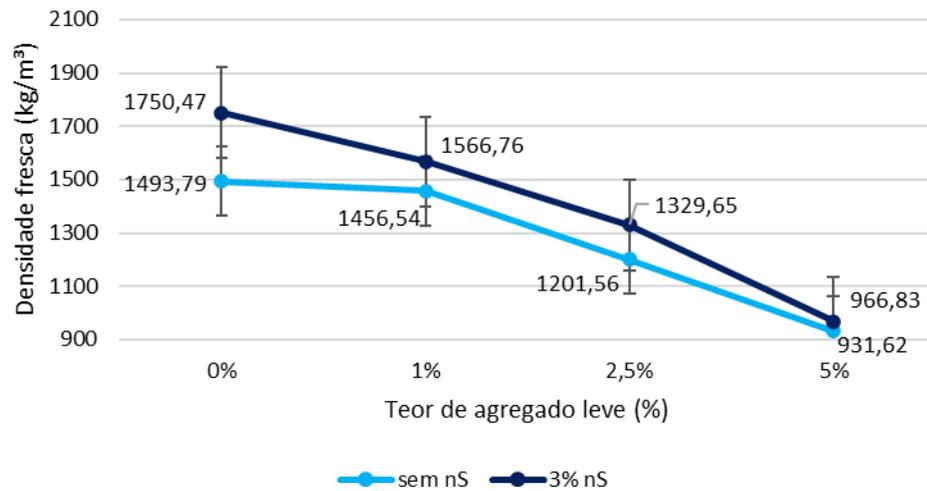
As argamassas leves com o uso de nanomaterial também apresentaram valores de ar incorporado menores, exceto para a argamassa com 7,5% de agregado leve, que apresentou resultados similares com ou sem o uso da nS.

Através da Figura 64 também foi possível fazer algumas observações, como:

- Nas argamassas sem nS, a redução no teor de ar incorporado das misturas com 5% e 7,5% de substituição do agregado natural pode ser justificada pela granulometria do pó de serra, que também apresenta uma quantidade de finos, conforme a curva granulométrica. Porém, a partir de 10%, os finos do pó de SM não foram suficientes para preencher os macroporos formados, devido a maior quantidade de agregado leve.
- Nas argamassas com nS, o teor de ar incorporado das misturas com 5%; 7,5% e 10% de agregado leve apresenta pouca variação, sugerindo que as nanopartículas podem ter contribuído também para uma maior densificação.

Por fim, quanto às argamassas leves com o EPS, também há uma redução já esperada na densidade fresca com o aumento do percentual de agregado leve na mistura (Figura 65). No entanto, esta redução foi mais acentuada, tendo em vista que o poliestireno expandido é um material bastante leve, o que contribuiu para reduções entre 37,6% e 44,8% com o aumento do EPS na mistura.

Figura 65 - Densidade fresca das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS)



Fonte: A Autora (2022)

Também é possível observar que as argamassas leves com o uso de nanomaterial apresentaram densidades frescas mais elevadas do que as argamassas sem nanossílica, tendendo a se aproximarem quando se faz uso de 5% de EPS na mistura. Neste teor de substituição, as densidades frescas apresentaram resultados similares com ou sem o uso da nS. Para as demais argamassas leves, o incremento na densidade ficou entre 7,6% e 10,7%.

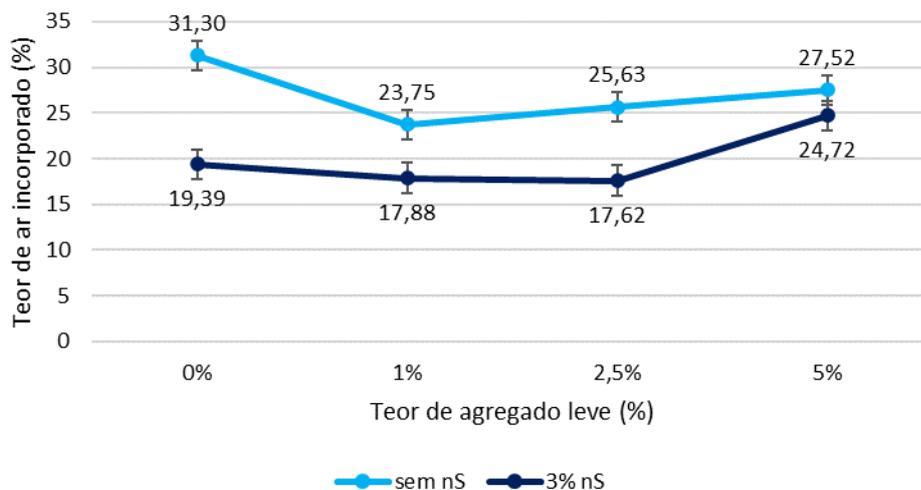
Através da Figura 65 também foi possível fazer algumas observações, como:

- Para a composição com 1% de EPS e 3% de nanossílica, a densidade fresca foi maior do que a densidade da argamassa convencional C01C2;0%nS, que não apresenta nem agregado leve e nem nanossílica. Isto indica que a nanossílica tornou o material mais denso, mesmo com um agregado leve na composição.
- É possível aumentar a densidade da composição com 2,5% de EPS para acima da argamassa convencional C01C2;0%nS, desde que faça uso de um maior teor de nS.

O teor de ar incorporado aumentou, diferentemente da AE e SM, com o aumento da quantidade de EPS na mistura (Figura 66); porém, ainda inferior à argamassa convencional sem agregado leve e sem nanossílica. Como a DMC do EPS é de 1,18 mm, inferior ao DMC da areia, é esperado que haja esta redução inicial no teor de ar incorporado, pois grãos menores conseguem preencher mais facilmente os vazios existentes.

Também é possível observar que as argamassas leves com o uso de nanomaterial apresentaram valores menores para este indicador do que as argamassas sem nanossílica, tendendo a se aproximarem quando se faz o uso de 5% de EPS na mistura.

Figura 66 - Teor de ar incorporado das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS)



Fonte: A Autora (2022)

Analisando os valores encontrados de densidade fresca em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas leves produzidas estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria, com exceção da argamassa com 5% de EPS, que apresenta valor bem abaixo do mínimo, que é  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Foram realizados os ensaios de densidade de massa aparente e de absorção por capilaridade nos 18 traços com agregados leves aos 28 dias após a moldagem dos corpos de prova. Neste último ensaio, é possível obter a absorção aos 10 e 90 minutos de exposição à água e o coeficiente de capilaridade (C).

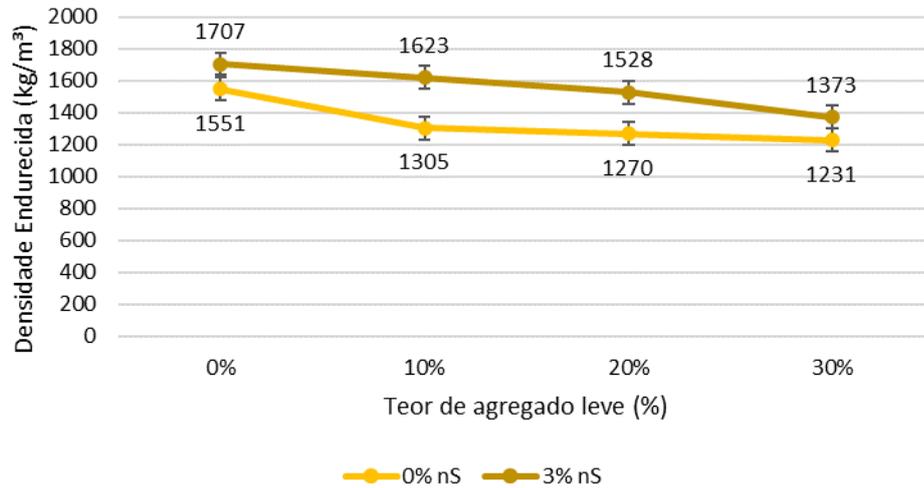
### 5.2.1 Densidade de massa aparente

As densidades de massa aparente dos 3 corpos de prova para cada traço estão apresentadas no Apêndice H, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005).

No geral, as densidades aparentes apresentam o mesmo comportamento das densidades frescas, o qual indica redução com o aumento no teor de agregado leve. Para as argamassas leves com 30% de argila expandida, esta redução foi em torno de 20% para as misturas com ou sem a nanossílica (Figura 67).

Além disso, as argamassas com nanossílica também são mais densas do que àquelas sem o nanomaterial para todos os teores de substituição do agregado natural, cujas densidades variam entre 11,5% a 24,4% mais elevadas.

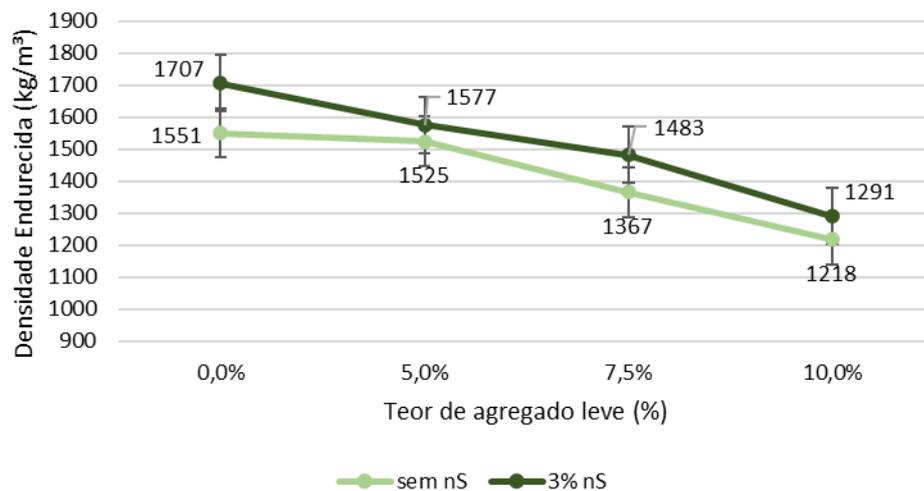
Figura 67 - Densidade endurecida das argamassas leves com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

Quanto às argamassas leves com o pó de serra, o gráfico da Figura 68 também indica uma redução nas densidades, embora seja uma queda mais acentuada, com um decréscimo de 21,5% e 24,4% para as argamassas sem e com nanossílica, respectivamente. Assim como na argila expandida, observa-se que as argamassas com nanossílica são mais densas do que as misturas que não apresentam a nS; embora, o crescimento tenha sido discreto de até 8,5% em relação à densidade das argamassas sem nanomaterial.

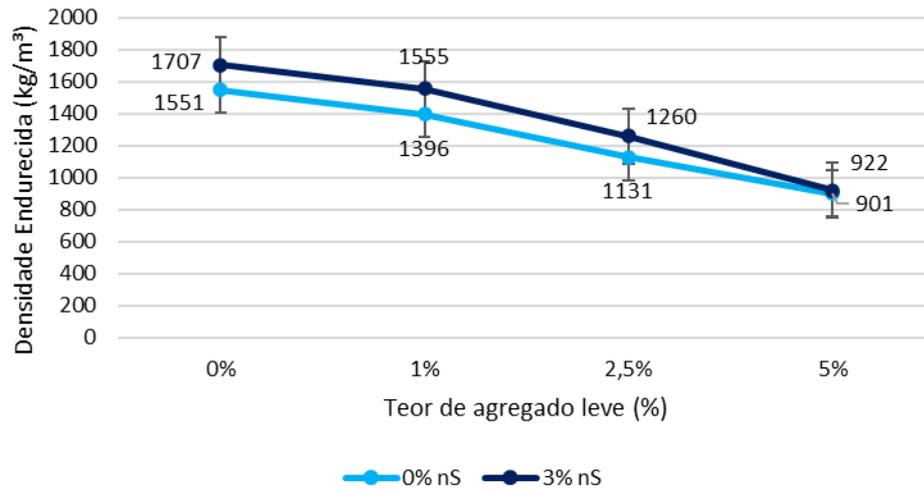
Figura 68 - Densidade endurecida das argamassas leves com pó de serra (SM)



Fonte: A Autora (2022)

Por fim, quanto às argamassas leves com o EPS, o gráfico da Figura 69 também indica uma redução nas densidades, sendo ainda mais acentuada do que as argamassas com argila expandida e pó de serra. As argamassas com 5% de EPS sem e com nanossílica, respectivamente, possuem densidades cerca de 41% e 46% mais reduzidas do que a argamassa convencional.

Figura 69 - Densidade endurecida das argamassas leves com poliestireno expandido (EPS)



Fonte: A Autora (2022)

As argamassas com nanossílica também são mais densas do que as misturas que não apresentam o nanomaterial; embora, esta diferença seja discreta nas composições com 5% de EPS.

No geral, a redução nas densidades conforme se aumenta o teor de substituição já é um resultado esperado, tendo em vista que a argila expandida, o pó de serra e o EPS são materiais mais leves do que a areia natural. No entanto, também se verifica que as argamassas com a nanossílica são mais densas do que as argamassas sem nS, o que indica que o nanomaterial preenche mais facilmente os vazios da mistura, mesmo utilizando agregados leves.

Quando se compara as argamassas com nanomaterial e a de referência (C04 C<sub>2;0%nS</sub>), houve redução na densidade apenas para 30% de substituição por argila expandida; 7,5% de substituição por pó de serra e 2,5% ou 5% de substituição por EPS. Dessa maneira, se o objetivo é reduzir a densidade, recomenda-se teores acima destes valores para argamassas com nanossílica.

Analisando os valores encontrados de densidade aparente em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas leves produzidas estão compatíveis com uma argamassa de

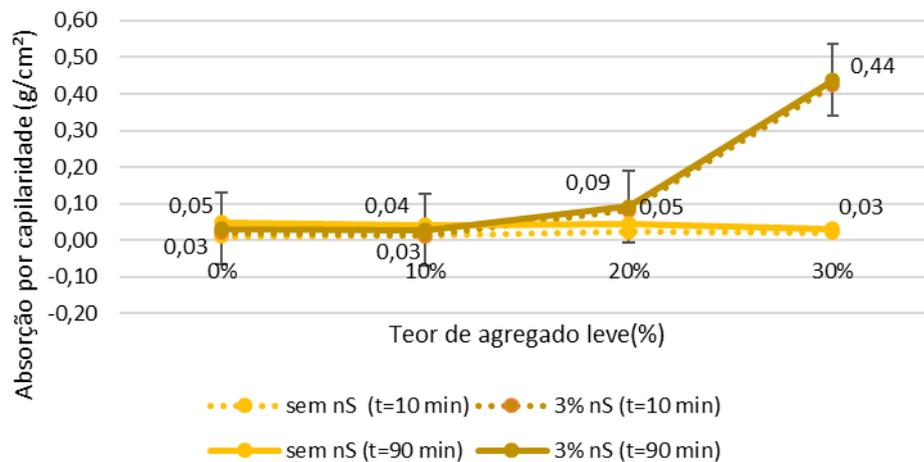
revestimento ou para assentamento de alvenaria, com exceção novamente da argamassa com 5% de EPS, que apresenta valor abaixo do mínimo, que é  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### 5.2.2 Absorção e coeficiente de capilaridade

Os resultados de absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos dos 3 corpos de prova para cada traço estão apresentados no Apêndice H, conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), bem como o coeficiente de capilaridade (C).

O gráfico da Figura 70 apresenta a absorção média por capilaridade aos 10 e 90 minutos das argamassas com argila expandida, indicando um crescimento deste parâmetro para as composições com nanossílica a partir de 20% de agregado leve em substituição à areia natural. Isto significa que as argamassas leves com nS absorvem mais água para teores mais elevados de argila expandida, como a partir de 20% de substituição.

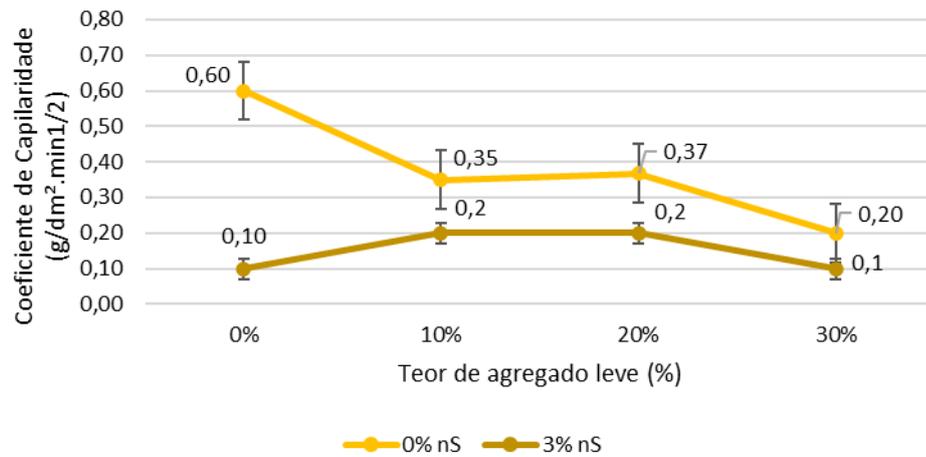
Figura 70 - Absorção por capilaridade das argamassas leves com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

No entanto, o coeficiente de capilaridade das argamassas com nanossílica é menor do que o das misturas sem a nS, o que significa que absorvem a maior parte da água já aos 10 minutos, variando pouco em relação aos 90 minutos de exposição à água, conforme se observa no gráfico da Figura 71.

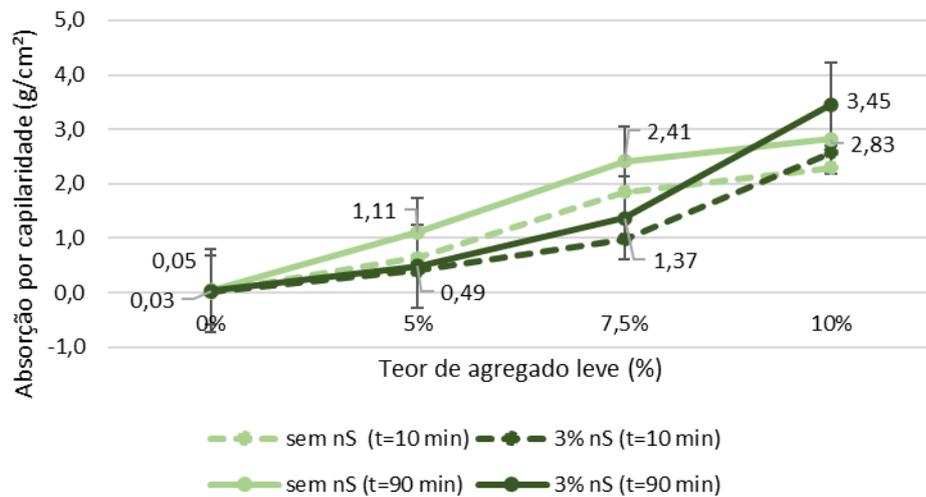
Figura 71 - Coeficiente de capilaridade das argamassas leves com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

Quanto às argamassas leves com o pó de serra, a absorção também aumentou com o teor de agregado leve (Figura 72). As composições com nanossílica apresentaram absorções menores até 7,5% de substituição da areia natural, cujo comportamento muda a partir deste teor.

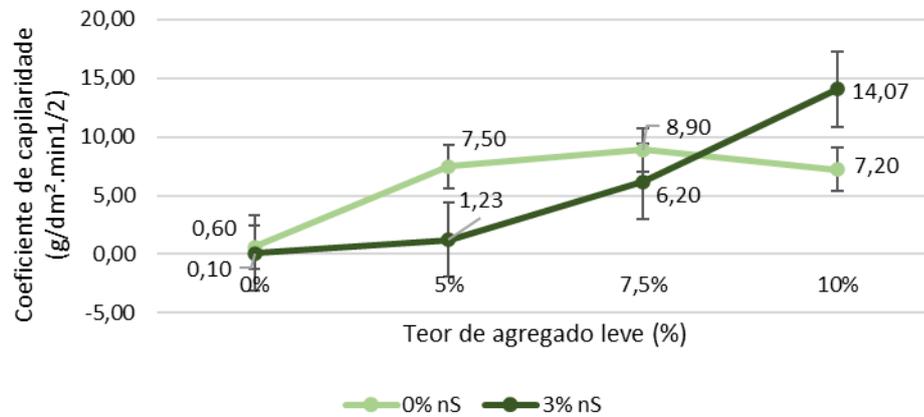
Figura 72 - Absorção por capilaridade das argamassas leves com pó de serra (SM)



Fonte: A Autora (2022)

No gráfico da Figura 73, o coeficiente de capilaridade também cresceu com o aumento no teor de pó de serra, sendo menor nas argamassas com a nanossílica até 7,5% de substituição do agregado natural. Porém, para um teor de 10% de substituição da areia, as argamassas com nS apresentaram um coeficiente de capilaridade maior do que as misturas sem nanomaterial.

Figura 73 - Coeficiente de capilaridade das argamassas leves com pó de serra (SM)



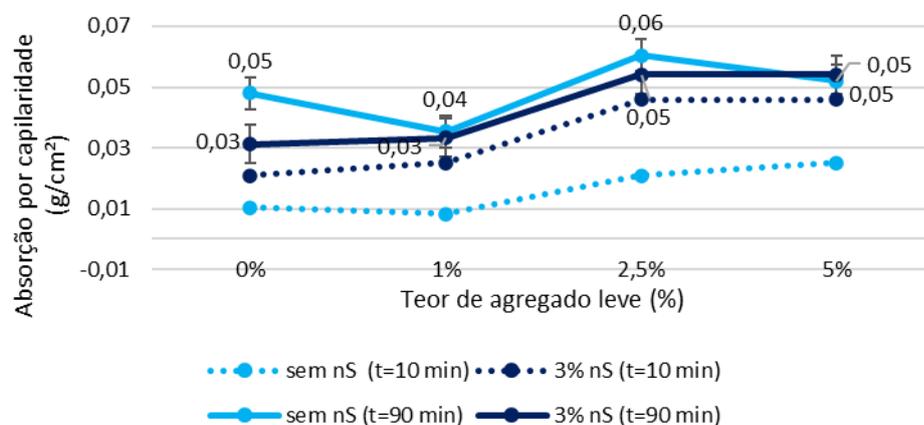
Fonte: A Autora (2022)

Conforme observado, é provável que a nanossílica pode atuar no preenchimento dos vazios até um certo teor de agregado leve (denominado de ótimo), reduzindo as densidades e o teor de ar incorporado. Com o aumento do agregado leve, há formação de macroporos que excedem as dimensões da nS, influenciando no aumento da absorção e do coeficiente de capilaridade novamente. Este comportamento foi observado através dos resultados alcançados nas propriedades físicas das argamassas com AE e com SM.

É importante ressaltar que, para a confirmação destas informações, é fundamental uma análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de verificar a formação destes macroporos, a partir de um dado teor ótimo, e o não preenchimento pela nS.

Já o gráfico da Figura 74, apresenta a absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos das argamassas com o EPS.

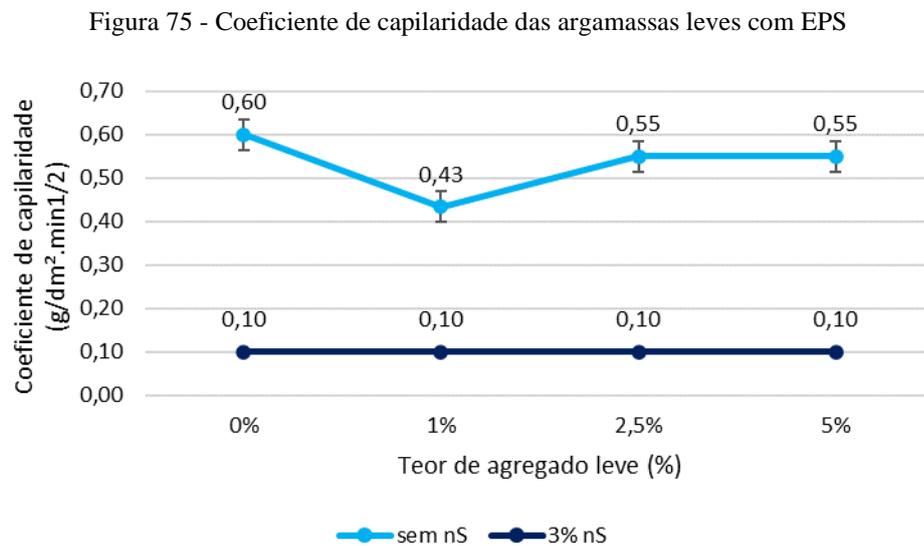
Figura 74 - Absorção por capilaridade das argamassas leves com EPS



Fonte: A Autora (2022)

Aos 10 minutos, os valores de absorção das misturas com nS são mais elevados do que das composições sem a nanossílica. Já aos 90 minutos, nota-se o comportamento contrário. Isso significa que as argamassas que apresentam nanossílica em sua composição absorvem mais água nos primeiros minutos quando expostas à umidade. Porém, passados 90 minutos de exposição, o comportamento é bastante semelhante às argamassas sem o nanomaterial.

Com relação ao coeficiente de capilaridade destas argamassas com EPS, o gráfico da Figura 75 corrobora que a absorção das argamassas com nS é maior durante os 10 primeiros minutos, variando pouco após este período.



Fonte: A Autora (2022)

A absorção e o coeficiente de capilaridade têm relação com a durabilidade das argamassas, a qual é maior nas misturas com o menor valor. Sendo assim, as argamassas com a argila expandida e EPS apresentaram o melhor desempenho.

Além disso, todas as composições com a nanossílica apresentaram menor coeficiente de capilaridade; assim como as argamassas com argila expandida e sem nanossílica apresentam melhor desempenho do que àquelas com EPS, apesar deste último ser um material essencialmente hidrófugo. Provavelmente, deve-se pela redução no teor de ar incorporado nas argamassas com argila.

Analisando os valores encontrados de densidade aparente em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas leves produzidas estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria, com exceção da argamassa com 10% de SM, que apresenta valor muito acima do limite máximo, que é de 12 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>. Além disso,

vale salientar que estas argamassas com SM apresentaram absorção e coeficiente de capilaridade bem altos quando comparadas às argamassas com AE e EPS, o que está relacionado às características do próprio agregado leve. O pó de SM é de origem vegetal e, portanto, requer mais água.

### 5.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão axial das composições analisadas.

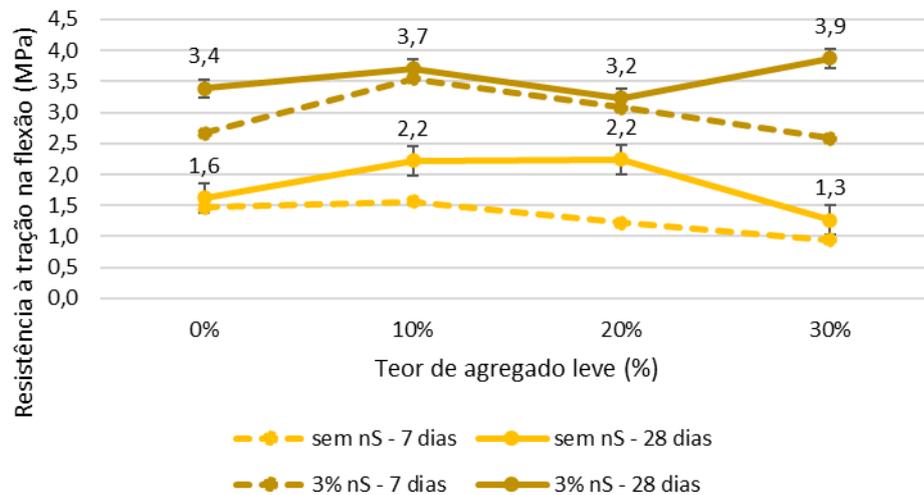
#### 5.3.1 Resistência à tração na flexão

O resultado deste ensaio por composição consiste na média dos resultados individuais de 3 corpos de prova (CP) prismáticos, conforme consta no Apêndice H.

A norma NBR 13279 (ABNT, 2005) recomenda que sejam utilizados pelo menos 2 corpos de prova para a obtenção da média com um desvio padrão inferior à 0,3 MPa. Caso este desvio não seja ultrapassado, deve-se moldar novos corpos de prova. O traço C16<sub>1%EPS; 3%nS</sub>, por exemplo, ultrapassou o desvio padrão com as 3 amostras aos 28 dias, sendo descartado aquele com maior desvio em relação à média e retirada nova média com os 2 cps restantes. Por isso, a indicação em **negrito** na Tabela do Apêndice H.

As resistências médias das argamassas com argila expandida estão apresentadas através do gráfico da Figura 76.

Figura 76 - Resistência à tração na flexão das argamassas com argila expandida (AE)

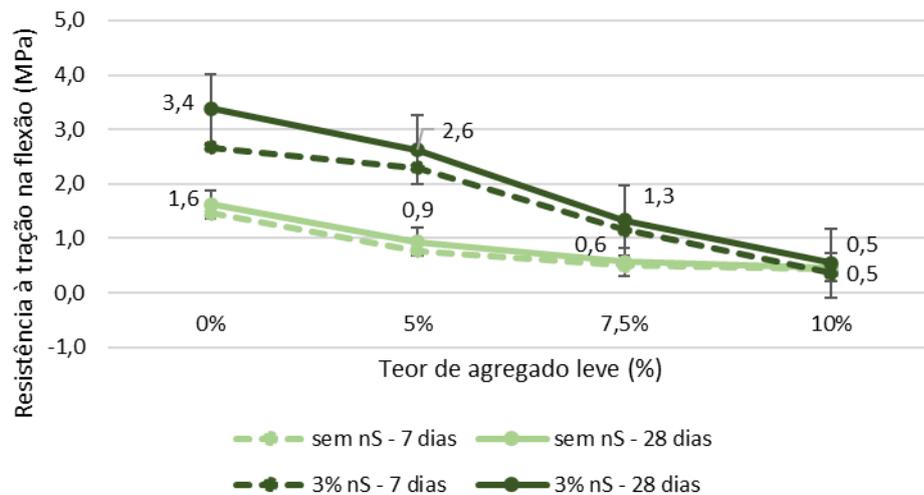


É fácil perceber no gráfico da Figura 76 que não há perda de resistência, mesmo com o aumento do teor de agregado leve nas misturas com nS. Nas misturas sem a nS, apenas com 30% torna-se evidente uma redução na resistência à tração na flexão.

Este aumento na resistência foi em torno de 68% para as argamassas com 10% de argila; 45% de ganho para as misturas com 20% de argila e 200% nas argamassas com 30% de agregado leve. Também é importante ressaltar que a AE moída conseguiu aumentar a resistência, ao invés de reduzir, nas argamassas sem a nS, podendo ser uma boa estratégia de otimização desta propriedade também. Assim como foi observado nas outras propriedades físicas, que também melhoraram.

Para as argamassas com o pó de serra, também houve ganhos na resistência com o uso da nS, sendo em torno de 189% de aumento para as argamassas com 5% de agregado leve, 117% de ganho na resistência nas misturas com 7,5% de pó de serra e nenhum ganho nas argamassas com 10% de substituição do agregado natural (Figura 77).

Figura 77 - Resistência à tração na flexão das argamassas com pó de serra (SM)

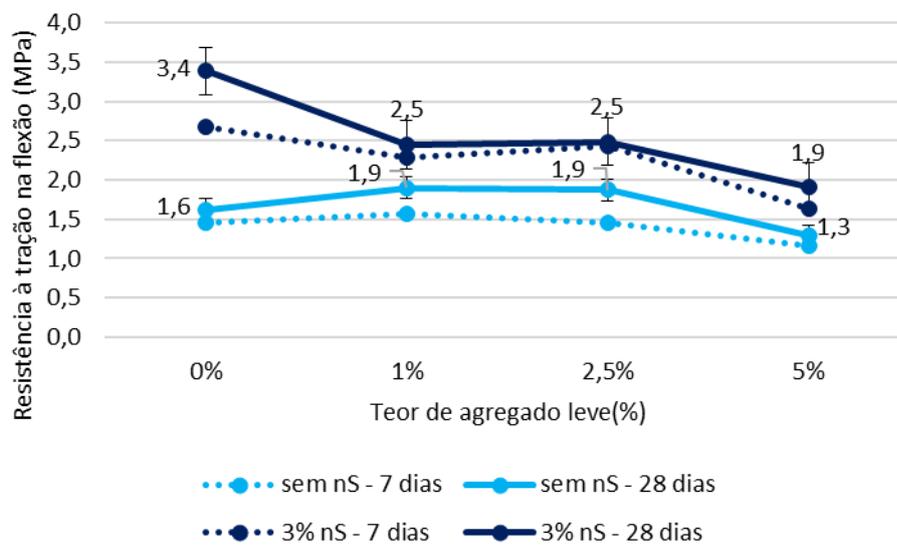


Fonte: A Autora (2022)

Nota-se que a resistência diminui nestas argamassas com a variação no teor de agregado leve para ambos os casos, com ou sem o nanomaterial. Além disso, aos 10% de substituição, verifica-se que a nanossílica não contribuiu para qualquer ganho na resistência. Deve-se isto à maior quantidade de agregado leve, que também aumenta a porosidade, reforçando a ideia de que existe um teor ótimo agregado, ao qual a nanossílica consegue preencher os espaços vazios e melhorar as propriedades físicas e mecânicas.

Por fim, as argamassas com o EPS e a nanossílica também apresentaram resistências maiores do que as argamassas sem o nanomaterial, conforme apresenta o gráfico da Figura 78, sendo em torno de 31% de aumento para as argamassas com 1% e 2,5% de EPS; enquanto, o ganho na resistência foi em torno de 46% para as argamassas com 5% de agregado leve. Nota-se que a resistência também se mantém equilibrada nas argamassas com nanossílica, mesmo variando o teor de agregado leve, apresentando uma tendência de queda a partir de 5% de substituição.

Figura 78 - Resistência à tração na flexão das argamassas com EPS



Fonte: A Autora (2022)

No geral, observa-se que todas as composições leves com a nanossílica têm resultados melhores do que as misturas sem a nanossílica, para todos os teores de substituição do agregado natural pelo leve. É possível, inclusive, alcançar o dobro da resistência nas argamassas com AE e SM. Nas argamassas com EPS, o incremento é de cerca de 31%.

Analisando os valores encontrados de resistência à tração na flexão em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas leves produzidas estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria, com exceção da argamassa com 10% de SM, que apresenta um valor abaixo do limite mínimo, que é de 1 MPa.

Além disso, vale salientar que é relevante a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, caso a argamassa seja utilizada para este fim, o qual não foi contemplado neste trabalho.

### 5.3.2 Resistência à compressão axial

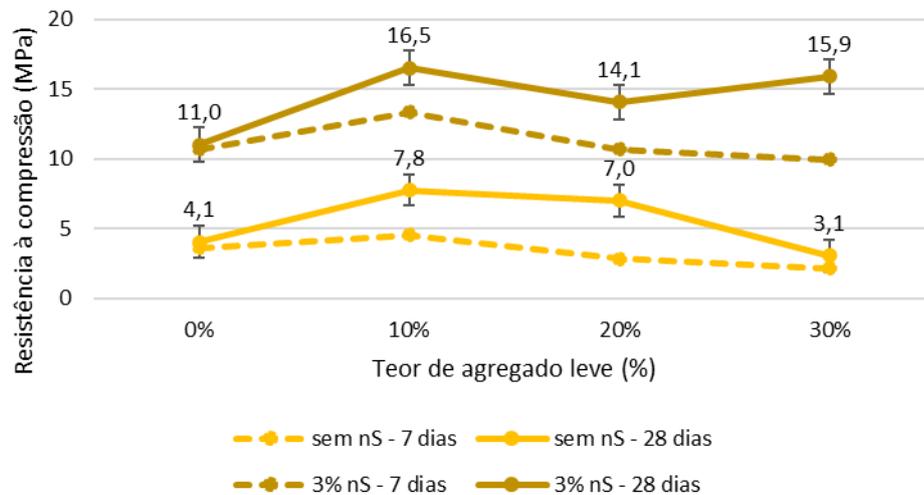
O resultado deste ensaio por composição consiste na média dos valores individuais das 6 metades dos 3 corpos de prova (CP) prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) rompidos inicialmente à tração, conforme é apresentado no Apêndice H.

Neste ensaio, também foi avaliado o desvio padrão máximo absoluto de 0,5 MPa. Quando este desvio foi ultrapassado, o resultado individual discrepante em relação à média dos 6 valores foi retirado e uma nova média e desvio padrão foram obtidos com os 5 resultados individuais restantes. Os corpos de prova com os valores descartados estão sinalizados em negrito na Tabela correspondente no Apêndice H.

As resistências médias das argamassas com argila expandida estão representadas graficamente através da Figura 79, na qual se verifica que também houve ganhos na resistência com o uso da nS, sendo em torno de 111,5% de aumento para as argamassas com 10% de argila, 101,4% de ganho na resistência nas misturas com 20% de argila e 413% nas argamassas com 30% de agregado leve. Nota-se que a resistência se mantém equilibrada nas argamassas com nS mesmo variando o teor de agregado leve; enquanto, tem uma tendência de queda nas argamassas sem o uso do nanomaterial a partir de 30% de substituição.

Além disso, as resistências das misturas com 10% e 20% de AE são mais elevadas do que a composição de referência (sem agregado leve), o que indica que os finos da AE podem ter preenchido os vazios, com ou sem a nanossílica.

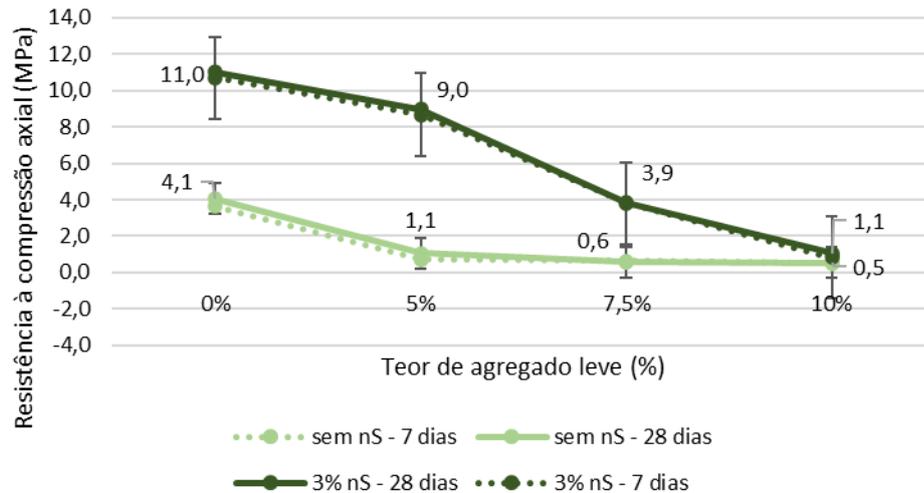
Figura 79 - Resistência à compressão axial das argamassas com argila expandida (AE)



Fonte: A Autora (2022)

Para as argamassas com o pó de serra, também houve ganhos na resistência com o uso da nS, sendo em torno de 7 vezes a resistência das argamassas sem a nanossílica para 5% de agregado leve. Para 7,5% de pó de serra, a resistência das argamassas com nanossílica foi em torno de 5,5 vezes mais elevada e, com 10% de substituição do agregado natural, foi possível dobrar o valor da resistência à compressão (Figura 80).

Figura 80- Resistência à compressão axial das argamassas com pó de serra (SM)

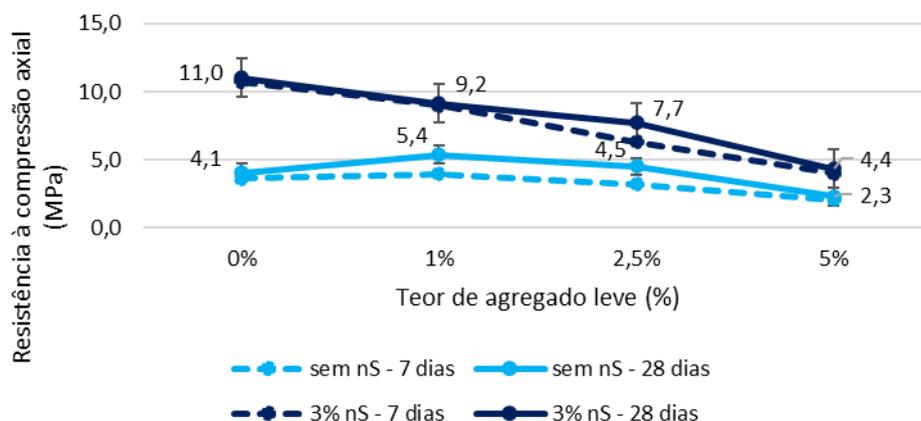


Fonte: A Autora (2022)

Nota-se que a resistência diminuiu nestas argamassas com a variação no teor de agregado leve para ambos os casos, com ou sem o nanomaterial. Além disso, assim como na resistência à tração, verifica-se que a maior porosidade destas argamassas pode comprometer o efeito do nanomaterial, conforme é observado através dos resultados das resistências com 10% de substituição. Nota-se uma desvantagem evidente deste agregado em relação aos demais.

Por fim, as argamassas com o EPS e a nanossílica também apresentaram resistências maiores do que as argamassas sem o nanomaterial, conforme apresenta o gráfico da Figura 81, sendo em torno de 70% de aumento para as argamassas com 1% e 2,5% de EPS; enquanto, o ganho na resistência foi em torno de 91% para as argamassas com 5% de agregado leve. Nota-se que a resistência diminuiu nas argamassas com EPS com a variação no teor de agregado leve.

Figura 81 - Resistência à compressão axial das argamassas com poliestireno expandido (EPS)



Fonte: A Autora (2022)

Analisando os valores encontrados de resistência à compressão axial em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), algumas argamassas leves produzidas não estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria. Por exemplo, nas argamassas com AE não seria necessário o uso da nS, pois as argamassas sem este nanomaterial já atendem ao critério. Nas argamassas com o pó de SM, apenas as argamassas com 5% e com 7,5% e nS estariam aptas para serem usadas como revestimento e/ou assentamento. Já nas argamassas com EPS, todas estariam aptas para serem usadas.

Porém, mais recentemente, há uma procura por blocos estruturais com resistências maiores (como 10, 15 ou 18 MPa), a fim de atender edifícios em alvenaria estrutural com altura elevada. Dessa maneira, a argamassa de revestimento e/ou assentamento pode alcançar resistências maiores, sem provocar fissurações por rigidez elevada da parede de alvenaria. A NBR 16868-1 (ABNT 2020) destaca que a resistência da argamassa não deve ultrapassar em 1,5 vezes a resistência do bloco, de vedação ou estrutural. Então, para um bloco de 10 MPa, pode-se utilizar uma argamassa de assentamento com 15 MPa, o que viabiliza as argamassas com AE e nS analisadas neste trabalho. É um caso específico, mas cada vez recorrente, tendo em vista o número de edifícios altos em alvenaria estrutural que têm sido construídos nas grandes cidades.

No geral, verifica-se que os efeitos positivos da nanossílica nas resistências à tração na flexão e à compressão axial de argamassas leves viabiliza o uso de agregados leves com um maior teor de substituição, contribuindo para o aumento no uso destes agregados e suas aplicações. Assim, é possível desenvolver um material cimentício com agregados leves e nanossílica com ganhos na resistência mecânica.

Além disso, foi possível perceber que:

- Nas argamassas com AE, houve perda de resistência apenas com 30% de agregado leve, mas que pode ser compensada com o uso de 3% de nS. Portanto, o teor ideal de AE numa argamassa é de 20%, com ou sem a nS;
- O pó de SM e o EPS reduzem significativamente a resistência de argamassas com o aumento do agregado leve na mistura. Porém, esta perda na resistência é compensada para teores de até 7,5% de pó de SM e 5% de EPS quando se faz o uso de 3% de nanossílica;
- Quando se considera a consistência, verificam-se que os teores recomendados de pó de SM e de EPS é de 5% e 2,5%, respectivamente.

A seguir, é apresentada a 4ª fase deste programa experimental, que consiste na escolha de 5 composições entre as que foram analisadas e a otimização delas para o ensaio acústico.

## 6 ESTUDO DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS

Este capítulo apresenta os resultados de 5 argamassas escolhidas dos estudos anteriores, as quais foram: 2 composições convencionais (C04<sub>C2, 0% nS</sub> e C06<sub>C2, 3% nS</sub>) e 3 leves (C05<sub>20%AE,3%nS</sub>; C16<sub>1%EPS,3% nS</sub> e C17<sub>2,5%EPS,3% nS</sub>). Estas composições foram escolhidas com base nos resultados de resistência mecânica e de consistência, tendo como base os critérios de resistência mecânica estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005) e na NBR 16868-1 (ABNT, 2020), bem como a proximidade com a consistência recomendada pela NBR 13276 (ABNT, 2016), que é de no mínimo 260 mm. Para as argamassas leves, foi dada a prioridade às misturas com o máximo de teor de agregado leve para otimizar os resultados acústicos, desde que não comprometesse os critérios de resistência mecânica e consistência das normas acima mencionadas.

Vale salientar que, inicialmente, foi proposta a escolha de 3 traços com agregados leves, sendo 1 de cada tipo analisado. Porém, os resultados com o pó de serra subsidiaram a eliminação desta argamassa leve nesta etapa de seleção. Assim, foram escolhidos 1 traço com argila expandida e 2 com EPS, conforme visto acima.

Estas argamassas selecionadas foram submetidas, inicialmente, ao ensaio de consistência de mesa *Flow Table* para a identificação do fator a/c ótimo correspondente a um espalhamento de no mínimo 260 mm, denominado de fator a/c ajustado, que apresentou valores específicos para cada uma das composições.

Posteriormente, como houve alteração no teor de água, foi necessário submetê-las novamente aos ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido, bem como aos ensaios de resistência mecânica, por se tratar de nova dosagem, a fim de identificar a viabilidade como argamassa de revestimento e assentamento, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Por fim, os corpos de prova cilíndricos foram moldados para a realização do ensaio de absorção sonora com o tubo de impedância, realizado em parceria com o Laboratório de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS). A seguir, são apresentadas estas análises.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Os resultados dos ensaios de consistência, densidade fresca e teor de ar incorporado são apresentados a seguir, contemplando a caracterização física dos compósitos cimentícios leves.

### 6.1.1 Consistência

Conforme visto nos estudos anteriores, o uso da nanossílica e dos agregados leves contribuem para uma consistência maior na mistura, que necessita de mais água ou aditivo plastificante. Neste trabalho, o fator a/c foi mantido constante em 0,52 nas análises anteriores para fins de comparação.

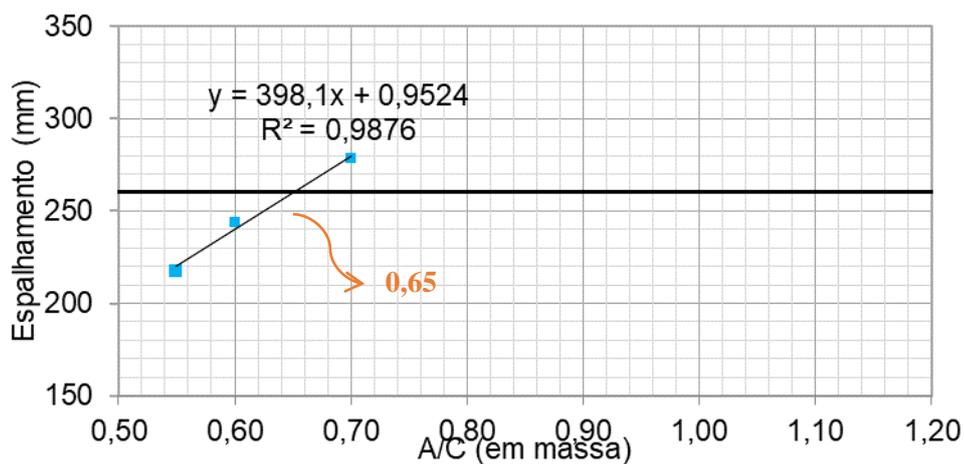
Nesta etapa, os traços foram ajustados com relação à água, a fim de alcançar um espalhamento mínimo de 260 mm, com exceção da composição C04C2,0%ns que não precisou ter sua consistência ajustada por apresentar espalhamento superior a 260 mm com o fator a/c de 0,52, conforme visto no Apêndice I.

Portanto, 4 dos 5 traços escolhidos foram submetidos ao ensaio de consistência, variando o fator a/c e relacionando aos espalhamentos médios, que apresenta os diâmetros (D1, D2 e D3) obtidos para os respectivos fatores a/c analisados, bem como o valor médio.

Estes dados foram relacionados graficamente através das Figuras 82 a 85, obtendo no geral uma linha de tendência com  $R^2$  acima de 0,90, o que viabiliza a identificação do fator a/c ideal para um espalhamento de 260 mm através destes gráficos, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

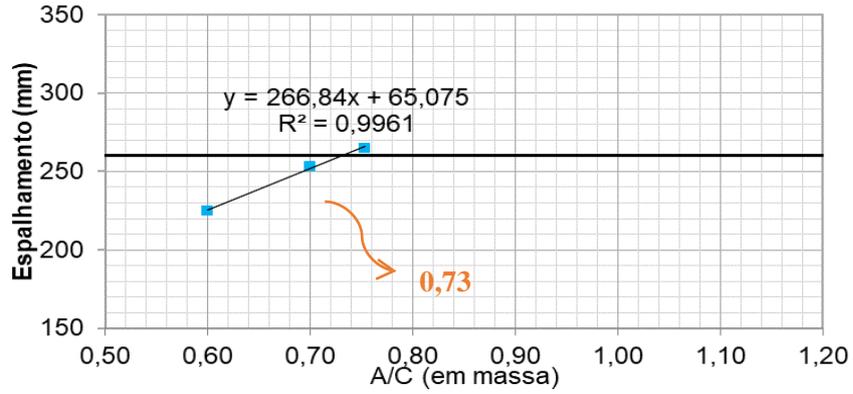
Os valores das relações água/cimento ótimas estão indicados no gráfico para cada argamassa.

Figura 82 - Estudo de dosagem da argamassa C06 C2,3%ns



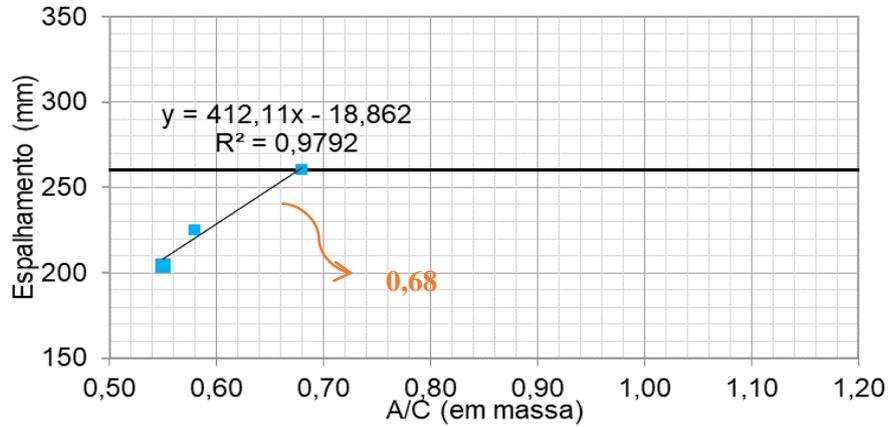
Fonte: A Autora (2022)

Figura 83 - Estudo de dosagem da argamassa C05 20%AE;3%nS



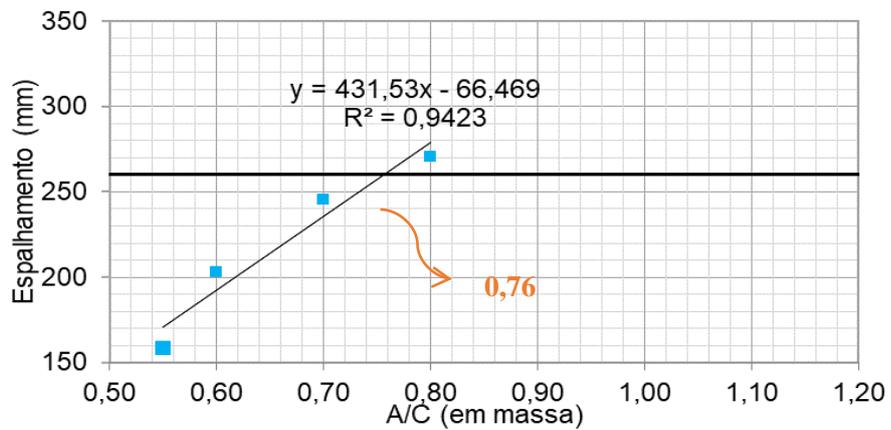
Fonte: A Autora (2022)

Figura 84 - Estudo de dosagem da argamassa C16 1%EPS;3%nS



Fonte: A Autora (2022)

Figura 85 - Estudo de dosagem da argamassa C17 2,5%EPS; 3%nS



Fonte: A Autora (2022)

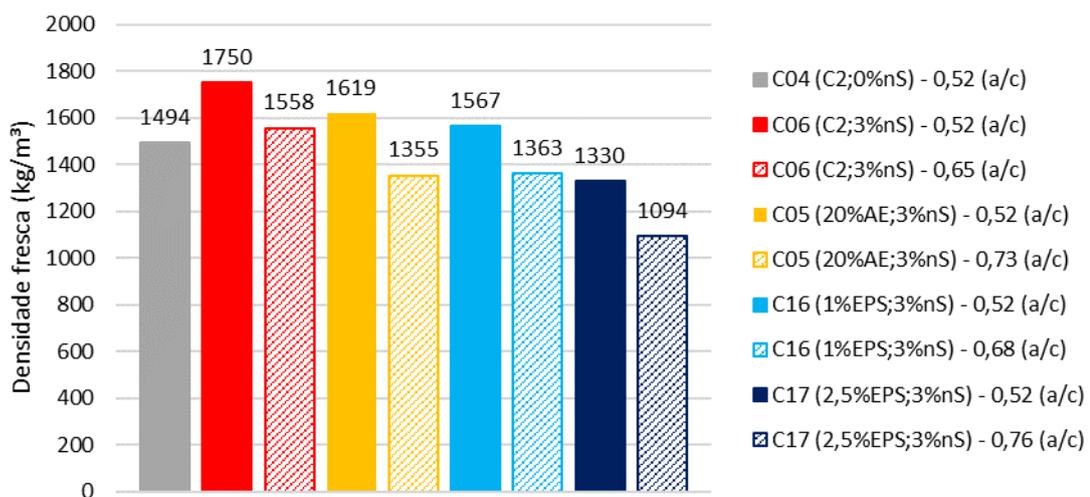
Com base nos valores encontrados, as argamassas C05<sub>20%AE;3%nS</sub> e C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub> necessitaram de mais água do que as demais. No caso da argamassa com AE, este agregado apresenta uma tendência em absorver água, seja pela granulometria mais fina ou pela sua origem mineralógica, conforme visto por alguns autores anteriormente (BARROCA; NEPOMUCENO; OLIVEIRA, 2015; ANGELIM; LINTZ; BARBOSA, 2017). No caso do EPS, estas misturas apresentam um teor maior deste agregado, sendo necessária mais água, a fim de manter a fluidez.

No geral, o aumento de água com este fator a/c ajustado foi de pelo menos 25% em relação à argamassa com fator padronizado de 0,52; portanto, é necessária nova caracterização física e mecânica.

### 6.1.2 Densidade de massa fresca e Teor de ar incorporado

As densidades frescas das 5 composições selecionadas estão apresentadas no gráfico da Figura 86, com o fator a/c anterior (0,52) e o ajustado, indicando uma redução nesta propriedade com o ajuste na consistência, variando entre 13% e 18% de redução, aproximadamente. Todas as novas composições (com fator a/c ajustado) apresentam uma densidade menor do que a C04<sub>C2;0%nS</sub>, com exceção da argamassa C06<sub>C2;3%nS</sub>. No entanto, é fácil perceber que a diferença entre estas argamassas é bem menor do que aquela obtida no estudo com as argamassas convencionais.

Figura 86 - Densidade fresca das argamassas selecionadas



Fonte: A Autora (2022)

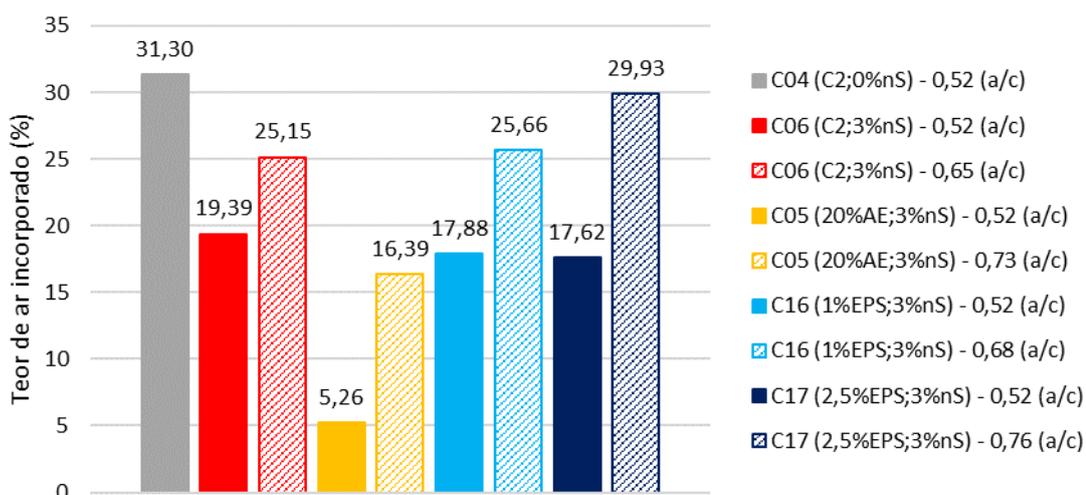
As novas argamassas C05<sub>20%AE;3%nS</sub> e C16<sub>1%EPS;3%nS</sub> alcançaram densidades cerca de 9% menores do que a argamassa convencional; enquanto, a nova argamassa C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub>

conseguiu reduzir em torno de 27%, devido a maior quantidade de EPS, que é um material bastante leve.

Analisando os valores encontrados de densidade de massa fresca em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as novas argamassas produzidas com fator a/c ajustado estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria, com exceção da C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub> com fator a/c de 0,76.

Quanto aos teores de ar incorporado destas composições, o gráfico da Figura 87 indica um aumento nesta propriedade para todas as novas composições em relação à mesma com o fator a/c de 0,52, sendo este comportamento compatível com a redução nas densidades frescas. Apesar do aumento no teor de ar incorporado, as novas composições ainda apresentam valor inferior à argamassa de referência C04<sub>C2;0%nS</sub>. Isto pode subsidiar os resultados encontrados de absorção sonora, que são apresentados mais adiante.

Figura 87 - Teor de ar incorporado das 5 argamassas selecionadas



Fonte: A Autora (2022)

Quanto às argamassas com o EPS, vale destacar que ambas alcançaram um valor próximo à argamassa de referência C04<sub>C2;0%nS</sub> quando se ajusta a quantidade de água, indicando que 1% ou 2,5% de EPS, juntamente com o aumento no fator a/c, podem minimizar o efeito empacotador promovido pela nanossílica quando é adicionada à argamassa convencional.

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

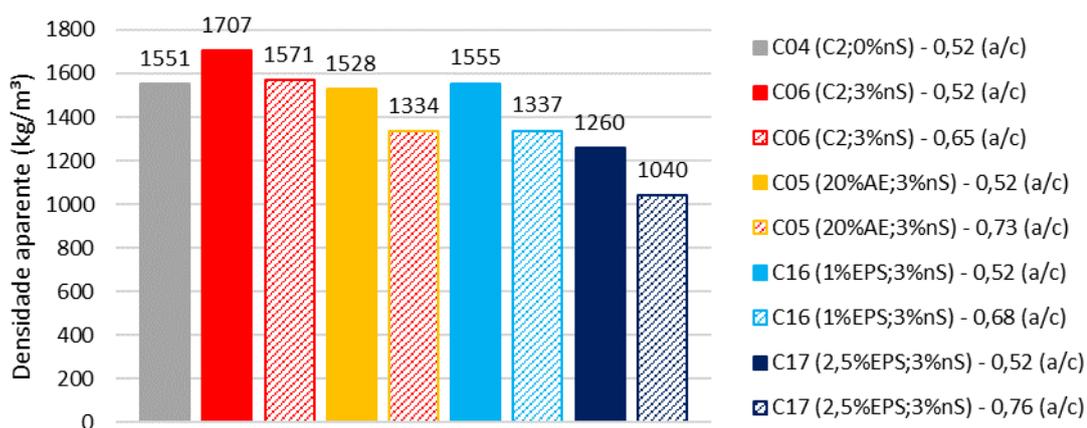
Os resultados dos ensaios de densidade de massa aparente, absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade são apresentados a seguir.

### 6.2.1 Densidade de massa aparente

As densidades aparentes das 5 argamassas selecionadas estão indicadas no gráfico da Figura 88 para uma consistência ajustada a um espalhamento mínimo de 260 mm, bem como as densidades obtidas para o fator a/c padronizado de 0,52, que foi utilizado nos estudos anteriores.

Verifica-se através do gráfico que as densidades reduziram entre 8% a 17% com o ajuste da consistência, tornando-as menos densas à medida que a quantidade de água foi ajustada. Esta propriedade apresentou comportamento semelhante ao da densidade de massa fresca, confirmando que o aumento no fator a/c reduziu a influência da nanossílica no aumento das densidades. Recomenda-se algumas análises de MEV para a verificação destas interações da nanossílica em função do fator a/c.

Figura 88 - Densidades aparentes das 5 argamassas selecionadas



Fonte: A Autora (2022)

Analisando os valores encontrados de densidade de massa aparente em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as novas argamassas produzidas com fator a/c ajustado estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria.

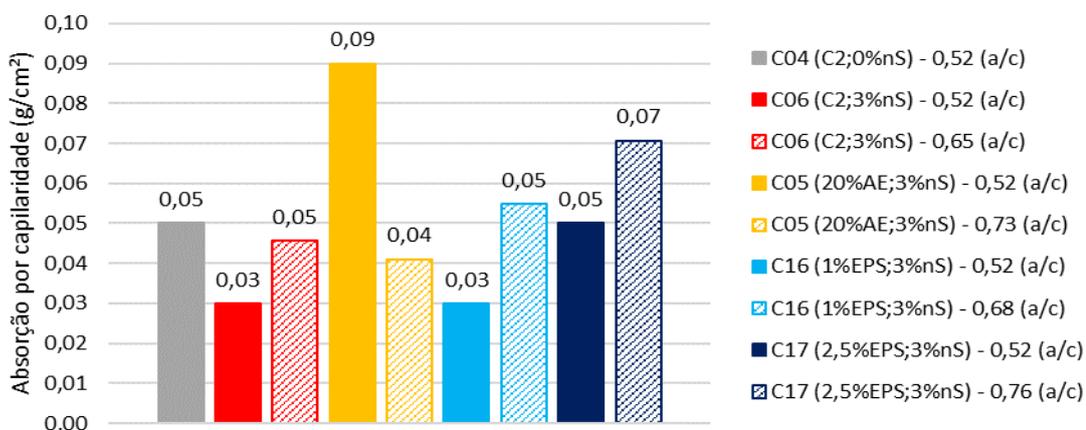
### 6.2.2 Absorção e coeficiente de capilaridade

As absorções por capilaridade aos 90 minutos de exposição à água das 5 argamassas selecionadas estão apresentadas no gráfico da Figura 89, no qual é possível observar um aumento nesta propriedade para todas as composições, com exceção da composição com argila expandida. Para esta argamassa, provavelmente, os finos da AE não absorveram tanta

água aos 90 minutos quanto antes, pois estava na presença de maior quantidade de água devido ao fator a/c mais elevado.

A absorção de água tem relação com a durabilidade do material, como já mencionado anteriormente. Assim, todas as novas composições, com exceção da mistura com a AE, absorvem mais água e, portanto, podem apresentar menor durabilidade em relação às intempéries do meio.

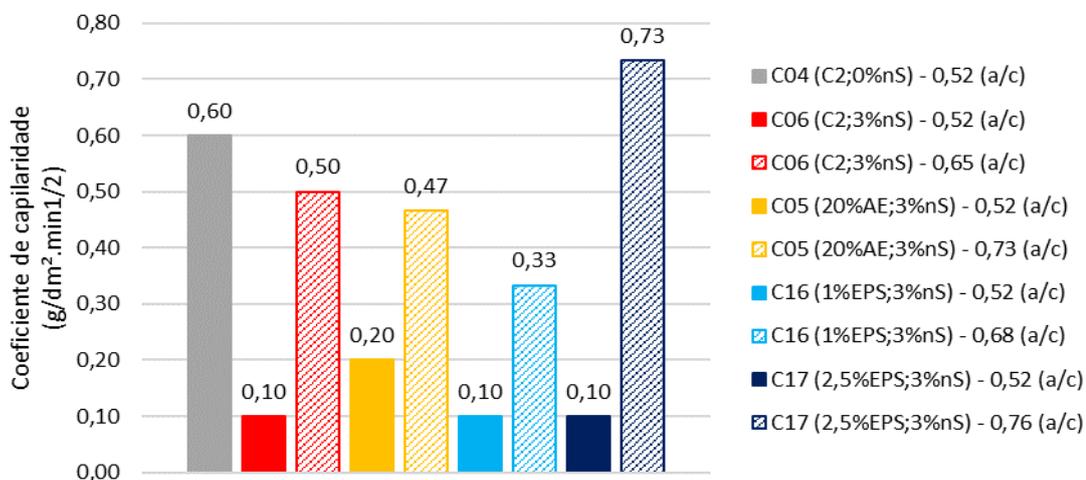
Figura 89 - Absorção por capilaridade aos 90 minutos das argamassas selecionadas



Fonte: A Autora (2022)

Da mesma forma, o coeficiente de capilaridade apresentado no gráfico da Figura 90 também aumentou para todas as composições com o ajuste do fator a/c, o que indica maior diferença entre a massa da amostra aos 10 minutos e aos 90 minutos de exposição à água, principalmente para a argamassa C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub>.

Figura 90 - Coeficiente de capilaridade das argamassas selecionadas



Fonte: A Autora (2022)

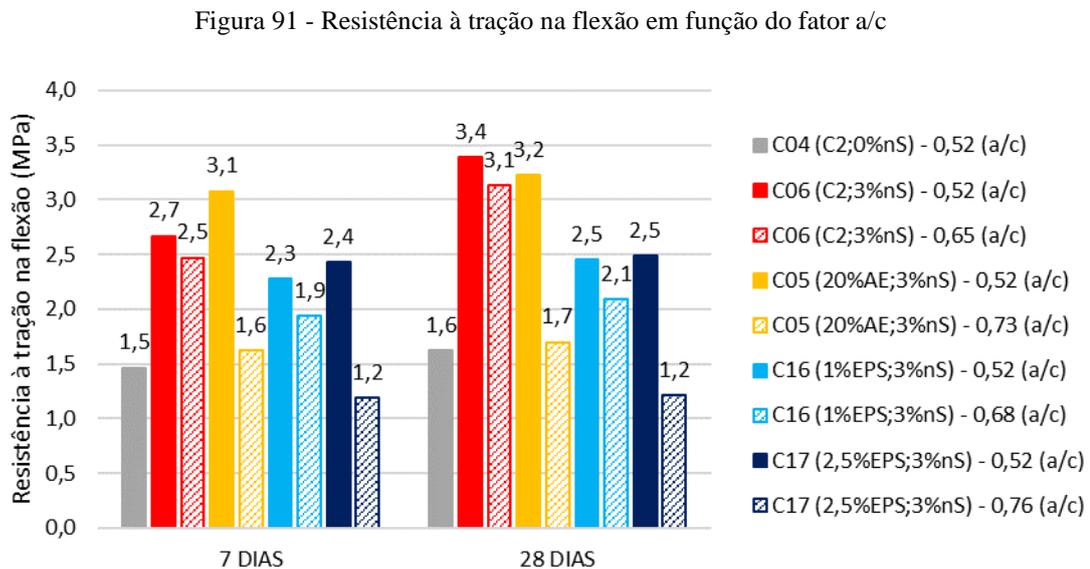
Apesar do aumento nesta propriedade, os valores encontrados de coeficiente de capilaridade em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as novas argamassas produzidas com fator a/c ajustado estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria.

### 6.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão axial das composições analisadas.

#### 6.3.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados médios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova estão apresentados no gráfico da Figura 91, no qual é possível verificar que o crescimento de resistência é maior nos 7 primeiros dias, não havendo diferenças significativas entre as idades, com exceção da argamassa convencional C06<sub>C2;3%nS</sub>.



Fonte: A Autora (2022)

É evidente a perda na resistência com o ajuste no fator a/c, principalmente nas argamassas leves, já que o fator a/c de ajuste destas argamassas é maior. Entre estas composições, foi ainda maior nas argamassas com um maior fator a/c, como C05<sub>20%AE;3%nS</sub> e C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub>. Nas argamassas C06<sub>C2;3%nS</sub> e C16<sub>1%EPS;3%nS</sub> a perda na resistência foi um pouco menor. Dessa forma, conclui-se que a nanossílica perde seu efeito empacotador quando se eleva a quantidade de água e de agregado leve, simultaneamente.

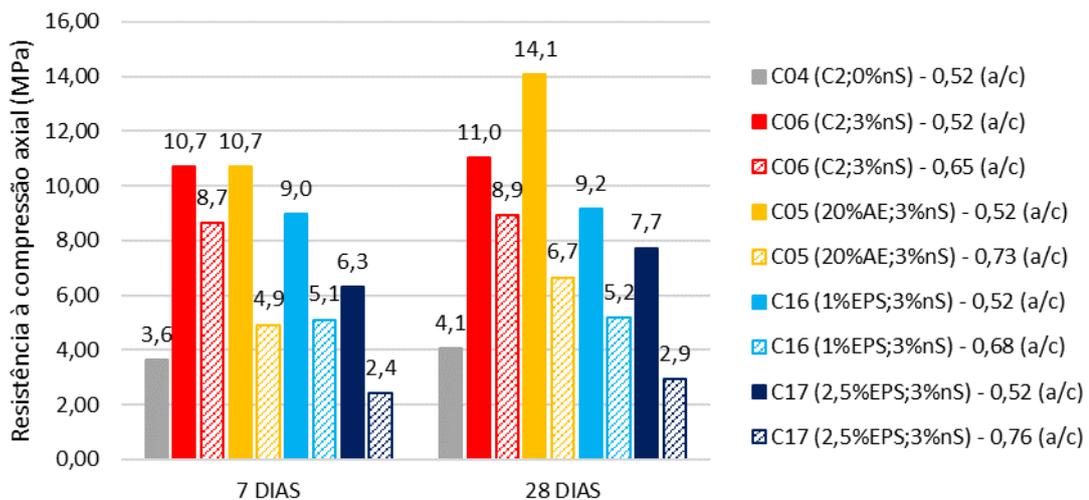
Analisando os valores encontrados de resistência à tração na flexão em relação a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as novas argamassas produzidas com fator a/c ajustado estão compatíveis com uma argamassa de revestimento ou para assentamento de alvenaria.

### 6.3.2 Resistência à compressão axial

Os resultados médios de resistência à compressão axial dos corpos de prova estão apresentados no gráfico da Figura 92, no qual é possível verificar que o crescimento de resistência é maior nos 7 primeiros dias, não havendo diferenças significativas entre as idades, com exceção da argamassa leve C05<sub>20%AE;3%nS</sub>.

As resistências obtidas pelas argamassas com o fator a/c de 0,52 e com o fator a/c ajustado para cada composição, visando um espalhamento mínimo de 260 mm, também são apresentadas. É evidente a perda na resistência com o ajuste no fator a/c, principalmente nas argamassas leves. Também se destaca a resistência elevada de 14,1 MPa na argamassa leve C05<sub>20%AE;3%nS</sub> aos 28 dias, superando inclusive a argamassa convencional C06<sub>C2;3%nS</sub>. Isto sugere que a argila expandida contribuiu para o efeito empacotador na argamassa C05<sub>20%AE;3%nS</sub>, assim como a nanossílica. Porém, este efeito foi reduzido com o ajuste no fator a/c, reduzindo a resistência mecânica, a densidade fresca e endurecida, bem como aumentando o teor de ar incorporado.

Figura 92 - Resistência à compressão axial em função do fator a/c



Fonte: A Autora (2022)

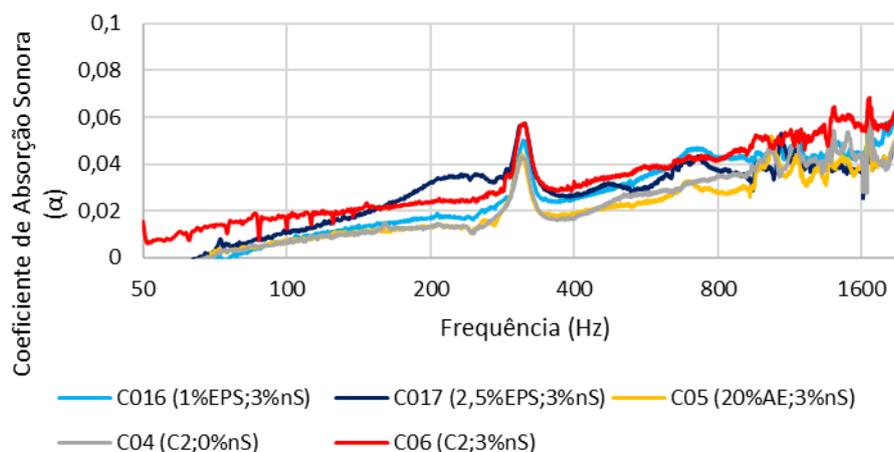
Este comportamento também foi observado nas argamassas leves com EPS - C16<sub>1%EPS;3%nS</sub> e C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub> – e na argamassa convencional C06<sub>C2;3%nS</sub>, cujas resistências mecânicas e

densidades reduziram com o aumento na quantidade de água, bem como o teor de ar incorporado e absorção por capilaridade aumentaram, o que sugere mais vazios na mistura. Além disso, verifica-se que as argamassas leves C05<sub>20%AE;3%nS</sub> e C16<sub>1%EPS;3%nS</sub> apresentam resistência mecânica igual ou superior à resistência da argamassa convencional C04<sub>C2;0%nS</sub>, o que também confirma a viabilidade para o reuso destes materiais em compósitos cimentícios. Apesar das resistências serem mais altas do que a argamassa de referência, os valores encontrados das novas composições com o fator a/c ajustado ainda estão compatíveis com as recomendações da NBR 13281 (ABNT, 2005) para argamassas de revestimento e assentamento.

#### 6.4 ABSORÇÃO SONORA

Os resultados obtidos através do ensaio com o tubo de impedância estão no Apêndice J, dos quais foram obtidas as curvas médias, indicadas através do gráfico da Figura 93.

Figura 93 - Curvas médias de absorção sonora



Fonte: A Autora (2022)

No geral, verifica-se que a absorção tende a aumentar com o aumento das frequências, sendo um efeito já esperado. Além disso, apresentam valores absolutos considerados baixos para um material absorvente, sendo abaixo de 0,1. Portanto, apesar de fazer o uso do agregado leve em 3 composições, percebe-se que isto não influenciou a absorção sonora.

Fazendo uma análise por frequência, foram obtidos os coeficientes médios ( $\alpha_m$ ) dos 6 corpos de prova para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 1900 Hz, conforme está apresentado na Tabela 19.

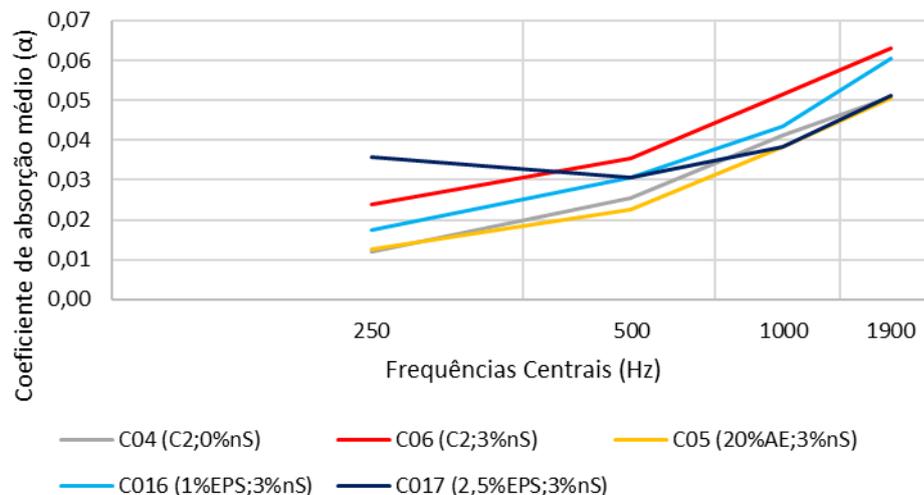
Tabela 19 - Coeficientes de absorção médios por frequência e ponderados

Composição	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	1900 Hz	Coeficiente Ponderado ( $\alpha_w$ )
C04 <sub>C2, 0% nS</sub>	0,01	0,03	0,04	0,05	0,03
C06 <sub>C2, 3% nS</sub>	0,02	0,04	0,05	0,06	0,04
C05 <sub>20%AE, 3% nS</sub>	0,01	0,02	0,04	0,05	0,03
C16 <sub>1%EPS, 3% nS</sub>	0,02	0,03	0,04	0,06	0,04
C17 <sub>2,5%EPS, 3% nS</sub>	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04

Fonte: A Autora (2022)

Estes resultados também foram apresentados no gráfico da Figura 94, no qual evidencia-se o aumento do coeficiente com o aumento da frequência e o comportamento semelhante entre as composições analisadas, o que é confirmado através do coeficiente de absorção ponderado, que não apresentou variação significativa. Portanto, pode-se concluir que o uso de agregado leve em compósitos cimentícios com nanossílica não foi capaz de contribuir para a absorção sonora, apesar de reduzir a densidade do material, tornando-o mais leve.

Figura 94 - Coeficientes de absorção médios por frequência



Fonte: A Autora (2022)

Através do gráfico acima, também se verifica que a composição C17<sub>2,5%EPS;3%nS</sub> apresentou uma absorção um pouco menor do que as demais composições nas frequências mais altas, apesar de fazer o uso de um maior teor de EPS; porém, é importante ressaltar que não há diferenças significativas entre os valores de coeficiente médios para a mesma frequência, o que pode ser confirmado através do coeficiente de absorção ponderado da Tabela 19. Portanto, considera-se as diferenças pouco significativas entre as composições.

Assim, este resultado indica que o uso de agregados leves em compósitos cimentícios não contribuiu para ganhos na absorção sonora. O uso de nanossílica em compósitos cimentícios, mesmo combinada aos agregados leves, não promoveu ganhos na absorção sonora. Isto é facilmente confirmado quando se compara os coeficientes ponderados dos traços convencionais - C04<sub>C2,0%nS</sub> e C06<sub>C2,3%nS</sub> - com os coeficientes ponderados dos traços com agregado leve - C05<sub>20%AE,3%nS</sub>, C16<sub>1%EPS,3%nS</sub> e C17<sub>2,5%EPS,3% nS</sub> – apresentados na Tabela 19.

Além disso, vale ressaltar que estas composições com nanossílica e agregado leve também apresentaram baixos teores de ar incorporado em relação à argamassa de referência, conforme visto no gráfico da Figura 88, sendo um parâmetro relevante para a porosidade do material. Recomenda-se a realização de outros ensaios para a verificação deste parâmetro de forma mais precisa, como porosimetria por intrusão de mercúrio. Porém, pelos resultados encontrados de absorção sonora, a quantidade de vazios nas argamassas com agregado leve não foi suficiente para a melhoria acústica, já que o teor de ar incorporado foi reduzido em relação à argamassa de referência C04<sub>C2,0%nS</sub>.

Acredita-se que para teores elevados de agregado leve, a absorção poderia melhorar, mas isto inviabiliza as argamassas, tendo em vista que acima de 30% de AE, 10% de pó de SM e 5% de EPS, os desempenhos físicos e mecânicos reduzem, consideravelmente.

Dessa forma, destaca-se que a absorção sonora depende não somente da leveza do material, mas também da quantidade de vazios presente no compósito. Apesar do aumento verificado no teor de ar incorporado com o ajuste na quantidade de água, ainda não foi possível contribuir para um real aumento na absorção sonora.

No geral, é possível concluir que:

- O uso do agregado leve não influenciou o coeficiente de absorção sonora ponderado das argamassas analisadas, o que indica que para uma maior influência na absorção, os teores devem ser mais elevados;
- Resultados de absorção sonora não satisfatórios podem significar bons resultados de isolamento acústico, o que pode contribuir para o atendimento deste requisito em edificações habitacionais, exigido através da norma de desempenho ou NBR 15575 (ABNT, 2021).

## 7 CONCLUSÕES

O uso de agregados leves em compósitos cimentícios já se tornou recorrente em estudos experimentais, bem como o uso de nanomateriais em compósitos cimentícios convencionais, a fim de verificar ganhos na resistência mecânica com uma análise microestrutural. Porém, pouco se tem publicado a respeito do comportamento de compósitos cimentícios leves com o uso de nanossílica, principalmente quanto às suas propriedades físicas e acústicas.

Por isso, este trabalho teve como objetivo analisar a influência simultânea de compósitos leves com a nanossílica, a partir de um estudo em argamassas convencionais e um estudo em argamassas leves, que utilizaram a argila expandida (AE), o pó de serra de madeira (SM) e o poliestireno expandido (EPS).

Nas argamassas convencionais, é possível concluir:

- o teor recomendado de nS em pó é 3% em substituição a mesma massa do cimento, não sendo viável utilizar 1% de nS, pois apresenta resultados semelhantes às argamassas sem nanomaterial, como também não é viável utilizar 5% de nS, pois compromete a fluidez das argamassas, consideravelmente;
- as argamassas com o cimento CP II F 40 (cimento 1) apresentaram resultados melhores de resistência mecânica aos 28 dias do que as argamassas com o cimento CP II E 40 (cimento 2); porém, as misturas com a escória de alto forno ainda podem melhorar seus resultados, tendo em vista que se trata de uma pozolana com hidratação lenta;
- há aumento nas densidades (fresca e aparente) e nas resistências mecânicas (tração na flexão e compressão) com o aumento do teor de nanossílica até 3% devido a um efeito empacotador do nanomaterial;
- há redução no teor de ar incorporado e na absorção por capilaridade com o aumento do teor de nanossílica até 3%, o que pode significar aumento na durabilidade dos compósitos expostos às intempéries;
- as curvas ATD-TG e DRX indicam menor quantidade de AQC e reserva alcalina, o que indica maior capacidade de formação de C-S-H;

No estudo experimental com as argamassas leves também foi possível concluir que:

- a AE moída pode atuar compactando a estrutura e conferindo resistências mecânicas melhores, com ou sem a nanossílica;

- as argamassas com o pó de SM necessitam de muita água para serem viáveis quanto à consistência, o que pode reduzir ainda mais a resistência mecânica;
- as argamassas com EPS necessitam de aditivo plastificante e nS para garantir a viabilidade, pois sem o aditivo este agregado sofre segregação da pasta e sem a nS apresenta uma resistência baixa;
- o teor recomendado destes agregados são 20% de AE, 5% de pó de SM e 2,5% de EPS em substituição a mesma massa do agregado natural, a fim de não comprometer significativamente as propriedades analisadas neste trabalho, principalmente as de resistência mecânica e consistência.

Nas argamassas leves também foi possível alcançar resistências mecânicas satisfatórias, usando 3% de nS, alcançando ganhos de 88% na resistência à tração na flexão e de 158% na resistência à compressão axial para um fator a/c de 0,52. Ajustando este fator a/c para um espalhamento de 260 mm, também se verificou que as resistências das argamassas com AE e EPS atendem aos critérios de uma argamassa para revestimento e assentamento, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Assim, a incorporação de agregados leves não comprometeu as resistências mecânicas; pelo contrário, contribuiu para ganhos nesta propriedade que permitem o reuso de resíduos de construção em compósitos cimentícios, o que favorece a sustentabilidade.

Em contrapartida, a absorção sonora não é garantida com o uso de agregados leves, já que os coeficientes de absorção ponderado medidos através do tubo de impedância não foram significativos nas argamassas leves, não ultrapassando 0,04, apesar de fazer o uso do agregado leve. Assim, conclui-se que o uso de agregados leves pode não significar ganhos na absorção sonora, tendo em vista que a nanossílica contribui para o preenchimento dos poros, que por sua vez, influencia na densidade, no teor de ar incorporado e nas resistências mecânicas. Indica-se teores de agregado leve maiores para um impacto mais significativo.

No entanto, resultados baixos de absorção sonora podem significar bons resultados de isolamento acústico, sendo um requisito cada vez mais exigido nas edificações, tendo em vista a NBR 15575 (ABNT, 2021).

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, fica evidente a necessidade de realizar um estudo experimental com as mesmas composições convencionais e leves, variando o fator a/c para cada uma delas e não apenas das 5 composições selecionadas. Outra sugestão seria manter o fator a/c constante em 0,52 e alterar o teor de aditivo plastificante para alcançar uma consistência adequada. Espera-se manter a resistência e alcançar a consistência adequada, simultaneamente.

Além disso, sugere-se aumentar o teor de nanossílica para 5%, fazendo os ajustes necessários na consistência. Dessa forma, acredita-se que é possível obter compósitos cimentícios ainda mais resistentes e até com funções estruturais. Outras propriedades também podem ser analisadas, como o desempenho térmico e a resistência ao fogo.

Diante dos resultados encontrados de resistência mecânica, é proposto o desenvolvimento de uma pesquisa experimental em concretos estruturais com o uso de resíduos e nanossílica, a fim de possibilitar maiores teores de substituição do agregado natural. Como visto neste trabalho, os agregados leves comprometem a resistência mecânica de compósitos, mas o uso da nanossílica associada pode viabilizá-los.

Para todos estes estudos experimentais, é relevante uma análise das interações entre a pasta e os agregados através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), porosimetria por intrusão de mercúrio, entre outros ensaios que permitam identificar com maior precisão a porosidade na matriz cimentícia.

Tendo em vista os resultados não satisfatórios de absorção sonora, é viável um estudo quanto ao desempenho acústico, analisando parâmetros de isolamento, conforme a NBR 15575 (ABNT, 2021).

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas experimentais aplicadas, utilizando estas novas composições otimizadas quanto à consistência aplicadas em produtos da construção civil, como blocos de vedação ou estrutural, elementos premoldados, entre outros, tendo em vista que elementos industrializados possuem maior controle na produção.

## REFERÊNCIAS

- AL-RIFAIE, W. N.; AHMED, W. K. Effect of nanomaterials in cement mortar characteristics. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 11, n.9, p. 1321- 1332, 2016.
- AHMAD, M. R.; CHEN, B.. Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate. **Composites Part B**, v. 171, p 46-60, 2019.
- ANDRADE, E. S.; GUIMARÃES, C. C.. Propriedades de argamassas com EVA (Ethylene Vinyl Acetate) em substituição parcial ao agregado. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 174- 192, 2017.
- ANGELIM, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G.. Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais. **Revista Matéria**, 2017.
- ARAÚJO, S. K. C.; OLIVEIRA, D. R.; SILVA, T. J.; BARBOSA, J. C.; GAVA, M..Desempenho acústico de painéis de gesso incorporados com fibra de celulose. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n.1, jan-abril, 2016. Doi: 105902/2236117019628
- ARENAS, C.; LUNA-GALIANO, Y.; LEIVA, C.; VILCHES, L. F.; ARROYO, F.; VILLEGAS, R.; FERNÁNDEZ-PEREIRA, C. Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 433- 442, 2017a.
- ARENAS, C.; LEIVA, C.; VILCHES, L. F.; GONZÁLEZ GANSO, J. A.. Approaching a methodology for the development of multilayer sound absorbing device recycling coal bottom ash. **Applied Acoustics**, v. 115, p. 81- 87, 2017b.
- ARRUDA FILHO, N. T.; DANTAS, C. P.; LEAL, A. F.; BARBOSA, N. P.; SILVA, C. G.; ALEXANDRE, M. V.. Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 894- 902, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Rio de Janeiro: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_\_. **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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C897**: Standard Specification for Aggregate for Job-Mixed Portland Cement-Based Plasters. Pennsylvania: ASTM, 2020.

BASTAMI, M.; BAGHBADRANI, M.; ASLANI, F.. Performance of nano-silica modified high strength concrete at elevated temperatures, **Construction and Building Materials**, v. 68, p.402-408, 2014.

BARBHUIYA *et al.*. Effects of the nanosilica addition on cement concrete: a review, **Materials Today: Proceedings**, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143>

BAGHERI, S.; NODOUSHAN, R. J.; AZIMZADEH, M.. Sound absorption performance of tea waste reinforced polypropylene and nanoclay biocomposites. **Polymer Bulletin**, 2022. Doi: <https://doi.org/article/10.1007/s00289-022-04295-y>

BARROCA, P. A. G.; NEPOMUCENO, M. C. S.; OLIVEIRA, L. A. P.. Avaliação do desempenho de argamassas de revestimento com agregados leves artificiais e reciclados. In: International Conference of Engineering, Cavilha, 2015. **Anais...** Cavilha: ICEUBI, 2015.

BARROS, F. B. M.. **Efeito da ação mecânica da moagem ultrafina sobre a decomposição térmica de amostras de calcário sedimentar e metamórfico cominuídas em moinho planetário de bolas**. Relatório Final (Iniciação Científica em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE, p.23. 2016.

BIRICIK, H.; SARIER, N. Comparative study of the characteristics of Nano Silica, Silica Fume and Fly Ash incorporated cement mortars, **Materials Research**, n. 3, v. 17, p. 570-582, 2014.

BRANCO, F. G.; GODINHO, L.. On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. **Construction and Building Materials**, v. 45, p.184-191, Abr. 2013.

BRANCHER, L. R.; ZINI, A.; SILVA, G. A. B. R.; NUNES, M. F. O.; ZENI, M.; PAGNUSSAT, D. T.; GRISA, A. M. C.. Caracterização de argamassas leves com resíduos de poli (cloreto de vinila) para contrapiso. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2016. **Anais...** Natal: CBECiMat, 2016.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B.. Efeitos do uso de aditivos com nanossílica na consistência e resistência mecânica do concreto. **Revista Eletrônica de Engenharia**, v. 13, n.2, p. 162 – 172, Jul./Dez. 2017.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B.. Efeitos do uso de aditivos com nanossílica na consistência e resistência mecânica do concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 12, n.2, p. 371 – 385, Abr. 2019.

CARBAJO, J.; ESQUERDO-LLORET, T. V.; RAMIS, J.; NADAL-GISBERT, A. V.; DENIA, F. D. Acoustic modeling of perforated concrete using the dual porosity theory. **Applied Acoustics**, v. 115, p. 150 – 157, Set. 2017.

CARDOSO, A. A.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.. Argamassas produzidas a partir de materiais não convencionais: uma revisão sistemática. In: 4º Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2016. **Anais...** Cuiabá: EEEA, 2016.

CHEN, Y.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 839 – 851, Set. 2017.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B.. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus – propriedades relevantes. **Cerâmica**, v. 60, p. 69 – 76, 2014.

CORINALDESI, V.; MAZZOLI, A.; SIDDIQUE, R.. Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 281 – 289, Jul 2016.

D’ALESSANDRO, F.; BALDINELLI, G.; BIANCHI, F.; SAMBUCCO, S.; RUFINI, A.. Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 264 – 274, 2018.

DE PAULO, F. A.; CAETANO, P. J. M.; GERALDO, V.. Aplicações da nanotecnologia na construção civil: análise experimental em argamassa expansiva com nanotubos de carbono. **Revista Pensar Engenharia**, v. 3, p. 1, 2015.

DRESCH, F. **Comportamento de misturas asfálticas tipo camada porosa de atrito (CPA)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, p.165. 2016.

DUART, M. A.. Características microestruturais de concretos adicionados de C-S-H e nanotubos de carbono. **Revista Matéria**, v. 26, n. 1, 2021.

FEDEROWICZ, K. *et al.*. Modification of lightweight aggregate concretes with sílica nanoparticles – a review. **Materials**, v. 14, p. 4242, 2021.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E.. Durability of expanded polystyrene mortars. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 175- 182, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029>

FERRÁNDIZ-MAS, V.; BOND, T.; GARCÍA-ALCOCEL, E.; CHEESEMAN, C.R.. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 285- 292, 2014.

FLORES-COLEN, I.; SOARES, A.; DE BRITO, J.. A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento. **Tech ITT Estruturas e Construção**, v. 11, n. 34, Out. 2013.

FUKUI, E.; MARTINS, E. J.; CAMPOS, H. F.; PINTO, M. C. C.; SILVA, S. H. L.; ROCHA, T. M. S.; KUDLANVEC JUNIOR, V. L.; COSTAS, M. R. M. M.. Efeito do procedimento de mistura no comportamento no estado fresco de argamassas de revestimento produzida em obra e industrializada. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.

GOMES, P. C. C.; DE ALENCAR, T. F. F.; DA SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C.. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31 – 46, Jul/Set. 2015.

GONÇALVES, MC. **Nanomateriais. ciência e engenharia de materiais de construção**. Ed. MC Gonçalves e F. Margarido: IST Press, pp. 727-771, 2012.

HAACH, V. G.; CARRAZEDO, R.; OLIVEIRA, L. M. F. Resonant acoustic evaluation of mechanical properties of masonry mortars. **Construction and Building Environment**, v. 152, p. 494- 505, Jul. 2017.

HARUEHANSAPONG, S.; PULNGEN, T.; CHUCHEEPSAKUL, S.. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 471-477, 2014.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; de MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, p. 1517-7076, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10534-2**: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. Switzerland: ISO, 1998.

JOHN, J.; THAMPURAN, A. L.; PREMLET, B.. Objective and subjective evaluation of acoustic comfort in classrooms: a comparative investigation of vernacular and modern school classroom in Kerala. **Applied Acoustics**, v. 104, p. 33-41, 2016.

LEFEVER, G. *et al.*. Combined use of superabsorbent polymers and nanosilica for reduction of restrained shrinkage and strength compensation in cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, v. 251, 2020.

LEMES, S. P. S.. **Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubo de carbono**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

KINNANE, O.; REILLY, A.; GRIMES, J.; PAVIA, J.; WALKER, R. Acoustic absorption of hemp-lime construction. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 674-682, Jun. 2016.

KIM, H. K.; JEON, J. H.; LEE, H. K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 193–200, 2012.

KONÁKOVÁ, D.; CÁCHOVÁ, M.; VEJMEKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; JERMAN, M.; BAYER, P.; ROVNANÍKOVÁ, P.; CERNÝ, R.. Lime-based plasters with combined expanded clay-silica aggregate: Microstructure, texture and engineering. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 374–383, 2017.

MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; MARQUES FILHO, J.; HELENE, P.. Nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland: influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. **Revista Alconpat**, v. 5, n. 2, p. 96-113, 2015.

MACHADO, L.B.B; MATOS, JR.. **Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial**. In: Técnicas de caracterização de polímeros. Canevarolo Jr. (Orgs) – São Paulo: Artliber Editora, 2007, 448p.

MEDEIROS, M. H. F.; DRANKA, F.; MATTANA, A. J.; COSTA, M. R. M. M.. Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Revista Matéria**, v. 20, n. 1, p. 127-144, 2015.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J.. Efeitos da nanossílica no desempenho mecânico e microestrutura de concretos de ultra-alta resistência. **Cerâmica**, v. 63, n. 1, p. 387-394, 2017.

MENDOZA, O.; SIERRA, G.; TOBÓN, J. I.. Influence of super plasticizer and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 771 – 778, Maio 2013.

MENEZES, I.; OLIVEIRA, D. M. de; SILVA, S. B. da; SOUZA, T. E. B.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.. Study and application of mortar with residues of expanded polystyrene. **International Journal of Development Research**, v. 08, n. 06, p. 21097-21102, 2018.

MOHAMED, A. M..Influence of nano materials on flexural behaviour and compressive strength of concrete. **HBRC Journal**, v. 12, p. 212-225 (2016).

NIVETHITHA, D.; SRIVIDHYA, S.; DHARMAR, S.. Review on Mechanical Properties of Cement Mortar Enhanced with Nanoparticles. **International Journal of Science and Research**, v. 5, n. 1, Jan. 2016.

NOGUEIRA, G. S. F. *et al.*. Incorporation of nanosilica in cement composites. **Revista Matéria**, v. 23, n. 03, 2018.

PACHECO, F.; KRUMENAUER, M.; DE MEDEIROS, D. R.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. F.. Development of lightweight concrete subfloor with ethylene vinyl acetate (EVA) aggregates waste to reduce impact sound in flooring system. **DYNA**, v. 84 (201), p. 290 – 295, 2017.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H.. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. **Cerâmica**, v. 64, p. 577-588, 2018.

PCZIECZEK, A.; SCHACKHOW, A.; EFFTING, C.; DIAS, T. F. D.; GOMES, I. R.. Properties of mortars containing tire rubber waste and expanded polystyrene (EPS). **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 11, n. 2, p. 219-225, 2017.

PEDROSO, M.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 221 – 228, fev. 2017.

PEREZ, G.; COMA, J.; BARRENECHE, C.; GRACIA, A.; URRESTARAZU, M.; BURÉS, S.; CABEZA, L. F. Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. **Applied Acoustics**, v. 110, p. 218 – 226, mar. 2016.

PONGSOPHA *et al.*. Thermal and acoustic Properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. **Results in Engineering**, v. 13, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100333>

RASHAD, A. M.. Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 81 – 101, jul. 2017.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica, **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 838-844, 2012.

SANTOS, J. F. L.; IGLESIAS, S. M.; DOMINGUEZ, D. S.; ALMEIDA, H. C.. Caracterização de argamassas leves reforçadas com fibras de piaçava utilizando tomografia computadorizada e Análise de Fourier. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 10, n. 2, p. 84-89, 2015.

SANTOS, W. J. dos; ALVARENGA, R. de C. S. S.; PEDROTI, L. G.; SILVA, R. C. da; FREIRE, A. S.; MORAES, B. A. de; CARVALHO, C. C. Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 225-243, jan./mar. 2018.

SAYADI, A. A.; TAPIA, J. V.; NEITZERT, T. R.; CLIFTON, G. C.. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, n. 1, p. 716-724, 2016.

SCHWARTZ, M. M.; CASSOL, G.. Estudo comparativo do concreto com adição de nanossílica e o concreto com adição de sílica ativa em suspensão. **Ignis**, Caçador, v. 7, n. 2, p. 80-94, maio/ago. 2018.

SETIATI, N. R.. The potential use of sílica as nanomaterials for mortar. In: 3rd International Conference on Construction and Building Engineering, 2017. **Anais... ICONBUILD**, 2017.

SIKORA, P. *et al.*. Evaluating the effects of nanosilica on the material properties of lightweight and ultra-lightweight concrete using image-based approaches. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.

SINGH, N. B.; SAXENA, S. K.; KUMAR, M.. Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete. **Materials today: proceedings**, v.5, p. 9035-9040, 2018.

SOLEYMANI, A. R.; MAHDIEI, M.; HAERIFAR, M.. Nano-titania/light expanded clay aggregate fixed bed as an effective adsorbent for removal of organic pollutant from water: equilibrium and kinetic studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, n. 1, p. 1328-1338, 2019.

SONEBI, M.; GARCÍA-TAENGUA, E.; HOSSAIN, K.M.A.; KHATIB, J.; LACHEMI, M.. Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 84, n. 1, p. 269-276, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P. de; OLIVEIRA, M. F. de. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 295-306, jul./set. 2017.

XIAOYU, G.; YINGFANG, F.; HAIYANG, L.. The compressive behavior of cement mortar with the addition of nano metakaolin. **Nanomaterials and nanotechnology**, v. 8, p. 1 – 7, 2018.

ZANON, T.; SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. S.. Avaliação dos efeitos da nanossílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. **Revista Alconpat**, v. 8, n. 2, p. 138-149, maio/ago. 2018.

ZHANG, P. *et al.*. Low dosage nanosilica modification on lightweight aggregate concrete. **Nanomaterials and nanotechnology**, v. 8, 2018.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

APÊNDICE A.1 – Resultados do ensaio de massa específica, conforme NBR 16605 (ABNT, 2007).

<b>Parâmetros</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
Massa de cimento (g)	60	60
Leitura no frasco de Le Chatelier (N1) em cm <sup>3</sup>	0,8	0,5
Temperatura inicial (T1) em graus celsius	24	24,5
Leitura no frasco de Le Chatelier (N2) em cm <sup>3</sup>	20,3	19,9
Temperatura final (T2) em graus celsius	23,5	24
Massa específica do cimento ( $\mu$ ) em g/cm <sup>3</sup>	3,077	3,093
<b>MEDIA DAS MASSAS ESPECÍFICAS em g/cm<sup>3</sup></b>	<b>3,085</b>	

APÊNDICE A.2 – Resultados do ensaio de consistência normal, conforme NBR 16606 (ABNT, 2018).

<b>CONSISTÊNCIA NORMAL</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
Massa de cimento (g)	499,9	500,2
Massa de água (g)	169,7	170
<b>QUANTIDADE DE ÁGUA (%)</b>	<b>33,9</b>	<b>34,0</b>

## APÊNDICE B – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NATURAL

APÊNDICE B.1 – Resultados do ensaio de massa unitária pelo método A e C e do volume de vazios

<b>Massa unitária - Areia Natural</b>			
<b>Método A - Compactado</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	19,2	19	18,96
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1738,9	1720,4	1716,7
<b>Método C - Solto</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	18,12	18,18	18,24
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1639,1	1644,6	1650,2

<b>Índice de Vazios - Areia Natural</b>	
<b>Método A - Compactado</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	2,43
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	1725,3
Índice de vazios (%)	28,7
<b>Método C - Solto</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	2,43
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	1644,65
Índice de vazios (%)	32,1

## APÊNDICE B.2 – Resultados do ensaio de massa específica

<b>Massas Específicas - Areia Natural</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
Massa do Frasco (g)	188,10	208,60
Massa de Areia (g)	500,10	499,90
Conjunto FRASCO + AREIA saturada (m1) (g)	688,20	708,50
ConjunTO FRASCO + AREIA + ÁGUA (m2) (g)	983,50	1003,80
AREIA seca (m) (g)	492,50	495,30
Volume de água (Va) (cm <sup>3</sup> )	296,03	296,03
Massa Específica da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	1,00
Massa Específica do agregado seco (d1) (g/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,43
Massa Específica do agregado saturado (d2) (g/cm <sup>3</sup> )	2,45	2,45
Massa Específica real do agregado (d3) (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,48

## APÊNDICE B.3 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - AREIA NATURAL (ENSAIO 1)</b>				
<b>PENEIRA (Nº)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	10	2,0	2,0
16	1,18 mm	87	17,4	19,4
30	600 µm	151	30,2	49,6
50	300 µm	100	20,0	69,6
100	150 µm	110	22,0	91,6
200	75 µm	35	7,0	98,6
FUNDO	FUNDO	7	1,4	100,0
	TOTAL	500	100	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - AREIA NATURAL (ENSAIO 2)</b>				
<b>PENEIRA (Nº)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0	0
8	2,36 mm	13	2,6	2,6
16	1,18 mm	84	16,8	19,4
30	600 µm	134	26,8	46,2
50	300 µm	93	18,6	64,8
100	150 µm	116	23,2	88
200	75 µm	48	9,6	97,6
FUNDO	FUNDO	12	2,4	100,0
	TOTAL	500	100	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - AREIA NATURAL (MÉDIA)</b>				
<b>PENEIRA (Nº)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Acumulado MÉDIO do Ensaio 1 e 2 (%)</b>
4	4,75 mm	0	0	0
8	2,36 mm	11,5	2,3	2,3
16	1,18 mm	85,5	17,1	19,4
30	600 µm	142,5	28,5	47,9
50	300 µm	96,5	19,3	67,2
100	150 µm	113	22,6	89,8
200	75 µm	41,5	8,3	98,1
FUNDO	FUNDO	9,5	1,9	100,0
	TOTAL	500	100	

## APÊNDICE C – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA

APÊNDICE C.1 – Resultados do ensaio de massa unitária pelo método A e C e do volume de vazios

<b>Massa unitária - Argila Expandida</b>			
<b>Método A - Compactado</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	7,68	7,64	7,60
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	674,1	670,8	667,4
<b>Método C - Solto</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	6,90	6,97	6,88
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	602,2	609,0	600,3

<b>Índice de Vazios - Argila Expandida</b>	
<b>Método A - Compactado</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	0,74
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	670,7
Índice de vazios (%)	9,4
<b>Método C - Solto</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	0,74
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	603,85
Índice de vazios (%)	18,4

## APÊNDICE C.2 – Resultados do ensaio de massa específica

<b>Massas Específicas - Argila Expandida</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
Massa do Frasco (g)	188,30	208,80
Massa de Argila (g)	100,20	100,10
Conjunto FRASCO + ARGILA saturada (m1) (g)	288,50	308,90
Conjunto FRASCO + ARGILA + ÁGUA (m2) (g)	703,70	724,50
ARGILA seca (m) (g)	63,10	61,40
Volume de água (Va) (cm <sup>3</sup> )	416,22	416,62
Massa Específica da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	1,00
Massa Específica do agregado seco (d1) (g/cm <sup>3</sup> )	0,75	0,74
Massa Específica do agregado saturado (d2) (g/cm <sup>3</sup> )	1,20	1,20
Massa Específica real do agregado (d3) (g/cm <sup>3</sup> )	1,35	1,38

## APÊNDICE C.3 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - ARGILA EXPANDIDA (ENSAIO 1)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	96	32,0	32,0
16	1,18 mm	54	18,0	50,0
30	600 µm	33	11,0	61,0
50	300 µm	17	5,7	66,7
100	150 µm	18	6,0	72,7
200	75 µm	21	7,0	79,7
FUNDO	FUNDO	61	20,3	100,0
	TOTAL	300	100	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - ARGILA EXPANDIDA (ENSAIO 2)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	85	28,3	28,3
16	1,18 mm	55	18,3	46,7
30	600 µm	35	11,7	58,3
50	300 µm	19	6,3	64,7
100	150 µm	20	6,7	71,3
200	75 µm	25	8,3	79,7
FUNDO	FUNDO	61	20,3	100,0
	TOTAL	300	100	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - ARGILA EXPANDIDA (MÉDIA)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Acumulado MÉDIO do Ensaio 1 e 2 (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	90,5	30,2	30,2
16	1,18 mm	54,5	18,2	48,3
30	600 µm	34	11,3	59,7
50	300 µm	18	6,0	65,7
100	150 µm	19	6,3	72,0
200	75 µm	23	7,7	79,7
FUNDO	FUNDO	61	20,3	100,0
	TOTAL	300	100	

## APÊNDICE D – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRA

APÊNDICE D.1 – Resultados do ensaio de massa unitária pelo método A e C e do volume de vazios

<b>Massa unitária - Pó de Serra</b>			
<b>Método A - Compactado</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (kg)	2,56	2,56	2,59
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	201,4	201,4	204,2
<b>Método C - Solto</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (kg)	2,4	2,38	2,36
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	186,6	184,8	182,9

<b>Índice de Vazios - Pó de serra</b>	
<b>Método A - Compactado</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	0,33
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	202,3
Índice de vazios (%)	38,7
<b>Método C - Solto</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	0,33
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	184,79
Índice de vazios (%)	44,0

## APÊNDICE D.2 – Resultados do ensaio de massa específica

<b>Massas Específicas - Pó de Serra</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
Massa do Frasco (g)	188,10	208,60
Massa de Pó de serra (g)	100,10	100,00
Conjunto FRASCO + PÓ DE SERRA saturada (m1) (g)	288,20	308,60
ConjunTO FRASCO + PÓ DE SERRA + ÁGUA (m2) (g)	699,60	719,10
PÓ DE SERRA seca (m) (g)	30,10	28,30
Volume de água (Va) (cm <sup>3</sup> )	412,41	411,51
Massa Específica da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	1,00
Massa Específica do agregado seco (d1) (g/cm <sup>3</sup> )	0,34	0,32
Massa Específica do agregado saturado (d2) (g/cm <sup>3</sup> )	1,14	1,13
Massa Específica real do agregado (d3) (g/cm <sup>3</sup> )	1,73	1,70

## APÊNDICE D.3 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - PÓ DE SERRA (ENSAIO 1)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	13	4,3	4,3
16	1,18 mm	59	19,7	24,0
30	600 µm	104	34,7	58,7
50	300 µm	51	17,0	75,7
100	150 µm	42	14,0	89,7
200	75 µm	25	8,3	98,0
FUNDO	FUNDO	6	2,0	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - PÓ DE SERRA (ENSAIO 2)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	9	3,0	3,0
16	1,18 mm	54	18,0	21,0
30	600 µm	97	32,3	53,3
50	300 µm	56	18,7	72,0
100	150 µm	47	15,7	87,7
200	75 µm	26	8,7	96,3
FUNDO	FUNDO	11	3,7	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - PÓ DE SERRA (MÉDIA)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Acumulado MÉDIO do Ensaio 1 e 2 (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	11	3,7	3,7
16	1,18 mm	56,5	18,8	22,5
30	600 µm	100,5	33,5	56,0
50	300 µm	53,5	17,8	73,8
100	150 µm	44,5	14,8	88,7
200	75 µm	25,5	8,5	97,2
FUNDO	FUNDO	8,5	2,8	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

## APÊNDICE E – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO EPS

APÊNDICE E.1 – Resultados do ensaio de massa unitária pelo método A e C e do volume de vazios

<b>Massa unitária - EPS</b>			
<b>Método A - Compactado</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	0,79	0,79	0,79
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	38,1	38,3	37,6
<b>Método C - Solto</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
Massa Recipiente + Agregado (Kg)	0,77	0,77	0,77
Massa do recipiente (kg)	0,38	0,38	0,38
Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	0,010823	0,010823	0,010823
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	36,5	36,3	35,8

<b>Índice de Vazios - EPS</b>	
<b>Método A - Compactado</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	0,10
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	38,0
Índice de vazios (%)	61,9
<b>Método C - Solto</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>
Massa específica seca relativa	36,17
Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )	997,54
Massa unitária média (kg/m <sup>3</sup> )	36,17
Índice de vazios (%)	99,9

APÊNDICE E.2 – Resultados do ensaio de massa específica

<b>Massas Específicas - EPS</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
Massa do Frasco (g)	208,60	208,60
Massa de EPS (g)	30,10	30,40
Conjunto FRASCO + EPS saturada (m1) (g)	238,70	239,00
ConjunTO FRASCO + EPS + ÁGUA (m2) (g)	422,10	435,10
EPS seca (m) (g)	30,10	30,40
Volume de água (Va) (cm <sup>3</sup> )	183,85	196,58
Massa Específica da água (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	1,00
Massa Específica do agregado seco (d1) (g/cm <sup>3</sup> )	0,10	0,10
Massa Específica do agregado saturado (d2) (g/cm <sup>3</sup> )	0,10	0,10
Massa Específica real do agregado (d3) (g/cm <sup>3</sup> )	0,10	0,10

## APÊNDICE E.3 – Resultados do ensaio de granulometria por peneiramento

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - EPS (ENSAIO 1)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0,0	0,0
8	2,36 mm	297	99,0	99,0
16	1,18 mm	3	1,0	100,0
30	600 µm	0	0,0	100,0
50	300 µm	0	0,0	100,0
100	150 µm	0	0,0	100,0
200	75 µm	0	0,0	100,0
FUNDO	FUNDO	0	0,0	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - EPS (ENSAIO 2)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Percentual Acumulado (%)</b>
4	4,75 mm	0	0	0
8	2,36 mm	294	98	98
16	1,18 mm	6	2	100
30	600 µm	0	0	100
50	300 µm	0	0	100
100	150 µm	0	0	100
200	75 µm	0	0	100
FUNDO	FUNDO	0	0	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

<b>CURVA GRANULOMÉTRIA - EPS (MÉDIA)</b>				
<b>PENEIRA (N°)</b>	<b>PENEIRAS (mm)</b>	<b>MASSA RETIDA (g)</b>	<b>Percentual Retido (%)</b>	<b>Acumulado MÉDIO do Ensaio 1 e 2 (%)</b>
4	4,75 mm	0	0	0
8	2,36 mm	295,5	98,5	98,5
16	1,18 mm	4,5	1,5	100
30	600 µm	0	0	100
50	300 µm	0	0	100
100	150 µm	0	0	100
200	75 µm	0	0	100
FUNDO	FUNDO	0	0	100,0
	<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>100</b>	

## APÊNDICE F – CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS COMPOSIÇÕES ANALISADAS

### APÊNDICE F.1 – Composições convencionais no estado endurecido



Legenda:

R0: C04 C2, 0%NS

R1: C05 C2, 1%NS

R3: C06 C2, 3%NS

### APÊNDICE F.2 – Composições leves no estado endurecido





**Legenda:**

1: C01 10%AE; 0%nS  
 2: C02 20%AE; 0%nS  
 3: C03 30%AE; 0%nS  
 7: C07 5%SM; 0%nS  
 8: C08 7,5%SM; 0%nS

9: C09 10%SM; 0%nS  
 10: C10 5%SM; 3%nS  
 11: C11 7,5%SM; 3%nS  
 12: C12 10%SM; 3%nS  
 13: C13 1%EPS; 0%nS

14: C14 2,5%EPS; 0%nS  
 15: C15 5%EPS; 0%nS  
 16: C16 1%EPS; 3%nS  
 17: C17 2,5%EPS; 3%nS

## APÊNDICE G – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS CONVENCIONAIS

### APÊNDICE G.1 – Consistência das argamassas convencionais

Composição	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Diâmetro médio (mm)
C01 C1, 0%nS	267	263	264	265
C02 C1, 1%nS	240	235	239	238
C03 C1, 3%nS	222	215	219	190
C04 C2, 0%nS	284	288	281	284
C05 C2, 1%nS	253	261	254	256
C06 C2, 3%nS	199	207	207	204

### APÊNDICE G.2 – Densidade fresca das argamassas convencionais

Traço	Recipiente (g)	Placa de vidro (g)	Conjunto Vazio (g)	Conjunto com água (g)	Volume do recipiente (cm <sup>3</sup> )	Conjunto com Argamassa (g)	Densidade fresca (kg/m <sup>3</sup> )
C01 C1, 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1069,7	1515,05
C02 C1, 1%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1113,5	1589,56
C03 C1, 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1211,4	1756,08
C04 C2, 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1057,2	1493,79
C05 C2, 1%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1103,6	1572,72
C06 C2, 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1208,1	1750,47

### APÊNDICE G.3 – Teor de ar incorporado das argamassas convencionais

Traço	Densidade fresca d (g/cm <sup>3</sup> )	Massas totais (g)	Volumes por material constituinte (cm <sup>3</sup> )	Densidade Teórica dt (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (A) %
C01 C1, 0%nS	1,515	3164,00	1458,68	2,17	30,15
C02 C1, 1%nS	1,589	3164,00	1459,33	2,17	26,69
C03 C1, 3%nS	1,756	3164,00	1460,61	2,17	18,93
C04 C2, 0%nS	1,49	3164,00	1455,05	2,17	31,30
C05 C2, 1%nS	1,57	3164,00	1455,73	2,17	27,64
C06 C2, 3%nS	1,75	3164,00	1457,09	2,17	19,39

## APÊNDICE G.4 – Densidade de massa aparente das argamassas convencionais

Composição	Corpo de Prova	L1 (mm)	L2 (mm)	A1 (mm)	A2 (mm)	C1 (mm)	C2 (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
C01 C1; 0%ns	CP1	40,6	42,1	40,25	40,25	160,25	160,3	266,8	377,8	1,4
	CP2	42	40,2	40,1	40,5	160,4	160,5	265,8	365,9	1,4
	CP3	40,1	40,6	41,6	40,5	160,8	160,5	266,1	369,7	1,4
C02 C1; 1%ns	CP1	40,6	40,5	40	40,3	162	162	263,7	389,4	1,5
	CP2	43	40,8	40,2	40,1	162	162,3	272,8	389,3	1,4
	CP3	40,3	40,7	41,2	40,8	161,2	161	267,5	381,4	1,4
C03 C1; 3%ns	CP1	40,2	40,4	40,25	40,1	160,3	160,3	259,5	432,3	1,7
	CP2	40,2	40,5	40,2	40	160,5	160,5	259,7	425,4	1,6
	CP3	40,4	40,6	40,3	40,1	160,3	160,3	261,0	413,2	1,6
C04 C2; 0%ns	CP1	40,1	40,2	40,9	40,7	161,2	161,2	264,1	406,6	1,5
	CP2	40,2	40,7	40,8	40,5	161,1	161,1	264,9	411,1	1,6
	CP3	40,2	40,3	41	40,3	161,2	161,2	263,7	411,9	1,6
C05 C2; 1%ns	CP1	40,2	40,3	40,2	40,9	160,8	161	262,6	432,5	1,6
	CP2	40,2	40,3	40,4	40,2	160,8	160,8	260,8	429,6	1,6
	CP3	40,3	40,2	40,4	40,8	160,8	160,9	262,9	436,5	1,7
C06 C2; 3%ns	CP1	40,2	40,3	40,7	40,8	160,4	160,5	263,2	449,7	1,7
	CP2	40,5	40,2	39,9	40,9	160,5	160,6	261,7	446,6	1,7
	CP3	40,4	40,3	40,3	40,8	160,4	160,4	262,4	447,7	1,7

## APÊNDICE G.5 – Absorção e coeficiente de capilaridade das argamassas convencionais

Traço	Corpo de Prova	Massa seca (g)	Massa 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g)	Massa 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g)	Área da seção (cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
C01 C1; 0%nS	CP1	368,4	368,9	369,9	16	0,03	0,09	1,0
	CP2	371,7	372,3	373,5	16	0,04	0,11	1,2
	CP3	368,6	369,4	370,5	16	0,05	0,12	1,1
C02 C1; 1%nS	CP1	399	399,6	400,6	16	0,04	0,10	1,0
	CP2	407,1	407,7	408,5	16	0,04	0,09	0,8
	CP3	401,1	401,7	402,6	16	0,04	0,09	0,9
C03 C1; 3%nS	CP1	443,5	444,3	445	16	0,05	0,09	0,7
	CP2	429,9	430,5	431,1	16	0,04	0,08	0,6
	CP3	435,6	435,9	436,2	16	0,02	0,04	0,3
C04 C2; 0%nS	CP1	406,6	406,9	407,4	16	0,02	0,05	0,5
	CP2	411,1	411,2	411,8	16	0,01	0,04	0,6
	CP3	411,9	412	412,7	16	0,01	0,05	0,7
C05 C2; 1%nS	CP1	432,5	432,8	433	16	0,02	0,03	0,2
	CP2	429,6	429,9	430,1	16	0,02	0,03	0,2
	CP3	436,5	436,8	437,2	16	0,02	0,04	0,4
C06 C2; 3%nS	CP1	449,7	450	450,1	16	0,02	0,03	0,1
	CP2	446,6	447	447,1	16	0,02	0,03	0,1
	CP3	447,7	448	448,3	16	0,02	0,04	0,3

## APÊNDICE G.6 – Resistência à tração na flexão das argamassas convencionais

Composição	Resistência (MPa)									
	7 dias					28 dias				
	CP1	CP2	CP3	Média (Mpa)	Desvio Padrão (DP)	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio Padrão (DP)
C01 C1; 0%nS	1,7	1,9	1,9	1,8	0,12	2,6	2,3	2,5	2,4	0,12
C02 C1; 1%nS	2,7	2,3	2,4	2,5	0,21	2,8	2,4	2,9	2,7	0,24
C03 C1; 3%nS	3,5	3,6	3,5	3,5	0,07	4,5	4,4	4,4	4,5	0,06
C04 C2; 0%nS	1,5	1,3	1,5	1,5	0,12	1,4	1,7	1,7	1,6	0,16
C05 C2; 1%nS	1,6	1,4	1,4	1,5	0,12	1,8	1,8	1,8	1,8	0,01
C06 C2; 3%nS	2,7	2,3	2,9	2,7	0,29	3,4	3,6	3,1	3,4	0,28

## APÊNDICE G.7 – Resistência à compressão axial das argamassas convencionais

Composição	Resistência (MPa)															
	7 dias								28 dias							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio Padrão	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	Média	Desvio Padrão
C01 C1; 0%nS	4,1	4,1	4,2	3,2	4,6	4,3	4,1	0,45	5,5	6,4	<b>7,0</b>	5,5	5,7	5,3	5,7	0,41
C02 C1; 1%nS	6,3	5,8	5,8	5,7	5,5	6,4	5,9	0,34	6,9	<b>8,2</b>	6,8	6,2	5,9	<b>5,0</b>	6,4	0,50
C03 C1; 3%nS	11,9	11,3	11,5	<b>10,5</b>	<b>9,8</b>	10,7	11,3	0,48	15,1	15,0	14,6	14,1	<b>15,8</b>	14,8	14,7	0,41
C04 C2; 0%nS	3,2	3,5	3,7	3,8	3,8	3,8	3,6	0,23	4,2	3,6	4,0	3,8	4,1	4,7	4,1	0,37
C05 C2; 1%nS	3,8	3,3	4,1	3,9	4,1	3,8	3,8	0,31	5,1	5,2	4,8	5,2	4,7	4,6	4,9	0,25
C06 C2; 3%nS	11,2	10,7	10,0	<b>8,1</b>	<b>9,7</b>	10,9	10,7	0,50	<b>13,6</b>	11,6	11,1	11,1	<b>9,3</b>	10,4	11,0	0,50

## APÊNDICE H – RESULTADOS DAS ARGAMASSAS LEVES

### APÊNDICE H.1 – Consistência das argamassas leves

<b>Composição</b>	<b>Diâmetro 1 (mm)</b>	<b>Diâmetro 2 (mm)</b>	<b>Diâmetro 3 (mm)</b>	<b>Diâmetro médio (mm)</b>
C01 10%AE; 0%nS	240	238	241	240
C02 20%AE; 0%nS	210	208	206	208
C03 30%AE; 0%nS	169	172	176	172
C04 10%AE; 3%nS	194	198	203	198
C05 20%AE; 3%nS	171	171	177	173
C06 30%AE; 3%nS	0	0	0	0
C07 5%SM; 0%nS	155	150	145	150
C08 7,5%SM; 0%nS	0	0	0	0
C09 10%SM; 0%nS	0	0	0	0
C10 5%SM; 3%nS	0	0	0	0
C11 7,5%SM; 3%nS	0	0	0	0
C12 10%SM; 3%nS	0	0	0	0
C13 1%EPS; 0%nS	242	238	241	240
C14 2,5%EPS; 0%nS	200	201	198	200
C15 5%EPS; 0%nS	135	145	140	140
C16 1%EPS; 3%nS	220	210	212	214
C17 2,5%EPS; 3%nS	151	148	148	149
C18 5%EPS; 3%nS	0	0	0	0

## APÊNDICE H.2 – Densidade fresca das argamassas leves

<b>Composição</b>	<b>Recipiente (g)</b>	<b>Placa de vidro (g)</b>	<b>Conjunto Vazio (g)</b>	<b>Conjunto com água (g)</b>	<b>Volume do recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Conjunto com Argamassa (g)</b>	<b>Densidade fresca (kg/m<sup>3</sup>)</b>
C01 10%AE; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1091,3	1551,79
C02 20%AE; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1045,3	1473,55
C03 30%AE; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	913,3	1249,02
C04 10%AE; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1138,2	1631,57
C05 20%AE; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1131	1619,32
C06 30%AE; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1044,8	1472,70
C07 5%SM; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1107,8	1579,86
C08 7,5%SM; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1070,4	1516,24
C09 10%SM; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	927,8	1273,69
C10 5%SM; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1147,6	1647,56
C11 7,5%SM; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1055,6	1491,07
C12 10%SM; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1005,7	1406,19
C13 1%EPS; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1035,3	1456,54
C14 2,5%EPS; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	885,4	1201,56
C15 5%EPS; 0%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	726,7	931,62
C16 1%EPS; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	1100,1	1566,76
C17 2,5%EPS; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	960,7	1329,65
C18 5%EPS; 3%nS	11,4	167,6	179	766,9	587,9	747,4	966,83

## APÊNDICE H.3 – Teor de ar incorporado das argamassas leves

<b>Composição</b>	<b>Densidade fresca d (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massas totais (g)</b>	<b>Volumes por material constituinte (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade Teórica dt (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de ar incorporado (A) %</b>
C01 10%AE; 0%nS	1,55	3164,00	1652,10	1,92	18,97
C02 20%AE; 0%nS	1,47	3164,00	1849,14	1,71	13,88
C03 30%AE; 0%nS	1,25	3164,00	2046,18	1,55	19,22
C04 10%AE; 3%nS	1,63	3164,00	1654,14	1,91	14,70
C05 20%AE; 3%nS	1,62	3164,00	1851,18	1,71	5,26
C06 30%AE; 3%nS	1,47	3164,00	2048,22	1,54	4,66
C07 5%SM; 0%nS	1,58	3164,00	1727,95	1,83	13,72
C08 7,5%SM; 0%nS	1,52	3164,00	1864,39	1,70	10,65
C09 10%SM; 0%nS	1,27	3164,00	2000,84	1,58	19,46
C10 5%SM; 3%nS	1,65	3164,00	1729,99	1,83	9,92
C11 7,5%SM; 3%nS	1,49	3164,00	1866,43	1,70	12,04
C12 10%SM; 3%nS	1,41	3164,00	2002,88	1,58	10,98
C13 1%EPS; 0%nS	1,46	3164,00	1656,38	1,91	23,75
C14 2,5%EPS; 0%nS	1,20	3164,00	1958,37	1,62	25,63
C15 5%EPS; 0%nS	0,93	3164,00	2461,68	1,29	27,52
C16 1%EPS; 3%nS	1,57	3164,00	1658,42	1,91	17,88
C17 2,5%EPS; 3%nS	1,33	3164,00	1960,41	1,61	17,62
C18 5%EPS; 3%nS	0,97	3164,00	2463,72	1,28	24,72

## APÊNDICE H.4 – Densidade de massa aparente das argamassas leves

Composição	Corpo de Prova	L1 (mm)	L2 (mm)	A1 (mm)	A2 (mm)	C1 (mm)	C2 (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
C01 10%AE; 0%nS	CP1	40,3	40,7	40,7	40,7	164	163	269,5	351,2	1,3
	CP2	40,4	39,9	40,8	41,3	164,4	163,4	270,1	350,3	1,3
	CP3	40,8	40	41	41,4	164	163,6	272,6	358,3	1,3
C02 20%AE; 0%nS	CP1	40,1	40,2	40,6	40,3	160,7	160,7	261,0	340	1,3
	CP2	40,3	40,2	41,2	40,6	160,4	160,5	264,1	333,8	1,3
	CP3	40,2	40,2	41,7	40,5	160,5	161	265,6	330	1,2
C03 30%AE; 0%nS	CP1	40,2	40,3	40,9	41,5	161	160,8	266,8	328,6	1,2
	CP2	40,4	40,3	40	40,6	161,7	161,9	263,1	325,4	1,2
	CP3	40,2	40	41,4	40	161,9	161,2	263,7	322,6	1,2
C04 10%AE; 3%nS	CP1	40,2	40,2	40	40,3	161	160,9	259,8	422,1	1,6
	CP2	40,2	40,1	39,8	40,4	160,9	160,9	259,1	420,5	1,6
	CP3	40,2	40,1	39,8	40,4	160,9	161	259,1	420,2	1,6
C05 20%AE; 3%nS	CP1	41,1	40,2	40,7	40,4	161,2	161,2	265,7	400,6	1,5
	CP2	40,2	40,2	41,4	40,4	161	161	264,7	403,2	1,5
	CP3	40,3	40,2	39,8	40,2	160,8	160,9	259,0	402,6	1,6
C06 30%AE; 3%nS	CP1	40,1	40,2	40,1	40,7	161,1	161,1	261,3	363	1,4
	CP2	40,2	40,2	40,7	40,4	160,9	161	262,4	353,5	1,3
	CP3	40,1	40,8	40,1	40,4	161,2	160,9	262,2	362,7	1,4
C07 5%SM; 0%nS	CP1	40,2	40,1	40,2	40,3	160,6	160,6	259,5	399	1,5
	CP2	40	40,2	40	40,3	161	161,1	259,3	393,2	1,5
	CP3	40,3	40,3	40,2	40,2	161,1	161,2	261,1	397	1,5
C08 7,5%SM; 0%nS	CP1	40,4	40	40,5	40	160,4	160,3	259,5	354,6	1,4
	CP2	40,2	40	39,5	40,1	160,3	160,4	255,9	343,8	1,3
	CP3	40,3	40,6	39,6	40,3	160,1	160,4	259,0	360	1,4
C09 10%SM; 0%nS	CP1	40,1	40,2	40,9	39,7	161,1	161	260,6	330,9	1,3
	CP2	40	40,2	39,1	39,9	161,4	161,4	255,6	310,1	1,2
	CP3	40	40,1	39,9	40,3	160,7	160,5	257,9	301,7	1,2
C10 5%SM; 3%nS	CP1	40,5	40	40	41,15	162,9	163,2	266,3	426,5	1,6
	CP2	40,1	40,7	40	40,8	162,1	162,1	264,6	409,4	1,5
	CP3	40,1	40,5	40,6	41	162,5	162,6	267,3	422,6	1,6
C11 7,5%SM; 3%nS	CP1	40,4	40,7	40,4	40,7	161,7	161,6	265,8	380,9	1,4
	CP2	40,3	40,2	40,4	40,5	162	161,5	263,3	398,9	1,5
	CP3	40,2	40	40,5	40,4	162	161,5	262,4	393,5	1,5
C12 10%SM; 3%nS	CP1	40,2	40,9	40,4	40,2	160,7	160,7	262,6	349	1,3
	CP2	40,1	40,2	40,2	40	160,5	160,5	258,4	330,6	1,3
	CP3	40,2	40,1	40,4	40,3	161,2	160,5	260,6	329,5	1,3
C13 1%EPS; 0%nS	CP1	40,3	40,4	40,6	40,4	162,5	161,9	265,1	372,4	1,4
	CP2	40,4	40	40,7	40,5	163	162,6	265,7	371,8	1,4
	CP3	40	40,9	40,5	41,2	163,6	163,2	270,0	373,7	1,4
C14 2,5%EPS; 0%nS	CP1	40,3	40,15	40,5	40,5	161,4	161,6	263,1	297,4	1,1
	CP2	40,3	40,8	40,5	40,2	161,9	162,4	265,3	305,2	1,2
	CP3	40,2	40,1	41	40,3	161	161,1	262,8	292,1	1,1

## APÊNDICE H.4 – Densidade de massa aparente das argamassas leves (continuação)

<b>Composição</b>	<b>Corpo de Prova</b>	<b>L1 (mm)</b>	<b>L2 (mm)</b>	<b>A1 (mm)</b>	<b>A2 (mm)</b>	<b>C1 (mm)</b>	<b>C2 (mm)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
C15 5%EPS; 0%nS	CP1	40,2	40,4	40,4	40,5	160,6	160,5	261,7	237,5	0,9
	CP2	40,2	40,2	40,9	40,8	160,9	160,6	264,0	231,5	0,9
	CP3	40,4	39,4	41,2	40,4	162,4	162,3	264,3	242,6	0,9
C16 1%EPS; 3%nS	CP1	40,1	40,2	40,4	40,9	161,1	161,3	263,1	410,9	1,6
	CP2	40,2	40,2	40,4	40,7	161	160,9	262,4	409,8	1,6
	CP3	40,2	40,1	41,5	40,4	160,9	160,8	264,5	407,9	1,5
C17 2,5%EPS; 3%nS	CP1	40,2	40,2	40,7	42	160,9	161,2	267,7	337	1,3
	CP2	40,1	40,2	40,7	41	160,7	161	263,8	335,1	1,3
	CP3	40,2	40,1	40,8	42	161,1	161,5	268,1	335,7	1,3
C18 5%EPS; 3%nS	CP1	40,2	40,2	40,6	41	160,8	160,7	263,7	243,4	0,9
	CP2	40,4	40,5	40,7	40,5	160,8	160,8	264,1	242,4	0,9
	CP3	40,3	40,4	40,4	40,4	160,7	160,7	262,0	242,4	0,9

## APÊNDICE H.5 – Absorção e coeficiente de capilaridade das argamassas leves

Composição	Corpo de Prova	Massa seca (g)	Massa 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g)	Massa 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g)	Área da seção (cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
C01 10%AE; 0%nS	CP1	346,2	346,4	346,7	16	0,01	0,03	0,3
	CP2	359,8	360	360,7	16	0,01	0,06	0,7
	CP3	349,6	349,8	350,2	16	0,01	0,04	0,4
C02 20%AE; 0%nS	CP1	341,7	342,2	342,6	16	0,03	0,06	0,4
	CP2	338,8	339,2	339,6	16	0,02	0,05	0,4
	CP3	337,8	338	338,3	16	0,01	0,03	0,3
C03 30%AE; 0%nS	CP1	324	324,3	324,4	16	0,02	0,02	0,1
	CP2	321,6	322,1	322,3	16	0,03	0,04	0,2
	CP3	317,5	317,7	317,9	16	0,01	0,02	0,2
C04 10%AE; 3%nS	CP1	420,5	420,8	421,1	16	0,02	0,04	0,3
	CP2	422,1	422,2	422,4	16	0,01	0,02	0,2
	CP3	420,2	420,4	420,6	16	0,01	0,03	0,2
C05 20%AE; 3%nS	CP1	400,6	402,4	402,5	16	0,11	0,12	0,1
	CP2	403,2	404,1	404,3	16	0,06	0,07	0,2
	CP3	402,6	403,8	404	16	0,07	0,09	0,2
C06 30%AE; 3%nS	CP1	363	370,6	371,1	16	0,48	0,51	0,5
	CP2	353,5	360,2	360,3	16	0,42	0,43	0,1
	CP3	362,7	368,7	368,8	16	0,38	0,38	0,1
C07 5%SM; 0%nS	CP1	399	410,4	417,6	16	0,71	1,16	7,2
	CP2	393,2	402,5	409,8	16	0,58	1,04	7,3
	CP3	397	406,9	414,9	16	0,62	1,12	8
C08 7,5%SM; 0%nS	CP1	354,6	384,9	394,5	16	1,89	2,49	9,6
	CP2	343,8	374,7	382,9	16	1,93	2,44	8,2
	CP3	360	387,8	396,7	16	1,74	2,29	8,9
C09 10%SM; 0%nS	CP1	330,9	369,8	380,8	16	2,43	3,12	11
	CP2	310,1	346,2	353,7	16	2,26	2,73	7,5
	CP3	301,7	336,9	343,8	16	2,20	2,63	6,9
C10 5%SM; 3%nS	CP1	426,7	433,1	434,7	16	0,40	0,50	1,6
	CP2	424,2	431,6	432,6	16	0,46	0,53	1
	CP3	445,1	451	452,1	16	0,37	0,44	1,1
C11 7,5%SM; 3%nS	CP1	390,1	407,4	413,2	16	1,08	1,44	5,8
	CP2	383,1	397,3	403,2	16	0,89	1,26	5,9
	CP3	376,1	391,6	398,5	16	0,97	1,40	6,9
C12 10%SM; 3%nS	CP1	346,1	388,8	402,8	16	2,67	3,54	14
	CP2	337	378,2	392,1	16	2,58	3,44	13,9
	CP3	351,5	391,2	405,5	16	2,48	3,38	14,3

## APÊNDICE H.5 – Absorção e coeficiente de capilaridade das argamassas leves (continuação)

Composição	Corpo de Prova	Massa seca (g)	Massa 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g)	Massa 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g)	Área da seção (cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 1 (t <sub>1</sub> =10 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção por capilaridade 2 (t <sub>2</sub> =90 min) (g/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
C13 1%EPS; 0%nS	CP1	361,6	361,7	363,7	16	0,01	0,04	0,5
	CP2	363,2	363,3	363,4	16	0,01	0,03	0,4
	CP3	356,3	356,5	356,9	16	0,01	0,04	0,4
C14 2,5%EPS; 0%nS	CP1	314,2	314,8	315,4	16	0,04	0,07	0,6
	CP2	308,9	309,1	309,9	16	0,01	0,06	0,8
	CP3	311,8	312	312,5	16	0,01	0,04	0,5
C15 5%EPS; 0%nS	CP1	236,5	236,6	236,8	16	0,01	0,02	0,2
	CP2	238,8	239,3	239,8	16	0,03	0,06	0,5
	CP3	240	240,6	241,2	16	0,04	0,07	0,6
C16 1%EPS; 3%nS	CP1	410	411	411,2	16	0,06	0,07	0,2
	CP2	409,8	409,9	410	16	0,01	0,01	0,1
	CP3	407,9	408	408,1	16	0,01	0,01	0,1
C17 2,5%EPS; 3%nS	CP1	337	337,9	338	16	0,06	0,06	0,1
	CP2	335,1	335,8	335,9	16	0,04	0,05	0,1
	CP3	335,7	336,3	336,5	16	0,04	0,05	0,2
C18 5%EPS; 3%nS	CP1	243,4	243,9	244	16	0,03	0,04	0,1
	CP2	242,4	243	243,2	16	0,04	0,05	0,2
	CP3	242,4	243,5	243,6	16	0,07	0,07	0,1

## APÊNDICE H.6 – Resistência à tração na flexão das argamassas leves

Composição	Resistência (MPa)									
	7 dias					28 dias				
	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão (DP)	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio Padrão (DP)
C01 10%AE; 0%nS	1,7	1,7	1,3	1,6	0,20	2,2	2,3	2,2	2,2	0,10
C02 20%AE; 0%nS	1,2	1,2	1,3	1,2	0,07	2,2	2,6	2,0	2,2	0,29
C03 30%AE; 0%nS	0,9	0,9	1,0	0,9	0,05	1,3	1,2	1,2	1,3	0,06
C04 10%AE; 3%nS	3,5	3,3	3,8	3,5	0,29	3,7	3,9	3,5	3,7	0,24
C05 20%AE; 3%nS	3,1	3,0	3,1	3,1	0,06	3,2	3,3	3,2	3,2	0,02
C06 30%AE; 3%nS	2,6	2,7	2,5	2,6	0,12	3,8	4,0	3,8	3,9	0,12
C07 5%SM; 0%nS	0,7	0,8	0,8	0,8	0,09	1,0	1,0	0,9	0,9	0,07
C08 7,5%SM; 0%nS	0,5	0,4	0,5	0,5	0,07	0,6	0,6	0,5	0,6	0,02
C09 10%SM; 0%nS	0,4	0,4	0,5	0,4	0,05	0,4	0,5	0,5	0,5	0,08
C10 5%SM; 3%nS	2,4	2,0	2,5	2,3	0,23	2,7	2,6	2,5	2,6	0,12
C11 7,5%SM; 3%nS	1,3	0,9	1,3	1,2	0,21	1,3	1,2	1,5	1,3	0,15
C12 10%SM; 3%nS	0,4	0,4	0,4	0,4	0,00	0,5	0,5	0,6	0,5	0,04
C13 1%EPS; 0%nS	1,4	1,7	1,6	1,6	0,18	2,0	1,8	2,0	1,9	0,10
C14 2,5%EPS; 0%nS	1,6	1,3	1,5	1,5	0,18	1,9	1,9	1,8	1,9	0,07
C15 5%EPS; 0%nS	1,3	1,1	1,1	1,2	0,09	1,3	1,2	1,3	1,3	0,06
C16 1%EPS; 3%nS	2,4	2,3	2,1	2,3	0,13	2,5	2,4	<b>1,8</b>	2,5	0,06
C17 2,5%EPS; 3%nS	2,6	2,3	2,4	2,4	0,15	2,7	2,4	2,4	2,5	0,15
C18 5%EPS; 3%nS	1,6	1,6	1,7	1,6	0,07	2,0	2,0	1,8	1,9	0,13

## APÊNDICE H.7 – Resistência à compressão axial das argamassas leves

Composição	Resistência (MPa)															
	7 DIAS						28 DIAS									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	DP	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12	Média	DP
C01 10%AE; 0%nS	4,6	4,2	5,1	4,3	<b>2,8</b>	<b>2,9</b>	4,5	0,4	7,6	7,6	8,1	8,1	7,9	7,3	7,8	0,3
C02 20%AE; 0%nS	3,1	2,4	2,7	2,8	2,9	3,3	2,9	0,3	<b>8,2</b>	6,7	<b>8,0</b>	6,9	7,7	6,7	7,0	0,5
C03 30%AE; 0%nS	2,5	2,5	2,0	2,0	2,2	1,7	2,2	0,3	3,4	3,1	3,0	3,0	3,2	2,6	3,1	0,3
C04 10%AE; 3%nS	12,8	13,3	14,4	13,2	13,4	14,2	13,4	0,5	16,4	16,5	<b>15,1</b>	16,3	17,2	16,2	16,5	0,4
C05 20%AE; 3%nS	10,9	10,9	10,6	11,1	10,0	9,6	10,7	0,4	14,5	13,9	14,3	13,6	14,0	14,0	14,1	0,3
C06 30%AE; 3%nS	9,6	9,7	10,5	<b>8,7</b>	9,5	10,5	10,0	0,5	16,7	<b>18,3</b>	15,6	15,5	15,8	<b>18,1</b>	15,9	0,5
C07 5%SM; 0%nS	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6	0,7	0,1	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	0,1
C08 7,5%SM; 0%nS	0,8	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,1	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,0
C09 10%SM; 0%nS	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,1
C10 5%SM; 3%nS	8,2	9,0	9,1	8,4	<b>6,8</b>	<b>7,7</b>	8,7	0,5	<b>10,6</b>	9,3	8,2	<b>7,8</b>	9,0	9,4	9,0	0,5
C11 7,5%SM; 3%nS	4,5	4,1	3,7	3,3	3,7	3,6	3,8	0,4	3,6	3,6	4,2	3,5	4,5	3,7	3,9	0,4
C12 10%SM; 3%nS	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	0,6	0,8	0,1	1,0	1,1	0,9	1,0	1,2	1,1	1,1	0,1
C13 1%EPS; 0%nS	3,1	4,1	4,2	4,2	3,9	4,3	4,0	0,4	5,8	5,4	4,6	5,7	<b>4,2</b>	<b>4,5</b>	5,4	0,5
C14 2,5%EPS; 0%nS	3,1	3,4	3,1	3,3	3,2	3,3	3,2	0,1	4,3	4,8	4,6	4,7	4,3	4,4	4,5	0,2
C15 5%EPS; 0%nS	2,2	2,2	1,8	1,9	2,2	2,2	2,1	0,2	2,5	2,3	2,0	2,4	2,3	2,4	2,3	0,2
C16 1%EPS; 3%nS	<b>10,9</b>	8,7	8,6	<b>10,2</b>	9,0	9,5	9,0	0,4	<b>8,0</b>	8,9	<b>10,3</b>	9,1	9,8	8,9	9,2	0,5
C17 2,5%EPS; 3%nS	<b>4,8</b>	<b>4,9</b>	6,6	6,3	6,0	6,3	6,3	0,3	7,3	7,9	7,8	7,7	7,6	8,0	7,7	0,2
C18 5%EPS; 3%nS	4,0	4,2	3,6	3,9	4,1	4,3	4,0	0,2	4,2	4,4	4,7	4,7	4,3	3,9	4,4	0,3

## APÊNDICE I – RESULTADOS DAS 5 COMPOSIÇÕES ESCOLHIDAS

### APÊNDICE I.1 – Estudo de consistência das 5 composições escolhidas

<b>Composição</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>D1 (mm)</b>	<b>D2 (mm)</b>	<b>D3 (mm)</b>	<b>Média (mm)</b>
C06 C2;3%nS	0,55	219	220	213	217
	0,60	244	243	244	244
	0,70	273	284	278	278
C05 20%AE;3%nS	0,60	222	227	225	225
	0,70	259	248	253	253
	0,75	262	269	264	265
C16 1%EPS;3%nS	0,55	197	208	208	204
	0,60	222	228	224	225
	0,68	257	264	260	260
C17 2,5%EPS; 3%nS	0,55	152	160	164	159
	0,60	203	199	206	203
	0,70	250	245	242	246
	0,80	265	271	276	271

## APÊNDICE J – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA

### APÊNDICE J.1 – Curva de absorção sonora dos 6 corpos de prova por composição

