



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Alessandra Zaleski

**Avaliação do efeito do uso de fosfesso e agente retentor de água no processo de
estabilização e durabilidade de argamassas estabilizadas**

Florianópolis

2021

Alessandra Zaleski

Avaliação do efeito do uso de fosfesso e agente retentor de água no processo de estabilização e durabilidade de argamassas estabilizadas

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.

Florianópolis

2021

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

ZALESKI, ALESSANDRA

Avaliação do efeito do uso de fosfogesso e agente retentor de água no processo de estabilização e durabilidade de argamassas estabilizadas / ALESSANDRA ZALESKI ; orientadora, Janaide Cavalcante Rocha, 2021. 153 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Argamassa estabilizada. 3. Fosfogesso. 4. Retentor de água. 5. Características reológicas. I. Rocha, Janaide Cavalcante. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Alessandra Zaleski

Avaliação do efeito do uso de fosfogesso e agente retentor de água no processo de estabilização e durabilidade de argamassas estabilizadas

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Gladis Camarini, Dra.

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS)

Prof. Adriano Michael Bernardin, Dr.

Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC)

Prof. Fernando Pelisser, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.

Coordenador do Programa

Profa. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.

Orientadora

Florianópolis, 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Sirlei e Nilto, por todo o apoio incondicional durante a minha jornada acadêmica e por sempre acreditarem no meu melhor.

Agradeço também à Professora Janaíde Cavalcante Rocha, por toda a orientação e suporte durante o período de mestrado e por ter contribuído com o meu crescimento.

Aos membros da banca, professores, Gladis Camarini, Adriano Michael Bernardin, Fernando Pelisser e Philippe Jean Paul Gleize, pelas contribuições com esta pesquisa e aos demais professores da UFSC, pelo conhecimento compartilhado.

Aos laboratórios ValoRes (Valorização de Resíduos e Materiais), LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) e NanoTec (Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil) pelo apoio técnico.

Às empresas Supremo cimento, Piramide Pré-moldados e MC Bauchemie pelos materiais doados para a realização da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Sendo assim, agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e à CAPES pelo apoio financeiro à pesquisa.

Por fim, agradeço aos meus colegas da pós-graduação e a todos que de alguma forma contribuíram e agregaram seu conhecimento com este trabalho.

RESUMO

A argamassa estabilizada requer um maior tempo em aberto no estado fresco, devido ao seu período de estabilização. Nesse período podem se observar pontos críticos como a ocorrência de coalescência e exsudação de água. Já na sua fase de aplicação, pode-se ter perda de água para o meio quando a argamassa estabilizada é curada em ambiente e perda de água para a base quando a mesma é aplicada em um substrato poroso, gerando uma hidratação incompleta do cimento que pode resultar em esfarelamento do revestimento e baixas resistências mecânicas. Tais efeitos podem levar ao surgimento de patologias nos revestimentos. Este trabalho corresponde a um estudo sobre o uso de um agente retentor de água à base de celulose em argamassas estabilizadas com fosfogesso (FG) e seus efeitos nesses sistemas. Inicialmente, realizou-se um estudo em pastas cimento:fosfogesso (1:1), onde o retentor de água (HPMC) foi testado em 0; 0,15 e 0,20% e o aditivo estabilizador de hidratação foi usado em 0 e 0,5%. O estudo permitiu identificar as características reológicas, a cinética de hidratação, tempos de pega e perda de fluidez das pastas. Após, realizou-se um estudo em argamassas estabilizadas de 48 e 72h, com dosagens de 0,85 e 1,2% de aditivo estabilizador de hidratação (AEH). O retentor de água foi estudado em teores de adição de 0,15 e 0,20%. Foram determinadas as propriedades tecnológicas no estado fresco e endurecido (desempenho mecânico e durabilidade) aos 42 dias. Além de um estudo específico das propriedades de trabalhabilidade de argamassas produzidas com FG versus filler de quartzo (FQ). Posteriormente, estudaram-se as propriedades de transporte (absorção de água por capilaridade com FG e FQ, isoterma de desorção e permeabilidade ao vapor de água) das argamassas estabilizadas de 72h aplicadas sobre o substrato poroso. Os resultados em pastas mostram que, quando se substitui o cimento por FG, ocorreu redução na fluidez da mistura (em 64,32%) e aumentou drasticamente o estresse de escoamento (de 1,8 para 614,0 Pa), devido a sua maior necessidade de água, mostrando-se poroso. Porém, quando combinado o uso do FG com os aditivos AEH e HPMC, pode-se obter uma maior fluidez, menor tensão de escoamento e menor viscosidade. Nas argamassas estabilizadas, o uso de HPMC cessou o fenômeno de exsudação de água e as adições de 0,15 e 0,20% proporcionaram as maiores resistências à compressão às argamassas de 48h ($\pm 5,28$ e $5,28$ MPa, respectivamente). Já o aumento do teor de AEH para 1,2% na estabilização de 72h ocasionou prejuízos no desempenho mecânico e nos resultados de módulo de elasticidade. Verificou-se que as argamassas aplicadas sem sucção do substrato poroso foram as que apresentaram os maiores valores de absorção capilar. Comparando as argamassas produzidas com FG e FQ, é perceptível que as argamassas com FG, indiferente da base, absorveram maior quantidade de água por capilaridade em 72h do que as argamassas com FQ. Por fim, conclui-se que o FG tem potencial de utilização para a produção de argamassas estabilizadas, pois o mesmo contribuiu para o retardo dos tempos de pega, efeito este, benéfico para a estabilização das argamassas. Ainda, quando se compara a resistência à compressão da argamassa com FG versus a argamassa com cimento se tem um aumento de 17,73% na resistência. A sua utilização dá uma nova destinação a esse material e evita a deterioração ambiental de grandes áreas onde esse produto é armazenado, e também, a exploração das reservas naturais de gesso.

Palavras-chave: Argamassa estabilizada. Exsudação de água. Resistências mecânicas. Retentor de água. Fosfogesso. Características reológicas.

ABSTRACT

Stabilized mortar requires longer open time in the fresh state, due to its stabilization period. During this period, critical points can be observed, such as the occurrence of coalescence and water exudation. In its application phase, there can be loss of water to the environment when the stabilized mortar is cured in the environment and loss of water to the base when it is applied to a porous substrate, generating incomplete hydration of the cement that can result in chipping of the coating and low mechanical strengths. Such effects can lead to the appearance of pathologies in the coatings. This work corresponds to a study on the use of a cellulose-based water retaining agent in mortars stabilized with phosphogypsum (FG) and its effects on systems. Initially, a study was carried out in pastes cement:phosphogypsum (1:1), where the water retainer (HPMC) was tested at 0; 0.15 and 0.20% and the hydration stabilizer additive was used at 0 and 0.5%. The common study identifies as rheological characteristics, the hydration kinetics, setting times and loss of fluidity of the doughs. Afterwards, a study was carried out in mortars stabilized for 48 and 72 hours, with dosages of 0.85 and 1.2% of hydration stabilizer additive (AEH). The water retainer was studied at addition levels of 0.15 and 0.20%. They were determined as technological properties in the fresh and hardened state (mechanical performance and durability) at 42 days. In addition to a specific study of the workability properties of mortars produced with FG versus quartz filler (FQ). Subsequently, the transport properties (water absorption by capillary action with FG and FQ, desorption isotherm and permeability to water vapor) of 72h stabilized mortars applied on the porous substrate were studied. The results in pastes show that when cement is replaced by FG, there was a reduction in the fluidity of the mixture (by 64.32%) and a drastically increased flow stress (from 1.8 to 614.0 Pa), due to its greater need for water, proving to be porous. However, when combined the use of FG with AEH and HPMC additives, it is possible to obtain greater fluidity, lower yield stress and lower viscosity. In the stabilized mortars, the use of HPMC stopped the phenomenon of water exudation and the additions of 0.15 and 0.20% provided the highest compressive strength to the 48h mortars (± 5.28 and 5.28 MPa, respectively). The increase in the AEH content to 1.2% in the 72h stabilization caused losses in mechanical performance and in the results of the modulus of elasticity. It was verified that the mortars applied without suction from the porous substrate were the ones that added the highest capillary absorption values. Comparing the mortars produced with FG and FQ, it is noticeable that the mortars with FG, regardless of the base, absorbed a greater amount of water by capillary action in 72 hours than the mortars with FQ. Finally, it is concluded that FG has potential for use in the production of stabilized mortars, as it contributed to the delay in setting times, an effect that is beneficial for the stabilization of the mortars. Also, when comparing the compressive strength of mortar with FG versus mortar with cement, there is an increase of 17.73% in strength. Its use gives a new destination to this material and avoids the environmental deterioration of large areas where this product is stored, and also an exploration of natural gypsum reserves.

Keywords: Stabilized mortar. Water exudation. Mechanical strength. Water retainer. Phosphogypsum. Rheological characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do calor da reação de hidratação do cimento Portland.....	27
Figura 2 – Efeito do aditivo estabilizador de hidratação no fluxo de calor por 72h.	30
Figura 3 – Fluxograma das etapas do estudo.....	57
Figura 4 – Calorímetro isotérmico.....	66
Figura 5 – Reômetro da Thermo Scientific utilizado no trabalho.	67
Figura 6 – Ensaio de resistências mecânicas: a) Módulo 1; b) Módulo 2.	74
Figura 7 – Módulo de elasticidade no equipamento Sonelastic.	75
Figura 8 – Método de moldagem para as argamassas-substrato.	77
Figura 9 – Recipiente com dois níveis: inferior: solução saturada; superior: amostra.....	79
Figura 10 – Análise granulométrica do fosfogesso.	87
Figura 11 – Distribuição granulométrica das areias e sua composição em 50% de cada.....	89
Figura 12 – Início e final de pega das pastas.....	91
Figura 13 – Efeito da adição do FG e dos aditivos na fluidez.....	93
Figura 14 – Efeito das composições ao longo do tempo: 24 e 48h.	94
Figura 15 – Flow relativo das pastas produzidas.....	95
Figura 16 – Perda de fluidez das pastas ao longo do tempo: 0, 24 e 48h.....	96
Figura 17 – Fluxo de calor por 360 horas.....	96
Figura 18 – Exemplificação das curvas de fluxo do ensaio de reologia analisadas a partir do ciclo ascendente e descendente.....	99
Figura 19 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 0h.....	101
Figura 20 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 24h.....	101
Figura 21 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 48h.....	102
Figura 22 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 0h.	103
Figura 23 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 24h.	104
Figura 24 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 48h.	104
Figura 25 – Influência do tempo de estabilização na viscosidade aparente das pastas.	106
Figura 26 – ANOVA: Efeito dos tempos de estabilização na viscosidade aparente das pastas.	107
Figura 27 – <i>Tukey</i> : viscosidade aparente das Pastas 3, 4 e 5.....	107

Figura 28 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 48h.	109
Figura 29 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 72h.	110
Figura 30 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 72h com fosfogesso e filler de quartzo.	111
Figura 31 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas de 48h de estabilização.....	112
Figura 32 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas de 72h de estabilização.....	113
Figura 33 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas com filler de quartzo de 72h de estabilização.	114
Figura 34 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 48h.	115
Figura 35 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 72h.	115
Figura 36 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 72h com fosfogesso e filler de quartzo.	117
Figura 37 – Água liberada por exsudação em argamassas de 48 e 72h.....	118
Figura 38 – Ensaio de exsudação de água nas argamassas de referência de 48h e 72h.	119
Figura 39 – Resistência à compressão aos 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.	120
Figura 40 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização na resistência à compressão.....	122
Figura 41 – <i>Tukey</i> : resistência à compressão das argamassas de 48 e 72h.	123
Figura 42 – Resistência à tração na flexão aos 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.	123
Figura 43 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização na resistência à tração na flexão.	124
Figura 44 – <i>Tukey</i> : Resistência à tração para as argamassas de 48 e 72h.	125

Figura 45 – Correlação entre a resistência à compressão e resistência à tração na flexão aos 42 dias.....	125
Figura 46 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.	126
Figura 47 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização no módulo de elasticidade dinâmico.	127
Figura 48 – Tukey: Módulo de elasticidade para as argamassas de 48 e 72h aos 28 e 42 dias.	128
Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão com módulo de elasticidade aos 42 dias.....	129
Figura 50 – Absorção capilar das argamassas estabilizadas por 72h com e sem sucção do substrato poroso aos 42 dias.	133
Figura 51 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e das bases com e sem sucção do substrato na absorção de água por capilaridade em 72h.....	134
Figura 52 – <i>Tukey</i> : Absorção de água para as argamassas de 72h com e sem sucção da base.	135
Figura 53 – Absorção capilar das argamassas estabilizadas por 72h com fosfogesso e filler de quartzo, com e sem sucção do substrato poroso, aos 42 dias.	136
Figura 54 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e das bases com e sem sucção do substrato na absorção de água por capilaridade em 72h do FG e FQ.....	137
Figura 55 – <i>Tukey</i> : absorção de água para as argamassas de 72h com FG e FQ, com e sem sucção da base.	138
Figura 56 – Isotermas de dessorção das argamassas estabilizadas a partir do ajuste dos pontos experimentais ao modelo de GAB.....	139
Figura 57 – Perda de massa ao longo do tempo.	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores que afetam as propriedades das argamassas.	44
Quadro 2 – Efeito do aditivo incorporador de ar nas propriedades das argamassas estabilizadas.....	45
Quadro 3 – Efeito do aditivo estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos com aditivos que inibem a hidratação do cimento Portland	29
Tabela 2 – Estudos de resistência à tração e à compressão em argamassas estabilizadas	36
Tabela 3 – Sínteses de estudos reológicos em pastas cimentícias.....	41
Tabela 4 – Sínteses de estudos com retentores de água	50
Tabela 5 – Variáveis controláveis e de respostas	58
Tabela 6 – Resumo do planejamento experimental.....	58
Tabela 7 – Aditivos utilizados	61
Tabela 8 – Caracterização: matérias-primas.....	62
Tabela 9 – Descrição das pastas	63
Tabela 10 – Composição das pastas	63
Tabela 11 – Pastas produzidas para o ensaio de tempo de pega.....	64
Tabela 12 – Composição das argamassas com FG.....	69
Tabela 13 – Composição das argamassas com FQ.....	70
Tabela 14 – Classes de absorção de água para blocos de concreto	75
Tabela 15 – Composição das argamassas com fosfogesso.....	76
Tabela 16 – Composição das argamassas com filler de quartzo	76
Tabela 17 – Resumo das características físicas do cimento e fosfogesso	86
Tabela 18 – Caracterização complementar do cimento CP II F-32.....	86
Tabela 19 – Composição química do cimento e do FG.....	88
Tabela 20 – Caracterização física das areias	88
Tabela 21 – Composição granulométrica das areias	89
Tabela 22 – Características químicas do AEH e AIA	90
Tabela 23 – Abertura das pastas ao longo do tempo	94
Tabela 24 – Índice de comportamento do fluido (n)	99
Tabela 25 – Parâmetros reológicos.....	100
Tabela 26 – Taxas de perda de índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas	109
Tabela 27 – Densidade de massa ao longo do tempo para as argamassas de 48 e 72h de estabilização.....	114

Tabela 28 – Densidade de massa ao longo do tempo para as argamassas com FQ em 72h de estabilização.....	116
Tabela 29 – Critérios de suscetibilidade à fissuração – CSTB (1993).....	129
Tabela 30 – Suscetibilidade à fissuração das argamassas aos 42 dias	129
Tabela 31 – Umidade natural e absorção de água dos blocos de concreto.....	130
Tabela 32 – Resultados médios da análise dimensional.....	131
Tabela 33 – Área líquida dos blocos de concreto	131
Tabela 34 – Absorção de água em 10 e 90 min e coeficiente de capilaridade das argamassas estabilizadas com e sem sucção do substrato	132
Tabela 35 – Conteúdo de umidade mássico em função da umidade relativa das argamassas estabilizadas por 72h	138
Tabela 36 – Valores ajustados pelo modelo de GAB e superfície específica (SGAB).....	139
Tabela 37 – Valores de raio do poro limite das argamassas estabilizadas	141
Tabela 38 – Permeabilidade ao vapor de água das argamassas estabilizadas de 72h	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a/c Relação de Água e Cimento
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AEH Aditivo Estabilizador de Hidratação
- AIA Aditivo Incorporador de Ar
- ASTM *American Society for Testing and Materials*
- C Compressão
- c Cimento
- CP II F-32 Cimento Portland Composto com Fíler
- CP's Corpos de Prova
- CSTB *Centre Scientifique et Technique du Batiment*
- D Diâmetro
- ECV Engenharia Civil
- EDX Espectroscopia de raios-x por Dispersão em Energia
- EN *European Norm*
- FQ Filler de Quartzo
- FTIR Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
- GAB Modelo desenvolvido por Guggenheim, Anderson e De Boer
- H Altura
- HEC Hidroxietil Celulose
- HEMC Hidroxietil Metil Celulose
- HPMC Hidroxipropil Metil Celulose
- ISO *International Organization for Standardization*
- NBR Norma Brasileira Regulamentadora
- NM *Asociación Mercosur de Normalización*
- PCE Superplastificante de Policarboxilato
- PVC Policloreto de Vinila
- RILEM *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*
- SAP Polímero Superabsorvente

SE Éteres de Amido

SG Gluconato de Sódio

T Tração

T° Temperatura

TOC Carbono Orgânico Total

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UR Umidade Relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

C_3S Silicato tricálcico

C_2S Silicato dicálcico

C_3A Aluminato tricálcico

C-S-H Silicato de cálcio hidratado

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Gipsita

C_4AF Ferro aluminato tetracálcico

CaO Carbonato de cálcio

SiO_2 Dióxido de silício

Al_2O_3 Óxido de alumínio

Fe_2O_3 Óxido de ferro

Na^+ Íon Sódio

K^+ Íon potássio

Mg^{2+} Íon magnésio

Na_2O Óxido de sódio

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo Geral.....	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	26
2.2	INCORPORAÇÃO DE AR EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	31
2.3	ARGAMASSA ESTABILIZADA	33
2.3.1	Reologia	38
2.3.2	Argamassa estabilizada sobre substratos porosos	42
2.4	RETENTORES DE ÁGUA.....	47
2.5	GESSOS SINTÉTICOS	51
2.5.1	Fosfogesso	51
2.6	PRESSUPOSTO DA PESQUISA	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	MATERIAIS.....	59
3.1.1	Cimento Portland.....	59
3.1.2	Sulfato de cálcio	59
3.1.3	Filler de quartzo.....	59
3.1.4	Agregado miúdo.....	60
3.1.5	Aditivos	60
3.2	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	61
3.2.1	Caracterização das matérias-primas	61

3.2.2	Etapa 1 – Análise do efeito do FG e HPMC no processo de hidratação e características reológicas das pastas	62
3.2.2.1	<i>Avaliação do tempo de pega.....</i>	64
3.2.2.2	<i>Análise da perda de fluidez ao longo do tempo.....</i>	65
3.2.2.3	<i>Cinética de hidratação</i>	65
3.2.2.4	<i>Estudo reológico.....</i>	66
3.2.3	Etapa 2 – Avaliação do HPMC e do tempo de estabilização no comportamento do estado fresco e endurecido das argamassas estabilizadas	68
3.2.3.1	<i>Índice de espalhamento</i>	71
3.2.3.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado.....</i>	71
3.2.3.3	<i>Exsudação de água</i>	72
3.2.3.4	<i>Resistências mecânicas: à compressão e à tração na flexão</i>	73
3.2.3.5	<i>Módulo de elasticidade.....</i>	74
3.2.4	Etapa 3 – Propriedades de transporte	75
3.2.4.1	<i>Absorção capilar</i>	77
3.2.4.2	<i>Isoterma de dessorção</i>	78
3.2.4.3	<i>Permeabilidade ao vapor de água.....</i>	82
3.3	MÉTODO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	86
4.1.1	Aglomerantes.....	86
4.1.2	Agregado.....	88
4.1.3	Aditivos químicos.....	89
4.2	ETAPA 1 – ANÁLISE DO EFEITO DO FG E HPMC NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO E CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DAS PASTAS.....	90
4.2.1	Avaliação do tempo de pega.....	90

4.2.2	Análise da perda de fluidez ao longo do tempo.....	92
4.2.3	Cinética de hidratação.....	96
4.2.4	Estudo reológico.....	98
4.3	ETAPA 2 – AVALIAÇÃO DO HPMC E DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS ESTABILIZADAS	108
4.3.1	Estado fresco	108
4.3.1.1	<i>Índice de espalhamento</i>	<i>108</i>
4.3.1.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado.....</i>	<i>114</i>
4.3.1.3	<i>Exsudação de água.....</i>	<i>117</i>
4.3.2	Estado endurecido	120
4.3.2.1	<i>Resistências mecânicas.....</i>	<i>120</i>
4.3.2.2	<i>Módulo de elasticidade dinâmico.....</i>	<i>126</i>
4.4	ETAPA 3 – PROPRIEDADES DE TRANSPORTE	130
4.4.1	Caracterização dos blocos de concreto	130
4.4.2	Absorção de água por capilaridade	131
4.4.3	Isoterma de dessorção	138
4.4.4	Permeabilidade ao vapor de água	141
5	CONCLUSÕES.....	143
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	145
	REFERÊNCIAS.....	146

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, buscam-se novas tecnologias na área da construção civil, a fim de se obter novos materiais com um maior controle tecnológico e melhoras nos processos construtivos. Atualmente, um material que vem sendo alvo de estudos e ganhando espaço no mercado é a argamassa estabilizada, a qual é uma argamassa dosada e produzida em centrais de mistura, fornecida em seu estado fresco e pronta para a aplicação em canteiros de obras. Tem um período de utilização superior à argamassa convencional e industrializada, podendo-se manter trabalhável por até 72 horas devido ao uso combinado de aditivos.

O êxito no processo de estabilização depende muito do controle dos parâmetros de dosagem, em especial, a quantidade de aditivo estabilizador de hidratação, que confere o tempo de estabilização desejável e, o teor de ar incorporado, que concebe a manutenção da trabalhabilidade das argamassas ao longo do tempo.

A estabilização dessas argamassas ocorre pela estabilização da hidratação do cimento Portland, que altera e prolonga o período de indução do material a partir do momento que se inicia o contato com a água, assim, retardando o início de pega. Os aditivos mais comuns destinados a essa ação de estabilização são os retardadores de pega e os estabilizadores de hidratação. Os quais são produzidos à base de substâncias orgânicas derivadas de carboidratos, como a sacarose, o gluconato e os ácidos carboxílicos.

Os estabilizadores de hidratação são capazes de atuar em todas as fases minerais do cimento, mais especificamente sobre os íons de cálcio, o que resulta em um atraso na hidratação inclusive do C_3A , retardando a formação de etringita e evitando a perda de trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. O uso desse aditivo permite o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa em consequência de uma maior formação de C-S-H na mistura (PAOLINI e KHURANA, 1998; HARTMANN *et al.*, 2011). A sua dosagem vai variar conforme sua natureza, concentração e efeito da base química.

Além do processo de estabilização, as argamassas estabilizadas requerem manutenção ao longo do seu tempo em aberto. O aditivo incorporador de ar tem função de melhorar a trabalhabilidade da mistura, aumentar a plasticidade e a estruturação do sistema, diminuir o consumo de água, e como resultado reduzir a retração por secagem e a retração plástica, que por suas vezes diminuem a tendência à fissuração (RESENDE, 2010).

Porém após a formação das bolhas de ar na matriz cimentícia da argamassa, se inicia uma etapa de instabilidade do sistema, pois a pressão interna das mesmas é inversamente proporcional ao seu diâmetro, ocorrendo uma diferença de pressão entre o interior e o exterior, tornando-as instáveis. Logo, as pequenas bolhas podem ser apontadas como as de maior instabilidade e como consequência mais susceptíveis ao colapso (ROMANO, 2013). Por muitas vezes gerando o processo de coalescência, o qual pode ser um fator prejudicial ao sistema de argamassa estabilizada, já que essa argamassa tem seu tempo em aberto prolongado.

Ainda no estado em aberto da argamassa estabilizada, pode ter-se a ocorrência de exsudação de água. Esse fenômeno foi evidenciado nos estudos de Guindani (2018) e Jantsch (2015), onde observaram a ocorrência de exsudação de água nas argamassas estabilizadas, devido à deficiência dos materiais sólidos constituintes em reterem a água de amassamento.

Após o período de estabilização e aplicação da argamassa estabilizada, ela passa pelo processo de cura e atinge o estado endurecido. Estudos anteriores apontam deficiências no desempenho das argamassas estabilizadas no estado endurecido. Guindani (2018) relatou problemas na argamassa estabilizada de 72 horas, onde ocorreu esfarelamento dos corpos de prova e resistências extremamente baixas, devido à perda de umidade dos corpos de prova após serem desmoldados e postos em cura ambiente com umidade relativa de 60+-5%, ocorrendo evaporação da água livre e perdendo parte da água necessária para a hidratação do cimento, a qual ainda não havia iniciado. Após o término da ação do aditivo, ao iniciar a reação de hidratação, a quantidade de água disponível para hidratar o cimento já era extremamente pequena, resultando em uma hidratação parcial e comprometendo o desempenho mecânico das argamassas.

Esse problema foi observado por outros autores, onde também encontraram deficiências na estabilização de 72 horas com resistências inferiores (CASALI *et al.*, 2011; BELLEI *et al.*, 2015; JANTSCH, 2015). Jantsch (2015) relatou a ocorrência de esfarelamento dos corpos de prova e observou-se que a argamassa de 72 horas se tornou mais porosa e absorveu uma maior quantidade de água do que aquela estabilizada para 36 horas. Devido a maior incorporação de ar nessa argamassa, provocada pelo aumento no percentual de aditivo incorporador de ar de 0,057%, sendo que na de 36 horas foi de 0,03%.

Alguns estudos têm abordado o efeito das argamassas estabilizadas após a sua aplicação em substratos porosos. Macioski *et al.* (2015) estudaram o comportamento da argamassa estabilizada sobre blocos de concreto. Aos 28 dias verificaram reduções nas resistências mecânicas e aumento do módulo de elasticidade dinâmico, atribuído à perda de água das argamassas para o substrato, por sucção. A faixa de valores de módulo com sucção da base variou de 8,8 GPa para o primeiro dia de armazenamento a 15,38 GPa para o segundo dia, onde o aumento do módulo representa uma argamassa mais rígida e, como consequência, uma maior suscetibilidade ao aparecimento de fissuras.

Arnez *et al.* (2017) analisaram a resistência de aderência à tração das argamassas estabilizadas aplicadas sobre o bloco cerâmico pré-saturado e em condição seca. Constataram reduções na resistência de aderência à tração para o bloco seco em 23,07% em comparação ao pré-saturado. O substrato por estar seco contribuiu com uma maior sucção da água presente no amassamento da argamassa, agravando a falta de água para a hidratação do cimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com base nos estudos anteriores, faz-se possível observar os pontos críticos relacionados à argamassa estabilizada: i) na fase de estabilização: ocorrência de coalescência; exsudação de água; ii) na fase de aplicação: perda de água para o meio quando a argamassa estabilizada é curada em ambiente; deficiências no processo de estabilização de 72 horas, a hidratação do cimento fica seriamente comprometida, podendo resultar em esfarelamento do revestimento, baixas resistências mecânicas e menor resistência de aderência; perda de água para o substrato poroso. Tais efeitos podem levar ao surgimento de patologias nos revestimentos.

Visando isto, as propriedades de alta retenção de água promovidas por materiais como cal, éteres de celulose e polímeros superabsorventes podem contribuir de maneira muito positiva. Os aditivos retentores de água à base de éteres celulose, mais especificamente o hidróxi propil metil celulose (HPMC) é capaz de melhorar a adesão das partículas e reter a água no interior da argamassa reduzindo os riscos de perda de água causada pela absorção do substrato ou pela evaporação de água para o meio circulante. Evitando que a água seja drenada rapidamente, ou seja, mais água é retida na argamassa fresca, melhorando a

hidratação do cimento, o que pode levar a melhores propriedades no estado endurecido, como uma maior resistência mecânica (PAIVA *et al.*, 2009).

Além da utilização de um material com alta capacidade de retenção de água, acredita-se que a utilização do aglomerante fosfogesso possa trazer benefícios na produção de argamassas estabilizadas. O fosfogesso é um resíduo químico oriundo dos processos industriais da produção do ácido fosfórico, composto por sulfato de cálcio, di-hidrato e de grande quantidade de impurezas como P_2O_5 , F^- e substâncias orgânicas.

Análises térmicas apontam que o fosfogesso calcinado em temperaturas de aproximadamente $160^\circ C$ apresentam propriedades físicas similares ao gesso utilizado na construção civil (SCHAEFER, 2013). Degirmenci (2008) analisou misturas de cimento com fosfogesso (0 a 50%) em estado natural sem beneficiamento e com tratamento térmico, calcinado à $150^\circ C$ por 2 horas. A incorporação de fosfogesso causou redução nas propriedades mecânicas aos 28 dias, ao contrário da adição de fosfogesso calcinado, que aumentou os valores de resistência à compressão e à tração, quanto maior o percentual de fosfogesso calcinado (50%) maior foi o desempenho mecânico. Encontrando-se em consonância com outros estudos de Yang *et al.* (2016) e Rosales *et al.* (2020), onde também obtiveram maiores resistências mecânicas com o uso de fosfogesso.

A produção do fosfogesso ocorre em grande escala, sendo para cada tonelada produzida de ácido fosfórico, 4,5 a 5 toneladas de fosfogesso. Com uma geração de fosfogesso no Brasil de aproximadamente 4,5 milhões de toneladas por ano. Devido a sua grande produção, o mesmo é amontoado a céu aberto, próximo às indústrias de fertilizantes, gerando contaminação ambiental (CANUT *et al.*, 2008; COTA *et al.*, 2012).

Deste modo, pesquisas que visem o uso de fosfogesso para o desenvolvimento de novos materiais na indústria da construção civil são de grande relevância do ponto de vista científico, técnico e econômico. Visto que, o fosfogesso é um aglomerante que pode beneficiar as misturas cimentícias, além de ser um resíduo de grande abundância e de baixo custo, a sua utilização evitaria a deterioração ambiental de grandes áreas onde esse produto é armazenado, e também, a exploração das reservas naturais de gesso.

Assim, o presente trabalho tem por finalidade buscar o entendimento das propriedades de estabilização de argamassas estabilizadas, tanto em seu estado fresco como endurecido. Ainda, de se verificar a contribuição potencial que o subproduto industrial,

fosfogesso, juntamente com um agente retentor de água à base de celulose (HPMC), tem no processo de estabilização, desempenho mecânico, durabilidade e propriedades de transporte das argamassas estabilizadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho visa avaliar a influência do fosfogesso e um agente retentor de água no processo de estabilização e de durabilidade das argamassas estabilizadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a influência do teor de aditivo retentor de água à base de celulose (0; 0,15 e 0,20%) na viscosidade aparente dos sistemas de cimento:fosfogesso (1:1).
- Avaliar a cinética de hidratação das pastas cimentícias com fosfogesso (1:1), contendo aditivo estabilizador de hidratação composto por gluconato de sódio e sacarose (0,5%) e, agente retentor de água em 0; 0,15 e 0,20%.
- Determinar o efeito das composições das argamassas estabilizadas de 48 e 72 horas, com 0,85 e 1,2% de aditivo estabilizador de hidratação, além da influência do aditivo retentor de água em 0,15 e 0,20%, no estado fresco, nas propriedades mecânicas e de durabilidade.
- Analisar o contato da argamassa estabilizada de 72 horas com o substrato poroso (bloco de concreto) por meio das propriedades físicas de transporte: absorção de água, isoterma de dessorção e permeabilidade ao vapor de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

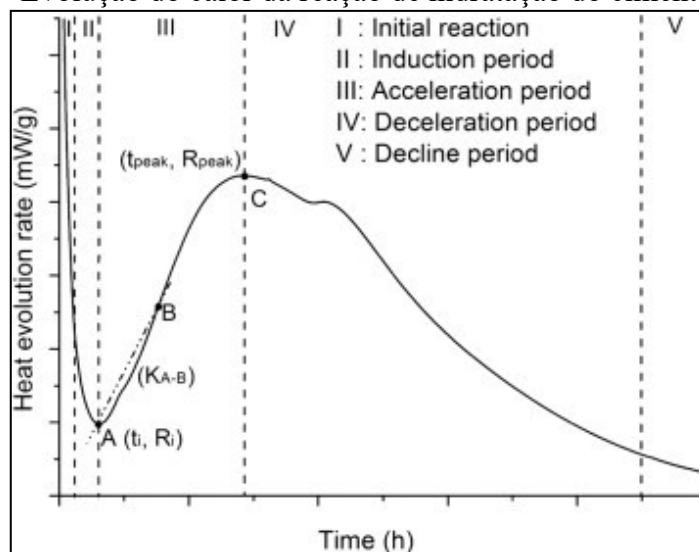
Segundo Souza (2007), a complexidade do processo de hidratação do cimento Portland, iniciado a partir do contato dos grãos anidros do cimento Portland com a água, é atribuída à heterogeneidade do material, que faz com que as reações químicas entre os minerais do clínquer, as muitas formas de sulfato de cálcio, álcalis, cal livre e a água se processem em taxas diferentes. Estes elementos exercem influência uns sobre os outros, formando hidratos, os quais provocam mudanças físico-mecânicas do sistema, como a pega e o endurecimento.

Os principais produtos da hidratação do cimento são o gel de C-S-H e o hidróxido de cálcio, os quais são provenientes dos silicatos com etringita e monossulfato, em menores quantidades e originados dos aluminatos. Logo, a taxa de hidratação dos principais compostos do cimento, nos primeiros dias é: C_3A (aluminato de cálcio) > C_3S (silicato de cálcio) > C_4AF (ferrita) > C_2S (silicato de cálcio). Estes compostos são formados a partir da calcinação do calcário e argila, fontes de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que são dosados e homogeneizados, resultando no clínquer. Ainda, o sulfato de cálcio é adicionado ao moinho em pequena quantidade, a fim de regularizar o tempo de início das reações do aglomerante com a água.

A presença do sulfato de cálcio permite a desaceleração da reação dos aluminatos com a água, evitando a pega rápida devido à formação da etringita ($C_6AS_3H_{32}$). Logo, ocorrendo o desequilíbrio entre a reatividade do C_3A e a taxa de dissolução do sulfato de cálcio, podendo-se formar pequenas quantidades de monossulfato (C_4ASH_{12}).

Juntamente com o desenvolvimento dos hidratos do cimento, acontece a evolução de calor da reação de hidratação do cimento em função do tempo, a qual pode ser observada na Figura 1. Após o primeiro contato do cimento com a água, observa-se uma alta liberação de calor (I), seguida de uma baixa e constante quantidade de calor liberada, correspondente ao período de dormência (II), posteriormente, ocorre a retomada da aceleração da hidratação, associada a uma forte evolução de calor (III), e assim, finalmente observa-se a desaceleração das reações de hidratação do cimento e, portanto o decréscimo da quantidade de calor liberada (IV e V) (KONG *et al.*, 2015).

Figura 1 – Evolução do calor da reação de hidratação do cimento Portland.



Fonte: Kong *et al.* (2015)

A estabilização da hidratação do cimento Portland pode ser correlacionada ao aumento do período de indução do material quando em contato com a água, assim, retardando o início de pega. Há substâncias químicas capazes de retardar as reações de hidratação, como: açúcares, lignossulfonatos, derivados de carboidratos ou sais ricos em fósforo. Estes compostos foram desenvolvidos para que pudessem ser utilizados como aditivos com finalidade específica de controlar as reações de hidratação do cimento, assim, prolongando o período de indução (RICKERT, 2002).

Os aditivos mais comuns destinados à ação de estabilização da hidratação do cimento são os retardadores de pega e os estabilizadores de hidratação. São produzidos à base de substâncias orgânicas derivadas de carboidratos, como a sacarose, gluconato e ácidos carboxílicos.

Os produtos chamados retardadores de pega do cimento, atuam principalmente sobre a hidratação do C_3S e C_2S , influenciando de maneira muito mais significativa a resistência inicial do que a manutenção do estado fresco, pois a perda de trabalhabilidade ocorre normalmente. Já os estabilizadores de hidratação são capazes de atuar em todas as fases minerais do cimento, mais especificamente sobre os íons de cálcio, o que resulta em um atraso na hidratação inclusive do C_3A , retardando a formação de etringita e evitando a perda de trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. O uso desse aditivo permite o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa em consequência do crescimento de

crystal de C-S-H. Um fator que pode ser negativo, é a utilização desses aditivos estabilizados de hidratação em altas dosagens, podendo ocorrer um atraso da pega por tempo indeterminado, havendo a inibição muito prolongada da hidratação do cimento, podendo-se fazer necessário para retomar o processo de hidratação a adição de um ativador, ou em outros casos, pode ocorrer a pega abrupta na hidratação do cimento. Já quando se faz menos uso desses aditivos, apenas é necessária a espera do término do efeito do estabilizador, permitindo a continuação da hidratação com o endurecimento e ganho de resistência do material (PAOLINI e KHURANA, 1998; HARTMANN *et al.*, 2011).

Esses aditivos atuam pela redução da solubilidade de compostos hidratados no cimento. Logo, podem reagir com um composto a fim de formar um precipitado na superfície das partículas, promovendo desta forma a formação de uma camada pouco permeável ao redor dos grãos e impedindo a evolução da hidratação durante algum período. Na presença de água, os íons cálcio tendem a se concentrar na solução de poro, e qualquer espécie química capaz de parar ou retardar essa dissolução também reduzirá a evolução da hidratação, retardando a pega. Os precipitados normalmente revestem os constituintes do cimento que se hidratam mais rapidamente tal como o C_3A , C_4AF e C_3S . Os principais mecanismos de atuação desses aditivos são de: bloqueador, onde o aditivo é fortemente adsorvido na superfície do cimento retardando a formação dos silicatos hidratados; quelação de íons de cálcio em solução, prevenindo a precipitação do hidróxido de cálcio (SCHAEFER, 2013).

Na Tabela 1 apresenta-se um levantamento dos aditivos estabilizadores e retardadores de hidratação utilizados em alguns estudos.

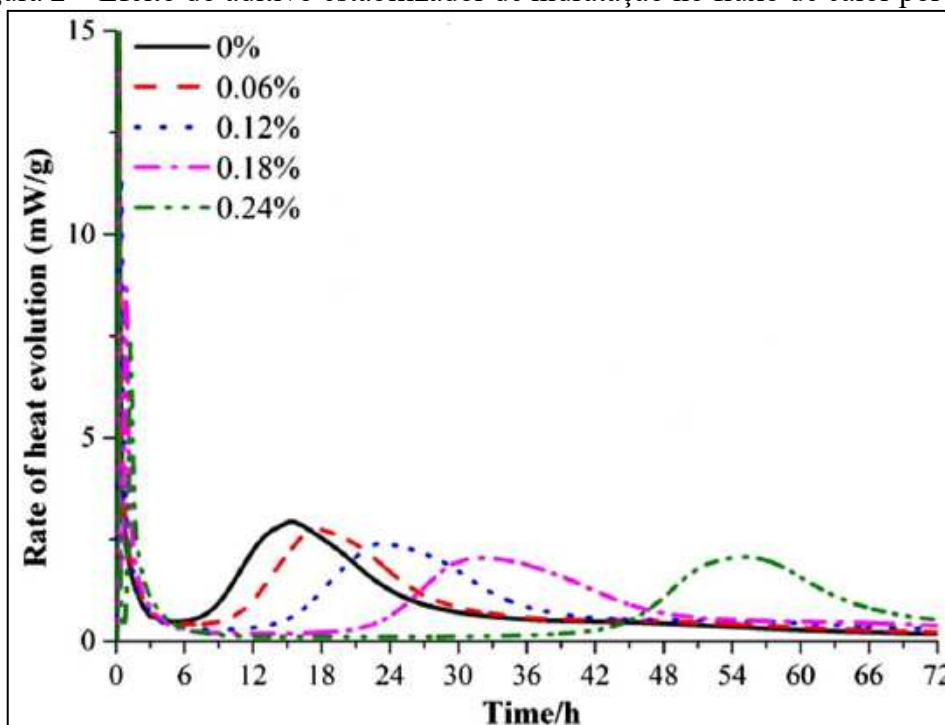
Tabela 1 – Estudos com aditivos que inibem a hidratação do cimento Portland

Autor	Estudo	Função do aditivo	Marca	Base química
SOUZA (2007)	Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento para produção de concreto	Estabilizador de hidratação	Recover	Sais, ácidos hidrocarboxilados e carboidratos
CAMPOS, MACIOSKI e CASALI (2013)	Tempo de pega em argamassas estabilizadas com aditivo estabilizador de hidratação	Plastificante e estabilizador	-	Açúcares e sais orgânicos
MA <i>et al.</i> (2015)	Influência do gluconato de sódio no desempenho e hidratação do cimento Portland	Estabilizador de hidratação	Sinopharm Chemical Reagent	Gluconato de sódio
TAN <i>et al.</i> (2017b)	Efeito da adsorção competitiva entre gluconato de sódio e superplastificante em pastas de cimento	Estabilizador de hidratação	-	Gluconato de Sódio
CASALI <i>et al.</i> (2018)	Influência do tipo de cimento e teor de água nas propriedades da argamassa estabilizada	Plastificante e estabilizador	-	Carboidratos
LOZOVEY (2018)	Método de dosagem de argamassa estabilizada para assentamento de blocos de concreto	Plastificante, retardador e estabilizador	Rheomix 702	Polissacarídeos
ZOU <i>et al.</i> (2020)	Influência dos retardadores na hidratação do cimento de sulfoaluminato de cálcio	Retardadores de pega	-	Ácido cítrico; Gluconato de sódio

Fonte: AUTORA (2020).

Na Figura 2, traz-se um estudo que permite notar o prolongamento do período de indução da hidratação do cimento conforme o aumento do uso de aditivo estabilizador de hidratação. Onde, apresentam-se curvas da evolução do calor de pastas de cimento com uma relação a/c de 0,30, com o incremento de teores de aditivo estabilizador de hidratação de base química de gluconato de sódio.

Figura 2 – Efeito do aditivo estabilizador de hidratação no fluxo de calor por 72h.



Fonte: Zhang *et al.* (2017)

Faz-se possível notar na Figura 2, que o tempo de estabilização foi crescente conforme se aumentou o teor de aditivo estabilizador de hidratação, ainda, dependendo da dosagem de aditivo, pode-se ter um período de estabilização de até 72 horas.

A dosagem do aditivo estabilizador de hidratação sobre a massa do cimento vai variar conforme sua natureza, concentração e efeito da base química. Ma *et al.* (2015) relatam que 0,03% de gluconato de sódio é capaz de promover a formação de etringita em idades precoces e que uma dosagem de 1% pode retardar a formação de etringita por até três dias, pois inibe significativamente a reação entre o C_3A e $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, o que aumenta a duração do período de indução.

Ainda, outras pesquisas trazem a utilização da sacarose, a qual é um dos retardadores mais potentes do cimento, 0,05% de sacarose adicionada na massa do cimento é eficiente para aumentar o período de indução por até 60 horas (PETERSON e JUENGER, 2006).

Campos, Macioski e Casali (2013), estudaram o tempo de início de pega de argamassas estabilizadas com aditivo estabilizador de hidratação (Tabela 1). Analisaram teores de aditivo de 0,1 a 0,9% e três métodos de ensaios para determinar o tempo de início de pega: semi-adiabático, ultrassônico e resistência à penetração. Obtiveram como resultados que

a adição de 0,9% de aditivo estabilizador de hidratação foi a que promoveu o maior tempo de estabilização das argamassas nos três métodos analisados, passando de 90 horas no ensaio de resistência à penetração.

2.2 INCORPORAÇÃO DE AR EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A incorporação de ar em concretos, argamassas e pastas de cimento é uma prática que oferece melhorias nas características de trabalhabilidade no estado fresco e diminuição da relação água/cimento.

Nas argamassas a presença de pequenas bolhas de ar reduz o atrito e o torque entre as partículas, favorecendo a deformação no estado fresco devido ao maior espaçamento provido pelas bolhas, que permitem o deslocamento das partículas sem que ocorra o contato entre elas, como uma espécie de lubrificante, facilitando o espalhamento e a aplicação do material, principalmente em sistemas de revestimentos (CARDOSO, 2009).

A incorporação de ar além de melhorar a trabalhabilidade, beneficia outras propriedades das argamassas, como o aumento da plasticidade e da estruturação do sistema, reduz a quantidade de finos, diminuindo o consumo de água, e como resultado reduzindo a retração por secagem e a retração plástica, que por suas vezes, diminuem a tendência à fissuração (RESENDE, 2010).

Os aditivos incorporadores de ar são formados por moléculas aonde em uma extremidade é hidrofóbica (apolar) e na outra extremidade é hidrofílica (polar) e, são conhecidos como compostos anfífilos. Esses compostos são tensoativos aniônicos e quando adicionados às pastas de cimento tendem a se adsorver nas partículas sólidas da pasta, por meio de sua parte polar e, a sua parte apolar fica voltada para a fase aquosa, assim dando um caráter hidrofóbico às partículas de cimento. Já as bolhas de ar que ficam presentes na mistura são formadas pelos tensoativos que não foram absorvidos e estão livres na fase aquosa (ROMANO, 2005).

Esses tensoativos agem diminuindo a tensão superficial da água, por causa da sua menor densidade. Assim, a bolha de ar tende a subir e ao chegar à superfície se estabiliza sem se romper. Os aditivos incorporadores de ar pertencem ao grupo dos difilos, possuindo uma

extremidade hidrófila (acrófbos) que atrai a água, e uma hidrófoba (acrófilos) que repele a água (BAUER, 2000).

A ação dos aditivos incorporadores de ar sobre as partículas de cimento ou de agregados muito finos, ocorre por meio de uma camada monomolecular com seu radical acrófobo ou camadas multimoleculares de ordem par. Essa colocação das moléculas proporciona a flotação ou agrupamento das partículas pela solubilidade dos restos apolares (BAUER, 2000).

Os incorporadores de ar são constituídos por produtos químicos que podem ser empregados como matérias-primas básicas para a produção do tipo aniônico: ácido abiético, sais de ácidos graxos (ácido oléico ou cáprico), alquil-arisulfonatos e alquilsulfonatos; do tipo catiônico: sais de alquil amônio e do tipo não-iônico: alquilfenóis etoxilados (COLLEPARDI (1980) *apud* ARAUJO (2005)).

O uso de aditivos incorporadores de ar também está consolidado no processo produtivo de argamassas estabilizadas. Essas argamassas requerem manutenção ao longo do seu tempo de estabilização, para que não percam a sua trabalhabilidade, a qual é uma característica das argamassas em que as mesmas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, sem perder a sua homogeneidade. A falta de trabalhabilidade da argamassa pode acarretar prejuízos no desempenho mecânico em seu estado endurecido (CARASEK, 2010).

Conforme Guindani (2018), estes aditivos geralmente são utilizados em dosagens muito pequenas, devido a sua alta capacidade espumante. Logo, teores de 0,05 a 0,5% são eficientes para atingir o volume de ar necessário para promover trabalhabilidade e leveza à argamassa estabilizada.

Após a formação das bolhas na matriz cimentícia da argamassa, se inicia uma etapa de instabilidade do sistema, pois a pressão interna das mesmas é inversamente proporcional ao seu diâmetro, ocorrendo uma diferença de pressão entre o interior e o exterior, tornando-as instáveis. Logo, as pequenas bolhas podem ser apontadas como as de maior instabilidade e como consequência mais susceptíveis ao colapso (ROMANO, 2013). O principal fator envolvido está associado à drenagem do material presente entre as bolhas, que acontece por meio do aumento das pressões capilares exercidas pela aproximação entre as superfícies, o qual resulta no rompimento da película e consequente fusão entre as bolhas (GUINDANI, 2018).

Essa fusão ocorre quando as bolhas menores se aglomeram em uma bolha maior, o que aumenta a sua força ascensional, podendo fazer com que esta se movimente até a superfície e seja perdida para o ambiente (ALVES, 2002). Esses processos de coalescência e colapso das bolhas, além de gerarem tensões internas no material no estado fresco, alteram as características reológicas da mistura, uma vez que permitem a aproximação e o atrito entre as partículas sólidas, reduzindo a trabalhabilidade. Ainda, com a redução da quantidade de bolhas e a aproximação das partículas sólidas, acontece o refinamento da porosidade capilar no estado fresco, que favorece o movimento ascensional da água, podendo resultar em exsudação (GUINDANI, 2018).

O processo de coalescência pode ser considerado um fator preponderante de desestabilização se aplicado ao sistema de argamassa estabilizada, visando que essa argamassa tem seu estado fresco prolongado por até três dias. Assim, a utilização de moléculas orgânicas, em especial ésteres de celulose, pode trazer benefícios para esse sistema, pois aumentam a retenção de água, a qual é extremamente importante para manter as propriedades reológicas até o momento da aplicação da argamassa estabilizada, e também aumentam a viscosidade do material, o que contribui para a estabilização das bolhas de ar incorporado, porque diminuem a tendência de movimentação da água e das partículas, reduzindo a coalescência. Deste modo, a utilização de ésteres de celulose em argamassas estabilizadas se mostra como uma solução pertinente e de grande importância para esta pesquisa, visando isso, será explanada no item 2.4.

2.3 ARGAMASSA ESTABILIZADA

As argamassas estabilizadas são argamassas dosadas e produzidas em centrais de mistura, fornecidas em estado fresco e prontas para a aplicação em canteiros de obras. Têm um período de utilização superior às argamassas convencionais e industrializadas, podendo-se manter trabalháveis por até 72 horas devido ao uso combinado de aditivos, já as demais argamassas devem ser usadas dentro do período de 2,5 horas após a mistura, em consequência do processo de hidratação do cimento (CASALI *et al.*, 2018).

A argamassa estabilizada requer um maior cuidado na sua produção, devido à sua maior sensibilidade a variações nas características dos seus materiais e no processo de

produção (BAUER *et al.*, 2015). A sua entrega no canteiro de obra ocorre em caixas ou em pequenos containers, onde a argamassa é armazenada até o período de uso. Faz-se importante nesta etapa que se tenham cuidados para evitar a evaporação da água da argamassa a fim de garantir que ela mantenha suas características de trabalhabilidade (GUINDANI, 2018).

O seu tempo de estabilização é determinado conforme a necessidade da obra, podendo variar de 36 até 72 horas, e também, entre períodos mais curtos, como 12 ou até 8 horas. O êxito no processo de estabilização depende muito do controle dos parâmetros de dosagem, em especial, a quantidade de aditivo retardador ou estabilizador de hidratação e o teor de ar incorporado, que concebem a manutenção da trabalhabilidade das argamassas ao longo do tempo (GUINDANI, 2018).

Schackow *et al.* (2019) produziram argamassas estabilizadas com o uso de aditivo retardador de hidratação e de incorporador de ar. As argamassas se mantiveram estabilizadas por 50 horas, já para a argamassa convencional ocorreu perda da trabalhabilidade rapidamente em 2 horas. A presença de incorporador de ar tornou as argamassas mais leves, com uma menor densidade, chegando a 1520,7 kg/m³ e com um maior teor de ar incorporado de 29%, mantendo a trabalhabilidade e plasticidade das misturas estabilizadas. Efeito esse do aditivo incorporador de ar, que também foi observado e, encontra-se em consonância nos estudos de Bellei *et al.* (2015). Bauer *et al.* (2015) relatam que o aditivo incorporador de ar possui uma importante função na plasticidade, pois o aumento de incorporação de ar nas misturas melhora a plasticidade das argamassas estabilizadas.

Machado (2018) obteve que o aditivo estabilizador de hidratação isolado reduziu as resistências mecânicas e aumentou o coeficiente de capilaridade, porém quando associado ao incorporador de ar reduziu o teor de água e contribuiu de forma positiva para as propriedades mecânicas e de absorção capilar das argamassas estabilizadas. O aditivo estabilizador de hidratação em um teor de 0,95% permitiu tempos de estabilização de até 32 horas.

Guindani (2018) estudou o comportamento de argamassas estabilizadas quanto à exsudação de água, onde obteve como resultado a liberação de água para a superfície com maior intensidade nas primeiras 10 horas, seguido por uma redução dos teores a partir de 24 horas. A redução da quantidade de água na superfície das argamassas sugeriu que essa água foi absorvida de volta pelo material.

O fenômeno de exsudação de água ocorre quando os materiais sólidos constituintes das argamassas têm deficiências em reter água de amassamento. Assim, aparecendo água na superfície da argamassa em seu estado fresco e quando ainda está em repouso. O controle da exsudação se faz necessário, visto que interfere na resistência final da argamassa.

Existem vários fatores que afetam este parâmetro, como materiais com consistência insatisfatória, carência de partículas finas e/ou granulometria deficiente, formato das partículas, os aditivos usados, a proporção entre os materiais da mistura e as propriedades do cimento como finura e teor de C₃A (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Para prevenir e combater o fenômeno de exsudação se faz o uso de adições minerais, ar incorporado e aditivos à base de éteres de celulose, ainda pode-se fazer o uso de agregado miúdo com partículas mais finas, diâmetro inferior a 150 µm e aumentar o consumo de cimento.

As argamassas devem ter capacidade de absorver água, porém uma absorção muito elevada pode levar a um baixo desempenho mecânico. Existem elementos que podem interferir na absorção, como as propriedades do próprio líquido, como densidade, viscosidade e tensão superficial. Outra são as características do substrato, como estrutura, diâmetro, volume e distribuição de poros da base, que influenciam na aderência e no transporte de água da argamassa (BAUER, 2005). Além disso, a água de amassamento também pode interferir na absorção de água, pois quando há um aumento na quantidade de água da mistura, tem-se um aumento na absorção de água por capilaridade. Ainda, os fenômenos de adsorção e dessorção em argamassas são dependentes da correlação água/cimento e aumentam com o acréscimo da quantidade de água (ISSADII *et al.*, 2015).

Bauer *et al.* (2015) analisaram 17 lotes de argamassas estabilizadas para revestimento, quanto ao desempenho mecânico. Obtiveram para a resistência à tração um intervalo de resultados variando de 1,23 a 3,63 MPa e para à compressão de 4,90 a 10,90 MPa. Elaboraram um perfil de desempenho seguindo a classificação de intervalos da NBR 13281 (2005), no qual os resultados obtidos na resistência à tração obedeceram as faixas de 2,0 a 3,5 MPa (R4); 2,7 a 4,5 MPa (R5) e > 3,5 MPa (R6), logo, para a compressão os níveis de desempenho foram 5,5 a 9,0 MPa (P5) e > 8,0 MPa (P6).

Nas argamassas estabilizadas podem ocorrer reduções no desempenho das resistências mecânicas conforme se aumenta o tempo de estabilização das mesmas. Bellei *et al.* (2015) analisaram as propriedades mecânicas no estado endurecido de argamassas

estabilizadas por 36 e 72 horas e, observam diminuições nas resistências à flexão e à compressão na estabilização até 72 horas. Obtiveram para flexão em 36h $\pm 3,7$ MPa e para 72h $\pm 1,3$ MPa, já para a compressão em 36h $\pm 8,8$ MPa e para 72h $\pm 1,9$ MPa. Fato esse, que atribuíram a maior quantidade de aditivo estabilizador de hidratação utilizado na produção da argamassa de 72h e ainda, a maneira e tempo de mistura, já que a cada nova volta do misturador mais ar era incorporado.

Na Tabela 2 encontram-se estudos com intervalos de valores de resistência à tração na flexão e à compressão, identificados nas pesquisas de argamassas estabilizadas. Todos seguiram a NBR 13279 (2005) e utilizaram corpos de prova prismáticos de 40x40x160mm. Os resultados são das argamassas moldadas no final do tempo de estabilização estabelecido em cada estudo.

Tabela 2 – Estudos de resistência à tração e à compressão em argamassas estabilizadas

Autor	Estudo	Aditivo /teor (%)	Nº de amostras	Procedimento de cura	Idade de cura (dias)	Propriedade	Tempo de estabilização	Faixa de Resistência (MPa)
CASA LI <i>et al.</i> (2011)	Argamassa estabilizada para revestimento	AEH	3	Cura seca ao ar	28	T	36h	2,70
		AIA					72h	1,85
CAMP OS <i>et al.</i> (2013)	Estudo do tempo de início de pega de argamassas estabilizadas	AEH: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9	3	-	28	T	Variação do AEH de 0,1 a 0,9	0,1: 1,91
								0,3: 2,41
								0,5: 2,97
								0,7: 2,98
								0,9: 2,97
								0,1: 3,54
								0,3: 6,05
			3			C		0,5: 6,36
								0,7: 8,62
								0,9: 7,32
BELLE I <i>et al.</i> (2015)	Argamassas estabilizadas de 36 e 72h	AEH	3	-	28	T	36h	3,7
		AIA	72h				1,3	
			3			C	36h	8,8
							72h	1,9
BAUE R <i>et al.</i> (2015)	Requisitos das argamassas estabilizadas	AEH	17 lotes	-	28	T	-	1,2 a 3,6
		AIA	17 lotes					4,9 a 10,9
JANTS CH (2015)	Argamassas estabilizadas por 36 e 72h	36h: AEH: 0,12	3	Desforma		T	36h	4,67
							72h	1,23

		AIA: 0,03		aos 7 dias e cura seca	28			
		72h: AEH: 0,19	6	ao ar (20°C e UR: 65%)		C	36h 72h	14,56 2,33
		AIA: 0,057						
TURR A (2016)	Argamassa estabilizada por 72h	AEH AIA	3	Desforma após 48±24h e	28	T	0h	0,87
			6	cura controlada		C	0h	8,10
	Argamassa estabilizada para revestimento	48h: AEH: 0,6	3	Cura T°: 23±1°C e	28	T	48h 72h	0,55 0,30
GUIND ANI (2018)		AIA: 0,3		UR: 60±5%				
		72h: AEH: 1,2	3			C	48h 72h	3,90 0,92
		AIA: 0,3						
MACH ADO (2018)	Argamassas estabilizadas para revestimento, dois lotes	AEH AIA	3	Desforma aos 7 dias	28	T	0h 24h	0,70 a 2,06 0,61 a 2,20
			3			C	0h 24h	1,41 a 8,33 1,12 a 6,65

AEH: Aditivo estabilizador de hidratação; AIA: Aditivo incorporador de ar; UR: Umidade relativa; T: Tração; C: Compressão.

Fonte: AUTORA (2020).

Pode-se observar na Tabela 2 que para a maioria dos estudos quando se há um aumento no período de estabilização ocorre redução do desempenho mecânico. Guindani (2018) relata um déficit na estabilização de 72 horas, onde ocorreu esfrelamento dos corpos de prova e resistências extremamente baixas nesse período. Fenômeno esse que foi atribuído devido à perda de umidade dos corpos de prova após serem desmoldados e postos em cura ambiente com umidade relativa de 60+-5%, ocorrendo evaporação da água livre e perdendo parte da água necessária para a hidratação do cimento, a qual ainda não havia iniciado.

Após o término da ação do aditivo, ao iniciar a reação de hidratação, a quantidade de água disponível para hidratar o cimento era extremamente pequena, resultando em uma hidratação parcial e comprometendo o desempenho mecânico. O efeito negativo do AEH pode estar associado ao prolongamento do efeito de envenenamento do cimento para além das 72 horas, fazendo-se necessário ressaltar que no traço de 72 horas foi utilizado o dobro de

aditivo estabilizador de hidratação, sendo 0,6% para 48 horas e 1,2% para 72 horas (GUINDANI, 2018).

O mesmo problema foi observado por outros autores, onde também encontraram deficiências na estabilização de 72 horas com resistências inferiores (Tabela 2) (CASALI *et al.*, 2011; BELLEI *et al.*, 2015; JANTSCH, 2015). Jantsch (2015) também obteve esfarelamento dos corpos de prova e observou que a argamassa de 72 horas se tornou mais porosa e absorveu maior quantidade de água do que a de 36 horas, devido a maior incorporação de ar nessa argamassa, onde o percentual de aditivo incorporador de ar foi de 0,057% e na de 36 horas de 0,03%.

Além disso, existem outros fatores que também podem afetar as resistências mecânicas, como o consumo de água e o teor de cimento utilizado. As resistências podem aumentar com a redução da proporção de agregado na argamassa, variar inversamente com a relação água/cimento e com o tipo de proporção entre cimento e cal, por sua vez, esses fatores influenciam diretamente na propriedade de módulo de elasticidade das argamassas.

2.3.1 Reologia

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando submetidos a uma tensão ou sollicitação mecânica externa. Considerada adequada a materiais complexos que não se delimitam numa categoria simples como gás, sólido ou líquido. Conhecida como a ciência da deformação e fluidez da matéria com relação direta entre tensão, deformação e tempo. Os aspectos reológicos permitem predizer a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo.

Por meio da reologia é possível descrever o comportamento de fluxo, espessamento, perda de trabalhabilidade, estabilidade e, até mesmo, a compactabilidade baseada na suspensão de partículas em pastas, argamassas e concretos.

A reação do cimento com a água e à secagem passa do estado fluido da argamassa para o estado sólido elástico, assim, neste período o comportamento reológico do material se transforma em consequência dos fenômenos envolvidos: dissolução, aglomeração, pH, precipitação de fases hidratadas ligantes e ação de aditivos, como dispersantes, retardadores de pega e incorporadores de ar. A argamassa deve apresentar um comportamento

pseudoplástico para favorecer o espalhamento, nivelamento e acabamento, mas com uma tensão de escoamento relevante ou com uma alta viscosidade, para manter-se estável após os estados que a mesma passa (CARDOSO, 2009).

Existem muitas variáveis que podem afetar as propriedades reológicas das argamassas, como a distância de afastamento entre as partículas mais finas e a espessura máxima de pasta entre os agregados. Além disso, a área superficial modifica a quantidade necessária de água para o amassamento da argamassa, visto que, composições com maiores áreas específicas são mais susceptíveis aos fenômenos de superfície que podem originar maior aglomeração das partículas ou refletir uma necessidade maior de aditivo. Outra variável que interfere no fluxo é a presença de bolhas de ar na matriz cimentícia, como consequência do uso de aditivo incorporador de ar, que aumenta a capacidade de deformação da argamassa, aproximando-se de um comportando plástico, onde as tensões necessárias para promover as deformações são bem pequenas, mesmo para deformações elevadas que o atrito seria predominante entre as partículas do agregado (ROMANO, 2013).

Logo, o estudo das propriedades reológicas se faz necessário para garantir a devida aplicação das argamassas – principalmente as argamassas estabilizadas que demandam de um maior tempo em aberto –, as quais são suspensões bifásicas compostas por uma fração grossa inerte (areia) (partículas entre 100 μm e 2 mm) e uma pasta reativa de água e finos, tal como, cimento e cal.

Esse estudo pode ser feito por meio das pastas cimentícias, onde as propriedades reológicas podem caracterizar a trabalhabilidade da pasta e a interação das partículas em suspensão. A fluidez da pasta de cimento pode ser melhorada diminuindo a sua viscosidade aparente, ainda, as características de tensão de escoamento e de viscosidade irão interferir na resistência à segregação das partículas de curso (OUYANG *et al.*, 2016).

Tan *et al.* (2017a) analisaram o efeito de um aditivo retardador de hidratação e superplastificante (bórax) na reologia da pasta de cimento de sulfoaluminato de cálcio. Observaram que conforme se aumentou a dosagem de aditivo (até 0,4%), tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica foram reduzidas, devido ao efeito retardado dos produtos de hidratação do aditivo. Esse atraso na hidratação pode aumentar a água livre na suspensão do cimento, contribuindo para o declínio da tensão e da viscosidade. Além disso, os

autores abordam que o uso do aditivo pode melhorar o desempenho da superfície das partículas de cimento, com um aumento no potencial zeta, plastificando as mesmas.

Esses resultados estão em consonância com outro estudo de Tan *et al.* (2017b), onde estudaram o efeito do gluconato de sódio na reologia da pasta de cimento. A tensão de escoamento foi reduzida com uma dosagem inferior a 0,1%, o mesmo ocorreu para a viscosidade plástica em dosagens de 0,03 a 0,15%, atribuindo esses resultados aos efeitos de retardamento da hidratação do cimento e plastificante do aditivo de gluconato de sódio.

Brumaud *et al.* (2014) analisaram a influência do aditivo retentor de água à base de éter de celulose na tensão de escoamento de pastas de cimento. A adição de éter de celulose modificou fortemente a tensão de escoamento e a deformação crítica onde o fluxo começou, os quais foram aumentados conforme se adicionou o aditivo, em comparação com a pasta de referência. O pico de tensão crítica necessário para iniciar o fluxo cresceu com o uso do aditivo, fator esse que foi atribuído aos polímeros adsorvidos que foram capazes de retardar a formação da rede rígida devido à nucleação e crescimento de C-S-H. Também, observou-se que o nível de rigidez do sistema foi reduzido para baixas deformações quando o aditivo foi adicionado na pasta, sugerindo que o éter de celulose tem um efeito de contribuição na nucleação de hidratos entre os grãos de cimento para o comportamento mecânico da suspensão fresca a baixas deformações.

Conte e Chaouche (2019) também estudaram os aspectos reológicos em pasta de cimento misturada com um agente retentor de água, ou seja, um espessante orgânico a base de éter de celulose. Notaram que ocorreu um aumento na tensão de escoamento com o éter de celulose entre 90 a 110 Pa, quando comparado com a pasta de referência, entre 80 e 90 Pa. Fato esse, que foi observado no estudo anterior de Brumaud *et al.* (2014), onde justificam que as macromoléculas do éter de celulose podem levar a uma ponte entre as partículas de cimento, aumentando a tensão de escoamento.

O procedimento de análise dos parâmetros reológicos se dá pelo ensaio de reometria, o qual é realizado em um reômetro controlado por torque. A geometria de placas/palhetas é a mais indicada para pastas com aditivos de características espessantes, os quais modificam a viscosidade como éteres de celulose e, foram utilizados nos estudos de Mansoutre *et al.* (1999), Brumaud *et al.* (2014) e Conte e Chaouche (2019). Já o cilíndrico móvel e um copo fixo é o mais adequado para o ensaio de pastas com baixa viscosidade, atribuindo maior

precisão para resultados de tensão de escoamento, utilizados nas pesquisas de Tan *et al.* (2017a), Tan *et al.* (2017b) e Azevedo (2019).

Na Tabela 3 expõem-se uma síntese de estudos reológicos em pastas cimentícias, com o uso de aditivos retardadores de hidratação e retentores de água, a fim de analisar a tensão de escoamento e a viscosidade aparente.

Tabela 3 – Sínteses de estudos reológicos em pastas cimentícias

Autor	Estudo	Aditivo	Teor (%)	Método	Parâmetro seguido	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade aparente (Pa.s)
TAN <i>et al.</i> (2017b)	Reologia em pasta com aditivo retardador de hidratação	SG e PCE	SG: 0,0-0,5 PCE: 0,1	Reômetro rotacional	Modelo de Bingham	0,5%SG: 12 0,1%PCE-0,5%SG: 75	0,5%SG: 0,31 0,1%PCE-0,5%SG: 1,5
TAN <i>et al.</i> (2017a)	Reologia em pasta com aditivo retardador de hidratação	Bórax e PCE	Bórax: 0,0-1,8 PCE: 0,08	Reômetro rotacional	Modelo de Bingham	1,8%Bórax: 42 0,08%PCE-1,8%Bórax: 130	1,8%Bórax: 0,25 0,08%PCE-1,8%Bórax: 2,2
CONTE e CHAOUCH E (2019)	Reologia em pasta com aditivo retentor de água	Éter de celulose: HPMC	0,1	Reômetro placa/palheta	Superposição paralela	90 a 110	-

SG: Gluconato de sódio; PCE: superplastificante de poliacarboxilato; HPMC: Hidroxipropil metil celulose.
Fonte: AUTORA (2020).

Observa-se na Tabela 3 que nos estudos com aditivos retardadores de hidratação, quando os mesmos têm sua ação combinada com o superplastificante (PCE), tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade aparente aumentam. Tan *et al.* (2017a; 2017b), explicam que esse efeito ocorre pela adsorção competitiva entre os retardadores e o superplastificante, resultando em um declínio na quantidade de adsorção e com efeito negativo na dispersão do sistema, diminuindo a fluidez e aumentando as propriedades reológicas. Essa ação é

dependente da quantidade de retardador de hidratação, pois se utilizado em pequena quantidade pode aumentar a dispersão, principalmente porque predomina o seu efeito retardador e plastificante, enquanto uma grande quantidade reduz a dispersão, porque o efeito de adsorção competitiva se torna predominante.

2.3.2 Argamassa estabilizada sobre substratos porosos

Os substratos são utilizados como alvenaria estrutural e/ou de vedação, destacando-se os substratos de concreto e cerâmico, onde na maioria das vezes são aplicadas as argamassas de revestimento. O tipo de substrato interfere na formação da estrutura porosa das argamassas, em regiões diferentes do revestimento, como interface argamassa/substrato e interna ao revestimento. Sendo que na região de interface, os poros tendem a ter menores diâmetros, devido à sucção da base (substrato) que é intensa neste local.

A perda de água por sucção da base nos primeiros minutos pode representar 50 a 60% da perda total de água, dependendo da combinação entre o substrato e argamassa. O substrato é considerado o maior responsável pelo transporte de água nos momentos de pós-aplicação da argamassa (SILVA, 2011).

No estudo de Paes, Bauer e Carasek (2003), relatam que as características de absorção de água dos blocos cerâmicos e de concreto são distintas. O bloco de concreto apresentou uma taxa inicial de sucção maior que a do bloco cerâmico, porém ao longo do tempo (até 2h) o bloco cerâmico absorveu uma maior quantidade de água, o que demonstra a importância do estudo da estrutura porosa dos materiais componentes do revestimento. Ainda, observaram que a camada de argamassa em contato com o bloco foi a que perdeu maior quantidade de água.

Não obstante, a argamassa estabilizada também perde água para o substrato poroso. Macioski *et al.* (2015) estudaram o comportamento da argamassa estabilizada sobre blocos de concreto. A argamassa foi moldada sobre o bloco com papel filtro umedecido, com molde sem o fundo e adensada na mesa vibratória. Desformaram os CP's após 7 dias e foram curados em ambiente de laboratório. Aos 28 dias foram submetidos a ensaios mecânicos, onde ocorreram reduções nas resistências mecânicas para as argamassas moldadas sobre o substrato poroso: resistência à compressão média e aproximada sem sucção da base de 6,18 MPa e com

sucção 5,51 MPa; resistência à tração média e aproximada sem sucção da base de 2,51 MPa e com sucção 2,18 MPa.

Com a redução das resistências ocorreu um aumento no módulo de elasticidade dinâmico, atribuído à perda de água das argamassas para o substrato por sucção. A faixa de valores de módulo variou de 8,8 GPa para o primeiro dia de armazenamento a 15,38 GPa para o segundo dia. O aumento do módulo representa uma argamassa mais rígida e como consequência, uma maior suscetibilidade ao aparecimento de fissuras.

Arnez *et al.* (2017) analisaram a resistência de aderência à tração da argamassa estabilizada sobre o bloco cerâmico em duas condições: pré-saturado e seco. Constataram redução na resistência de aderência à tração com o bloco seco em 23,07%, quando comparado ao pré-saturado, o que pode estar ligado à falta de água na hidratação do cimento Portland. O substrato por estar seco contribuiu com uma maior sucção da água presente no amassamento da argamassa, agravando a falta de água para a hidratação do cimento.

Dallagnol (2018) observou a tendência à fissuração de argamassas estabilizadas aplicadas no substrato cerâmico. Assentou blocos cerâmicos com argamassa, realizou um tratamento da base do bloco com uma camada de chapisco e após aplicou a argamassa estabilizada. O autor realizou o acompanhamento da cura por 28 dias e observou que não houve incidências de fissuras.

Por meio dos estudos, fica evidente a necessidade de avaliar o contato da argamassa-substrato poroso, já que a argamassa estabilizada é aplicada sobre o substrato e rapidamente perde água por sucção do substrato poroso, implicando nas propriedades das argamassas, como diminuição da resistência à compressão, à tração, de aderência, aumento do módulo de elasticidade e suscetibilidade ao aparecimento de fissuras.

No quadro 1, apresenta-se uma síntese geral dos fatores que podem afetar as principais propriedades das argamassas estabilizadas, tendo em vista a necessidade de ter conhecimento sobre os mesmos, para que possam ser controlados, a fim de não prejudicarem o processo.

Quadro 1 – Fatores que afetam as propriedades das argamassas.

Propriedades	Fatores
Consistência	Tipo e a proporção de materiais, parâmetros utilizados na mistura e o teor de água.
Plasticidade	Natureza e quantidades de aglomerantes e agregados, tempo de mistura, presença de aditivos e teor de ar incorporado.
Trabalhabilidade	Área superficial das partículas, volume aparente, conteúdo de vazios, quantidade de finos e a forma e textura das partículas. Aglomerantes utilizados, proporção entre os ligantes e o empacotamento das partículas.
Exsudação de água	Materiais com consistência insatisfatória, carência de partículas finas e/ou granulometria deficiente, formato das partículas, aditivos usados, proporção entre os materiais da mistura, propriedades do cimento como finura e teor de C_3A .
Retenção de água	Perda de água de amassamento precocemente seja por evaporação ou pela absorção de água da base, ocorrência de fissuras no sistema.
Reologia	Distância de afastamento entre as partículas mais finas, espessura máxima de pasta entre os agregados, maior área superficial e a presença de bolhas de ar na matriz cimentícia.
Fissuras	Movimentações térmicas e higroscópicas, retração hidráulica da argamassa, consumo de cimento, teor e natureza dos aglomerantes e finos, quantidade de água de amassamento, traço da argamassa, resistência de aderência à base, espessura das camadas, intervalo de tempo de aplicação entre as camadas e perda de água de amassamento por sucção da base ou pela ação de agentes atmosféricos.
Absorção capilar	Propriedades do próprio líquido: densidade, viscosidade e tensão superficial. Características do substrato: estrutura, diâmetro, volume, distribuição de poros da base (influenciam na aderência e no transporte de água da argamassa) e relação a/c.
Resistências mecânicas	Consumo de água da mistura, teor de cimento e proporção de agregados.
Módulo de elasticidade	Quantidade de cimento e a aglomeração das partículas dos agregados usados na matriz, em virtude da forma e da rugosidade que os grãos apresentam.

Fonte: Autora (2020).

Além dos fatores relacionados aos materiais constituintes das misturas, relação a/c, e substrato (quadro 1), os principais aditivos utilizados na produção das argamassas estabilizadas também causam efeitos sobre essas propriedades. Nos quadros 2 e 3, têm-se os efeitos do aditivo incorporador de ar e do aditivo estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas, com base em estudos.

Quadro 2 – Efeito do aditivo incorporador de ar nas propriedades das argamassas estabilizadas.

Propriedades	Efeito AIA	Teor	Autores
Plasticidade e trabalhabilidade	Obtiveram argamassas mais leves e com menores densidades, as bolhas de ar do aditivo afastaram os agregados, diminuindo o atrito e o torque, ocasionando maior fluidez. A plasticidade foi melhorada e a trabalhabilidade foi mantida pelo tempo de estabilização desejável.	0,5% - -	SCHACKO <i>W et al.</i> (2019) BELLEI <i>et al.</i> (2015) BAUER <i>et al.</i> (2015)
Reologia	O aumento do volume de ar incorporado, provocado pelo aumento do teor de aditivo resultou na diminuição da viscosidade e da tensão de escoamento das pastas, foi obtida uma correlação entre as pastas e a fase aquosa, onde se mostrou significativa para a tensão de escoamento, ilustrando que as alterações na tensão de escoamento estão diretamente relacionadas com as características das bolhas de ar na fase aquosa.	0,2 a 3,0 g/L	ROMANO (2013)
Absorção capilar	O AIA promoveu uma redução no coeficiente de capilaridade, devido ao fato do aditivo reduzir a necessidade de água na mistura e por formar bolhas que interrompem o transporte de água capilar. Em outro estudo, o incremento de AIA em argamassas de 72h, ocasionou valores de absorção superiores aos de 36h, devido a maior presença de bolhas de ar a qual tornou a argamassa mais porosa.	- 0,2% 36h: 0,03% 72h: 0,057%	SALOMÃO (2016) OLIVEIRA (2017) JANTSCH (2015)
Resistências mecânicas	Não ocorreram prejuízos nas propriedades mecânicas, por conta da utilização do AIA, uma vez que o emprego do aditivo promoveu as reduções do teor de água. Mas pode haver diminuição das resistências mecânicas com a inserção de microbolhas de ar na matriz cimentícia, caso não haja uma redução de água.	0,2%	OLIVEIRA (2017)

Fonte: Autora (2020).

Quadro 3 – Efeito do aditivo estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas.

Propriedades	Efeito AEH	Teor (%)	Autores
Plasticidade e trabalhabilidade	Dependendo do teor utilizado, promovem um tempo em aberto superior de uso das argamassas, porém evidenciou-se que o uso de AEH isolado incidiu em perda na consistência.	0,95%	OLIVEIRA (2017)
Reologia	O AEH (gluconato de sódio e sacarose) provocou uma redução lenta na fluidez e o aumento na viscosidade aparente ao longo do tempo, indicando que as reações de hidratação estavam ocorrendo lentamente nas pastas e ocasionando um travamento	0,5%	GUINDANI (2018)

	interno entre as partículas.		
	Em outro estudo com AEH (boráx), tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica foram reduzidas, devido ao efeito retardado dos produtos de hidratação do aditivo. Esse atraso na hidratação pode aumentar a água livre na suspensão do cimento, contribuindo para o declínio da tensão e da viscosidade.	0,4%	TAN <i>et al.</i> (2017b)
Fissuras	Com o incremento de AEH em 0,95%, as argamassas estabilizadas foram classificadas em baixa suscetibilidade à fissuração, porém levaram um tempo maior para desforma o que pode ter influenciado.	0,95%	OLIVEIRA, BAUER e SANTOS (2017)
Absorção capilar	O AEH isolado aumentou a absorção capilar conforme seu incremento na produção das argamassas.	0,4 a 0,95%	OLIVEIRA (2017)
Resistências mecânicas	Conforme aumento na dosagem do AEH a resistência à compressão diminuiu, devido à elevada dosagem do AEH, ocorrendo o efeito de envenenamento do cimento, pois enquanto a argamassa perdeu água para o ambiente o cimento ainda não havia iniciado a reação de hidratação, comprometendo o desempenho mecânico.	- - 0,95% 1,2%	CASALI <i>et al.</i> (2011) BELLEI <i>et al.</i> (2015) OLIVEIRA (2017) GUINDANI (2018)

Fonte: Autora (2020).

Por meio dos estudos levantados ao decorrer dessa revisão bibliográfica é possível listar os pontos críticos em relação à argamassa estabilizada:

- ocorrência de coalescência: desestabilização das bolhas de ar com movimentação da água e das partículas;
- exsudação de água: materiais constituintes são incapazes de reterem água;
- perda de água para o meio: argamassa estabilizada em cura ambiente perde água para o meio;
- perda de água para o substrato: a argamassa estabilizada é aplicada sobre o substrato e rapidamente perde água por sucção do substrato poroso;
- estabilização de 72h: nesse período a hidratação do cimento fica seriamente comprometida, devido a maior adição de AEH, podendo resultar em esfarelamento do revestimento, baixas resistências mecânicas e menor resistência de aderência, o que pode levar ao surgimento de patologias nos revestimentos;

- hidratação incompleta do cimento Portland: a perda de água da argamassa estabilizada para o ambiente ocorre enquanto o cimento ainda não iniciou a reação de hidratação o que compromete o desempenho mecânico.

Nestes casos, as propriedades de alta retenção de água promovidas por materiais como cal, éteres de celulose e polímeros superabsorventes podem contribuir de maneira muito positiva.

2.4 RETENTORES DE ÁGUA

A retenção de água é uma propriedade que está associada à habilidade da argamassa fresca em preservar a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que causam perda de água de amassamento, seja por evaporação para o meio ou pela absorção de água da base. Assim possibilitando que as reações de endurecimento da argamassa aconteçam de forma gradativa, promovendo a adequada hidratação do cimento e um consequente ganho de resistência (CARASEK, 2010). Segundo a ASTM C270-14 (2019), o valor mínimo para retenção de água em argamassas deve ser de 75%.

Bauer *et al.* (2015), produziram argamassas estabilizadas aonde o valor médio encontrado para a retenção de água foi de 77,44%, – os autores abordam que este parâmetro é importante para que se tenha água suficiente no interior das argamassas para a ocorrência das reações de hidratação e também para que a remoção de água precocemente não cause fissuração – mostrando que absorção proporcionada pelo substrato não prejudicou as funções da argamassa, pois retenção de água muito baixa pode ser associada à fissuração.

Atualmente existem agentes retentores de água que são capazes de reter a água no interior da argamassa durante o processo de desidratação causada pela absorção do substrato ou pela evaporação de água para o ambiente. Também podem contribuir para a redução da segregação da pasta-agregados, melhorar a homogeneidade da mistura, a trabalhabilidade e as propriedades no estado endurecido.

Segundo Paiva *et al.* (2009), os retentores de água mais utilizados são à base de éteres de celulose, que também têm a função de espessantes, ou seja, modificadores de viscosidade e aglutinantes. A celulose é um polissacarídeo em forma de homopolímero linear e insolúvel em água devido as suas fortes interações moleculares por meio de hidrogênio.

Porém, através da substituição de uma fração dos grupos de hidroxila por hidroalquila, permite-se transformar a celulose insolúvel em um polímero solúvel em água. Os éteres de celulose mais utilizados como aditivos são o hidroxipropil e o hidroxietil metil celulose (HPMC e HEMC). O uso desses aditivos pode ser benéfico para melhorar a coesão das argamassas, pois evitam que a água seja drenada rapidamente, ou seja, mais água é retida na argamassa fresca, melhorando a hidratação do cimento, o que pode levar a melhores propriedades no estado endurecido, como uma maior resistência mecânica. Esses retentores de água à base de éteres de celulose são introduzidos em quantidades muito pequenas, sendo menores de 0,5% na massa total da formulação (argamassa seca) (BALAYSSAC *et al.*, 2011).

Ainda, têm-se estudos que abordam que o uso destes aditivos retentores de água pode contribuir para o retardo da hidratação do cimento, sendo um efeito secundário e não controlado que pode ser induzido por algumas adições de polissacarídeos. Pourchez *et al.* (2006) analisaram a influência dos aditivos de hidroxipropil e o hidroxietil metil celulose na hidratação do cimento. Como resultados, observaram que o conteúdo de metoxila foi o principal parâmetro referente ao atraso na precipitação da Portlandita induzido pelo uso dos aditivos. Logo, os autores relatam que o uso desses aditivos com um conteúdo conhecido de metoxila pode permitir controlar o atraso da hidratação do cimento e conseqüentemente, o tempo de endurecimento das argamassas.

Não obstante, outro retentor de água que vem sendo estudado são os polímeros superabsorventes, os quais são um grupo de materiais poliméricos que têm a capacidade de absorver uma quantidade significativa de líquido do ambiente e reter o líquido dentro de sua estrutura sem se dissolver. Em argamassas e concretos, por sua vez, pode promover a cura interna e mitigar os fenômenos de auto-dessecação. Durante a mistura, o polímero superabsorvente absorve a água mantendo-a no interior, já no processo de cura, o superabsorvente inchado libera gradualmente a água interna para a matriz de argamassa (JENSEN e HANSEN, 2001).

Paiva *et al.* (2009) estudaram os efeitos de dois tipos de agentes retentores de água em argamassas de revestimento: hidroxipropil metil celulose (HPMC) e polímero superabsorvente (SAP) (copolímero reticulado de acrilamina/ácido acílico com tamanho de partícula abaixo de 0,25 mm), ambos adicionados em pó e em teores de 0,05 a 0,15%. Avaliaram a capacidade de retenção de água das misturas pela EN 1015-8 (1999). Em

resposta, obtiveram que o HPMC melhorou a fluidez devido a maior incorporação de ar na operação da mistura e promoveu uma maior coesão entre as partículas do material no seu estado fresco.

No processo de secagem o HPMC foi o mais eficiente em reter a água dentro das argamassas (99,7%), porém, a incorporação de ar ocasionou uma redução na resistência à flexão e à compressão. Já o SAP ocasionou um maior estresse de escoamento, levando a um material com menor fluidez, sendo necessário o uso de um plastificante para obter a mesma trabalhabilidade. Embora o SAP não tenha sido tão eficiente na retenção de água (96,5%) como o HPMC, o SAP foi mais eficaz em promover a retenção adequada de água sob condições severas de secagem (temperatura externa de 40 °C e sujeita à ventilação), sem diminuir significativamente as resistências. Ainda, percebeu-se que a utilização desses aditivos (HPMC e SAP) em um menor percentual (0,028%), diminuiriam os valores de coeficiente capilar, podendo estar ligado ao fato de que os pequenos poros introduzidos pelos agentes retentores de água (SAP e HPMC) podem reduzir a rede capilar.

Cappellari, Daubresse e Chaouche (2013) abordaram em seus estudos o uso de três aditivos espessantes orgânicos para avaliar a retenção de água em argamassas. Os éteres utilizados foram o de celulose (hidroxietil metil celulose), goma de guar (hidroxipropílico) e amido (Solvitose H2060). As misturas com os aditivos à base de éter de celulose e éter de goma de guar aumentaram significativamente a consistência das argamassas e levaram a uma diminuição da tensão de escoamento. Por meio dos testes de reologia, percebeu-se que as misturas com esses éteres diminuiriam o gel formado pelas partículas minerais das argamassas, demonstrando alta capacidade de retenção de água.

Já o éter de amido exibiu um maior impacto na tensão de escoamento e uma baixa capacidade de retenção de água, pois os níveis de retenção de água foram significativamente inferiores aos obtidos com os outros éteres. Na prática o éter de amido não é utilizado isoladamente como agente de retenção de água, mas sim, em associação com um éter de celulose, a fim de melhorar as propriedades reológicas. Patural *et al.* (2011) explicam que esse éter se mostra mais eficaz para fins de se obter uma melhorara na consistência e um aumento na trabalhabilidade do material no seu estado fresco, do que nas propriedades de retenção de água das argamassas.

Na Tabela 4 apresenta-se uma síntese de estudos que utilizaram aditivos retentores de água em argamassas, bem como a faixa de valores que foram obtidos.

Tabela 4 – Sínteses de estudos com retentores de água

Autor	Estudo	Tipo de aditivo	Função dos aditivos	Norma	Método	Teores de aditivos	Teor médio de retenção de água (%)
POUR CHEZ <i>et al.</i> (2006)	Argamassas com éteres de celulose	HPMC e HEMC	Agente de retenção de água e espessante (modificador de viscosidade)	ASTM C91 (2003)	Medição da perda de água após a sucção	0,27%	HPMC: 96,16 HEMC: 95,42
PAIVA <i>et al.</i> (2009)	Argamassa com dois agentes retentores de água	HPMC e SAP	Agente de retenção de água e espessante	EN 1015-8 (1999)	Medição da água retida na argamassa fresca submetida à sucção	Teores de 0,05 a 0,15%	HPMC: 99,7 SAP: 96,5
PATU RAL <i>et al.</i> (2011)	Argamassas cimentícias produzidas com éteres	HPMC, HEMC, HEC e SE	Agente de retenção de água e espessante	ASTM C1506-17 (2017)	Medição da perda de água após a sucção	0,27%	HPMC: 98,1 HEMC: 96,12 HEC: 97,0 SE: 80,0

HPMC: Polímero de hidroxipropil metil celulose; HEMC: Hidroxietil metil celulose; SAP: Polímero de superabsorvente; HEC: hidroxietilcelulose; SE: Éteres de amido.

Fonte: AUTORA (2020).

O éter de celulose que apresentou maior capacidade de retenção de água em todos os estudos foi o HPMC (Tabela 4). Esse retentor de água tem o potencial de promover uma selagem nas argamassas, envolvendo a pasta-agregados/finos, reduzindo a segregação e evitando a perda de água. Funcionando como um sistema de cura interna e agente selador, impedindo a autodessecação das argamassas por mais tempo (BENTZ *et al.*, 2009). Ainda, podendo modificar a microestrutura das argamassas, aumentando o grau de hidratação do cimento, gerando conseqüentemente uma densificação da argamassa e, assim, reduzindo a sua porosidade (DANG *et al.*, 2015).

2.5 GESSOS SINTÉTICOS

Os gessos sintéticos são subprodutos (resíduos) oriundos dos processos industriais da produção do ácido fosfórico, ácido bórico, ácido fluorídrico e da dessulfurização dos gases de combustão. Os principais gessos sintéticos são o fosfogesso, borogesso, florgesso e dessulfogesso.

São materiais alternativos ao gesso, o qual é resultante da gipsita natural. Os gessos sintéticos são utilizados na construção civil, como por exemplo, na indústria cimenteira. Também são utilizados na agricultura, principalmente para correção do pH do solo. Isso é possível devido à sua similaridade quanto às propriedades físicas e químicas em relação à gipsita natural, principalmente o sub-produto do ácido fosfórico, o fosfogesso, e do ácido bórico, o borogesso (SCHAEFER, 2013).

2.5.1 Fosfogesso

O fosfogesso é um subproduto originado a partir do ataque químico da rocha fosfática utilizada para a produção de fertilizantes, esse processo ocorre a partir da rocha primária que reage com o ácido sulfúrico resultando na formação de um precipitado de sulfato de cálcio, chamado fosfogesso. Nesse processo, o ácido sulfúrico dissolve a rocha, obtendo-se o ácido fosfórico, fosfogesso e ácido fluorídrico (CANUT *et al.*, 2008; PEREIRA, 2010).

O fosfogesso é um resíduo químico geralmente composto por sulfato de cálcio, di-hidrato e de grande quantidade de impurezas como P_2O_5 , F^- e substâncias orgânicas (ácido fosfórico, fosfatos, fluoritas) que aderem à superfície dos cristais de di-hidrato ou podem substituí-los na matriz. Os resíduos de fósforo em sua composição podem variar de 0,7 a 0,9%. Ainda, podem conter elementos radioativos presentes na rocha matriz como metais pesados (Cd, As, Pb e Zr), fluoretos e radionuclídeos das séries de desintegração do urânio e tório (COTA *et al.*, 2012; SCHAEFER, 2013), onde a concentração desses irá depender da composição química da rocha fosfática. A rocha fosfática mais utilizada na fabricação do ácido fosfórico no Brasil é a apatita, de origem magmática (BRONDINO, 2014).

A produção do fosfogesso ocorre em grande escala, pois para cada tonelada produzida de ácido fosfórico geram-se de 4,5 a 5 toneladas de fosfogesso. Sendo a geração de

fosfogesso no Brasil de aproximadamente 4,5 milhões de toneladas por ano. Devido a sua grande produção, o mesmo é amontoado a céu aberto, próximo às indústrias de fertilizantes (CANUT *et al.*, 2008; COTA *et al.*, 2012).

Segundo Pereira (2010) as principais vias de contaminação ambiental resultantes deste armazenamento são a poluição atmosférica por fluoretos e outros elementos tóxicos, a lixiviação de produtos ácidos para as águas superficiais, o escoamento na superfície, a erosão e instabilidade das pilhas e a poluição de lençóis freáticos.

Análises térmicas apontam que o fosfogesso calcinado em temperaturas de aproximadamente 160°C apresenta propriedades físicas similares ao gesso utilizado na construção civil (SCHAEFER, 2013).

Canut *et al.* (2008) compararam o fosfogesso sem tratamento e tratado – à 60°C por 1h, após, peneirado e aquecido à 160°C por mais 1 hora – com a gipsita, por meio de análises por difração de raios X. Os principais compostos cristalinos encontrados nesta análise foram a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). O fosfogesso sem tratamento consistiu principalmente de gipsita e, quando exposto ao aquecimento modificou a sua composição aumentando a concentração de bassanita no material, comprovando sua semelhança com a fonte natural de gipsita (empregada na construção civil).

Assim, cada vez mais há estudos que prosseguem a fim de viabilizar o desenvolvimento de novos materiais com o uso de fosfogesso na indústria da construção civil, atuando como uma alternativa que é orientada pela sustentabilidade mediante a minimização do consumo de recursos naturais cada vez mais escassos e a redução da contaminação ambiental causada pelo incorreto armazenamento do fosfogesso.

Degirmenci (2008) analisou misturas de cimento com fosfogesso (0 a 50%) em estado natural sem beneficiamento e com tratamento térmico, calcinado à 150°C por 2 horas. A incorporação de fosfogesso causou redução nas propriedades mecânicas aos 28 dias, ao contrário da adição de fosfogesso calcinado, que aumentou os valores de resistência à compressão e à tração, quanto maior o percentual de fosfogesso calcinado (50%) maior foi o desempenho mecânico. Ainda, a condição de cura interferiu no comportamento mecânico, com resistências mais altas para as misturas curadas ao ar do que as em cura úmida.

Quanto à absorção de água, a mesma aumentou com o aumento da adição de fosfogesso. Os melhores resultados se mostraram para o fosfogesso calcinado onde a absorção permaneceu entre 10 e 23%, já para o fosfogesso sem beneficiamento ficou entre 28 e 40%.

O fosfogesso sem beneficiamento se encontra na forma de di-hidrato, por meio do seu processo de tratamento térmico se permite obter diferentes tipos de sulfato de cálcio. Faz-se possível observar no estudo de Canut *et al.* (2008), mediante termogravimetria, que em temperatura de calcinação a partir de 96°C se tem a formação do hemidrato, sendo que a partir de 155°C as propriedades físicas se mostram semelhantes ao gesso de construção, e à 435°C há formação da anidrita II (CANUT *et al.*, 2008). Além disso, com a calcinação em temperaturas elevadas é possível tornar as impurezas como fosfatos e fluoretos em inertes.

Yang *et al.* (2016) produziram argamassas autonivelantes com os cimentos Portland e sulfoaluminato e, com fosfogesso em estado natural, com adições de 40 a 55%. O espalhamento inicial da argamassa diminuiu com o aumento do teor de fosfogesso, devido ao fato de que a área específica do fosfogesso é maior do que a da areia de quartzo, sendo necessária mais água para obter o mesmo espalhamento. No entanto, para o espalhamento medido aos 20min a fluidez aumenta conforme o acréscimo do teor de fosfogesso de 40 a 50%, apresentando diminuição somente para 55%. Efeitos esses, atribuídos ao retardamento de fixação e à morfologia do fosfogesso, o aumento na fluidez se faz devido à ação retardada de pega do próprio material e a diminuição pela área específica mais alta do fosfogesso.

A resistência à compressão e à flexão aumentaram em 160% da idade de 1 dia para 28 dias. Na retração na secagem ocorreu um aumento na retração de 0,05 para 0,15% com o aumento de fosfogesso. Os autores relatam que o fosfogesso não atua apenas como material de preenchimento, mas participa da hidratação dos cimentos, sendo absorvido pela hidratação do C_4A_3 e C_3A , sendo os dois principais minerais presentes nos cimentos.

Rosales *et al.* (2020) avaliaram a utilização de fosfogesso com diferentes tratamentos para a produção de argamassas. Atribuíram quatro tipos de tratamentos ao fosfogesso: seco em estufa a 40°C por 48h; triturado em moinho de bolas e peneirado em malha de 125µm; calcinado em mufla a 800°C por 18h e; lavado, filtrado e seco à 40°C por 48h. Observaram o mesmo comportamento relatado no estudo anterior, conforme se aumentou a taxa de incorporação de fosfogesso (de 2,5% para 5%) se diminuiu o espalhamento das misturas. O

fosfogesso tornou a pasta mais rígida e foi necessária mais água para obter uma consistência semelhante à da argamassa de cimento.

Todas as argamassas com fosfogesso obtiveram desempenho mecânico superior à argamassa produzida com gesso natural. Os maiores valores de resistência à compressão para a adição de 2,5%, foram obtidos com o tratamento lavado, filtrado e seco (superior a 55 MPa), induzindo a ocorrência da eliminação das impurezas presentes no fosfogesso por esse tratamento e, que o material adicionado em pequenas porcentagens aumentou a resistência à compressão. Com o aumento da adição para 5% se obteve uma melhora na resistência à compressão, os maiores valores foram obtidos para o tratamento seco em estufa a 40°C por 48h (58,44 MPa). Esse aumento está relacionado ao tempo de pega, pois as misturas com 5% de adição tiveram um tempo de pega final maior. O atraso no tempo de pega está relacionado à reação de hidratação lenta do fosfogesso, e isso por sua vez, aumentou a resistência à compressão. Comparando os resultados de resistência à compressão das argamassas fabricadas com os diversos tratamentos de fosfogesso, os mesmos podem ser considerados semelhantes. A resistência à tração também aumentou com o aumento da adição de fosfogesso.

Pesquisas que visem o uso de fosfogesso para o desenvolvimento de novos materiais na indústria da construção civil são de grande relevância do ponto de vista científico, técnico e econômico. Visto que, o fosfogesso é um aglomerante que pode beneficiar as misturas cimentícias, contribuindo para o aumento do desempenho mecânico. Além de ser um resíduo de grande abundância e de baixo custo, a sua utilização evitaria a deterioração ambiental de grandes áreas onde esse produto é armazenado, e também, a exploração das reservas naturais de gesso.

2.6 PRESSUPOSTO DA PESQUISA

As argamassas estabilizadas necessitam de permanência no seu estado fresco por um longo período, podendo chegar até 72 horas. Neste estado, as características de retenção de água são essenciais para que sejam asseguradas as propriedades reológicas que garantem sua aplicação.

Nesse sentido, foram desenvolvidos os seguintes estudos:

- Análise do efeito do aditivo retentor de água à base de celulose (HPMC) na combinação do sistema cimento:fosfogesso (1:1 em massa) nas características reológicas e na cinética de hidratação das pastas. Foram testados teores de 0,15 e 0,20% de HPMC, além de uma mistura de referência (0%), pressupondo-se que o fosfogesso (FG) e HPMC podem contribuir para o atraso das reações de hidratação;
- Análise das argamassas estabilizadas em composições para 48 e 72 horas de estabilização. Seguiu-se a mesma proporção das pastas de 1:1 (cimento:fosfogesso) e testou-se o retentor de água em teores de 0,15 e 0,20%. Inferindo que o uso de HPMC pode diminuir ou cessar o fenômeno de exsudação de água e manter as argamassas mais trabalháveis até 72h e também, se o HPMC diminui os efeitos de dessecação em argamassas de 72h. Ainda o efeito combinado do FG e HPMC pode interferir/melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade das argamassas estabilizadas. Também, fez-se um estudo específico nas propriedades de trabalhabilidade das argamassas estabilizadas, produzidas com fosfogesso (material poroso) versus produzidas com filler de quartzo (resíduo inerte);
- Análise das argamassas estabilizadas para 72 horas aplicadas em substrato poroso (bloco de concreto), com os moldes sem as bases, aplicados no substrato com papel filtro, utilizando o mesmo traço da etapa anterior. Presumindo que as argamassas produzidas sobre o bloco de concreto absorvam maior quantidade de água por capilaridade do que as argamassas produzidas no molde e, que as argamassas com HPMC percam menor quantidade de massa em diferentes umidades relativas. Foram avaliadas as propriedades de: absorção capilar, isoterma de dessorção e permeabilidade ao vapor de água. Ainda, seguiu-se com o estudo específico (da etapa anterior) com fosfogesso versus filler de quartzo quanto à absorção de água por capilaridade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentado o processo utilizado para a produção das argamassas estabilizadas, bem como, suas variáveis de resposta e controláveis, materiais que foram empregues e métodos de ensaios propostos. O trabalho foi dividido em 3 etapas, além da caracterização dos materiais:

- Caracterização das matérias-primas;
- Etapa 1 – Análise do efeito do FG e HPMC no processo de hidratação e características reológicas das pastas;
- Etapa 2 – Avaliação do HPMC e do tempo de estabilização no comportamento do estado fresco e endurecido das argamassas estabilizadas;
- Etapa 3 – Propriedades de transporte.

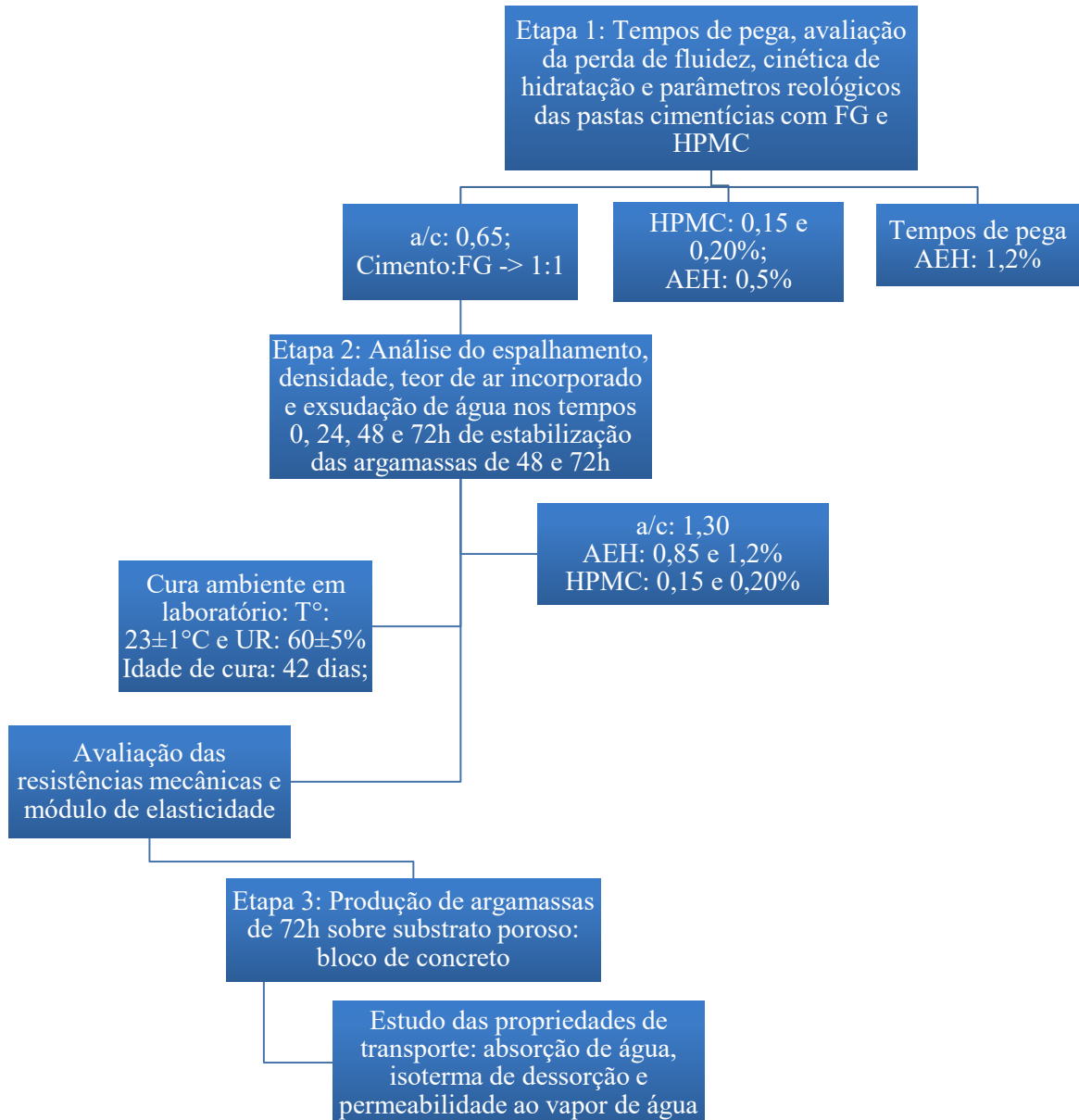
Na etapa 1 foi realizado um estudo em pastas de cimento com fosfogesso, com o intuito de analisar o efeito desse aglomerante (fosfogesso) e do aditivo estabilizador de hidratação (AEH) no desenvolvimento da hidratação das pastas, com o ensaio de calorimetria, tendo como objetivo compreender a cinética de evolução do calor nas amostras e, o ensaio de tempos de início e fim de pega. Estudaram-se também as características reológicas das pastas e a interação com o aditivo retentor de água (HPMC).

Para a etapa 2 foram produzidas argamassas com fosfogesso nos tempos de estabilização de 48 e 72h, com o objetivo de determinar o efeito do AEH e do HPMC nas características de trabalhabilidade, exsudação de água, desempenho mecânico aos 42 dias e módulo de elasticidade aos 28 e 42 dias das argamassas estabilizadas. Também, realizou-se um estudo específico para avaliar as propriedades de trabalhabilidade das argamassas de 72h. Produziram-se argamassas com fosfogesso e argamassas com filler de quartzo, para aferir a influência desses materiais no espalhamento e fluidez das argamassas estabilizadas.

Na etapa 3 conduziu-se o estudo das propriedades de transporte das argamassas estabilizadas por 72h com a interferência do substrato poroso, bloco de concreto. Analisou-se a absorção de água por capilaridade das argamassas com fosfogesso e com filler de quartzo. O comportamento quando as argamassas com fosfogesso são expostas em diferentes umidades relativas e quanto à permeabilidade ao vapor de água das mesmas.

Na Figura 3 encontra-se um fluxograma com resumo das 3 etapas que foram realizadas neste estudo.

Figura 3 – Fluxograma das etapas do estudo.



Fonte: Autora (2020)

Na Tabela 5 encontram-se as variáveis controláveis e de respostas para cada etapa do estudo.

Tabela 5 – Variáveis controláveis e de respostas

Etapas	Estudos	Variáveis controláveis	Variáveis de respostas
1	Pastas	Fosfogesso: 0 e 50%; AEH: 0 e 0,5%; HPMC: 0, 0,15 e 0,20%	Tempos de pega, mini-slump, calorimetria e reômetria
2	Argamassas	Tempo de estabilização: 48 e 72h; HPMC: 0, 0,15 e 0,20%; Material: FG e FQ Idade de cura: 28 e 42d	Espalhamento, densidade de massa, teor de ar incorporado, exsudação de água, resistências mecânicas e módulo
3	Argamassa-substrato	Substrato: bloco de concreto e molde; HPMC: 0, 0,15 e 0,20% Material: FG e FQ	Absorção capilar, isoterma de dessorção e permeabilidade ao vapor de água

Fonte: AUTORA (2020).

Na Tabela 6 apresenta-se o planejamento experimental com os ensaios que foram realizados e o número de amostras que foram ensaiadas.

Tabela 6 – Resumo do planejamento experimental

Etapa	Ensaio	Característica das misturas	Nº de amostras
Etapa 1	Tempo de pega	FG: 50% AEH: 1,2% HPMC: 0, 0,15 e 0,20%	3 traços
	Mini-slump	FG: 0 e 50%;	5 traços
	Calorimetria	AEH: 0 e 0,5%;	5 traços
	Reometria	HPMC: 0, 0,15 e 0,20%	5 traços
Etapa 2	Índice de consistência	Estabilização: 48 e 72h;	6 traços
	Densidade de massa	HPMC: 0, 0,15 e 0,20%;	6 traços
	Teor de ar incorporado	FG:areia: 1:1	6 traços
	Exsudação de água	FQ:areia: 1:1	6 traços
	Resistência à compressão	FG:areia: 1:1	3 CP's x 6 traços
	Resistência à tração na flexão	Idade de cura: 42d	3 CP's x 6 traços
	Módulo de elasticidade	FG:areia: 1:1 Idade de cura: 28 e 42d	3 CP's x 6 traços
Etapa 3	Absorção de água	Substrato: bloco de concreto e molde FG:areia: 1:1 FQ:areia: 1:1 Idade de cura: 42d	3 CP's x 3 traços
	Isoterma de dessorção	FG:areia: 1:1	4 CP's x 3 traços
	Permeabilidade ao vapor de água	HPMC: 0, 0,15 e 0,20%; Idade de cura: 42d	3 CP's x 3 traços

Fonte: AUTORA (2020).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no programa experimental foram propostos considerando a disponibilidade no mercado, a revisão bibliográfica realizada em estudos anteriores e, de se obter misturas que possibilitassem alcançar as características desejáveis para argamassas estabilizadas: estabilização pelos períodos de 48 e 72h, espalhamento de 270 ± 10 mm e teor de ar incorporado de $18\pm 2\%$.

3.1.1 Cimento Portland

Foi usado o Cimento Portland CP II F-32 (cimento Portland composto com material carbonático), o qual apresenta resistência característica de 32 MPa e adição de filler calcário de 11 até 25% em massa. Este cimento não apresenta muitas adições em sua composição, o que propicia a avaliação da influência de aditivos sobre a estabilização.

3.1.2 Sulfato de cálcio

O sulfato de cálcio utilizado como matéria-prima foi o fosfogesso, proveniente do município de Imbituba-SC. Esse material recebeu tratamento térmico pela empresa, sendo conduzido ao forno em temperatura de 190°C e calcinado por cerca de 30 minutos, dando origem ao Hemidrato β .

Neste trabalho, o Hemidrato β obtido a partir do fosfogesso foi denominado de fosfogesso (FG).

3.1.3 Filler de quartzo

Foi utilizado como um material fino o filler de quartzo (FQ), com origem comercial. Para um estudo específico de espalhamento, densidade de massa, teor de ar incorporado (Etapa 2) e absorção capilar (Etapa 3) nas argamassas estabilizadas de 72h, para se comparar com as argamassas produzidas com fosfogesso, devido ao filler de quartzo apresentar natureza inerte e ausência de reatividade.

3.1.4 Agregado miúdo

Foram utilizadas como agregado miúdo duas areias naturais com composições granulométricas distintas: fina e média. Sendo realizada uma composição entre as areias de 50% cada, para se obter uma distribuição granulométrica com maior abrangência de faixas.

3.1.5 Aditivos

Para a realização deste trabalho fez-se a escolha de três tipos de aditivos, cada qual com suas funções distintas: estabilizador de hidratação, incorporador de ar e agente retentor de água.

O aditivo estabilizador de hidratação foi usado a fim de prolongar o estado fresco dos materiais cimentícios, com composição química de sacarose e gluconato de sódio. Foi utilizado em 0,5% na massa do cimento no estudo em pastas. Em 1,2% para o estudo de tempos de pega. E para a produção das argamassas, utilizou-se 0,85% para se alcançar a estabilização de 48h e 1,2% para o tempo de estabilização de 72h.

O aditivo incorporador de ar foi um surfactante líquido, com moléculas de caráter aniônico. Aditivos com esta característica de ionização são os mais utilizados em materiais cimentícios, por apresentarem boa capacidade espumante e baixo custo de produção. Foi fixado em 0,4% na massa do cimento para a produção das argamassas estabilizadas.

Quanto ao agente retentor de água, foi utilizado um aditivo à base de celulose, hidroxipropil metil celulose (HPMC) da marca Methocel. Com o objetivo de melhorar a adesão das partículas e reter a água da mistura, evitando que a água fosse drenada rapidamente, assim, melhorando a hidratação do cimento e consequentemente, o desempenho mecânico. Foi utilizado em dosagens de 0,15 e 0,20% na massa do cimento, nos estudos de pastas e argamassas.

Na Tabela 7 apresentam-se os aditivos que foram utilizados e as respectivas nomenclaturas adotadas.

Tabela 7 – Aditivos utilizados

Nomenclatura	Material	Função
AEH	Aditivo estabilizador de hidratação	Prolongamento do início de pega
AIA	Aditivo incorporador de ar	Manutenção da trabalhabilidade
HPMC	Aditivo retentor de água	Retenção de água

Fonte: AUTORA (2020).

3.2 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Neste item é descrito como foi realizada a caracterização das matérias primas, as etapas que foram seguidas e os métodos de ensaios de cada etapa, tanto no estado fresco como no estado endurecido e ainda, o método estatístico que foi utilizado para análise dos resultados do trabalho.

3.2.1 Caracterização das matérias-primas

Os materiais foram caracterizados seguindo os ensaios padronizados por normas brasileiras e também, ensaios específicos quando se fez necessário. Na Tabela 8 estão expostos os ensaios que foram realizados para a caracterização das matérias-primas.

Tabela 8 – Caracterização: matérias-primas

Matéria-prima	Característica físico-química	Norma de ensaio	Equipamento
CP II F-32	Caracterização mecânica: resistência à compressão	Fabricante	
	Caracterização química Caracterização física: massa específica, área específica, tempo de pega e composição granulométrica		
Areias: Fina e média	Composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	Peneiras série normal
	Módulo de finura		
	Massa específica	NBR NM 52 (2009)	Picnômetro
	Massa unitária	NBR NM 45 (2006)	Recipiente cilíndrico
	Teor de umidade	NBR 9939 (2011)	Estufa
Fosfogesso	Composição granulométrica	Granulometria laser	Granulômetro a laser Mastersizer 2000, por via úmida
	Área específica	NBR NM 16372 (2015)	Permeâmetro de Blaine
	Massa específica	NBR 16605 (2017)	Frasco Le Chatelier
	Composição química	EDX	SHIMADZU, modelo EDX – 700 HS
	Teor de umidade	NBR 9939 (2011)	Estufa
Aditivos	Caracterização química	Fabricante	

EDX: Espectroscopia de raios-x por dispersão em energia.

Fonte: AUTORA (2020).

3.2.2 Etapa 1 – Análise do efeito do FG e HPMC no processo de hidratação e características reológicas das pastas

O estudo em pastas teve como principal propósito analisar o efeito do fosfogesso e do aditivo estabilizador de hidratação no desenvolvimento da hidratação das pastas, características reológicas e a interação com o aditivo retentor de água.

Assim, se estudou as interações entre o FG, cimento, aditivo estabilizador de hidratação e o aditivo retentor de água. O cimento e o FG mantiveram as mesmas proporções que foram utilizadas nas argamassas (1:1) e a substituição foi feita em massa (50%). A relação água/cimento foi de 0,65, com o objetivo das pastas com FG (material poroso, o qual necessita maior quantidade de água) serem capazes de se espalharem além do diâmetro da base do mini-cone de 40 mm.

Fixou-se o aditivo estabilizador de hidratação em 0,5% na massa do cimento para o estudo em pastas.

O aditivo retentor de água foi utilizado em dois percentuais de substituição diferentes, 0,15 e 0,20% na massa do cimento, além de uma mistura de referência (0%), a fim de avaliar a influência desse aditivo nas pastas cimentícias.

As variáveis controláveis que foram utilizadas nesta etapa a fim de avaliar a real influência das mesmas nas variáveis de resposta (tempo de pega, mini-slump, calorimetria e reometria) são:

- Percentual de FG: 0 e 50%;
- Percentual de AEH: 0 e 0,5%;
- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%.

Na Tabela 9 expõem-se a descrição e traços das pastas que foram produzidas. Já na Tabela 10, encontram-se as quantidades de materiais para cada traço das respectivas pastas.

Tabela 9 – Descrição das pastas

Amostra	Nomenclatura	Descrição	Traço
Pasta 1	Ref.100%C	Referência com cimento	1:0,65 (c:a/c)
Pasta 2	50%C.50%FG	FG em 50% (1:1)	1:1:0,65 (c:FG:a/c)
Pasta 3	50%FG.0,5%AEH	Cim + FG + AEH em 0,5%	1:1:0,65:0,005 (c:FG:a/c:AEH)
Pasta 4	50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC	Cim + FG + AEH + HPMC em 0,15%	1:1:0,65:0,005:0,0015 (c:FG:a/c:AEH:HPMC)
Pasta 5	50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC	Cim + FG + AEH + HPMC em 0,20%	1:1:0,65:0,005:0,0020 (c:FG:a/c:AEH:HPMC)

c: Cimento; a/c: relação água/cimento.

Fonte: AUTORA (2020).

Tabela 10 – Composição das pastas

Amostra	Traço	Cimento (g)	FG (g)	Água (g)	AEH (g)	HPMC (g)
Pasta 1	1:0,65	400	0	260	0	0
Pasta 2	1:1:0,65	200	200	260	0	0
Pasta 3	1:1:0,65:0,005	200	200	260	2,00	0
Pasta 4	1:1:0,65:0,005:0,0015	200	200	260	2,00	0,60
Pasta 5	1:1:0,65:0,005:0,0020	200	200	260	2,00	0,80

Fonte: AUTORA (2020).

Na Tabela 11, têm-se as pastas que foram produzidas para o ensaio de tempo de pega. Para este ensaio se produziu apenas as pastas 3, 4 e 5, com um teor de AEH de 1,2% na massa do cimento, para melhor representar as argamassas de 72h e seus tempos de desforma.

Tabela 11 – Pastas produzidas para o ensaio de tempo de pega

Amostra	Nomenclatura	Descrição	Traço
Pasta 3	Ref.	Cim + FG + AEH em 1,2%	1:1:0,65:0,012 (c:FG:a/c:AEH)
Pasta 4	0,15% HPMC	Cim + FG + AEH + HPMC em 0,15%	1:1:0,65:0,012:0,0015 (c:FG:a/c:AEH:HPMC)
Pasta 5	0,20% HPMC	Cim + FG + AEH + HPMC em 0,20%	1:1:0,65:0,012:0,0020 (c:FG:a/c:AEH:HPMC)

c: Cimento; a/c: relação água/cimento.

Fonte: AUTORA (2020).

Todas as amostras foram produzidas conforme o seguinte procedimento de mistura:

- a) Os materiais secos (cimento, FG e HPMC) foram misturados manualmente por 30s;
- b) Após, foram deixados em contato com 95% da água durante 30s, seguidos por 30s de mistura manual;
- c) Os 5% de água restante foram adicionados juntamente com o aditivo estabilizador de hidratação;
- d) Finalizando com 120s de mistura em velocidade alta em um misturador mecânico de alta energia (10.000–30.000 rpm), com uma pausa aos 60s para remover o material aderido nas paredes da cuba.

Finalizada a mistura, foram realizadas as análises nas pastas pelos ensaios laboratoriais: tempo de início e fim de pega, mini-slump, calorimetria e reometria.

Após os ensaios no período de 0h, as amostras foram armazenadas em recipiente de polietileno hermeticamente fechados para evitar a evaporação de água e o contato com o ambiente, e mantidas em temperatura constante de 23±1°C. Para as análises em 24 e 48h, as pastas foram misturadas manualmente por 60s.

3.2.2.1 Avaliação do tempo de pega

Para análise do início e fim de pega das misturas foi utilizado o método da agulha de Vicat, conforme a norma NBR 16607 (2018). Sendo definido pela norma que o tempo de

início de pega é considerado o tempo em que a agulha de Vicat penetra 6 ± 2 mm da placa base da pasta. Já o fim de pega é considerado o tempo transcorrido do contato da água com o cimento até quando a agulha de Vicat penetra apenas 0,5 mm na pasta. Para essa determinação foi necessário substituir a agulha de Vicat do tempo de início de pega pela agulha de fim de pega (acessório anular), a qual facilita a observação exata de penetrações pequenas.

Para este ensaio se produziu apenas as pastas 3, 4 e 5 apresentadas na Tabela 11, com um teor de AEH de 1,2% na massa do cimento, para melhor representar as argamassas. Pois as pastas 1 e 2, eram misturas apenas com cimento, FG e água, sem aditivos.

Para esse ensaio o objetivo foi de se obter o tempo de pega das argamassas, para posterior desforma nas Etapas 3 e 4. Realizou-se a estabilização pelo maior período, o mais crítico, de 72 horas.

3.2.2.2 *Análise da perda de fluidez ao longo do tempo*

A perda de fluidez das pastas ao longo do tempo foi avaliada através de ensaio de mini-slump, nos tempos de 0, 24 e 48h. O procedimento utilizou um pequeno cone, cujas dimensões são: 60 mm de altura, 20 mm de diâmetro superior e 40 mm de diâmetro inferior. O qual foi preenchido com a pasta e após o preenchimento total, o cone foi removido e a pasta fluiu sobre uma placa de vidro, onde foram obtidas duas medidas ortogonais do diâmetro após 1 min da remoção do cone, sendo o resultado a média entre as medições.

3.2.2.3 *Cinética de hidratação*

Para analisar a cinética de hidratação, isto é, a liberação de calor de hidratação das pastas, foram realizadas medições por meio de um calorímetro isotérmico *Thermometric AB da TAM Air (TA Instruments)* de oito canais, com sistema informatizado de aquisição de dados, com frequência média de leitura a cada 30 segundos durante o período em que o ensaio foi monitorado.

O ensaio foi realizado com uma quantidade de ≥ 10 g de amostra, para todos os traços abordados na Tabela 10. Durante todo o período de ensaio e aquisição de dados, a temperatura

do equipamento foi mantida constante a 21°C. Na Figura 4 pode-se observar o calorímetro isotérmico que foi utilizado.

Figura 4 – Calorímetro isotérmico.



Fonte: Autora (2020)

Após isso, foi plotado o gráfico de fluxo de calor x tempo, e assim, fez-se possível analisar as etapas de hidratação das pastas e avaliar a influência do fosfogesso e dos aditivos na liberação de calor e hidratação do cimento.

3.2.2.4 Estudo reológico

Para avaliar os parâmetros reológicos das pastas, fez-se o ensaio de reômetria rotacional, por meio do reômetro da marca Thermo Scientific, modelo Hake Mars III, com torque máximo de 200 N.mm e velocidade de rotação máxima de 1500 rpm, no laboratório NanoTec, ECV/UFSC, conforme se expõe na Figura 5.

Figura 5 – Reômetro da Thermo Scientific utilizado no trabalho.



Fonte: Autora (2020)

O objetivo desse ensaio foi determinar as variações da viscosidade aparente das pastas ao longo o tempo, logo, as amostras foram avaliadas nos tempos de 0, 24 e 48h. A geometria utilizada foi de placa-placa serrilhada de 35 mm, com gap de 1 mm. Seguiu-se uma rotina de ensaio de fluxo de acordo com a descrição:

- a) Aplicou-se um pré-cisalhamento com duração de 60s a uma taxa de 100s^{-1} ;
- b) posteriormente iniciou-se o ciclo, o qual foi composto de duas rampas, sendo a primeira a curva ascendente (aceleração) com uma taxa de cisalhamento de $0,1\text{s}^{-1}$ a 100s^{-1} e em seguida a curva descendente (desaceleração) no qual partiu do mesmo ponto 100s^{-1} e retornou até $0,1\text{s}^{-1}$;

O modelo adotado para o cálculo foi o de Herschel-Bulkley, segundo a Equação 1.

Equação 1 – Cálculo pelo modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Onde:

τ = Tensão de cisalhamento;

τ_0 = Tensão de escoamento inicial dinâmica;

k = Viscosidade plástica;

$\dot{\gamma}$ = Taxa de cisalhamento;

n = Índice de comportamento.

Por meio dos resultados que foram obtidos da tensão de cisalhamento, foram calculados os valores de viscosidade aparente das pastas. A viscosidade aparente é a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento e é considerada a viscosidade pontual do material.

3.2.3 Etapa 2 – Avaliação do HPMC e do tempo de estabilização no comportamento do estado fresco e endurecido das argamassas estabilizadas

Esta etapa teve como objetivo determinar o efeito do aditivo retentor de água (HPMC) e do aditivo estabilizador de hidratação (AEH) na estabilização de 48 e 72h das argamassas compostas com fosfogesso. Avaliando se o retentor de água reduz ou até mesmo cessa o fenômeno de exsudação de água, também, procurou-se avaliar se o HPMC diminui os efeitos de dessecação em argamassas de 72h e se promove melhoras no desempenho mecânico.

Ainda, realizou-se um estudo específico para avaliar as propriedades de trabalhabilidade no estado fresco das argamassas de 72h. Produziram-se argamassas com fosfogesso e argamassas com filler de quartzo, a fim de se comparar os dois materiais. O filler de quartzo é um resíduo de natureza inerte (a/c: 1,10), já o fosfogesso é um material poroso (a/c: 1,30). Para aferir a influência desses materiais no espalhamento e fluidez das argamassas estabilizadas.

Para se alcançar as variáveis de resposta (ensaios de trabalhabilidade para as argamassas de 48h, exsudação de água e desempenho mecânico (48 e 72h)) que foram propostas nesta etapa, tiveram-se os fatores controláveis:

- Tempo de estabilização: 48 e 72 horas;
- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%.

Para as variáveis de resposta de trabalhabilidade nas argamassas de 72h (espalhamento, densidade e teor de ar), tiveram-se os fatores controláveis:

- Material: FG e FQ;
- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%.

Para a variável de resposta de módulo de elasticidade, seguiram-se os fatores controláveis:

- Tempo de estabilização: 48 e 72 horas;

- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%.
- Idade de cura: 28 e 42 dias.

A relação a/c foi fixada em 1,3 para se alcançar a consistência desejável com a utilização do FG, obedecendo a um índice de espalhamento de 270 ± 10 mm.

O aditivo incorporador de ar foi ajustado para obter-se um teor de ar incorporado de $18 \pm 2\%$ do volume de argamassa. Já o aditivo estabilizador de hidratação foi dosado até alcançar o teor ideal para os períodos de estabilização de 48 e 72h.

O agente retentor de água foi estudado em dois teores: 0,15 e 0,20% na massa do cimento, com base em uma média de estudos, onde relatam que esse aditivo é utilizado em pequenas quantidades, menores que 0,5% (PAIVA *et al.*, 2009; PATURAL *et al.*, 2011).

O fosfogesso seguiu a mesma proporção utilizada nas pastas de 1:1 (cimento:FG), porém nesta etapa a substituição foi realizada no traço de areia, seguindo a proporção de 5:1 (areia:FG), em massa.

Na Tabela 12 apresentam-se as composições estabelecidas das argamassas com FG produzidas nesta etapa. Logo, na Tabela 13 expõem-se as composições para as argamassas com FQ.

Tabela 12 – Composição das argamassas com FG

Amostra	Tempo de estabilização	Nomenclatura	Descrição	Traço
Argamassa 1	48 horas	Ref. – 48h	Referência 48h	1:5:1:1,30:0,4:0,85 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH)
Argamassa 2	48 horas	0,15% HPMC – 48h	HPMC em 0,15%	1:5:1:1,30:0,4:0,85;0,15 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH:HPMC)
Argamassa 3	48 horas	0,20% HPMC – 48h	HPMC em 0,20%	1:5:1:1,30:0,4:0,85;0,20 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH:HPMC)
Argamassa 4	72 horas	Ref. – 72h	Referência 72h	1:5:1:1,30:0,4:1,2 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH)
Argamassa 5	72 horas	0,15% HPMC – 72h	HPMC em 0,15%	1:5:1:1,30:0,4:1,2;0,15 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH:HPMC)
Argamassa 6	72 horas	0,20% HPMC – 72h	HPMC em 0,20%	1:5:1:1,30:0,4:1,2;0,20 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH:HPMC)

c: Cimento; a: Areia; a/c: relação água/cimento.
Fonte: AUTORA (2020).

Tabela 13 – Composição das argamassas com FQ

Amostra	Tempo de estabilização	Nomenclatura	Descrição	Traço
Argamassa 7	72 horas	Ref. – 72h	Referência 72h	1:5:1:1,10:0,4:1,2 (c:a:FQ:a/c:AIA: AEH)
Argamassa 8	72 horas	0,15% HPMC – 72h	HPMC em 0,15%	1:5:1:1,10:0,4:1,2;0,15 (c:a:FQ:a/c:AIA:AEH:H PMC)
Argamassa 9	72 horas	0,20% HPMC – 72h	HPMC em 0,20%	1:5:1:1,10:0,4:1,2;0,20 (c:a:FQ:a/c:AIA:AEH:H PMC)

c: Cimento; a: Areia; a/c: relação água/cimento.

Fonte: AUTORA (2020).

As argamassas foram produzidas com o misturador/argamassadeira padrão de duas velocidades (baixa - 62 rpm / alta – 125 rpm) e se respeitou as particularidades de misturas das argamassas estabilizadas, como por exemplo a utilização dos aditivos, sendo que o incorporador de ar foi misturado antes do estabilizador de hidratação.

O procedimento de mistura foi seguido para todas as argamassas, o mesmo foi desenvolvido para este estudo com base em estudos anteriores de argamassas estabilizadas e, encontra-se descrito a seguir:

- a) misturou-se as areias fina e média por 30s em velocidade baixa;
- b) adicionou-se o FG e se misturou por 30s em velocidade baixa;
- c) acrescentou-se o cimento e se misturou por 30s em velocidade baixa;
- d) adicionou-se o retentor de água HPMC (pó) e se misturou por mais 30s em velocidade baixa;
- e) acrescentou-se 90% da água e se misturou por 30s em velocidade baixa;
- f) interrompeu-se 1min para remover o material aderido nas paredes da cuba;
- g) acrescentou-se o aditivo incorporador de ar junto com 5% da água e se misturou por 30s em velocidade baixa;
- h) acrescentou-se o aditivo estabilizador de hidratação junto com os 5% restante da água e se misturou por 1min em velocidade alta;
- i) interrompeu-se 30s para homogeneização manual;
- j) finalizou-se com 30s de mistura em velocidade alta.

Após o processo de mistura foram avaliados os parâmetros de trabalhabilidade no estado fresco: índice de espalhamento, densidade de massa e teor de ar incorporado nos períodos de 0, 24, 48 e 72h. No estado fresco também foi realizado o ensaio de exsudação de água, em 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 24h, 48h e 72h.

Para avaliar os parâmetros de trabalhabilidade nos tempos de 24, 48 e 72 horas, as argamassas foram armazenadas em potes plásticos com tampas. Sendo que nesses períodos, foi realizada a homogeneização das argamassas no misturador por 30s em velocidade baixa, por conseguinte, foram submetidos aos ensaios no estado fresco. Após o final da estabilização, foram moldados os corpos de prova para cada ensaio específico e submetidos à cura ambiente ($T^{\circ} 23 \pm 1^{\circ}C$ e UR 60 \pm 5%) em laboratório até a idade de cura.

A argamassa estabilizada não endurece de forma normal, devido à presença do aditivo estabilizador de hidratação, exigindo um tempo maior para a desforma dos CP's, visando isso, as argamassas estabilizadas foram avaliadas na idade de 42 dias do primeiro contato do cimento com a água.

3.2.3.1 Índice de espalhamento

O espalhamento das argamassas foi determinado pelo ensaio de índice de consistência de acordo com a norma NBR 13276 (2016). O ensaio consistiu na medição do diâmetro de espalhamento da argamassa contida em um volume de tronco de cone após 30 quedas da mesa. O molde padrão foi preenchido com argamassa em três camadas de alturas aproximadamente iguais, onde se aplicou 15, 10 e 5 golpes com um soquete em cada camada. Foram aplicadas 30 quedas de mesma altura da mesa, forçando a argamassa a se espalhar sobre a superfície. O índice de espalhamento foi à média de três medições de diâmetro da argamassa espalhada sobre a superfície da mesa.

3.2.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Para obter-se a densidade de massa e o teor de ar incorporado nas misturas de argamassas, seguiu-se a NBR 13278 (2005), a qual estabelece um método de ensaio para determinação desses parâmetros em argamassas de revestimento.

O ensaio consistiu em preencher um recipiente cilíndrico em três camadas, com 20 golpes cada camada. Após, efetuou-se quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm, com o intuito de retirar os vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. E por fim, pesou-se e se registrou a massa do molde com a argamassa.

A seguir nas Equações 2 e 3, os cálculos utilizados para a densidade de massa e teor de ar incorporado.

Equação 2 – Cálculo de densidade de massa

$$d = \frac{mc - mv}{V_r} \times 1000 \quad (2)$$

Onde:

d: densidade de massa da argamassa (kg/m^3);

mc: massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa (g);

mv: massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

Vr: volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

Equação 3 – Cálculo do teor de ar incorporado

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{dt} \right) \quad (3)$$

Onde:

A: teor de ar incorporado da argamassa (%);

d: densidade de massa da argamassa (g/cm^3);

dt: densidade de massa teórica da argamassa (g/cm^3).

O procedimento para cálculo do teor sugere uma comparação entre a massa específica teórica da argamassa (se ela fosse constituída 100% por sólidos + água) e a massa específica mensurada da amostra.

3.2.3.3 Exsudação de água

A exsudação de água foi medida seguindo a metodologia de RILEM MR-6 (1982), a qual consistiu no preparo de um lote de argamassa, onde se utilizaram béqueres de vidro

vertedor e com volume de 600 ml, com a colher se colocou 500 ml de argamassa em cada um dos béqueres sem realizar o adensamento do material, após preencher a marca de 500 ml se promoveu a retirada do ar aprisionado. Em seguida, o copo foi coberto com plástico filme por 15 minutos.

A exsudação da água foi medida aos 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 24h, 48h e 72h após a moldagem das amostras. A água exsudada foi retirada da superfície com o auxílio de uma pipeta graduada. A quantidade de água exsudada da mistura foi registrada a cada medição feita nos intervalos de tempo determinados.

Quando se terminou o ensaio foi necessário fazer o cálculo para verificar a quantidade de água excedente, conforme a Equação 4.

Equação 4 – Cálculo de exsudação das argamassas

$$\frac{V.P.}{V.I.} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

V.P.: Volume de água retirado com a pipeta (em cm³);

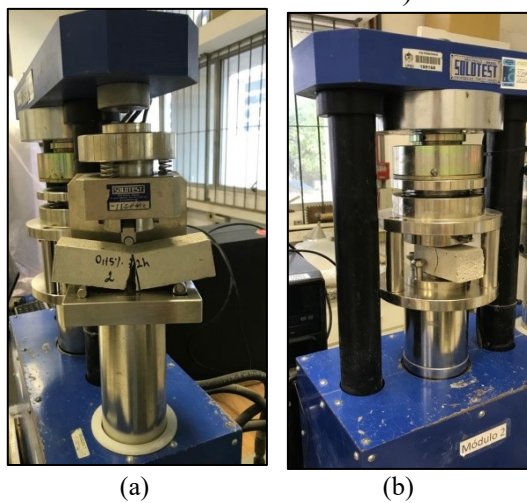
V.I.: Volume inicial da calda introduzida no béquer (em cm³).

3.2.3.4 Resistências mecânicas: à compressão e à tração na flexão

Para os ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração na flexão foram moldados corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm seguindo os procedimentos descritos na NBR 13279 (2005). As moldagens foram realizadas nos tempos de 48 e 72h, sendo 3 CP's para cada uma das misturas. Os corpos de prova foram curados em ambiente com temperatura de 23±1°C e umidade relativa de 60±5%.

As argamassas foram submetidos ao rompimento na idade de 42 dias, utilizou-se uma prensa Solotest de dois módulos (Figura 6), sendo o Módulo 1 para flexão com capacidade de carga de 2.0 kgf e o Módulo 2 para compressão com capacidade de carga de 2.200 kgf. Ao final dos rompimentos, foram consideradas as resistências potenciais de cada amostragem.

Figura 6 – Ensaio de resistências mecânicas: a) Módulo 1; b) Módulo 2.



Fonte: Autora (2020)

3.2.3.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado no equipamento da Sonelastic da ATPC Engenharia, sendo um ensaio não destrutivo do módulo de elasticidade a partir de frequências naturais adquiridas por meio da técnica de excitação por impulso, com base na norma ASTM E 1876 (2015).

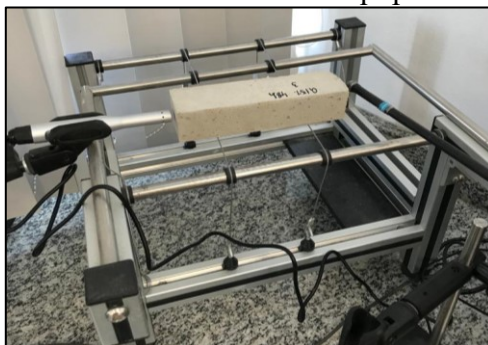
O ensaio consistiu em colocar o corpo de prova deitado e posicionar o sensor acústico do equipamento, após, por meio de uma haste foi provocado um pequeno impacto na extremidade do corpo de prova prismático (40x40x160 mm), que foi captado pelo sensor do equipamento, onde no ponto médio do seu comprimento existe um captador acústico. O sinal obtido passou por um processamento de FFT (*Fast Fourier Transform*) para se obter os picos de frequências naturais de vibração, essa frequência depende da massa, geometria e dimensões dos corpos de prova. A partir desses picos de frequências foram calculados os módulos de elasticidade.

O modo de vibração utilizado nesse ensaio foi o de vibração longitudinal, que permite o cálculo do módulo de elasticidade a partir do uso de uma razão de Poisson de $0,33 \pm 0,01$. O equipamento é composto por captadores, suportes e pulsador, ligados a um computador que possui o *software* instalado para acompanhamento dos resultados do ensaio.

Obtiveram-se os resultados dos módulos de elasticidade para as argamassas estabilizadas nas idades de 28 e 42 dias. O teste foi repetido três vezes em cada corpo de

prova (3 CP's para cada traço). O ensaio foi realizado no equipamento Sonelastic do laboratório NanoTec – UFSC, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Módulo de elasticidade no equipamento Sonelastic.



Fonte: Autora (2020)

3.2.4 Etapa 3 – Propriedades de transporte

Esta etapa teve como propósito avaliar as propriedades de transporte das argamassas estabilizadas por 72h com a interferência de um substrato poroso. Por meio do estudo da formação da macroestrutura da argamassa, pelos seus parâmetros de capilaridade.

Assim, aplicou-se a argamassa estabilizada no substrato poroso visando que o substrato interfere na formação da estrutura porosa das argamassas e é considerado o maior responsável pelo transporte de água nos momentos de pós-aplicação da argamassa.

O substrato poroso que foi utilizado é o bloco de concreto, o qual é um dos substratos mais utilizados em obras (como alvenaria estrutural ou/e vedação), onde são aplicadas as argamassas de revestimento.

Na Tabela 14, expõe-se a classificação de absorção de água para os blocos de concreto (vazados) segundo a NBR 6136 (2016).

Tabela 14 – Classes de absorção de água para blocos de concreto

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão (MPa)	Absorção de água (%)			
			Agregado normal		Agregado leve	
			Individual	Média	Individual	Média
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$		
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$

Fonte: ADAPTADO DA NBR 6136 (2016).

Os blocos foram caracterizados conforme a NBR 12118 (2014), por meio da análise dimensional, área líquida, umidade natural e absorção de água.

Em busca da variável de resposta de absorção de água, as variáveis controláveis desta etapa foram:

- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%;
- Material: FG e FQ;
- Substrato: bloco de concreto e molde.

Para alcançar as variáveis de resposta de isoterma de dessecção e permeabilidade ao vapor de água das argamassas com FG, teve-se o fator controlável:

- Percentual de HPMC: 0; 0,15 e 0,20%.

A seguir na Tabela 15 e 16, estão expostos os traços das argamassas estabilizadas que foram produzidas nesta etapa.

Tabela 15 – Composição das argamassas com fosfogesso

Amostra	Tempo de estabilização	Nomenclatura	Descrição	Traço
Argamassa 3	72 horas	Ref.	Referência	1:5:1:1,30:0,4:1,2 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH)
Argamassa 4	72 horas	0,15% HPMC	HPMC em 0,15%	1:5:1:1,30:0,4:1,2:0,15 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH: HPMC)
Argamassa 5	72 horas	0,20% HPMC	HPMC em 0,20%	1:5:1:1,30:0,4:1,2:0,20 (c:a:FG:a/c:AIA:AEH: HPMC)

c: Cimento; a: Areia; a/c: relação água/cimento.
Fonte: AUTORA (2020).

Tabela 16 – Composição das argamassas com filler de quartzo

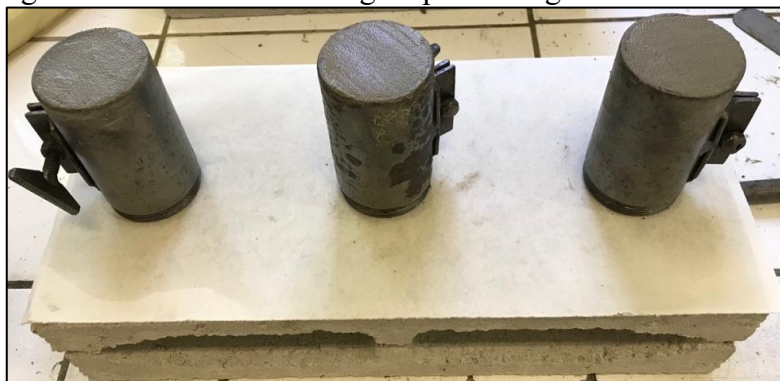
Amostra	Tempo de estabilização	Nomenclatura	Descrição	Traço
Argamassa 6	72 horas	Ref. – FQ	Referência	1:5:1:1,10:0,4:1,2 (c:a:FQ:a/c:AIA:AEH)
Argamassa 7	72 horas	0,15% HPMC – FQ	HPMC em 0,15%	1:5:1:1,10:0,4:1,2:0,15 (c:a:FQ:a/c:AIA:AEH: HPMC)
Argamassa 8	72 horas	0,20% HPMC – FQ	HPMC em 0,20%	1:5:1:1,10:0,4:1,2:0,20 (c:a:FQ:a/c:AIA:AEH: HPMC)

c: Cimento; a: Areia; a/c: relação água/cimento.
Fonte: AUTORA (2020).

Os moldes com as argamassas foram postos sobre o substrato com papel filtro previamente umedecido e sem o fundo do molde, conforme o método utilizado por Macioski *et al.* (2015) e pode ser observado na Figura 8. A desforma ocorreu quando as argamassas estavam em condições de desmolde (endurecidas). Foram curadas por 42 dias.

Nesta etapa se trabalhou apenas com a argamassa no tempo de estabilização de 72h, devido a maior deficiência dessa argamassa levantada em estudos anteriores: hidratação incompleta do cimento, baixo desempenho mecânico e esfrelamento de CP's. Visando nesta etapa um estudo mais aprofundado das propriedades de transporte das argamassas, com interferência do substrato poroso, por meio dos ensaios de: absorção de água por capilaridade, isoterma de dessorção e permeabilidade ao vapor de água. Os quais são explanados nos itens seguintes. Se seguiu o mesmo procedimento de mistura da etapa 2, apresentado anteriormente no item 3.2.3.

Figura 8 – Método de moldagem para as argamassas-substrato.



Fonte: Autora (2020)

3.2.4.1 Absorção capilar

A absorção capilar foi determinada seguindo os procedimentos descritos nas NBR's 9779 (2012) e 15259 (2005), utilizaram-se 3 corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm, que foram moldados ao final do período de estabilização de 72h para cada composição, e ensaiados aos 42 dias após a confecção das misturas.

Foram feitas medições de 10 e 90min conforme a NBR 15259 (2005) e de 3, 6, 24, 48 e 72h seguindo a NBR 9779 (2012). Os valores de absorção capilar foram determinados através da Equação 5.

Equação 5 – Cálculo da variação de massa

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{S} \quad (5)$$

Onde:

A_t : Absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

m_t : Massa do corpo de prova em cada tempo (g);

m_0 : Massa inicial do corpo de prova (g);

S : Área da seção transversal do corpo de prova (cm^2).

3.2.4.2 Isoterma de dessorção

Segundo Andrade *et al.* (2015), o ensaio de isoterma traz informações a respeito da estrutura porosa do material e expõe a variação do conteúdo de umidade deste quando exposto a um ambiente em que a umidade relativa varia.

Quando há um aumento do conteúdo de umidade do material trata-se do fenômeno de adsorção, já quando ocorre a diminuição se faz referente ao fenômeno de dessorção. Os dois fenômenos consistem no processo de ligação ou retenção de moléculas na superfície de partículas sólidas regido pelas forças de Van der Waals (SANTOS *et al.*, 2007).

Para o ensaio de isoterma de dessorção se seguiu a ASTM C1498 (2016). O ensaio consistiu em colocar uma amostra em uma atmosfera em equilíbrio com solução salina saturada com corpo de fundo, para manter a umidade relativa constante. Essa medida teve a finalidade de determinar a quantidade de água dessorvida para diferentes valores de umidade relativa no estado de equilíbrio, sendo obtida por meio do método gravimétrico.

Foram desenvolvidos recipientes para armazenar as amostras e a solução saturada, com dois níveis separados por uma superfície perfurada. No nível inferior foi colocada a solução e no superior as amostras, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Recipiente com dois níveis: inferior: solução saturada; superior: amostra.



Fonte: Autora (2020)

Foram obtidas amostras de argamassas de 5 mm de espessura e seção de 20x20 mm a partir de corpos de prova cilíndricos do ensaio de absorção de água. As amostras foram secas em estufa à 50°C por 72h e por seguinte pesadas.

Foram empregados seis sais diferentes: sulfato de potássio, cloreto de sódio, nitrato de sódio, cloreto de magnésio, acetato de potássio e hidróxido de potássio. Tais sais na temperatura ambiente (23±1°C), os quais apresentaram os seguintes valores de umidade relativa de equilíbrio: 96, 75, 64, 31, 23 e 6%, respectivamente.

A massa das amostras foi medida periodicamente no ambiente de maior umidade relativa até a sua constância. Depois de atingido o equilíbrio, as amostras foram transferidas para o próximo ambiente (segunda maior umidade relativa) para aferição da massa até sua constância. Esse procedimento foi repetido até completar o ensaio no ambiente de menor umidade relativa. Após esta etapa, as amostras foram secas em estufa até constância de massa em temperatura de 105°C para obtenção da massa seca.

A variação de umidade ocorrida ao longo do tempo em cada UR específica é dada pelo conteúdo mássico, de acordo com a Equação 6.

Equação 6 – Cálculo do conteúdo mássico da fase dessorvida

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

W: Conteúdo de umidade mássico (%);

m: Massa da amostra em equilíbrio (g);

m₀: Massa da amostra seca (g).

O método matemático de GAB foi utilizado para a obtenção do ajuste dos pontos experimentais a partir do método dos mínimos quadrados não lineares. Assim, para cada formulação de argamassa, os valores experimentais de conteúdo de umidade (W) obtidos para cada umidade relativa (h) foram inseridos na Equação 7 de GAB.

Equação 7 – Cálculo do volume adsorvido de água

$$W = \frac{W_m \times c \times k \times h}{(1 - k \times h)^c (1 + (c - 1) \times k \times h)} \quad (7)$$

Onde:

W: Volume adsorvido de água (umidade de equilíbrio) (g/g);

W_m: Conteúdo de umidade da monocamada (g/g);

c: Constante de energia relacionada à diferença de entalpia livre das moléculas de água nas camadas superiores de sorção (E_l) e na monocamada (E_i);

k: Relacionado com a diferença de entalpia livre de moléculas de água no líquido puro (E_m) e nas camadas superiores de sorção (E_l);

h: Umidade relativa.

Em seguida, foram calculados os valores de W_m, k e c que tornavam mínimo o erro quadrático do ajuste, ou R² (diferença entre o conteúdo mássico experimental e teórico obtido por GAB). O método foi testado utilizando o software Excel (Solver) da Microsoft.

A partir do W_m obtido pelo modelo de GAB para cada formulação, calculou-se a superfície específica das argamassas (SGAB), dada pela Equação 8. O raio limite, acima do qual ocorre apenas um aumento na espessura da camada adsorvida (não ocorre condensação) foi calculado a partir da Equação 9.

Equação 8 – Cálculo da superfície específica do material poroso

$$S = \frac{N_{avg} \times W_m \times A_m}{M} \quad (8)$$

Onde:

S: Área específica do material (m²/g);

Navg: Número de avogadro ($6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$);

Wm: Conteúdo mássico da formação de uma camada de moléculas (g/g);

M: massa molar da água (18,01528 g/mol);

Am: Área de recobrimento de uma molécula adsorvida (para água: $A_m = 10 (\text{Å}^\circ)^2 = 1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$).

Equação 9 – Cálculo do raio limite

$$r = \frac{-2 \times \sigma \times M}{\rho \times R \times T \times \ln(h)} + ea \quad (9)$$

Onde:

r: Raio de poro (m);

σ : Tensão superficial da água (N/m);

M: Massa molecular da água (g/mol);

ρ : Massa específica da água (g/m^3);

R: Constante universal dos gases perfeitos (J/mol.K);

T: Temperatura (K);

h: Umidade relativa do ambiente;

ea: Espessura de camada adsorvida (m).

A espessura da camada adsorvida é calculada conforme a Equação 10.

Equação 10 – Cálculo da espessura da camada adsorvida

$$ea = N \times em \quad (10)$$

Onde:

ea: espessura de camada adsorvida (m);

N: número de camadas adsorvidas;

em: espessura da monocamada adsorvida (m).

Considerando que a água adsorvida possua a mesma densidade que a água livre, e que a área de uma molécula de água adsorvida seja igual a 10\AA^2 ou $10 \times 10^{-20}\text{m}^2$, calcula-se a espessura da monocamada de acordo com a Equação 11 (FERNANDES, 1990):

Equação 11 – Cálculo da espessura da monocamada

$$em = \frac{M}{\rho \times am \times Navg} = 3\text{\AA} \quad (11)$$

O número de camadas adsorvidas pode ser calculado a partir da equação de GAB, conforme a Equação 12.

Equação 12 – Cálculo da espessura da monocamada

$$N = \frac{W}{Wm} = \frac{c \times k \times h}{(1 - k \times h) \times (1 + c \times k \times h - k \times h)} \quad (12)$$

3.2.4.3 Permeabilidade ao vapor de água

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor se seguiu a EN 1015-19 (2000), a qual aborda um ensaio para a determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas.

Podem-se destacar os seguintes utensílios de ensaio que foram utilizados: balança com precisão de 1mg, um vedante impermeável, um copo circular, solução saturada de sulfato de potássio (K_2SO_4) e solução saturada de hidróxido de potássio (KOH).

Para a execução do ensaio se produziu corpos de prova em forma de disco com espessura uniforme de 5 mm. Para cada mistura de argamassa se preparou 3 amostras que foram curadas por 42 dias. Diferente do indicado na norma, a cura não foi úmida, pois a argamassa estabilizada não endurece de forma normal, devido à presença do aditivo estabilizador de hidratação, e também, a intenção do trabalho é verificar o material como se ele fosse extraído de uma parede, imitando condições reais de obra. Visando isso, os corpos de prova foram deixados em ambiente de laboratório e desmoldados após 11 dias.

Logo, se produziram copos teste circulares para se encaixar os CP's, os quais foram selados nas aberturas para que a pressão do vapor de água no interior fosse diferente do ambiente exterior.

As soluções salinas foram adquiridas em forma sólida e foram posteriormente saturadas e dissolvidas em água destilada.

Para a realização do ensaio os copos foram preenchidos com K_2SO_4 , após, as amostras foram colocadas nos copos e vedadas, o controle da pressão de vapor foi feito com o uso de KOH. Foi deixada uma folga de ar entre as amostras e a solução. Após, os copos foram mantidos em ambiente de laboratório com temperatura de $23\pm 2^\circ C$ e umidade relativa de $60\pm 5\%$.

O ensaio terminou quando a quantidade de vapor de água que passava pela amostra por unidade de tempo se tornou constante. A seguir nas equações 13, 14, 15, 16 e 17, expõem-se as fórmulas para se obter a permeabilidade ao vapor, conforme detalhadas no estudo de Temp (2014).

Equação 13 – Cálculo do fluxo de vapor e permeância

$$\text{Fluxo de vapor} = \frac{\Delta G}{\Delta t}; \quad \Lambda = \frac{1}{A\Delta p/(\Delta g/\Delta t) - Ra} \quad (13)$$

Onde:

A: Área da abertura do copo de ensaio (m^2);

Δp : Diferença de pressão do vapor entre ambiente e solução saturada (Pa);

$\Delta G/\Delta t$: Fluxo do vapor de água (kg/s);

Λ : Permeância ao vapor de água ($kg/m^2.s.Pa$)

Ra: Resistência ao vapor de água da folga de ar entre a proveta e a solução (0,048.09Pa.m² s/kg por 10mm de folga).

Equação 14 – Cálculo da pressão de cada um dos ambientes (Δp)

$$P = P_s \times \frac{HR}{100} \quad (14)$$

Onde:

P: Pressão de cada um dos ambientes (Pa);

Ps: Pressão parcial de saturação (22°C = 2640 Pa).

Equação 15 – Cálculo da permeabilidade

$$p = \Delta \times e \quad (15)$$

Onde:

p: Permeabilidade (kg/m.s.Pa);

Δ : Permeância ao vapor de água (kg/m².s.Pa);

e: Espessura do corpo de prova (m).

Equação 16 – Cálculo da espessura da camada de ar de difusão equivalente

$$Sd = 1,95 \times 10^{-10} \times \frac{e}{\pi} \quad (16)$$

Onde:

Sd: Espessura da camada de ar de difusão equivalente (m);

e: Espessura do corpo de prova (m).

Equação 17 – Cálculo do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

$$\mu = 1,94 \times 10^{-10} / \Delta \quad (17)$$

Onde:

μ : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água;

Δ : Permeância ao vapor de água (kg/m².s.Pa).

3.3 MÉTODO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise estatística foi realizada para os resultados obtidos nos ensaios de reologia (viscosidade aparente), resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água por capilaridade, para se obter maior confiabilidade nos dados.

O tratamento estatístico realizado nos resultados deste trabalho se fez por meio da aplicação do método de análise de variância *Factorial ANOVA*. Esta análise é proposta com significância estatística com 95% de confiança, usando o *software STATISTICA 8.0*, o qual busca avaliar se os fatores de controle causam efeitos significativos na variável de resposta medida.

Em grupos de resultados que se mostraram pertinentes foi realizado o teste de *Tukey*. Analisou-se se os dados obtidos na pesquisa foram estatisticamente iguais ou diferentes e fez-se possível determinar quais foram às técnicas que oferecem os melhores resultados. Esse método é usado para testar toda e qualquer diferença significativa entre duas médias de tratamento, ou seja, não permite comparar grupos entre si. O teste baseia-se na diferença mínima significativa, onde se considera um nível de significância de 5%. Ele consiste na construção de intervalos de confiança para todos os pares de médias de tal forma que o conjunto dos intervalos tenha um grau de confiança de 95%.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são descritos os resultados obtidos nas três etapas do trabalho experimental, além da caracterização dos materiais. Ainda, análises comparativas e discussões pertinentes ao estudo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Aglomerantes

Os aglomerantes utilizados foram caracterizados fisicamente em relação à massa específica, área superficial específica, teor de umidade e tamanho de partícula. Na Tabela 17, encontram-se os resultados resumidos da caracterização física do cimento e do fosfogesso. O tempo de pega do cimento e a sua caracterização mecânica estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 17 – Resumo das características físicas do cimento e fosfogesso

Material	Massa específica (g/cm ³)	Área específica Blaine (cm ² /g)	Teor de umidade (%)	d ₅₀ (µm)	d ₇₅ (µm)	d ₉₀ (µm)
CP II F-32	3,030	4239	-	6,69	0,78	NA
FG	2,450	3579	13,07	5,07	6,58	8,03

Fonte: AUTORA (2021).

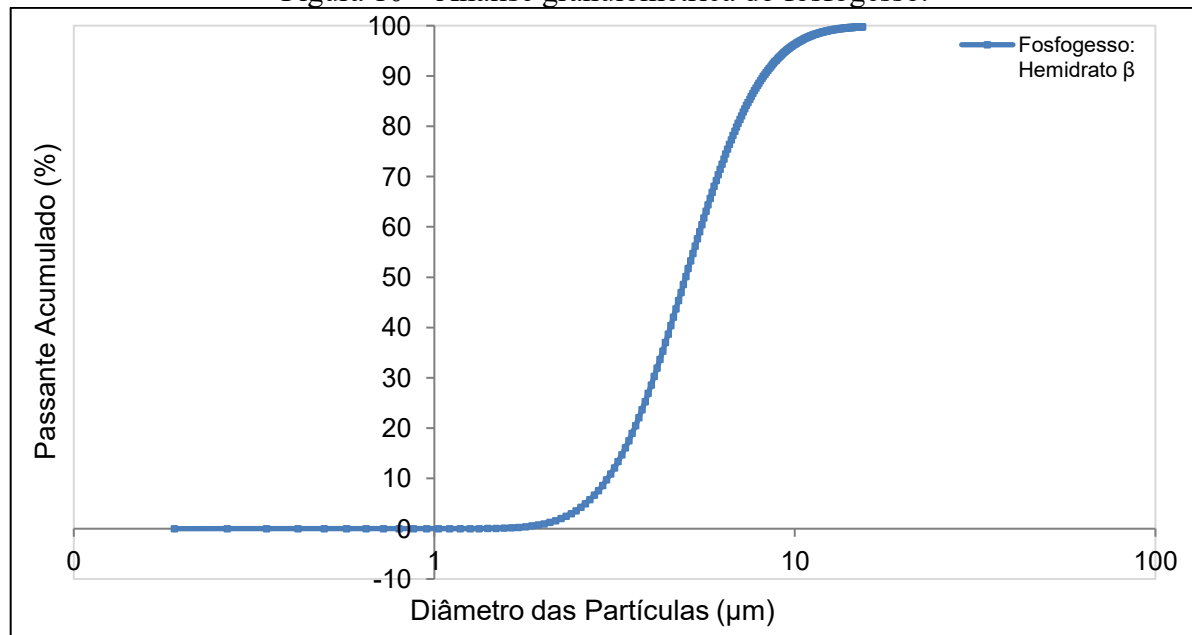
Tabela 18 – Caracterização complementar do cimento CP II F-32

Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
260	312	15,4	26,4	30,4	35,1

Fonte: FABRICANTE (2021).

A análise granulométrica do fosfogesso pode ser observada na Figura 10. O resultado mostra que a amostra estudada é fina (<100 µm).

Figura 10 – Análise granulométrica do fosfogesso.



Fonte: Autora (2020)

A partir das características observadas nos resultados, percebe-se grande diferença entre as massas específicas dos aglomerantes, que variaram de acordo com a natureza de cada material. Ainda, o fosfogesso apresenta uma distribuição granulométrica mais grosseira do que a do cimento.

A composição química do cimento foi fornecida pelo fabricante e a do FG foi obtida pelo ensaio de espectroscopia de raios-x por dispersão em energia (EDX), conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Composição química do cimento e do FG

Constituintes	CP II F-32 (%)	FG (%)
SiO ₂	15,700	1,221
Al ₂ O ₃	4,000	-
Fe ₂ O ₃	2,800	1,122
CaO	59,100	42,604
MgO	5,100	-
SO ₃	2,400	52,608
K ₂ O	0,940	-
Na ₂ O	0,200	-
CO ₂	8,900	-
BaO	-	1,070
SrO	-	0,934
Nd ₂ O ₃	-	0,268
TiO ₂	-	0,073
ZrO ₂	-	0,039
NbO	-	0,026
CuO	-	0,019
Y ₂ O ₃	-	0,017

Fonte: AUTORA (2021).

Como se pode observar na Tabela 19, os principais óxidos que compõem o fosfogesso são o CaO e o SO₃, que formam o sulfato de cálcio. Outros óxidos metálicos são encontrados em pequenas quantidades.

4.1.2 Agregado

As areias utilizadas para a produção das argamassas foram caracterizadas fisicamente. Os resultados estão expostos nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Caracterização física das areias

Material	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (kg/m³)	Teor de umidade (%)
Areia Fina	2,646	1448,551	4,38
Areia Média	2,653	1473,127	9,19

Fonte: AUTORA (2021).

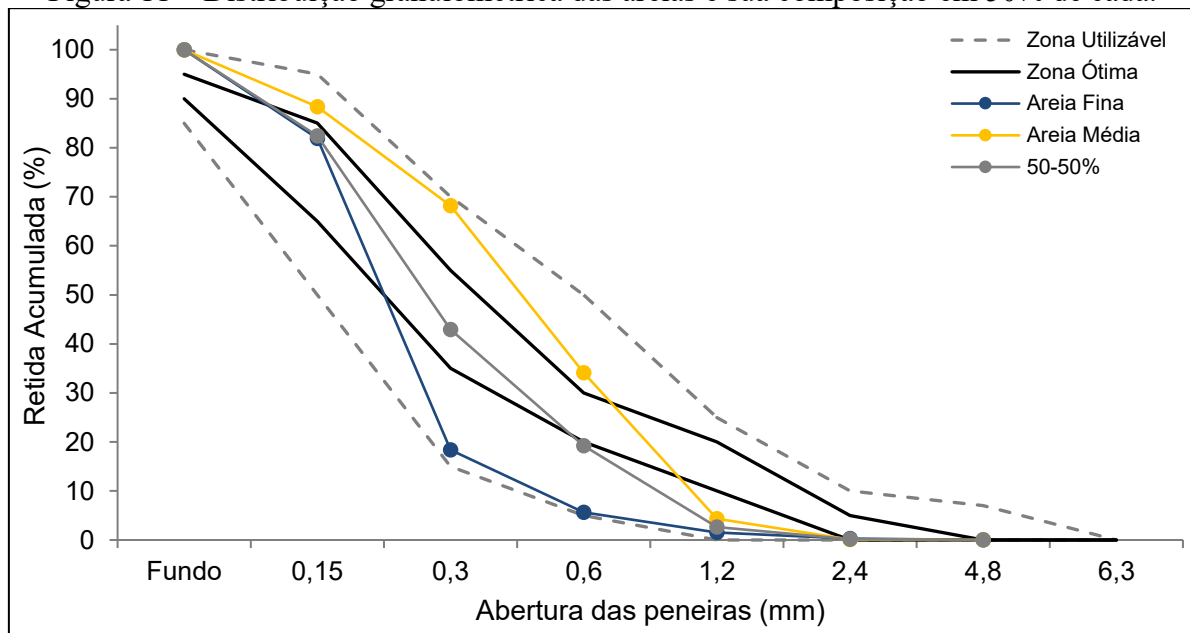
Tabela 21 – Composição granulométrica das areias

Peneiras (mm)	Retida acumulada (%)		
	Areia Fina	Areia Média	Fina-Média (50%-50%)
4,8	0,02%	0,00%	0,00%
2,4	0,30%	0,09%	0,15%
1,2	1,50%	4,32%	2,64%
0,6	5,65%	34,12%	19,24%
0,3	18,40%	68,20%	42,93%
0,15	81,91%	88,34%	82,45%
Fundo	100,00%	99,97%	99,99%
Diâmetro máximo (mm)	1,2	1,2	1,2
Módulo de finura (%)	1,08	1,95	1,47

Fonte: AUTORA (2021).

As massas específicas das areias são muito semelhantes, pois as duas areias são compostas por grãos de quartzo. As curvas granulométricas das areias e da composição entre elas estão expostas na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição granulométrica das areias e sua composição em 50% de cada.



Fonte: Autora (2020)

4.1.3 Aditivos químicos

Na Tabela 22 tem-se a caracterização química e física do aditivo estabilizador de hidratação e do incorporador de ar.

Tabela 22 – Características químicas do AEH e AIA

Teste	Aditivo estabilizador de hidratação	Aditivo incorporador de ar
Densidade de líquidos (g/mL)	1,18	1,00
pH	4,94	10,19
Teor de sólidos (%)	44,38	5,65
Análise visual de cor	Castanho escuro médio	Amarelo a castanho claro
Base química	Composição de sacarose e gluconato de sódio	Surfactante aniônico

Fonte: FABRICANTE (2020).

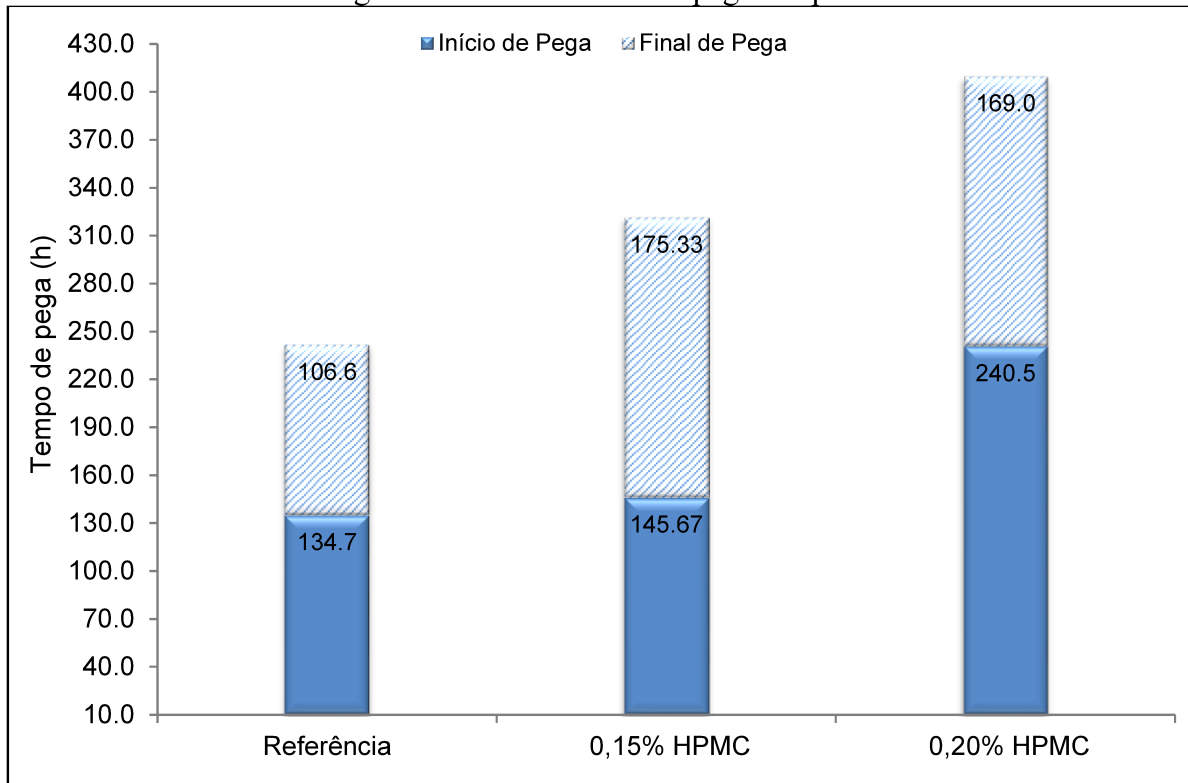
Já o aditivo retentor de água (HPMC) utilizado tem seu estado físico em pó, com coloração branca e é solúvel em água. É um polímero (éter de celulose) de alto peso molecular com faixa de concentração de 100%.

4.2 ETAPA 1 – ANÁLISE DO EFEITO DO FG E HPMC NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO E CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DAS PASTAS

4.2.1 Avaliação do tempo de pega

A avaliação do início e final de pega foi estudada nas pastas cimentícias com o teor fixo de AEH de 1,2% (na massa do cimento), objetivando a estabilização de 72h, ou seja, simulando as argamassas estabilizadas pelo maior período. As mesmas foram estabilizadas por três dias e após, foram submetidas ao ensaio de penetração pela agulha de Vicat. Os tempos de pega podem ser compreendidos na Figura 12.

Figura 12 – Início e final de pega das pastas.



Fonte: Autora (2020)

Analisando a Figura 12, percebe-se que conforme se adicionou o aditivo retentor de água ocorreu um aumento nos tempos de pega, contribuindo para o retardo da hidratação do cimento. Esse efeito do HPMC foi relatado em estudos anteriores, onde o conteúdo de metoxila foi o principal parâmetro referente ao atraso na precipitação da Portlandita, induzido pelo uso dos aditivos de hidroxipropil e o hidroxietil metil celulose (POURCHEZ *et al.*, 2006).

Mendes e Piovesan (2020) obtiveram um início de pega de 41,91h para argamassas estabilizadas com o mesmo cimento utilizado nessa pesquisa, CP II F e com 1,7% de AEH. Tempo esse inferior aos obtidos neste estudo, onde o AEH em dosagem menor (1,2%) teve um início de pega de 134,7h para o traço sem HPMC. Porém a base química do AEH utilizado no estudo de Mendes e Piovesan (2020) não foi citada, fator esse, que interfere diretamente no prolongamento da hidratação do cimento. Além disso, realizaram o ensaio em argamassas, podendo ter interferência da areia e da cal nos resultados obtidos.

Outro fator que contribuiu para os elevados tempos de pega encontrados nesta pesquisa foi à utilização de fosfogesso, o qual é constituído principalmente por sulfato de

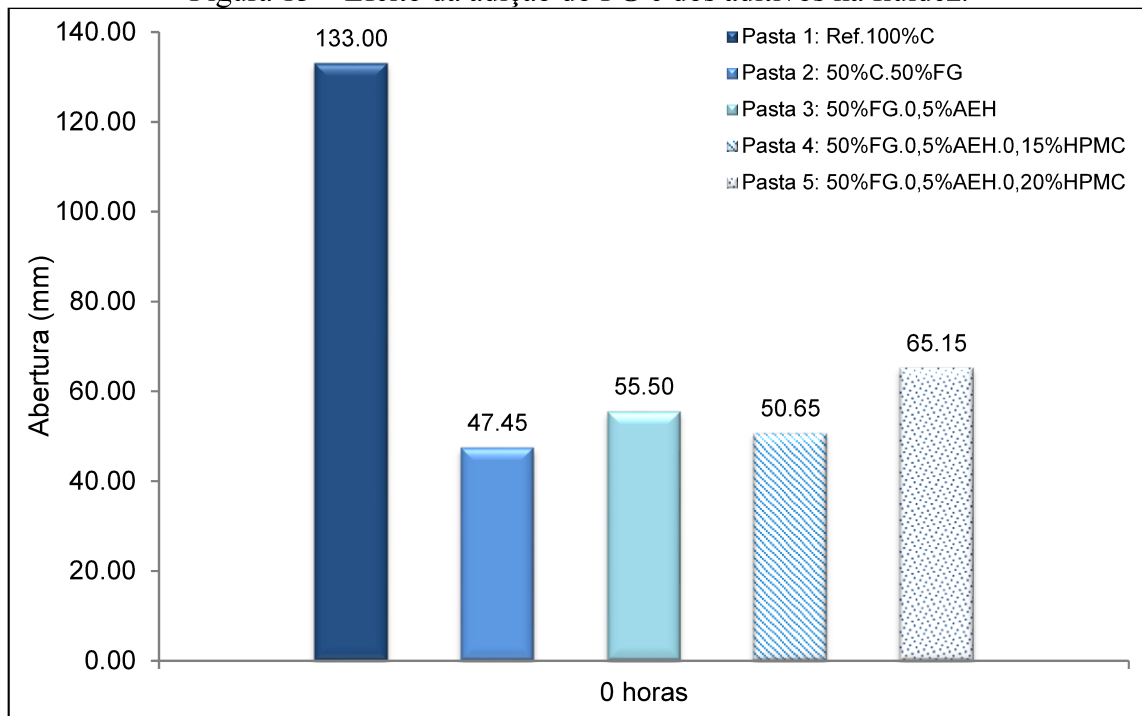
cálcio, que tem função de regular a pega do cimento. Ao entrar em contato com o C_3A , o sulfato de cálcio forma cristais muito finos de etringita, que criam uma membrana protetora ao redor das partículas de cimento. Essa membrana dificulta seu contato com a água, retardando assim seu processo de hidrólise e a consequente formação do aluminato hidratado, pois enquanto houver íons SO_4^{2-} a etringita é formada lentamente (BAUER, 2000; PEREIRA, 2010; NEVILLE, 2015).

Segundo Milito (2001) a velocidade do endurecimento dos materiais cimentícios com gesso depende da temperatura, do tempo de calcinação, da finura, da quantidade de água de amassamento e da presença de aditivos e impurezas. Ainda, os gessos de elevada finura contribuem para uma pega mais rápida e atingem maiores resistências, em razão do aumento da superfície específica disponível para a hidratação. No entanto, o fosfogesso desse estudo não apresenta uma elevada finura, com área de superfície específica ($3579 \text{ cm}^2/\text{g}$) menor que a do cimento ($4239 \text{ cm}^2/\text{g}$). Mas é composto por impurezas que diminuem a velocidade de endurecimento.

4.2.2 Análise da perda de fluidez ao longo do tempo

As pastas foram avaliadas pelo método do mini-slump com o objetivo de caracterizar de maneira simplificada o efeito do FG e dos aditivos na fluidez das amostras. As aberturas das pastas em 0 hora podem ser observadas na Figura 13.

Figura 13 – Efeito da adição do FG e dos aditivos na fluidez.



Fonte: Autora (2020)

A maior abertura no espalhamento foi alcançada com a pasta de cimento e água. Quando se substitui o cimento pelo fosfogesso (1:1) fica evidente a redução na fluidez causada pelo aglomerante em 64,32%, devido a maior necessidade de água do FG, mostrando-se um material poroso. Ao adicionar o aditivo estabilizador de hidratação se pode perceber um aumento na abertura de 16,96% comparado à Pasta 2, o que pode ser atribuído à função desse aditivo de evitar a perda de trabalhabilidade da mistura no estado fresco, sugerindo um aspecto plastificante.

Quando se adiciona o HPMC em 0,15% há uma redução na abertura de 8,73% comparado à Pasta 3, mas quando se aumenta a adição para 0,20% ocorre um aumento na abertura de 28,62% em comparação à Pasta 4. Sendo a Pasta 5, a mistura com menor redução na fluidez em relação à mistura de cimento e água, indicando que a adição de HPMC nessa porcentagem contribui para o aumento da fluidez.

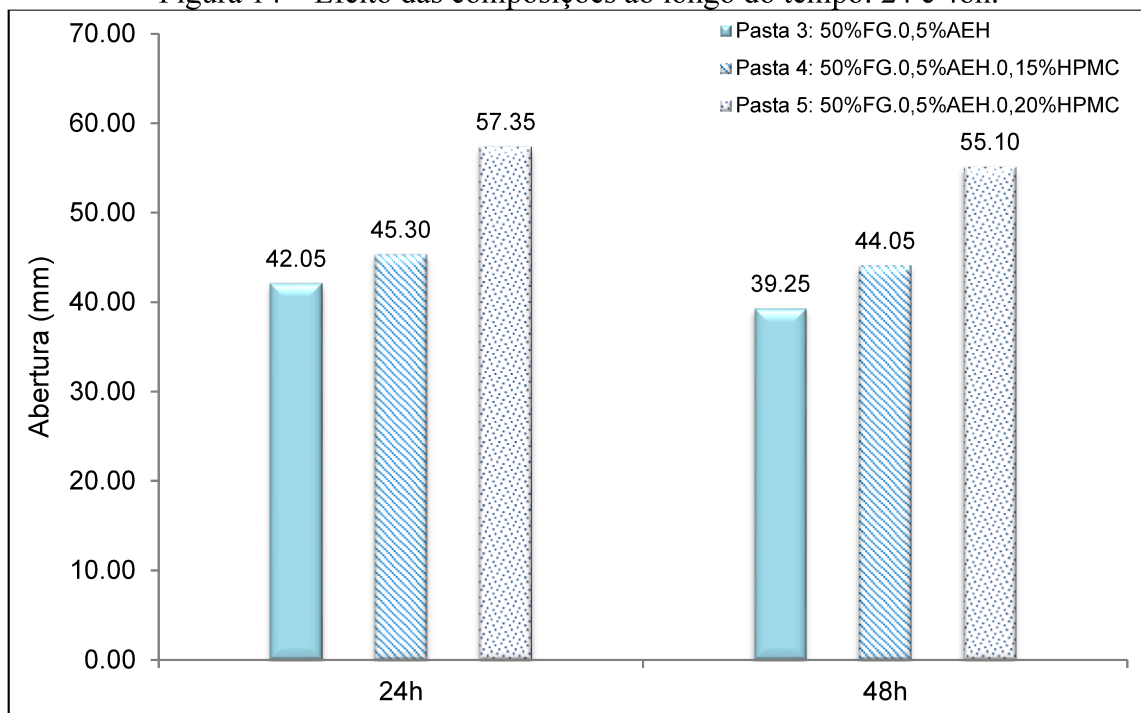
O estudo da fluidez ao longo do tempo foi feito para as pastas 3, 4 e 5, pois as pastas sem aditivo estabilizador de hidratação endureceram no mesmo dia. Os resultados da abertura ao longo do tempo se encontram na Tabela 23 e Figura 14.

Tabela 23 – Abertura das pastas ao longo do tempo

Nomenclatura	Abertura (mm)		
	0 horas	24h	48h
Ref. 100%C	133,00	Endureceu	Endureceu
50%C.50%FG	47,45	Endureceu	Endureceu
50%FG.0,5%AEH	55,50	42,05	39,25
50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC	50,65	45,30	44,05
50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC	65,15	57,35	55,10

Fonte: AUTORA (2021).

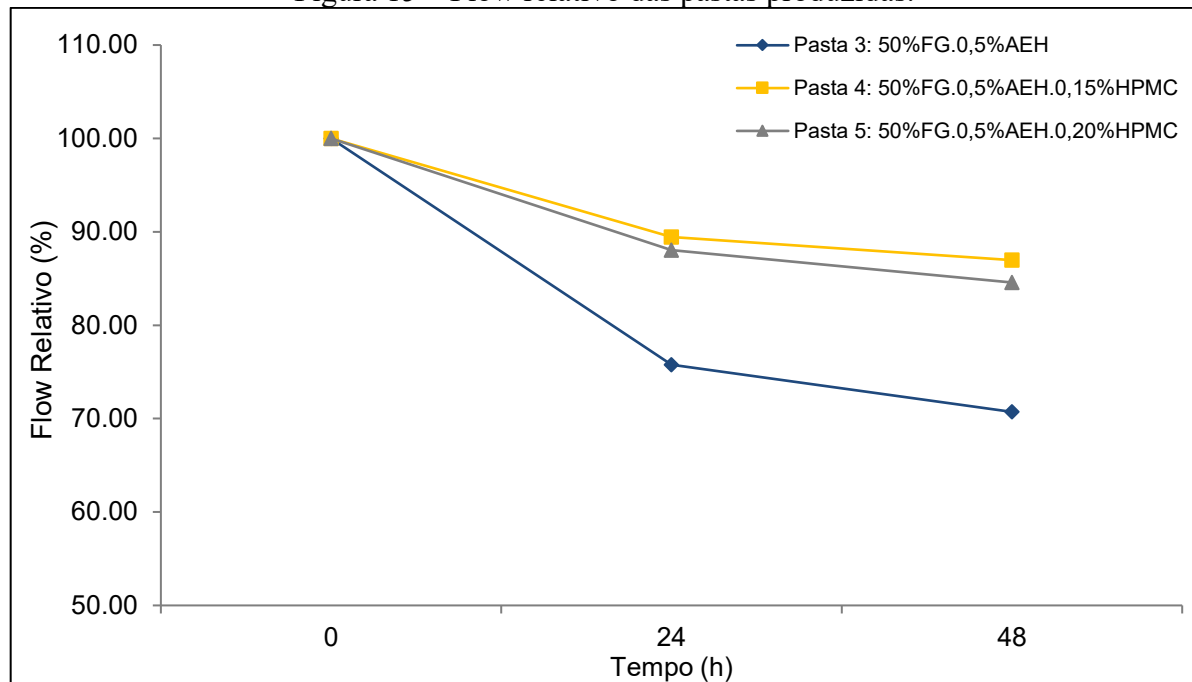
Figura 14 – Efeito das composições ao longo do tempo: 24 e 48h.



Fonte: Autora (2020)

Na Figura 15, tem-se o gráfico com o flow relativo das pastas até 48 horas, onde está apresentada a redução percentual da fluidez ao longo do tempo de estabilização.

Figura 15 – Flow relativo das pastas produzidas.

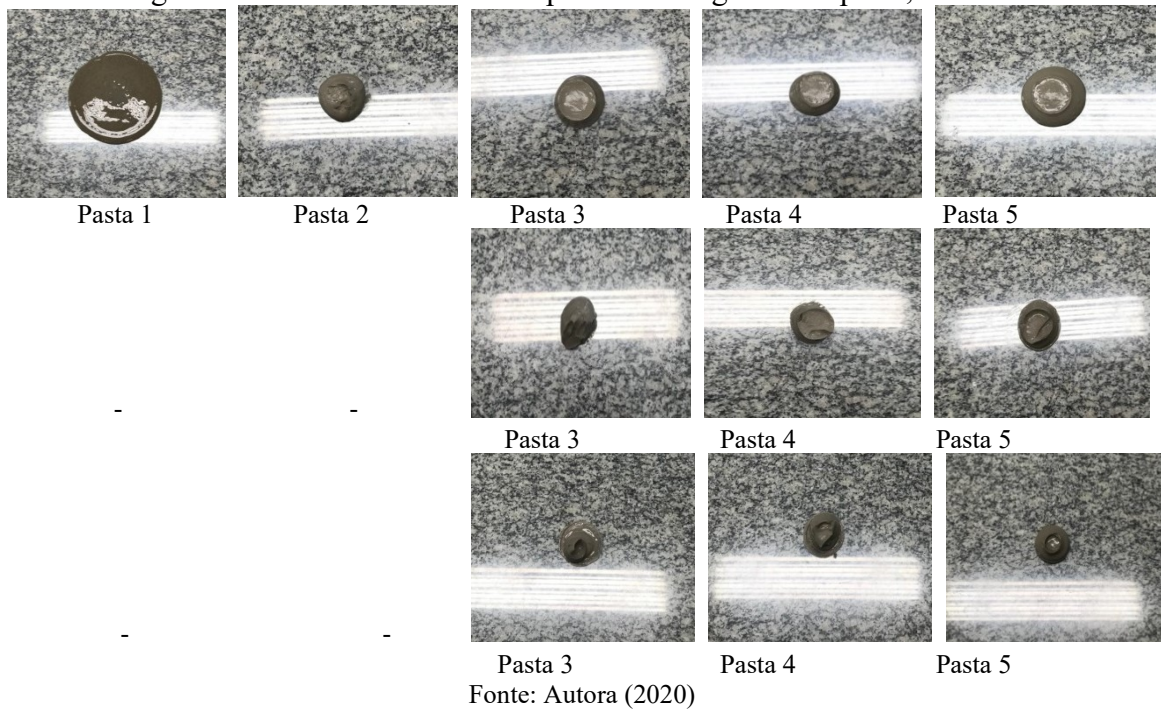


Fonte: Autora (2021)

As pastas com aditivo retentor de água contribuiram para a manutenção da fluidez ao longo do tempo. A Pasta 5 com 0,20% de HPMC foi a que obteve maior abertura em 48h com 55,10 mm e a Pasta 4 foi a que menos reduziu o percentual de fluidez ao longo do tempo, 13,03% em 48h. Ficando evidente o efeito do retentor de água de evitar a perda de água durante a estabilização, melhorando a trabalhabilidade e contribuindo para a manutenção da fluidez, quando comparada a Pasta 3 sem HPMC.

Na Figura 16, pode-se perceber a redução na fluidez e o aspecto visual das pastas ao longo do tempo de estabilização, até 48 horas.

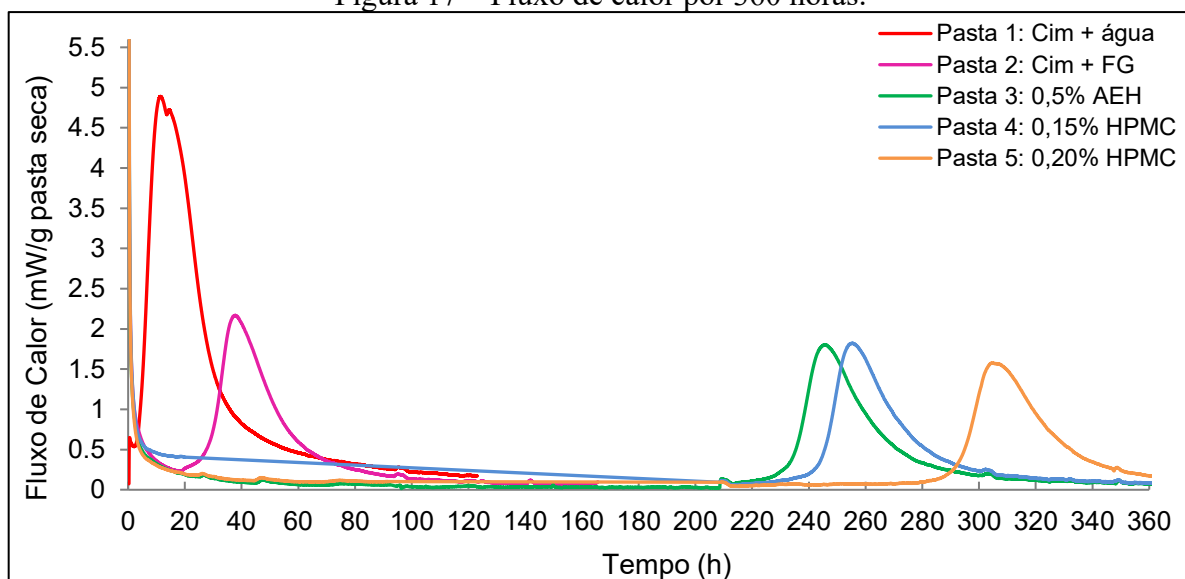
Figura 16 – Perda de fluidez das pastas ao longo do tempo: 0, 24 e 48h.



4.2.3 Cinética de hidratação

Os resultados da avaliação da cinética de hidratação por calorimetria isotérmica das pastas estão expostos na Figura 17.

Figura 17 – Fluxo de calor por 360 horas.



A amostra só com cimento (Pasta 1) apresentou início de pega nas primeiras horas iniciais (até 5h) e um fluxo de calor máximo de 4,89 mW/g. Quando se substituiu o cimento por FG houve um atraso no início de pega (para mais de 20h) e uma redução no pico de fluxo de calor máximo, chegando a 2,16 mW/g.

Na presença do aditivo estabilizador de hidratação (base química de gluconato de sódio e sacarose), o tempo de início de pega foi prolongado para até 230h e com a adição do retentor de água em 0,15% se estendeu até 240h. Ainda, com 0,20% de HPMC se obteve o maior tempo para a retomada da hidratação do cimento, com 285h. Ficando evidente a contribuição do fosfogesso e do aditivo retentor de água no prolongamento das reações de hidratação do cimento Portland com aditivo estabilizador de hidratação.

Este feito do fosfogesso também foi observado no estudo de Costa *et al.* (2021), onde analisaram a hidratação de cimentos ternários com fosfogesso, em adições de 1 a 10% e a/c 0,55. Os tempos de início de pega foram maiores conforme o aumento do teor de FG, o período de indução aumentou de 40 min com 5% para 3h com 10% de FG. Isso ocorreu devido à presença de sulfato de cálcio e impurezas de fósforo na composição do FG, aumentando a concentração de íons cálcio na solução, a deposição de hidratos e a adsorção de íons fosfato na superfície dos grãos de cimento. O maior teor de FG favoreceu a dissolução de silicato tricálcico no sistema e a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Quanto ao aditivo estabilizador de hidratação, Ma *et al.* (2015) relatam que a incorporação de gluconato de sódio altera significativamente a cinética de hidratação do cimento Portland. O gluconato de sódio prolonga o período de indução e retarda a reação do C₃S. Com apenas 0,1% de gluconato de sódio o início de pega foi prolongado para mais de 10h. Ainda o aumento da dosagem desse aditivo diminuiu significativamente o pico de calor máximo liberado.

O comportamento do HPMC observado nesta pesquisa se encontra em consonância com o estudo de Ou *et al.* (2012). Observaram a evolução de calor em 72h para pastas de cimento (a/c 0,45) com éteres de celulose (HPMC, HEMC, HEC e MC). Os éteres de celulose retardaram a hidratação do cimento em idades precoces, estenderam o período de indução, diminuíram a taxa de calor de hidratação durante o período de aceleração e o valor do pico de calor máximo. Durante o período de desaceleração, a taxa do calor de hidratação nas pastas com éteres de celulose foram maiores do que na pasta de cimento.

Segundo Pourchez *et al.* (2006), o conteúdo de metoxila é o parâmetro principal em relação ao atraso induzido por HPMC e HEMC, o tempo de retardo aumenta com a diminuição do conteúdo de metoxila, já o peso molecular e o conteúdo de hidroxipropila têm pequeno impacto no retardo da hidratação do cimento.

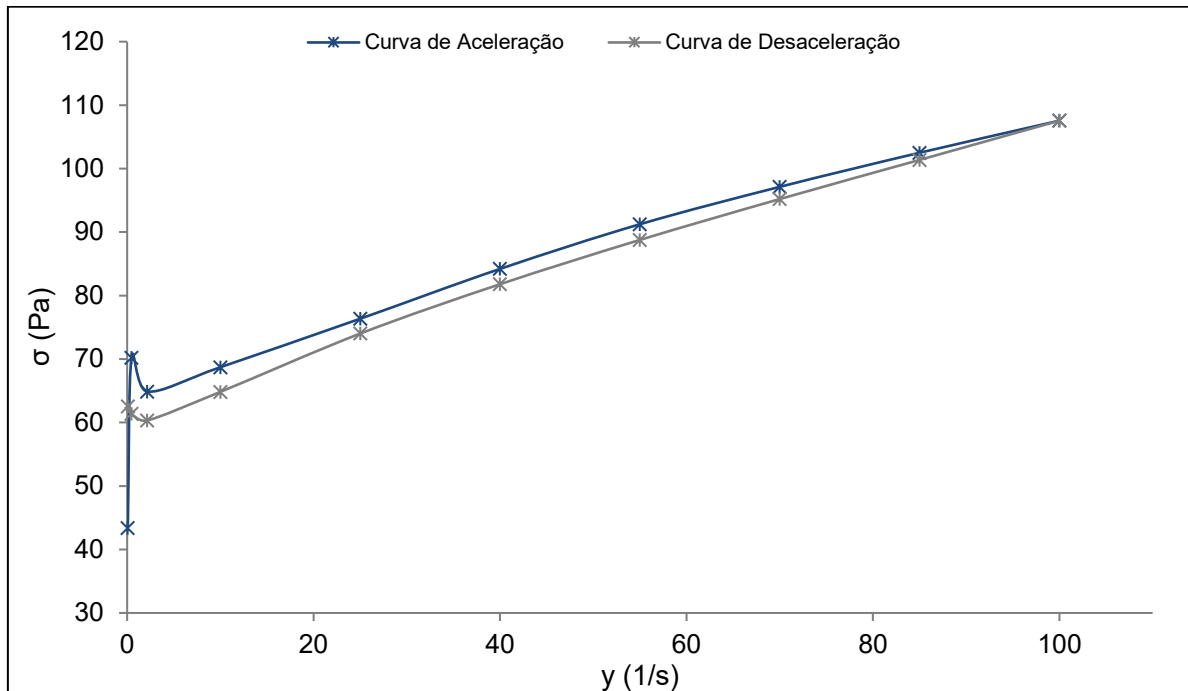
Outra causa considerada determinante para o retardo causado pelos éteres de celulose é o fenômeno de adsorção. A maioria dos aditivos orgânicos adicionados em pastas de cimento apresenta afinidade com a superfície das partículas de cimento e produtos de hidratação do cimento. Fator esse, que evita a dissolução das partículas de cimento e a precipitação dos produtos de hidratação e, logo, influencia a taxa de hidratação e pega do cimento (OU *et al.*, 2012).

4.2.4 Estudo reológico

Em um primeiro momento foram analisadas as curvas de fluxo das pastas considerando os ciclos ascendente e descendente, a partir disso foi observada a heterogeneidade dos resultados dos ciclos ascendentes, escolhendo-se trabalhar com os ciclos descendentes.

A Figura 18 apresenta as curvas de fluxo realizada para o ensaio de reologia, onde se pode observar que para o ciclo descendente (desaceleração), a redução da taxa de cisalhamento implicou decréscimos das tensões. No entanto, esse comportamento não seguiu uma correlação linear, optando-se pelo o uso do modelo de Herschel-Bulkley a fim de se obter os valores de tensão de escoamento e de viscosidade mais exatos.

Figura 18 – Exemplificação das curvas de fluxo do ensaio de reologia analisadas a partir do ciclo ascendente e descendente.



Fonte: Autora (2021)

A partir da curva descendente, obtiveram-se os parâmetros reológicos das pastas ao longo do tempo de estabilização. As pastas sem aditivo estabilizador de hidratação foram avaliadas apenas em 0h, devido ao endurecimento das mesmas. O índice de comportamento do fluido é apresentado na Tabela 24. A tensão de escoamento inicial dinâmica e a viscosidade aparente se encontram na Tabela 25.

Tabela 24 – Índice de comportamento do fluido (n)

Amostra	Nomenclatura	n		
		0h	24h	48h
Pasta 1	Ref. 100%C	0,545	Endureceu	Endureceu
Pasta 2	50%C.50%FG	0,640	Endureceu	Endureceu
Pasta 3	50%FG.0,5%AEH	0,433	0,499	0,895
Pasta 4	50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC	0,856	0,774	1,185
Pasta 5	50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC	0,805	1,204	1,802

Fonte: AUTORA (2021).

Com base no índice de comportamento do fluido (Tabela 24), as pastas cimentícias apresentam comportamento pseudoplástico ($n < 1$), com exceção da Pasta 5 em 24h e 48h e da

Pasta 4 em 48h, onde ao longo do tempo de estabilização apresentaram comportamento dilatante ($n > 1$).

Tabela 25 – Parâmetros reológicos

Nomenclatura	σ (Pa)			η (Pa.s)		
	0h	24h	48h	0h	24h	48h
Ref. 100%C	1,807	Endureceu	Endureceu	0,0512	Endureceu	Endureceu
50%C.50%FG	614,00	Endureceu	Endureceu	2,1468	Endureceu	Endureceu
50%FG.0,5%AEH	70,75	330,00	173,80	0,8210	2,7257	1,7946
50%FG.0,5%AEH. 0,15%HPMC	104,30	344,50	545,90	0,5269	1,4059	1,0083
50%FG.0,5%AEH. 0,20%HPMC	57,69	214,90	325,30	0,5340	0,6509	0,4530

σ : Tensão de escoamento inicial dinâmica; η : Viscosidade aparente.

Fonte: AUTORA (2021).

É possível observar na Tabela 25 que a tensão de escoamento inicial dinâmica aumentou drasticamente quando se substituiu o cimento pelo FG (Pasta 2), de 1,807 Pa para 614,0 Pa. Permitindo inferir que esse aglomerante promove um aumento na tensão mínima necessária a ser aplicada para que possibilite a pasta fluir.

Quando se adicionou o aditivo estabilizador de hidratação a tensão de escoamento reduziu em 88,47% em comparação à Pasta 2, indicando que o AEH atuou favorecendo a fluidez e reduzindo o atrito interno entre as partículas de cimento e FG.

Com a adição de 0,15% de HPMC a tensão mínima necessária a ser aplicada para a pasta fluir aumentou em 47,42% em comparação à Pasta 3. Devido ao HPMC ser um agente espessante que pode modificar os parâmetros reológicos das misturas. No entanto, com 0,20% de HPMC ocorreu uma redução na tensão de escoamento de 44,68% em comparação à Pasta 4 com 0,15% de HPMC. Este comportamento também pode ser observado no estudo de mini-slump, onde a Pasta 5 com 0,20% de HPMC teve maior abertura durante todo o tempo de estabilização (até 48h) do que a Pasta 4, contribuindo para a fluidez da mistura.

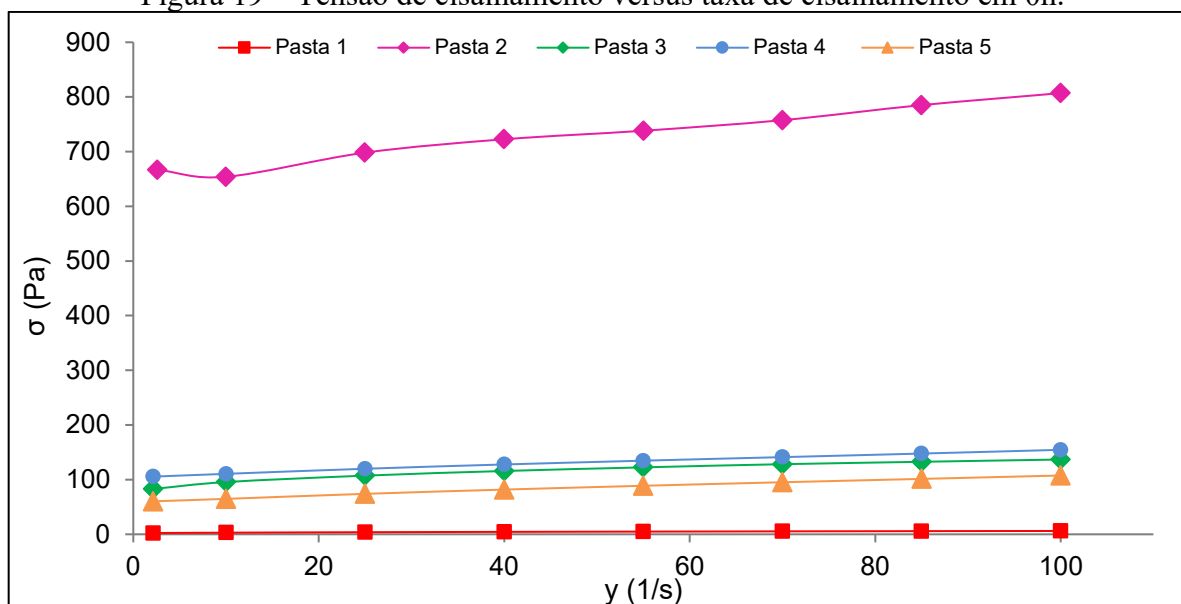
A tensão de escoamento inicial dinâmica aumentou para todas as pastas em 24h. O mesmo ocorreu para as pastas em 48h, com exceção da Pasta 3 que diminuiu de 24h para 48h em 47,33%, respectivamente.

Quanto à viscosidade aparente, para todas as pastas houve um aumento nessa propriedade em 24h e uma redução em 48h. O mesmo foi observado por Guindani (2018),

onde as pastas com cimento e 0,5% de aditivo estabilizador de hidratação apresentaram um aumento expressivo na viscosidade até 24h e em 48h a viscosidade foi reduzida.

Nas Figuras 19, 20 e 21 encontram-se os resultados da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento das pastas ao longo do tempo.

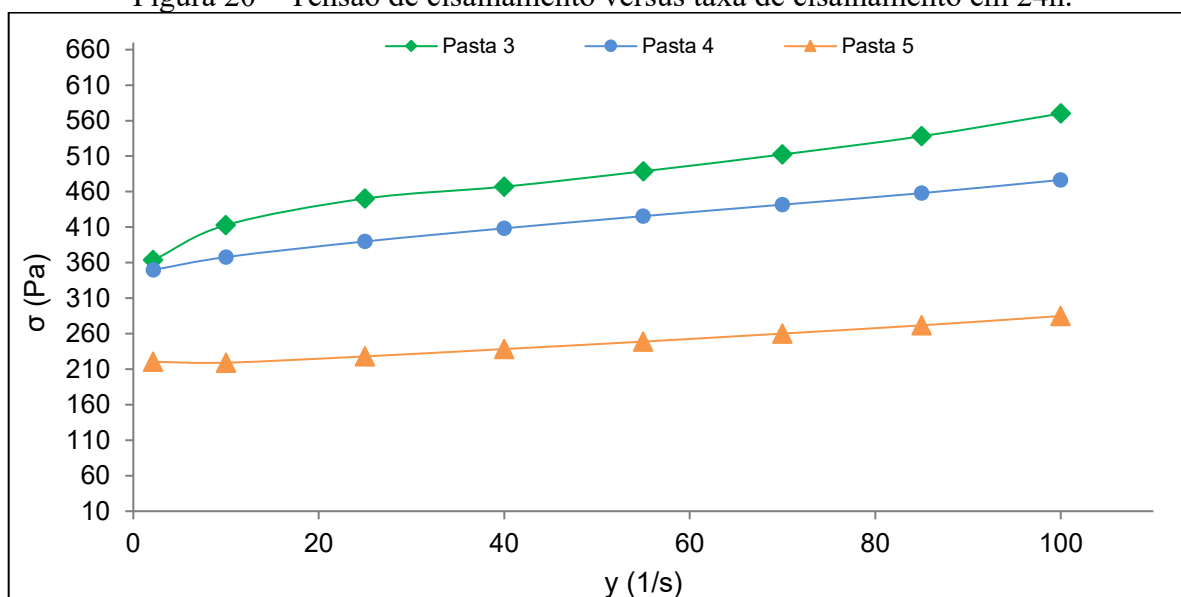
Figura 19 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 0h.



Pasta 1: Ref.100%C; Pasta 2: 50%C.50%FG; Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.

Fonte: Autora (2021)

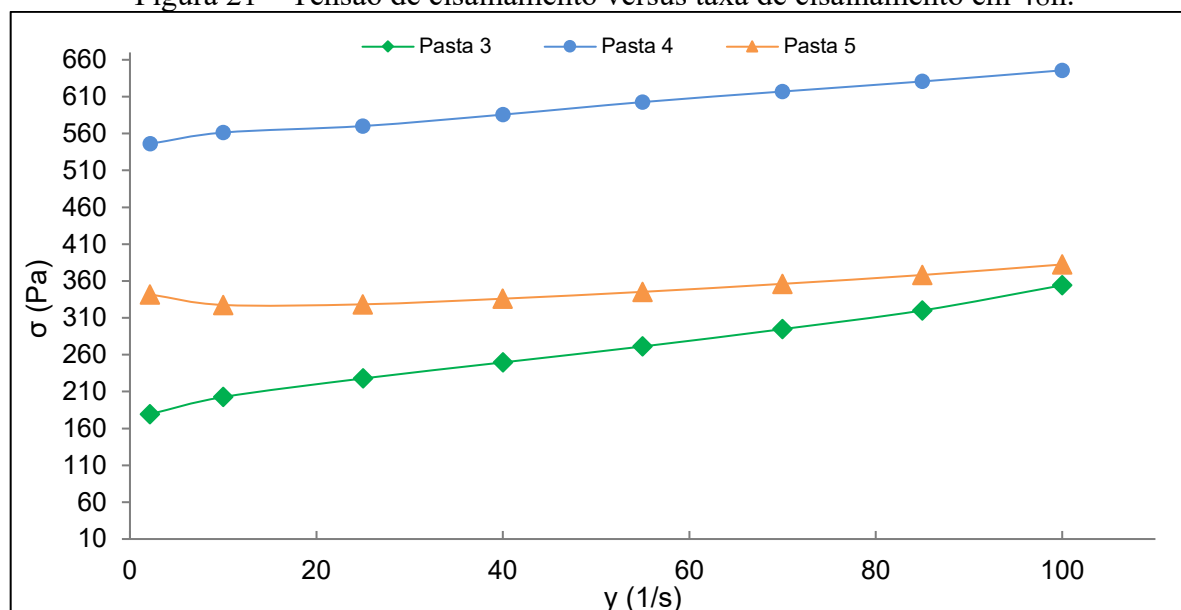
Figura 20 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 24h.



Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.

Fonte: Autora (2021)

Figura 21 – Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento em 48h.



Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.
Fonte: Autora (2021)

Analisando a tensão pela taxa de cisalhamento em 0h, tem-se que a tensão de cisalhamento aumentou significativamente quando se substituiu o cimento por FG (Pasta 2). Os compostos hidratados do cimento Portland, como o C-S-H, podem ter contribuído para o intertravamento dos cristais de di-hidrato produzidos na mistura com sulfato de cálcio, conduzindo dessa forma a uma estrutura mais densa e fechada, até mesmo evitando a dissolução completa em água. Necessitando de uma maior tensão de escoamento inicial a ser aplicada para a pasta fluir, aumentando a tensão de escoamento pela taxa de cisalhamento e consequentemente a viscosidade aparente (Figura 22), causando redução na fluidez da pasta.

Outro fator que pode ter contribuído é o efeito combinado do tamanho e forma das partículas do FG, as partículas mais grosseiras e irregulares podem facilitar a formação de uma estrutura de aglomerados estáveis, aumentando o atrito sólido entre as partículas e exigindo uma força de cisalhamento maior para destruir (JIANG *et al.*, 2019).

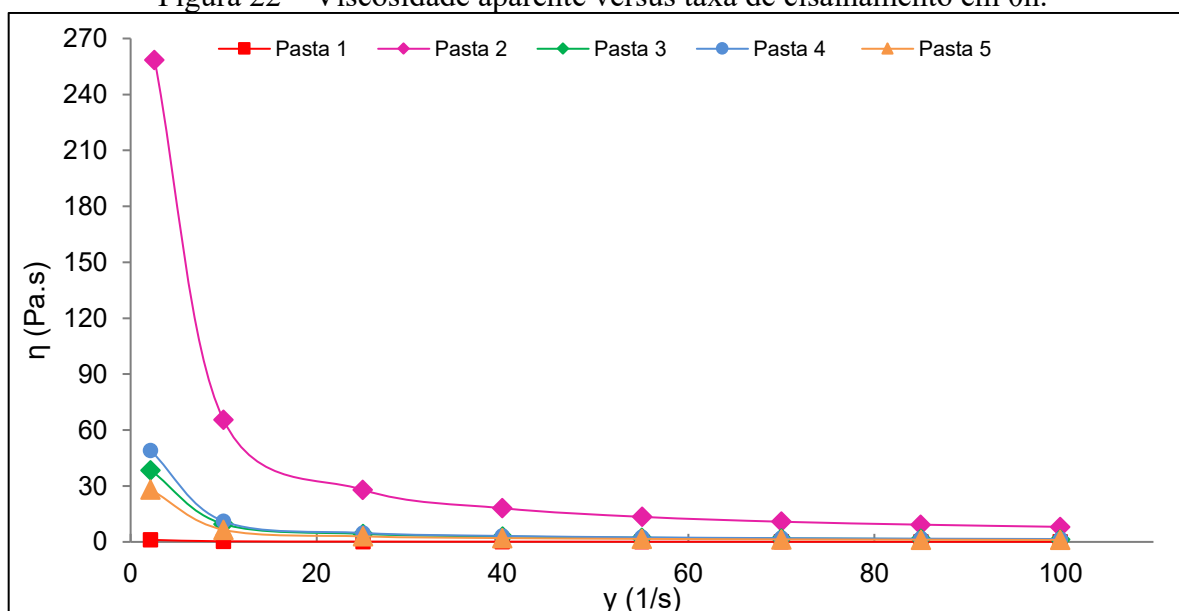
Já quando se adicionou o aditivo estabilizador de hidratação as tensões diminuíram, essa redução da tensão pela taxa de cisalhamento com a presença do aditivo estabilizador também foi observada no estudo de Guindani (2018). Tan *et al.* (2017b) relatam que o aumento da dosagem de aditivo estabilizador (base de gluconato de sódio) reduziu a tensão de

escoamento, demonstrando que esse aditivo tem efeito plastificante na pasta de cimento. O efeito plastificante aumenta com o aumento da dosagem, acima de 0,1%.

Ao longo do tempo as tensões de cisalhamento aumentaram para as Pastas 3, 4 e 5 em comparação ao tempo 0h. Em 48h, a Pasta 4 com 0,15% de HPMC, foi a que apresentou maior tensão de cisalhamento e um maior aumento no estresse de escoamento (Tabela 25) entre as pastas estudadas.

As pastas podem ser classificadas como fluidos não-Newtonianos, pois as viscosidades variaram com a taxa de cisalhamento e com o tempo. Nas Figuras 22, 23 e 24 têm-se a viscosidade aparente versus a taxa de cisalhamento ao longo do tempo.

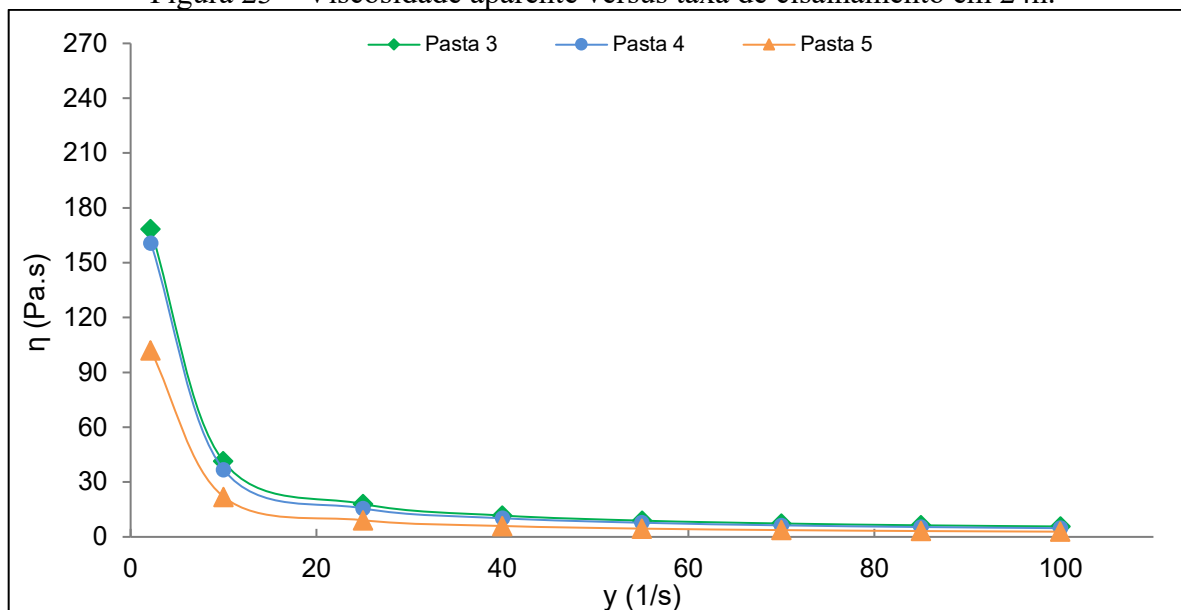
Figura 22 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 0h.



Pasta 1: Ref.100%C; Pasta 2: 50%C.50%FG; Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.

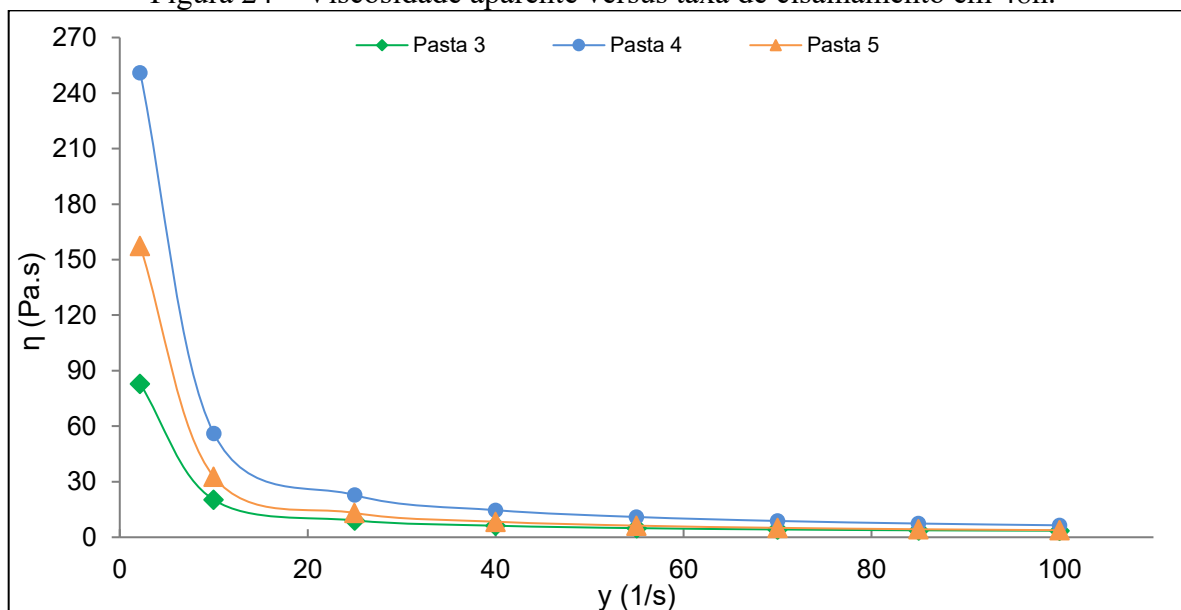
Fonte: Autora (2021)

Figura 23 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 24h.



Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.
Fonte: Autora (2021)

Figura 24 – Viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento em 48h.



Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.
Fonte: Autora (2021)

Todas as pastas obtiveram um incremento na viscosidade de 0h para 24h. De 24h para 48h somente as pastas com adição de éter de celulose (HPMC) aumentaram a viscosidade. A Pasta 4 com 0,15% de HPMC foi a que apresentou maiores valores de viscosidade pela taxa cisalhante em 48h, implicando em uma redução na fluidez. Já a Pasta 5

com um teor de adição de 0,20% de HPMC, apresentou menor viscosidade e uma maior facilidade de escoamento do que a adição de 0,15%.

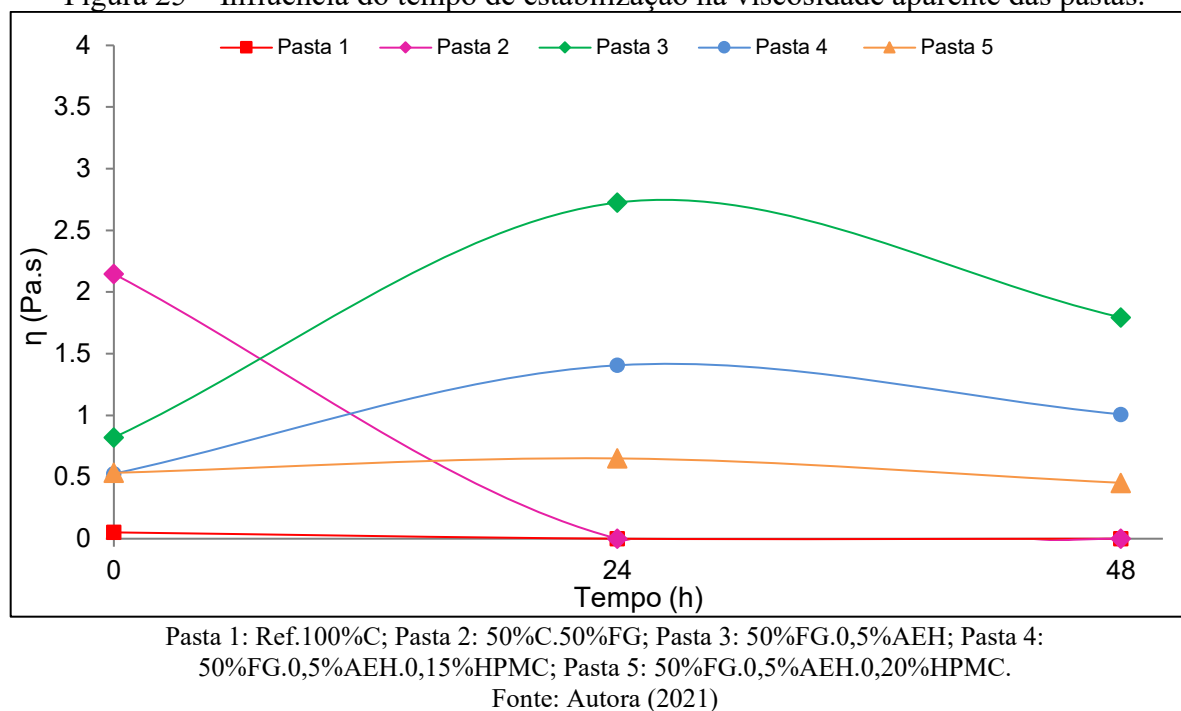
A pasta com aditivo estabilizador de hidratação apresentou uma redução na viscosidade pela taxa de cisalhamento em 48h, indicando uma maior facilidade de escoamento do que no tempo de estabilização de 24h. Mostrando uma tendência semelhante ao da tensão de cisalhamento observado na Figura 21.

Tanto na tensão de cisalhamento, quanto na viscosidade pela taxa de cisalhamento, a adição com 0,15% de HPMC obteve os maiores incrementos nesses parâmetros do que a adição de 0,20%. Estes resultados se encontram em divergência com outros autores, Ma *et al.* (2018) relatam que a viscosidade e a tensão aumentaram com o aumento da dosagem de HPMC, devido esse aditivo aumentar a viscosidade do líquido.

Segundo Ma *et al.* (2018), as partículas de cimento podem ser adsorvidas em uma molécula de HPMC por meio da combinação entre Ca^{2+} superficial e grupos éter. Ainda, uma partícula de cimento também pode ser conectada por várias moléculas de HPMC, resultando no efeito de aumento de viscosidade. Outro aspecto é que grupos éter e grupos hidroxila podem polarizar as moléculas de água para formar as ligações de hidrogênio, e isso pode fixar as moléculas de água dentro da estrutura molecular da HPMC, essas ligações de hidrogênio podem reticular várias moléculas de HPMC, chamados de combinação de água livre, resultando também no efeito de aumento da viscosidade. Esses dois efeitos podem explicar a razão para o aumento da tensão de escoamento, viscosidade aparente e tensão pela taxa de cisalhamento quando se adiciona HPMC nas pastas.

Na Figura 25, pode-se perceber a influência do tempo de estabilização (até 48h) na viscosidade aparente das pastas.

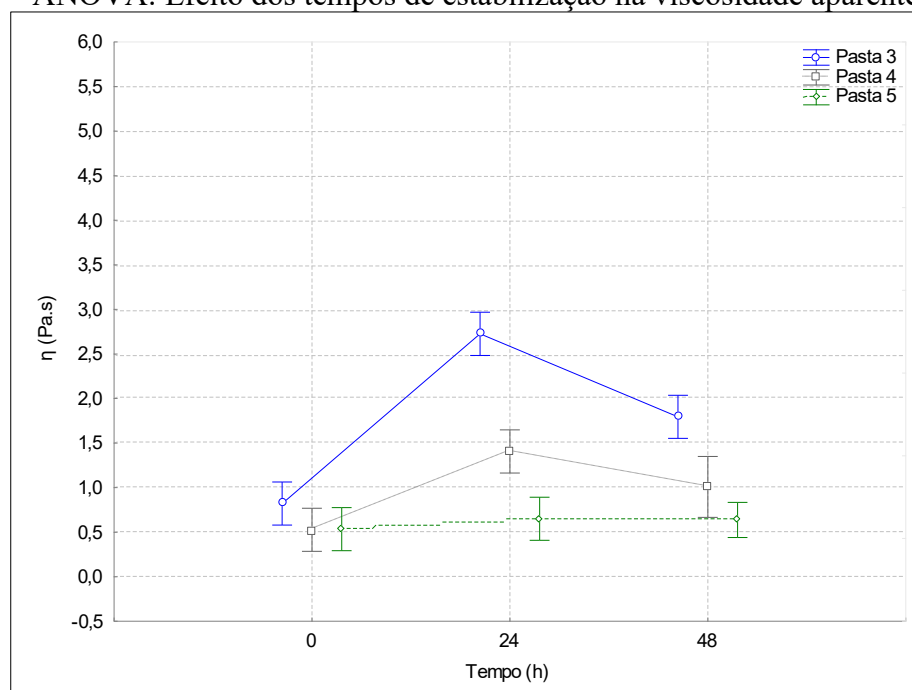
Figura 25 – Influência do tempo de estabilização na viscosidade aparente das pastas.



É perceptível que as pastas aumentam a viscosidade aparente de 0h para 24h, ocorrendo uma redução no final do período de estabilização em 48h.

Na Figura 26 tem-se o efeito do tempo de estabilização na viscosidade aparente das pastas, conforme a análise estatística ANOVA. Na Figura 27 expõem-se o teste de *Tukey* realizado para as Pastas 3, 4 e 5.

Figura 26 – ANOVA: Efeito dos tempos de estabilização na viscosidade aparente das pastas.



Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.
Fonte: Autora (2021)

Analisando estatisticamente os resultados, verifica-se que com 95% de confiança que a Pasta 5 foi a única que o tempo de estabilização não influenciou significativamente nas variações de viscosidade aparente sofridas ao longo do tempo. Já para as demais pastas, o tempo de estabilização influenciou significativamente nesta propriedade.

Figura 27 – Tukey: viscosidade aparente das Pastas 3, 4 e 5.

Tukey HSD test; variable Viscosidade (Spreadsheet1)										
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests										
Error: Between MS = ,02284, df = 9,0000										
Tempo (h)	Pastas	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}
0	3	,82100	,52690	,53400	2,7257	1,4059	,65090	1,7946	1,0083	,63810
0	4	0,605079		1,000000	0,000224	0,004688	0,992744	0,000460	0,300506	0,993524
0	5	0,630242	1,000000		0,000224	0,004951	0,995023	0,000472	0,314720	0,995766
24	3	0,000226	0,000224	0,000224		0,000389	0,000225	0,003171	0,000308	0,000224
24	4	0,056252	0,004688	0,004951	0,000389		0,012725	0,311151	0,499258	0,006298
24	5	0,954860	0,992744	0,995023	0,000225	0,012725		0,000803	0,613165	1,000000
48	3	0,002338	0,000460	0,000472	0,003171	0,311151	0,000803		0,033799	0,000462
48	4	0,974628	0,300506	0,314720	0,000308	0,499258	0,613165	0,033799		0,512826
48	5	0,899965	0,993524	0,995766	0,000224	0,006298	1,000000	0,000462	0,512826	

Pasta 3: 50%FG.0,5%AEH; Pasta 4: 50%FG.0,5%AEH.0,15%HPMC; Pasta 5: 50%FG.0,5%AEH.0,20%HPMC.
Fonte: Autora (2021)

Conforme análise de *Tukey*, a Pasta 5 não apresentou diferenças significativas entre as variações de viscosidade aparente ao longo das 48h. Para a Pasta 4, de 24 a 48h a diferença não se mostrou significativa, não ocorrendo o mesmo para 0h. Já a Pasta 3, teve uma diferença significativa em todos os tempos de estabilização.

As Pastas 3, 4 e 5 em 0h não apresentaram diferenças significativas entre elas. Já em 24h as diferenças na viscosidade aparente foram significativas para todas as pastas. Em 48h apenas para as pastas com HPMC (4 e 5) não houveram diferenças significativas comparadas entre si. Se comparadas com a Pasta 3, a diferença se mostrou estatisticamente distinta.

A maior adição de HPMC, 0,20%, acarretou em menores viscosidades do que com a adição de 0,15%, ainda as variações de viscosidade da adição de 0,20% durante o período de estabilização não foram significativas entre elas. Assim, nota-se o efeito benéfico desse percentual de adição, que contribuiu para a redução da viscosidade aparente e para a melhora da fluidez, facilitando o escoamento das pastas ao longo do tempo.

4.3 ETAPA 2 – AVALIAÇÃO DO HPMC E DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS ESTABILIZADAS

4.3.1 Estado fresco

4.3.1.1 Índice de espalhamento

Nesta etapa foram produzidas as argamassas estabilizadas para avaliações mais específicas das propriedades no estado fresco. Calculou-se a taxa de perda de índice de espalhamento ao longo do tempo, expostas na Tabela 26. Os índices de espalhamento das amostras estabilizadas por 48 e 72h estão apresentados nas Figuras 28 e 29.

Tabela 26 – Taxas de perda de índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas

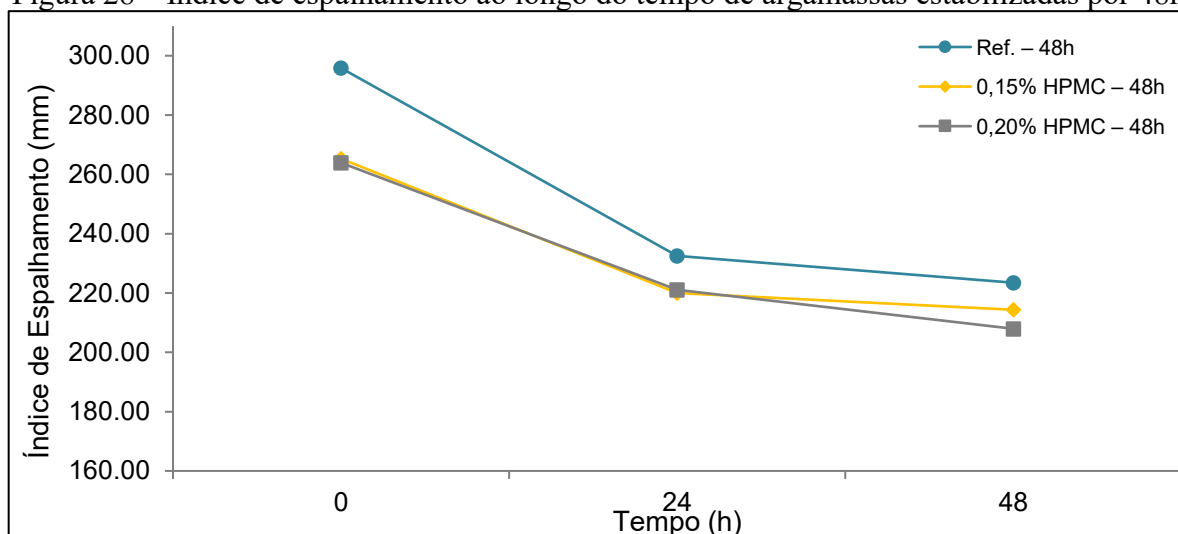
Nomenclatura	Taxa de perda (mm/h)	
	48h	72h
Ref. – 48h	1,507	-
0,15% HPMC – 48h	1,061	-
0,20% HPMC – 48h	1,166	-
Ref. – 72h	1,317	1,102
0,15% HPMC – 72h	1,213	0,897
0,20% HPMC – 72h	0,949	0,808

Fonte: AUTORA (2021).

A argamassa de referência de 48h foi a que apresentou redução de fluidez mais acentuada entre as amostras, 1,507 mm/h, ao final da estabilização. Já as misturas com 0,15 e 0,20% de HPMC exibiram as menores perdas na fluidez, 1,061 e 1,166 mm/h, respectivamente. O mesmo ocorreu para as argamassas de 72h ao final do período de estabilização, a mistura de referência obteve maior taxa de perda de fluidez com 1,102 e as misturas com HPMC (0,15 e 0,20%), menores reduções na fluidez, com uma taxa de 0,897 e 0,808 mm/h, respectivamente.

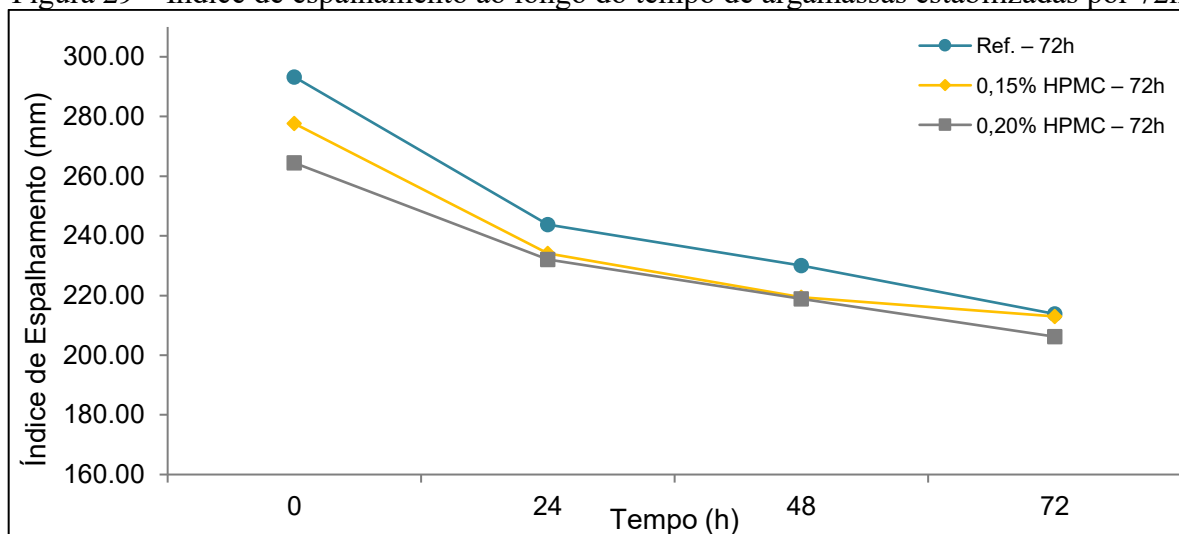
As menores taxas de perda de índice de espalhamento alcançadas com as misturas contendo 0,15 e 0,20% de HPMC ao final dos períodos de estabilização se atribuem ao efeito de retenção de água do HPMC, o qual preservou a água no interior da argamassa durante o tempo em que ela ficou em aberto, concedendo-a trabalhabilidade, sem grandes perdas de fluidez.

Figura 28 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 48h.



Fonte: Autora (2021)

Figura 29 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 72h.



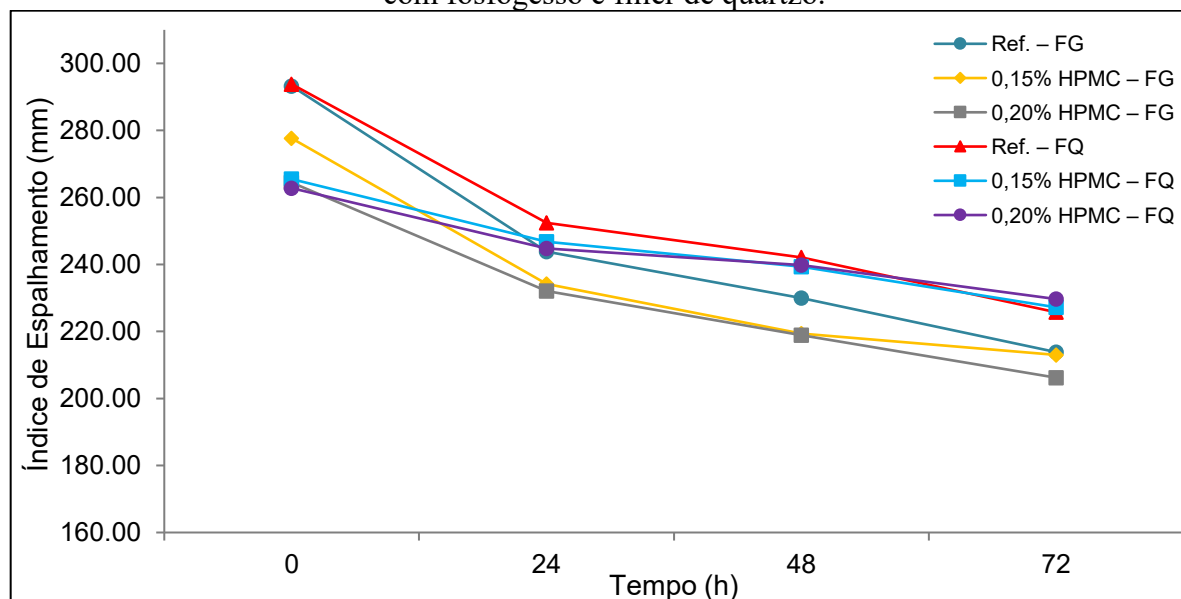
Fonte: Autora (2021)

As argamassas de referência (sem HPMC) de 48 e 72h, no período inicial de 0h, obtiveram um maior espalhamento do que as outras misturas, devido ao aumento na trabalhabilidade proporcionado pelo AEH. Com a adição de HPMC ocorreu uma redução no espalhamento de 10,33% para 0,15% e 10,79% para 0,20% em comparação à referência, para as argamassas de 48h. Em 72h a diminuição no espalhamento foi de 5,32% para 0,15% e 9,82% para 0,20%. Esta redução na fluidez ocorreu em função do aumento da viscosidade ocasionado pelo HPMC, o qual está relacionado à adsorção das partículas de cimento e a fixação de água livre pela formação da ligação de hidrogênio (MA *et al.*, 2018). No entanto, esses decréscimos não foram prejudiciais ao sistema, pois obedeceram ao parâmetro de índice de espalhamento de 270 ± 10 mm.

Ao final da estabilização, percebe-se que todos os traços foram capazes de manter as argamassas no estado fresco por até 48 e 72h, com índice de espalhamento superior a 180 mm, critério esse, que foi utilizado para se considerar a argamassa estabilizada ainda utilizável, com base no estudo de Guindani (2018).

Na Figura 30 tem-se um estudo específico, onde se produziu argamassas estabilizadas de 72h com filler de quartzo (FQ), o qual é um resíduo de natureza inerte (a/c: 1,10), a fim de se comparar com as argamassas estabilizadas produzidas com fosfogesso, que é um material poroso (a/c: 1,30). Aferindo a influência desses materiais no espalhamento e fluidez das argamassas estabilizadas.

Figura 30 – Índice de espalhamento ao longo do tempo de argamassas estabilizadas por 72h com fosfogesso e filler de quartzo.



Fonte: Autora (2021)

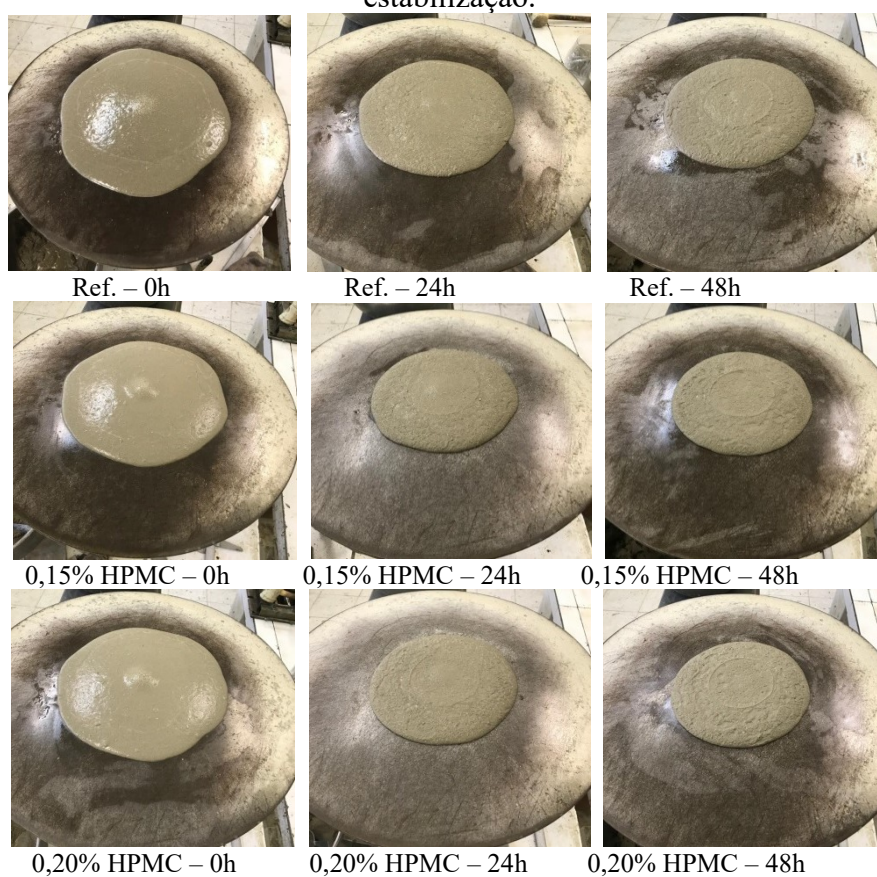
A argamassa de referência com FQ apresentou um espalhamento praticamente igual à argamassa de referência com FG em 0h, 293,80 e 293,23 mm, respectivamente. Porém ao longo do tempo de estabilização, obteve menores reduções no índice de espalhamento do que a argamassa com FG. Em 72h, o espalhamento foi 5,56% maior do que a argamassa de referência com FG.

As misturas com HPMC (0,15 e 0,20%) contendo FQ obtiveram um índice de espalhamento menor em 0h do que as misturas com FG, 265,47 e 262,77 mm, já para o FG 277,63 e 264,43 mm. Contudo, ao longo do tempo de estabilização alcançaram um índice de espalhamento superior ao das argamassas com FG. Em 72h, o espalhamento para 0,15% foi de 6,67% e para 0,20% foi de 11,38%, maiores do que as misturas com FG.

Todas as argamassas com FQ apresentaram um índice de espalhamento superior ao das argamassas com FG ao longo do período de estabilização. Evidenciando que o filler de quartzo contribuiu para a manutenção da fluidez das argamassas estabilizadas. Este efeito do FQ encontra-se em consonância com o estudo de Guindani (2018), onde as amostras com FQ apresentaram os maiores índices de espalhamento e as menores taxas de perdas ao longo do tempo, independente da dosagem de aditivo estabilizador, esses efeitos foram atribuídos a baixa capacidade de absorção de umidade desse fino.

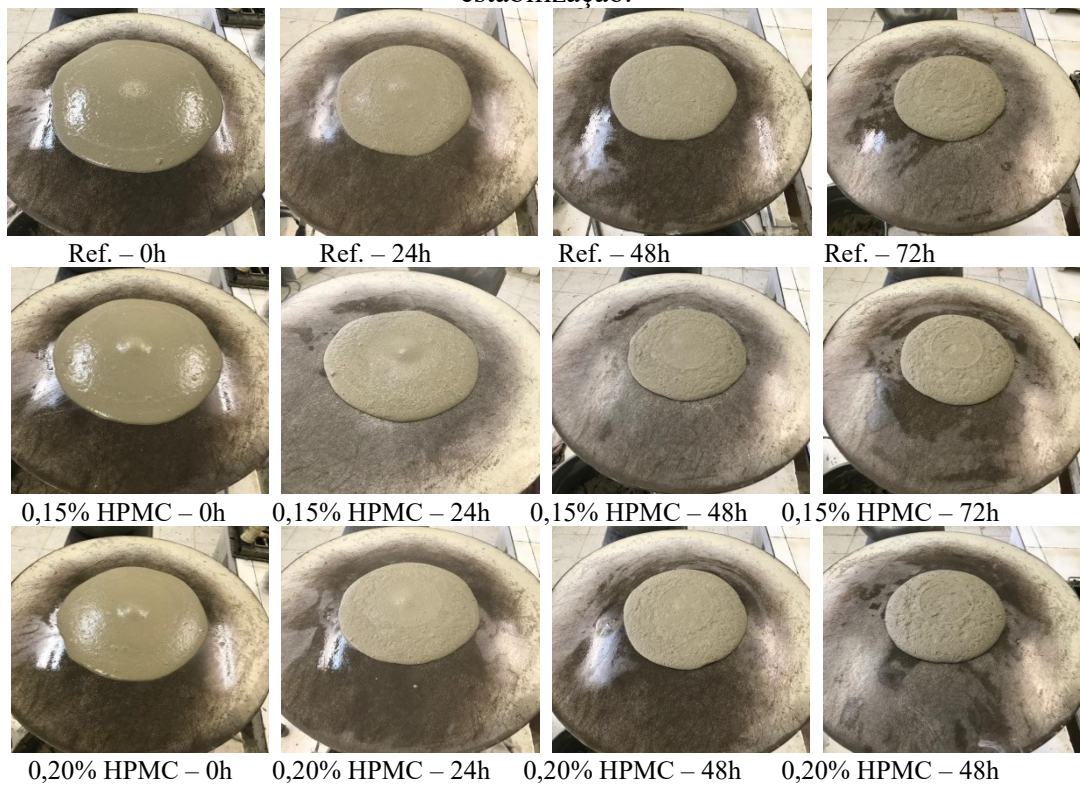
Nas Figuras 31 e 32, têm-se o espalhamento das argamassas estabilizadas de 48 e 72h. É visível por meio das fotos, observar as mudanças de aspecto das argamassas de 0h até o final da estabilização, encontrando-se no início mais brilhante e com maior plasticidade do que no final. Na Figura 33, encontra-se o espalhamento das argamassas produzidas com FQ e estabilizadas até 72h. Onde se pode perceber que essas argamassas mantiveram uma maior trabalhabilidade durante toda a estabilização e uma superfície mais lisa do que as argamassas com FG.

Figura 31 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas de 48h de estabilização.



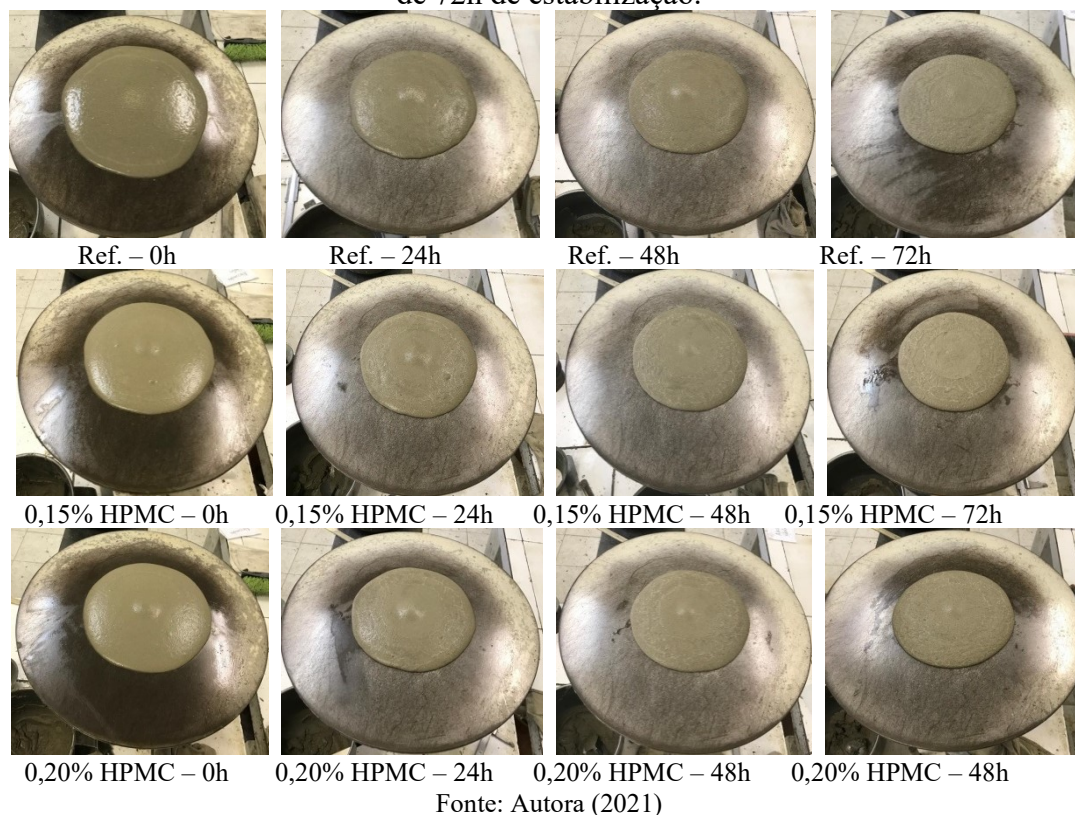
Fonte: Autora (2021)

Figura 32 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas de 72h de estabilização.



Fonte: Autora (2021)

Figura 33 – Índice de espalhamento ao longo do tempo das argamassas com filler de quartzo de 72h de estabilização.



4.3.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

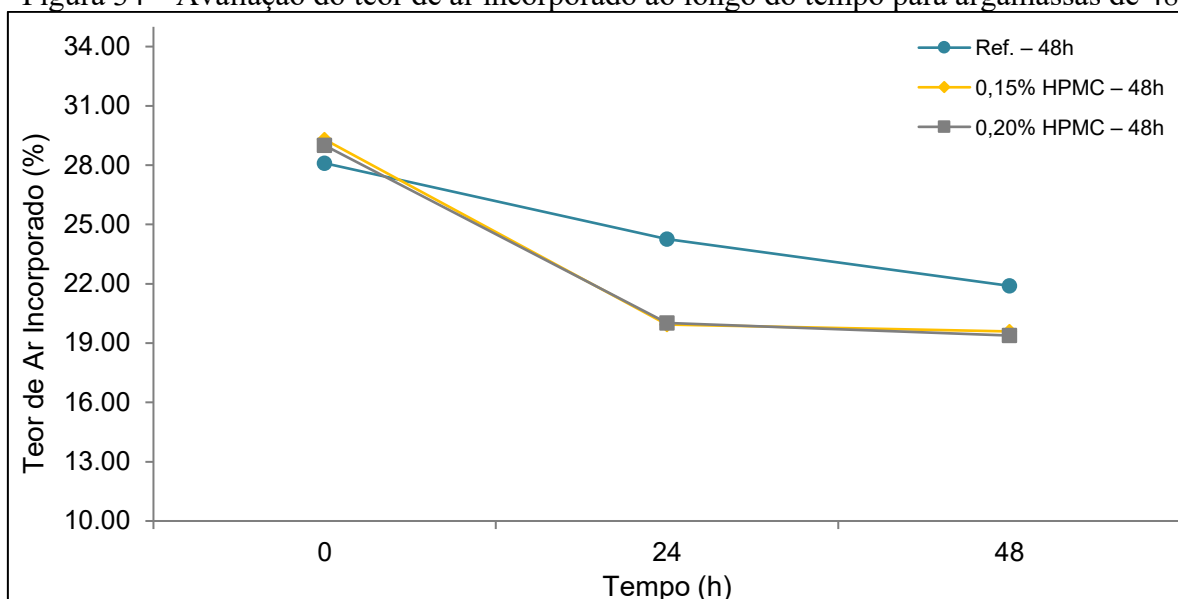
As densidades de massa das argamassas aumentaram ao longo do tempo de estabilização, como pode ser observado na Tabela 27. Esse aumento nas densidades ao longo do tempo ocorre pela perda de ar incorporado (Figuras 34 e 35) nas misturas, causando diminuições nos índices de espalhamento e consequentemente reduzindo a fluidez.

Tabela 27 – Densidade de massa ao longo do tempo para as argamassas de 48 e 72h de estabilização

Nomenclatura	Densidade (kg/m ³)			
	0h	24h	48h	72h
Ref. – 48h	1541,79	1624,13	1674,83	-
0,15% HPMC – 48h	1516,07	1716,64	1724,28	-
0,20% HPMC – 48h	1522,50	1715,13	1728,73	-
Ref. – 72h	1561,82	1609,55	1657,76	1719,09
0,15% HPMC – 72h	1525,96	1698,07	1696,34	1708,21
0,20% HPMC – 72h	1511,87	1669,88	1673,10	1703,76

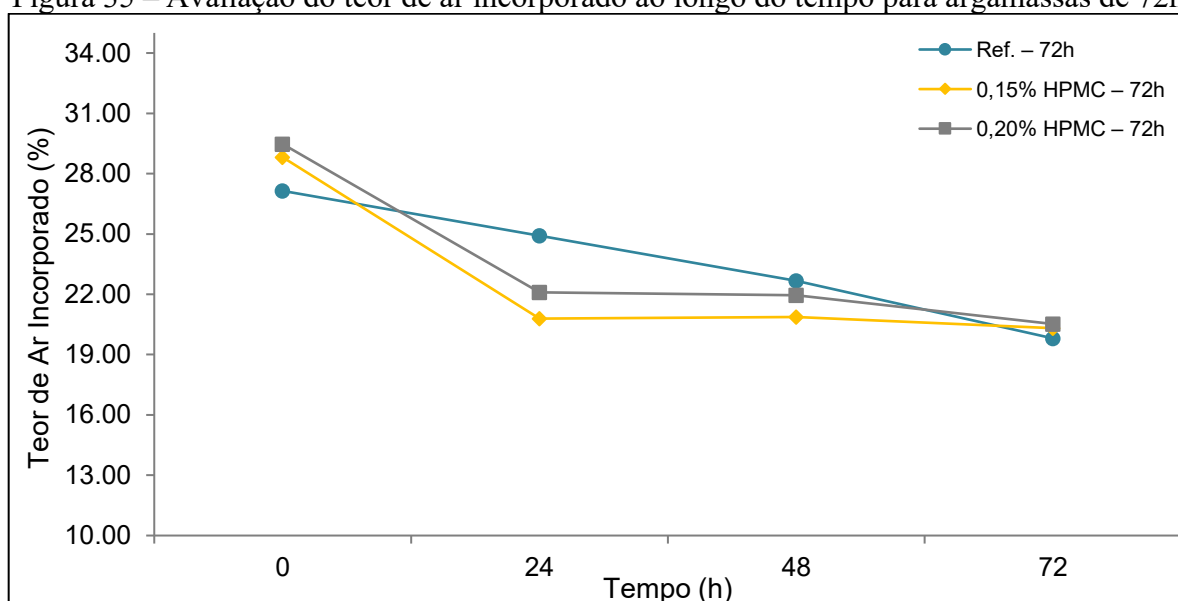
Fonte: AUTORA (2021).

Figura 34 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 48h.



Fonte: Autora (2021)

Figura 35 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 72h.



Fonte: Autora (2021)

Nas argamassas estabilizadas por 48h (Figura 34) as misturas com HPMC em 0,15 e 0,20%, perderam ar incorporado ao final da estabilização em comparação à argamassa de referência, com reduções de 9,09 e 13,63%, respectivamente. Já para as argamassas estabilizadas por 72h (Figura 35), as misturas com HPMC obtiveram maiores teores de ar incorporado em 0h e menores perdas de ar incorporado em 72h em comparação à mistura de

referência. Em 72h o ar incorporado na mistura de 0,15% era de 2,52% e para 0,20% era de 3,58%, maiores que a referência.

Apesar das reduções no teor de ar incorporado durante todo o período de estabilização, todas as misturas obedeceram ao parâmetro estabelecido de teor de ar incorporado de $18\pm 2\%$ ao final das 48 e 72h. Isso foi possível devido ao uso do aditivo incorporador de ar, que preservou as características de plasticidade e trabalhabilidade das argamassas pelo tempo em que ficaram em aberto no estado fresco.

Na Tabela 28 têm-se as densidades de massa ao longo do tempo para as argamassas estabilizadas por 72h com filler de quartzo. Podendo-se perceber que para todas as misturas as densidades aumentaram em 24h, seguinte de uma redução em 48h e 72h, com exceção da argamassa de referência que aumentou a densidade em 72h em 0,45% em comparação às 48h. Os aumentos de 48 para 72h foram de 1,58 e 1,73% para 0,15 e 0,20%.

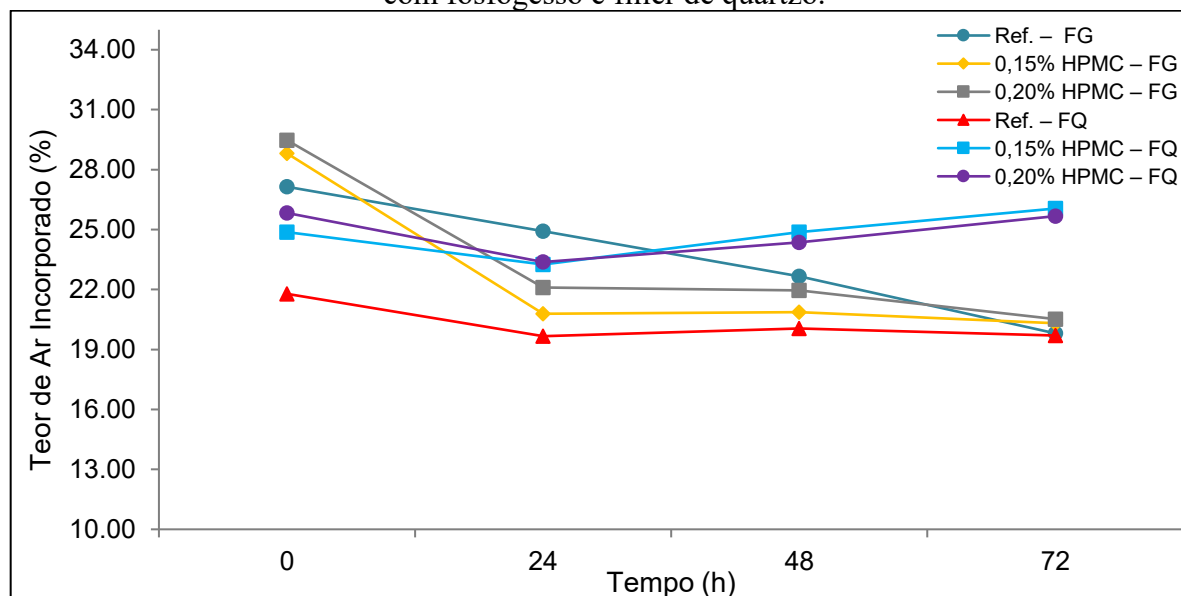
Evidenciando que o FQ incorporou mais ar em 48 e 72h, o que tornou as misturas mais leves, apresentando menores densidades. Este efeito pode ser observado na Figura 36, a qual apresenta um comparativo entre as argamassas produzidas e estabilizadas por 72h com FQ e com FG, avaliando o teor de ar incorporado nas mesmas.

Tabela 28 – Densidade de massa ao longo do tempo para as argamassas com FQ em 72h de estabilização

Nomenclatura	Densidade (kg/m ³)			
	0h	24h	48h	72h
Ref. – 72h	1725,27	1772,01	1763,35	1771,27
0,15% HPMC – 72h	1657,27	1692,88	1657,27	1631,06
0,20% HPMC – 72h	1636,00	1690,16	1668,40	1639,47

Fonte: AUTORA (2021).

Figura 36 – Avaliação do teor de ar incorporado ao longo do tempo para argamassas de 72h com fosfogesso e filler de quartzo.



Fonte: Autora (2021)

As argamassas com FQ incorporaram menores teores de ar em 0h do que as com FG. Entretanto, ao longo do tempo de estabilização (após 24h) os teores de ar incorporados aumentaram para as argamassas com 0,15 e 0,20% de HPMC em 28,31 e 25,09% em comparação as argamassas com FG em 72h. Já a argamassa de referência com FQ obteve um teor de ar incorporado em 72h (19,70%) muito próximo à argamassa de referência com FG (19,81%). Pode-se inferir que a adição do aditivo retentor de água nas argamassas com FQ contribuiu para o aumento e manutenção do teor de ar incorporado ao longo do tempo.

Guindani (2018) também relata que as argamassas estabilizadas com FQ foram as que apresentaram maiores teores de ar incorporado e menores perdas do teor de ar. Com desempenho muito semelhante às argamassas estabilizadas de cimento Portland.

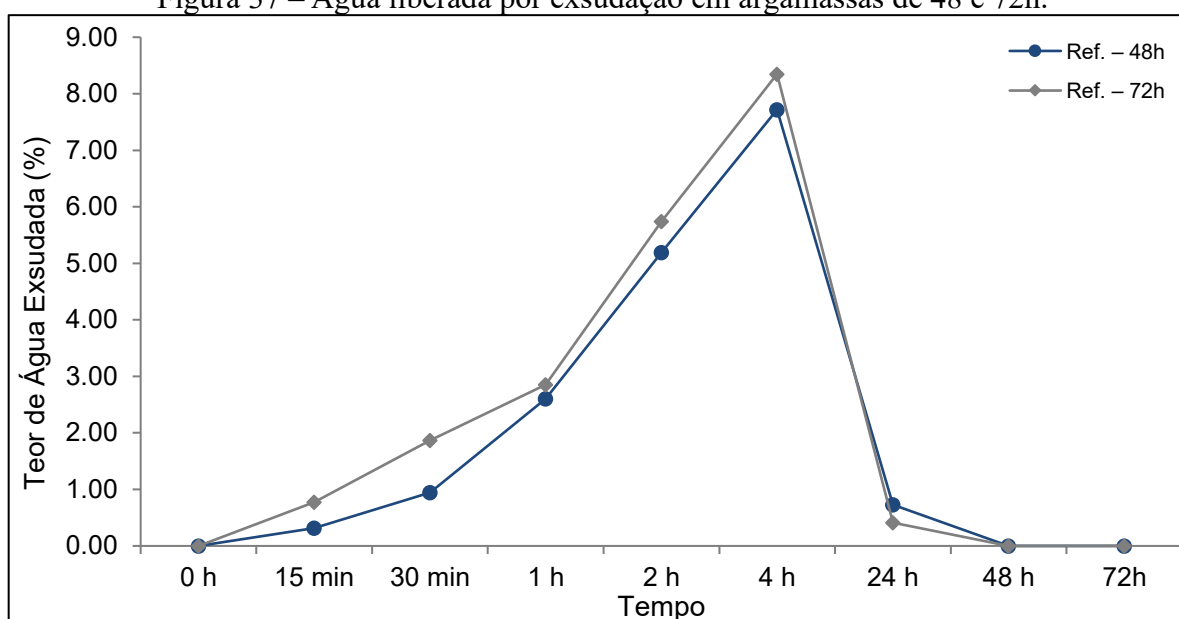
4.3.1.3 Exsudação de água

Os resultados obtidos na análise da exsudação de água para as argamassas estabilizadas por 48 e 72h estão apresentados na Figura 37. O fenômeno de exsudação ocorreu somente para as argamassas de referência, sem HPMC. Sendo possível ver o efeito benéfico

do retentor de água à base de celulose, o qual cessou o efeito de exsudação nas argamassas com 0,15 e 0,20% de HPMC, conferindo retenção de água ao material.

O processo de coalescência e colapso das bolhas que ocorrem em argamassas com a incorporação de ar podem resultar em exsudação, devido à redução da quantidade de bolhas e a aproximação das partículas sólidas, acontecendo o refinamento da porosidade capilar no estado fresco, que favorece o movimento ascensional da água. A utilização do retentor de água (éter de celulose) em 0,15 e 0,20% aumentou a retenção de água e a viscosidade do material, o que contribuiu para a estabilização das bolhas de ar incorporado, diminuindo a tendência de movimentação da água e das partículas, reduzindo a coalescência e evitando a ocorrência de exsudação.

Figura 37 – Água liberada por exsudação em argamassas de 48 e 72h.



Fonte: Autora (2021)

A maior quantidade de água exsudada tanto para a argamassa de 48h, como para de 72h, ocorreu no tempo de 4 horas, com 7,72 e 8,35%, respectivamente. Após, houve redução na liberação de água para a superfície. Em 24h a água liberada era de 0,73% para a argamassa de referência de 48h e 0,41% para a de 72h, sugerindo que a água, possivelmente, foi absorvida de volta pelo material, uma vez que os béqueres eram fechados com plástico filme para evitar a evaporação da água.

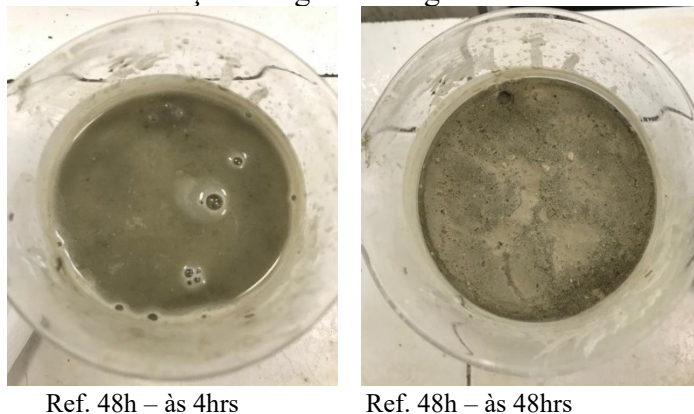
Guindani (2018) produziu argamassas estabilizadas (a/c 1,25) com o mesmo tipo de cimento (CP II F-32) e mesma composição química de AEH (gluconato de sódio e sacarose) utilizados nesta pesquisa (a/c 1,30). A mistura com cimento (sem finos) apresentou exsudação de água com maior intensidade nas primeiras 10h, próximo a 9% para a argamassa de 48h e de 10% para a de 72h de estabilização. Em 24h para a argamassa de 48h a água exsudada foi próxima a 8% e para a de 72h próxima a 9%.

Comparando esses resultados com esta pesquisa, onde a argamassa de referência é composta por cimento:fosfogesso (1:1), observa-se que as argamassas exsudaram água nas primeiras horas iniciais tanto quanto a de cimento do estudo de Guindani (2018). No entanto, em 24h as argamassas de fosfogesso (48 e 72h) tiveram uma redução na exsudação de água muito mais significativa do que as argamassas só de cimento, de 90,54 e 95,08% em comparação ao tempo de 4h de ensaio. Para as argamassas de cimento de 48 e 72h as reduções foram de 11,11 e 10,0%, respectivamente.

Apesar da ocorrência de exsudação, as argamassas com FG chegaram em 48h com um teor zero de água livre na superfície, ou seja, toda a água foi consumida pela amostra durante o processo de enrijecimento. O mesmo não ocorreu no estudo das argamassas de cimento. Indicando que o FG necessita de mais água do que o cimento para que ocorram as reações completas de hidratação das misturas.

Na Figura 38 é possível observar dois períodos distintos do ensaio. O primeiro às 4h, com a maior ocorrência de água livre nas superfícies das amostras. O segundo às 48h, onde toda a água foi consumida pelas amostras.

Figura 38 – Ensaio de exsudação de água nas argamassas de referência de 48h e 72h.





Ref. 72h – às 4hrs

Ref. 72h – às 48hrs

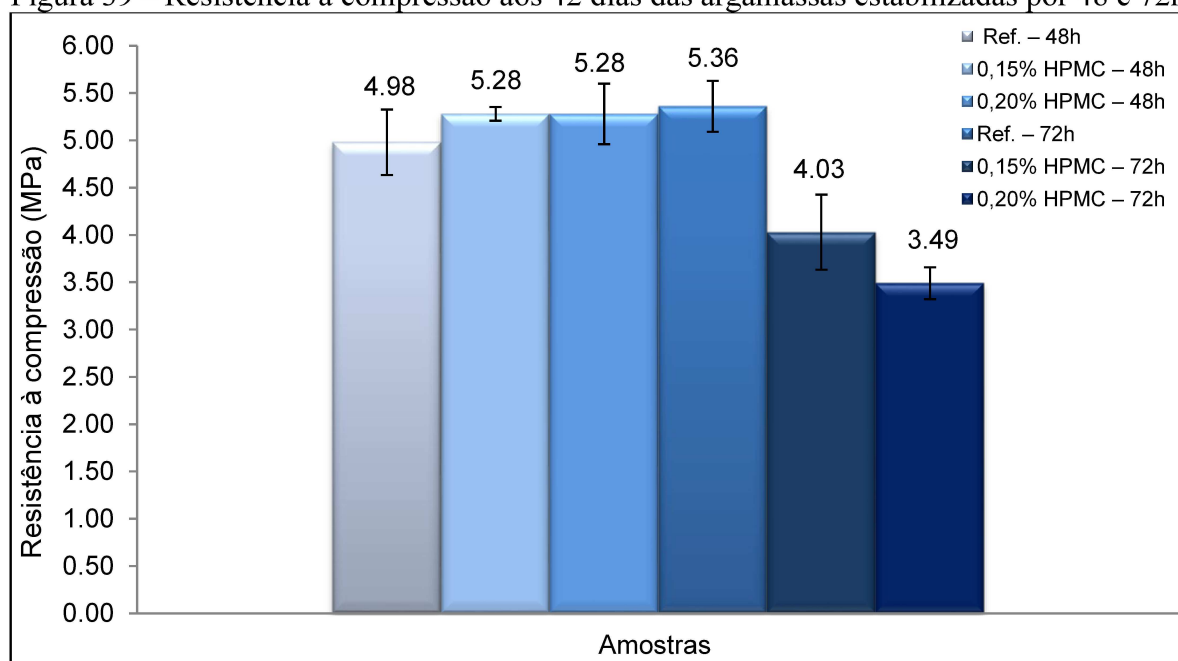
Fonte: Autora (2021)

4.3.2 Estado endurecido

4.3.2.1 Resistências mecânicas

Foram avaliadas as resistências mecânicas para CP's moldados ao final do período de estabilização, para argamassas estabilizadas em dois períodos, 48 e 72h, com o objetivo de avaliar a influência do tempo de estabilização sobre o desempenho mecânico. Os resultados da resistência à compressão aos 42 dias são apresentados na Figura 39.

Figura 39 – Resistência à compressão aos 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.



Fonte: Autora (2021)

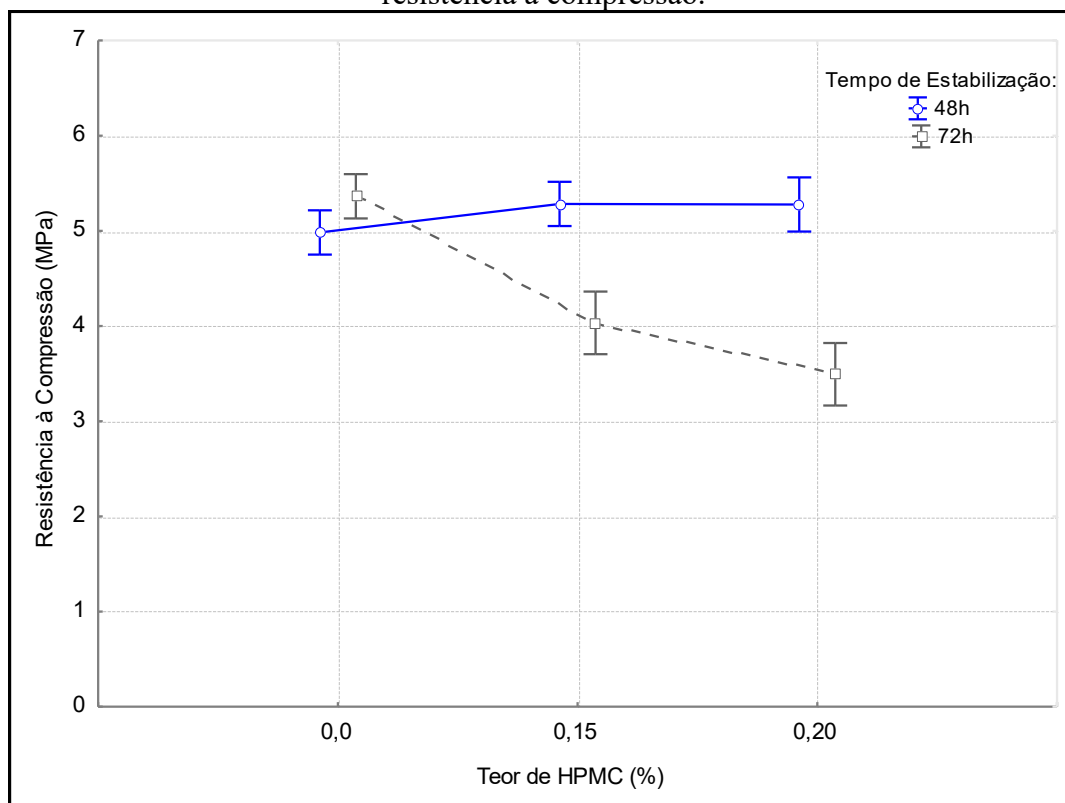
As argamassas de 48h com HPMC apresentaram um aumento nas resistências à compressão se comparadas à referência, em 6,02%. Estas argamassas também obtiveram acréscimos nas resistências se comparadas às argamassas de 72h com 0,15 e 0,20% de HPMC, em 31,01 e 51,28%, respectivamente. O aumento do tempo de estabilização para 72h e conseqüentemente o aumento do teor de AEH para 1,2%, ocasionaram prejuízos nas resistências à compressão. Os quais podem ter ocorrido devido à alta dosagem de AEH que associado com o aumento da adição de HPMC, contribuiu para a redução do desempenho mecânico das misturas.

Comportamento semelhante foi relatado em outros estudos, onde o incremento da dosagem do aditivo estabilizador de hidratação prejudicou o desempenho mecânico em argamassas de 72h de estabilização (CASALI *et al.*, 2011; BELLEI *et al.*, 2015; JANTSCH, 2015; OLIVEIRA, 2017; GUIDANI, 2018).

No estudo de Guindani (2018), a argamassa estabilizada de cimento de 48h teve uma resistência de 4,23 MPa, comparando-a com a argamassa de referência com fosfogesso desta pesquisa, percebe-se que houve um aumento de 17,73% na resistência à compressão com FG. Outros autores também relatam que a utilização de fosfogesso em argamassas proporcionou resistências superiores ou semelhantes à argamassa de controle (cimento). Islam *et al.* (2017) obtiveram um aumento na resistência à compressão de 1,96% com FG e 4,20% com FG tratado, ambos em 5% de substituição, em comparação à argamassa de cimento. Degirmenci (2008) alcançou uma melhora na resistência à compressão aos 28 dias, com 13,76 MPa para 50% de substituição de FG tratado (150°C por 2h).

Na Figura 40 pode-se observar o efeito isolado dos teores de adição de HPMC sobre as misturas e o efeito combinado dos tempos de estabilização com os teores de adição de HPMC sobre as resistências à compressão das argamassas estabilizadas.

Figura 40 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização na resistência à compressão.



Fonte: Autora (2021)

A partir da ANOVA dos resultados das argamassas de 48h, observa-se que o teor de HPMC não influenciou significativamente nos valores de resistência à compressão. Já em 72h, quando se adicionou 0,15 e 0,20% de HPMC, ocorreram reduções significativas nas resistências à compressão em comparação à referência. O teor de adição de 0,20% não foi significativo em comparação ao de 0,15% de HPMC em 72h.

Na Figura 41, expõem-se o teste de *Tukey* para as argamassas estabilizadas de 48 e 72h.

Figura 41 – Tukey: resistência à compressão das argamassas de 48 e 72h.

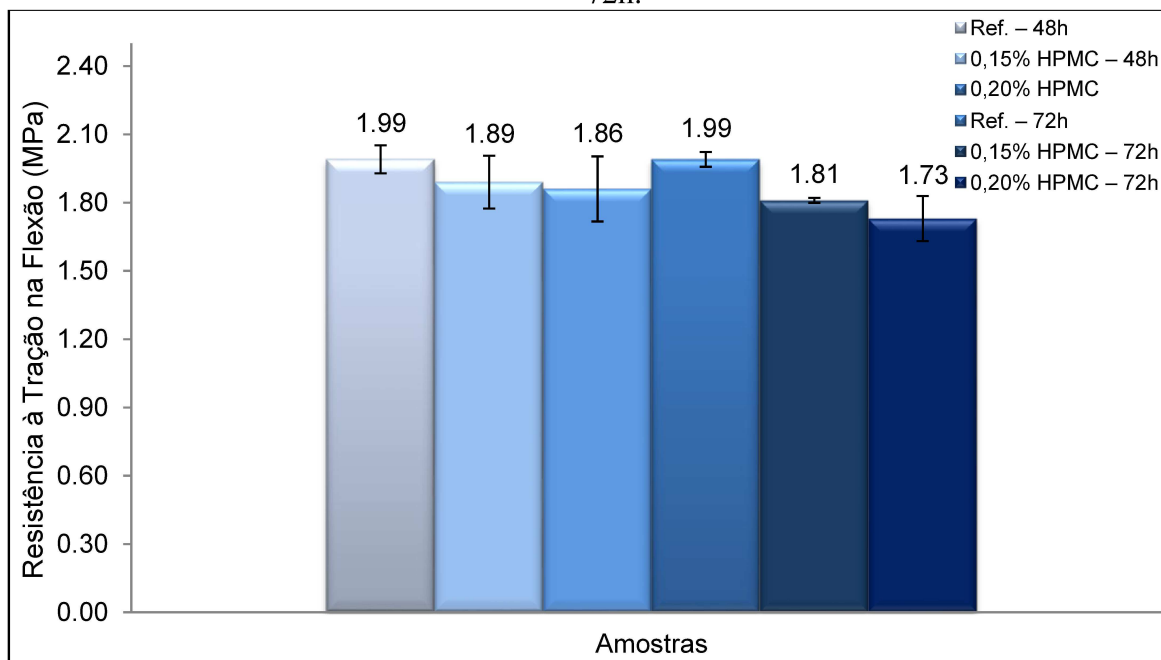
Tukey HSD test; variable Resistência à Compressão (MPa) (Resistência à compressão)							
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests							
Error: Between MS = ,07531, df = 22,000							
Teor de HPMC (%)	Tempo de Estabilização (h)	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		4,9833	5,3633	5,2833	4,0333	5,2775	3,4933
0,0	48		0,199811	0,431912	0,000962	0,569984	0,000145
0,0	72	0,199811		0,995496	0,000149	0,996285	0,000144
0,15	48	0,431912	0,995496		0,000160	1,000000	0,000144
0,15	72	0,000962	0,000149	0,000160		0,000203	0,195843
0,20	48	0,569984	0,996285	1,000000	0,000203		0,000144
0,20	72	0,000145	0,000144	0,000144	0,195843	0,000144	

Fonte: Autora (2021)

Analisando o efeito combinado dos tempos de estabilização com os teores de HPMC por meio do teste de Tukey, verifica-se que a mistura de referência de 72h é estatisticamente igual à referência e as adições de 0,15 e 0,20% de HPMC de 48h e diferente das adições de HPMC de 72h.

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 42 dias são apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Resistência à tração na flexão aos 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.

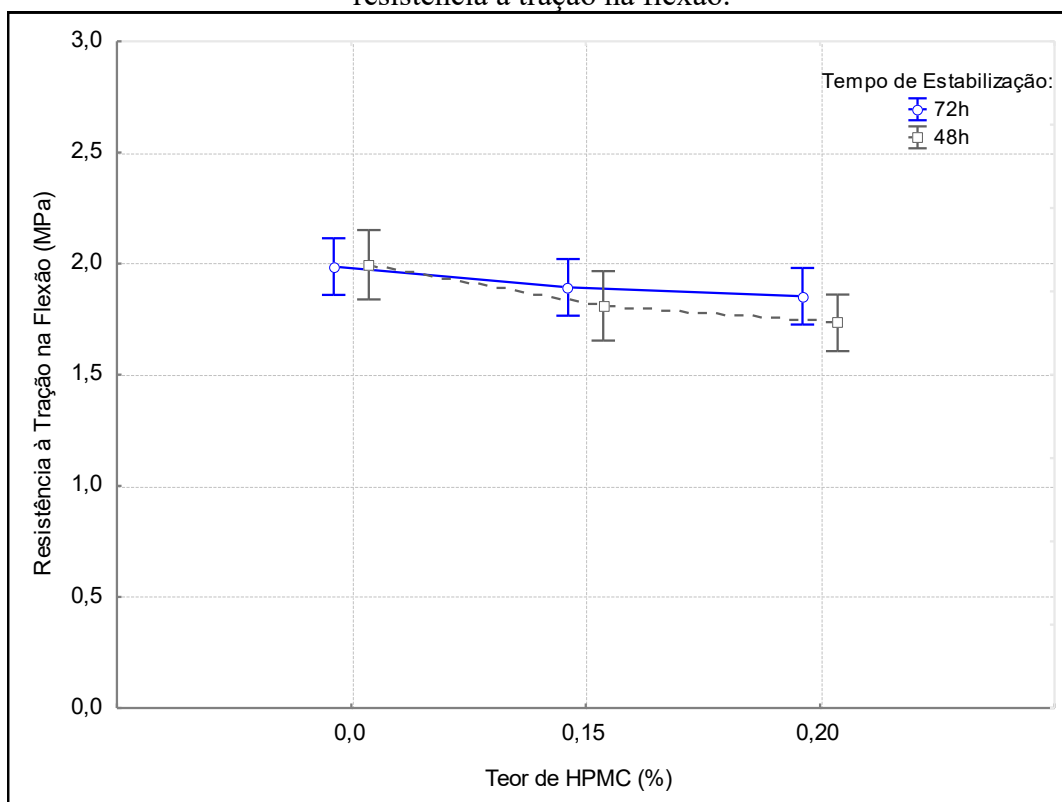


Fonte: Autora (2021)

As argamassas de referência de 48 e 72h apresentaram o mesmo comportamento de resistência à tração na flexão. Quando se adicionou o HPMC em 0,15 e 0,20% ocorreram reduções nas resistências se comparadas às argamassas de referência. Para 48h foi de 5,02 e 6,53% e para 72h de 9,04 e 13,06%, respectivamente. Essa redução nos valores das misturas de 72h é similar ao comportamento observado na resistência à compressão.

O efeito isolado dos teores de adição de HPMC sobre as misturas e o efeito combinado dos tempos de estabilização com os teores de adição de HPMC sobre as resistências à tração na flexão das argamassas estabilizadas podem ser observadas na Figura 43.

Figura 43 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização na resistência à tração na flexão.



Fonte: Autora (2021)

Por meio da análise estatística ANOVA, verificou-se que os decréscimos nas resistências à tração na flexão não foram significativos quando se adicionou o HPMC, tanto para a argamassa de 48h, quanto para a argamassa de 72h. O efeito combinado dos tempos de estabilização, ou seja, o aumento na dosagem de AEH de 0,85 para 1,2% também não

influenciou significativamente nesta propriedade. Ainda, segundo os testes de Tukey, todos os valores de resistência à tração são estatisticamente iguais entre si. Os resultados podem ser observados na Figura 44.

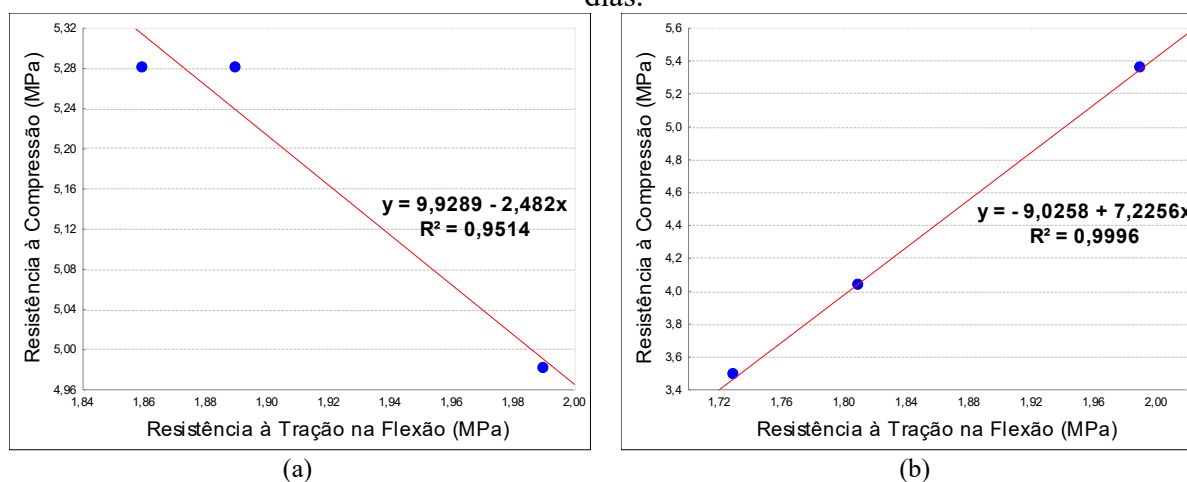
Figura 44 – Tukey: Resistência à tração para as argamassas de 48 e 72h.

Tukey HSD test; variable Resistência à Tração na Flexão (MPa) (Resistência à tração)							
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests							
Error: Between MS = ,00981, df = 10,000							
Teor de HPMC (%)	Tempo de Estabilização (h)	{1} 1,9867	{2} 1,9950	{3} 1,8933	{4} 1,8100	{5} 1,8533	{6} 1,7333
0,0	48		0,999999	0,848201	0,426670	0,588997	0,083918
0,0	72	0,999999		0,860838	0,470224	0,634854	0,119811
0,15	48	0,848201	0,860838		0,932035	0,995298	0,414674
0,15	72	0,426670	0,470224	0,932035		0,995944	0,950894
0,20	48	0,588997	0,634854	0,995298	0,995944		0,681146
0,20	72	0,083918	0,119811	0,414674	0,950894	0,681146	

Fonte: Autora (2021)

Na Figura 45 (b) pode-se observar que houve uma correlação forte entre os resultados de resistência à compressão e à tração das argamassas de 72h de estabilização aos 42d. Conforme se reduziu a resistência à compressão também ocorreu redução na resistência à tração. O mesmo não pode ser constatado para as argamassas estabilizadas por 48h (a), onde não seguiu uma correlação linear, as resistências à compressão aumentaram com a adição de HPMC e as resistências à tração diminuíram.

Figura 45 – Correlação entre a resistência à compressão e resistência à tração na flexão aos 42 dias.



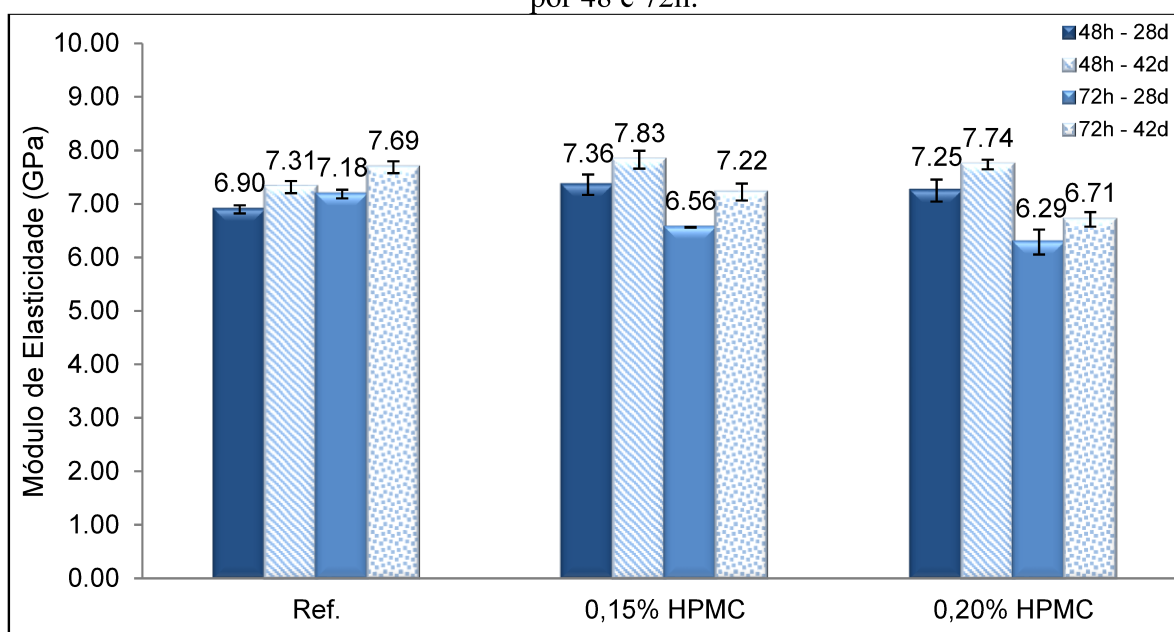
(a) argamassa de 48h (b) argamassa de 72h.

Fonte: Autora (2021)

4.3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado de modo não destrutivo, logo, as argamassas estabilizadas de 48 e 72h foram avaliadas nas idades de 28 e 42 dias. Os resultados podem ser verificados na Figura 46.

Figura 46 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 42 dias das argamassas estabilizadas por 48 e 72h.



Fonte: Autora (2021)

Observa-se na Figura 46 que ocorreu um aumento nos valores de módulo com HPMC em comparação à referência para as argamassas estabilizadas por 48h. Aos 28 dias houve um aumento para 0,15 e 0,20% de HPMC em 6,67 e 5,07% em comparação à mistura de referência. Já aos 42 dias o aumento foi de 7,11 e 5,88%, respectivamente.

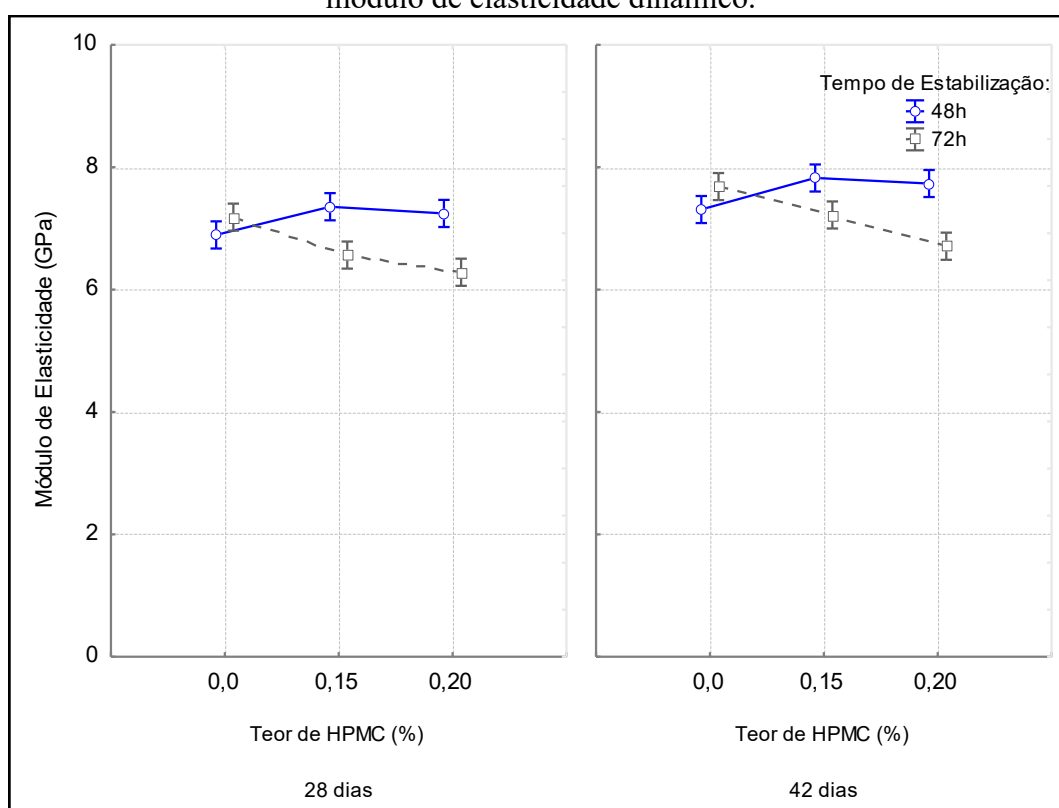
Contudo, para as argamassas estabilizadas por 72h ocorrem reduções nos valores de módulo em comparação à referência e ao acréscimo de HPMC. Aos 28 dias as reduções foram de 8,63 e 12,39% para 0,15 e 0,20% de HPMC em comparação à mistura de referência. Já aos 42 dias foram de 6,11 e 12,74%, respectivamente.

Todas as argamassas apresentaram acréscimos nos valores de módulo na idade de 42 dias em comparação aos 28 dias. O que pode estar relacionado à hidratação lenta da

argamassa estabilizada e, conseqüentemente ganhos no desempenho mecânico em uma maior idade de cura.

Na Figura 47 pode-se observar o efeito isolado dos teores de adição de HPMC sobre as misturas e o efeito combinado dos tempos de estabilização com os teores de adição de HPMC sobre os módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas estabilizadas aos 28 e 42 dias.

Figura 47 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e dos tempos de estabilização no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Autora (2021)

Aos 28 dias, com base da ANOVA dos resultados das argamassas estabilizadas por 48h, constata-se que a adição de HPMC não influenciou significativamente os valores de módulo de elasticidade. Já para as argamassas de 72h, ocorreram decréscimos nos valores de módulo quando se adicionou 0,15 e 0,20% de HPMC, os quais se mostraram significativos em comparação à referência, mas não entre eles.

Na idade de cura de 42 dias, a adição de HPMC também não influenciou significativamente os módulos de elasticidade das argamassas estabilizadas por 48h. Para as

argamassas de 72h, a redução ao adicionar 0,15% de HPMC não teve influência significativa, mas com 0,20% de HPMC houve um decréscimo significativo em comparação à referência. Apesar da redução com 0,20% de HPMC em comparação à mistura com 0,15%, o percentual de retentor de água não influenciou significativamente o módulo de elasticidade se comparados entre si.

Por meio de Tukey, Figura 48, é possível verificar que tanto aos 28 dias, quanto aos 42 dias de cura, os teores de 0,15 e 0,20% de HPMC são estatisticamente iguais entre eles, porém são diferentes entre os tempos de estabilização, 48 e 72h. Inferindo que a diferença é ocasionada pelo teor de AEH (0,85 e 1,2%), o qual é o principal contraste entre os tempos de estabilização.

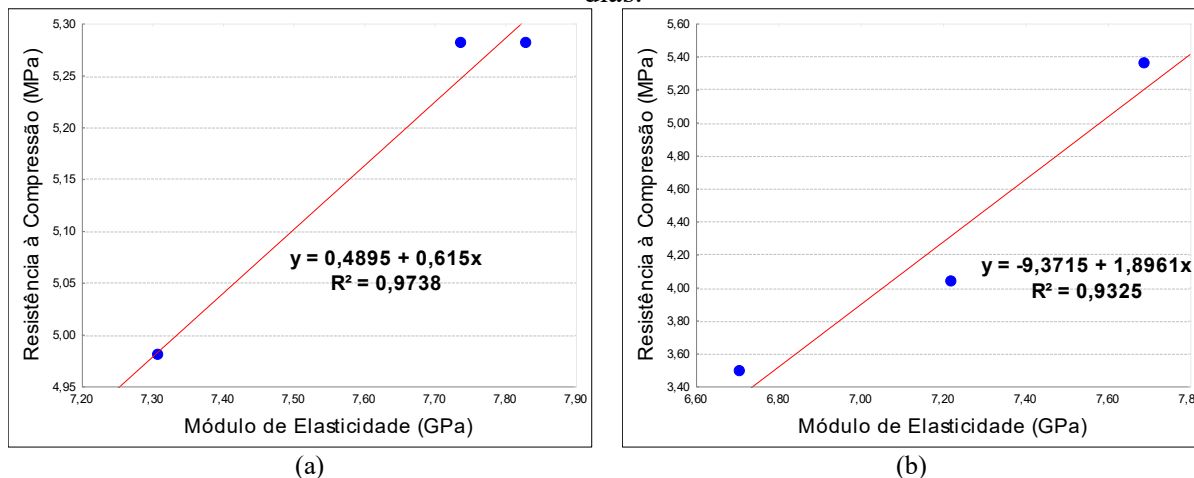
Figura 48 – Tukey: Módulo de elasticidade para as argamassas de 48 e 72h aos 28 e 42 dias.

Tukey HSD test; variable Módulo de Elasticidade (GPa) (Módulo)														
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests														
Error: Between MS = .02069, df = 12,000														
Teor de HPMC (%)	Tempo de Estabilização (h)	Idade (dias)	{1} 6,8950	{2} 7,3100	{3} 7,1850	{4} 7,6850	{5} 7,3550	{6} 7,8250	{7} 6,5650	{8} 7,2200	{9} 7,2450	{10} 7,7350	{11} 6,2850	{12} 6,7100
0,0	48	28		0,255125	0,678725	0,004715	0,163665	0,001216	0,524082	0,543323	0,450670	0,002838	0,032678	0,966040
0,0	48	42	0,255125		0,998248	0,366659	1,000000	0,091943	0,007559	0,999911	0,999996	0,231816	0,000574	0,036466
0,0	72	28	0,678725	0,998248		0,107878	0,980772	0,023507	0,029283	1,000000	0,999998	0,063000	0,001593	0,140232
0,0	72	42	0,004715	0,366659	0,107878		0,524082	0,995524	0,000317	0,155512	0,200139	1,000000	0,000179	0,000836
0,15	48	28	0,163665	1,000000	0,980772	0,524082		0,147674	0,147674	0,004715	0,996670	0,999427	0,351137	0,000421
0,15	48	42	0,001216	0,091943	0,023507	0,995524	0,147674		0,000203	0,034521	0,045401	0,999911	0,000174	0,000325
0,15	72	28	0,524082	0,007559	0,029283	0,000317	0,004715	0,000203		0,019955	0,015196	0,000260	0,716716	0,994091
0,15	72	42	0,543323	0,999911	1,000000	0,155512	0,996670	0,034521	0,019955		1,000000	0,091943	0,001164	0,096993
0,20	48	28	0,450670	0,999996	0,999998	0,200139	0,999427	0,045401	0,015196	1,000000		0,119892	0,000943	0,074132
0,20	48	42	0,002838	0,231816	0,063000	1,000000	0,351137	0,999911	0,000260	0,091943	0,119892		0,000177	0,000574
0,20	72	28	0,032678	0,000574	0,001593	0,000179	0,000421	0,000174	0,716716	0,001164	0,000943	0,000177		0,231816
0,20	72	42	0,966040	0,036466	0,140232	0,000836	0,022257	0,000325	0,994091	0,096993	0,074132	0,000574	0,231816	

Fonte: Autora (2021)

Na Figura 49 pode-se observar que houve uma correlação forte entre os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico aos 42 dias, tanto para 48h de estabilização (a), quanto para 72h (b). Para as argamassas de 48h, conforme se aumentou a resistência à compressão ocorreu acréscimo nos valores de módulo de elasticidade. Nas argamassas de 72h, à medida que ocorreu redução na resistência à compressão também se reduziram os módulos de elasticidade.

Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão com módulo de elasticidade aos 42 dias.



(a) argamassa de 48h (b) argamassa de 72h.

Fonte: Autora (2021)

A correlação de aumento da resistência à compressão e módulo de elasticidade, pode estar associada a uma argamassa mais rígida, com menor capacidade de se deformar sem que ocorra a ruptura, como consequência pode se ter o surgimento de fissuras no revestimento. Para investigar isto, relacionaram-se os resultados de módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão com os critérios de classificação quanto à fissuração da CSTB (1993) (Tabelas 29 e 30).

Tabela 29 – Critérios de suscetibilidade à fissuração – CSTB (1993)

Características	Critérios de classificação quanto à fissuração		
	Baixa suscetibilidade	Média suscetibilidade	Alta suscetibilidade
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	$E \leq 7000$	$7000 < E < 12000$	$E \geq 12000$
E/Rt	$E/Rt \leq 2500$	$2500 < E/Rt < 3500$	$E/Rt \geq 3500$

Rt: Resistência à tração na flexão (MPa).

Fonte: ADAPTADO DE CSTB (1993).

Tabela 30 – Suscetibilidade à fissuração das argamassas aos 42 dias

Características	Misturas					
	Ref. - 48h	0,15% HPMC - 48h	0,20% HPMC - 48h	Ref. - 72h	0,15% HPMC - 72h	0,20% HPMC - 72h
E (MPa)	7310	7830	7740	7690	7220	6710
E/Rt	3673,36	4142,85	4161,29	3864,32	3988,95	3878,61

Fonte: AUTORA (2021).

Analisando as argamassas pelo módulo de elasticidade, apresentaram média suscetibilidade à fissuração, com exceção da mistura de 72h com 0,20% de HPMC, que se enquadra em baixa suscetibilidade, conforme a Tabela 30 avaliada em conjunto com a Tabela 29.

Quando se correlacionou o módulo de elasticidade com a resistência à tração na flexão (E/Rt), as possibilidades de fissuração se elevaram. Dado que, todas as argamassas apresentaram alta suscetibilidade à fissuração, como consequência dos baixos valores de resistência à tração na flexão, pois os mesmos precisariam ser elevados para a redução da suscetibilidade à fissuração.

4.4 ETAPA 3 – PROPRIEDADES DE TRANSPORTE

4.4.1 Caracterização dos blocos de concreto

Primeiramente foi realizada a caracterização do substrato utilizado, bloco de concreto, para posterior aplicação das argamassas estabilizadas por 72h e estudo das propriedades de transporte. Nas Tabelas 31, 32 e 33 estão apresentados os resultados da caracterização dos blocos de concreto: umidade natural, absorção de água, análise dimensional e área líquida.

Tabela 31 – Umidade natural e absorção de água dos blocos de concreto

Blocos	Umidade natural (%)	Média (%)	Absorção de água (%)	Média (%)	Absorção (%) - NBR 6136 (2016)
1	70,66		7,13		
2	47,62	57,13	8,80	7,53	≤ 10
3	53,11		6,67		

Fonte: AUTORA (2021).

Tabela 32 – Resultados médios da análise dimensional

Blocos	l x c x h (mm)	Espessura L (mm)	Espessura T (mm)	Furos L (mm)	Furos T (mm)	Espessura equivalente (mm/m)	Ab (mm ²)
1	89,10 x 377,77 x 188,33	21,30	22,87	158,75	45,80	181,59	33659,01
2	90,47 x 377,90 x 190,07	21,75	22,43	159,60	47,75	178,09	34187,35
3	90,60 x 378,40 x 189,50	22,07	21,97	160,90	46,95	174,15	34283,04

l: largura; c: comprimento; h: altura; L: Longitudinal; T: Transversal; Ab: Área da base.

Fonte: AUTORA (2021).

Tabela 33 – Área líquida dos blocos de concreto

Blocos	Área líquida (mm ²)	Média (mm ²)
1	24716,81	
2	24628,20	24817,73
3	25108,18	

Fonte: AUTORA (2021).

Os blocos utilizados neste estudo, enquadram-se na classificação “C” com ou sem função estrutural (resistência característica à compressão $\geq 3,0$ MPa) e constituídos de agregado normal. Logo, a absorção média dos blocos está em consonância com a NBR 6136 (2016), onde a absorção média dos blocos foi $\leq 10\%$.

As dimensões encontradas nos blocos foram verificadas com as dimensões nominais da NBR 6136 (2016). A largura atendeu à tolerância permitida de ± 2 mm e a altura de ± 3 mm. Já o comprimento não atendeu a tolerância de ± 3 mm, chegando a 12,23 mm abaixo do valor referenciado em norma de 390 mm. Os blocos também não atenderam os valores de espessura longitudinal e transversal de 18 mm cada, com tolerância de ± 1 mm.

Ainda, pode-se constatar a variabilidade nos resultados de caracterização (Tabelas 31, 32 e 33) entre os espécimes do mesmo lote.

4.4.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é um processo físico de retenção de água na fase líquida pelos poros capilares de materiais cimentícios e é influenciado pela estrutura porosa

do material. Sendo um parâmetro fundamental para avaliação da durabilidade de argamassas, dado que, constitui uma das formas de transporte de agentes agressivos e deletérios aos materiais.

Na Tabela 34 estão apresentadas as absorções capilares aos 10 e 90 min para as argamassas estabilizadas por 72h com fosfogesso, com e sem sucção do substrato poroso, na idade de 42 dias. Por meio dos valores de absorção capilar aos 10 e 90 min, foram calculados os coeficientes de capilaridade das amostras.

Tabela 34 – Absorção de água em 10 e 90 min e coeficiente de capilaridade das argamassas estabilizadas com e sem sucção do substrato

Propriedades	Nomenclatura					
	Ref. c/sucção	0,15% HPMC c/sucção	0,20% HPMC c/sucção	Ref. s/sucção	0,15% HPMC s/sucção	0,20% HPMC s/sucção
Absorção capilar – 10 min (g/cm ²)	0,29	0,35	0,35	0,35	0,29	0,29
Absorção capilar – 90 min (g/cm ²)	0,57	0,62	0,65	0,64	0,61	0,57
Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	5,05	3,76	4,15	4,36	4,96	4,55

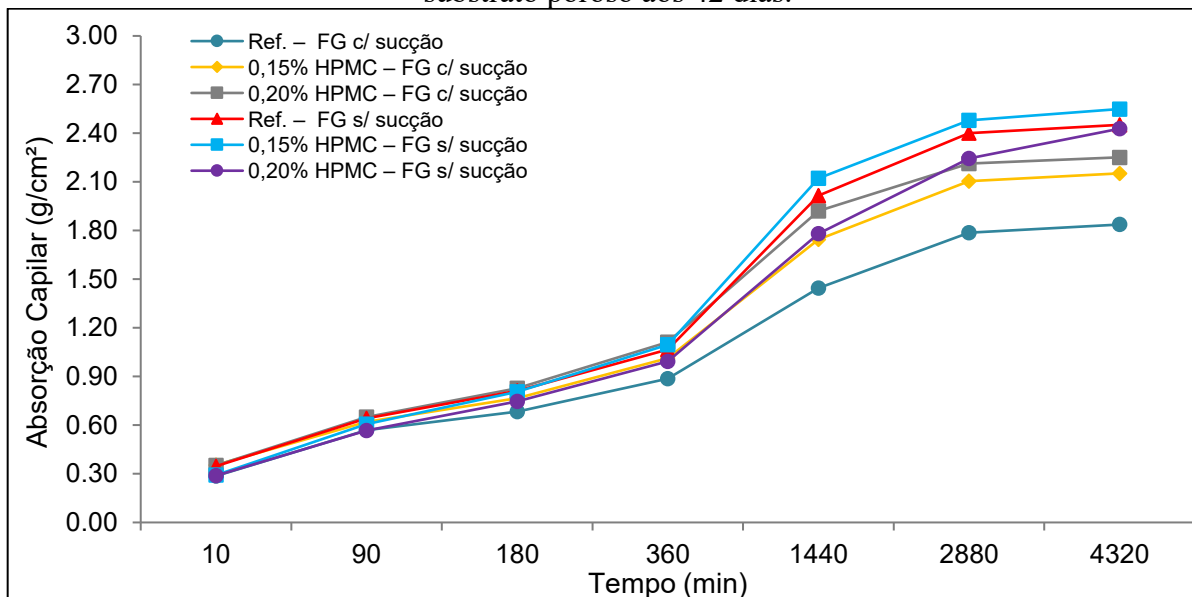
Fonte: AUTORA (2021).

Para as misturas com sucção da base os coeficientes de capilaridade diminuíram com a adição de HPMC, já nas misturas sem sucção da base, pode-se perceber um aumento no coeficiente de capilaridade com o uso de HPMC.

Verifica-se que os valores de coeficiente de capilaridades encontrados neste estudo são próximos aos valores obtidos em outros estudos com argamassas estabilizadas. Jantsch (2014) encontrou um valor de 2,3 g/dm².min^{1/2} para uma argamassa estabilizada por 72h na idade de cura de 40 dias. Oliveira (2017) obteve coeficientes entre 3,9 a 5,5 g/dm².min^{1/2} para argamassas com 0,95% de AEH e 0,20% AIA. Bauer *et al.* (2015) avaliaram 17 lotes de argamassas estabilizadas, onde os coeficientes de capilaridade variaram entre 2,0 a 4,4 g/dm².min^{1/2}.

A evolução da absorção de água por capilaridade até 4320 min (72 horas) para as argamassas estabilizadas por 72h, com e sem a interferência do bloco de concreto, está apresentada na Figura 50.

Figura 50 – Absorção capilar das argamassas estabilizadas por 72h com e sem sucção do substrato poroso aos 42 dias.



Fonte: Autora (2021)

A partir das curvas de absorção apresentadas, verifica-se que as argamassas sem sucção do substrato foram as que apresentaram os maiores valores de absorção capilar. Em 72 horas, a mistura com 0,15% de HPMC apresentou a maior absorção, de 2,55 g/cm², em um percentual de 4,08% maior do que a referência. A mistura com 0,20% de HPMC obteve uma absorção muito próxima à de referência, com uma redução de 0,81% apenas.

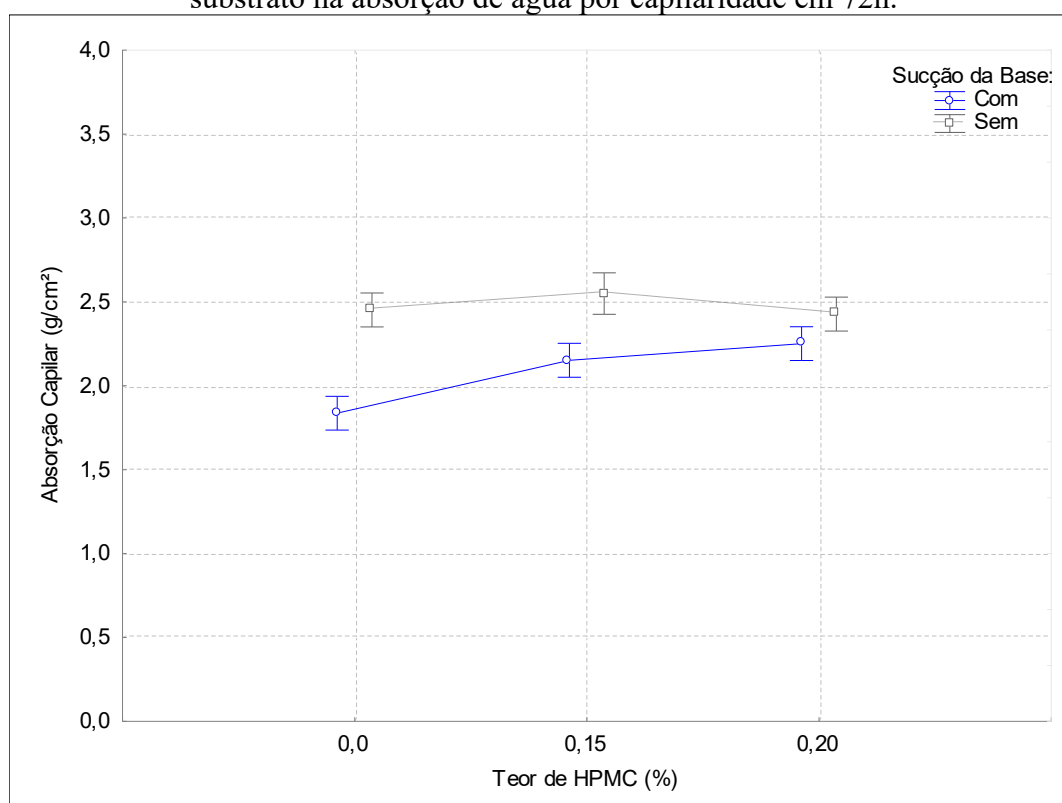
Um fator que pode ter contribuído para a menor absorção capilar das argamassas com sucção do substrato poroso é que as argamassas foram moldadas sobre papel filtro previamente umedecidas sobre o bloco de concreto e não diretamente no bloco de concreto, para evitar a ancoragem das argamassas. A absorção poderia ser diferente se as misturas tivessem sido moldadas propriamente no bloco de concreto, que por sua vez, tem poros de maiores diâmetros, que facilitam a saturação do componente, ainda a configuração da estrutura porosa deste substrato é responsável pela maior sucção de água da argamassa (PAES, 2004).

Para as argamassas com sucção da base, a de referência foi a que apresentou menores absorções capilares ao longo do tempo, chegando em 72h com uma absorção de 1,84 g/cm². Com o incremento do teor de HPMC, 0,15 e 0,20%, ocorreram aumentos nas absorções de água para todos os tempos analisados, em 72h foram de 16,30 e 22,28% em comparação à

referência. Uma hipótese levantada para a maior absorção de água com o uso do HPMC é a formação de uma rede porosa causada pelos éteres de celuloses, que pode ter uma ação específica no mecanismo de transferências hídricas em função do número de vazios de ar e poros capilares (POURCHEZ *et al.*, 2010).

Na Figura 51 pode-se observar o efeito isolado dos teores de adição de HPMC sobre as misturas e o efeito combinado das bases com os teores de adição de HPMC sobre as absorções de água por capilaridade em 72h das argamassas estabilizadas aos 42 dias. Na Figura 52 pode-se observar o teste de *Tukey* para a absorção de água das argamassas estabilizadas de 72h.

Figura 51 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e das bases com e sem sucção do substrato na absorção de água por capilaridade em 72h.



Fonte: Autora (2021)

Analisando os resultados de absorção em 72h para as argamassas com sucção do substrato poroso, por meio da análise ANOVA, constata-se que a adição de HPMC influenciou significativamente os valores de absorção capilar. Entretanto, o acréscimo na absorção com o teor de 0,20% comparado a 0,15% não foi significativo. Quanto às

argamassas sem sucção da base, a adição de HPMC não influenciou significativamente essa propriedade.

Figura 52 – Tukey: Absorção de água para as argamassas de 72h com e sem sucção da base.

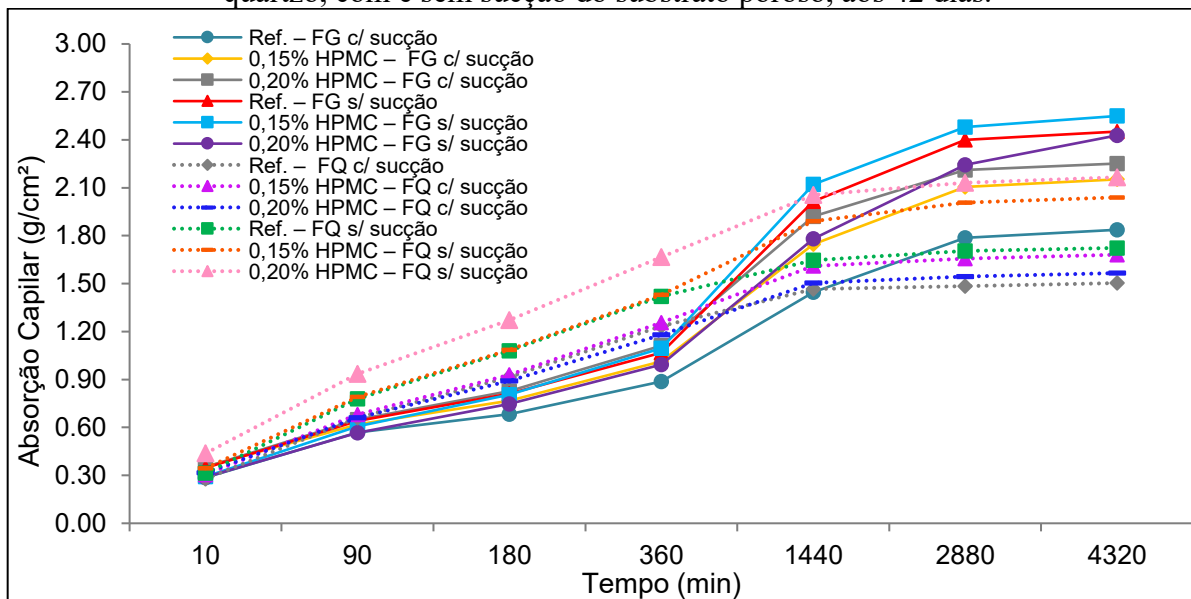
Tukey HSD test; variable Absorção Capilar (g/cm ²) (Absorção de água por capilaridade)							
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests							
Error: Between MS = ,00632, df = 11,000							
Teor de HPMC (%)	Sucção da base	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		1,8370	2,4516	2,1525	2,5493	2,2514	2,4280
0,0	Com		0,000177	0,005124	0,000175	0,000675	0,000181
0,0	Sem	0,000177		0,007500	0,755706	0,084225	0,998952
0,15	Com	0,005124	0,007500		0,002135	0,657527	0,013220
0,15	Sem	0,000175	0,755706	0,002135		0,016506	0,574368
0,20	Com	0,000675	0,084225	0,657527	0,016506		0,147684
0,20	Sem	0,000181	0,998952	0,013220	0,574368	0,147684	

Fonte: Autora (2021)

O efeito combinado das bases com e sem sucção do substrato poroso com os teores de HPMC foi observado por meio do teste de Tukey. As misturas sem sucção apresentaram valores estatisticamente iguais entre elas, quando comparadas às misturas com sucção, referência e 0,15% de HPMC, mostraram diferenças significativas na absorção capilar. Porém comparadas ao teor de 0,20% de HPMC, a mistura de referência e 0,20% de HPMC sem sucção se mostraram estatisticamente iguais.

A absorção de água por capilaridade também foi investigada para as argamassas com filler de quartzo, a fim de se comparar com as argamassas produzidas com fosfogesso, apresentadas na Figura 53. Aferindo a influência desses materiais no transporte de água das argamassas estabilizadas.

Figura 53 – Absorção capilar das argamassas estabilizadas por 72h com fosfogesso e filler de quartzo, com e sem sucção do substrato poroso, aos 42 dias.



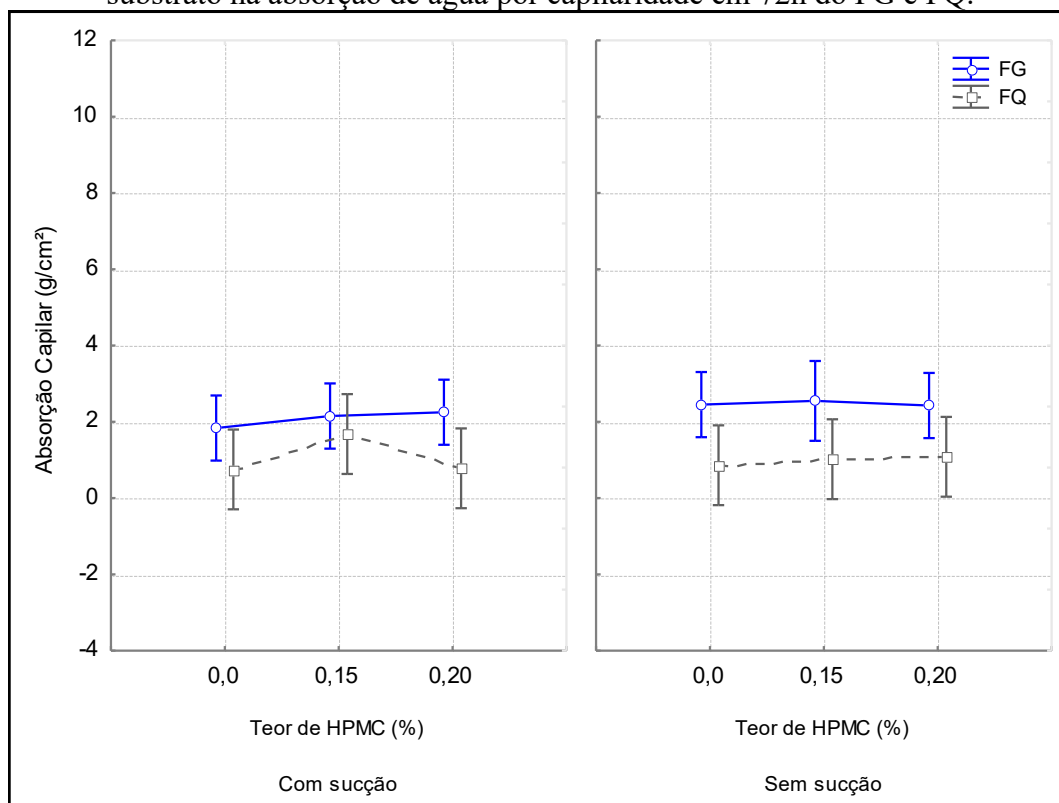
Fonte: Autora (2021)

Pode-se observar que as argamassas com filler de quartzo tiveram um aumento na absorção de água acentuado nas primeiras 24 horas, seguinte de um suave acréscimo até 72 horas. As misturas sem sucção do substrato foram as que apresentaram os maiores valores de absorção capilar, em consonância com o estudo de fosfogesso.

Em 72 horas a mistura com 0,20% de HPMC sem sucção foi a que apresentou a maior absorção capilar de 2,17 g/cm², 26,16% maior que à referência. A mistura com 0,15% de HPMC teve um acréscimo na absorção capilar de 18,60% em comparação à referência. Para as misturas com sucção da base porosa a maior absorção capilar foi para a mistura com 0,15% de HPMC (1,68 g/cm²), com um aumento de 12,0% em comparação a mistura de referência. A argamassa com 0,20% de HPMC apresentou um acréscimo na absorção de 4,67% em relação à referência. Ficando evidente que tanto para sucção, como para sem sucção do bloco de concreto, as argamassas produzidas com retentor de água, foram as que apresentaram os maiores valores de absorção de água por capilaridade.

Para comparar os resultados de absorção capilar das argamassas com filler de quartzo com as argamassas de fosfogesso se utilizou ANOVA, conforme a Figura 54.

Figura 54 – ANOVA: Efeito dos teores de adição de HPMC e das bases com e sem sucção do substrato na absorção de água por capilaridade em 72h do FG e FQ.



Fonte: Autora (2021)

É perceptível que as argamassas com fosfogesso, indiferente da base, absorveram maior quantidade de água por capilaridade em 72h do que as argamassas com filler de quartzo. Schaefer (2013) obteve que as argamassas com fosfogesso, predomínio de sulfato de cálcio, absorveram maior volume de água do que as argamassas com predomínio de cimento Portland, indicando a maior porosidade do fosfogesso. Guindani (2018) alcançou uma menor absorção de água em argamassas estabilizadas produzidas com filler de quartzo em comparação à argamassa com 100% de cimento, sugerindo uma menor quantidade de poros capilares devido à presença do filler de quartzo.

Analisando os resultados por ANOVA, os acréscimos nas absorções de água sofridos pelas argamassas com fosfogesso em comparação as com filler de quartzo, não foram significativos, tanto para sucção do substrato poroso, quando para sem sucção. Ainda, os teores de HPMC não influenciaram significativamente os valores de absorção capilar.

Por meio de Tukey, verificou-se que todos os valores de absorção capilar em 72h são estatisticamente iguais, indiferente das variáveis aplicadas. Os resultados podem ser observados na Figura 55.

Figura 55 – Tukey: absorção de água para as argamassas de 72h com FG e FQ, com e sem sucção da base.

Tukey HSD test; variable Absorção Capilar (g/cm²) (Absorção capilar FG x FQ)														
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests														
Error: Between MS = ,49149, df = 17,000														
Teor de HPMC (%)	Sucção da base	Fino	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}
			1,8370	,75172	2,4516	,86173	2,1525	1,6809	2,5493	1,0199	2,2514	,78304	2,4280	1,0828
0	Com	FG		0,847799	0,992080	0,913863	0,999982	1,000000	0,989539	0,971677	0,999741	0,868736	0,994199	0,983938
0	Com	FQ	0,847799		0,322568	1,000000	0,576392	0,963581	0,366814	1,000000	0,485514	1,000000	0,339809	0,999996
0	Sem	FG	0,992080	0,322568		0,407797	0,999989	0,981232	1,000000	0,547627	1,000000	0,345578	1,000000	0,606184
0	Sem	FQ	0,913863	1,000000	0,407797		0,678624	0,984926	0,449563	1,000000	0,586682	1,000000	0,427524	1,000000
15	Com	FG	0,999982	0,576392	0,999989	0,678624		0,999695	0,999941	0,813292	1,000000	0,605629	0,999995	0,858431
15	Com	FQ	1,000000	0,963581	0,981232	0,984926	0,999695		0,977067	0,997248	0,998305	0,971082	0,985041	0,998845
15	Sem	FG	0,989539	0,366814	1,000000	0,449563	0,999941	0,977067		0,580656	0,999997	0,389450	1,000000	0,634249
15	Sem	FQ	0,971677	1,000000	0,547627	1,000000	0,813292	0,997248	0,580656		0,731700	1,000000	0,569516	1,000000
20	Com	FG	0,999741	0,485514	1,000000	0,586682	1,000000	0,998305	0,999997	0,731700		0,513982	1,000000	0,784864
20	Com	FQ	0,868736	1,000000	0,345578	1,000000	0,605629	0,971082	0,389450	1,000000	0,513982		0,363710	0,999999
20	Sem	FG	0,994199	0,339809	1,000000	0,427524	0,999995	0,985041	1,000000	0,569516	1,000000	0,363710		0,628214
20	Sem	FQ	0,983938	0,999996	0,606184	1,000000	0,858431	0,998845	0,634249	1,000000	0,784864	0,999999	0,628214	

Fonte: Autora (2021)

4.4.3 Isoterma de desorção

A Tabela 35 apresenta os valores de conteúdo mássico de umidade (W), obtidos experimentalmente para cada formulação em cada umidade relativa específica (h). Já a Tabela 36, mostra os valores de Wm, k e c calculados para cada argamassa a partir do ajuste dos pontos experimentais (h,W) ao modelo matemático de GAB e a superfície específica das argamassas (Se) calculadas a partir dos valores de Wm.

Tabela 35 – Conteúdo de umidade mássico em função da umidade relativa das argamassas estabilizadas por 72h

Misturas	Conteúdo de Umidade Mássico (%)					
	h = 0,06	h = 0,23	h = 0,31	h = 0,65	h = 0,75	h = 0,97
Ref.	1,553	1,785	1,76	2,022	2,142	2,396
0,15% HPMC	1,386	1,737	1,698	2,024	2,184	2,573
0,20% HPMC	1,581	1,786	1,801	2,085	2,213	2,595

Fonte: AUTORA (2021).

Tabela 36 – Valores ajustados pelo modelo de GAB e superfície específica (SGAB)

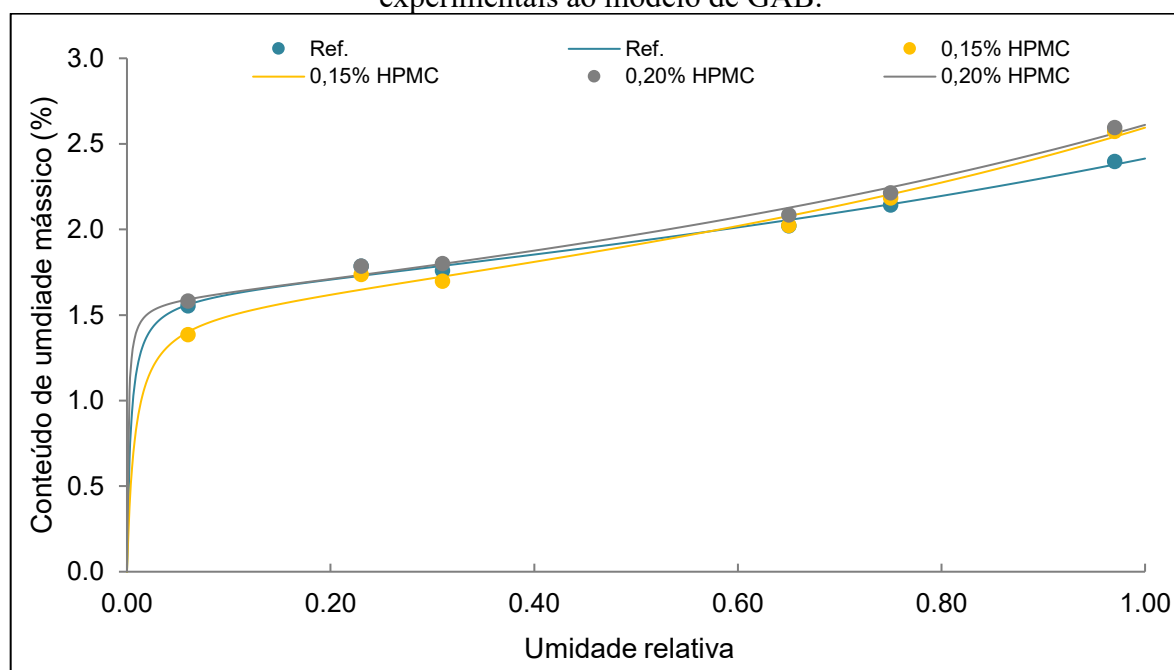
Misturas	Wm (%)	c	k	Erro	S _{GAB} (m ² /g)
Ref.	1,622	822,811	0,330	0,005	54,200
0,15% HPMC	1,538	317,159	0,410	0,013	51,393
0,20% HPMC	1,585	2029,314	0,393	0,007	52,964

Erro: somatório dos erros quadrados dos pontos experimentais com relação aos pontos teóricos descritos pelo modelo de GAB.

Fonte: AUTORA (2021).

A Figura 56 apresenta as isotermas de desorção das argamassas, em que os pontos representam os pontos obtidos experimentalmente e as linhas representam o ajuste matemático obtido pelo modelo matemático de GAB.

Figura 56 – Isotermas de desorção das argamassas estabilizadas a partir do ajuste dos pontos experimentais ao modelo de GAB.



Fonte: Autora (2021)

Analisando os resultados quanto à forma, as isotermas geradas pelo modelo de GAB assemelham-se às isotermas do tipo II, característica de sólidos não porosos ou macroporosos. Nesses sólidos, ocorre a adsorção de mono e multicamada. Ainda, não apresentam histerese, ou seja, reversível. Porém, ressalta-se que não foi realizada a isoterma de adsorção, não sendo possível verificar a ocorrência de histerese.

Pelas curvas obtidas podem ser diferenciadas três fases: em umidades relativas elevadas, ocorre a dessorção dos macroporos, a qual é pouco significativa, e o esvaziamento da água condensada em mesoporos, em umidades relativas intermediárias, os mesoporos preenchidos pela adsorção de multicamadas são esvaziados, e em baixas umidades, ocorre a dessorção da monocamada presente nos microporos.

Investigando o efeito do retentor de água à base de celulose nas curvas de dessorção das argamassas, faz-se possível verificar que os maiores conteúdos de umidade mássicos nos trechos de 97 a 65% são apresentados pelas argamassas com 0,15 e 0,20% de HPMC. Com a diminuição da umidade relativa de 65 a 6%, os traços que apresentam maior conteúdo de umidade mássico são o de referência e 0,20% de HPMC. Sendo o de 0,20% de HPMC o que contém maior conteúdo de umidade mássico em todas as umidades relativas analisadas.

Nota-se ainda que nas curvas das argamassas de referência e 0,15% de HPMC, ocorre uma inversão de comportamento próximo ao teor de umidade de 65%. Esta inversão consiste em que a amostra de argamassa de referência apresenta maior conteúdo de umidade para baixos teores de umidade relativa (até 65%), e menores conteúdos de umidade quando se consideram umidades relativas acima de 65%. Já a curva estabelecida para a argamassa com 0,15% de HPMC, apresenta menores conteúdos de umidade mássicos para umidades relativas abaixo de 65% e maiores conteúdos acima de 65%.

Estas diferenças de comportamento com relação à dessorção do vapor de água nas argamassas são reflexos dos parâmetros que alteram a estrutura porosa e a distribuição dos tamanhos dos poros, neste caso o percentual de adição do éter de celulose (HPMC). Onde o traço com maior percentual de HPMC, 0,20%, apresentou os maiores conteúdos mássicos em todas as umidades relativas analisadas, evidenciando um aumento da porosidade da argamassa com esse teor de HPMC.

Os raios de poros limite foram calculados a partir do ajuste GAB para temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e são apresentados na Tabela 37. Poros com raios maiores do que o raio limite não condensam em dada umidade relativa (h).

Tabela 37 – Valores de raio do poro limite das argamassas estabilizadas

Misturas	Raio do poro limite (nm)					
	0,06	0,23	0,31	0,65	0,75	0,97
Ref.	0,67	1,04	1,24	2,85	4,09	35,36
0,15% HPMC	0,65	1,05	1,24	2,87	4,13	35,42
0,20% HPMC	0,68	1,05	1,25	2,87	4,12	35,41

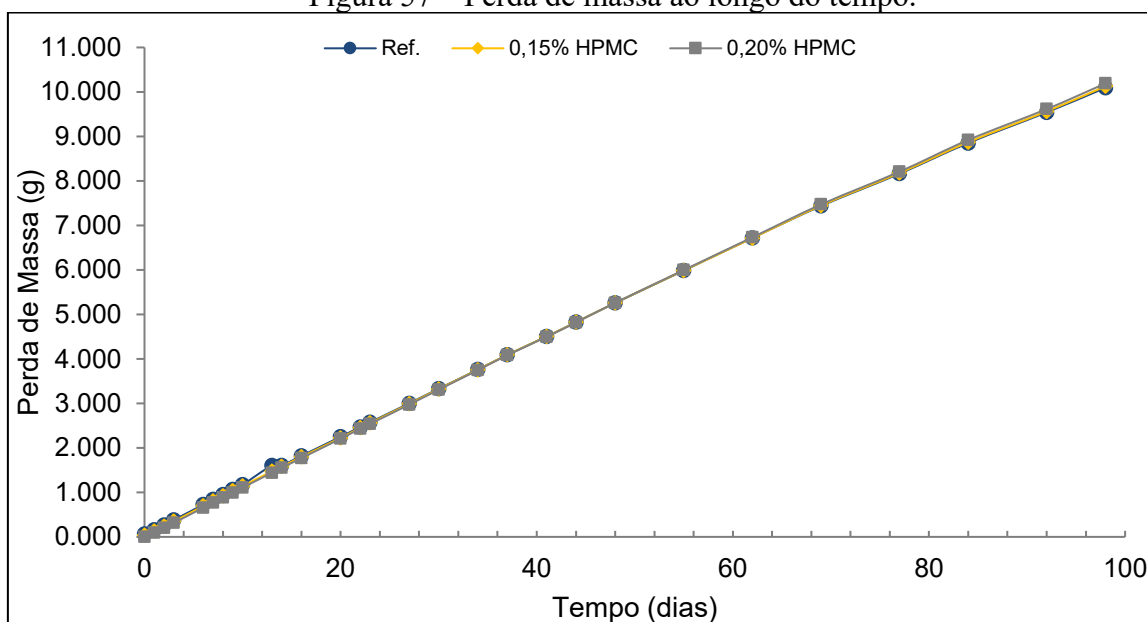
Fonte: AUTORA (2021).

O raio do poro limite aumentou conforme o aumento da umidade. Podendo-se verificar que para umidades relativas inferiores a 65%, a condensação capilar ocorreu apenas nos microporos (<2nm). Já para as umidades relativas de 65, 75 e 97%, a condensação ocorreu nos mesoporos (entre 2 e 50nm).

4.4.4 Permeabilidade ao vapor de água

Os resultados da permeabilidade ao vapor de água evidenciam profundamente a perda de massa das argamassas estabilizadas de 72h, conforme pode ser observado na Figura 57.

Figura 57 – Perda de massa ao longo do tempo.



Fonte: Autora (2021)

A perda de massa se mostrou contínua durante todo o ensaio e para todas as misturas estudadas. Efeito este, que já era esperado, devido à solução salina utilizada dentro do copo ter sido o sulfato de potássio (UR: 97%), o qual apresenta umidade relativa elevada, ocorrendo à perda de massa. O mesmo ocorreu no estudo de Jantsch (2015) para argamassas estabilizadas por 72h, onde também utilizou uma solução com umidade relativa elevada, nitrato de potássio (UR: 94%).

Os resultados de fluxo de vapor, permeância, permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de permeabilidade estão expostos na Tabela 38.

Tabela 38 – Permeabilidade ao vapor de água das argamassas estabilizadas de 72h

Nomenclatura	Fluxo de vapor (Kg/s)	Permeância (Λ) (Kg/m².Pa.s)	Permeabilidade (p) (Kg/m.Pa.s)	Coefficiente de permeabilidade (μ)
Ref.	1,184E-09	2,538E-10	1,269E-12	0,764
0,15% HPMC	1,192E-09	2,555E-10	1,277E-12	0,759
0,20% HPMC	1,203E-09	2,579E-10	1,289E-12	0,752

Fonte: AUTORA (2021).

A argamassa de referência teve a transmissão de vapor reduzida quando comparada as argamassas com HPMC. Indicando que o uso de HPMC facilita a passagem de vapor dentro das amostras. Logo, as argamassas com HPMC mostraram-se mais permeáveis ao vapor de água do que a referência.

A permeabilidade aumentou com o acréscimo da dosagem do retentor de água. O teor de 0,20% de HPMC apresentou o maior valor de permeabilidade, evidenciando que esse teor ocasionou um aumento na porosidade da argamassa. Indicando maior conexão entre os poros.

5 CONCLUSÕES

Por meio do estudo em pastas foi possível analisar o efeito do FG e dos aditivos nas misturas cimentícias. A adição de FG em 50% reduziu a fluidez da mistura, devido a maior necessidade de água desse material, mostrando-se poroso. O FG contribuiu para o atraso no início de pega e reduziu o pico de fluxo de calor máximo em comparação à pasta só com cimento. A tensão de escoamento inicial dinâmica aumentou drasticamente quando se substituiu o cimento pelo FG. O FG permite inferir que seu uso promove um aumento na tensão mínima necessária a ser aplicada para que possibilite a pasta fluir. Estes resultados indicam que o uso isolado de FG (sem aditivos) refletiria em reduções na fluidez e no espalhamento das argamassas.

O teor de adição de 0,20% de HPMC proporcionou os melhores resultados no estudo em pastas. Esse teor possibilitou o maior tempo para a retomada da hidratação do cimento, 285h. A pasta com 0,20% foi a que obteve a maior abertura em 48h e a pasta com 0,15% foi a que menos reduziu o percentual de fluidez ao longo do tempo. Esse teor também contribuiu para a redução da viscosidade aparente e para a melhora da fluidez, facilitando o escoamento da pasta ao longo do tempo, onde em 48h a viscosidade foi de 0,453 Pa.s para 0,20% e 1,008 Pa.s para 0,15%.

Analisando o efeito do AEH na cinética de hidratação, obtém-se que o mesmo prolongou o tempo de início de pega para até 230h. Já na tensão de escoamento, quando se adicionou o AEH a tensão reduziu em comparação à pasta só com FG, indicando que esse aditivo atuou favorecendo a fluidez e reduzindo o atrito interno entre as partículas de cimento e FG.

Mediante o estudo de argamassas estabilizadas, fez-se possível ver o efeito benéfico do HPMC, o qual cessou o fenômeno de exsudação de água, que ocorreu somente para as argamassas de referência (sem HPMC). O HPMC conferiu retenção de água ao material. Em relação à resistência à compressão, as argamassas de 48h com 0,15 e 0,20% de HPMC apresentaram resistências superiores a de referência (em 6,02 e 6,02%). Ainda, as argamassas de 48h apresentaram melhor desempenho mecânico que as argamassas de 72h. O aumento do teor de AEH para 1,2% na estabilização de 72h ocasionou prejuízos nas resistências à compressão. Já para as resistências à tração na flexão, ocorrem reduções com o uso de

HPMC (0,15 e 0,20%), tanto para as argamassas de 48h (em 5,02 e 6,53%) quanto para as de 72h (em 9,04 e 13,06%), em relação à referência. Na propriedade de módulo de elasticidade, as argamassas curadas por 42 dias apresentaram valores superiores às curadas por 28 dias. O que pode estar relacionado à hidratação lenta da argamassa estabilizada e, conseqüentemente ganhos no desempenho mecânico em uma maior idade de cura.

A partir das curvas de absorção, verificou-se que as argamassas sem sucção do substrato foram as que apresentaram os maiores valores de absorção capilar. Em 72 horas, a mistura com 0,15% de HPMC apresentou a absorção de água mais elevada. Para as argamassas com sucção da base, bloco de concreto, o incremento do teor de HPMC (0,15 e 0,20%), acarretou em aumentos nas absorções de água para todos os tempos analisados. Comparando as argamassas produzidas com FG e FQ, ficou perceptível que as argamassas com FG, indiferente da base, absorveram maior quantidade de água por capilaridade em 72h do que as argamassas com FQ.

Quanto à caracterização da estrutura porosa das argamassas, o ensaio de isoterma de dessorção permitiu identificar que o traço com maior percentual de HPMC, 0,20%, apresentou os maiores conteúdos mássicos em todas as umidades relativas analisadas. Em relação à permeabilidade ao vapor de água, ocorreu um aumento com o acréscimo da dosagem do retentor de água. O teor de 0,20% de HPMC apresentou o maior valor de permeabilidade. Assim, ficando evidente que o teor de 0,20% de HPMC ocasionou um aumento na porosidade das argamassas, indicando maior conexão entre os poros, nas propriedades avaliadas.

Por fim, compreende-se que apesar da redução na fluidez e maior estresse de escoamento causado pelo FG no estudo em pastas, quando se combina o seu uso com aditivos (AEH e HPMC), pode-se obter uma maior fluidez, menor tensão de escoamento e menor viscosidade. O FG contribuiu para o retardo dos tempos de pega, efeito este, benéfico para a estabilização das argamassas. Ainda, por meio do estudo em argamassas, quando se compara a resistência à compressão da argamassa com FG versus a argamassa com cimento se tem um aumento de 17,73% na resistência. Por meio do exposto, faz-se visível o potencial de utilização do FG, sendo viável a sua utilização na matriz cimentícia para a produção de argamassa estabilizada, dando uma nova destinação a esse material e evitando a deterioração ambiental de grandes áreas onde esse produto é armazenado, e também, a exploração das reservas naturais de gesso.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados pelo programa experimental desta pesquisa, sugerem-se como questões a serem estudadas por trabalhos futuros:

- Avaliar a absorção das moléculas dos aditivos pelas partículas de cimento e FG por meio de suspensões aquosas e análises de íons de cálcio e teor de carbono livre;
- Explorar a utilização do FG em mais percentuais de substituição para a produção de argamassas estabilizadas, quanto a sua estabilização e desempenho mecânico;
- Avaliar a aderência das argamassas estabilizadas ao substrato quando aplicadas diretamente sobre laje e/ou bloco de concreto;
- Fazer o ensaio de isoterma de adsorção para verificar se há a ocorrência de histerese.

REFERÊNCIAS

ALVES, Nielsen José Dias. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 91**: Specification for masonry cement: determination of water retention and air content. West Conshohocken, 2003.

_____. **ASTM C 270**: Standard specification for mortar for unit masonry. 2019.

_____. **ASTM C 1148**: Standard test method for measuring the drying shrinkage of masonry mortar. 2014.

_____. **ASTM C 1498**: Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials. 2016.

_____. **ASTM C 1506**: Standard test method for water retention of hydraulic cement-based mortars and plasters. 2017.

_____. **ASTM E 1876**: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. 2015.

ANDRADE, D. S.; BAUER, E.; PAES, I. N. L. Isotermas de dessorção de água em argamassas de cimento e cal. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

ARNEZ, D. G.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. Argamassa estabilizada: influência da lâmina de água disposta na estocagem e da pré-saturação do substrato cerâmico. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, v. 2, p. 27-34, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **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, 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, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **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, 2005.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

AZEVEDO, N. H. de. **Avaliação do desempenho de pastas de cimento Portland reforçadas com nanobastões de carbeto de silício após tratamento térmico**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BALAYSSAC, J. P.; NICOT, P.; RUOT, B.; DEVÈS, O.; DÉTRICHÉ, C. H. Influence of admixtures on the cracking sensitivity of mortar layers applied to a mineral substrate. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2828-2836, jun. 2011.

BAUER, E.; REGUFFE, M.; NASCIMENTO, M. L. M.; CALDAS, L. R. Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

BAUER, Elton. Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades. In: LEM-UNB, 2005, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: Universidade de Brasília, SINDUCON-DF, 2005.

BAUER, Elton. Estudo dos aditivos para argamassas de revestimento. **Relatório Técnico**. Laboratório de Ensaio de Materiais, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

BELLEI, P.; JANTSCH, A. C.; TEMP, A. L.; NUNES, G. R.; OLIVEIRA, M. D. de; MOHAMAD, G. Estudo comparativo do desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas estabilizadas de 36h e 72h. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

BENTZ, D. P.; PELTZ, M. A.; SNYDER, K. A.; DAVIS, J. M.; Verdict: Viscosity enhancers reducing diffusion in concrete Technology: A New approach to decreasing transport. **Concrete International**, p. 31-36, jan. 2009.

BRONDINO, J. A. **Contribuição ao estudo do fosfogesso comparativamente a algumas propriedades do gesso mineral**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) – Programa de Pós-graduação em Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

BRUMAUD, C.; BAUMANN, R.; SCHMITZ, M.; RADLER, M.; ROUSSEL, N. Cellulose ethers and yield stress of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 55, p. 14-21, jan. 2014.

CAMPOS, G. M.; MACIOSKI, G.; CASALI, J. M. Estudo do tempo de início de pega de argamassas com aditivo estabilizador de hidratação. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2013, Gramado. **Anais [...]**. Gramado, 2013.

CANUT, M. M. C.; JACOMINO, V. M. F.; BRATVEIT, K.; MAGALHÃES GOMES, A.; YOSHIDA, M. I. Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries. **Materials Characterization**, v. 59, p. 365-373, 2008.

CAPPELLARI, M.; DAUBRESSE, A.; CHAOUICHE, M. Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: relationship with water-retention. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 950-961, jan. 2013.

CARASEK, Helena. **Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia de materiais: Argamassas**. São Paulo: ISAIA G. C., 2010.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CASALI, J. M.; MELO, F. D.; SERPA, V. C.; OLIVEIRA, A. L. de; BETIOLI, A. M.; CALÇADA, L. M. L. Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready mix mortar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 33-52, abr/jun. 2018.

CASALI, J.; MANN NETO, A.; ANDRADE, D.; ARRIAGADA, N. Avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa estabilizada para assentamento e revestimento. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Juiz de Fora e Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT (CSTB). **Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation – Cahier MERUC**. Livraison 341, cahier 2669-3, juillet-août 1993. Paris.

CONTE, T.; CHAOUICHE, M. Parallel superposition rheology of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, nov. 2019.

COSTA, A. R. D.; MATOS, S. R. C.; CAMARINI, G.; GONÇALVES, J. P. Hydration of sustainable ternary cements containing phosphogypsum. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 28, jul. 2021.

COTA, S. D. S.; JACOMINO, V. M. F.; TADDEI, M. H. T. NASCIMENTO, M. R. Modelagem numérica do impacto ambiental associado à aplicação de fosfogesso como cobertura de aterros sanitários. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS)**, v. 26, p. 27-42, 2012.

DALLAGNOL, G. H. **Estudo sobre as características nos estados fresco e endurecido de uma argamassa para revestimentos estabilizada por 72 horas variando o tempo de aplicação a partir de sua mistura na central dosadora**. 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2018.

DANG, Y.; SHI, X.; MERY, S.; XIEN, N.; BENSON, A.; YANG, Z. Influence of surface sealers on the properties of internalley cured cement mortar containing saturated fine lightweight aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, dec. 2015.

DEGIRMENCI, N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1857-1862, aug. 2008.

EUROPEAN NORM. **EN 1015-8**: Methods of test for mortar for masonry, part. 8: determination of water retentivity of fresh mortar. 1999.

_____. **EN 1015-19**: Methods of test for mortar for masonry: determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. 2000.

GUINDANI, Eduardo Nobre. **Argamassa estabilizada para revestimento: Avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco e endurecido.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: ISAIA G. C., Ed. IBRACON, 2011.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES (RILEM). **MR 6: Tendency of water to separate from mortars (bleeding).** 1982.

ISLAM, G. M. S.; CHOWDHURY, F. H.; RAIHAN, M. T.; AMIT, S. K. S.; ISLAM, M. R. Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 744-751, 2017.

ISSAADI, N.; NOUVIAIRE, A.; BELARBI, R.; AIT-MOKHTAR, A. Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 237-247, may. 2015.

JANTSCH, Ana Cláudia Akele. **Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: I. principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 647-654, apr. 2001.

JIANG, G.; WU, A.; WANG, Y.; LI, J. The rheological behavior of paste prepared from hemihydrate phosphogypsum and tailing. **Construction and Building Materials**, v. 229, dec. 2019.

KONG, X.; EMMERLING, S.; PAKUSCH, J.; RUECKEL, M.; NIEBERLE, J. Retardation effect of styrene-acrylate copolymer latexes on cement hydration. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 23-41, may. 2015.

LOZOVEY, Ana Carolina Reis. **Método de dosagem de argamassa estabilizada para assentamento de alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MA, B.; PENG, Y.; TAN, H.; JIAN, S.; ZHI, Z.; GUO, Y.; QI, H.; ZHANG, T.; HE, X. Effect of hydroxypropyl-methyl cellulose ether on rheology of cement paste plasticized by

polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 341-350, jan. 2018.

MA, S.; LI, W.; ZHANG, S.; GE, D.; YU, J.; SHEN, X. Influence of sodium gluconate on the performance and hydration of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 138-144, aug. 2015.

MACHADO, L. T. **Caracterização de argamassas estabilizadas para revestimento**. 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MACIOSKI, G.; COSTA, M. M. C. da.; CASALI, J. M. Caracterização de argamassas estabilizadas submetidas à sucção de substrato poroso. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA ARGAMASSAS, 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

MACIOSKI, G.; KUSZKOWSKI, H.; MELLO, M. do. R. de.; COSTA, M. da.; CASALI, J. M. Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas estabilizadas. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2013, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.

MANSOUTRE, S.; COLOMBET, P.; VAN DAMME, H. Water retention and granular rheological behavior of fresh C₃S paste as a function of concentration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1441-1453, sep. 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. McGraw-Hill, 3 ed., 2006.

MENDES, G. P.; PIOVESAN, A. Z. Avaliação da influência de diferentes tipos de cimentos nas propriedades da argamassa estabilizada. **Conhecimento em Construção**, v. 7, p. 25-44, 2020.

MILITO, J. A. de. **Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento Portland e sílica ativa para revestimento**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. **Cimento Portland**. Santana: Bookman, p. cap. 1, 2015.

OLIVEIRA, Valéria Costa de. **Estudo comportamental da formulação, dos requisitos, e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

OLIVEIRA, V. C. de.; BAUER, E.; SANTOS, M. Estudo comportamental das argamassas estabilizadas de revestimentos quanto a suscetibilidade a fissuração. In: XIII CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS, 2017, Ceará. **Anais** [...]. Ceará, 2017.

OU, Z. H.; MA, B.; JIAN, S. Influence of cellulose ethers molecular parameters on hydration kinetics of Portland cement at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 78-83, aug. 2012.

OUYANG, J.; HAN, B.; CAO, Y.; ZHOU, W.; LI, W.; SHAH, S. P. The role and interaction of superplasticizer and emulsifier in fresh cement asphalt emulsion paste through rheology study. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 643-653, oct. 2016.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimento de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. 2004. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PAES, I. L.; BAUER, E.; CARASEK, H. Revestimento em argamassa: influencia do substrato no transporte e fixação de água nos momentos iniciais pós-aplicação. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2003.

PAIVA, H.; ESTEVES, L. P.; CACHIM, P. B.; FERREIRA, V. M. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with diferente types of water retaining agentes. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1141-1146, feb. 2009.

PAOLINI, Marco; KHURANA, Rabinder. Admixtures for Recycling of Waste Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 221-229, 1998.

PATURAL, L.; MARCHAL, P.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; RUOT, B.; DEVÈS, O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 46-55, jan. 2011.

PEREIRA, R. R. **Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico de cimento Portland**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química e Bioquímica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

PETERSON, V. K.; JUENGER, M. C. G. Time-resolved quasielastic neutron scattering study of the hydration of tricalcium silicate: Effects of CaCl_2 and sucrose. **Physica B**, v. 385-386, p. 222-224, nov. 2006.

POURCHEZ, J.; RUOT, B.; DEBAYLE, J.; POURCHEZ, E.; GROSSEAU, P. Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 242-252, feb. 2010.

POURCHEZ, J.; PESCHARD, A.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GUILHOT, B.; VALLÉE, F. HPMC and HEMC influence on cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 288-294, feb. 2006.

RESENDE, Paulo Sérgio de Oliveira. **Efeito do ar incorporado em argamassas de revestimentos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira. **Produção e caracterização de materiais porosos obtidos pelo método de incorporação de espumas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

ROSALES, J.; PÉREZ, S. M.; CABRERA, M.; GÁZQUEZ, M. J.; BOLIVAR, J. P.; BRITO, J. de.; AGRELA, F. Treated phosphogypsum as an alternative set regulator and mineral addition in cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, jan. 2020.

SALOMÃO, Maria Cláudia de Freitas. 2016. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v. 12, p. 253-268, 2007.

SCHACKOW, A.; FERRARI, A. K.; EFFTING, C.; ALVES, V. O.; GOMES, I. R. Stabilized mortar with air incorporator agent and plasticizer set retarded: performance measurement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 1248-1259, dec. 2019.

SCHAEFER, C. O. **Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVA, Cecília Rodrigues da Silva. **Avaliação de diferentes tratamentos de base aplicados sobre alvenaria de bloco cerâmico na aderência da argamassa: Estudo de caso**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SOUZA, Aline Ferreira de. **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto**. 2007.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TAN, H.; GUO, Y.; ZOU, F.; JIAN, S.; MA, B.; ZHI, Z. Effect of borax on rheology of calcium sulphoaluminate cement paste in the presence of polycarboxylate superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 277-285, may. 2017a.

TAN, H.; ZOU, F.; MA, B.; GUO, Y.; LI, X.; MEI, J. Effect of competitive adsorption between sodium gluconate and polycarboxylate superplasticizer on rheology of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 338-346, jul. 2017b.

TEMP, A. L. **Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

TURRA, Daniel Giovani. **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas**. 2016. Trabalho de Diplomação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

YANG, L.; ZHANG, Y.; YAN, Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 204-213, jul. 2020.

ZHANG, X.; HE, Y.; LU, C.; HUANG, Z. Effects of sodium gluconate on early hydration and mortar performance of Portland cement-calcium aluminate cement-anhydrite binder. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 1065-1073, dec. 2017.

ZOU, D.; ZHANG, Z.; WANG, D. Influence of citric acid and sodium gluconate on hydration of calcium sulfoaluminate cement at various temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 263, dec. 2020.