



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Fernanda de Marco

**Estudo do uso de resíduo oriundo do sistema de dessulfurização de gases (FGD) como  
adição em argamassa estabilizada**

Florianópolis  
2023

Fernanda de Marco

**Estudo do uso de resíduo oriundo do sistema de dessulfurização de gases (FGD) como  
adição em argamassa estabilizada**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis

2023

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

MARCO, FERNANDA DE

Estudo do uso de resíduo oriundo do sistema de  
dessulfurização de gases (FGD) como adição em argamassa  
estabilizada. / FERNANDA DE MARCO; orientadora, Janaíde  
Cavalcante Rocha, 2023.

179 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Argamassas estabilizadas. 3. FGD.  
4. Tempos de estabilização. 5. Características reológicas.  
I. Rocha, Janaíde Cavalcante. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

Fernanda De Marco

**Estudo do uso de resíduo oriundo do sistema de dessulfurização de gases (FGD) como adição em argamassa estabilizada**

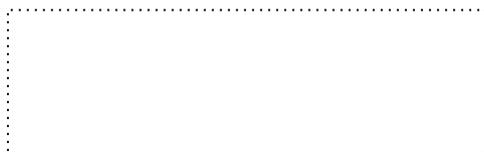
O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Elton Bauer  
Universidade de Brasília (UnB)

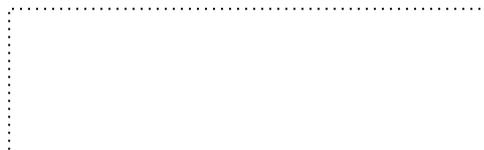
Prof. Juliana Casalli  
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto  
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, 2023.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida e pela oportunidade de vivenciar essa experiência tão enriquecedora.

A minha família pelo apoio incondicional durante a minha jornada acadêmica e por sempre me incentivarem na busca de conhecimento. Esse momento não é apenas uma conquista minha, mas de todos nós. Amo muito vocês!

Ao meu noivo, Adriano Schwartz Cerato, por sempre me apoiar e incentivar, sua presença e ajuda foram essenciais. Te amo!

A minha orientadora professora Janaíde Cavalcante Rocha, pela oportunidade que me foi dada, pelo apoio demonstrado durante o período de orientação, pelo conhecimento compartilhado e pela valiosa orientação. Muito obrigada por tudo que fizestes por mim.

Agradeço à banca de qualificação e defesa do mestrado pelo aceite do convite e pelas contribuições fundamentais para o aprimoramento do trabalho.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pelo conhecimento compartilhado, de maneira especial, aos amigos que estiveram comigo desde o início e foram imprescindíveis durante todo o meu mestrado. Obrigada por tornarem esta caminhada muito mais leve e especial.

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) e seus servidores, pela prestatividade na realização dos ensaios e pelo apoio técnico concedido.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

Aos demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para essa pesquisa.

## RESUMO

As argamassas estabilizadas são frequentemente empregadas na construção civil por permitirem a sua utilização por um período de tempo superior as argamassas convencionais, de forma a aumentar a sua trabalhabilidade em até 72 horas. Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a influência do resíduo do processo de dessulfurização de gases (FGD) em argamassas estabilizadas. O resíduo utilizado passou por tratamento térmico com o intuito de obter três composições químicas: di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita. Inicialmente, buscou-se avaliar o efeito da adição do FGD e do aditivo estabilizador de hidratação (AEH) em pastas de cimento Portland na reologia, na hidratação e na resistência à compressão. Quatro composições químicas do FGD foram avaliadas nos teores de 2,5%, 5%, 10% e 15%. A quantidade de AEH foi de 0,5%, 1% e 1,5% em relação ao cimento Portland. Os resultados do teste de reologia indicaram que a tensão de cisalhamento, a tensão de escoamento e a viscosidade equivalente aumentaram na presença do FGD de acordo com sua composição química. O di-hidrato apresentou os menores valores de tensão de cisalhamento, tensão de escoamento dinâmica e viscosidade equivalente comparado às demais misturas com resíduo, favorecendo a fluidez e contribuindo positivamente para o processo de estabilização. A adição do AEH reduziu a tensão de cisalhamento inicial das pastas, evidenciando que esse aditivo pode auxiliar na redução do atrito interno entre as partículas de cimento Portland e, conseqüentemente, favorecer a fluidez. No entanto, ao longo do período de estabilização, ocorreu o aumento da tensão de cisalhamento. Já a incorporação do FGD contribuiu para o aumento do tempo de início de pega, diminuiu os picos liberação de calor máximo e reduziu o grau de hidratação em comparação à pasta com cimento Portland, sugerindo a ocorrência de uma reação de hidratação mais lenta. Ainda, quando se compara a resistência à compressão das pastas com 15% de FGD hemi-hidrato, di-hidrato e anidrita com a argamassa referência se tem acréscimos de 40,08%, 14,4% e 17,20% na resistência, respectivamente. Posteriormente, foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas estabilizadas com FGD abrangendo principalmente os mecanismos de estabilização e o desempenho mecânico, com dosagens de 0,3% e 0,6% de AEH e teores de 2,5% e 15% de FGD. Os resultados mostraram que as argamassas com FGD apresentaram os menores índices de perda de espalhamento ao longo do tempo. O aumento do teor de AEH para 0,6% na estabilização proposta de 72 horas diminuiu o desempenho mecânico, o módulo de elasticidade e os resultados de absorção capilar. A adição do FGD nas argamassas estabilizadas contribuiu para o aumento do tempo de início de pega, reduziu o teor de AEH necessário para a produção de argamassas estabilizadas (48 e 72 horas) e aumentou o desempenho mecânico. Por fim, para viabilizar o uso do FGD em argamassas estabilizadas mais investigações devem ser realizadas.

**Palavras-chave:** Argamassas estabilizadas; FGD; Tempos de estabilização; Características reológicas.

## ABSTRACT

Ready-mix mortars are often used in construction for allowing them to be applied for a long time than conventional mortars, increasing their workability by up to 72 hours. This research aimed to evaluate the influence of residue from the gas desulphurization process (FGD) in ready mix mortar. The residue used was thermally treated to obtain three chemical compositions: dihydrate, hemihydrate and anhydrite. Initially, this study evaluated the effect of adding FGD and hydration stabilizer admixture (AEH) in cement pastes, by analyzing rheology, hydration kinetics and compressive strength. Four chemical compounds of FGD were evaluated at the levels of 2.5%, 5%, 10%, and 15%. The amount of AEH used was 0.5%, 1%, and 1.5%. The results of the rheology test indicated that the shear stress, yield stress, and equivalent viscosity increased in the presence of FGD, in accordance with its chemical composition. The dihydrate showed the lowest values of shear stress, dynamic yield stress, and equivalent viscosity compared to hemihydrate and anhydrite, favoring fluidity and contributing positively to the stabilization process. The addition of AEH decreased the initial shear stress of the pastes, evidencing that this admixture contributes to reducing the internal friction between the Portland cement particles, consequently, favoring the fluidity. However, over the stabilization period, there was an increase in shear stress. The addition of FGD increased the initial setting time, reduced the peak intensity of the maximum heat, and reduced the hydration degree compared to the Portland cement paste. These observations showed that cements with FGD added had a slower hydration reaction. Additionally, the compressive strength of mortars with 15% addition of hemihydrate, dihydrate, and anhydrite increased by 40.08%, 14.4%, and 17.20%, respectively, compared to the reference mortar. Furthermore, the fresh and hardened state properties of ready-mix mortars with FGD were evaluated, especially the stabilization mechanisms and the mechanical performance. The mixtures evaluated in this second stage were 0.3% and 0.6% for HAE, whereas 2.5% and 15% for FGD. The results indicated the FGD mortars showed the lowest spreading loss rate over time. Increasing the AEH content to 0.6% in the proposed stabilization of 72 hours decreased mechanical performance, elastic modulus, and increased the capillary absorption. The addition of FGD in the ready-mix mortars increased the initial setting time, reduced the AEH content required for the production of ready-mix mortars (48 and 72 hours), and increased the mechanical properties compared to the reference mortar. Finally, to enable the use of FGD in ready-mix mortars, further investigations must be carried out.

**Keywords:** Ready-mix mortars; FGD; Stabilization times; Rheological characteristics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tensão superficial e distribuição dos surfactantes .....	30
Figura 2 – Diagrama do sistema FGD úmido com a utilização de calcário .....	45
Figura 3 – Projeto e operação convencionais de um sistema de dessulfuração de gases de combustão com cal seca (FGD).....	46
Figura 4 – (a) Análises térmicas (TG e DSC) do gesso FGD e (b) DRX do gesso FGD em diferentes temperaturas.....	49
Figura 5 – Calorimetria diferencial de exploratória e termogravimétrica (DSC/TGA) do gesso FGD in natura .....	50
Figura 6 – (a) Resultado obtidos por calorimetria isotérmica dos cimentos compostos (b) Efeito da adição de sulfato de cálcio na reação de componentes do cimento .....	53
Figura 7 – (a) Distribuição granulométrica (b) Ensaio de calorimetria em partículas grossas, médias e finas .....	55
Figura 8 – Esquema representativo do programa experimental .....	60
Figura 9 – Tempo de armazenamento em recipiente hermético antes da realização dos ensaios da etapa 3 do estudo.....	62
Figura 10 – (a) Reômetro HAAKE MARS III; (b) Geometria cilindro concêntrico aletado ...	66
Figura 11 – Representação esquemática da determinação – Ensaio de resistência à penetração: (a) Molde sem e com argamassa (b) Penetrômetro de Proctor .....	74
Figura 12 – Esquema do calorímetro semi-adiabático utilizado no ensaio de calorimetria .....	76
Figura 13 – Preparação das amostras .....	80
Figura 14 – Execução do ensaio .....	80
Figura 15 – Formas de ruptura no ensaio de resistência à aderência à tração em um sistema de revestimento sem chapisco .....	81
Figura 16 – Equipamento do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	83
Figura 17 – Distribuição granulométrica do CP II F - 32.....	86
Figura 18 – Difratoograma de Raio – X do FGD após tratamento térmico .....	88
Figura 19 – Distribuição granulométrica do FGD.....	89
Figura 20 – Espectros de infravermelho das três composições químicas do gesso FGD.....	90
Figura 21 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	91
Figura 22 – Espectros de infravermelho do aditivo estabilizador de hidratação.....	93

Figura 23 – Fluidez em pastas de cimento Portland produzidas com a incorporação de FGD tratado a 50°C (D), 150°C (H) e 650°C.....	94
Figura 24 – Fluidez das pastas sem aditivo com: (a) 2,5% de FGD; (b) 5,0% de FGD; (c) 10% de FGD (d) 15% de FGD.....	96
Figura 25 – Análise da incorporação de FGD no tempo inicial (0h) em pastas com aditivo estabilizador de hidratação .....	97
Figura 26 – Análise da incorporação de FGD após 3 horas em pastas com aditivo estabilizador de hidratação.....	98
Figura 27 – Análise da incorporação de FGD após 24h em pastas com aditivo estabilizador de hidratação.....	99
Figura 28 – Análise da incorporação de FGD após 72h em pastas com aditivo estabilizador de hidratação.....	99
Figura 29 – Medidas de espalhamento das pastas com 0,5% de aditivo e FGD (a) di-hidrato; (b) hemi-hidrato e (c) anidrita .....	100
Figura 30 – Tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c) .....	101
Figura 31 – Tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c) e aditivo estabilizador de hidratação; Viscosidade vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c) e aditivo estabilizador de hidratação .....	102
Figura 32 – Tensão de escoamento dinâmica das pastas de cimento com aditivo avaliadas ao longo de 72 horas (a); Viscosidade equivalente em 100 s-1 das pastas de cimento avaliadas ao longo de 72 horas (b).....	104
Figura 33 – (a) Tensão de escoamento dinâmica e (b) Viscosidade equivalente das pastas REF, 15%FGD50°C, 15%FGD150°C e 15%FGD650°C.....	106
Figura 34 – Tensão de escoamento dinâmica das pastas REF, 15%FGD50°C0,5%A, 15%FGD150°C0,5%A e 15%FGD650°C0,5%A nos tempos de (a) 0 horas (b) 24 horas (c) 48 horas e (d) 72 horas .....	106
Figura 35 – Viscosidade equivalente das pastas REF, 15%FGD50°C0,5%A, 15%FGD150°C0,5%A e 15%FGD650°C0,5%A nos tempos de (a) 0 horas (b) 24 horas (c) 48 horas e (d) 72 horas .....	107
Figura 36 – Curvas de liberação de calor das pastas analisadas sem aditivo .....	109
Figura 37 – Curvas de liberação de calor com o uso de aditivo estabilizador de hidratação .	110

Figura 38 – Calor acumulado (ou total) liberado pelas amostras ao longo do tempo sem aditivo (a) e com (b) .....	110
Figura 39 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland avaliadas aos 28 dias com a adição de 15% de FGD tratado termicamente .....	112
Figura 40 – Ajuste no consumo de água do traço padrão.....	113
Figura 41 – Ajuste do aditivo incorporador de ar.....	114
Figura 42 – Retas de regressão obtidas no ensaio de resistência à penetração (03_REF) .....	115
Figura 43 – Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura referência nos três corpos de prova ensaiados (0,6% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados .....	118
Figura 44 – Elevação da temperatura versus tempo com 0,3% (a) e 0,6% (b) de AEH.....	120
Figura 45 – Calor acumulado ao longo do tempo com 0,3% e 0,6% AEH.....	120
Figura 46 – Teor de ar incorporado das argamassas estabilizadas com 0,3% de AEH de (a) 24 horas e (b) 48 horas .....	126
Figura 47 – Teor de ar incorporado das argamassas estabilizadas com 0,6% de AEH.....	126
Figura 48 – Correlação entre índice de consistência e teor de ar incorporado.....	127
Figura 49 – Absorção de água por capilaridade versus a raiz do tempo/min <sup>1/2</sup> .....	130
Figura 50 – Correlação entre a densidade de massa no estado e o coeficiente de capilaridade .....	133
Figura 51 – Resistência à compressão das argamassas estabilizadas aos 28 dias após a moldagem .....	134
Figura 52 – Resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas aos 28 dias após a moldagem .....	137
Figura 53 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas estabilizadas.....	139
Figura 54 – Correlação entre resistência à compressão com o módulo de elasticidade aos 28 dias.....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Retardo das misturas com a incorporação de 0,15% de sacarose.....	26
Tabela 2 – Principais componentes que afetam os mecanismos de entrada de ar em materiais cimentícios.....	32
Tabela 3 – Principais fatores que influenciam a incorporação de ar em compostos cimentícios .....	33
Tabela 4 – Contribuição dos resíduos em argamassas estabilizadas .....	42
Tabela 5 – Classificação das tecnologias de dessulfuração.....	43
Tabela 6 – Composição química do gesso FGD.....	47
Tabela 7 – Resumo do planejamento experimental.....	62
Tabela 8 – Ensaio de caracterização das matérias-primas utilizadas.....	63
Tabela 9 – Proporções de misturas para produção das pastas de cimento Portland contendo FGD .....	64
Tabela 10 – Proporções de misturas para produção das pastas selecionadas de cimento Portland contendo FGD .....	65
Tabela 11 – Composições das argamassas estabilizadas.....	69
Tabela 12 – Proporções de misturas com 0,3% de AEH para produção das argamassas estabilizadas selecionadas de cimento Portland contendo FGD.....	75
Tabela 13 – Cálculos necessários para a obtenção dos parâmetros de calor das argamassas estabilizadas.....	77
Tabela 14 – Calores específicos referentes aos materiais utilizados .....	78
Tabela 15 – Critérios de suscetibilidade quanto à fissuração, quanto ao módulo de elasticidade – CSTB (1993) .....	84
Tabela 16 – Características físico-químicas do CII F - 32 .....	85
Tabela 17 – Quantificação dos compostos do cimento empregado.....	86
Tabela 18 – Características normativas do cimento Portland, fornecidas pelo fabricante .....	87
Tabela 19 – Características físico-químicas dos resíduos tratados termicamente.....	89
Tabela 20 – Caracterização física do agregado miúdo .....	91
Tabela 21 – Dados dos aditivos utilizados .....	92
Tabela 22 – Determinação dos coeficientes pelo modelo de Herschel – Bulkey e área de histerese .....	105
Tabela 23 – Resumo dos resultados obtidos por calorimetria isotérmica .....	109

Tabela 24 – Módulo de elasticidade das argamassas .....	112
Tabela 25 – Resultados individuais e média dos tempos obtidos no ensaio para o início de pega (0,3% AEH).....	116
Tabela 26 – Tempos obtidos no ensaio de resistência à penetração de início, fim e duração de pega.....	116
Tabela 27 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,3% de aditivo ...	117
Tabela 28 – Resultados individuais e média dos tempos obtidos no ensaio para o início de pega com 0,6% AEH.....	119
Tabela 29 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,6% de aditivo ...	119
Tabela 30 – Resultados do ensaio de calorimetria semi-adiabática das argamassas estabilizadas .....	121
Tabela 31 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,3% de AEH (24 e 48 horas) .....	122
Tabela 32 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,6% de aditivo (72 horas) .....	123
Tabela 33 – Densidade de massa das argamassas estabilizadas ao longo do tempo de estabilização.....	124
Tabela 34 – Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação e do teor de FGD na densidade de massa das argamassas estabilizadas no tempo 0h .....	125
Tabela 35 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de densidade de massa relacionados ao teor de FGD .....	125
Tabela 36 – Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação, do teor de FGD e da composição química do FGD na densidade de massa das argamassas estabilizadas no tempo 0h .....	128
Tabela 37 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados combinados de teor de AEH e composição química relacionados ao teor de ar incorporado no tempo 0h.....	128
Tabela 38 – Absorção de água por capilaridade.....	129
Tabela 39 – Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação e do teor de FGD na absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo .....	130
Tabela 40 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de absorção de água por capilaridade relacionados ao teor de aditivo estabilizador de hidratação.....	131
Tabela 41 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de absorção de água por capilaridade relacionados ao teor de FGD.....	131

Tabela 42 – Resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido (g/cm <sup>3</sup> ) .....	132
Tabela 43 – análise ANOVA do efeito da composição química, do FGD e dos teores de aditivo estabilizador e FGD na densidade de massa das argamassas em estudo.....	132
Tabela 44 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de densidade de massa no estado endurecido relacionadas ao teor de aditivo estabilizador de hidratação e o teor de FGD .....	133
Tabela 45 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas estabilizadas .....	136
Tabela 46 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de resistência à compressão das argamassas estabilizadas .....	136
Tabela 47 – ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas.....	138
Tabela 48 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas .....	138
Tabela 49 – ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade .....	139
Tabela 50 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de módulo de elasticidade das argamassas estabilizadas .....	140
Tabela 51 – Resistência potencial de aderência à tração.....	141
Tabela 52 – Suscetibilidade à fissuração das argamassas aos 28 dias com 0,3% de AEH ....	143
Tabela 53 – Suscetibilidade à fissuração das argamassas aos 28 dias com 0,6% AEH .....	143

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Relação água-cimento;  
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;  
AFm – Monossulfato de cálcio;  
AEH – Aditivo estabilizador de hidratação;  
AIA – Aditivo incorporador de ar;  
C<sub>2</sub>S – Silicato dicálcico;  
C<sub>3</sub>A – Aluminato tricálcico;  
C<sub>3</sub>S – Silicato tricálcico;  
C<sub>4</sub>AF – Fase alumino-ferrítica;  
CaO – Cal livre;  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono;  
CPA – Cinza de palha de arroz  
CV – Cinza volante;  
CSH - Silicato de cálcio hidratado;  
DRX – Difração de raios-X;  
DSC – Calorimetria exploratória diferencial;  
EDX – Espectroscopia de raio-X;  
FGD – Dessulfurização de gases;  
FTIR – Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier;  
MC – Metacaulim;  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;  
MgO – Periclásio;  
MIP - Porosimetria por Intrusão de Mercúrio;  
MPa – Mega pascal (10<sup>6</sup> Pascal);  
NBR – Norma Brasileira de Referência;  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio;  
OPC – Cimento Portland ordinário;  
SA – Sílica ativa;  
SC – Sulfato de cálcio;  
SO<sub>x</sub> – Óxidos de enxofre;  
SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre;  
TG (ou TGA) – Análise termogravimétrica.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral. ....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>ARGAMASSA ESTABILIZADA.....</b>	<b>17</b>
2.1	CONSTITUINTES.....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Cimento Portland.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Agregados.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Aditivos.....</b>	<b>23</b>
2.2	COMPORTAMENTO DE FLUXO DE PASTAS E ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	33
2.3	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	35
2.4	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS.....	39
<b>2.4.1</b>	<b>Aplicação do resíduo do processo de dessulfurização de gases (FGD) na construção civil.....</b>	<b>42</b>
2.4.1.1	Origem do resíduo.....	42
2.4.1.2	Caracterização do gesso FGD.....	47
<b>3</b>	<b>SINTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
4.1	MÉTODOS.....	63
<b>4.1.1</b>	<b>Caracterização das matérias – primas utilizadas no estudo.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Etapa 1 – Estudo em pasta.....</b>	<b>63</b>
4.1.2.1	Fluidez.....	65
4.1.2.2	Comportamento reológico.....	66
4.1.2.3	Cinética de hidratação do Cimento Portland.....	67
4.1.2.4	Desempenho mecânico.....	68
<b>4.1.3</b>	<b>Etapa 2 e 3 – Argamassas estabilizadas no estado fresco e endurecido.....</b>	<b>68</b>
4.1.3.1	Consistência.....	71
4.1.3.2	Teor de ar incorporado e densidade de massa.....	71
4.1.3.3	Exsudação de água (bleeding).....	73

4.1.3.4	Tempo de início e fim de pega .....	73
4.1.3.5	Ajuste nos tempos de pega das argamassas estabilizadas .....	75
4.1.3.6	Absorção de água por capilaridade.....	78
4.1.3.7	Aderência Potencial à tração no Substrato Padrão .....	78
4.1.3.8	Desempenho mecânico .....	81
4.1.3.9	Módulo de elasticidade dinâmico .....	83
4.1.3.10	Susceptibilidade à fissuração.....	84
4.2	<b>ANÁLISE ESTÁTISTICA DOS RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
4.3	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS. ....</b>	<b>85</b>
4.3.1	<b>Cimento Portland .....</b>	<b>85</b>
4.3.2	<b>Gesso FGD.....</b>	<b>87</b>
4.3.3	<b>Agregado miúdo.....</b>	<b>91</b>
4.3.4	<b>Aditivos químicos.....</b>	<b>92</b>
4.3.5	<b>Água .....</b>	<b>93</b>
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>94</b>
5.1	<b>ESTUDO EM PASTA.....</b>	<b>94</b>
5.1.1	<b>Estudo preliminar em pastas – Fluides .....</b>	<b>94</b>
5.1.2	<b>Estudo Reológico .....</b>	<b>100</b>
5.1.3	<b>Cinética de hidratação .....</b>	<b>108</b>
5.1.4	<b>Resistência à compressão .....</b>	<b>111</b>
5.2	<b>ESTUDO EM ARGAMASSAS. ....</b>	<b>113</b>
5.2.1	<b>Estudos preliminares em argamassa estabilizada .....</b>	<b>113</b>
5.2.2	<b>Ajuste dos tempos de pega .....</b>	<b>114</b>
5.2.3	<b>Consistência.....</b>	<b>122</b>
5.2.4	<b>Densidade de massa e teor de ar incorporado .....</b>	<b>124</b>
5.2.5	<b>Exsudação de água .....</b>	<b>128</b>
5.2.6	<b>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade .....</b>	<b>129</b>
5.2.7	<b>Densidade de massa no estado endurecido.....</b>	<b>131</b>
5.2.8	<b>Resistência à tração na flexão e resistência à compressão .....</b>	<b>134</b>
5.2.9	<b>Modulo de elasticidade dinâmico .....</b>	<b>138</b>
5.2.10	<b>Resistência potencial de aderência à tração .....</b>	<b>141</b>
5.2.11	<b>Susceptibilidade à fissuração.....</b>	<b>142</b>
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>144</b>

<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>147</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
	<b>ANEXO A - RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO E RETAS DE REGRESSÃO</b>	
	<b>.....</b>	<b>166</b>

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A construção civil exige cada vez mais tecnologias que auxiliem na produtividade, eficiência e no controle tecnológico dos processos construtivos, inserindo-se neste contexto a argamassa estabilizada que surge como uma forma de facilitar a logística, diminuir a estocagem de materiais, evitar desperdício e geração de resíduos associados a produção da argamassa no canteiro de obras e fornecer maior precisão na dosagem em comparação as argamassas produzidas pelos métodos tradicionais de obra (BAUER *et al.*, 2015).

Em paralelo a isso, nos últimos anos ocorreu o aumento da demanda de diversos processos industriais, a exemplo da produção de energia por usinas termelétricas de carvão e do aço por siderúrgicas, que levaram à geração de grandes quantidades de resíduos industriais em todo o mundo (YANG *et al.*, 2020; INCE; TAYANÇLI; DEROGAR, 2021).

A queima de carvão mineral, ocasionada principalmente por usinas termelétricas, é responsável por aproximadamente 50% do total das emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) no mundo (BRODNY; TUTAK, 2019). Por esse motivo, países da União Europeia, por exemplo, adotaram diretrizes que contém limites para a emissão de gases poluentes (*Directives regulating emissions of air pollutants* - EU 2015/2193). No Brasil, a resolução do CONAMA nº 436 (BRASIL, 2011) também imprime limites para a emissão de SO<sub>2</sub> de acordo com a atividade realizada. Isto posto, o processo de dessulfurização de gases (FGD), é empregado em usinas com grande emissão de SO<sub>2</sub> (termelétricas e siderúrgicas) como uma das principais rotas para reduzir as emissões prejudiciais aos seres vivos e aos demais componentes do meio ambiente como o solo, a água e o clima (LI *et al.*, 2017; LI; JIANG, 2021).

Dentre as diversas configurações do processo FGD para controlar a exaustão de SO<sub>2</sub>, que variam principalmente conforme o consumo de água, o sistema por via úmida é mais difundido devido a eficiência de dessulfuração (capacidade de retenção de SO<sub>2</sub>). Esse sistema geralmente utiliza pasta de cal/calcário pulverizada no gás de combustão e obtém resíduos sólidos e aquosos. (CÓRDOBA, 2015; CORDOBA; STAICU, 2018). O principal resíduo gerado no processo é conhecido como gesso FGD por apresentar composição química semelhante ao gesso natural (WU *et al.*, 2019). De outro modo, o componente predominante de ambos é sulfato de cálcio di-hidrato (LEI *et al.*, 2017).

Em um cenário mundial, foi observado valores expressivos de geração desse resíduo. Na China, por exemplo, cerca de 7,6 a 9,5 milhões de toneladas são produzidas por ano (LI; JIANG, 2021). Já nos Estados Unidos, conforme a *American Coal Ash Association*,

aproximadamente 33 milhões de toneladas métricas de gesso FGD foram gerados em 2019. No Brasil, embora não existam dados efetivos referentes a geração de resíduos FGD, estima-se um grande volume de produção anual ao considerar que o país é o 9º maior produtor de aço no mundo conforme levantamento da *WorldSteel Association* e o carvão é responsável por 2,7% da oferta de energia do Brasil (Balanço Energético Nacional, 2021). Além disso, uma siderúrgica localizada no Espírito Santo – BR, apresentou uma geração de 25.000 t de gesso FGD no ano de 2019 (MOHAUPT, 2019).

Devido os custos e às restrições quanto ao seu descarte por órgãos ambientais, a incorporação do gesso FGD em compostos cimentícios mostra-se como uma alternativa vantajosa em diversos estudos (XU *et al.*, 2017; CAILLAHUA; MOURA, 2018; KHATIB; WRIGHT; MANGAT, 2019; THYMOTIE; CHANG; NGUYEN, 2020). Embora tenham pesquisas que propõem a utilização do gesso FGD e algumas aplicações em vários países, atualmente estas práticas não são efetivadas em grande escala, sendo a maioria tratada como um resíduo sólido e disposto em aterros controlados (LEI *et al.*, 2017).

Desse modo, o desenvolvimento de novas abordagens viáveis para a utilização do gesso FGD surgem como uma forma de diminuir a quantidade que é distribuída em aterros (WANG; WU; WU, 2020). A indústria da construção civil, por sua vez, tem capacidade para absorver e reduzir efetivamente esse resíduo ao considerar que é responsável por um consumo colossal de materiais e um grande volume de produção de compostos cimentícios (CHEN; LI; POON, 2018).

Neste mesmo viés, as argamassas estabilizadas são utilizadas na construção civil com o intuito de prolongar o tempo de trabalhabilidade, de forma a aumentar o seu tempo de manuseio e aplicação em até 72 horas. Para tanto, são utilizados aditivos estabilizadores de hidratação com a finalidade de controlar as reações de hidratação do cimento Portland e aumentar o seu período de indução, isto é, o intervalo compreendido entre o contato inicial com a água e o início de pega.

Diante disso, por apresentar a mesma composição principal do gesso natural, evidencia-se o potencial do uso do gesso FGD como aditivo ou como retardador de pega em materiais à base de cimento (LI; JIANG, 2021). Estudos realizados por Guo e Shi (2008) e Zhang, Pan e Wu (2016) adicionaram em compostos cimentícios o gesso FGD e confirmaram o potencial da utilização deste resíduo em prolongar o tempo de pega devido ao fornecimento de uma variedade de íons sulfatos disponíveis durante a hidratação do cimento Portland. Além disso, a presença de gesso FGD em compostos cimentícios pode resultar em valores de

resistência mais altos (LEI *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018; TYMOTIE; CHANG; NGUYEN, 2020). No entanto, isso irá depender da composição química de sulfato de cálcio (di-hidrato, hemi-hidrato e/ou anidrita) utilizado na mistura. O hemi-hidrato, por exemplo, quando utilizado em misturas de cimento Portland como fonte de sulfato apresenta resistência inicial mais alta do que o di-hidrato, pois proporciona uma taxa de dissolução mais rápida e tende a formar mais etringita em idades iniciais. Todavia, apresenta tempo de pega do cimento Portland mais rápido quando comparado ao di-hidratado (MARDANI-AGHABGLOU *et al.*, 2016). Já a adição de di-hidrato aumenta o tempo de pega sem afetar a resistência à compressão (PAPAGEORGIU; TZOUVALAS; TISIMAS, 2005). Já na forma anidrita, embora apresente uma taxa de dissolução mais lenta e menor resistência à compressão inicial, após 3 dias proporciona um aumento dos produtos de hidratação que favorece o acréscimo das propriedades mecânicas aos 28 dias. Ainda, mostra-se como um retardador eficiente da pega, sem alterações significativas nas propriedades físico-mecânicas das pastas de cimento Portland (TZOUVALAS; DERMATAS; TSIMAS, 2004).

Dessa forma, a incorporação de gesso FGD em argamassa estabilizada pode contribuir com a redução dos impactos ambientais ocasionados pela disposição inadequada desse resíduo e apresenta-se como uma solução tecnicamente viável, podendo evidenciar ganhos de desempenho tanto no estado fresco como endurecido desse sistema.

Nesta conjuntura, o presente trabalho teve como finalidade principal investigar o efeito da adição de gesso FGD na cinética de hidratação do cimento Portland e no desempenho no estado fresco e endurecido das argamassas estabilizadas. Observando-se escassez de estudos que empregam diferentes fases de sulfato de cálcio do gesso FGD em argamassas estabilizadas. Isso reforça a contribuição científica e o ineditismo desta pesquisa.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o emprego de resíduo do processo de dessulfurização de gases (FGD) em pastas e argamassas estabilizadas.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar diferentes composições químicas de sulfato de cálcio do gesso FGD (di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita) e a influência do teor de gesso FGD na cinética de hidratação e nas propriedades do estado fresco e do endurecido das argamassas estabilizadas;
- Determinar o efeito da incorporação do gesso FGD e do aditivo estabilizador de hidratação na cinética de hidratação da pastas e avaliar sua compatibilidade;
- Analisar a influência do aditivo estabilizador de hidratação, do aditivo incorporador de ar e gesso FGD nas condições de estabilidade das argamassas no estado fresco ao longo do tempo de utilização e no estado endurecido.

### 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa é composta por sete capítulos. O primeiro capítulo contém a introdução, a justificativa e os objetivos deste estudo. Nos capítulos dois e três é apresentado o embasamento teórico utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa, que engloba os fatores e materiais envolvidos no processo de estabilização das argamassas e as características e potencialidades de utilização do gesso FGD. O quarto capítulo contém os materiais e os métodos utilizados no programa experimental desta pesquisa. O capítulo cinco contempla os resultados encontrados. No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho. Por fim, no sétimo capítulo são elencadas sugestões para o desenvolvimento de novas pesquisas.

## 2. ARGAMASSA ESTABILIZADA

A argamassa estabilizada tem ganhado cada vez mais espaço na construção civil por apresentar maior controle tecnológico, aumento de produtividade e redução da estocagem de materiais no canteiro de obras quando comparada a argamassas preparadas no local de aplicação (OLIVEIRA, 2017). Conforme Neto e Djanikian (1999), os primeiros registros dessa tecnologia ocorreram na Alemanha Ocidental na década de 1970. No entanto, os autores citam que poucos apontamentos foram relatados sobre o tema na época.

Na década de 1980 as argamassas estabilizadas começaram a ser empregadas no Brasil (ANTONIAZZI *et al.*, 2020). Contudo, ainda existem lacunas e ausência de normas específicas para a sua utilização. Diante da carência de informações consolidadas referente aos padrões de desempenho necessários para o emprego desse material torna-se importante o aprofundamento referente aos comportamentos e as propriedades das argamassas estabilizadas para o seu fornecimento. Apesar disso, o uso de argamassas estabilizadas teve um aumento na construção civil em obras de grandes centros (ANTONIAZZI; MOHAMAD; CASALI, 2021).

A argamassa estabilizada pode ser definida como uma mistura pronta com trabalhabilidade de 24 até 72 horas. Para atender a essa condição possui em sua composição aditivos estabilizadores de hidratação e aditivos incorporadores de ar que conferem o aumento do tempo de trabalhabilidade e, conseqüentemente, do período de aplicação (ANTONIAZZI *et al.*, 2020). Essa combinação de aditivos foi analisada em diversos estudos que verificaram o desempenho (SCHACKOW *et al.*, 2019), a composição (ANTONIAZZI *et al.*, 2020), o tipo de cimento Portland e a quantidade de água (CASALI *et al.*, 2018), as características da mistura (FUKUI *et al.*, 2018) e a influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido (GUINDANI, 2018). Tais pesquisas evidenciam que com o aumento do tempo de estabilização para 72 h, as resistências mecânicas das argamassas tendem a diminuir e pode ocorrer perda das propriedades no estado fresco, como a trabalhabilidade.

As argamassas estabilizadas são compostas geralmente por cimento Portland, agregado miúdo, água, aditivo incorporador de ar (AIA) e aditivo estabilizador de hidratação (AEH). Os aditivos estabilizadores de hidratação atuam no controle da hidratação do cimento Portland e os aditivos incorporadores de ar auxiliam na plasticidade das argamassas, propriedade que é fundamental nas etapas de execução de revestimentos (BAUER *et al.*, 2015).

O processo de produção dessas argamassas ocorre em centrais dosadoras e são entregues no canteiro de obra em caixas apropriadas onde são armazenadas até o período de

utilização. Os produtores de argamassas estabilizadas sugerem o uso de uma película de água de aproximadamente 20 mm para garantir os tempos de estabilização durante o período de armazenamento em obra, porém não há normas que orientem os procedimentos de armazenamento, introdução de película de água e aplicação das argamassas estabilizadas (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Dessa forma, nos últimos anos novos estudos que visam analisar as propriedades das argamassas estabilizadas estão surgindo. No entanto, a maioria das evidências encontradas até o momento sobre a temática de argamassas estabilizadas é oriunda de estudos nacionais.

## 2.1. CONSTITUINTES

### 2.1.1. Cimento Portland

O cimento Portland é definido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) como um pó fino que apresenta propriedades ligantes, aglomerantes ou aglutinantes. É obtido por meio do processamento de materiais como o calcário e a argila que formam o clínquer e tem como principais produtos de hidratação o silicato dicálcico ( $C_2S$ ), o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato tetracálcio ( $C_4AF$ ) e, como produtos secundários, pode apresentar cal livre ( $CaO$ ), periclásio ( $MgO$ ), fases metálicas, sulfatos e óxidos (PARIS *et al.*, 2016). O clínquer, componente principal do cimento Portland, pode ser moído de forma isolada para a produção de cimento utilizável, no entanto, na maioria das aplicações requer a presença de sulfato de cálcio para controlar as características do tempo de pega do cimento Portland (HEWLETT; LISKA, 2019). Convencionalmente, com a finalidade de suprir a necessidade de sulfato, gesso ou outros materiais são adicionados ao cimento Portland.

A cinética de hidratação do cimento Portland é um dos principais fatores a serem observados, pois possui influência no processo de estabilização das argamassas estabilizadas ao considerar que os aditivos estabilizadores de hidratação atuam no prolongamento do tempo do tempo de indução (CAMPOS; CASALI; MACIOSKI, 2013; GUINDANI *et al.*, 2018). Dentre os principais compostos presentes na composição química do cimento Portland puro, os primeiros a iniciarem as reações de hidratação ao entrarem em contato com a água são o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), o sulfato de cálcio e o silicato tricálcico ( $C_3S$ ). O  $C_3A$  influencia na perda da fluidez do sistema água-cimento nos primeiros instantes da hidratação, o sulfato de

cálcio forma a etringita na superfície dos grãos e o  $C_3S$  gera o silicato de cálcio hidratado (CSH) e uma fase cristalina, a portlandita (MARCHON *et al.*, 2018).

O  $C_3S$  (alita) constitui 50 a 80% do cimento Portland e domina o desenvolvimento de suas propriedades (SCRIVENER; JUILAND; MONTEIRO, 2015). Dessa forma, o  $C_3S$  pode ser considerado o responsável pela resistência do concreto em todas as idades, mas principalmente nas idades iniciais. A hidratação do silicato tricálcico é um processo no qual a sua dissolução entrega íons cálcio e silício na solução dos poros e a precipitação das fases de hidrato (CSH e CH - hidróxido de cálcio) consome os referidos íons (NABER *et al.*, 2019). Conforme Scrivener *et al.* (2019), os mecanismos que envolvem a reação de hidratação do  $C_3S$  são geralmente discutidos em relação às curvas de evolução de calor.

Ao relacionar a taxa de fluxo de calor ao longo do tempo é possível determinar a evolução total de calor. Com a curva que pode ser obtida graficamente a partir dessa relação observa-se cinco estágios típicos da reação de hidratação: reação inicial, período de indução, período de aceleração, período de desaceleração e período de reação lenta. Durante o período de indução ou dormência ocorre o início do crescimento do CSH (SCRIVENER *et al.*, 2019).

Quanto a estrutura do CSH, fase principal de ligação dos materiais cimentícios, ainda não existe um consenso que explique as ligações entre as folhas. Pellenq, Lequeux e Van Damme (2008) apresentam um modelo no qual as forças de ligação entre as folhas de CSH se caracterizam como iônico-covalentes (eletrostáticas). No entanto, esse modelo não está plenamente resolvido (RICHARDSON, 2008).

No período de indução, o cimento Portland permanece plástico e apresenta boa trabalhabilidade. Na argamassa estabilizada controlar esse período é essencial pois proporciona o tempo no qual pode ser transportada, lançada e aplicada antes do seu endurecimento, isto é, proporciona o aumento do seu tempo de trabalhabilidade. De acordo com Hu, Ge e Wang (2014), é geralmente aceito que a pega ocorre no período de aceleração, no qual os silicatos começam a se hidratar de forma rápida.

O segundo componente majoritário do clínquer é o  $C_2S$  (belita) que possui reações semelhantes ao  $C_3S$ , porém é menos reativo e a reação ocorre mais lentamente com menor liberação de energia (KURDOWSKI, 2014). Durante a hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$  ocorre a formação de silicato de cálcio hidratado e portlandita.

O  $C_3A$  (celita) é um mineral que possui alta reatividade, libera calor nas primeiras horas e reage com a água para formar a etringita. Quando o  $C_3A$  entra em contato com a água na ausência de íons sulfato reage rapidamente e libera grande quantidade de calor. Por esse

motivo, o sulfato de cálcio geralmente é adicionado na forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para controlar a hidratação rápida do  $\text{C}_3\text{A}$ . A gipsita é facilmente solúvel em água e durante a moagem final pode ser transformado em sulfato hem-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) devido ao aumento de temperatura dentro do moinho (AÏTCIN; FLATT, 2015).

De modo geral, na presença de uma fonte de sulfato de cálcio, a reação do  $\text{C}_3\text{A}$  sofre alteração, ocorre baixa produção de calor e a taxa de reação só aumenta rapidamente quando todo o sulfato de cálcio adicionado for consumido (BULLARD *et al.*, 2011). Nessa perspectiva, conforme o esperado, a incorporação de sulfato de cálcio adicional pode atrasar o pico do aluminato em curvas de calor, aumentando o tempo em que a argamassa pode ser acondicionada e aplicada (ZUNINO; SCRIVENER, 2019). Os autores constataram também que a quantidade de calor liberada no início do pico de aluminato pode ser correlacionada com o teor de sulfato de cálcio no sistema para uma determinada composição de ligante, dessa forma, a quantidade necessária de CSH também aumenta linearmente de acordo com o conteúdo inicial de sulfato de cálcio presente no sistema.

Já o  $\text{C}_4\text{AF}$ , conhecido industrialmente como ferrita, é responsável pela alta resistência à corrosão química do cimento Portland e por sua coloração (KURDOWSKI, 2014). A hidratação do cimento Portland envolve reações químicas complexas entre a água e os componentes principais do cimento Portland anidro ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) que formam os compostos hidratados como o silicato de cálcio hidratado, a portlandita, a etringita e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (BAHAFID *et al.*, 2017). Os autores ressaltam ainda que o processo de hidratação do cimento Portland e a microestrutura formada dependem da sua formulação e das condições de hidratação.

Nessa conjuntura, em países como os Estados Unidos, a argamassa possui cimentos específicos para a sua fabricação conhecidos como *mortar cements* (PCA, 2002a) e *masonry cements* (PCA, 2002b) que possuem em sua composição adição de cal virgem e outros finos que auxiliam no melhor desempenho e nas características essenciais ao sistema, como o tempo de pega e a plasticidade. No Brasil, foi implementada a NBR 16697 (ABNT, 2018) que permitiu o aumento percentual de adições de diferentes cimentos Portland produzidos nacionalmente sem prejudicar suas propriedades como forma de reduzir a produção de clínquer que é a principal fonte de emissão de gás carbônico. Estudos nacionais recentes realizados com argamassa estabilizada apontam o CP II F-32 com adição de filler, o CP II Z-32 com adição de pozolana e o CP IV-32 como os cimentos Portland mais utilizados na composição deste produto

(BAUER *et al.*, 2015; SCHACKOW *et al.*, 2019; ANTONIAZZI *et al.*, 2020; CASALI *et al.*, 2020; JANTSCH *et al.*, 2021).

Casali *et al.* (2018) realizaram um estudo com três tipos diferentes de cimento Portland utilizados por empresas locais, o CII F-32, CP II Z-32 e CP IV-32 que apresentaram superfície específica (Blaine) de 3102 cm<sup>2</sup>/g, 4345 cm<sup>2</sup>/g e 3441 cm<sup>2</sup>/g, respectivamente. Os autores verificaram que à medida que a finura do cimento aumenta, as reações de hidratação que consomem água iniciam mais cedo. Dessa forma, ao considerarem o mesmo teor de água/materiais secos para a produção das misturas, no cimento mais grosso (CP II F-32) o tempo necessário para o início das reações de hidratação foi maior. Nessa perspectiva, ainda conforme o estudo, o CP IV por ter finura intermediária apresentou comportamento intermediário.

Antoniazzi, Mohamad e Casali (2021) avaliaram dois tipos de cimento Portland, o CP II F-40 e o CP II Z-32 que apresentaram superfície específica (Blaine) de 4521,50 cm<sup>2</sup>/g e 3657,50 cm<sup>2</sup>/g, respectivamente e variados teores de aditivos incorporadores de ar e aditivos estabilizadores de hidratação. Como resultado do estudo foi observado que ocorreu o aumento dos tempos de pega em argamassas com CII Z-32 devido à granulometria do cimento Portland, isto é, o CII F-40 por ser mais fino aumentou a temperatura nas primeiras idades e apresentou tempo de pega inferior ao CII Z-32 em argamassas produzidas com aditivo estabilizador de hidratação. O cimento Portland que apresenta a maior finura necessita de maior quantidade de água para a mesma fluidez e as partículas de cimento Portland finas hidratam mais rapidamente do que as mais grossas (JIAO *et al.*, 2017).

Outros fatores além da finura do cimento podem influenciar nas propriedades reológicas dos compostos cimentícios. De acordo com a revisão de JIAO *et al.* (2017) sobre os efeitos dos constituintes nas propriedades reológicas de compostos cimentícios, cimentos Portland com maior teor de C<sub>3</sub>A, alto teor de álcalis, alta área superficial específica e baixo teor de SO<sub>3</sub> geralmente diminuem a trabalhabilidade. A combinação adequada dessas características pode contribuir para a menor demanda de aditivos.

Nessa perspectiva, observa-se que a finura e o tipo do cimento Portland podem interferir no aumento do período de indução durante a hidratação do cimento Portland. Adicionalmente a isso, o aditivo estabilizador de hidratação utilizado para aumentar o período de indução, atua no processo de hidratação do cimento Portland de formas distintas e interagem com o tipo de cimento Portland utilizado. A influência da incorporação dos aditivos incorporadores de ar (AIA) e estabilizadores de hidratação (AEH) nos mecanismos de estabilização de argamassas no estado fresco estão descritos no item 2.1.1.3.

### 2.1.2. Agregados

Os agregados miúdos estão presentes em grande proporção na composição das argamassas, sua análise e caracterização tornaram-se mais evidentes nos últimos anos devido ao maior controle e desenvolvimento tecnológico (HADDAD *et al.*, 2020). Características como a distribuição granulométrica, a finura e o formato dos agregados apresentam influência nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas, as quais serão detalhadas a seguir.

A finura dos agregados tem influência na fluidez das pastas de argamassas e, conseqüentemente, nas propriedades reológicas das mesmas. As areias mais grossas normalmente fornecem misturas mais ásperas e menos trabalháveis ao passo que as areias mais finas necessitam de maior consumo de água e cimento Portland e, portanto, aumentam os custos (HADDAD *et al.*, 2020). Agregados com tamanho de partícula bem distribuído garantem bom empacotamento e desempenho em compostos cimentícios (HADDAD *et al.*, 2020). Giordani e Masuero (2019) citam que uma composição contínua e com menor volume de vazios, que apresenta maior quantidade de pasta para envolver os grãos e facilita a laminação entre as partículas, pode ocasionar maiores índices de consistência e menor tensão de cisalhamento inicial. Por outro lado, a utilização de granulometria uniforme afeta o escoamento em argamassas de reboco (STOLZ; MASUERO, 2018).

O estudo de Santos *et al.* (2018) cita a influência da distribuição adequada de tamanho de partículas dos constituintes no desenvolvimento da resistência mecânica devido a dois mecanismos principais: (1) efeito de preenchimento, onde os vazios são preenchidos por grãos menores e (2) reações químicas que permitem melhorias na zona de transição interfacial. A distribuição do tamanho de partícula afeta consideravelmente o volume de vazios a serem preenchidos na pasta de cimento Portland. No entanto, o uso de aditivo incorporador de ar tende a diminuir esses efeitos (ROMANO; DOS REIS TORRES; PILEGGI, 2015). Assim, a otimização da distribuição aliada ao uso de aditivos incorporadores de ar pode ser uma forma eficaz de controlar a reologia de uma suspensão (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018).

Adicionalmente a isso, a utilização de agregados miúdos com formato angular pode melhorar a estrutura das argamassas, influenciando no aumento das propriedades mecânicas e apresentando menor volume de macroporos em comparação aos grãos arredondados, por exemplo, pois a utilização de agregados com forma angular permite melhor densidade de

empacotamento, redução da porosidade e da absorção de água das argamassas (SANTOS et al., 2018).

Diante das características explanadas, agregados com graduação contínua que não apresentem ausências ou excessos das dimensões favorecem o fluxo. Em argamassa estabilizada, agregados miúdos com granulometria média ou média-fina podem ser favoráveis a estabilização (GUINDANI, 2018). Além disso, módulos de finura entre 1,0 e 2,0 são favoráveis ao processo de estabilização (PAGNUSSAT, 2012).

### **2.1.3. Aditivos**

Os mecanismos de estabilização de argamassas requerem a manutenção da trabalhabilidade no estado fresco ao longo do tempo de estabilização. Dessa forma, com a finalidade de atingir períodos maiores de utilização da argamassa em obra no estado fresco, aditivos estabilizadores de hidratação que atuam na hidratação do cimento Portland e aditivos incorporadores de ar que auxiliam na trabalhabilidade do sistema são adicionados à mistura. O estudo dos mecanismos de hidratação do cimento Portland na presença desses aditivos é geralmente avaliado em pastas de cimento Portland. No entanto, ressalta-se que não há estudos sobre esses mecanismos quando esses aditivos são aplicados em argamassas estabilizadas. Dessa forma, para que o processo de estabilização ocorra de forma correta é necessário analisar a compatibilidade entre o tipo de aglomerantes e os aditivos.

Nesse contexto, em argamassa estabilizada são utilizados aditivos destinados ao controle do tempo inicial de pega como forma de estabilizar as reações de hidratação do cimento, aumentando o intervalo de tempo entre o contato inicial com a água e o início de pega (período de indução), ou seja, usam-se aditivos que prolongam o estado fresco das argamassas (GUINDANI *et al.*, 2018). Os retardantes são amplamente utilizados como forma de modificar os tempos de pega em concretos em condições de clima quente e em situações que requerem um maior tempo de pega de forma a prolongar as reações de hidratação (ZHU *et al.*, 2020). De modo geral, conforme relatado e observado pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em pastas de cimento no estudo de Zajac *et al.* (2020), os aditivos retardantes atuam na formação e morfologia da etringita e tendem a suprimir e retardar a sua formação inicial. Os autores ressaltam ainda, que para a verificação adequada do efeito dos retardantes, os mesmos devem ser pré-dissolvidos na água de mistura para garantir uma distribuição homogênea do retardador na amostra.

No entanto, para entender o efeito desses dois aditivos na hidratação do cimento Portland, há dois fatores principais que devem ser considerados no estudo das pastas: a fase do cimento (aluminato ou silicato) sobre a qual o aditivo estabilizador de hidratação irá atuar e sua natureza química (GUO *et al.*, 2019). Além disso, conforme os autores há quatro principais conceitos relacionados aos mecanismos dos retardadores de cimento Portland: (1) teoria de adsorção: o retardador se adsorve nas superfícies de hidratação e, dessa forma, inibe o contato com a água; (2) teoria da precipitação: na fase aquosa o retardador reage com íons de cálcio e hidroxila e formam uma camada impermeável e insolúvel ao redor dos grãos de cimento; (3) teoria da nucleação: ocorre a interrupção do crescimento dos produtos de hidratação quando o retardador se adsorve em seu núcleos; (4) teoria da complexação: a formação de núcleos é evitada quando o retardador quela os íons de cálcio – capacidade de misturas retardadores de solubilizar os íons de cálcio .

Para compreender tais mecanismos, estudos que avaliam a capacidade de adsorção do retardador na superfície do cimento são realizados. Guo *et al.* (2019) realizaram essa análise por meio do método de ensaio de capacidade de adsorção de aditivos proposto por Plank *et al.* (2006) que consiste em submeter a pasta de cimento a um analisador de carbono orgânico total (TOC) para determinar a concentração normal do retardador. Posteriormente, é realizado o despejo do filtro-prensa para coletar o filtrado da pasta do cimento Portland. As variações nessas concentrações determinam a capacidade de adsorção do retardador na superfície das partículas.

Os aditivos destinados ao controle do tempo de pega podem ser identificados por meio do intervalo de controle das diversas reações na superfície dos grãos de cimento Portland e são divididos comercialmente em retardadores de pega e estabilizadores de hidratação. Adicionalmente a isso, os aditivos estabilizadores de hidratação se diferem dos retardadores convencionais porque retardam a hidratação dos aluminatos tricálcicos (SHAIKH; MALI, 2016). Por meio de medições calorimétricas, o estudo de Paoli e Krurana (1988) mostrou os efeitos dos retardadores de pega no processo de hidratação e constatou que esses aditivos agem no processo de hidratação do cimento Portland basicamente sobre as fases de silicato (alita e belita). Como resultado, uma vez que não atuam sobre a hidratação do C<sub>3</sub>A, afetam de forma mais efetiva o desenvolvimento da resistência inicial por atrasá-la do que a reologia no estado fresco do concreto (PAOLINI; KRURANA, 1998, NALET; NONAT, 2016).

Já os efeitos dos aditivos estabilizadores de hidratação, que constituem uma variação dos retardadores, foram verificados por análise calorimétrica de condução e ensaios de MEV

em pastas no estudo de Paolini e Krurana (1998). Os resultados dessas análises realizadas pelos autores indicam que os aditivos estabilizadores de hidratação impossibilitam a nucleação na superfície de hidratos ricos em íons de cálcio e, desse modo, inibem a nucleação e a formação de CSH e CH quando adicionados no início da mistura. Além disso, proporcionam a redução na taxa de dissolução de sulfato de cálcio e a precipitação dos compostos hidratados. De modo geral, os AEH prorrogam o início das reações do cimento Portland, pois atrasam a hidratação, inclusive do  $C_3A$ , ao atuar em todas as fases minerais do clínquer do cimento. Por esse motivo, quanto maior a quantidade de clínquer no cimento, maior o teor de aditivo é necessário para estabilização do sistema (NALET; NONAT, 2016). Esses aditivos controladores de hidratação, conforme a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), são conhecidos comercialmente como estabilizantes, inibidores, entre outros.

Os aditivos estabilizadores de hidratação são classificados de acordo com os seus materiais base em aditivos orgânicos e inorgânicos. Esses aditivos são compostos por carboidratos distintos e derivados de açúcar como a glicose e D-gluconato e de misturas de dispersão polimérica como os lignossulfonatos, polinaftaleno sulfonatos, fosfonatos de óxido de polietileno e alguns éteres de policarboxilato (NALET; NONAT, 2016).

Os aditivos químicos à base de moléculas orgânicas são os mais utilizados comercialmente e tem como uma das principais ações o controle da cinética de hidratação (ZAJAC *et al.*, 2016). A taxa máxima da hidratação é potencializada na presença das moléculas orgânicas e ocorre o retardo da hidratação do  $C_3S$  devido ao aumento da quantidade de hidratos e o prolongamento do período de indução (NALET; NONAT, 2016). Os açúcares presentes nesses aditivos podem atuar por envenenamento por meio da nucleação/adsorção de superfície acarretando em camadas semipermeáveis nos grãos do cimento (KOCHOVA; GAUVIN; BROUWERS, 2017). O retardo desses aditivos na hidratação do  $C_3S$  pode ser consequência da adsorção das moléculas no CSH (prejudica a nucleação) no  $C_3S$  devido a dissolução impedida e na Portlandita por meio do deslocamento das moléculas de superfície e sua interação na solução (NALET; NONAT, 2016). Desse modo, a adsorção de moléculas nas fases anidras, hidratados ou ambos possuem um papel importante no processo de hidratação (MARCHON *et al.*, 2018).

Além disso, podem interagir com minerais de clínquer de formas distintas, como é o caso da sacarose, que é um dos retardadores mais utilizados e eficazes, possui grande influência na hidratação do cimento, e não reage diretamente com o aluminato ( $C_3A$ ), apresentando assim, pouca ação de retardo nessa fase (KOCHOVA; GAUVIN; BROUWERS, 2017).

Adicionalmente a isso, o estudo de Bishop e Barron (2006) examinou o impacto da incorporação da sacarose na hidratação do cimento Portland e verificou que esse produto químico inibe a hidratação do  $C_3S$  e acelera a formação de etringita. Os autores ressaltam que a formação da etringita acelerada não tem influência no retardo da hidratação, ao contrário das fases de silicato que podem inibir a hidratação do cimento Portland. Já Von Daake e Stephan (2017) citam, que ao estabilizar os hidratos de aluminato hexagonal e sua conversão em fases estáveis, a sacarose retarda a hidratação do cimento Portland. Além disso, os autores relatam que o efeito de retardo depende de fatores como o teor e o tempo de adição.

Ataie *et al.* (2015) analisaram os mecanismos de retardo da sacarose na hidratação do cimento Portland (CP) e a interação com materiais cimentícios suplementares e verificaram que o período de indução das amostras contendo 0,15 % de sacarose foi de aproximadamente 56 horas. Neste momento, a hidratação continua de forma rápida devido a dissolução renovada do cimento e os locais de nucleação não envenenados. Além disso, a incorporação de metacaulim (MC), sílica ativa (SA) e cinza de palha de arroz pré-tratada a 500°C (CPA500) reduziram a ação retardadora da sacarose ao contrário das amostras com 15% de CV que apresentaram retardo mais longo (Tabela 1).

Tabela 1 – Retardo das misturas com a incorporação de 0,15% de sacarose

<b>Amostra</b>	<b>Amorfo (%)</b>	<b>Área de superfície (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Retardo (h)</b>
CP	-	-	56
CP + CPA500	88,2	200	4
CP+SA	99,9	8,83	18
CP +CV	77	0,31	>72
CP +MC	48	7,54	38

Fonte: Adaptada de ATAIE *et al.* (2015)

O principal mecanismo responsável pela redução da ação retardadora da sacarose de acordo com Ataie *et al.* (2015) pode ser atribuído à alta área de superfície da cinza de palha de arroz que forneceu mais locais de nucleação para a precipitação de CSH no sistema cimentício. O metacaulim e a sílica ativa também apresentaram o mesmo mecanismo, porém em menor proporção devido a suas áreas de superfície serem consideravelmente mais baixas em comparação a cinza de palha de arroz.

Como o desempenho dos produtos químicos de construção dependem de sua adsorção no clínquer de cimento Portland nos primeiros produtos de hidratação, o estudo de Von Daake Stephan (2017) analisou o comportamento de adsorção de aditivos retardadores disponíveis

comercialmente assim como a composição da solução dos poros por adição (controlada pelo tempo) de diferentes tipos de cimentos Portland. A adsorção dos aditivos retardadores foi avaliada por meio de análise do teor de carbono orgânico (TOC) na solução dos poros e por investigações do comportamento reológico da pasta (viscosidade). Ademais, a composição iônica da solução dos poros foi avaliada por análise química por espectroscopia de emissão óptica. Como resultado do estudo, com o aumento da dosagem foi averiguado um aumento da viscosidade plástica. Quanto à adsorção de gluconato de sódio (Na-Glu), verificou-se influência significativa do tempo de dosagem. A análise de solução dos poros sugeriu uma interação entre as fases de ferrita do clínquer de cimento Portland e o Na-Glu.

O Na-Glu também é um estabilizador de hidratação comumente utilizado em compostos cimentícios devido a sua ação efetiva de retardo do cimento Portland e sua afinidade iônica com os íons de cálcio. De modo geral, algumas teorias explicam o comportamento de retardo, como a ação efetiva no retardo da hidratação do  $C_3S$  devido à sua adsorção que ocasiona o prolongamento do período de indução (MA *et al.*, 2015) e a teoria de complexação de íons de cálcio na superfície de  $C_3A$  que previne a formação de hidratos precoces (LEI; LI; FUDDIN, 2020).

Ma *et al.* (2015) avaliaram a influência da adição de Na-Glu nos teores de 0%, 0,01%, 0,03%, 0,05%, 0,1 e 1,0% no desempenho e hidratação do cimento Portland. A análise de distribuição dos tamanhos dos poros utilizou um porosímetro de intrusão de mercúrio, onde indicou que o excesso de Na-Glu (1,0%) aumentou o tamanho dos poros e, em consequência, contribuiu com o aumento da porosidade das argamassas de cimento Portland devido à redução da hidratação dos grãos de cimento Portland (MA *et al.*, 2015). A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) demonstrou que o excesso de gluconato de sódio não favoreceu a hidratação do  $C_3S$ . Nos resultados, os autores evidenciam que o primeiro pico endotérmico atribuído à desidratação de CSH e Aft se desloca para a esquerda e enfraquece o terceiro pico a 435°C atribuído a decomposição de CH. Assim, no teor de 1,0% não ocorre o terceiro pico. Tal evidência foi suportada pelos experimentos de DRX. Com essa dosagem, os autores observaram que gluconato de sódio inibiu a formação de etringita por até 72 horas.

Ainda, o excesso Na-Glu inibe a dissolução de gipsita e a formação de Aft. Os resultados dos experimentos de DRX demonstram a presença de uma porção de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (gipsita) que permaneceu no cimento Portland com 1% de gluconato, o que comprova que o Na-Glu gluconato de cálcio em excesso não é útil para a dissolução da gipsita (MA *et al.*, 2015). Em relação aos resultados de resistência a compressão, verificou-se um teor ótimo de 0,03% de

Na- Glu. Ademais, quanto ao efeito do Na-Glu no tempo de configuração e na consistência foi constatado que além de um forte retardador de pega, o Na-Glu atua como um agente redutor de água eficaz.

A faixa de dosagem do aditivo estabilizador varia conforme a sua concentração e base química. Além disso, a compatibilidade com os demais materiais da mistura também pode ocasionar variação no tempo de início de pega. Guindani (2018), por exemplo, utilizou uma dosagem de 0,5% de aditivo estabilizador de hidratação em pastas de cimento Portland e observou que o tempo de início de pega foi prolongando em até 305 horas. Já em argamassas estabilizadas, o mesmo autor utilizou teores de 0,6% e 1,2% de aditivo estabilizador de hidratação para obter tempos de início de pega próximos a 48 e 72 horas, respectivamente. No estudo de Campos, Macioski e Casali (2013) que buscou analisar o tempo de pega em argamassas estabilizadas com aditivo estabilizador de hidratação a base de açúcares e testou teores de aditivos de 0,1 a 0,9%, obtiveram tempos de início de pega de até 90 horas.

Em relação aos retardadores inorgânicos, utilizados com menor frequência, as misturas à base de fosfato, por exemplo, retardam a cinética de hidratação do aluminato, tal como a reação do silicato em ligantes de cimento Portland, fator este relacionado à formação de complexos dificilmente solúveis com íons que são dissolvidos na solução dos poros (VON DAAKE; STEPHAN, 2017).

Com o término do efeito do aditivo estabilizador de hidratação, o cimento Portland começa espontaneamente a hidratar e a mistura endurece normalmente, produzindo um material de qualidade, isto é, a hidratação é reiniciada regularmente (PAOLINI; KRURANA, 1998). Os autores ressaltam ainda que pode ocorrer uma interrupção permanente da hidratação se dosagem do aditivo estabilizador for muito alta, a qual não pode ser reativada.

Adicionalmente a isso, os aditivos incorporadores de ar influenciam na manutenção da trabalhabilidade das argamassas estabilizadas (ALVES, 2002). Conforme a NBR 13529 (ABNT, 2013), o aditivo incorporador de ar pode formar microbolhas de ar que são distribuídas homogeneamente na argamassa, conferindo-lhe melhor trabalhabilidade e redução da sua densidade.

A incorporação de ar melhora a plasticidade e mantém a trabalhabilidade das argamassas estabilizadas ao longo do período requerido (BAUER *et al.*, 2015; SCHACKOW *et al.*, 2019). Além disso, a utilização e o incremento de incorporador de ar tendem a diminuir a densidade das argamassas estabilizadas ao longo do tempo (SCHACKOW *et al.*, 2019; ZALESKI, 2021). De acordo com Alves (2002), o ar incorporado também pode afetar a

retenção de água das argamassas no estado fresco pelas características físico-químicas das microbolhas de ar, supõe-se que as mesmas retêm água.

As normas como a ASTM C1142 (ASTM, 2013) e BS 4721 (BS,1981) limitam o teor máximo de ar incorporado em 18%. No Brasil, ainda não existe um regulamento que especifique os intervalos limites para o teor de ar incorporado, embora a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) cite os requisitos de desempenho das argamassas de revestimento, não são especificados intervalos limites para o teor de ar incorporado.

Quando utilizados em teores adequados, os aditivos incorporadores de ar podem introduzir pequenas bolhas de ar (ou vazios) dispersas na matriz cimentícia (QIAO *et al.*, 2017). Esses aditivos podem aumentar a espuma inicial na pasta de cimento, diminuir a densidade da argamassa e aumentar a trabalhabilidade, o que contribui para um melhor desempenho na incorporação de ar (ALVES, 2002). Além disso, as bolhas de ar geradas pelos aditivos tendem a atenuar os erros da distribuição granulométrica (ROMANO; DOS REIS TORRES; PILEGGI, 2015).

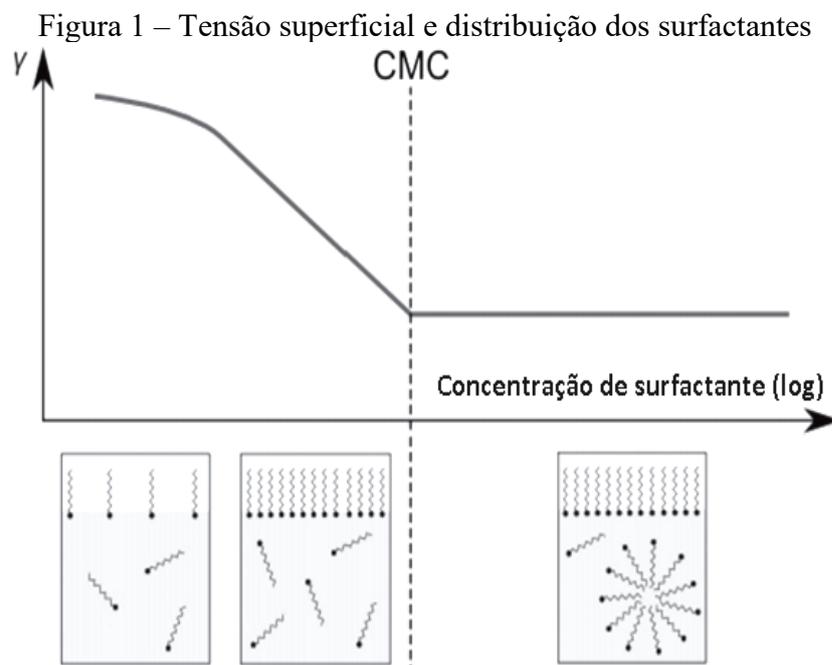
Dentre os efeitos dos aditivos incorporadores de ar pode ser destacado a redução da tensão superficial do sistema. Segundo Ke *et al.* (2020) ao misturar os aditivos incorporadores de ar com a água, muitas bolhas são criadas devido a agitação ou vibração e, dessa forma, os aditivos incorporadores de ar podem ser adsorvidos pela interface gás-líquido com a finalidade de diminuir a energia de interface e a tensão superficial, o que acarreta no aumento das bolhas presentes no sistema cimentício. Nessa perspectiva, em estudos como o de Tunstall *et al.* (2017) os autores sugerem que alguns AIA têm maior dependência da tensão superficial para estabilizar as bolhas de ar ao passo que outros dependem principalmente da interação do cálcio.

As partículas de cimento Portland podem auxiliar na estabilização de bolhas de ar evitando a coalescência. Isso ocorre porque o conteúdo de ar se acumula durante a mistura e as moléculas de surfactantes que são coaguladas por íons de cálcio se dissolvem novamente e se aderem nas partículas de cimento Portland e continuam auxiliando a entrada de ar (BRUERE, 1971).

As misturas incorporadoras de ar consistem basicamente em compostos surfactantes (MENDES *et al.*, 2017). Esses aditivos possuem unidades com forte atração pelo solvente conhecida como “cabeça hidrofílica” e por componentes que possuem pouca atração pela água denominados “cauda hidrofóbica” com direção ao ar (DU; FOLLIARD, 2005). Ainda conforme os autores, a classificação química do surfactante tem como base a extremidade hidrofílica.

Nesse contexto, os aditivos incorporadores de ar podem ser divididos em: surfactantes aniônicos, catiônicos e não iônicos (SOUZA *et al.*, 2017). Há ainda o grupo anfotérico, o qual pode conter uma carga negativa e uma positiva (DU; FOLLIARD, 2005). De acordo com Feneuil, Pitois e Roussel (2017), a extremidade hidrofílica pode ser carregada (surfactantes iônicos) ou polar (surfactantes não iônicos). Os tensoativos aniônicos são os mais utilizados como os agentes incorporadores de ar em cimento Portland e compostos cimentícios, no qual apresentam forte adsorção em sua superfície (QIAO *et al.*, 2020).

Em dosagens altas, existe a formação de micelas que são responsáveis pelo limite de redução da tensão superficial e consistem em uma junção de moléculas surfactantes (DU; FOLLIARD, 2005). Nesse sentido, a tensão superficial do ar-líquido acima da concentração micelar crítica (CMC) não diminui com o aumento da concentração de surfactante (Figura 1), pois a interface ar-água fica saturada com moléculas de surfactante ao passo que as moléculas residuais de surfactante em solução a granel se reúnem em elementos chamados micelas (FENEUIL; PITOIS; ROUSSEL, 2017).



Fonte: Adaptada de Feneuil, Pitois e Roussel (2017).

Em argamassas estabilizadas, os aditivos incorporadores de ar são recomendados em dosagens baixas devido à alta capacidade espumante (GUINDANI, 2018). Além disso, dosagens menores diminuem a coalescência de bolhas de ar. No entanto, as interações com os demais materiais da mistura podem ocasionar variações no teor de ar incorporado. Por exemplo,

o estudo de Casali *et al.* (2018), encontrou teor de ar incorporado de até 37% em argamassas estabilizadas com pequenas dosagens (0,35%) de aditivo incorporador de ar, dependendo da relação água/materiais secos e do tipo de cimento Portland.

Com o aumento da finura das partículas, a área de superfície aumenta e mais surfactantes podem ser adsorvidos nos grãos de cimento Portland e por esse motivo o surfactante disponível na fase líquida, responsável pela concepção e estabilização das bolhas de ar, diminui e, como consequência, o ar incorporado na mistura é reduzido (SHAH; YUAN; ZUO, 2020). Ainda, a estrutura inicial dos poros após a mistura da pasta pode ser desestabilizada por meio dos seguintes mecanismos: (a) o fluxo conduzido pela gravidade de bolhas crescentes acarreta em uma distribuição heterogênea de ar na amostra, (b) a diferença na pressão capilar entre bolhas de tamanhos distintos ocasiona a troca gasosa e leva a rearranjos da bolha, (c) o rompimento dos filmes de espuma induz o engrossamento do conjunto de bolha por meio do processo de coalescência (FENEUIL; PITOIS; ROUSSEL, 2017). Ainda, os aditivos incorporadores de ar produzem bolhas de ar aprisionadas que podem coalescer (PUTHIPAD; OUCHI; ATTACHAIYAWUTH, 2018). Além disso, a alta viscosidade auxilia o processo de estabilização das bolhas de ar e fornece um efeito de amortecimento que evita a coalescência das bolhas (YUAN; ZUO, 2020).

As distribuições dos tamanhos de bolhas de ar aprisionados foram avaliadas no estudo de Puthipad, Ouchi e Attachaiyawuth (2018), no qual foi utilizado um instrumento de análise de vazios de ar (AVA) em um período de 120 minutos que permitiu analisar o grau de coalescência do ar aprisionado. Nesse estudo foi verificado que a ordem de adição dos produtos, a seleção cuidadosa AIA e o procedimento da mistura nas argamassas podem reduzir o grau de coalescência.

Nesse contexto, a incorporação de ar em compostos cimentícios é um processo complexo que pode ser afetado por seus componentes como o tipo de cimento Portland, a presença de finos, a qualidade e quantidade da água e os aditivos utilizados. A Tabela 2 apresenta a influência dos componentes na incorporação de ar em compostos cimentícios.

Tabela 2 – Principais componentes que afetam os mecanismos de entrada de ar em materiais cimentícios

<b>Componentes</b>	<b>Influência no processo da incorporação de ar em compostos cimentícios</b>	<b>Referência</b>
<b>Cimento</b>		
Finura e hidratação do cimento Portland	O aumento da finura ocasiona o aumento da área de superfície e da taxa de hidratação do cimento Portland. Dessa forma, mais surfactantes são adsorvidos nos grãos de cimento Portland e a quantidade de surfactante disponível é reduzida e, em consequência, a entrada de ar diminui. O aumento do teor de cimento também pode reduzir o teor de ar incorporado.	ALVES (2002); DU; FOLLIARD (2005)
<b>Presença de finos</b>		
Adições	Ocasiona a distribuição mais uniforme de vazios de ar, pois tende a reduzir o conteúdo de ar, aumentar a área específica e diminuir o fator de espaçamento. A alta área de superfície influencia no aumento da dosagem de AIA.	ZHANG <i>et al.</i> , (2020); PUTHIPAD, OUCHI, ATTACHAIYAWUH, (2018)
<b>Qualidade da água</b>		
Água	Ao utilizar água potável na mistura, os efeitos das impurezas são imperceptíveis. Porém quando contaminada pode apresentar efeitos positivos ou negativos na entrada de ar. A incorporação de ar possibilita reduzir a quantidade água necessária para amassamento, o que pode acarretar na redução da retração plástica e por secagem.	ALVES (2002); ROMANO (2013); DU; FOLLIARD (2005)
<b>Aditivos</b>		
Incorporadores de ar (AIA)	A adição de AIA e outros aditivos podem aumentar ou diminuir a coalescência de bolhas de ar, a depender da ordem de adição. Além disso, os AIA aumentam a capacidade espumante.	ALVES (2002); PUTHIPAD; OUCHI; ATTACHAIYAWUT H (2018).

Fonte: Adaptada pela autora (2023)

Além dos componentes, a entrada de ar em compostos cimentícios pode ser influenciada por fatores como o tempo de mistura e do surfactante, a temperatura, a pressão atmosférica e a vibração (Tabela 3).

Tabela 3 – Principais fatores que influenciam a incorporação de ar em compostos cimentícios

<b>Fatores</b>	<b>Influência no processo de incorporação de ar em compostos cimentícios</b>	<b>Referência</b>
<b>Processo de mistura e processamento</b>		
Método/ Processo de mistura	O método e a ordem de mistura apresentam influência na estabilidade da incorporação de ar.	ROMANO et al., (2009); ROMANO (2013)
Tempo de mistura e do surfactante	O aumento do tempo de mistura em uma dosagem e a incorporação de aditivo incorporador de ar em teores altos pode ocasionar o aumento de pequenas bolhas e apresenta influência significativa no teor de ar incorporado a mistura. O tempo em que o surfactante se difunde na interface deve ser controlado para favorecer a tensão superficial. O tempo de mistura quanto ao teor de AIA apresenta valores limites, a partir dos quais não são verificados mais ganhos significativos no teor de ar incorporado nas argamassas	ALVES (2002) ANTONIAZZI, MOHAMAD, CASALI (2020); RATH <i>et al.</i> , (2017); ROMANO et al., (2009)
Vibração	A vibração pode forçar as bolhas de ar a entrarem em contato e formarem uma maior. As bolhas de ar tendem a se mover do fundo para o topo da mistura, aumentando a taxa de perda durante a vibração.	HAN <i>et al.</i> , (2015)
<b>Outros fatores</b>		
Temperatura	A viscosidade é influenciada pela temperatura, quanto menor for a viscosidade, menor a estabilidade das bolhas de ar, o que acelera a coalescência e a eliminação das mesmas.	ROMANO et al., (2012);

Fonte: Adaptada pela autora (2023)

Neste mesmo viés, os mecanismos de desestabilização em compostos cimentícios podem ser reduzidos ao selecionar aditivos, materiais e procedimentos de mistura adequados. Ao considerar tais fatores na produção de compostos cimentícios é possível melhorar a estabilidade volumétrica, a qual garante a compatibilidade do sistema no estado fresco (PUTHIPAD; OUCHI; ATTACHAIYAWUTH, 2018).

## 2.2. COMPORTAMENTO DE FLUXO DAS PASTAS E DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A reologia é uma forma eficaz de caracterizar a trabalhabilidade, prever o comportamento do fluxo, a estabilidade e a compatibilidade dos compostos cimentícios (JIAO *et al.*, 2017). Entender o comportamento de fluxo das argamassas é essencial para analisar o

seu comportamento uma vez que a fluidez adequada tende a aumentar a área de contato da argamassa com o substrato onde é aplicada o que torna o sistema mais estável e com maior durabilidade (STOLZ; MASUERO, 2018).

Em argamassas estabilizadas, que ficam trabalháveis por longos períodos de tempo (até 72h), o controle das propriedades reológicas é interessante, pois ocorrem alterações ao longo do tempo do tempo de estabilização, como a redução da fluidez (GUINDANI, 2018; ZALESKI, 2021).

Os principais parâmetros utilizados para verificar as propriedades reológicas incluem a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (MARCHON *et al.*, 2018). A tensão de escoamento é utilizada com a finalidade de verificar a estabilidade e a capacidade de enchimento em compostos cimentícios no estado fresco e caracteriza-se pela tensão mínima na qual a argamassa começa a fluir ao passo que a viscosidade plástica é um indicador para a compactabilidade, usinabilidade e resistência à segregação e depende de fatores como a proporção da fração de volume e a densidade de empacotamento das partículas na mistura (JIAO *et al.*, 2017). Além disso, pode ser definida como a resistência ao fluxo e à segregação, que acarreta em uma mistura não uniforme (HAN *et al.*, 2015).

Diversos fatores podem influenciar as propriedades reológicas de compostos cimentícios como a composição química, a densidade de empacotamento, as propriedades dos materiais cimentícios, a textura superficial e o tipo das misturas minerais, devido principalmente, aos efeitos de enchimento, de morfologia, de dispersão e de adsorção (JIAO *et al.*, 2017). O aditivo incorporador de ar também tem influência. Bolhas menores (10–600  $\mu\text{m}$ ) de ar podem reduzir de forma significativa a tensão de escoamento e a viscosidade plástica da argamassa (ZHANG *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a tensão de escoamento pode ser significativamente modificada quando surfactantes, principalmente aniônicos, são adicionados à pasta de cimento Portland (FENUIL; PITOIS; ROUSSEL, 2017). De acordo com Feneuil, Roussel e Pitois (2020), baixa concentração de surfactante resulta em um aumento da tensão de escoamento devido a adsorção do surfactante nos grãos de cimento Portland que os transformam em grãos hidrofóbicos e resultam em interações atraentes ao passo que alta concentração de surfactante ocasiona uma queda de tensão de escoamento da pasta relacionada a aglomeração do surfactante na superfície dos grãos de cimentos Portland que levam à repulsão entre eles.

A capacidade de união da argamassa no estado fresco com uma base é denominada adesão e está relacionada com as características reológicas da pasta, principalmente a tensão

superficial (CASAREK, 2010). Ainda conforme a autora, a adição de cal a argamassa pode diminuir sua tensão superficial contribuindo com a molhagem da superfície dos substratos e dos agregados. Além disso, aditivos incorporadores de ar tendem a diminuir a tensão superficial e podem ocasionar efeitos semelhantes (KE *et al.*, 2020).

As propriedades do cimento Portland, como a composição química e suas características físicas também podem modificar os aspectos reológicos de compostos cimentícios ao considerar que a fase  $C_3A$  é a mais reativa no cimento Portland e sua hidratação tem influência nas propriedades reológicas do compostos cimentícios (MARCHON *et al.*, 2018).

Outro fator relevante ao analisar os aspectos reológicos, refere-se à incorporação de resíduos nas misturas. As alterações no comportamento reológico podem ocorrer devido ao formato das partículas que apresentam influência no atrito interno e na consistência da mistura (CARTUXO *et al.*, 2015). Ademais, adições residuais as misturas podem apresentar influência no escoamento e na viscosidade das argamassas, pois escoamento da argamassa relaciona-se com o empacotamento das partículas e o índice de uniformidade dos agregados, sendo assim, granulometrias uniformes tendem a não ser favoráveis ao teor de ar incorporado (STOLZ; MASUERO, 2018).

### 2.3. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Dentre as propriedades normalmente analisadas em argamassa estabilizada no estado endurecido destacam-se: resistência à compressão e resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, aderência, absorção de água, permeabilidade e retração. Essas argamassas devem seguir os critérios especificados pela norma NBR 13281 (ABNT, 2023) referente aos requisitos mínimos para a utilização de argamassas de assentamento e revestimentos.

Quanto às propriedades mecânicas, a relação a/c, a cura interna, o adensamento, as características dos agregados e aditivos são fatores que podem resultar em efeitos importantes na resistência de argamassas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em argamassa estabilizada, o uso de aditivos para obter as características desejáveis pode afetar as propriedades no estado endurecido.

Segundo Antoniazzi *et al.* (2020), o aditivo estabilizador de hidratação quando empregado em altos teores pode diminuir a resistência à compressão e a resistência à tração, o que indica um possível retardo na formação dos compostos hidratados. Jantsch *et al.* (2015),

por exemplo, analisaram argamassas estabilizadas de 36 e 72 horas com cura seca ao ar (20°C e UR: 65%) e desforma após 7 dias e obtiveram resultados médios de resistência à tração na flexão na faixa de 4,66 e 1,23 MPa e de resistência à compressão de 14,56 MPa a 2,33 MPa, respectivamente.

Zaleski (2021) também evidenciou que as argamassas produzidas para 48 horas com agente retentor de água (HPMC) apresentaram valores superiores de resistências à compressão quando comparadas às argamassas de 72 horas com 0,15% e 0,20% de HPMC, em aproximadamente 31,01 e 51,28%, respectivamente. Esses resultados foram atribuídos ao aumento da dosagem de 0,85% para 1,2% de aditivo estabilizador de hidratação que ocasionou prejuízos nas resistências à compressão. O mesmo comportamento foi evidenciado nos resultados de resistência à tração na flexão.

Bauer *et al.* (2015), analisaram 17 lotes de argamassas estabilizadas que foram aplicadas em obras por um período de três anos e obtiveram intervalos de maior ocorrência entre 1,23 a 2,63 MPa para resistência à tração na flexão e 4,90 a 10,90 MPa para resistência à compressão. Essas argamassas foram avaliadas conforme os parâmetros mínimos exigidos pela norma brasileira NBR 13281 (ABNT, 2023). Nesse estudo, foi proposto pelos autores um perfil de desempenho para as argamassas estabilizadas de revestimento no qual a resistência à compressão foi considerada adequada nos níveis de desempenho de 5,5 a 9,0 MPa (P5) e > 8,0 MPa (P6) e a resistência à tração na flexão nas faixas de 2,0 a 3,5 MPa (R4); 2,7 a 4,5 MPa (R5) e > 3,5 MPa (R6).

Oliveira (2017) analisou a influência das distribuições granulométricas dos agregados no desempenho mecânico das argamassas estabilizadas com teores de 0,40% de AEH e 0,20% de aditivo incorporador de ar e encontrou resultados de resistência à compressão que variaram de 8,40 MPa para argamassas estabilizadas produzidas com areia fina para 8,10 MPa para argamassas estabilizadas produzidas com areia média (granulometria contínua e bem graduada). Já na resistência à tração na flexão os valores ficaram entre 2,50 MPa para areia fina e 2,20 MPa para areia média. Esses resultados estão de acordo com o perfil de desempenho proposto por Bauer *et al.* (2015).

A aderência é o termo utilizado para descrever a resistência e a extensão do contato entre a argamassa e uma base (CARASEK, 2010). É uma propriedade complexa que depende de diversos fatores, como a trabalhabilidade, a retenção de água, as características de pega, o teor de ar incorporado, os materiais constituintes, as condições climáticas no momento de aplicação, o modo e o tempo decorrido após a aplicação do composto argamassado

(THAMBOO; DHANASEKAR, 2015). Bauer *et al.* (2015) encontraram valores mais representativos de aderência potencial entre 0,51 e 0,62 MPa em lotes de argamassas estabilizadas analisadas em um período de três anos, sendo que todos os valores encontrados ficaram muito acima de 0,3 MPa, valor esse considerado o mínimo para uso em paredes externas pela NBR 13749 (2013). Ainda, alguns estudos observaram a ocorrência de reduções significativas da resistência de aderência com o aumento do tempo de estabilização, associados ao aumento da dosagem de aditivo estabilizador de hidratação (BELLEI *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2017.).

A capacidade que um revestimento tem de absorver deformações pode ser avaliado por meio do módulo de elasticidade, isto é, quanto maior a capacidade do revestimento de absorver deformações, menor será o valor do módulo (SILVA, 2006). Oliveira (2017), encontrou módulo de elasticidade próximos para argamassas estabilizadas produzidas com areia fina e média de 9,39 e 9,60 GPa, respectivamente. Zaleski (2021), em seu estudo, observou que nas argamassas estabilizadas de 72 horas ocorreram reduções nos valores de módulo em comparação à referência e as argamassas de 48 horas. As faixas de valores de módulo para 48 horas ficaram entre 7,25 a 7,83 MPa para 48 horas e 6,29 a 7,22 MPa para argamassas estabilizadas de 72 horas avaliadas aos 28 e 42 dias. Ainda, a autora observou que todas as argamassas apresentaram acréscimos nos valores de módulo quando avaliadas aos 42 dias, sugerindo que podem ocorrer ganhos no desempenho mecânico em maiores idades de cura devido a hidratação lenta da argamassa estabilizada.

O uso de aditivos em argamassa estabilizada também pode influenciar o contato da argamassa com a base, a exemplo dos aditivos incorporadores de ar que podem ser prejudiciais a resistência a aderência ao considerar que a área de contato da argamassa diminui devido a formação de vazios de ar na interface (STOLZ *et al.*, 2016). Segundo Carasek (2010), teores de ar acima de 20% apresentam problemas para os revestimentos, embora baixos valores de teor de ar podem melhorar a aderência e trazer ganho de trabalhabilidade da argamassa.

A absorção por capilaridade avalia a facilidade de entrada de água e como o seu transporte ocorre dentro de um revestimento argamassado de estrutura porosa (RODRIGUES FILHO, 2013; JANTSCH, 2015). De acordo com Bauer *et al.* (2015), valores de coeficiente de capilaridade acima de 3 já podem ser críticos para fachadas que ficam submetidas diariamente à chuva. O autor encontrou coeficientes de capilaridade com maior frequência em dois intervalos, sendo eles de 2,00 à 3,20 e 3,20 a 4,40 g/m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>. Ao comparar o coeficiente de capilaridade de duas argamassas estabilizadas com agregados miúdos diferentes e os mesmos

teores de aditivo, Oliveira (2017) obteve coeficientes de capilaridade de  $6,70 \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  com areia fina e  $6,60 \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  com areia média. Zaleski (2022) encontrou valores na faixa de 3,76 a  $5,05 \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  para argamassas estabilizadas por 72 horas com fosfogesso na idade de 42 dias aplicadas sobre um substrato poroso.

Outro fator que pode apresentar influência é a permeabilidade, pois a estrutura dos poros dos materiais cimentícios é responsável por regular as propriedades de transporte e encontra-se em desenvolvimento contínuo (XIE *et al.*, 2020). Essa propriedade pode ser associada a possíveis manifestações patológicas como eflorescências, manchas de bolor e mofo (CARASEK, 2010). Além disso, a permeabilidade e a estrutura dos poros dos materiais à base de cimento Portland possui grande influência na durabilidade das argamassas (YANG *et al.*, 2019). Isso ocorre porque a permeabilidade ao vapor de água faz com que diminua o número de líquidos presentes na superfície da argamassa auxiliando assim a redução de patologias oriundas do excesso de umidade, a exemplo de mofos.

Nessa perspectiva, de acordo com Ledesma *et al.* (2014), em argamassas externas busca-se resultados de permeabilidade a vapor superiores e absorção capilar inferiores. Desse modo, é válido citar que adições residuais, a exemplo do gesso FGD, podem contribuir com a redução da absorção de água capilar em compostos cimentícios (TEXEIRA, 2019).

A retração é uma propriedade física relevante em materiais à base de cimento que pode ser definida como a alteração volumétrica decorrente da secagem e é responsável pela formação de fissuras e trincas (ZHANG; HAMA; NA, 2015). As fissuras constituem uma das principais manifestações patológicas de argamassas e podem ser associadas a problemas de dosagem de materiais e de misturas inadequadas (SOUZA *et al.*, 2020). Nesse sentido, problemas como o variações volumétricas podem reduzir a vida útil e ocasionar danos à argamassa. Como forma de reduzir as alterações volumétricas por secagem, algumas adições podem ser incorporadas ao sistema pois diminuem a temperatura interna e contribuem com o atraso do pico de temperatura. (JIANG *et al.*, 2018).

Diante do exposto, ao analisar o desempenho das argamassas em termos de durabilidade é fundamental compreender a influência da penetração de diversos agentes deletérios, principalmente a evolução da permeabilidade à água para materiais cimentícios (XIE *et al.*, 2020). Os fatores como a qualidade dos materiais, a composição da argamassa e a exposição às intempéries podem interferir na durabilidade de revestimentos de argamassas (CARASEK, 2010).

## 2.4. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

A crescente utilização de resíduos em compostos cimentícios justifica-se pelos benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Além disso, é amplamente conhecido que as adições podem melhorar as propriedades das argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido. A adição de resíduos finos, por exemplo, pode aumentar a compactação das argamassas e acarretar em propriedades positivas como o acréscimo das resistências mecânicas, maior retenção de água, menor absorção de água e menor permeabilidade à água (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015).

Embora os resíduos finos proporcionem maior compactação das argamassas modificadas e, em decorrência desse incremento, ofereçam vantagens variadas ao sistema, há aspectos negativos oriundos da incorporação de partículas finas aos compostos cimentícios que devem ser analisados, como o maior módulo de elasticidade (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2019). O aumento do módulo de elasticidade gera uma argamassa mais rígida e com menor capacidade de deformação quando submetida a tensões de carregamento que acarretam em fissuras internas e externas no produto final (JESUS *et al.*, 2019).

Além disso, as adições podem contribuir para a liberação de água livre, auxiliar na dispersão dos grãos de cimento Portland e ajudar na retenção da umidade (LIN *et al.*, 2019). Tais acontecimentos proporcionam boa fluidez e contribuem com a resistência a variações volumétricas na secagem (WANG *et al.*, 2017; LIN *et al.*, 2019). Em contrapartida, o tamanho ideal das partículas deve ser avaliado, o aumento da finura das adições pode exibir um volume de poros mais denso e influenciar negativamente a retração por secagem (ZHANG; HAMA; NA, 2015). Quanto maior a finura, maior a área de superfície específica e é necessária uma maior demanda de água para a “lubrificação” das partículas o que resulta em modificações na estrutura dos poros da matriz de cimento e, conseqüentemente, pode ocasionar maior retração (ZHANG *et al.*, 2015).

Pode-se citar a área de superfície específica com um fator a ser considerado no controle da demanda de água em sistemas cimentícios (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019). A área de superfície também tem influência na dosagem e seleção de aditivos retardadores. Ataie *et al.* (2015) relatam que quanto maior a área de superfície maior é a necessidade de dosagem do aditivo retardador no sistema.

Com a exploração e a grande geração de resíduos surge a necessidade de testar e qualificar tais materiais para utilização em compostos cimentícios. Inúmeros estudos

verificaram o uso de resíduos em argamassas, no entanto poucos estudos testaram esses materiais em argamassas estabilizadas (GUINDANI,2018). Conforme o relatório da arte da RILEM (2018) para a aplicação em grande proporção na indústria da construção civil é importante verificar a variabilidade desses novos materiais nas propriedades de compostos cimentícios e seus requisitos de cura.

A incorporação de resíduos finos pode diminuir o teor de vazios e a liberação de água no interior da argamassa, contribuindo com o aumento da retenção de água (OLIVEIRA et al, 2015). Assim, a argamassa em contato com a água quando aplicada em um substrato poroso tem a capacidade de reter água e aumenta a probabilidade de atingir a hidratação do cimento (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2015). A absorção de água também pode ser reduzida com a adição de resíduos, a exemplo do gesso FGD que pode e apresentar incrementos na resistência à compressão de compostos cimentícios (TEIXEIRA, 2019).

A utilização de resíduos finos em compostos cimentícios pode reduzir também a porosidade da matriz cimentícia e o coeficiente de capilaridade, além de conferir melhores propriedades mecânicas (HSU; CHI; HUANG, 2018). Há de considerar também que esses materiais podem melhorar a durabilidade das misturas cimentícias. (ATAIE *et al.*, 2015). Hsu, Chi e Huang (2018) ressaltam que partículas com maior finura são mais eficazes na redução dos diâmetros dos poros das argamassas. Em contrapartida, a estabilidade das bolhas de ar diminui com a adição de finos, a exemplo da cinza volante que devido à sua forma esférica, o ar arrastado pode facilmente coalescer e escapar (SHAH; YUAN; ZUO, 2020).

De acordo com o estudo de Carvalho *et al.* (2021) partículas mais finas podem aumentar os tempos de início de pega em comparação a partículas mais grosseiras. Isso ocorre porque as partículas mais finas podem atuar como locais de nucleação e, dessa forma, aceleram a hidratação do cimento (WANG *et al.*, 2018; KONG *et al.*, 2018). De outro modo, a incorporação de alguns resíduos podem auxiliar e potencializar o processo de desaceleração da hidratação, a exemplo da cinza de lodo de esgoto que contém íons ortofosfatos que retardam a hidratação do cimento Portland (MEJDI *et al.*, 2020), do resíduo de dessulfurização de gases que apresenta potencial de ser utilizado como retardador de pega (KORALEGEDARA *et al.*, 2019) e do pó de forno elétrico a arco que tem o potencial para retardar a hidratação do cimento Portland de forma semelhante a retardadores comerciais (LOZANO-LUNAR *et al.*, 2019).

Frente às características apresentadas e os aspectos discutidos até o momento referentes a incorporação de resíduos, a Tabela 4 apresenta as possíveis contribuições desses

resíduos ao processo de estabilização e nas propriedades do estado endurecido de argamassas estabilizadas.

Tabela 4 – Contribuição dos resíduos em argamassas estabilizadas

(continua)

Característica	Contribuições dos resíduos em argamassas estabilizadas	Referência
Área superficial	Ao aumentar a finura, a área de superfície específica aumenta e maior demanda de água para a “lubrificação” das partículas é necessária. Devido a isso, ocorrem modificações na estrutura dos poros da matriz de cimento e, em consequência, pode ocorrer maior retração. Além disso, maior quantidade de aditivos estabilizadores de hidratação são adsorvidos nos grãos. Isso resulta em menor quantidade do aditivo disponível na fase líquida.	ZHANG <i>et al.</i> , (2015). SHAH; YUAN; ZUO, (2020). ATAIE <i>et al.</i> , (2015)
Formato das partículas	Em decorrência do formato das partículas, o comportamento reológico pode sofrer alterações. Isso ocorre porque o formato das partículas influencia no atrito interno entre as partículas e no fluxo da mistura, isto é, o aumento do atrito entre as partículas sólidas para um mesmo volume de finos pode reduzir a trabalhabilidade das argamassas estabilizadas. Além disso, em formatos esféricos que promovem maior “lubrificação” entre os finos, a segregação pode ocorrer e o ar arrastado pode facilmente coalescer e escapar.	CARTUXO <i>et al.</i> , (2015). MEHDIPOUR <i>et al.</i> , (2016). SHAH; YUAN; ZUO, (2020)
Tempo de pega	Partículas com maior finura podem atuar como locais de nucleação e, em consequência, acelerar a hidratação do cimento em comparação a partículas mais grossas. Portanto, mais produtos hidratados são formados (CSH e CH) em idades precoces e o tempo de pega é reduzido. Todavia, alguns resíduos finos possuem propriedades que podem favorecer a desaceleração da hidratação do cimento Portland pela presença de íons ou componentes que alteram a hidratação do cimento.	W KONG <i>et al.</i> , (2018). JIANG <i>et al.</i> , (2018). MEJDI <i>et al.</i> , (2020). GU <i>et al.</i> , (2021) KORALEGEDAR A <i>et al.</i> , (2019). LOZANO-LUNAR <i>et al.</i> , (2019)
Capacidade de retenção de água	A incorporação de finos acarreta em menor teor de vazios, aumenta a compactação das argamassas e a retenção de água. Ou seja, quando em contato com um substrato poroso, argamassas com finos têm maior capacidade de reter água e atingir a hidratação completa do cimento. Ademais, a maior retenção de água favorece as propriedades mecânicas das argamassas.	FARINHA; BRITO; VEIGA, (2015). CHEN <i>et al.</i> , (2020). GOVIN <i>et al.</i> , (2016). YUAN; ZUO, (2020)

Tabela 4 – Contribuição dos resíduos em argamassas estabilizadas

(conclusão)

Capacidade de diminuir a temperatura interna	Algumas adições diminuem a temperatura interna e atrasam o pico de calor. Fator esse que favorece o processo de estabilização ao considerar que temperaturas de cura mais altas aceleram a taxa de hidratação.	JIANG <i>et al.</i> , (2018)
Capacidade de reduzir a porosidade e o coeficiente de capilaridade	A maior finura das adições minerais é eficaz na redução do diâmetro dos poros e do coeficiente de capilaridade por meio da formação de mais produtos hidratados (CSH). O aumento do teor de substituição de partículas finas também diminui o tamanho dos poros. Tais fatores auxiliam no melhor desempenho da argamassa no estado endurecido.	HSU; CHI; HUANG, (2018). ATAIE <i>et al.</i> , (2015)
Capacidade de aderência à superfície	Com a adição de finos, o fluido que penetra o substrato tem maior resistência após a hidratação e, dessa forma, a aderência da argamassa à superfície é melhorada.	FARINHA; BRITO; VEIGA, (2015). CARASEK, (2010)

Fonte: Adaptada pela autora (2023)

#### 2.4.1. Aplicação do resíduo do processo de dessulfurização de gases (FGD) na construção civil

##### 2.4.1.1. Origem do resíduo

O processo de dessulfurização de gases - FGD (*Flue Gas Desulfurization*) é utilizado em usinas termelétricas, usinas siderúrgicas para a produção do aço e algumas fábricas de produtos químicos com grande emissão  $\text{SO}_2$  como forma de reduzir emissões prejudiciais aos seres vivos e ao meio ambiente (LI *et al.*, 2017). A queima de carvão mineral é responsável por cerca de 50% do total das emissões de  $\text{SO}_2$  no mundo (BRODNY; TUTAK, 2019). Por esse motivo, diversos países adotaram diretivas que contém limites para a emissão de gases poluentes (*Directives regulating emissions of air pollutants* - EU 2015/2193, CONAMA nº 436, 2011). Ao considerar tais emissões, o uso do processo FGD representa uma das principais rotas industriais para o controle e remoção do dióxido de enxofre da atmosfera (MATHIEU *et al.*, 2013). Em alguns países como os Estados Unidos, a utilização desse processo por empresas produtoras de eletricidade passou a ser obrigatória (WALIA; DICK, 2018).

Foram desenvolvidas diversas configurações do processo FGD para controlar a exaustão de  $\text{SO}_2$  que variam principalmente conforme o consumo de água (seco, semi-seco e úmido). Esses sistemas são fundamentados nos mecanismos de uso de soluções reagentes para

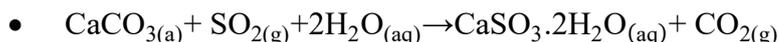
converter os gases de combustão (GUO; SHI, 2008). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (SRIVASTAVA, 2000), as tecnologias de dessulfuração disponíveis são classificadas em regeneráveis e não-regeneráveis. Nos sistemas regeneráveis o  $\text{SO}_2$  é liberado do adsorvente e pode ser processado para produzir enxofre elementar e ácido sulfúrico ao passo que nos processos não-regeneráveis o  $\text{SO}_2$  são confinados pelo sorvente e formam subprodutos que apresentam potencial para ser utilizados na construção civil, como o gesso. A Tabela 5 mostra a classificação desses sistemas e os materiais utilizados no processo.

Tabela 5 – Classificação das tecnologias de dessulfuração

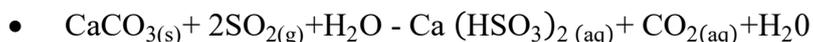
<b>Dessulfurização de Gás de Combustão</b>		
<b>Não-regenerativo</b>	Úmido	Calcário com oxidação forçada ou oxidação natural; Cal; Carga reforçada com mercúrio e Água do mar.
	Seco ou Semi-seco	Secagem por spray de cal; Injeção de sorvente na linha de gás; Injeção de sorvente na fornalha; Leito fluidizado circundante.
<b>Regenerativo</b>	Úmido	Sulfito de sódio; Óxido de magnésio; Carbonato de sódio; Amido.
	Seco ou Semi-seco	Carvão ativado.

Fonte: Adaptada de SRIVASTAVA (2000)

O sistema FGD mais difundido no mundo é o processo de dessulfurização de gases por via úmida devido a eficiência de dessulfuração (capacidade de retenção de  $\text{SO}_2$ ) e o custo operacional. Esse sistema geralmente utiliza uma pasta de cal/calcário pulverizada no gás de combustão e obtém subprodutos sólidos e aquosos (CÓRDOBA, 2015). O processo é baseado em reações ácido-base complexas que podem ocorrer sob duas condições de oxidação: forçada ou natural (CORDOBA; STAICU, 2018). Para a maioria das aplicações é interessante controlar a oxidação, no entanto, dependendo das condições como o excesso de gás de combustão, pH e a concentração de  $\text{SO}_2$  de alguns sistemas, pode ser vantajoso operar no modo natural (BREF, 2006). A oxidação natural tem como principal produto a mistura de 65% de  $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ao passo que a oxidação forçada tem como produto final cerca de 90% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (BREF, 2006). Conforme Cordoba e Staicu (2018), ao considerar a oxidação forçada, a reação geral na zona de contato gás-líquido com um a faixa de pH entre 5 e 6 ocorre da seguinte forma:



Ainda conforme os autores, no tanque de reação ocorre a conclusão das reações iniciadas na zona de contato gás-líquido. Ao utilizar uma faixa de pH mais baixa entre 4,5 e 5,5 a reação química é alterada:

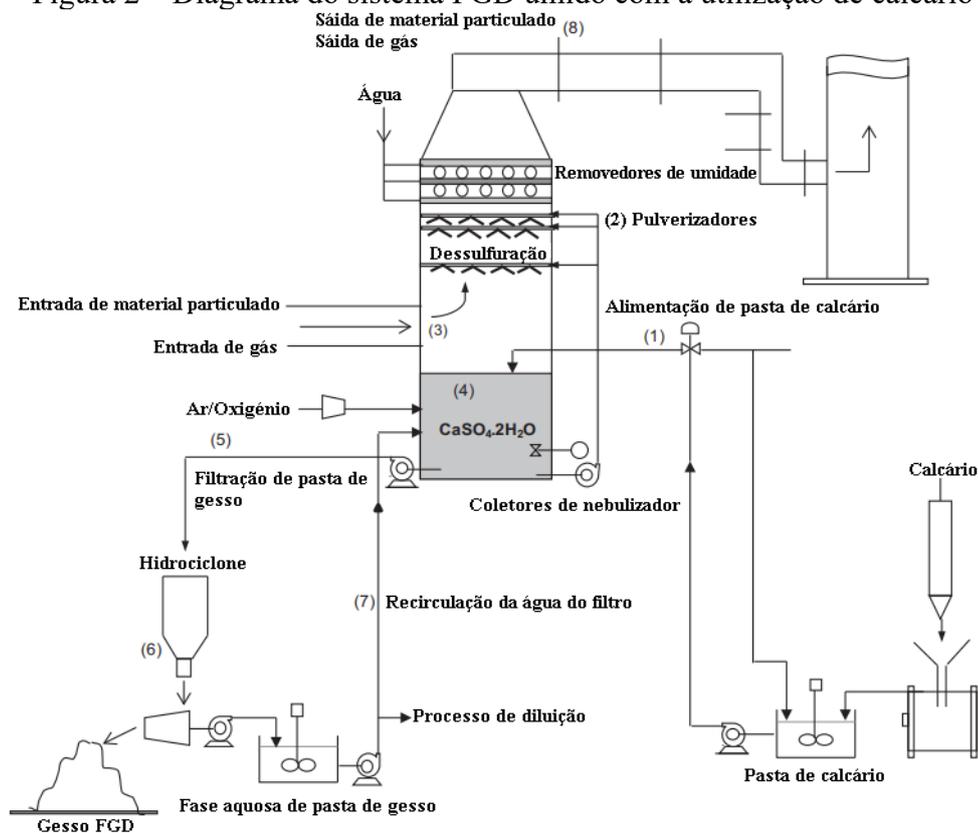


Com base nas reações acima, evidencia-se a mudança do produto primário da neutralização por calcário conforme ocorre a alteração do pH. No tanque de reação a pasta de calcário fresco é misturada com a pasta consumida com a finalidade de substituir o  $\text{CaCO}_3$  e ocorre a neutralização da pasta ácida (CORDOBA; STAICU, 2018). Por fim, o  $\text{CO}_2$  é produzido e posteriormente dessorvido e ocorre a formação de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como subproduto:



No sistema FGD de calcário úmido com oxidação forçada (Figura 2) em um primeiro momento, conforme Cordoba (2015) é realizada a preparação da pasta de calcário no moinho de bolas fechado e após esse material é bombeado para o purificador em um regime controlado com a finalidade de manter o pH do purificado. As gotas de lama suspensas contendo calcário pulverizado reagem com o gás de combustão e caem no tanque. Nessa etapa, o oxigênio é injetado no tanque de reação por meio de aspersores de fundo e, em consequência, ocorre a reação com  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$  ou  $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  produzindo o gesso FGD ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Para formar esse subproduto a lama de gesso flui por meio de hidrociclones para um filtro de vácuo onde os sólidos são lavados e concentrados (CORDOBA, 2015).

Figura 2 – Diagrama do sistema FGD úmido com a utilização de calcário



**Legenda:**

- (1) Alimentação da pasta de calcário para o purificador;
- (2) A lama de calcário é bombeada por meio dos coletores do nebulizador e pulverizada no purificador para reagir com o  $\text{SO}_2$ ;
- (3) Fluxo de entrada de gás e material particulado para o depurador após o processo de combustão;
- (4) Formação de pasta de gesso como resultado do processo de dessulfuração;
- (5) Extração da pasta de gesso para o processo de filtração por hidrociclones;
- (6) Produção de pasta de gesso;
- (7) Recirculação de água filtrada após processo de diluição;
- (8) Gás limpo, material particulado e fluxo de saída gasoso.

Fonte: Adaptada de CORDOBA (2015)

Embora o sistema seja o mais utilizado e apresenta eficiência e custo baixo, o processo de lavagem úmido apresenta alto consumo de água e resulta em grandes volumes de resíduos líquidos quando comparado com os processos secos e semi-secos (MATHIEU *et al.*, 2013).

De acordo com Córdoba (2015), o sistema de dessulfuração de gases semi-seco ou Spray-Dryer é o segundo mais popular em todo o mundo e é o mais utilizado em caldeiras que possuem capacidade pequena e/ou média e carvão com teor de enxofre inferior a 1,5% em peso. Isso ocorre devido ao tipo de reagente utilizado e a menor demanda de água em comparação ao processo úmido (CARPENTER, 2013). Nesse sistema, conforme Cordoba (2015), os gases de combustão que contém  $\text{SO}_2$  reagem com os agentes alcalinos (geralmente o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o  $\text{CaO}$ ) e são gerados resíduos secos. Essa reação química reduz o teor de dióxido de enxofre. Após a

reação do  $\text{SO}_2$  com o adsorvente que é misturado com o excesso de água ou utilizado para produzir a lama de cal, esse material vai para o absorvedor de onde o  $\text{SO}_2$  também é removido do gás de combustão. No processo semi-seco (Figura 3) ocorrem as seguintes reações primárias:

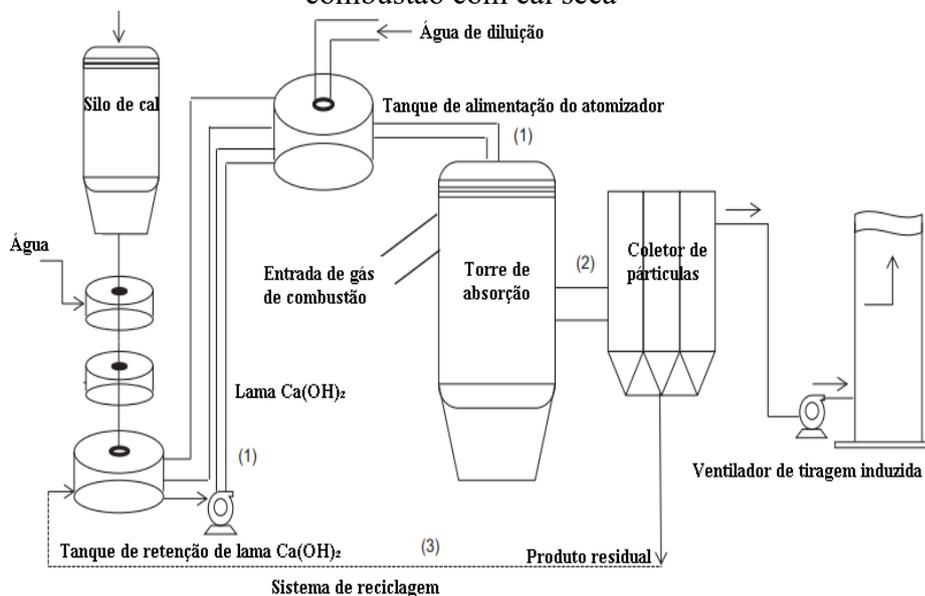
- $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Nesse processo pode ocorrer também uma reação secundária:

- $\text{CaSO}_3 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$

O subproduto desse sistema é transportado para o dispositivo de coleta de partículas. Esses resíduos são compostos de  $\text{CaSO}_3$  e  $\text{CaSO}_4$  e quando a secagem não é tão eficiente pode ocorrer a formação de compostos hidratados como a Gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a Hennebachite ( $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). Ressalta-se ainda, que nesse processo, a água evaporada pelo calor do gás de combustão não necessita de tratamento (CÓRDOBA, 2015). O processo FGD é responsável pela geração de grandes quantidades de gesso como subproduto (MATHIEU *et al.*, 2013).

Figura 3 – Projeto e operação convencionais de um sistema de dessulfuração de gases de combustão com cal seca



#### Legenda:

- (1) Alimentação de cal no tanque de alimentação do atomizador;
- (1) Lama de cal é pulverizada no purificador para reagir com o  $\text{SO}_2$ ;
- (2) O subproduto da dessulfuração é arrastado para o gás de combustão e transportado a jusante em direção a um dispositivo de coleta específico;
- (3) Resíduo é reciclado e misturado com pasta fresca de  $\text{CaO}$  para melhorar a utilização.

Fonte: Adaptada de Córdoba (2015)

## 2.4.1.2. Caracterização do gesso FGD

Estudos recentes mostram que o gesso natural e o gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGD) possuem propriedades químicas semelhantes (WU *et al.*, 2019). Tal conclusão é observada por meio do ingrediente principal dos subprodutos da dessulfurização, o sulfato de cálcio, que também é o principal composto gesso natural. Por esse motivo o subproduto oriundo desse processo é denominado como gesso FGD. A composição química do gesso natural e do gesso FGD (%) gerado em alguns estudos é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do gesso FGD

<b>Estudo</b>	<b>LEI <i>et al.</i> (2017) / China</b>	<b>GUO; SHI (2008) / China</b>	<b>LEI <i>et al.</i> (2017) / China</b>	<b>HANJITSU WAN <i>et al.</i> (2020) / Tailândia</b>	<b>CÓRDOBA; AYORA; QUEROL (2021) / Espanha</b>
<b>Gesso FGD/ Diâmetro médio (µm)</b>	<b>Gesso natural / 26,55</b>	<b>Não tratado / 25-70 (80% dos grãos)</b>	<b>Não tratado / 32,67</b>	<b>Tratado termicament e (100°C) /150</b>	<b>Não tratado/ 40-50</b>
SiO <sub>2</sub>	3,12	1,82	1,05	0,73	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,69	0,39	0,34	0,42	0,1
CaO	34,8	31,24	35,94	32,84	31
MgO	1,73	0,64	0,17	0,76	0,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,20	0,11	0,09	0,1
SO <sub>3</sub>	39,0	41,8	41,54	48,47	42
K <sub>2</sub> O	0,05	0,13	0,09	0,01	<0,01
Na <sub>2</sub> O	0,49	0,05	0,82	0,17	0,03
H <sub>2</sub> O	16,94	18,56	18,17	-	-
Outras composições	3	-	1,77	-	25,96
Perda de ignição	-	5,17	-	16,44	-

Fonte: Adaptada pela autora (2023)

Com a Tabela 6, observa-se que o gesso natural e o gesso FGD contém quantidade elevada de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e óxido de cálcio (CaO) em sua composição química. Além disso, impurezas podem estar presentes na composição do resíduo FGD.

De acordo com o nível de hidratação, o sulfato de cálcio apresenta três composições químicas diferentes, são elas: sulfato de cálcio di-hidrato ou gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), hemi-hidrato ou bassanita (CaSO<sub>4</sub>.0,5H<sub>2</sub>O) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>). Essas composições podem ser obtidas

por meio de processo de aquecimento em temperaturas determinadas (TYMOTIE; CHANG; NGUYEN, 2020).

A composição predominante do gesso natural e do gesso FGD é sulfato de cálcio di-hidrato (LEI *et al.*, 2017). No entanto, quando aquecidos em temperaturas entre 120 - 160°C, o sulfato de cálcio di-hidrato é transformado em hemi-hidrato devido a perda de 75% da sua água de cristalização. Ainda, o sulfato de cálcio pode existir na forma de anidrita III em temperaturas superiores a 160°C quando ocorre a desidratação total da gipsita. Com o aquecimento em temperaturas superiores a 300°C forma-se a anidrita II e entre 1000°C e 1200°C pode ocorrer a transformação para anidrita I. Os tipos de anidrita variam conforme a velocidade de hidratação e o endurecimento (THEINSEN, 1983; SINGH; MIDDENDORF, 2007; SINGH; MIDDENDORF, 2007; TYMOTIE; CHANG; NGUYEN, 2020).

O hemi-hidrato é encontrado em duas formas, conhecidas tradicionalmente por “ $\alpha$ ” ou “ $\beta$ ” que variam conforme o modo de preparo: “ $\alpha$ ” é preparado por métodos úmidos a exemplo da autoclavagem enquanto “ $\beta$ ” por métodos secos como a calcinação (ADRIEN *et al.*, 2016). Segundo os autores, a forma “ $\beta$ ” é mais usual. O uso de  $\alpha$ -hemi-hidrato é menos comum do que do  $\beta$ -hemi-hidrato devido ao produto de sua hidratação ser muito quebradiço (YU; BROUWERS, 2011).

A adição de materiais contendo sulfato de cálcio em compostos cimentícios além de afetar o tempo de pega pode influenciar no aumento da resistência e evitar retração plástica (TZOUVALAS, DERMATAS, TSIMAS, 2004). As diferentes fases do sulfato de cálcio exibem comportamentos distintos devido a taxa de dissolução. O hemi-hidrato apresenta taxa de dissolução (9,0 g /L) mais rápida do que do di-hidrato (2,4 g /L), o que favorece a geração de etringita mais rapidamente durante a hidratação e, em consequência, o aumento da resistência inicial. Ainda, no cenário da dissolução lenta com anidrita (2,1 g/L) o sulfato de cálcio é menos solúvel que o aluminato, isto é, a solução pobre de sulfato de cálcio levaria ao crescimento de agulhas finas e longas de etringita. Por esse motivo, a anidrita só apresenta aumento de resistência em idades avançadas, isto é, após 28 dias (TORRÉNS-MARTÍN; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 2013; ZHANG *et al.*, 2018).

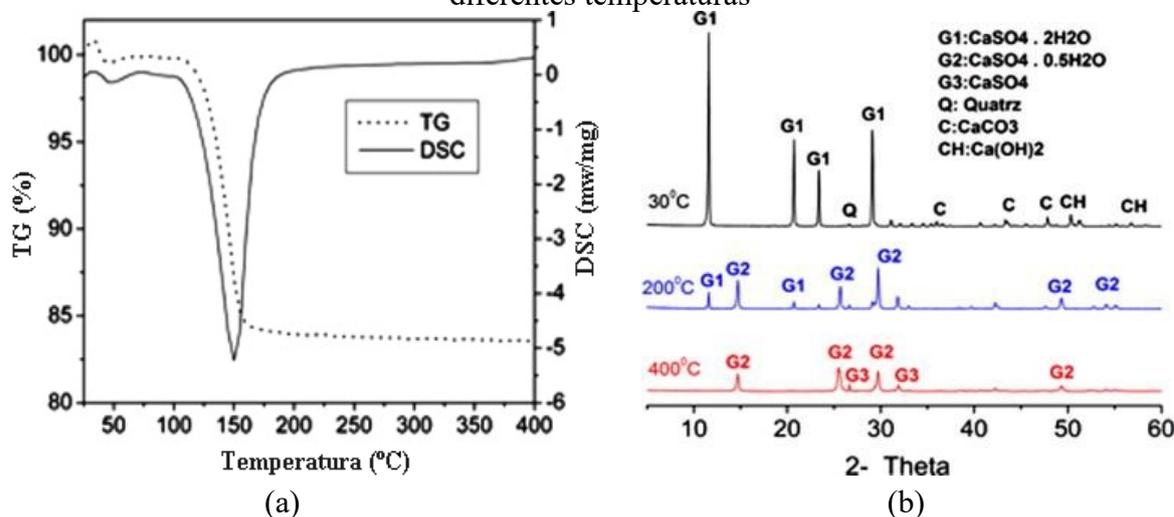
Quanto ao tempo de configuração, observa-se que o di-hidrato aumenta o tempo de pega em comparação ao hemi-hidrato ao passo que a anidrita, diminui o tempo de pega comparada ao di-hidrato, no entanto, ainda se apresenta como um retardador de pega eficaz (PAPAGEORGIU; TZOUVALAS, TSIMAS, 2005; TZOUVALAS, DERMATAS, TSIMAS,

2004). As interações dos diferentes tipos de sulfato de cálcio com aditivos estabilizadores de hidratação ainda não foram discutidas na literatura.

O teor de umidade do gesso FGD não tratado oriundo desses processos encontra-se geralmente na faixa entre 5% e 12% (POULLIKAS *et al.*, 2015; KORALEGEDARA *et al.*, 2017). Devido a isso, quando utilizado em compostos cimentícios o resíduo passa por um tratamento térmico para desidratá-lo (GUO; SHI, 2008, MANFROI, 2014).

Guo e Shi (2008) investigam o comportamento térmico do gesso FGD para avaliar diferentes composições químicas de sulfatos em cimentos Portland e concretos. Para tanto, o gesso FGD foi analisado em diferentes temperaturas (30°C, 200°C e 400°C). Em 30°C foi aquecido até atingir peso constante entre as medidas e em temperaturas superiores o resíduo foi mantido em aquecimento por 60 min. Nos resultados das análises de calorimetria exploratória diferencial e termogravimétrica - DSC/TGA (Figura 4a) verifica-se uma perda de massa no intervalo de temperatura de 120-200°C que, conforme os autores, está relacionada à transferência de fase de di-hidrato (gipsita) para hemi-hidrato (gesso ou bassanita). Essa conclusão está relacionada com os padrões obtidos no DRX (Figura 4b).

Figura 4 – (a) Análises térmicas (TG e DSC) do gesso FGD e (b) DRX do gesso FGD em diferentes temperaturas

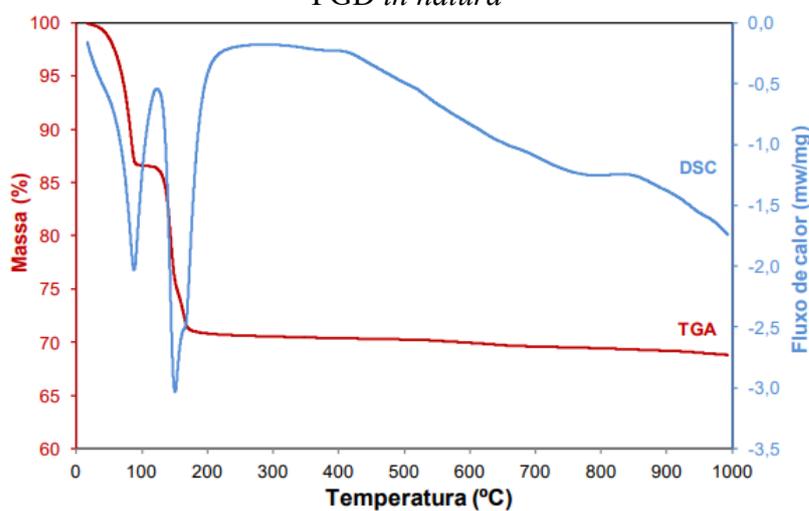


Com a análise realizada pelos autores observa-se que o gesso FGD seco a 30° C apresenta principalmente  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gipsita), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A 200°C verifica-se quantidade significativa de  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  (bassanita) e a 400°C percebe-se a presença de  $\text{CaSO}_4$  (anidrita). Quanto ao desempenho mecânico, o gesso FGD tratado a 200°C foi o que apresentou os melhores resultados de resistência à flexão e à

compressão aos 7 e 28 dias. Isso pode ter ocorrido porque a taxa de dissolução do hemi-hidrato é mais rápida do que do di-hidrato, o que favoreceu a geração de etringita mais rapidamente durante a hidratação (TORRÉNS-MARTÍN; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 2013; ZHANG *et al.*, 2018).

Manfroi (2014) também verificou a perda de massa do gesso FGD por meio de análises TGA/DSC. Com os resultados do estudo apresentados na Figura 5, observa-se um pico endotérmico a 90°C associado à perda de água de umidade. Em temperaturas entre 120 e 160°C da curva TGA observa-se uma perda de massa. A 150°C nota-se um pico endotérmico na curva de DSC que, conforme o autor, indica mudança da fase di-hidrato para hem-hidrato. Essa mudança de fase também foi observada no estudo de Guo e Shi (2008). O pico endotérmico a 165°C foi atribuído a anidrita III ou a anidrita solúvel enquanto os picos exotérmicos a 400°C e 850°C da curva de DSC refere-se à transição para anidrita II e anidrita I, respectivamente. Os autores analisaram também o gesso FGD seco a 50°C e observaram o mesmo perfil das curvas de DSC/TGA do gesso *in natura*, com exceção das temperaturas inferiores a 100°C, onde foi observado um pequeno pico endotérmico associado a perda de água por umidade.

Figura 5 – Calorimetria diferencial de exploratória e termogravimétrica (DSC/TGA) do gesso FGD *in natura*



Fonte: Adaptada de Manfroi (2014)

Com as análises térmicas é possível observar também a pureza do resíduo. Conforme Manfroi (2014), o gesso puro apresentou 98% de pureza. Esse resultado foi verificado por meio da perda de massa teórica do estudo. Além disso, a microestrutura observada no gesso FGD calcinado por uma hora a 150°C (aumento de 100 e 500 vezes) mostra que o mesmo é composto por cristais rômnicos regulares. Tanto o pH quanto à umidade desse resíduo variam conforme o

processo FGD utilizado. No processo mais utilizado (úmido), o pH do resíduo varia entre 5 e 6 (CORDOBA, 2015) ao passo que no processo do tipo seco e semi-seco apresentam pH variando entre 7 e 12 (ZAREMBA *et al.*, 2008).

Adicionalmente a isso, em comparação ao gesso natural, a área específica do gesso FGD é inferior a 1000 cm<sup>2</sup>/g ao passo que a do gesso natural encontra-se, na maioria das análises, em aproximadamente 2500 cm<sup>2</sup>/g (HENKELS; GAYNOR, 2010). A distribuição do tamanho de partícula do gesso FGD e do gesso natural também são diferentes. No estudo de Lei *et al.* (2017), o conteúdo de partículas do gesso natural foi mais alto na faixa de 1-10 µm e sua distribuição do diâmetro de partículas é relativamente médio enquanto o do gesso FGD não tratado apresentou partículas principalmente na faixa de 10-60 µm e sua distribuição de diâmetro concentrou-se em tamanhos de partículas relativamente grandes.

Quanto a periculosidade, embora o gesso FGD apresente metais pesados como o arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, prata, selênio e zinco, alguns estudos o têm considerado como não perigoso pois encontra-se dentro dos limites estipulados pelas normativas em diversos países. Leiva *et al.* (2010), observaram as concentrações de elementos lixiviados do gesso FGD e do gesso comercial e compararam com os limites máximos estabelecidos pela norma EM 12457 (CEN, 2002). No estudo, foi verificado a presença de metais pesados como mercúrio, selênio, chumbo, bário, cádmio, antimônio, cromo, arsênio, zinco e cobre em concentrações lixiviadas inferiores aos limites estabelecidos pela normativa europeia de deposição de resíduos em aterros (EULP - European Union Landfill Directive).

Hao *et al.* (2017), realizaram o ensaio de lixiviação por precipitação sintética (SPLP) em amostras de gesso FGD coletadas em 12 usinas de energia na China e determinaram a concentração de cádmio, chumbo, zinco, cobre, manganês e níquel. Os resultados do estudo mostraram que a concentração de metais pesados ficou abaixo do nível regulamentar da China.

No Brasil, a NBR 10004 (ABNT, 2004) define critérios para a classificação dos resíduos quanto a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana. Manfroi (2014), analisou o resíduo FGD obtido por processo semi-seco e verificou que as concentrações de cromo, arsênio e cádmio do gesso FGD a 150°C são superiores aos limites de lixiviação definidos pela normativa. Em relação a solubilização, os elementos arsênio, cobre, ferro, zinco, manganês e cádmio apresentaram concentrações superiores aos limites que são recomendados pela norma. Assim, o resíduo foi classificado como Classe I, Perigoso. Já Teixeira (2019), comparou os resultados alcançados no ensaio de solubilização e lixiviação do gesso FGD

proveniente do processo semi-seco com a normativa brasileira e verificou que as concentrações dos metais lixiviados avaliados foram inferiores aos estabelecidos pela normativa.

Em compostos cimentícios, a fase do  $C_3A$  é a mais reativa do cimento e a sua hidratação pode ter influência nas propriedades reológicas e no desempenho mecânico (GENG *et al.*, 2018). Sem fonte de sulfato de cálcio para controlar a sua hidratação, o  $C_3A$  induz uma pega rápida do cimento nos primeiros minutos. Comumente, o gesso é adicionado no processo de mistura como fonte de sulfato de cálcio para evitar esse comportamento. A incorporação desse material ocorre, frequentemente, em pequenas porcentagens (cerca de 3 a 5% por peso) para reduzir a velocidade da reação e controlar a pega do cimento (NAIK *et al.*, 2010). O ajuste da relação  $C_3A/CaSO_4 \cdot 2H_2O$  é realizado por meio de observações do retardo de pega por técnicas como calorimetria de fluxo de calor isotérmico e identificação de fases por difração de raios-x (SCRIVENET; QUENNOZ, 2013; RAMÍREZ *et al.*, 2020). Desse modo, observar a interação do sulfato de cálcio com o  $C_3A$  na cinética de hidratação mostra-se interessante para a produção de compostos cimentícios com adição de gesso FGD, pois permite realizar ajustes no período de indução. No entanto, ainda não há consenso sobre os mecanismos de retardo da hidratação do  $C_3A$  na presença de gesso.

Embora os mecanismos que envolvem a desaceleração da reação do  $C_3A$  com a incorporação do gesso ainda não estejam consolidados, há algumas hipóteses principais para descrever a inibição de  $C_3A$ . Pode-se citar a de adsorção de íons de sulfato e cálcio na superfície de  $C_3A$  como a mais aceita em estudos recentes. Outra hipótese também considerada refere-se à formação de etringita e/ou um AFm (monossulfato de cálcio) como uma barreira de difusão que bloqueia a superfície do  $C_3A$  de entrar em contato com a fase aquosa (GENG *et al.*, 2018).

No entanto, Geng *et al.* (2018) realizaram um estudo morfológico e espectroscópico 2D e 3D da fronteira de dissolução do  $C_3A$  na presença de gesso e evidenciaram que as fases AFm não formam uma barreira de difusão de controle de taxa inibidora da dissolução de  $C_3A$  nesse período porque a etringita, identificada em análises de microscopia de raios-x de transmissão de varredura e absorção de raios-x, é o único produto de hidratação após o período inicial de reação (150 min) antes da dissolução completa do gesso. Em suma, os autores não observaram nenhum traço de uma barreira de difusão o que contraria a segunda hipótese relatada. Todavia, nenhuma evidência direta dessas hipóteses foi relatada até o momento.

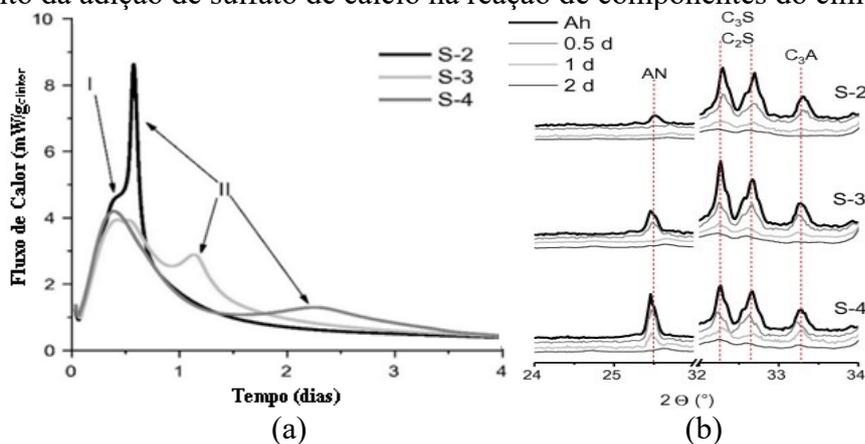
Novos *insights* fundamentados na adsorção de íons de cálcio e sulfato também foram relatados no estudo de Marchon *et al.* (2018). Os autores relataram que as teorias prevaletentes

sobre os mecanismos de adsorção enfatizam a importância da coexistência de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  na superfície do  $\text{C}_3\text{A}$ .

O estudo de Marchon *et al.* (2018) também discutiu os mecanismos cinéticos da hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  na presença de gesso em três períodos principais por meio de calorimetria ao relacionar a taxa de hidratação com o tempo: (1) reação inicial, (2) reação lenta (período de indução) e (3) hidratação renovada de  $\text{C}_3\text{A}$ . No período de reação inicial os autores evidenciaram que o  $\text{C}_3\text{A}$  reage com gesso para formar etringita e essa reação libera uma grande quantidade de calor. Já no período de indução subsequente, o calor liberado é baixo e a reação diminui de forma significativa e no terceiro período ocorre um pico acentuado característico resultante da reação entre  $\text{C}_3\text{A}$  e etringita que, conforme o estudo, acarreta na formação de monossulfoaluminato (MARCHON *et al.*, 2018).

Nessa perspectiva, o uso de gesso adicional pode favorecer os mecanismos de estabilização das argamassas ao considerar que com o aumento de sulfato de cálcio na cinética de hidratação a reação tende a ocorrer mais lentamente. Tal constatação foi evidenciada em diversos estudos, como o de Amankwah *et al.* (2018) que investigaram as interações do sulfato de cálcio em cimentos compostos (escória-calcário) com adição de 2%, 3% e 4% (S-2, S-3 e S-4, respectivamente) por meio de análise de calorimetria isotérmica (Figura 6a) para averiguar os efeitos das adições de sulfato de cálcio na hidratação. O estudo baseia-se no pressuposto que os níveis ideais de sulfato de cálcio são geralmente mais altos do que os utilizados apenas no clínquer de cimento (ZAJAC *et al.*, 2014). Aliado a isso, como forma de averiguar o tempo em que ocorreu a reação completa da fonte de sulfato de cálcio, os autores utilizaram difração de raios-X (DRX). Os resultados da análise de DRX são demonstrados na Figura 6ab.

Figura 6 – (a) Resultado obtidos por calorimetria isotérmica dos cimentos compostos (b) Efeito da adição de sulfato de cálcio na reação de componentes do cimento



Fonte: Adaptada de Adu-Amankwah *et al.* (2018)

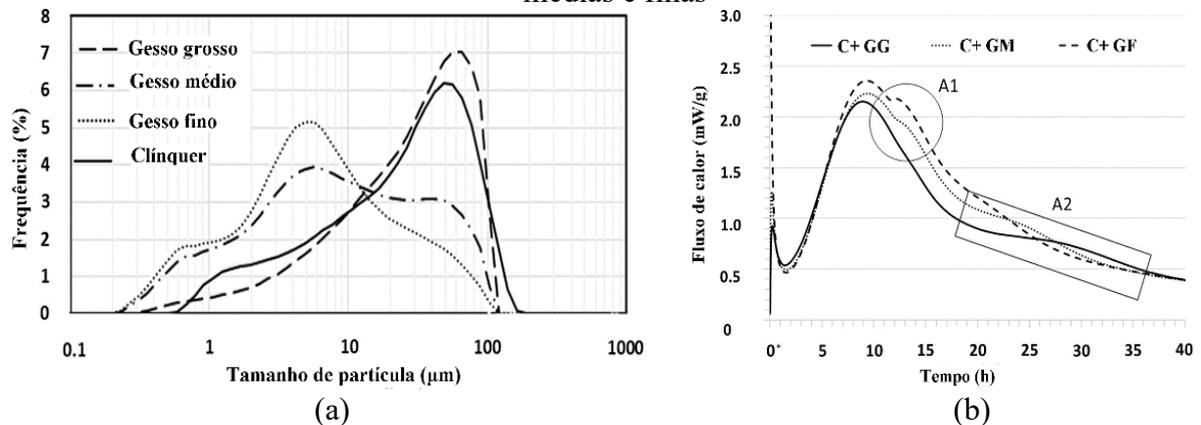
Com os resultados (Figura 6a), os autores constaram que um conteúdo crescente de sulfato de cálcio tem impacto pronunciado na cinética inicial de hidratação do  $C_3A$  e a reação ocorre mais lentamente. Ainda, evidenciaram que o tempo para o esgotamento do sulfato de cálcio é proporcional ao seu conteúdo e ao atingir o ponto de depleção do sulfato de cálcio, a hidratação do  $C_3A$  deixa de ser controlada e sua dissolução acelera. O pico associado à depleção de sulfato (II) foi retardado com o aumento do teor de sulfato, com o máximo após 12, 32 e 60 h (S-2, S-3 e S-4). Já os resultados de DRX dos mesmos autores revelaram que nas misturas S-2, S-3 e S-4 a reação completa da fonte de sulfato utilizada ocorreu nas primeiras 12 horas, em 1 e 2 dias, respectivamente. Demonstrando-se assim, que o pico de depleção do sulfato indicado por calorimetria não corresponde necessariamente à dissolução completa dos sulfatos de cálcio presentes na mistura.

Os ensaios de calorimetria isotérmica e DRX também foram correlacionados no estudo de Zunino e Scrivener (2019) para observar a quantidade máxima de etringita e AFm formadas após o pico do aluminato em pasta endurecida (24 horas). Como o sistema buscou analisar a influência do efeito de enchimento na necessidade de sulfato de cálcio de cimentos misturados, foi observado que o efeito fíler dos materiais cimentícios suplementares utilizados (metacaulim e calcário) acelera a reação da alita e, em decorrência disso, o esgotamento do gesso é alcançado mais cedo durante o processo de hidratação. Nesse sentido, as argamassas de cimento Portland dependem da dosagem correta de gesso (sulfato de cálcio hidratado) para controlar a hidratação do  $C_3A$  e assim preservar a trabalhabilidade da pasta de cimento nas primeiras horas (GENG *et al.*, 2018).

A adição de sulfato não influencia apenas o tempo de pega de forma significativa. Adu-Amankwah *et al.* (2018) observou forte impacto na evolução da resistência à compressão de compostos cimentícios. Os autores constataram, por meio de modelagem termodinâmica com base no grau de reação do clínquer do cimento e da escória em função do tempo, que com o aumento do conteúdo de sulfato o volume de hidratos também aumenta e, dessa forma, a resistência apresenta valores mais altos devido ao aumento da formação de etringita. Em contrapartida, níveis de sulfato em excesso impactam negativamente o desempenho da fase CSH conforme análises das porosidades totais calculadas pelo método de análise termogravimétrica e por modelagem termodinâmica que fornecem dados em termos de teor de água e, dessa forma, da densidade aparente. Tais consequências referem-se à redução do teor de água no CSH e da resistência à compressão (COPELAND *et al.*, 1967; ADU-AMANKWAH *et al.*, 2018).

A adição de materiais cimentícios suplementares ao sistema pode ter impacto significativo no balanço de sulfato dos cimentos devido ao seu efeito de preenchimento (ZUNINO; SCRIVENER, 2019). Além disso, as características físicas do gesso (fino, médio e grosso) influenciam o grau de dissolução e alteram a formação dos produtos de hidratação nas primeiras horas. O estudo de Barbosa, Ramalho e Portella (2018) verificou que quanto mais fino o gesso, maior quantidade de calor é liberado e mais rapidamente é consumido. As distribuições granulométricas das partículas analisadas no estudo podem ser visualizadas na Figura 7a ao passo que o resultado do teste de calorimetria pode ser verificado na Figura 7b.

Figura 7 – (a) Distribuição granulométrica (b) Ensaio de calorimetria em partículas grossas, médias e finas



Fonte: Adaptada de Barbosa, Ramalho e Portella (2018)

Com os gráficos do estudo (Figura 7) observa-se a influência do tamanho de partículas do gesso na cinética de hidratação devido ao tempo de dissolução. O comportamento reológico foi alterado conforme a finura do gesso e diferentes viscosidades aparentes foram observadas no estudo. As amostras com gesso médio e fino aumentaram a viscosidade em 1,97 e 1,8 vezes, respectivamente, ao passo que amostras com gesso grosso apresentaram resultados de viscosidade 4,7 vezes maior do que a medida inicial (BARBOSA, RAMALHO; PORTELLA, 2018). Ainda conforme o estudo, quanto maior a área superficial do gesso maior é a estabilidade do sistema granular ao longo do tempo e o processo de dissolução do gesso é mais rápido. Dessa forma, o tempo de formação dos produtos de hidratação nas primeiras horas pode variar.

Lei *et al.*, (2017) analisaram as propriedades de materiais de construção de alta resistência à base de gesso FGD não tratado. Conforme o estudo, o subproduto FGD não tratado, se difere do gesso natural por apresentar maior teor de umidade, menor granulometria e distribuição de partículas diferentes. O gesso FGD apresentou partículas principalmente na

faixa 10-60  $\mu\text{m}$  e o tamanho de partícula do gesso natural foi mais alto na faixa de 1-10  $\mu\text{m}$ . De modo geral, partículas com tamanho menor trazem mais benefícios para as propriedades do material endurecido (LEI *et al.*, 2017). Dessa forma, os autores concluíram que em relação a distribuição granulométrica o gesso natural é melhor.

Ao observar a composição química do gesso FGD não tratado verifica-se que a concentração de  $\text{CaO}$  e  $\text{SO}_3$  é maior que no gesso natural. Dessa forma, com relação a fração de massa de sulfato de cálcio di-hidrato, o gesso FGD não tratado é melhor. Ainda conforme Lei *et al.* (2017), a resistência à tração e a resistência à compressão das pastas com o gesso FGD aos 28 dias de cura atingiram os requisitos de resistência do cimento Portland padrão na China. O aumento de resistência foi atribuído pelos autores a formação de uma microestrutura mais densa, a picos de difração da etringita mais fortes e o aumento do grau de hidratação. De modo geral, a quantidade de etringita adequada preenche os poros de materiais cimentícios e, em consequência, aumenta a resistência assim como apresenta maior grau de hidratação (LEI *et al.*, 2017).

Teixeira (2019), utilizou o gesso FGD hemihidrato como adição na produção de concretos em teores de 5%, 10% e 15% sobre a massa de cimento. As relações água/aglomerante foram 0,45 e 0,6. Como resultado, os autores observaram que a adição de 5% do gesso FGD promoveu um aumento na resistência à compressão, garantiu o valor de resistência concreto sem o gesso FGD e diminuiu a absorção de água por capilaridade e imersão. Os demais percentuais promoveram resistências à compressão superiores ou iguais ao concreto sem adição. Quanto a resistência à tração, os teores superiores a 5% promoveram redução nessa propriedade. Todavia, conforme a autora, as adições minerais não apresentam grandes contribuições para esta propriedade. A respeito do teor de vazios, verificou-se resultados positivos com o uso do gesso FGD uma vez que a incorporação ótima de 5 % possibilitou a redução do número de vazios e da absorção por capilaridade em 14 e 36%, respectivamente, quando comparado a mistura sem o resíduo.

Por meio da análise da microestrutura por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS acoplado em amostras extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial no estudo de Teixeira (2019) averiguou-se que a estrutura dos concretos com incorporações de 5% e 10% foi mais densa e coesa que as demais misturas avaliadas, o que indicou uma melhora na zona de transição resultante do aumento de finos contidos no gesso FGD.

Teixeira (2019) evidenciou que a adição do resíduo FGD ocasionou maior produção de CSH nas micrografias, indicando que este resíduo pode apresentar efeito de enchimento (filer), preenchendo os poros e proporcionando maior densificação da matriz ao atuar produzindo pontos de nucleação para os desenvolvimentos dos compostos e a formação de CSH na hidratação. Ainda, foi observada a formação de etringita. O efeito de enchimento do gesso FGD também foi identificado na pesquisa de Khatib, Wright e Mangat (2011) e foi atribuído à presença de sulfito de cálcio hemi-hidrato ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) oriundo de processos semi-secos, o qual é um mineral geralmente inerte.

O efeito da incorporação do gesso FGD em concretos simulado em 365 dias foi averiguado por meio do ensaio de resistência à compressão por Khatib, Wright e Mangat (2016). Dentre as porcentagens de substituição do cimento por gesso FGD seco e semi-seco analisadas na faixa de 10% a 90%, os autores observaram que o teor de 10% do resíduo obteve resistência superior ao concreto referência em idades avançadas. Adicionalmente a isso, a incorporação além de 20% reduz sistematicamente o desempenho mecânico.

### 3. SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o que foi evidenciado na revisão de literatura, a incorporação do resíduo de dessulfurização de gases (FGD) em diferentes compostos cimentícios resultou em maior tempo de pega e aumento da resistência à compressão (ZHANG; PAN; WU, 2016; ADU-AMANKWAH *et al.*, 2018; TEIXEIRA, 2019; KORALEGEDARA *et al.*, 2019). Este resíduo é denominado como gesso FGD por apresentar composição semelhante ao gesso natural (WU *et al.*, 2019).

Conforme Zaga *et al.* (2018), os níveis ideais de sulfato de cálcio, principal componente do gesso FGD, geralmente são mais altos do que os utilizados apenas no clínquer de cimento Portland. No entanto, alguns autores observaram que níveis de sulfato em excesso impactam negativamente o desempenho da fase ligante (silicato de cálcio hidratado) e podem reduzir a resistência à compressão (COPELAND *et al.*, 1967; ADU-AMANKWAH *et al.*, 2018). Dessa forma, teores de até 15% de gesso FGD sobre a massa de cimento mostraram resultados positivos para a utilização em compostos cimentícios (KHATIB, WRIGHT, MANGAT, 2016; TEIXEIRA, 2019).

A fonte de sulfato de cálcio (di-hidrato, hemi-hidrato e/ou anidrita) pode apresentar comportamentos distintos em relação ao tempo de pega e ao desenvolvimento de resistência mecânica. O uso de hemi-hidrato proporciona resistência inicial maior enquanto a anidrita apresenta acréscimo de resistência aos 28 dias. Quanto ao tempo de pega, o di-hidrato exibe um aumento em relação as demais fases de sulfato de cálcio (TZOUVALAS; DERMATAS; TSIMAS, 2004; PAPAGEORGIU; TZOUVALAS; TISIMAS, 2005; MARDANI-AGHABGLOU *et al.*, 2016). No entanto, todas as fontes de sulfato de cálcio são consideradas retardadores de pega eficientes.

Em argamassas estabilizadas são utilizados aditivos estabilizadores de hidratação e aditivos incorporadores de ar para manter a trabalhabilidade ao longo do tempo e aumentar o período de manuseio e aplicação (ANTONIAZZI *et al.*, 2020). Esses aditivos constituem uma parcela importante dos mecanismos envolvidos na estabilização das argamassas, sendo os aditivos químicos estabilizadores à base de moléculas orgânicas os mais utilizados comercialmente por apresentarem como principal ação a desaceleração da cinética de hidratação e os aditivos incorporadores de ar com caráter aniônico por oferecerem forte adsorção na superfície do cimento e auxiliarem na manutenção da trabalhabilidade ao longo do tempo de estabilização (ZAJAC *et al.*, 2016).

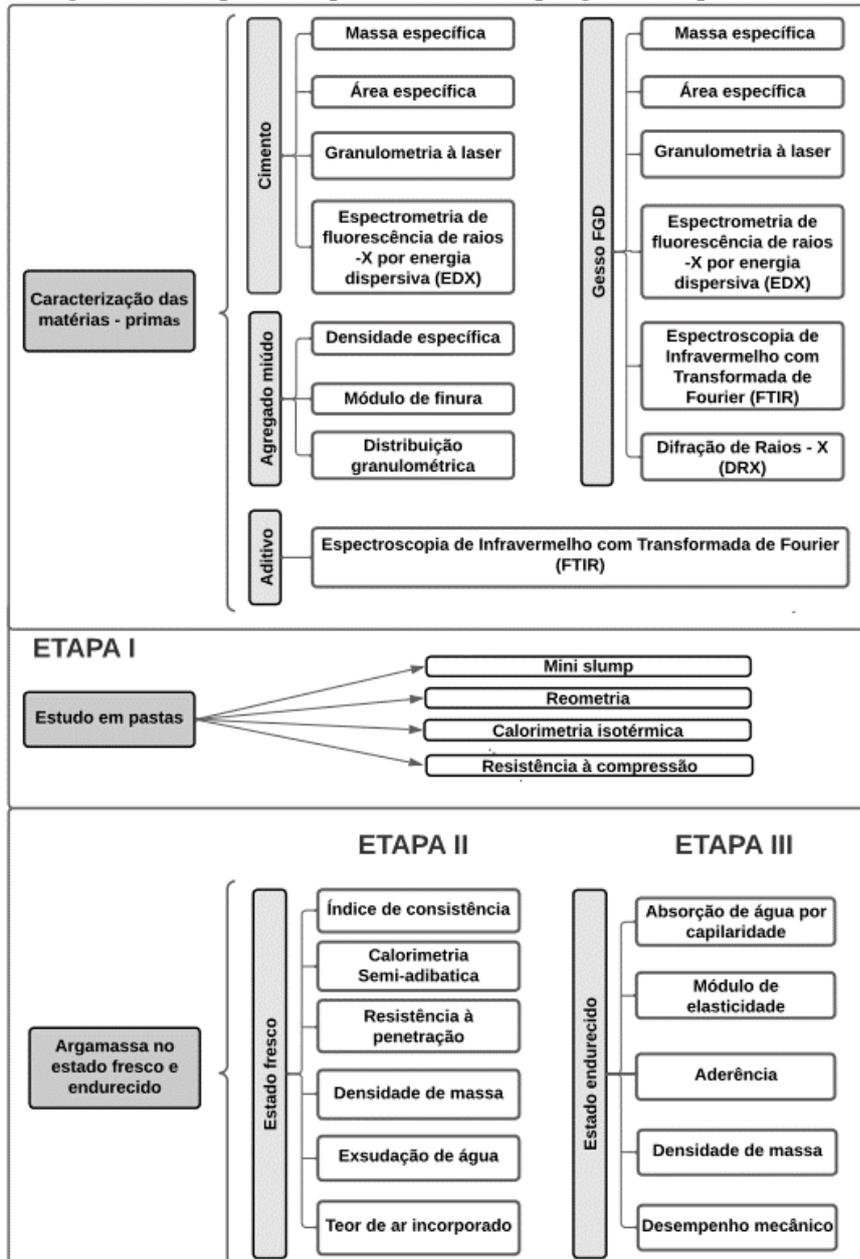
Para garantir a compatibilidade e a estabilidade do sistema no estado fresco, os mecanismos de desestabilização de hidratação devem ser reduzidos. O aumento da finura das partículas de cimento Portland, por exemplo, pode impactar na quantidade de água disponível, responsável pela estabilização e reduzir o ar incorporado na mistura pois mais surfactantes são adsorvidos nos grãos de cimento (SHAH; YUAN; ZUO, 2020). Além disso, a coalescência de bolhas de ar também é um fator de desestabilização que favorece a exsudação. Dessa forma, como discutido no decorrer do estudo, selecionar os aditivos, materiais e procedimentos de misturas adequados pode contribuir para o processo de estabilização.

Nesse contexto, para diminuir a coalescência de bolhas de ar o uso de aditivos incorporadores de ar é recomendado em dosagens baixas devido à sua alta capacidade espumante (GUINDANI, 2018). Teores de ar abaixo de 20% podem melhorar a aderência e trazer ganhos na trabalhabilidade das argamassas (CASAREK, 2010). Quanto aos agregados miúdos, o módulo de finura entre 1,0 e 2,0 pode ser favorável ao processo de estabilização (PAGNUSSAT *et al.*, 2012; SCHACKOW *et al.*, 2019). Adicionalmente a isso, a incorporação de resíduos com menor área de superfície podem auxiliar na ação retardadora dos aditivos estabilizadores, aumentando o retardo (ATAIE *et al.*, 2015). Nesse contexto, identifica-se que a incorporação de gesso FGD como fonte de sulfato de cálcio pode ser explorada para auxiliar no aumento do tempo de pega e no incremento de resistência à compressão em argamassa estabilizada.

#### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MÉTODOS E MATERIAIS

Esta seção contém a descrição dos métodos e materiais que foram utilizados para o desenvolvimento do programa experimental deste estudo, o qual foi estruturado por três etapas principais, conforme evidenciado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema representativo do programa experimental



Fonte: Autora (2023)

Em um primeiro momento realizou-se a caracterização dos materiais que foram utilizados no estudo com o objetivo de verificar suas características físicas-químicas e mineralógicas e determinar as temperaturas de calcinação do gesso FGD necessárias para obter as três composições químicas do resíduo analisadas: di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita.

Na primeira etapa, foi investigado o efeito da incorporação do gesso FGD na cinética de hidratação e nas características reológicas (viscosidade e tensão de escoamento) em pastas e a sua compatibilidade com o aditivo estabilizador de hidratação selecionado. Nesta etapa, as variáveis controláveis foram os teores de FGD (0%, 2,5%, 5%, 10% e 15%) e de aditivo estabilizador de hidratação (0,5, 1,0 e 1,5%) e as variáveis de respostas esperadas foram a fluidez, os tempos de pega, calorimetria e reômetria.

A segunda e a terceira etapa compreendem a avaliação das argamassas estabilizadas no estado fresco e endurecido, respectivamente. Com essa avaliação buscou-se compreender a influência da adição do gesso FGD e dos aditivos nas propriedades mais relevantes ao estudo, como a manutenção da trabalhabilidade ao longo do tempo, os tempos de pega e o desempenho mecânico (avaliado aos 28 dias após a moldagem). As variáveis controláveis dessa etapa foram os tempos de utilização propostos de 24, 48 e 72h, os teores de gesso FGD de 2,5% e 15% e a idade de cura de 28 dias após a moldagem. Como variáveis de respostas pode-se citar: espalhamento, densidade de massa, teor de ar incorporado, tempos de pega, exsudação de água, absorção capilar, aderência potencial à tração, resistências mecânicas e módulo de elasticidade.

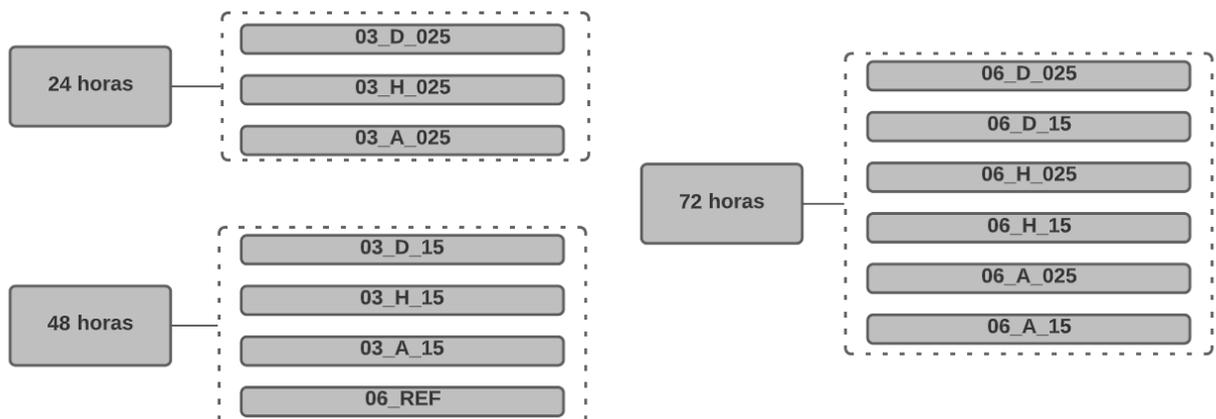
O estudo foi desenvolvido no laboratório ValoRes – Valorização de Resíduos e Materiais Sustentáveis do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC, em Florianópolis/SC. A Tabela 7 apresenta o planejamento com os ensaios realizados na segunda e terceira etapa do programa experimental e o número de amostras ensaiadas. Ressalta-se que os tempos de armazenamento dos ensaios realizados na Etapa 03 foram definidos de acordo com os resultados dos ensaios de calorimetria semi-adiabática e resistência à penetração (Figura 9). A argamassa 03\_REF foi armazenada por 21 horas após a sua produção até a realização das moldagens, por ter apresentado tempo de início de pega inferior a 24 horas.

Tabela 7 – Resumo do planejamento experimental

Etapa	Ensaio	Característica das misturas	Tempo de armazenamento	Nº de amostras
Etapa 1 – Estudo em Pasta	Mini-slump (Cone de Kantro)	AEH: 0,5, 1,0 e 1,5% FGD: 0%, 2,5%, 5%, 10% e 15% 3 composições químicas do FGD + referência	24,48 e 72 horas	39 traços
	Calorimetria isotérmica	AEH: 0,5 % FGD: 15% 3 composições químicas do FGD + referência	Sem armazenamento	8 traços
	Reometria			8 traços
Etapa 2 – Estudo em argamassa no estado fresco	Índice de consistência	Estabilização: 48 e 72h; AEH: 0,3 e 0,6% AIA: 0,2% 3 composições químicas do FGD + referência	24, 48 e 72 horas	14 traços
	Teor de ar incorporado			14 traços
	Densidade de massa			14 traços
	Calorimetria semi- adiabática		Sem armazenamento	14 traços
	Resistência à penetração			14 traços
	Exsudação de água			14 traços
Etapa 3 – Estudo em argamassa no estado endurecido	Absorção capilar	AEH: 0,3 e 0,6% AIA: 0,2% 3 composições químicas do FGD + referência	Os tempos de armazenamento das argamassas estabilizadas estão apresentados na Figura 9	3 CP's x 14 traços
	Aderência Potencial à tração			10 CP's x 14 traços
	Resistência à compressão			3 CP's x 14 traços
	Resistência à tração na flexão			3 CP's x 14 traços
	Módulo de elasticidade			3 CP's x 14 traços

Fonte: Autora (2023)

Figura 9 – Tempo de armazenamento em recipiente hermético antes da realização dos ensaios da etapa 3 do estudo



Fonte: Autora (2023)

## 4.1. MÉTODOS

### 4.1.1. Caracterização das matérias – primas utilizadas no estudo

A Tabela 8 apresenta um resumo dos ensaios que foram realizados durante a caracterização das matérias-primas utilizadas no estudo. Os ensaios que possuem normatização foram executados de acordo com as especificações das normas e os demais ensaios com a utilização de equipamentos específicos descritos abaixo. As matérias-primas foram preparadas previamente e os agregados secos em estufa à 105°C por 24h. Após, os materiais foram acondicionados no laboratório com a finalidade de ocorrer o resfriamento da temperatura dos mesmos.

Tabela 8 – Ensaios de caracterização das matérias-primas utilizadas

Ensaio	Procedimento ou Equipamento	Materiais ensaiados
Massa específica	NBR 16605:2017/ Frasco de Le Chatelier	Cimento Portland e gesso FGD
Área específica	NBR 16372:2015/ Permeabilímetro de Blaine	Cimento Portland e gesso FGD
Granulometria à laser	Microtrac s3500, sem meio dispersante.	Cimento Portland e gesso FGD
Espectrometria de fluorescência de raios – X por energia dispersiva (EDX)	EDX da marca Shimadzu, modelo 700 HS	Cimento Portland e gesso FGD
Difração de raios – x (DRX)	Difratômetro de raios – X, modelo X- Pert	Cimento Portland Gesso FGD
Distribuição granulométrica das partículas	NBR 17054: 2022 / Peneiras da série normal.	Agregado miúdo
Densidade específica	NBR 16916:2021 / Molde tronco – cônico.	Agregado miúdo
Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	Agilent Technologies – CARY 660	Aditivo

Fonte: Autora (2023)

### 4.1.2. Etapa 1 – Estudo em pasta

O estudo em pastas teve como objetivo avaliar a interação do aditivo estabilizador de pega com as três composições químicas do gesso FGD e as consequências destas interações nas características do estado fresco e endurecido das pastas. Como discutido no decorrer desse estudo, tanto os aditivos como a adição do gesso FGD podem alterar a cinética de hidratação do cimento Portland, as propriedades reológicas e o desempenho mecânico dos compostos cimentícios.

Nessa perspectiva, ao considerar que a análise das interações entre o gesso FGD, o aditivo estabilizador de hidratação e o cimento Portland são importantes e constituem as fases mais reativas da mistura relacionadas a cinética de hidratação, foram realizados estudos em pastas referentes a essa fração. Além disso, como forma de obter uma mistura mais representativa dos materiais analisados, optou-se por utilizar a relação a/c de 0,45, empregada também em pastas de estudos semelhantes que utilizam resíduos e aditivos (ATAIE *et al.*, 2015; GUINDANI, 2018). Essa relação a/c difere-se da proposta para argamassas estabilizada pois o agregado miúdo não foi utilizado nos estudos em pastas. Sendo assim, menor quantidade de água é necessária ao considerar o grande volume de grãos do agregado nas argamassas.

Inicialmente foram realizadas misturas para verificar o comportamento das pastas quanto a fluidez por meio *de mini slump*. Desse modo, para avaliar a influência do gesso FGD foram confeccionadas pastas com a mesma relação água/cimento (0,45). O teor de adição do FGD foi de 2,5%, 5,0%, 10% e 15% em relação a massa de cimento Portland e a quantidade de aditivo estabilizador de hidratação utilizada foi de 0,5%, 1,0% e 1,5% em relação à massa de cimento Portland. As proporções finais estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Proporções de misturas para produção das pastas de cimento Portland contendo FGD

Mistura	Cimento (g)	FGD (g)	Água (g)	a/c (g/g)	AEH (g)
REF	500	-	225	0,45	-
2,5%FGD0,5%AEH	500	12,5	225	0,45	2,5
2,5%FGD1,0%AEH	500	12,5	225	0,45	5
2,5%FGD1,5%AEH	500	12,5	225	0,45	7,5
5%FGD0,5%AEH	500	25	225	0,45	2,5
5%FGD1,0%AEH	500	25	225	0,45	5
5%FGD1,5%AEH	500	25	225	0,45	7,5
10%FGD0,5%AEH	500	50	225	0,45	2,5
10%FGD1,0%AEH	500	50	225	0,45	5
10%FGD1,5%AEH	500	50	225	0,45	7,5
15%FGD0,5%AEH	500	75	225	0,45	2,5
15%FGD1,0%AEH	500	75	225	0,45	5
15%FGD1,5%AEH	500	75	225	0,45	7,5

\*Essas dosagens foram realizadas com o FGD tratado a 50°C, 150°C e 400°C.

Fonte: Autora (2023)

Com a finalidade de verificar o comportamento da incorporação do FGD ao longo do tempo e explorar a temperatura ótima de tratamento térmico foram produzidas pastas sem o uso de aditivos e com resíduo FGD tratado termicamente a 50°C, 150°C e 650°C. A relação água/cimento foi de 0,45.

Após os resultados iniciais obtidos por meio da avaliação da fluidez (*mini Slump*) das pastas de cimento, optou-se por utilizar o maior teor de adição de FGD (15%) e o teor intermediário do aditivo estabilizador de hidratação (0,5%). O teor de adição escolhido foi de 15% tendo em vista que a incorporação de um maior teor de resíduo apresentou uma influência mais significativa no processo de hidratação enquanto o teor de 0,5% de aditivo estabilizador proporcionou a menor perda de fluidez ao longo do tempo em comparação a mistura sem resíduo. Ademais, o intuito da avaliação em pasta foi observar o comportamento do resíduo e sua compatibilidade com o aditivo utilizado para verificar a possibilidade de emprego do FGD e do aditivo utilizado em argamassas estabilizadas. Nessa etapa, as pastas foram avaliadas quanto a reologia, calorimetria e desempenho mecânico. A Tabela 10 apresenta as proporções de mistura selecionadas nessa etapa.

Tabela 10 – Proporções de misturas para produção das pastas selecionadas de cimento Portland contendo FGD

Mistura	Cimento (g)	FGD (g)	Água (g)	a/c (g/g)	AEH (g)
REF	400	-	180	-	-
REF0,5%A	400	-	180		2
15%FGD50°C	400	60	180	0,45	-
15%FGD150°C	400	60	180	0,45	-
15%FGD650°C	400	60	180	0,45	-
15%FGD50°C0,5%A	400	60	180	0,45	2
15%FGD150°C0,5%A	400	60	180	0,45	2
15%FGD650°C0,5%A	400	60	180	0,45	2

Fonte: Autora (2023)

Os estudos reológicos e de calorimetria isotérmica foram iniciados 10 minutos após o contato da água com os materiais secos. Além disso, realizou-se misturas das pastas com o auxílio do misturador antes da realização de cada medição por um tempo padronizado de 1 minuto. Essas amostras foram armazenadas em recipientes fechados para evitar o contato com o ambiente e a evaporação de água ( $24^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.1.2.1. Fluidez

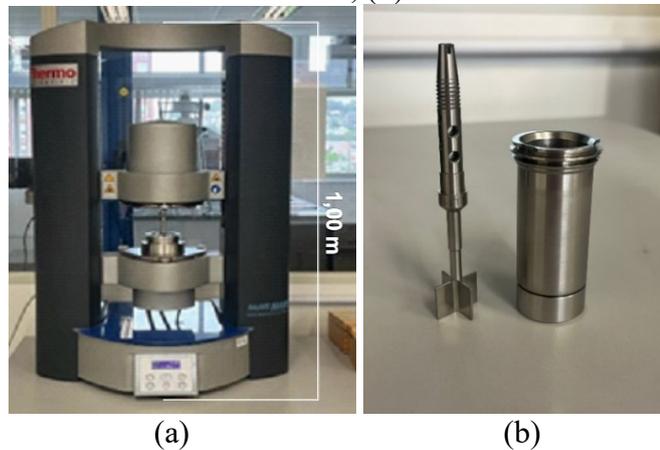
O *mini slump* foi utilizado para avaliar de forma indireta a tensão de escoamento das pastas de cimento ensaiadas. O procedimento consistiu em utilizar um pequeno tronco de cone padrão preenchido com a pasta a ser ensaiada. Após o preenchimento, o cone foi removido e a pasta fluiu sobre uma placa de vidro. Foram determinadas duas medidas ortogonais do diâmetro

após 1 minuto da retirada do cone. O resultado do ensaio correspondeu à média aritmética dos dois diâmetros medidos. Além de verificar a tensão de escoamento de forma indireta, o estudo avaliou a variação do espalhamento ao longo do tempo (3, 24, 48 e 72 horas) para observar a ocorrência de perda de fluidez. As pastas foram armazenadas em recipientes herméticos e homogeneizadas por 1 minuto em misturador de alta frequência antes de cada ensaio.

#### 4.1.2.2. Comportamento reológico

O comportamento reológico das pastas de cimento com FGD e aditivo estabilizador de hidratação produzidas nessa etapa também foi avaliado por meio de reometria rotacional, em um reômetro da marca Thermo Scientific, modelo Haake MARS III, localizado no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) - UFSC com objetivo de determinar as variações do valor da viscosidade plástica e da tensão de escoamento ao longo do tempo. A geometria cilindro concêntrico aletado (Figura 10) foi utilizada como forma de evitar o escorregamento das partículas (RAHMAN; BALUCH; MALIK, 2014; SCHANKOSKI *et al*, 2020). Assim, com o intuito de verificar a influência do gesso FGD e também do aditivo estabilizador de hidratação no processo de estabilização e a sua contribuição à reologia das amostras, as medições foram realizadas 10 minutos após o primeiro contato da água com as partículas de cimento e ao longo do período de estabilização nos tempos de 24, 48 e 72 horas. A quantidade de amostra de pasta utilizada em cada análise foi de 25 ml inseridas no recipiente de geometria cilindro concêntrico aletado e o ensaio ocorreu a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  utilizando um gap de 11 mm.

Figura 10 – (a) Reômetro HAAKE MARS III; (b) Geometria cilindro concêntrico aletado



Fonte: Autora (2023)

O protocolo do ensaio será descrito a seguir. Inicialmente, aplicou-se um pré-cisalhamento com duração de 60s a uma taxa de  $100\text{s}^{-1}$ . Após, iniciou-se o ciclo, composto de duas rampas, uma primeira curva de aceleração (ascendente) com taxa de cisalhamento de  $0,1\text{s}^{-1}$  a  $100\text{s}^{-1}$  e em seguida a curva de desaceleração (descendente) partindo do mesmo ponto  $100\text{s}^{-1}$  a  $0,1\text{s}^{-1}$ .

Posteriormente, a partir da confecção de gráficos das curvas de fluxo é possível determinar os parâmetros reológicos das pastas. Para tanto, os dados da porção decrescente das curvas e fluxo obtidos foram ajustados por três modelos principais que descrevem as curvas de fluxo: o modelo de Herschel-Bulkley (HB), Bingham e Casson (lin). O modelo que melhor descreveu os resultados foi o de HB, os demais modelos apresentaram valores negativos. Esse comportamento também foi descrito no estudo de Larrard, Ferraris, Sedran (1998), o qual apontou que a relação torque e velocidade de rotação não é exatamente linear e encontrou um valor de tensão de escoamento negativo ao utilizar o modelo de Bingham. Dessa forma, o modelo de Herschel–Bulkley (HB) parece fornecer benefícios na descrição do comportamento do fluxo devido a possibilidade de descrever um comportamento não-linear das pastas (JIAO *et al.*, 2017). Ainda, esse modelo pode descrever de forma mais precisa a tensão de escoamento (GUO; YANG; XIONG, 2020). Por esse motivo, o modelo de HB foi utilizado no estudo. A Equação 1 refere-se ao modelo HB.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^b \quad (1)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento (Pa),  $\gamma$  é taxa de cisalhamento ( $\text{s}^{-1}$ ),  $k$  é o índice de consistência e  $b$  o índice de fluxo.

#### 4.1.2.3. Cinética de hidratação do Cimento Portland

O ensaio calorimetria isotérmica foi realizado para avaliar a influência do teor de adição na cinética de hidratação do cimento Portland bem como o efeito do aditivo estabilizador de hidratação. Para isso foi utilizado um calorímetro modelo TAM Air (Ta Instruments), localizado no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) – UFSC, o qual forneceu informações sobre o fluxo de calor que representa os vários estágios de hidratação do cimento.

#### 4.1.2.4. Desempenho mecânico

A resistência à compressão axial das pastas foi avaliada na idade de 28 dias após a moldagem. Dessa forma, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos (diâmetro de 19 mm e altura de 26 mm) para cada mistura avaliada. As amostras foram retificadas em cortadeira metalográfica e mantidas em cura submersa em água até a data do ensaio. Posteriormente, foram ensaiadas seguindo o procedimento estabelecido pela NBR 5739 (ABNT,2018) em uma prensa universal Instron, modelo 5569. Por fim, foram aplicados fatores de correção definidos pela mesma normativa aos valores de resistência à compressão em função da relação da altura e do diâmetro dos corpos de prova.

#### 4.1.3. Etapa 2 e 3 – Argamassas estabilizadas no estado fresco e endurecido

Nessa etapa são descritas as propriedades avaliadas que foram executados no estado fresco e endurecido. Também, é apresentada a dosagem utilizada dos materiais para a realização do estudo. Os ensaios foram realizados no LMMC e no Laboratório ValoRes, localizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, em Florianópolis/SC.

Como forma de aderir o estudo a realidade do mercado de argamassas estabilizadas e a pesquisas anteriores sobre argamassas estabilizadas na região em estudo, o agregado miúdo selecionado seguiu a proporção de 6:1 (areia: cimento). A relação a/c das argamassas foi definida adicionando pequenas quantidades de água a partir da relação a/c pré-definida de 0,9 com a finalidade de atingir um índice de espalhamento que se assemelha à realidade das construções. Desse modo, o espalhamento na mesa de consistência pré-definido foi de  $270 \pm 10$ mm.

Os aditivos utilizados no estudo para a produção das argamassas estabilizadas foram dosados em massa de cimento conforme informações do fabricante. Após a definição do consumo de água da mistura, os aditivos utilizados foram ajustados da seguinte forma:

- Aditivo incorporador de ar: foi utilizado um valor inicial conforme informação do fabricante e acrescentou-se doses de 0,1%, seguidas de medições do teor de ar incorporado até o valor de  $18 \pm 2\%$  (GUINDANI, 2018);
- Aditivo estabilizador de hidratação: após a definição do teor de aditivo incorporador de ar foram realizadas misturas para determinar duas dosagens com capacidade de

estabilização nos tempos de 48 e 72 horas para cada aditivo. Sendo assim, o aditivo estabilizador de hidratação foi dosado em teor inicial conforme recomendações do fabricante. Por fim, esta argamassa foi monitorada durante o tempo de estabilização para determinar a capacidade de estabilização da dosagem.

Os teores de adição incorporados nos traços de argamassa estabilizada foram selecionados com base na revisão bibliográfica de estudos que utilizaram o gesso FGD (KHATIB, WRIGHT; MANGAT, 2016, TEIXEIRA, 2019) e no estudo realizado em pastas. Desse modo, o gesso FGD foi utilizado como adição nos teores de 2,5% e 15% sobre a massa de cimento. O procedimento para as misturas com adição foi o mesmo utilizado para a dosagem inicial (sem gesso FGD) com a finalidade de ajustar a mistura e observar alterações ocasionadas pelo efeito do gesso FGD sobre a ação do aditivo incorporador de ar, do estabilizador de hidratação e no índice de consistência. Os teores de aditivos definidos nessa etapa foram utilizados em todas as etapas do estudo. Ressalta-se que para cada medição realizada no estado fresco, as argamassas foram misturadas novamente durante 1 minuto em argamassadeira (rotação alta) como forma de padronizar as medições e homogeneizar a mistura.

O tempo de armazenamento antes da moldagem variou conforme os resultados dos tempos de pega obtidos nos ensaios de resistência à penetração e calorimetria semi-adiabática. Dessa forma, foram produzidas argamassas estabilizadas com tempos de 24, 48 e 72 horas de acordo com a dosagem do aditivo estabilizador de hidratação e do teor de FGD. Após a moldagem os corpos de prova foram avaliados aos 28 dias. Esse processo foi realizado com o intuito de avaliar as argamassas estabilizadas após 28 dias do início das reações de hidratação do cimento Portland.

Para obter as variáveis de resposta (trabalhabilidade, exsudação, teor de ar incorporado, absorção de água por capilaridade, aderência potencial à tração e desempenho mecânico) que foram propostas nesta etapa, os seguintes fatores controláveis foram definidos:

- Teor de adição de FGD: 0%, 2,5% e 15%;
- Tempo de estabilização: 24, 48 e 72 horas;
- Idade de cura: 28 dias após a moldagem (a moldagem foi realizada 4 horas antes do início de tempo de pega de cada amostra conforme estipulado nos ensaios de resistência à penetração e calorimetria).

A Tabela 11 apresenta as composições das argamassas estabilizadas produzidas nessa etapa.

Tabela 11 – Composições das argamassas estabilizadas

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Traço</b>
03_REF	Referência sem FGD e com 0,3% de AEH	1:6:1,2:0,2:0,3 (c:a:a/c:AIA/AEH)
03_D_025	2,5% de FGD Di-hidrato 0,3% de AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
03_D_15	15% FGD Di-hidrato 0,3% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
03_H_025	2,5% FGD hemi-hidrato 0,3% AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
03_H_15	15% FGD hemi-hidrato 0,3% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
03_A_025	2,5% FGD anidrita 0,3% AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
03_A_15	15% FGD anidrita 0,3% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,3 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_REF	Referência sem FGD e com 0,6% de AEH	1:6:1,2:0,2:0,6 (c:a:a/c:AIA/AEH)
06_D_025	2,5% FGD Di-hidrato 0,6 % AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_D_15	15% FGD Di-hidrato 0,6% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_H_025	2,5% FGD hemi-hidrato 0,6% AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_H_15	15% FGD hemi-hidrato 0,6% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_A_025	2,5% FGD anidrita 0,6% AEH	1:2,5:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)
06_A_15	15% FGD anidrita 0,6% AEH	1:15:6:1,2:0,2:0,6 (c:FGD:a:a/c:AIA/AEH)

\*c: Cimento Portland; a: Areia; a/c: relação água/cimento

Fonte: Autora (2023)

A produção das argamassas foi realizada em um misturador mecânico padrão de movimento planetário de duas velocidades (baixa - 62 rpm / alta – 125 rpm). O procedimento de mistura foi o mesmo para todas as argamassas produzidas. Este procedimento foi desenvolvido para este estudo e teve como base pesquisas anteriores de argamassas estabilizadas. O procedimento seguiu as etapas:

- a) Misturar os materiais secos por 30 segundos em velocidade baixa;
- b) Adicionar 90% da água e misturar por 30s em velocidade baixa;
- c) Interromper a mistura para limpar as partes aderidas ao recipiente e a pá de mistura (1 minuto);
- d) Adicionar 5% do restante da água junto com o aditivo incorporador de ar misturados a mesma (em repouso);
- e) Misturar por 30 segundos em velocidade baixa;
- f) Adicionar 5% do restante da água junto com o aditivo estabilizador de hidratação misturados a mesma (em repouso);
- g) Misturar por 30 segundos em velocidade alta;
- h) Interromper a mistura durante 30 segundos para homogeneização manual;
- i) Misturar por 30 segundos em velocidade alta.

#### 4.1.3.1. Consistência

A consistência foi avaliada conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). O valor final do índice de consistência corresponde à média de três medidas de diâmetro, expresso em milímetros. Foram realizadas medições também ao longo do tempo de estabilização (0, 24, 48 e 72 horas) para verificar alterações no índice de consistência. Para tanto, as argamassas estabilizadas foram armazenadas em recipientes herméticos e ocorreu a homogeneização em argamassadeira (rotação alta) durante 1 minuto antes da realização de cada ensaio ao longo do tempo.

#### 4.1.3.2. Teor de ar incorporado e densidade de massa

O teor de ar incorporado foi avaliado ao longo do tempo com a finalidade de verificar a capacidade de manutenção das bolhas de ar. Analisar esse fator é importante para garantir a manutenção das propriedades no estado fresco ao longo do tempo, como a trabalhabilidade. O teor de ar incorporado e a densidade de massa foram obtidos conforme estabelece a NBR 13278 (ABNT, 2005). A avaliação da densidade de massa também foi realizada ao longo do tempo de armazenamento (0,24, 48 e 72h). As argamassas foram mantidas em recipientes herméticos até o momento do ensaio. Antes de cada ensaio foi realizada uma nova mistura em argamassadeira (rotação alta) por 1 minuto.

Para a execução do ensaio conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005) registra-se a massa de um recipiente cilíndrico vazio com uma placa de vidro. Em seguida, enche-se o recipiente com água destilada e anota-se sua massa (rasar o recipiente com a placa para que não permaneçam bolhas de ar). O volume ( $V_R$ ) é obtido por meio da diferença dessas massas. O volume do recipiente utilizado foi de 480,3 cm<sup>3</sup>. Após o preparo da argamassa, insere-se a mesma no recipiente cilíndrico em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Em cada uma dessas camadas devem ser aplicados 20 golpes com o auxílio da espátula em posição vertical. Terminado o golpeamento em cada camada devem ser efetuadas três quedas do recipiente a uma altura aproximada de 3 centímetros para retirar os vazios entre a parede do recipiente e a argamassa. Por fim, deve-se rasar o recipiente com uma espátula com inclinação de 45° em relação à superfície da argamassa, pesar e registrar a massa do molde com a argamassa ( $m_c$ ).

A densidade de massa da argamassa ( $d$ ) pode ser calculada por meio da Equação 2.

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (2)$$

Sendo:

$d$  = massa específica da argamassa (kg/m<sup>3</sup>);

$m_c$  = massa do recipiente cilíndrico com a argamassa (gramas);

$m_v$  = massa do recipiente cilíndrico vazio (gramas);

$V_r$  = é o volume do recipiente cilíndrico (cm<sup>3</sup>).

O teor de ar incorporado na argamassa pode ser calculado por meio da Equação 3:

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

Sendo:

$A$  = teor de ar incorporado na argamassa (%);

$d$  = massa específica da argamassa (g/cm<sup>3</sup>);

$d_t$  = massa específica teórica da argamassa, ou seja, sem vazios, (g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.1.3.3. Exsudação de água (*bleeding*)

Para determinar a quantidade de água exsudada em cada amostra de argamassa foram utilizadas as recomendações da RILEM MR-6 descrita por Cappeto (2003). Os béqueres de 600 mL foram preenchidos em massa das amostras como forma de padronizar as medidas. Em seguida, a argamassa foi cortada com uma faca inoxidável em movimentos horizontais para retirar o ar aprisionado. O recipiente foi coberto com uma lâmina de vidro por aproximadamente 15 minutos após rasar a superfície da argamassa. A ocorrência de exsudação foi verificada em 15 min., 30 min., 1h, 2h e 4 h, 24, 48 e 72 horas após a confecção das amostras.

Jantsh (2015) ao avaliar argamassas estabilizadas verificou que a exsudação de água continua até os 60 minutos de ensaio, não ocorrendo incremento de água em medições posteriores de 2 e 4 horas. Além disso, a autora destacou que o plástico filme mostrou-se mais indicado por permitir melhor vedação do bico vertedor durante o ensaio.

#### 4.1.3.4. Tempo de início e fim de pega

Para monitorar os tempos de início e fim de pega e definir um teor de aditivo de hidratação para os tempos de 24, 48 e 72 horas de estabilização, optou-se por utilizar o ensaio normalizado de determinação dos tempos de pega, conforme preconiza a NBR NM 9: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração (ABNT, 2003).

Para tanto, foram utilizados três corpos de provas para cada mistura, compostos por um segmento de cano PVC com diâmetro nominal de 150 mm e altura de 200 mm. A base do cano foi fixada em um apoio de vidro por meio de silicone. O preenchimento dos corpos de prova com a argamassa foi realizado em uma única camada e adensados com 18 golpes distribuídos na seção do molde. Como forma de acompanhar a evolução da temperatura, em um dos corpos de prova foi inserido um termopar na altura de 7,5 cm. Após a preparação dos moldes cilíndricos foi determinada a resistência à penetração com o auxílio equipamento de Proctor, o qual possui agulhas de seções circulares e áreas de 16, 32, 65, 129, 161, 215, 323, 484 e 645 mm<sup>2</sup>. Ressalta-se a importância da amostra ser armazenada e mantida devidamente coberta durante o ensaio para evitar a evaporação excessiva. O molde cilíndrico confeccionado sem e com argamassa e o equipamento de Proctor utilizado nas medições podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática da determinação – Ensaio de resistência à penetração:  
(a) Molde sem e com argamassa (b) Penetrômetro de Proctor



Fonte: Autora (2023)

Durante a realização do ensaio foi registrado o tempo de contato inicial do cimento com a água de amassamento e o deslocamento provocado por cada agulha com o auxílio do equipamento de Proctor. A resistência à penetração corresponde à razão entre a força necessária para produzir a penetração de 2,5 cm na argamassa, em 10 segundos, pela área da face inferior da agulha utilizada.

Dessa forma, os tempos de início e fim de pega são os tempos decorridos até que a argamassa atinja a resistência à penetração de 3,5 MPa e 27,6 MPa, respectivamente (NBR NM 9, 2013). Para a determinação dos tempos de início e fim de pega foi utilizado o método analítico proposto pela normativa, o qual consiste na determinação dos coeficientes  $a_0$  e  $a_1$  da Equação 4 pelo método de regressão dos mínimos quadrados que resolve todo o conjunto de pares  $(rp, t)$ , obtidos experimentalmente, onde  $rp$  é a resistência à penetração em megapascals e  $t$  é o tempo decorrido em minutos.

$$\log(rp) = a_0 + a_1 \log(t) \quad (4)$$

Para cada corpo de prova foram calculados o tempo de início e de fim de pega relacionado ao tempo no qual a equação apresentou  $rp = 3,5$  MPa e  $rp = 27,6$  MPa, respectivamente.

Para ajustar os teores do aditivo estabilizador de hidratação, a média dos três corpos de prova preparados. Optou-se inicialmente por utilizar o aditivo incorporador de ar fixado em 0,2% e um teor de aditivo estabilizador de 0,3% em relação ao cimento Portland ao considerar os resultados obtidos no estudo em pastas com o uso do FGD relacionados ao aumento do

período de indução em até 6 dias comparado a mistura sem adição do resíduo. Após os resultados iniciais de resistência à penetração, a dosagem de 0,6% de AEH e 15% de FGD foi analisada. Essa avaliação foi realizada por meio do ensaio de resistência à penetração como forma de obter os tempos de início e fim de pega e, por consequência, estimar dois teores de aditivos estabilizador de hidratação com o objetivo de determinar uma dosagem para 48 e 72 horas de estabilização. Ainda, foi avaliado a manutenção do índice de consistência e o teor de ar incorporado ao longo do tempo. Ressalta-se que as três composições químicas do gesso FGD foram avaliadas em teores de adição de 2,5% e 15% como forma de verificar a diferença do teor de gesso incorporado à mistura no tempo de pega da argamassa (Tabela 12).

Tabela 12 – Proporções de misturas com 0,3% de AEH para produção das argamassas estabilizadas selecionadas de cimento Portland contendo FGD

Mistura/Nomenclatura	Cimento (g)	FGD (g)	Areia (g)	AEH (g)	AIA (g)	Água (g)	a/c
03_REF	400	0	2400	1,2	0,8	480	1,2
0,3_D_025		10					
03_D_15		60					
03_H_025		10					
03_H_15		60					
03_A_025		10					
03_A_15		60					

Fonte: Autora (2023)

#### 4.1.3.5. Ajuste nos tempos de pega das argamassas estabilizadas

A avaliação foi realizada por meio do ensaio de resistência à penetração como forma de obter os tempos de início e fim de pega e, por consequência, estimar os teores de aditivos estabilizador de hidratação com o objetivo de determinar uma dosagem para 24, 48 e 72 horas de estabilização. Ainda, foi avaliado a manutenção do índice de consistência e o teor de ar incorporado ao longo do tempo.

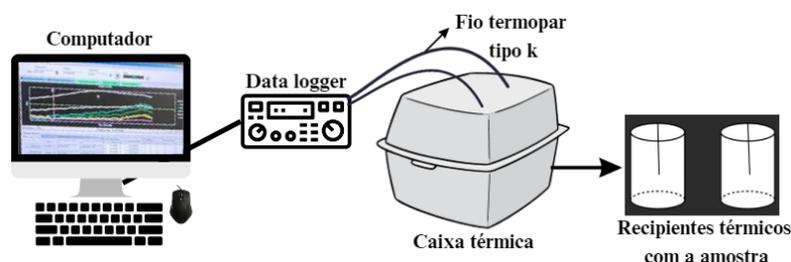
As reações químicas que ocorrem nas argamassas no período da pega e no endurecimento liberam calor que ocasionam a elevação da temperatura da amostra. A calorimetria semi-adiabática, de modo geral, fornece medidas do desenvolvimento da

temperatura. Ainda, é possível obter dados do calor gerado da amostra em função do tempo. Ressalta-se que neste método não se evita a perda de calor embora se reduza ao máximo.

Nesse contexto, as argamassas estabilizadas no estado fresco foram avaliadas por meio de um calorímetro semi-adiabático de 6 canais do grupo Valores, ECV/UFSC em temperatura inicial de  $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$  com a finalidade de verificar a influência do FGD e os mecanismos de hidratação e propor uma dosagem de aditivo para dois tempos de estabilização usuais, isto é, 48h e 72 horas. Ainda, a quantidade de calor gerado fornece informações referentes às reações químicas que ocorrem durante o período de hidratação.

Para tanto, foram utilizadas aproximadamente 300g de argamassa. A amostra, no estado fresco, foi utilizada após 24 horas da sua mistura e foi misturada novamente por 1 minuto antes de ser lançada em um recipiente cilíndrico de EPS com espessura de 1,5 cm, altura de 12 cm e diâmetro de 6 cm. O termopar tipo K foi mantido na metade da altura de todas as amostras. Ressalta-se que o ensaio foi realizado em ambiente climatizado e as medidas foram feitas em um data logger Hewlett-Packard, modelo 34970As, conectado a um microcomputador com leituras realizadas a cada 1 minuto. Os recipientes cilíndricos foram mantidos dentro de uma caixa térmica de PVC com parede dupla conforme é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Esquema do calorímetro semi-adiabático utilizado no ensaio de calorimetria



Fonte: Autora (2023)

O procedimento para avaliar a cinética de hidratação e alguns parâmetros de calor foi realizado com o intuito de melhor distinguir a influência da incorporação das três composições químicas do gesso FGD e observar os tempos de início de pega das amostras. Para avaliar os tempos de início de pega três métodos de cálculos podem ser empregados: método das tangentes, das frações diretas e das derivadas. Antoniazzi (2019) avaliou os resultados de calorimetria por meio dos três métodos de cálculo e observou que os resultados obtidos demonstraram coerência e proximidade entre si. Dessa forma, neste estudo optou-se por adotar o método das tangentes para a análise de dados das argamassas desse estudo.

Após a confecção dos gráficos dos resultados foi possível obter os tempos de início de pega, o pico de temperatura e o tempo para atingir a temperatura máxima. Ainda, foi possível calcular o DT (duration time), que é o tempo decorrido entre o tempo de início de pega e o momento em que a curva atinge o pico máximo (GUINDANI, 2018). Com as medidas da temperatura ao longo do tempo do ensaio foi possível determinar diversos parâmetros descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculos necessários para a obtenção dos parâmetros de calor das argamassas estabilizadas

Parâmetro	Equação
Varição da temperatura com o tempo ( $\Delta T$ )	$\Delta T = T_i - T_1$ Onde, $T_i$ : variação da temperatura em função da temperatura inicial (°C) $T_i$ : temperatura no intervalo de tempo $i$ considerado (°C) $T_1$ : temperatura da amostra no início do ensaio (°C)
Capacidade térmica da amostra - $C_s$	$C_s = m_s \cdot \sum (g_i \cdot c_i)$ $C_s$ : capacidade térmica da amostra (J/K) $m_s$ : massa da amostra (kg) $g_i$ : proporção relativa do constituinte na massa da amostra (kg/kg) $c_i$ : calor específico do constituinte, em kJ/kg.K
Calor gerado no tempo	$Q_i = \frac{C_s \cdot \Delta T_i}{mc}$ $Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo $i$ (J/g) $C_s$ : capacidade térmica da amostra (J/K) $T_i$ : variação da temperatura no tempo $i$ (°C) $mc$ : massa de cimento na amostra (g)
Calor total gerado ( $Q_{max}$ )	$Q_{max} = \sum Q_i$ $Q_{max}$ : quantidade do calor total gerado durante o ensaio (J/g) $Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo $i$ (J/g)

Fonte: Autora (2023)

Destaca-se que para esse cálculo foi utilizada a composição das fases do cimento, obtida por DRX (aproximadamente 48% C3S, 16,4% C2S, 3,9% C3A e 3,2% C4AF). Os valores do calor de hidratação para os principais compostos do cimento Portland são: C3S = 510 J/g, C2S = 260 J/g, C3A = 1100 J/g, C4AF = 410 J/g (LEA,2004). Os calores específicos dos materiais são apresentados na Tabela 14. Neste trabalho, adotou-se o calor específico do gesso como calor específico do FGD.

Tabela 14 – Calores específicos referentes aos materiais utilizados

Material	Cimento Portland	Areia	Água	FGD
Calor específico kJ/kg.K	0,84	0,80	4,182	1,090

Fonte: TEKES (2000); Engineering ToolBox (2003)

#### 4.1.3.6. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu as prescrições da NBR 15259:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade). Para este ensaio utilizou-se os seguintes equipamentos: balança digital com precisão de 0,01g e recipiente retangular. As amostras foram ensaiadas aos 28 dias após a moldagem. As superfícies dos corpos de prova foram lixadas e limpas com pincel. Os corpos de prova foram pesados e posicionados com a face quadrada sobre os suportes do recipiente, evitando a molhagem em outras superfícies. O nível da água permaneceu constante a  $5 \pm 1$  mm acima da face em contato com a água. Em cada determinação do ensaio o corpo de prova foi retirado, seco superficialmente com pano úmido e foi registrada sua massa. Os tempos de leitura foram adaptados da norma técnica e realizadas em 5, 10, 20, 40, 60 e 90 minutos para obter uma curva de evolução mais precisa. A Equação 5 foi utilizada para o cálculo. Ressalta-se que os corpos de prova foram colocados na estufa a  $50^\circ\text{C}$  dois dias antes de serem ensaiados.

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{s} \quad (5)$$

Sendo:

$C$  = absorção de água por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );

$m_{\text{sat}}$  = massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

$m_s$  = massa do corpo de prova seco em temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$

$S$  = área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ ).

#### 4.1.3.7. Aderência Potencial à tração no Substrato Padrão

A resistência de aderência à tração dos revestimentos de paredes e tetos corresponde a tensão máxima ocasionada por uma carga perpendicular à superfície da argamassa aplicada ao

substrato e o seu ensaio é preconizado pela NBR 15258 (ABNT, 2021). A aplicação da argamassa ao substrato ocorreu 4 horas antes do tempo de início de pega estipulado para as argamassas estabilizadas analisadas como forma de prever a aderência quando a argamassa for utilizada próxima a seu período máximo de aplicação sugerido.

Para verificar a capacidade da argamassa resistir às tensões atuantes na interface com o substrato as argamassas devem ser preparadas e colocadas em um substrato na posição horizontal sobre uma base plana e firme. O gabarito deve ser fixado deixando uma profundidade uniforme para a aplicação da argamassa ( $18 \pm 2$  mm). O ensaio deve ser realizado com o substrato seco e devem ser preparadas duas porções de argamassa utilizadas em um prazo máximo de 15 minutos. O procedimento de moldagem, cura e ruptura pode ser verificado nas Figuras 13 e 14 e seguiu as seguintes etapas:

- Aplica-se a argamassa em uma camada de aproximadamente 5 mm com uma colher de pedreiro, pressionando-a sobre o substrato de forma a eliminar os vazios e garantir que toda a superfície esteja coberta. Imediatamente após a primeira camada, deve-se aplicar a segunda deixando um excesso de material para ser rasado com o auxílio de uma régua metálica deixando com acabamento uniforme. Remover o gabarito e manter os substratos revestidos durante as primeiras 24 h na posição horizontal em condições ambientais de laboratório ( $23^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de 60%);
- A segunda etapa seguinte refere-se ao corte do revestimento e a colagem da pastilha. O corte do revestimento para delimitar os corpos de prova deve ser executado a seco, a partir de 3 dias que antecedem a ruptura em uma profundidade de 1 mm para dentro do substrato. Para a colagem a superfície deve estar isenta de resíduo e aplica-se a cola na pastilha ou na argamassa e, em seguida, pressiona-se a pastilha para garantir melhor espalhamento da cola;
- Realiza-se a ruptura de 10 corpos-de prova distribuídos no substrato e espaçados em no mínimo 40 mm das bordas e 20mm entre em 28 dias após a moldagem. O equipamento de tração deve ser acoplado à pastilha e aplica-se um esforço de tração perpendicular aos corpos -de- prova com uma taxa de carregamento constante de ( $250 \pm 50$  N/s) até a ruptura do corpo-de- prova. Anota-se a carga de ruptura, mede-se a área superficial do corpo de prova (mm) e registra-se a forma de ruptura do corpo de prova.

Figura 13 – Preparação das amostras



Fonte: Autora (2023)

Figura 14 – Execução do ensaio



Fonte: Autora (2023)

Para obter o valor de resistência de aderência à tração em cada amostra utiliza-se a Equação 6:

$$R = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Sendo:

R = Resistência de aderência à tração (MPa);

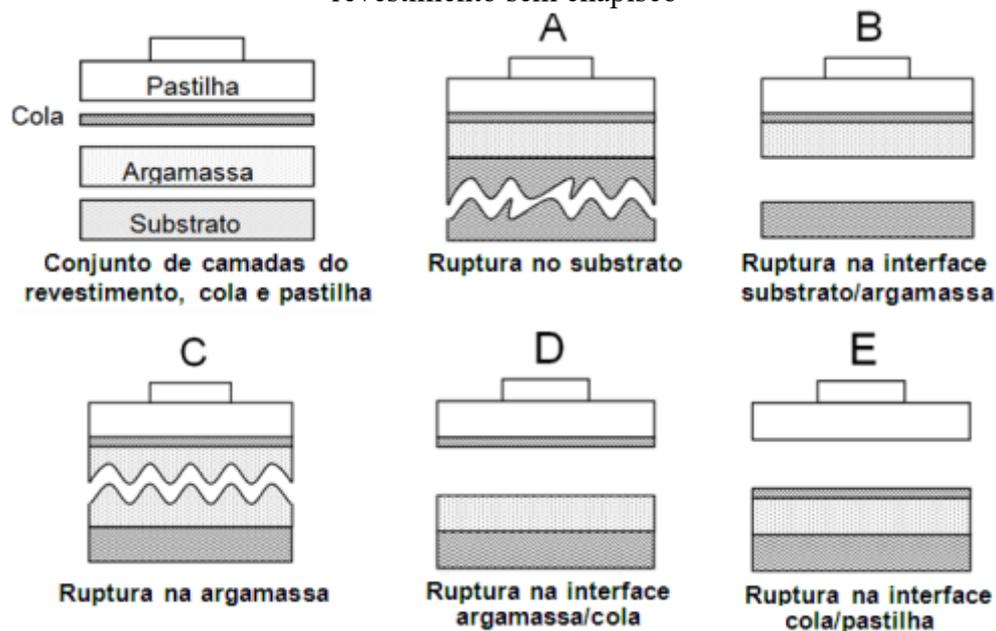
P = Carga de ruptura (N);

A = Área do corpo de prova (mm<sup>2</sup>).

Este cálculo da resistência potencial de aderência à tração foi realizado descartando-se os valores que se afastaram  $\pm 30\%$  da média, conforme especificado pela normativa do ensaio.

A forma de ruptura dos corpos-de-prova pode ser avaliada e expressa de acordo com a indicação da porcentagem de ocorrência. A Figura 15 mostra as formas de ruptura de um revestimento sem chapisco.

Figura 15 – Formas de ruptura no ensaio de resistência à aderência à tração em um sistema de revestimento sem chapisco



Fonte: Adaptada da norma NBR 13528 (2021)

#### 4.1.3.8. Desempenho mecânico

Os efeitos nas propriedades mecânicas da argamassa estabilizada foram analisados para verificar a qualidade e garantir maior confiabilidade ao produto final. Os procedimentos necessários para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão são preconizados pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a execução do ensaio os moldes prismáticos

com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm devem ser adensados em mesa de adensamento com 30 quedas nas duas camadas de argamassa. Foram utilizados três corpos de prova para cada uma das moldagens realizadas.

A ruptura foi realizada nos corpos de prova aos 28 dias após a moldagem em uma prensa da marca Solotest de dois módulos: o módulo 1 é utilizado para flexão com capacidade de carga de 2.0 Kgf e o módulo dois para compressão com capacidade de carga de 2.200 Kgf. É importante destacar, que o desvio absoluto para resistência à tração na flexão é de 0,3 MPa e para a resistência à compressão axial é de 0,5 MPa. Em caso de valor discrepante, uma nova média deve ser calculada. O resultado deve ser a média de três corpos de prova no ensaio de resistência à tração na flexão e quatro corpos de prova no ensaio de resistência à compressão axial para cada mistura. As condições de cura ocorreram em ambiente controlado com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $60 \pm 6\%$ .

O procedimento para obter resistência à tração na flexão ( $R_f$ ) seguiu a NBR 13279 (ABNT, 2005) e consiste em posicionar o corpo de prova nos dispositivos de apoio do equipamento do ensaio (a fase rasada não deve ficar em contato com os dispositivos de apoio e nem com o dispositivo de carga. A carga aplicada ( $F_t$ ) deve ser de cerca de  $(50 \pm 10 \text{ N/s})$  até a ruptura do corpo-de-prova. A distância entre os suportes ( $L$ ) é calculada em milímetros. O cálculo é tido pela Equação 7:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times L}{40^3} \quad (7)$$

Sendo:

$R_f$  = resistência à tração na flexão (MPa);

$P$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

$L$  = distância entre os suportes (mm).

Já a resistência à compressão axial é obtida com a ruptura das metades dos três corpos de prova do ensaio de flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento. A carga aplicada deve ser de  $500 \pm 10 \text{ N/s}$  até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão é calculada conforme a Equação 8:

$$R_C = \frac{F_C}{1600} \quad (8)$$

Sendo:

$R_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F_c$  = carga máxima aplicada (N);

1600 = área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40mm (mm<sup>2</sup>).

Ressalta-se, que para os cálculos, o desvio absoluto máximo entre os corpos de prova foi considerado a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média. Esses resultados foram obtidos conforme preconiza a NBR 13279 (ABNT, 2005), avaliando o desvio absoluto máximo e descartando os valores superiores a 0,30 MPa.

#### 4.1.3.9. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado utilizando o equipamento Sonelastic da ATCP Engenharia. É um método de ensaio não destrutivo que utiliza frequências naturais adquiridas por meio da excitação por impulso. Este método é normatizado pela ASTM E1876:09: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, And Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. O ensaio é repetido três vezes em cada corpo de prova ensaiado e consiste em colocar o corpo-de-prova deitado e posicionar o sensor acústico do equipamento. Após, com o auxílio de uma haste é provocado o impacto no corpo de prova, o qual é captado pelo sensor do equipamento que fornece os resultados dos módulos de elasticidade (Figura 16). É necessário introduzir os dados de massa e as dimensões de cada corpo de prova prismático ensaio, pois os picos de frequências naturais de vibração obtidos pelo aparelho dependem de tais parâmetros.

Figura 16 – Equipamento do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Autora (2023)

#### 4.1.3.10. Susceptibilidade à fissuração

A susceptibilidade à fissuração de revestimentos de argamassa pode ser avaliada por meio do método desenvolvido pelo Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB, 1993). Os critérios de avaliação desse método são apresentados na Tabela 15.

Nesse estudo, para investigar a susceptibilidade à fissuração foi relacionado os dados obtidos de módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão com os critérios de classificação quanto a fissuração da CSTB (1993). Ressalta-se que a retração por secagem não foi avaliada.

Tabela 15 – Critérios de suscetibilidade quanto à fissuração, quanto ao módulo de elasticidade – CSTB (1993)

Características (aos 28 dias)	Critérios de classificação quanto à fissuração		
	Baixa susceptibilidade	Média susceptibilidade	Alta susceptibilidade
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	$E \leq 7000$	$7000 < E < 12000$	$E \geq 12000$
E/Rt*	$E/Rt \leq 2500$	$2500 < E/Rt < 3500$	$E/Rt \geq 3500$
Retração por secagem – mm/m	$D1/1 \leq 0,7$	$0,7 < D1/1 < 1,2$	$D1/1 \geq 3500$

\*Rt: Resistência à tração na flexão

Fonte: CSTB (1993)

## 4.2. ANÁLISE ESTÁTISTICA DOS RESULTADOS

A análise estatística dos resultados foi realizada com o auxílio do software *STATISTICA* 10 nos ensaios de densidade de massa no estado endurecido, resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água por capilaridade como forma de obter maior confiabilidade nos dados emitidos. O método de análise utilizado foi de variância Factorial ANOVA, o qual avalia se os fatores de controle apresentam efeitos significativos nas variáveis de resposta analisadas. Quando foi observado efeito significativo na análise ANOVA, realizou-se o teste Tukey. Esse método busca avaliar as diferenças significativas entre duas médias de tratamento e, dessa forma, permite comparar e analisar os grupos entre si.

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir são descritos os resultados de caracterização dos materiais empregados neste estudo, sendo eles: cimento Portland, agregado miúdo, FGD, aditivos e água.

#### 4.3.1. Cimento Portland

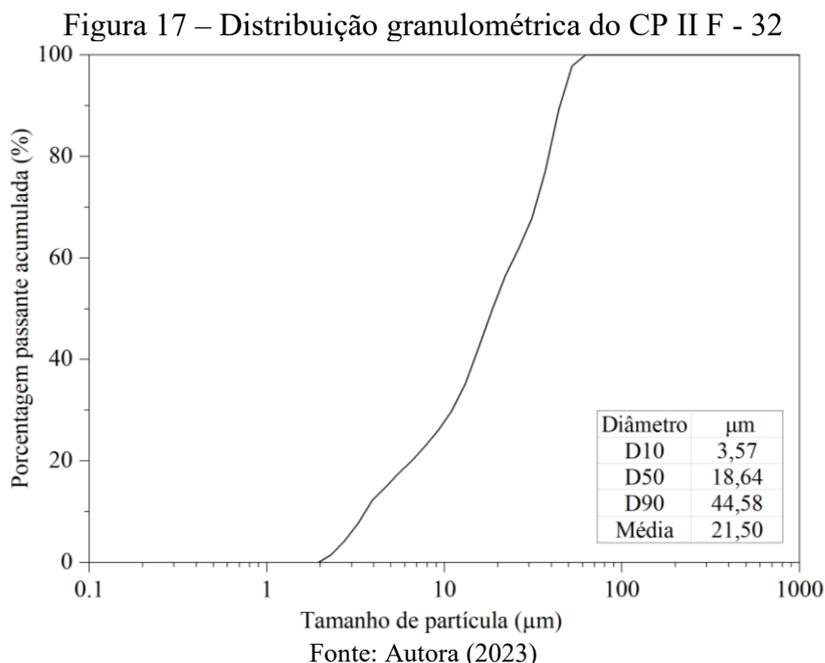
Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pela utilização do CII F-32 como ligante, o qual possui a adição de um filler calcário em sua composição. Os percentuais apresentados para este cimento foram de 56,70% de CaO e 17,90% de SiO<sub>2</sub>. O cimento utilizado neste estudo foi fornecido por uma empresa de Florianópolis e apresenta as características físico-químicas descritas na Tabela 16.

Tabela 16 – Características físico-químicas do CII F - 32

Características	CP II F -32
% CaO	56,70
% SiO <sub>2</sub>	17,90
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00
% K <sub>2</sub> O	0,92
% TiO <sub>2</sub>	0,37
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50
% SO <sub>3</sub>	2,40
% MnO	0,06
% P.F	9,29
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,07
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4644

Fonte: Autora (2023)

A Figura 17 apresenta a distribuição granulométrica do cimento Portland, determinada com a utilização do equipamento S25000 (Microtrac), por via seca. Como por ser observado, o CII F- 32 possui tamanho médio de partícula de 21,50 µm.



A Tabela 17 apresenta a composição mineralógica do cimento Portland, determinado por meio de análise quantitativa de fases por difração de raios-X (DRX-Rietveld). A quantificação foi realizada por dois métodos: pelo método de Rietveld com o auxílio do software X'Pert HighScore Plus 3.0 (PANalytical) e por meio das equações de Bogue (BOGUE, 1929). Pode-se verificar que os valores obtidos pelos diferentes métodos são compatíveis e coerentes com o esperado para um CII F-32 conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 17 – Quantificação dos compostos do cimento empregado

Composto	Método		
	DRX – Rietveld (%)	Código ICSD	Bogue (%)
C <sub>3</sub> S - Alita	48,0	94742	53,35
C <sub>2</sub> S - Belita	16,4	79550	28,50
C <sub>3</sub> A - Celita	3,9	1841 (Cubic)/ 1880 (Ortho)	6,80
C <sub>4</sub> AF - Ferrita	3,2	9197	9,12
Gesso – di-hidrato	2,4	151692	-
Gesso – hemi-hidrato	2,2	69060	-
Gesso - Anidrita	0,4	243305	-
CaCO <sub>3</sub> - Calcita	19,9	79673	-
MgO - Periclase	3,8	56026	-

Fonte: Autora (2023)

Ressalta-se que ambos os métodos podem conter erros. Conforme Scrivener, Snelling e Lothenbach (2016), a forma de preparação da amostra, a sobreposição dos picos devido a

existência de um grande número de fases levam a erros de até 3% na quantificação das fases maiores e de 2% nas fases menores. Já o método de Bogue assume que o clínquer é composto somente pelas fases silicato dicálcico ( $C_2S$ ), silicato tricálcico ( $C_3S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), as demais fases não são consideradas (Taylor, 1997). As características físicas e mecânicas do cimento empregado estão descritas na Tabela 18 e foram fornecidas pelo fabricante do material.

Tabela 18 – Características normativas do cimento Portland, fornecidas pelo fabricante

Caracterização	
Início de pega (min)	227
Fim de pega (min)	291
Massa específica ( $g/cm^3$ )	3,06
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	16,1
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	27,8
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	31,8
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	37,6
Expansibilidade (mm)	0

Fonte: Fabricante (2023)

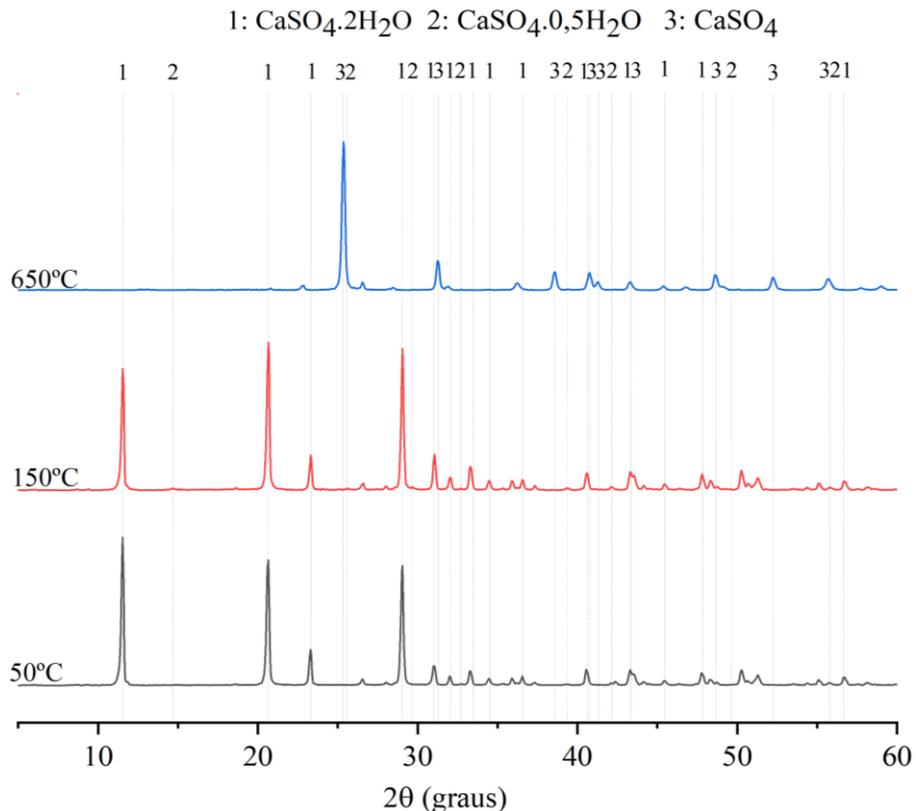
#### 4.3.2. Gesso FGD

O gesso FGD foi incorporado ao processo de mistura como adição com o intuito de avaliar a sua influência em argamassas estabilizadas. Em específico, buscou-se incorporar as diferentes composições químicas de sulfatos de cálcio (gipsita, hemi-hidrato e anidrita) e avaliar sua contribuição para o aumento do período de indução e para a melhoria das propriedades das argamassas estabilizadas. Esse resíduo é proveniente do processo de dessulfurização de uma usina termelétrica de carvão localizada no estado do Rio Grande do Sul – RS. A condição de avaliação do gesso FGD foi:

- I. Gesso FGD *in natura* seco em estufa a 50°C por 48 horas (sulfato de cálcio do tipo di-hidrato);
- II. Gesso FGD calcinado a 150°C por 4 horas, em mufla, para obter sulfato de cálcio do tipo hemi-hidrato (hemi-hidrato);
- III. Gesso FGD calcinado a 650°C por 4 horas, em mufla, para obter sulfato de cálcio do tipo anidro (anidrita).

Após o tratamento térmico, as amostras foram submetidas a análises de difração de raios – X (DRX), conforme apresentado na Figura 18. Esse ensaio foi realizado com a finalidade de verificar se os tratamentos térmicos realizados no resíduo resultaram nas composições mineralógicas de di-hidratro, hemihidratro e anidrita esperadas.

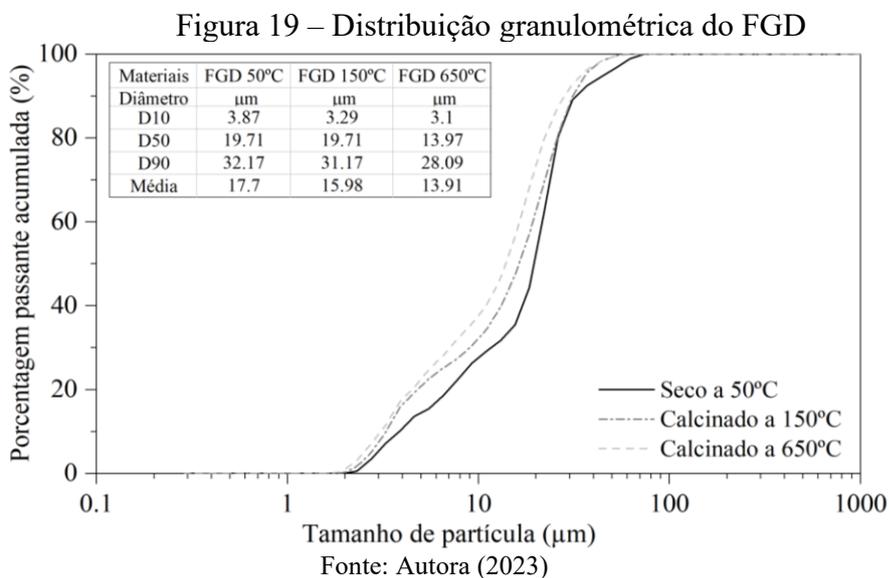
Figura 18 – Difratoograma de Raio – X do FGD após tratamento térmico



1: Dihidratro (151692 ICSD); 2:Hemihidratro (69060 ICSD) e 3:Anidrita (243305 ICSD)  
Fonte: Autora (2023)

Com os dados obtidos, foi possível quantificar a presença desses minerais. A quantificação foi realizada pelo método de Rietveld com o auxílio do software X'Pert HighScore Plus 3.0 (PANalytical). Os resultados obtidos mostraram que o FGD seco a 50°C é composto majoritariamente por di-hidratro (cerca de 84%), ao passo que o resíduo calcinado a 150°C e a 650°C apresentam a presença majoritária de hemi-hidratro (80%) e anidrita (88%), respectivamente. Em menor concentração, observa-se a presença de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Estes resultados indicam que o tratamento térmico promoveu alterações na estrutura do material.

Os resultados da análise granulométrica do gesso FGD estão apresentados na Figura 19. Na curva apresentada, verifica-se porcentagens acumulativas do volume das partículas do gesso FGD em função do seu diâmetro.



Os resultados mostram que o gesso FGD seco a 50°C apresenta partículas muito finas, ao considerar que 90% do volume da amostra possui diâmetros menores que 32,17 μm, 50% do volume apresenta diâmetros menores que 19,71 μm e 10% diâmetro menor que 3,87 μm. O mesmo padrão é observado nas demais amostras.

A composição química do gesso FGD, obtida pelo ensaio de espectroscopia de raios - x por dispersão em energia (EDX), pode ser verificada na Tabela 19.

**Tabela 19 – Características físico-químicas dos resíduos tratados termicamente**

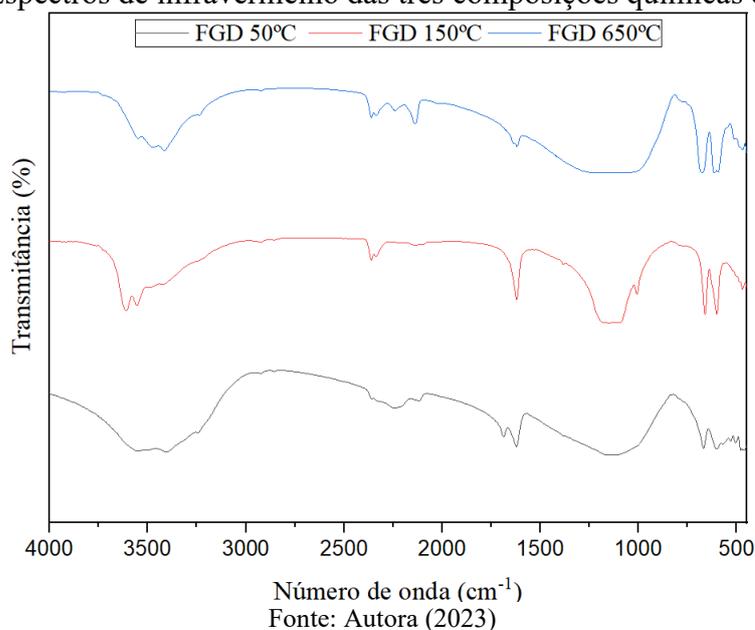
<b>Características</b>	<b>FGD 50°C</b>	<b>FGD 150°C</b>	<b>FGD 650°C</b>
% SiO <sub>2</sub>	5,212	5.290	6.450
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,506	0.543	0.625
% K <sub>2</sub> O	0,272	0.274	0.369
% TiO <sub>2</sub>	0,061	0.074	0.082
% CaO	31,235	33.539	38.162
% SO <sub>3</sub>	41,560	45.338	52.319
% CuO	0,015	0.013	1.914
% CO <sub>2</sub>	21,087	14.874	0.016
% SrO	0,053	0.055	0.064
% P.F	21,09	14,87	1,92
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,21	3,01
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	1862	1919	2326

Fonte: Autora (2023)

Com os dados obtidos da composição química do resíduo (Tabela 19), observa-se que os principais óxidos que compõem o gesso FGD são o CaO e o SO<sub>3</sub>, os quais formam o sulfato de cálcio. O FGD calcinado a 650°C apresenta maior teor desses óxidos em comparação as demais composições químicas. Além disso, impurezas como SrO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, CuO e MgO podem ser observadas na composição química do gesso FGD em menores teores. Ainda, observa-se que com o aumento da temperatura utilizada no tratamento térmico do resíduo ocorre o aumento da superfície específica (Tabela 19).

Os espectros de transmissão na região do infravermelho (4000 a 400 cm<sup>-1</sup>) foram registrados em um espectrômetro com transformada de Fourier (FTIR). Os resíduos utilizados na análise foram preparados em forma de pastilhas de Kbr prensados sob vácuo. Os resultados podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 – Espectros de infravermelho das três composições químicas do gesso FGD



Número de onda (cm<sup>-1</sup>)

Fonte: Autora (2023)

A presença de moléculas de água pode ser verificada em duas bandas de absorção características: na região de 1650 cm<sup>-1</sup> (banda de deformação vibracional por flexão) e na região de 3600 a 3200 cm<sup>-1</sup> (banda de estiramento vibracional). A gipsita apresenta maior quantidade de moléculas de água, formando mais ligações O-H. Por esse motivo seu espectro apresenta bandas de absorção mais largas que as demais amostras. Na figura 20, observa-se que o gesso FGD 50°C (gipsita) apresenta duas bandas em 1620 cm<sup>-1</sup> e 1685 cm<sup>-1</sup> referentes ao grupo (O-H), características da gipsita. A banda de 1680 cm<sup>-1</sup> refere-se as moléculas de água fracamente retidas e a banda de 1629 cm<sup>-1</sup> surge de moléculas de água fortemente retidas. O hemi-hidrato

contém apenas água fortemente retida e possui única vibração de flexão em  $1620\text{ cm}^{-1}$  (MANDAL; MANDAL, 2002). Esta água diminui de intensidade com o aumento da temperatura de calcinação.

### 4.3.3. Agregado miúdo

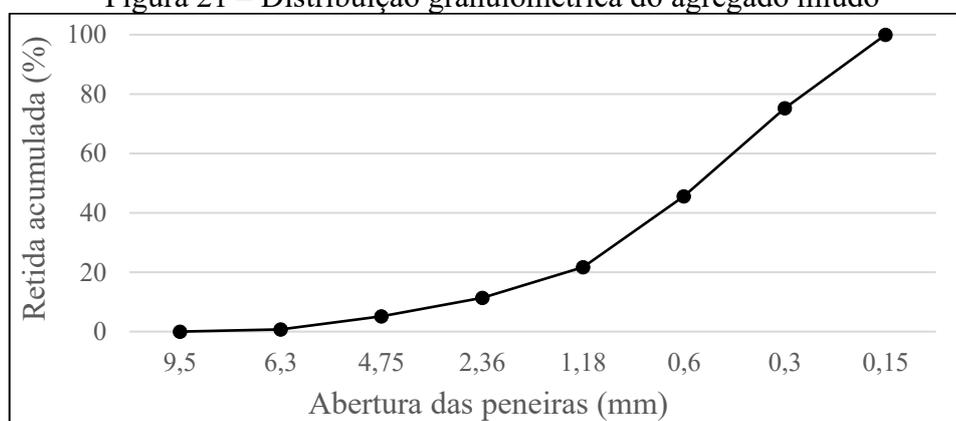
Como forma de favorecer o processo de estabilização, o agregado miúdo selecionado possui módulo de finura entre 1,0 e 2,0 (PAGNUSSAT *et al.*, 2012; SCHACKOW *et al.*, 2019). Apresenta massa específica de  $2,37\text{ g/cm}^3$  e módulo de finura 1,60. Os resultados da caracterização física do material estão dispostos na Tabela 20 e sua curva de distribuição granulométrica na Figura 21.

Tabela 20 – Caracterização física do agregado miúdo

Abertura de Malha	Retido Acumulado (%)
	Areia Média
4,8 mm	0,76
2,4 mm	5,2
1,2 mm	11,43
0,6 mm	21,67
0,3 mm	45,53
0,15 mm	75,3
Fundo	100
<b>Dimensão Máx.</b>	<b>4,75 mm</b>
Módulo de Finura	1,60
Massa Específica	$2,37\text{ g/cm}^3$
Massa específica unitária	$1,260\text{ kg/dm}^3$

Fonte: Autora (2023)

Figura 21 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2023)

#### 4.3.4. Aditivos químicos

Foram utilizados dois aditivos: um aditivo estabilizador de hidratação (AEH) e um incorporador de ar (AIA). O aditivo estabilizador de hidratação selecionado é à base de moléculas orgânicas e permite ajuste do tempo de estabilização entre 24 e 72 horas, enquanto o aditivo incorporador de ar empregado apresenta caráter aniônico e boa retenção de água por conter em sua formulação retentores de água. A Tabela 21 apresenta um breve resumo dos aditivos utilizados.

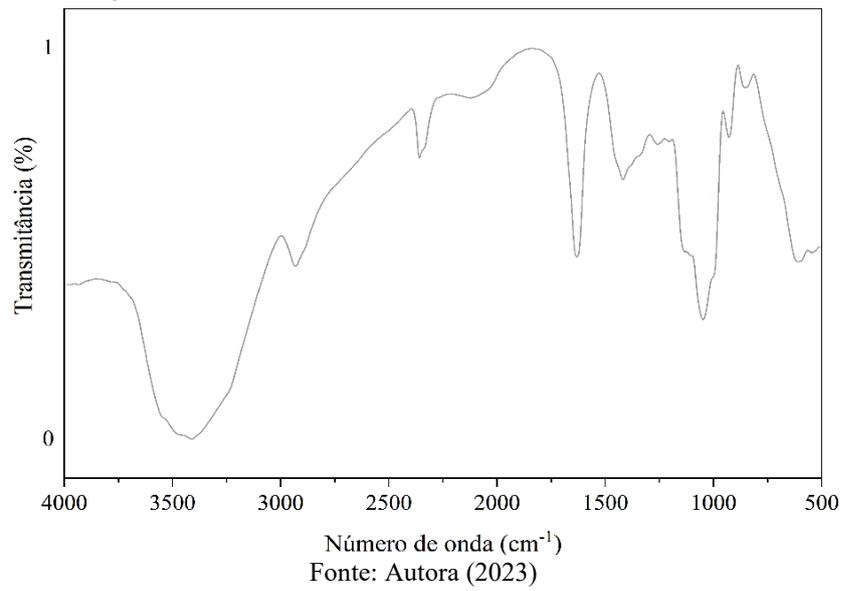
Tabela 21 – Dados dos aditivos utilizados

<b>Aditivo</b>	<b>Densidade (kg/L)</b>	<b>Dosagem</b>	<b>Cor</b>	<b>Base química</b>	<b>Função</b>
Estabilizador de hidratação (AEH)	1,19	$\geq 0,2\% \leq 1,5\%$ (sobre o peso do cimento)	Marrom escuro	Sacarose e gluconato de sódio	Prolongar o tempo de início de pega
Incorporador de ar (AIA)	1,00	$\geq 0,1\% \leq 0,5\%$ (sobre o peso do cimento)	Marrom	Surfactante aniônico	Trabalhabilidade

Fonte: Dados do fabricante (2022)

Ressalta-se que os dados técnicos fornecidos pelo fabricante se referem à temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $60\% \pm 2\%$  de umidade relativa do ar. Como forma de verificar a base química do aditivo estabilizador de hidratação, realizou-se o ensaio de FTIR. A Figura 22 apresenta as bandas de infravermelho do aditivo estabilizador de hidratação. Os resultados sugerem a presença de sacarose ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ) devido aos picos característicos nas bandas de 900 a  $1100\text{ cm}^{-1}$  (CAMEO, 2018). Observa-se por meio do formato das bandas que o aditivo utilizado não é um elemento puro, e pode conter também gluconato ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_7$ ) em sua composição (NIST, 2018).

Figura 22 – Espectros de infravermelho do aditivo estabilizador de hidratação



#### 4.3.5. Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi obtida no Laboratório de ValoRes por meio do processo de ionização para evitar a presença de sais e garantir a conformidade com as normativas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

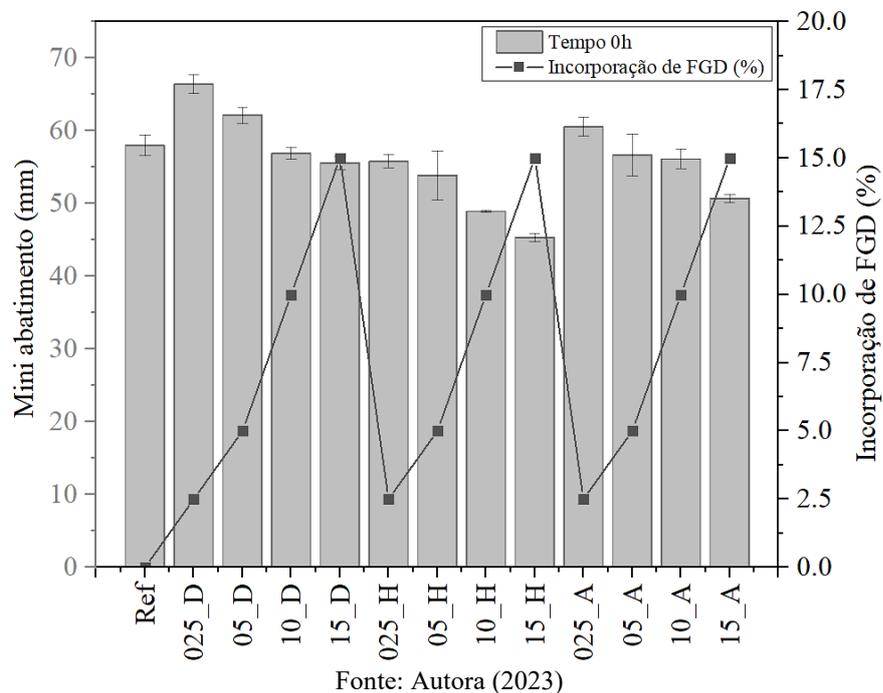
A apresentação dos resultados segue a sequência adotada no Programa Experimental e apresenta análises comparativas e discussões relevantes ao estudo.

### 5.1 ESTUDO EM PASTA

#### 5.1.1 Estudo preliminar em pastas – Fluidiez

As Figuras 23 e Figura 24 mostram os resultados do ensaio de fluidiez para as pastas produzidas sem o uso de aditivos e com resíduo FGD tratado termicamente a 50°C, 150°C e 650°C. Essa avaliação teve o intuito de verificar o comportamento da incorporação do FGD (0, 2,5%, 5%, 10% e 15% sobre a massa de cimento) ao longo do tempo na fluidiez das amostras.

Figura 23 – Fluidiez em pastas de cimento Portland produzidas com a incorporação de FGD tratado a 50°C (D), 150°C (H) e 650°C (A)



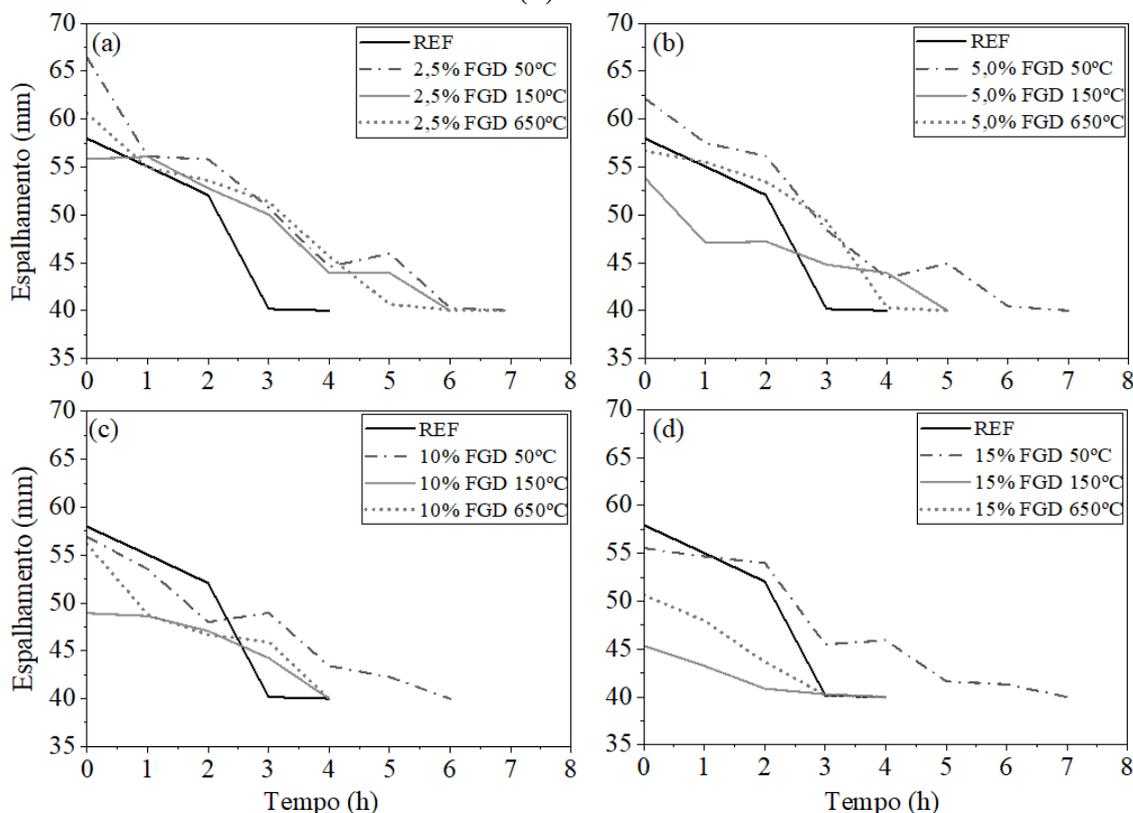
As pastas com o resíduo na fase hemi-hidratado (150°C) apresentaram menores valores de espalhamento inicial quando comparados à mistura controle (REF), o que pode estar relacionado a taxa de dissolução mais rápida do hemi-hidrato que favorece a geração de etringita mais rapidamente durante a hidratação em relação ao di-hidrato e anidrita (TORRÉNS-

MARTÍN; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 2013; ZHANG *et al.*, 2018). Estas reduções foram de 3,7%, 7,1%, 15,6% e 21,8% em relação à mistura sem FGD (REF) para os teores de adição de 2,5%, 5,0%, 10% e 15%, respectivamente. O aumento da incorporação do FGD na mistura pode estar associado ao aumento da redução da fluidez das pastas analisadas. A mesma tendência pode ser verificada nas pastas tratadas a 50°C e 650°C.

As pastas tratadas a 650°C apresentaram aumento da fluidez no menor teor de adição de aproximadamente 4,5% e redução de 2,2%, 3,2% e 12,6% nos demais teores de incorporação, comprovando a influência do aumento do teor da adição do resíduo na fluidez. Esse comportamento já era esperado, ao considerar que a relação água/cimento utilizada foi a mesma em todas as misturas.

Nessa perspectiva, verifica-se que o resíduo na forma de di-hidrato apresentou maiores valores de espalhamento. Isto pode estar relacionado a finura do material ao considerar que a fase do FGD di-hidratada possui menor permeabilidade ao ar que as demais fases (Blaine 1862 cm<sup>2</sup>/g, 1919 cm<sup>2</sup>/g e 2326 cm<sup>2</sup>/g para respectivamente di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita). As pastas de cimento com 2,5% e 5,0% de FGD tratado a 50°C apresentaram acréscimos na fluidez de 14,5% e 7,18%, respectivamente, em comparação à mistura controle (REF). Já as pastas de cimento di-hidrato com 10% e 15% de FGD apresentaram redução de 1,8% e 4,2%, respectivamente. Estas reduções podem ser oriundas do aumento da incorporação de resíduo para uma mesma relação água/cimento como citado anteriormente. A Figura 24 mostra a média de 3 medições perpendiculares de cada amostra ao longo do tempo de estabilização para os teores de incorporação de 2,5, 5,0,10 e 15%.

Figura 24 – Fluidez das pastas sem aditivo com: (a) 2,5% de FGD; (b) 5,0% de FGD; (c) 10% de FGD (d) 15% de FGD



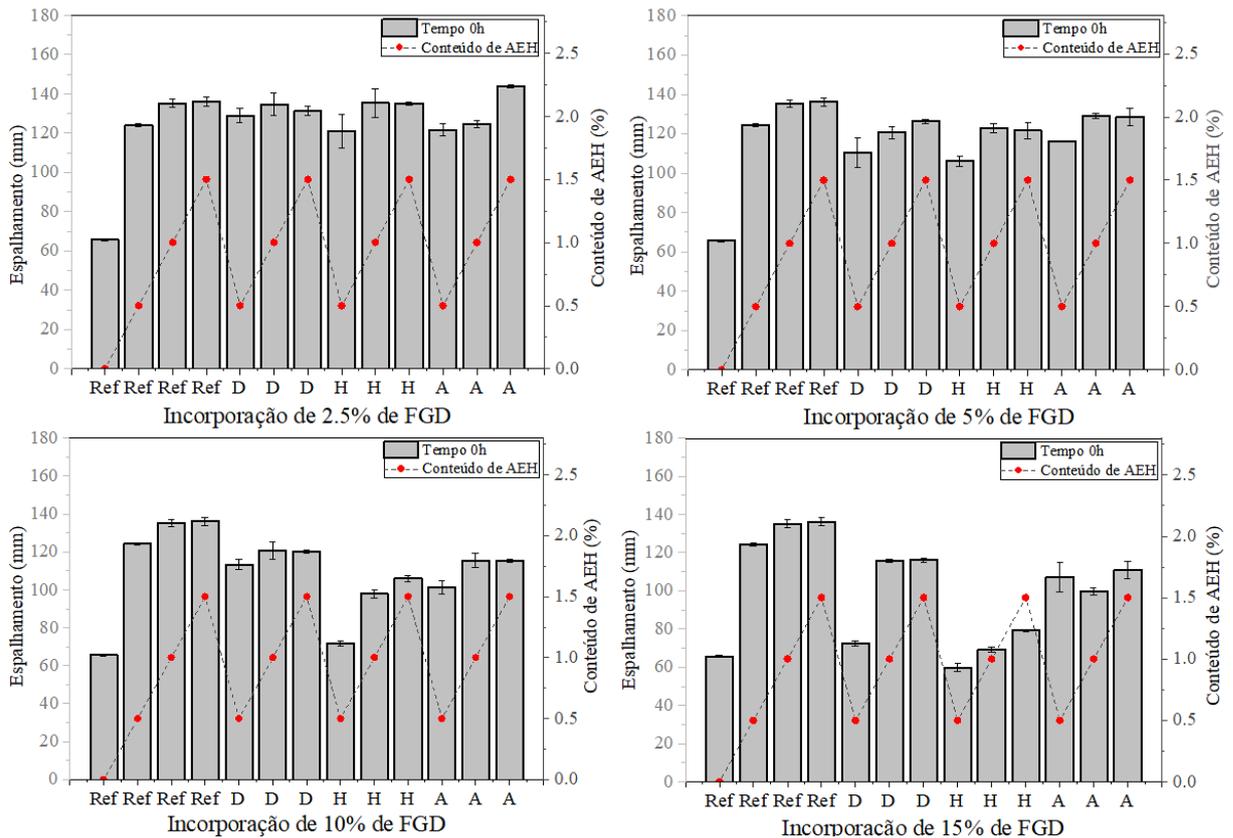
Fonte: Autora (2023)

Ocorreu a modificação da fluidez com a adição do FGD nas pastas, esse valor variou de acordo com o teor de adição do resíduo analisado e sua taxa de dissolução. O di-hidrato apresentou maior manutenção da fluidez em todos os teores de adição, seguidos da anidrita e do hemi-hidrato e manteve a fluidez das pastas por aproximadamente 3 horas a mais do que a mistura referência. Já hemi-hidrato e anidrita apresentaram acréscimo da fluidez nas menores substituições (2,5% e 5,0%) de cerca de 1 ou 2 horas.

O efeito combinado do gesso FGD e do aditivo estabilizador de hidratação também foi analisado. Dessa forma, ao analisar o efeito da incorporação do gesso FGD no tempo inicial (Figura 25), verifica-se uma tendência de aumento da fluidez com o acréscimo do teor de aditivo. Quanto ao teor de adição, as pastas com 2,5% e 5% de FGD apresentaram um espalhamento inicial maior do que as pastas com 10% e 15%. Esse comportamento condiz com o aumento da incorporação do resíduo para uma mesma relação água/cimento (0,45) que resulta em maior demanda de água. A adição de 2,5% mantém os valores de fluidez das pastas próximas ou maiores a mistura referência. Nos teores de 10% e 15% são observadas reduções bruscas de mais de 40% de fluidez inicial comparada às misturas referências. Adicionalmente

a isso, a taxa de dissolução mais rápida do hemi-hidrato pode ser associada aos menores valores de espalhamento obtidos nas pastas produzidas de FGD. Esse comportamento também foi apresentado nas pastas sem aditivo.

Figura 25 – Análise da incorporação de FGD no tempo inicial (0h) em pastas com aditivo estabilizador de hidratação

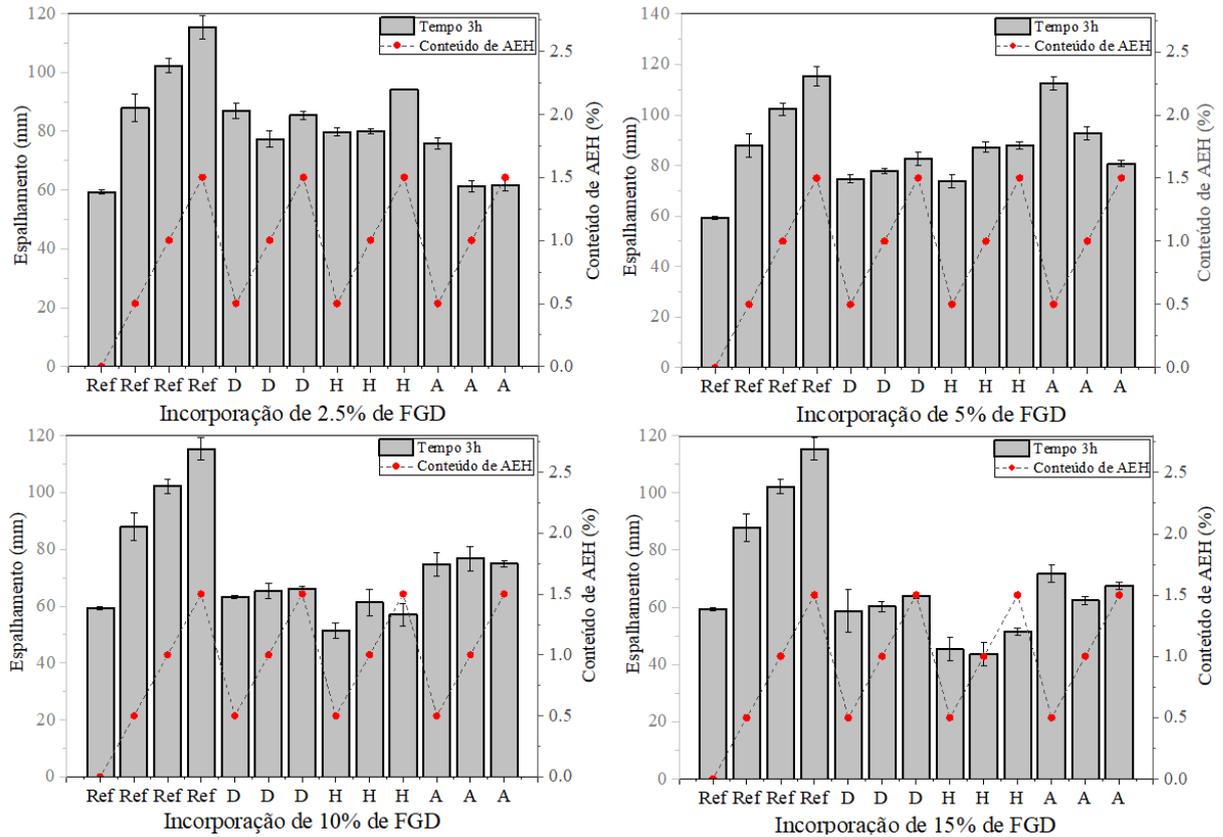


Fonte: Autora (2023)

A Figura 26 mostra a fluidez das pastas após 3 horas de mistura. De modo geral, com exceção da anidrita, verifica-se que quanto maior o teor de aditivo, maior o espalhamento das pastas. Este efeito já era esperado, pois conforme MA *et al.* (2015), ocorre a homogeneização das cargas superficiais das partículas de cimento pelas moléculas dos aditivos a base de gluconato. Ainda, nos maiores teores de adição de FGD (10 e 15%) é possível verificar o fenômeno relatado por Mardani-Aghablou *et al.* (2016). Os autores citam que o hemi-hidrato, por proporcionar uma taxa de dissolução mais rápida do que o di-hidrato, tende a formar mais etringita em idades iniciais. Sendo assim, a fluidez das pastas diminui quando comparado ao di-hidratado na mesma idade. Observa-se também perda de fluidez de até 55% nos maiores teores de adição (15% de FGD e 1,5% de AEH) em comparação à mistura referência. Quanto

ao teor de aditivo, as pastas com 0,5% de adição apresentaram menor perda de fluidez entre pastas analisadas.

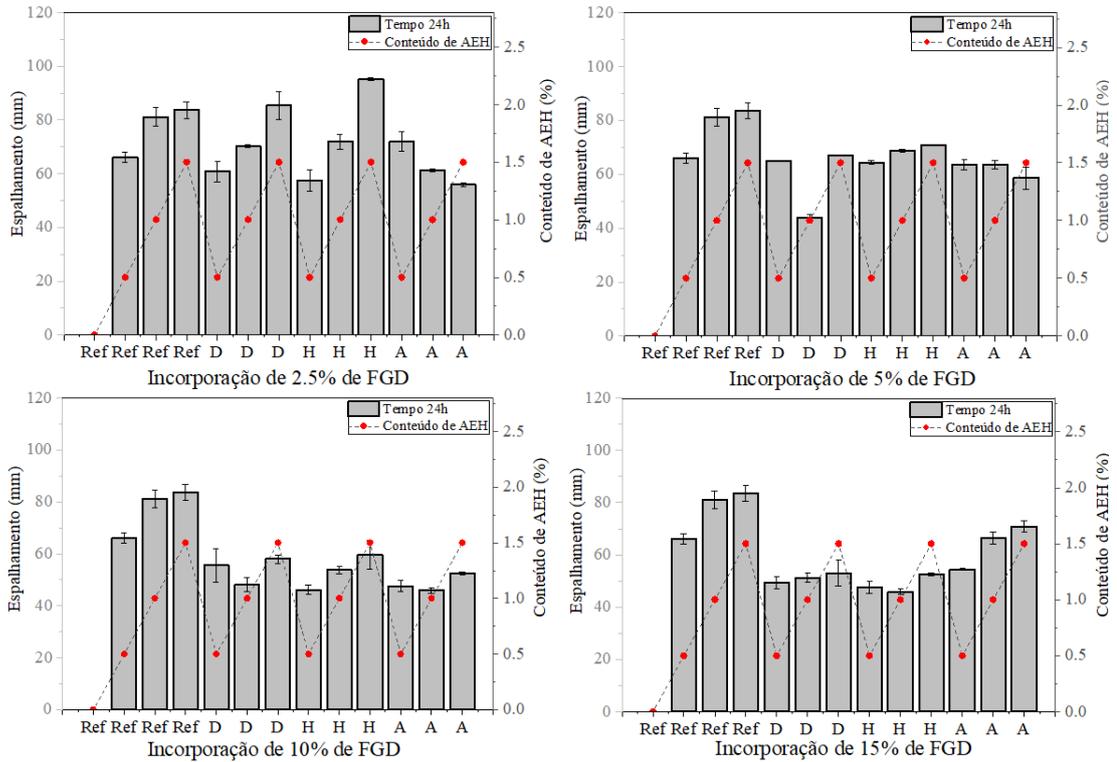
Figura 26 – Análise da incorporação de FGD após 3 horas em pastas com aditivo estabilizador de hidratação



Fonte: Autora (2023)

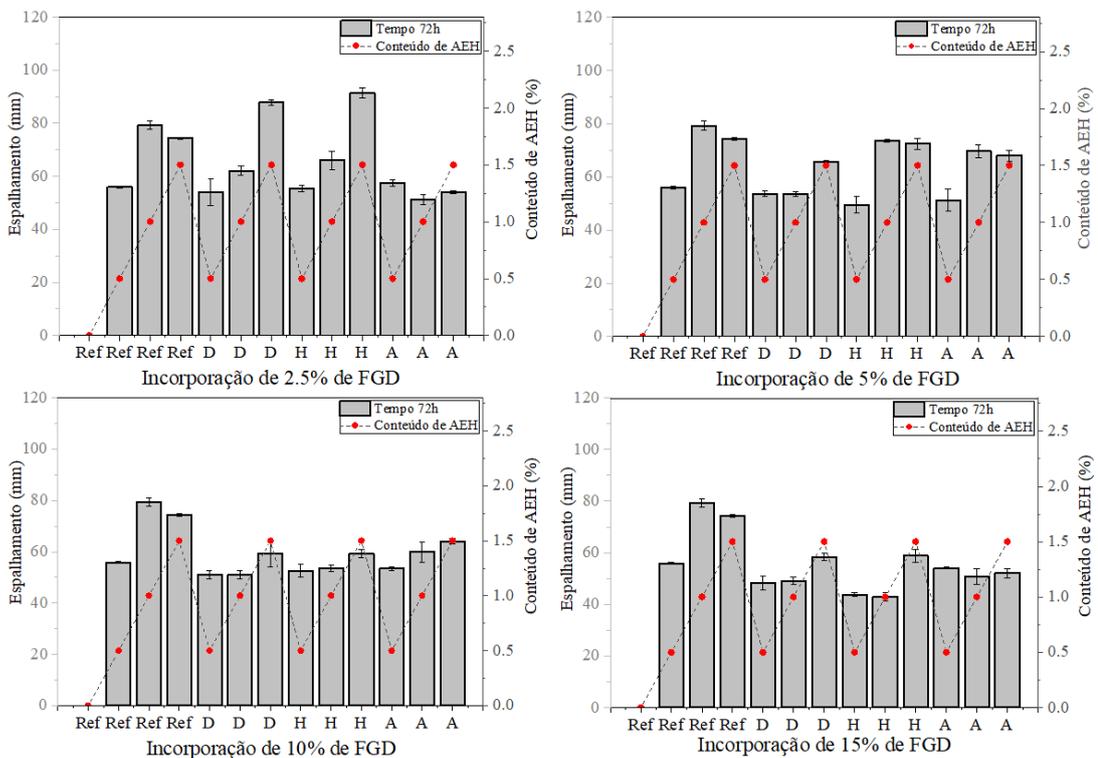
Nas primeiras 24 horas ocorreu a perda de fluidez de aproximadamente 50% em todas as pastas analisada (Figura 27). Após esse período, constatou-se baixo percentual de perda de abatimento. Por fim, ao analisar o tempo inicial comparado ao tempo final de utilização previsto para argamassas estabilizadas (72 horas) observa-se perda de fluidez de até 60% ao longo do tempo. No entanto, como pode ser observado na Figura 28, as pastas ainda apresentam fluidez adequada para serem ensaiadas.

Figura 27 – Análise da incorporação de FGD após 24h em pastas com aditivo estabilizador de hidratação



Fonte: Autora (2023)

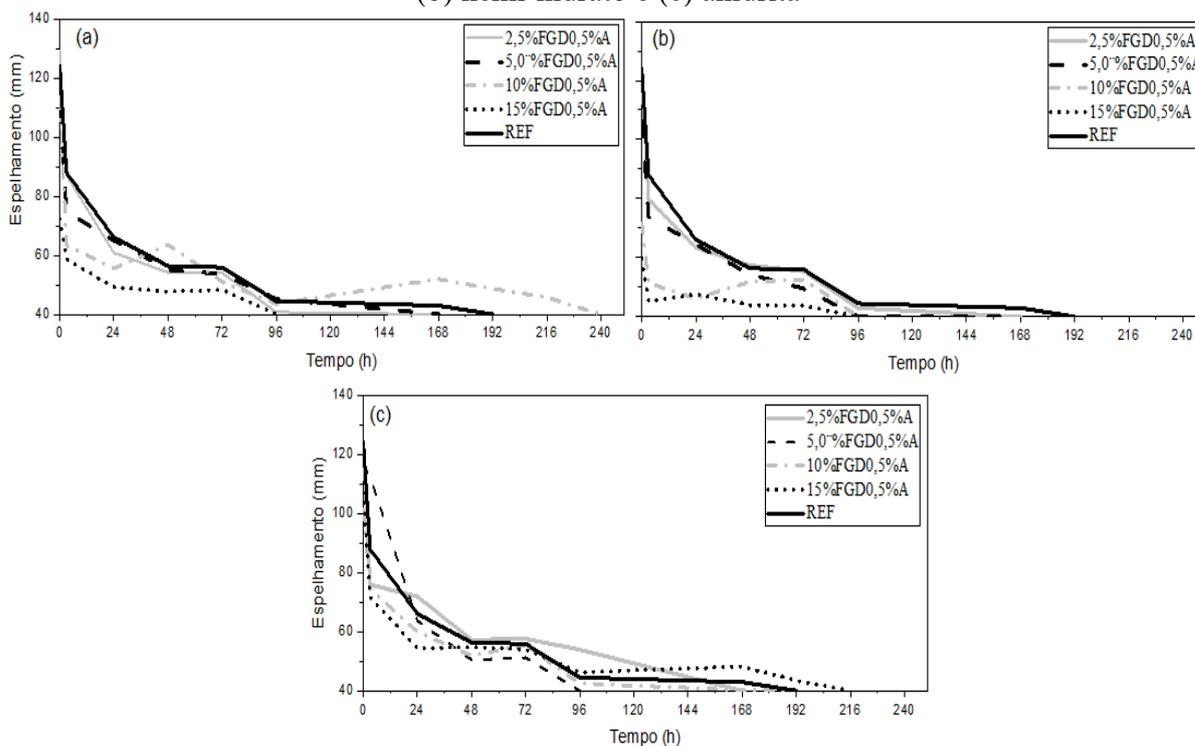
Figura 28 – Análise da incorporação de FGD após 72h em pastas com aditivo estabilizador de hidratação



Fonte: Autora (2023)

A Figura 29 mostra as medidas de espalhamento das pastas com 0,5% de aditivo estabilizador de hidratação e as três temperaturas de tratamento térmico do resíduo analisadas: di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita. O teor de 0,5% AEH foi selecionado por apresentar tempos de estabilização superiores a 72 horas, não necessitando de dosagens superiores para análise dos resultados de fluidez das pastas com FGD. Os resultados mostram que o FGD di-hidrato e hemi-hidrato apresentaram maior manutenção da fluidez nos menores teores de adição (2,5 e 5%) ao contrário da anidrita que apresentou maior manutenção da fluidez nos maiores teores (10 e 15%). Ainda, destaca-se que todos os teores de adição apresentam queda brusca da fluidez nas três primeiras horas e mantiveram a fluidez por mais de 72 horas.

Figura 29 – Medidas de espalhamento das pastas com 0,5% de aditivo e FGD (a) di-hidrato; (b) hemi-hidrato e (c) anidrita



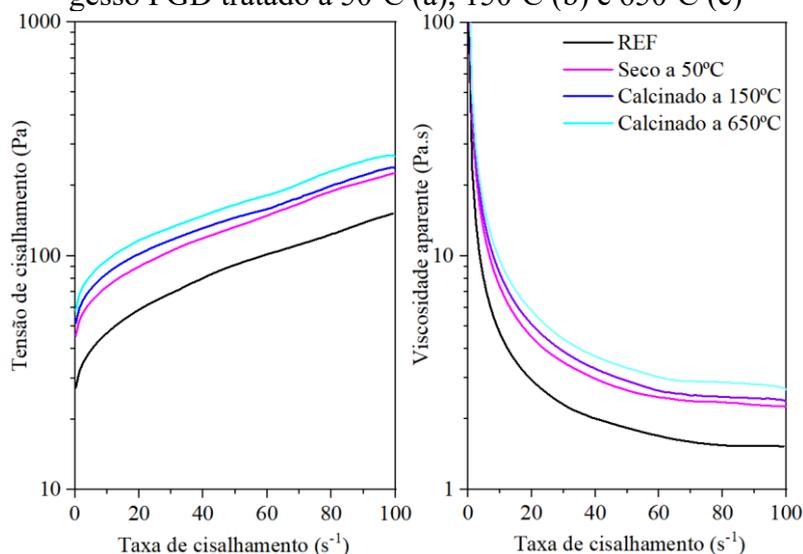
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.2. Estudo Reológico

Em um primeiro momento, o efeito da presença do gesso FGD e do seu tratamento térmico a 50°C, 150°C e 650°C nas propriedades reológicas das pastas foi avaliado de forma isolada nas misturas com ausência de aditivos. Após, o aditivo estabilizador de hidratação foi adicionado a análise como forma de observar o efeito conjunto do resíduo com o aditivo nas

pastas de cimento produzidas. A Figura 30 mostra as curvas de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento e viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento após 10 min do contato das partículas de cimento Portland com a água. Já Figura 31 mostra as pastas produzidas com o uso de aditivo estabilizador de hidratação após 10 min, 24, 48 e 72 horas do primeiro contato das partículas de cimento Portland com a água. Como pode ser observado nos gráficos apresentados, as pastas de cimento Portland avaliadas apresentaram curvas com o mesmo perfil, isto é, a adição de FGD e do aditivo estabilizador de hidratação não alterou o comportamento inicial das pastas. De modo geral, verifica-se que a viscosidade aparente varia com a taxa de cisalhamento, ou seja, as pastas analisadas apresentam comportamento não-newtoniano (WALLEVIK E WALLEVIK, 2011). Ainda, o decréscimo gradual da viscosidade aparente à medida que a taxa de cisalhamento aumenta pode ser observado. Tal comportamento pode ser definido como pseudoplástico ou shear-thinning (ROUSSEL, 2012). Por outro lado, alguns autores como YAHIA (2014) analisam o comportamento das curvas de fluxo não lineares por meio dos valores do índice pseudoplástico ( $n$ ) oriundos do modelo utilizado para descrever as curvas, sendo considerada uma mistura fluidificante se  $n < 1$  ou dilatante se  $n > 1$ . Isto posto, ao aplicar o modelo de Herschel – Bulkley na curva descendente, todas as pastas produzidas apresentaram  $n > 1$ , sendo caracterizadas como fluido dilatante como pode ser verificado na Tabela 22. Porém, como esses valores absolutos do índice pseudoplástico encontram-se próximos de 1, o comportamento dilatante é menos pronunciado nas curvas de fluxo apresentadas.

Figura 30 – Tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c)

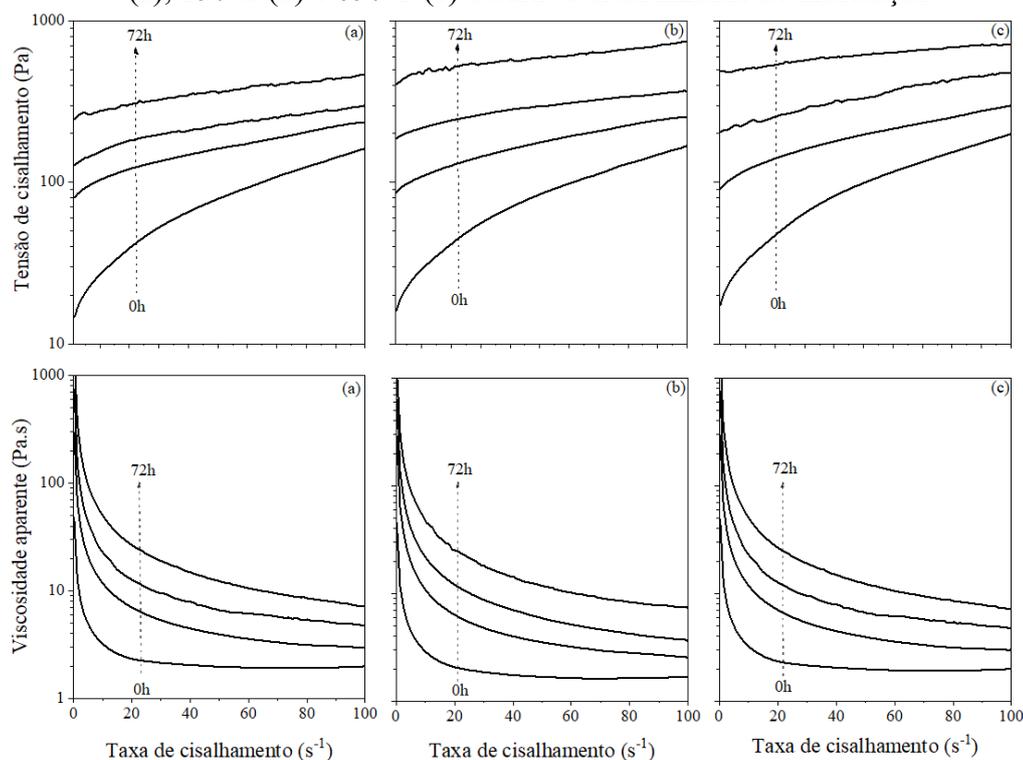


Fonte: Autora (2023)

Ao analisar a Figura 30 verifica-se que a tensão de cisalhamento aumenta com a presença do resíduo e de acordo com o tratamento térmico aplicado. A curva de tensão de cisalhamento das amostras com o resíduo seco e 50°C, calcinado a 150°C e calcinado a 650°C apresentou acréscimo de 48,57%, 56,69% e 76,12% quando comparados à mistura referência. Por apresentar menores valores de tensão de cisalhamento quando comparado às demais fontes de sulfato, infere-se que o FGD seco a 50°C (di-hidrato) favorece a fluidez e reduz o atrito interno entre as partículas. Esses resultados colaboram com os resultados iniciais obtidos na avaliação de fluidez.

As pastas com aditivo estabilizador de hidratação analisadas na sequência (Figura 31) mostram que ao longo do tempo a tensão de cisalhamento para as mesmas taxas de cisalhamento tendem a aumentar em todas as fontes de sulfato analisadas. Ainda, ao comparar os resultados das amostras com e sem aditivo, verifica-se que ocorreu redução da tensão de cisalhamento inicial das pastas na presença do aditivo como era esperado. A tensão de cisalhamento no tempo inicial reduziu aproximadamente 62,98%, 39,45%, 41,11% e 33,54% para as amostras REF, FGD seco e 50°C, calcinado a 150°C e a 650°C, respectivamente.

Figura 31 – Tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c) e aditivo estabilizador de hidratação; Viscosidade vs. taxa de cisalhamento nas pastas produzidas com gesso FGD tratado a 50°C (a), 150°C (b) e 650°C (c) e aditivo estabilizador de hidratação



Fonte: Autora (2023)

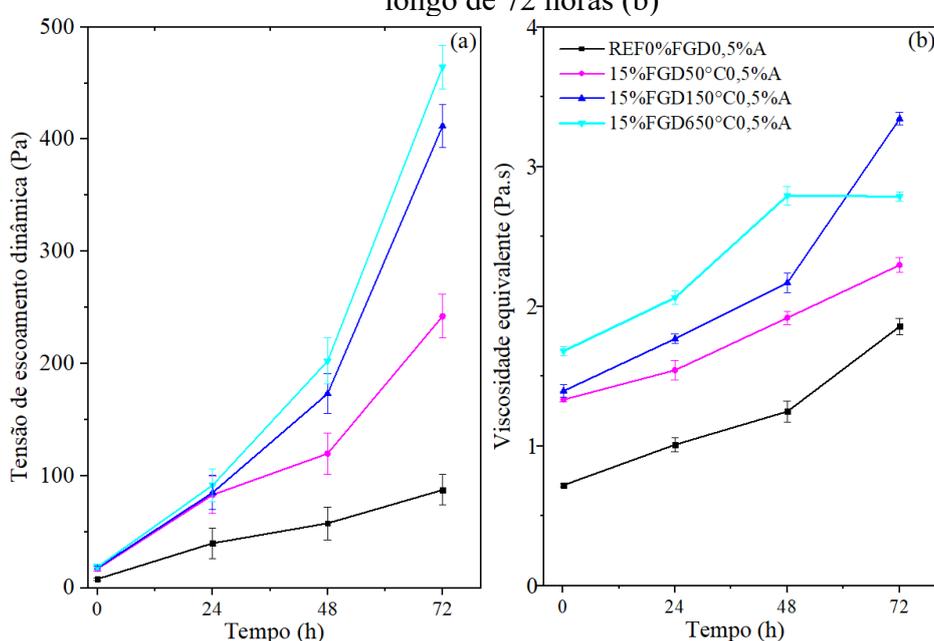
A Figura 32 apresenta a tensão de escoamento dinâmica das pastas de cimento obtidas ao longo de 72 horas após o primeiro contato das partículas de cimento com a água. No período correspondente à análise (10 minutos a 72 horas), a pasta referência apresentou um aumento de aproximadamente 91% na tensão de escoamento dinâmica. As pastas com adição de resíduo e aditivo apresentaram a mesma tendência, com acréscimos de 93% (15%FGD50°C0,5%A), 96% (15%FGD150°C0,5%A) e 96% (15%FGD650°C0,5%A). Entre 48 e 72 horas, as misturas com resíduo mostram um aumento brusco da tensão de escoamento de mais de 50% em todas as amostras analisadas. Tais resultados mostram que a tensão de escoamento aumenta gradativamente ao longo do tempo e com a presença de resíduo.

Conforme Marchon *et al.* (2018) a tensão de escoamento refere-se a tensão acima da qual o fluxo inicia e abaixo da qual termina. Ainda, conforme os autores, a tensão de escoamento pode ser relacionada com a trabalhabilidade das pastas de cimento. Isto posto, percebe-se que o di-hidrato (15%FGD50°C0,5%A) possui menor tensão de escoamento dinâmica e menor viscosidade equivalente comparado às demais misturas com resíduo. Assim, pode-se inferir que o mesmo apresenta maior fluidez ao longo do tempo que as demais pastas analisadas. Por outro lado, com a adição de resíduo nas pastas observa-se o aumento da tensão de escoamento, sendo a anidrita (15%FGD650°C0,5%A) a amostra com maior tensão de escoamento. Posto isto, o incremento dos valores de tensão de escoamento dinâmica ao longo do tempo pode ser um indicativo das reações que estão ocorrendo na pasta. Destaca-se ainda que os resultados corroboram com os valores de fluidez discutidos anteriormente.

A viscosidade descreve a resistência ao fluxo dos materiais, isto é, quanto maior a viscosidade, maior a resistência ao fluxo e a coesão da pasta de cimento (MARCHON, 2018; JIANG *et al.*, 2018). As pastas avaliadas apresentaram acréscimos na viscosidade equivalente com a incorporação do resíduo. Esse comportamento pode ser atribuído a incorporação de partículas finas que por apresentarem grande área superficial específica, resultam em maior adsorção de água às partículas, reduzindo a quantidade de água disponível na mistura para a “lubrificação” das partículas (DE LARRARD, SEDRAN, 2002; KLEIN *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015). Adicionalmente a isso, os resultados indicam que o tratamento térmico do resíduo afetou a viscosidade das pastas. O resíduo na forma de di-hidrato apresentou os menores valores de viscosidade, seguido pelo hemi-hidrato e anidrita. Isto também pode estar relacionado a finura do material obtida no tratamento térmico (Blaine 1962 cm<sup>2</sup>/g, 1819 cm<sup>2</sup>/g e 2326 cm<sup>2</sup>/g para respectivamente di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita).

A mistura 15%FGD50°C0,5%A, por exemplo, apresentou valores viscosidade inicial cerca de 4,5% e 26,32% menores que a mistura 15%FGD150°C0,5%A e 15%FGD650°C0,5%A, respectivamente. Ao comparar com a mistura referência os acréscimos são de 85%, 93,46% e 133,82% para o resíduo seco a 50°C, calcinado a 150°C e a 650°C. Ainda, ao longo do tempo observa-se aumento da viscosidade, com exceção do resíduo tratado a 650°C, o qual apresenta decréscimo da viscosidade no período compreendido entre 48 e 72 horas.

Figura 32 – Tensão de escoamento dinâmica das pastas de cimento com aditivo avaliadas ao longo de 72 horas (a); Viscosidade equivalente em 100 s<sup>-1</sup> das pastas de cimento avaliadas ao longo de 72 horas (b)



Fonte: Autora (2023)

A área de histerese das curvas de fluxo, apresentada na Tabela 22, foi determinada por meio da diferença entre as áreas das curvas de aceleração e desaceleração do gráfico de Tensão de cisalhamento vs Taxa de cisalhamento. De modo geral, a incorporação do resíduo promoveu aumento da área de histerese ao passo que as pastas com aditivo apresentaram valores de histerese menores nos tempos iniciais. Dessa forma, a dispersão das matrizes cimentícias com o resíduo reduziu. Observa-se ainda, que o modelo de H-B aplicado ajustou bem os dados, uma vez que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) variou de 0,9968 a 0,9997. As Figura 33, Figura 34 e Figura 35 mostram os valores das principais propriedades reológicas analisadas nas pastas de cimento em análise: a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade equivalente.

Ao comparar as pastas com e sem aditivo, nota-se redução da viscosidade aparente inicial. Tal comportamento também foi observado por autores como BESSAIRES-BEY *et al.*

(2016) e GUINDANI (2018) ao avaliarem argamassas com agente químico à base de gluconato de sódio. Os autores atribuíram esse comportamento a homogeneização das cargas iônicas da superfície das partículas ocasionada pela ação das moléculas orgânicas na matriz cimentícia.

Tabela 22 – Determinação dos coeficientes pelo modelo de Herschel – Bulkey e área de histerese

Composição	Tempo (h)	Herschel-Bulkey					Área de histerese (Pa.s)
		$\tau_0$ (Pa)	K	$\eta$	R <sup>2</sup>	$\mu$ (Pa.s)	
REF	0	34,36	1,12	1,00	0,9984	1,14	637,00
REF0,5%A	0	7,92	0,03	1,71	0,9994	0,72	147,30
	24	39,80	1,02	1,00	0,9969	1,01	736,70
	48	57,62	3,41	0,76	0,9986	1,25	925,50
	72	87,41	7,89	0,66	0,9997	1,86	925,50
15%FGD50°C	0	61,34	0,82	1,15	0,9986	1,56	806,70
15%FGD150°C	0	68,05	1,12	1,09	0,9966	1,63	770,20
15%FGD650°C	0	77,81	1,20	1,10	0,9968	1,86	1267,00
15%FGD50°C0,5%A	0	17,03	0,60	1,19	0,9994	1,33	425,90
	24	83,07	2,19	0,92	0,9977	1,54	1203,00
	48	119,80	7,22	0,69	0,9981	1,92	682,80
	72	242,20	5,50	0,79	0,9976	2,30	2002,00
15%FGD150°C0,5%A	0	17,75	0,74	1,15	0,9994	1,39	436,60
	24	85,07	2,80	0,89	0,9995	1,77	1636,00
	48	173,30	9,88	0,64	0,9995	2,17	1929,00
	72	411,90	10,14	0,74	0,9889	3,34	2599,00
15%FGD650°C0,5%A	0	18,63	0,93	1,14	0,9995	1,68	685,60
	24	91,59	2,98	0,91	0,9986	2,06	1872,00
	48	202,30	2,36	1,04	0,9982	2,79	4074,00
	72	464,50	7,05	0,78	0,9973	2,79	2947,00

Fonte: Autora (2023)

Figura 33 – (a) Tensão de escoamento dinâmica e (b) Viscosidade equivalente das pastas REF, 15%FGD50°C, 15%FGD150°C e 15%FGD650°C

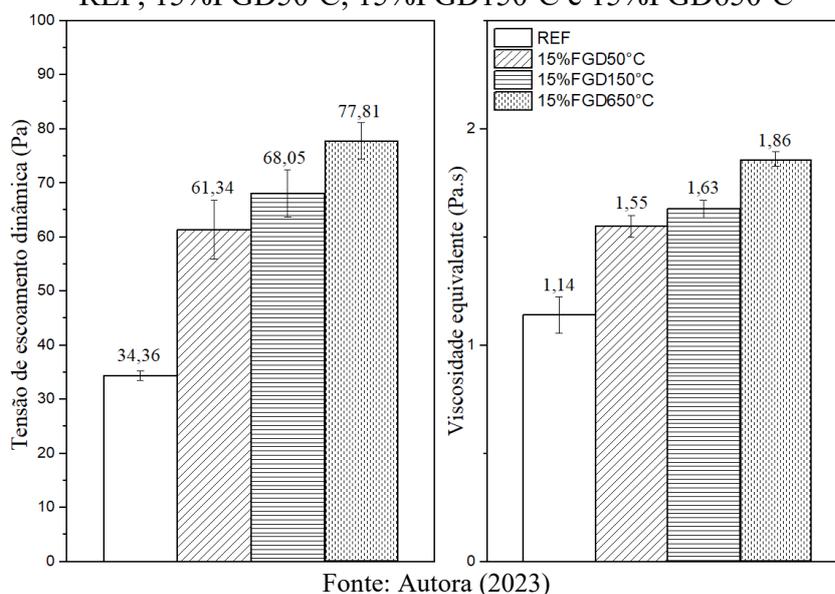
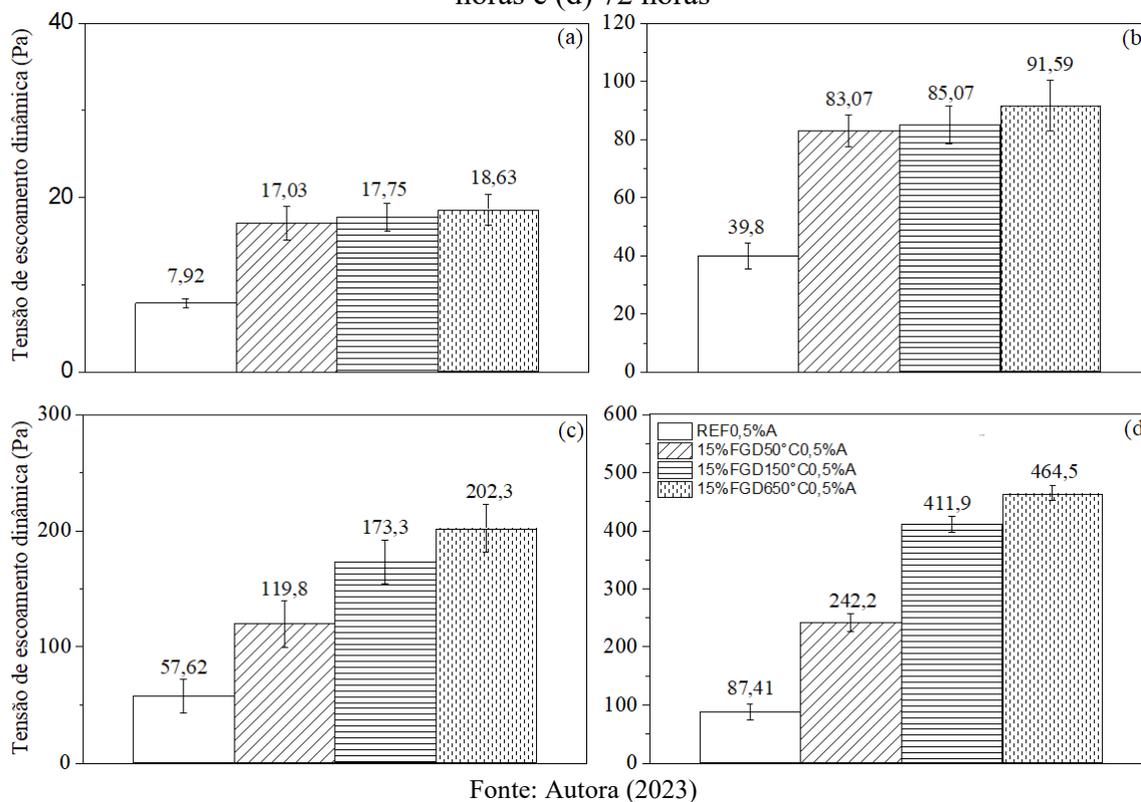


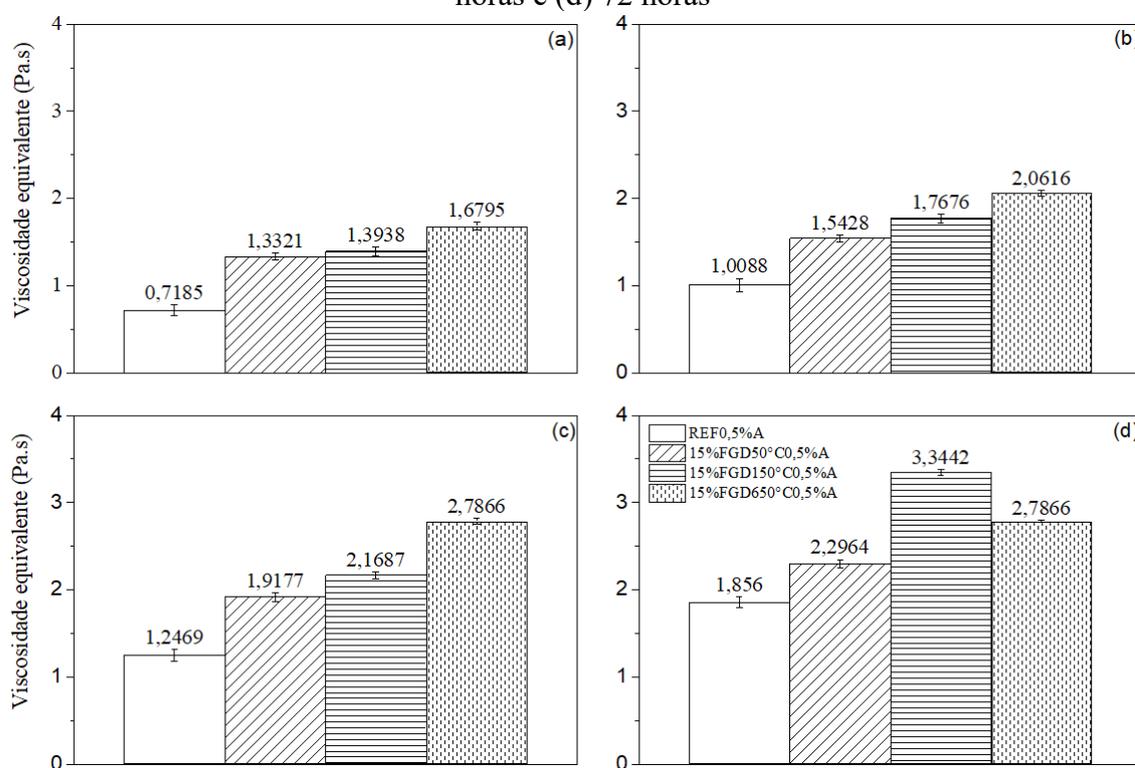
Figura 34 – Tensão de escoamento dinâmica das pastas REF, 15%FGD50°C0,5%A, 15%FGD150°C0,5%A e 15%FGD650°C0,5%A nós tempos de (a) 0 horas (b) 24 horas (c) 48 horas e (d) 72 horas



A Figura 35 mostra que à medida que o tempo de estabilização aumenta, a viscosidade também aumenta. Ao comparar com os dados de fluidez nas pastas que apresentaram uma

tendência redução lenta da fluidez ao longo do tempo, os resultados indicam que as reações de hidratação ocorrem de forma lenta. Ademais, a presença do resíduo aumenta a viscosidade, o que pode estar relacionado a um travamento interno entre as partículas. Adicionalmente a isso, os valores de viscosidade equivalente das pastas com di-hidrato foram os menores em relação às demais amostras com resíduo. Dessa forma, sugere-se que o mesmo contribui positivamente para o processo de estabilização.

Figura 35 – Viscosidade equivalente das pastas REF, 15%FGD50°C0,5%A, 15%FGD150°C0,5%A e 15%FGD650°C0,5%A nos tempos de (a) 0 horas (b) 24 horas (c) 48 horas e (d) 72 horas



Fonte: Autora (2023)

Em 72 horas, observa-se que o hemi-hidrato (15%FGD150°C) apresenta o maior valor de viscosidade equivalente. Este resultado pode ser atribuído a taxa de dissolução mais rápida do hemi-hidrato, que favorece a geração de etringita mais rapidamente durante o processo de hidratação e, dessa forma, aumenta a viscosidade aparente da pasta. (TORRÉNS-MARTÍN; FERNÁNDEZ-CARRASCO, 2013; ZHANG *et al.*, 2018; BARBOSA; RAMALHO; PORTELLA, 2018).

### 5.1.3 Cinética de hidratação

A Figura 36 apresenta as curvas de liberação de calor das pastas analisadas sem aditivo, enquanto a Figura 37 apresenta as curvas com a presença do aditivo estabilizador de hidratação. Quatro estágios típicos da reação de hidratação podem ser identificados nas curvas de fluxo de calor obtidas (Figura 36): (i) período inicial que ocorre nos primeiros minutos após o contato com a água (ii) período de indução, (iii) período de aceleração e (iv) período de desaceleração no qual ocorre a redução da taxa de reação (SCRIVENER *et al.*, 2019). É geralmente aceito que a pega ocorre no período de aceleração (HU, GE E WANG, 2014).

A Figura 38, por sua vez, mostra o calor acumulado (ou total) liberado pelas amostras ao longo do tempo. O grau de hidratação do cimento Portland, calculado por meio da razão do calor evoluído em um momento e o calor total de hidratação do cimento (BETIOLI; SILVA; PILEGGI, 2009), pode ser observado na Tabela 23, assim como o resumo dos resultados de calorimetria obtidos.

De modo geral, ao observar o comportamento das amostras sem e com aditivo nas curvas de liberação de calor, verifica-se que a presença do resíduo diminuiu os picos de liberação de calor principal em todas as pastas e reduziu grau de hidratação, o que sugere a ocorrência de uma reação de hidratação mais lenta e prolongada, corroborando com as análises já reportadas para este material (Guo e Shi, 2008; Zhang, Pan e Wu, 2016). O pico principal de calor diminuiu de 2,82 mW/g (REF) para até 2,38 mW/g (15%FGD50C) nas pastas sem aditivo, e foi prorrogado de 3,6 horas para 4,55 horas. A mesma tendência de redução do pico de calor foi observada nas pastas com aditivo, o pico principal diminuiu de 2,53 mW/g (REF0,5%A) para 1,43 mW/g (15%FGD150C0,5%A), e o tempo de início de pega foi prorrogado de 119 horas para 272 horas. De modo geral, o retardo, resultado da presença de íons sulfatos disponíveis durante a hidratação nas misturas com resíduo, foi menos perceptível nas pastas sem aditivo. Nestas amostras, verificou-se um incremento de aproximadamente 2 horas em comparação à mistura referência. Já nas pastas com aditivo, a amostra 15%FGD150C0,5%A (FGD hemi-hidrato) apresentou um aumento de cerca de 153 horas quando comparado a mistura referência.

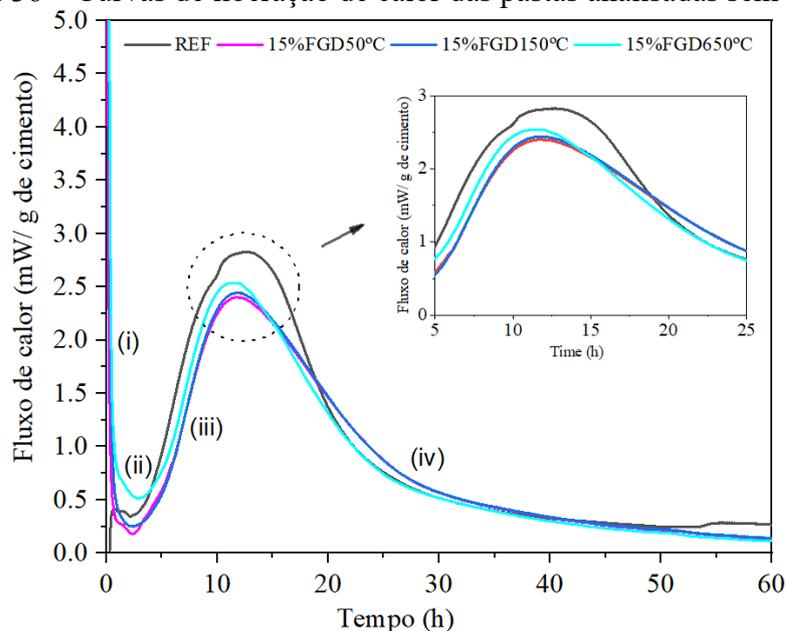
Tabela 23 – Resumo dos resultados obtidos por calorimetria isotérmica

Amostra	Tempo de início de pega (h)	Pico principal (mW/g)	Calor total acumulado (J/g)	Grau de hidratação após 325 horas (%)	DT (h)
REF	3,6	2,82	242	76,58	9
REF0,5%A	119	2,53	253	80,06	9
15%FGD50C	4,55	2,38	208	65,82	7,25
15%FGD150C	4,60	2,42	221	69,93	7,3
15%FGD650C	4,65	2,57	215	68,03	6,85
15%FGD50C0,5%A	237	1,81	210	66,45	12,5
15%FGD150C0,5%A	272	1,43	190	60,32	15
15%FGD650C0,5%A	218,5	1,39	218	68,99	19

Fonte: Autora (2023)

Ao comparar as três fases de sulfato de cálcio obtidas por tratamento térmico, observam-se picos de calor próximos ao das pastas sem aditivo, sendo todos menores do que a mistura referência. Ademais, os resultados estão de acordo com as alterações no grau de hidratação. Isto é, a adição de resíduo diminuiu o grau de hidratação do cimento Portland, retardando a hidratação do mesmo.

Figura 36 – Curvas de liberação de calor das pastas analisadas sem aditivo

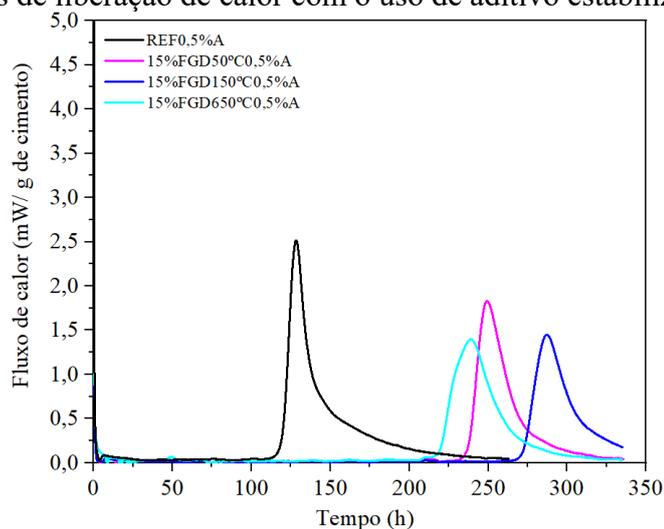


Fonte: Autora (2023)

As misturas com adição de aditivo mostraram maior influência do resíduo ao longo do tempo (Figura 37). Ademais, quanto ao prolongamento do tempo de pega, o aditivo a base de moléculas orgânicas mostrou-se compatível na matriz cimentícia proposta. Ainda, ao comparar as misturas, observa-se que o resíduo na forma di-hidrato, apresentou os menores tempos de

início de pega dentre as amostras, assim como os maiores picos de temperatura. Tal resultado sugere que o di-hidrato na matriz cimentícia aumenta a reatividade das pastas. No entanto, ao ser comparado com a mistura referência a adição do resíduo reduz a reatividade inicial, sendo favorável ao processo de estabilização.

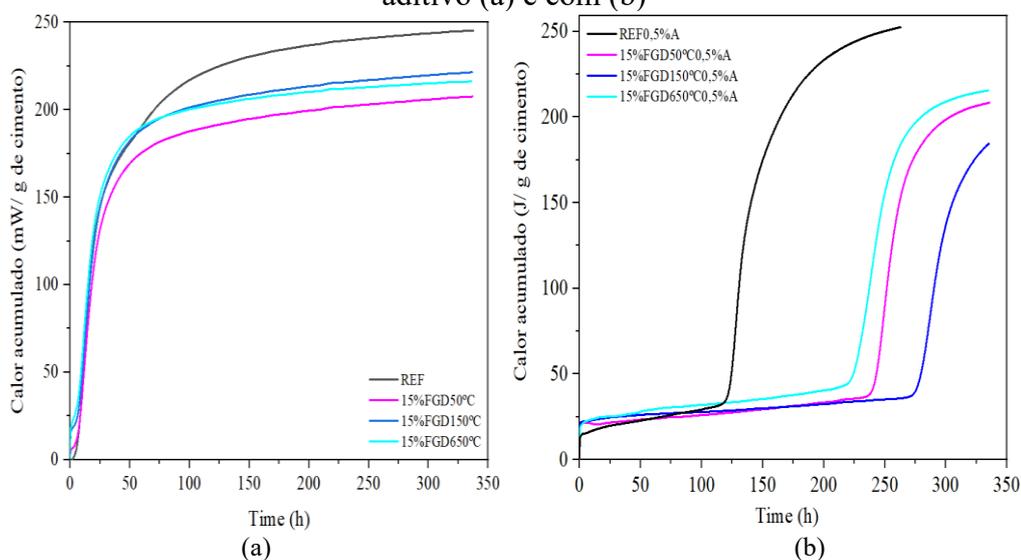
Figura 37 – Curvas de liberação de calor com o uso de aditivo estabilizador de hidratação



Fonte: Autora (2023)

Dentre as composições avaliadas, é evidente que existe uma tendência de redução do calor acumulado na presença de resíduo, o que possivelmente está relacionado com redução do grau de hidratação das matrizes cimentícias (Figura 38).

Figura 38 – Calor acumulado (ou total) liberado pelas amostras ao longo do tempo sem aditivo (a) e com (b)



Fonte: Autora (2023)

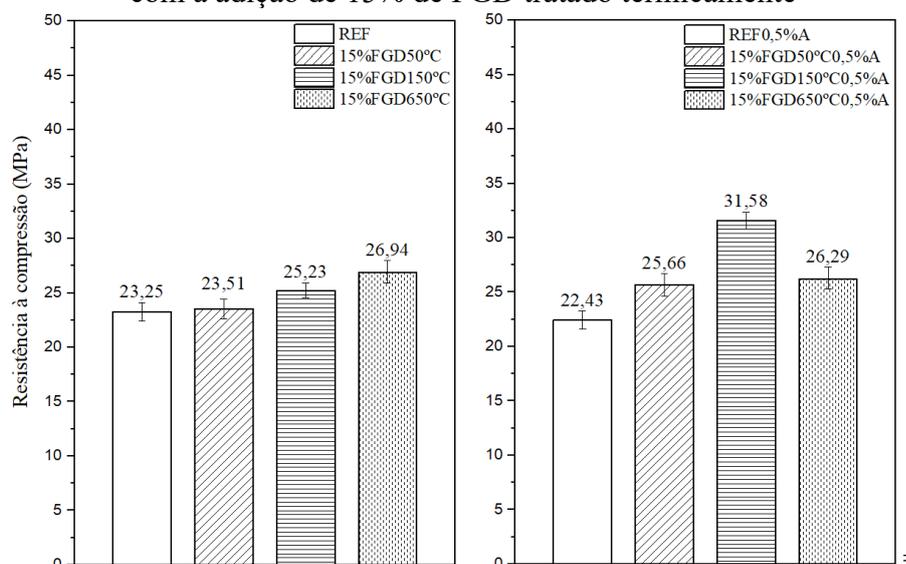
#### 5.1.4 Resistência à compressão

A Figura 39 contém os resultados de resistência à compressão das pastas de cimento Portland avaliadas aos 28 dias com a adição de 15% de FGD tratado termicamente em diferentes temperaturas. A barra de erros corresponde ao desvio padrão  $\pm 1$ . No período avaliado, observam-se ganhos de resistência das pastas com resíduo em relação à pasta referência. Tais resultados corroboram com a literatura onde o efeito da adição do resíduo em matrizes cimentícias resulta em valores de resistência mais altos (LEI *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018; TYMOTIE; CHANG; NGUYEN, 2020). Dentre as razões pelas quais a resistência à compressão aumentou pode-se citar a finura e as impurezas do gesso FGD, a exemplo do  $\text{CaCO}_3$  que tende a melhorar a estrutura do cimento endurecido (CONG e GONG, 1997; GUO e SHI, 2008).

Adicionalmente a isso, as pastas com a presença de aditivo apresentaram os maiores valores de resistência. Uma possível explicação para esse resultado é que o agente químico utilizado pode ter atuado como incorporador de ar às pastas como referido no estudo de Antoniazzi *et al.* (2020), no qual os autores verificaram a ação do aditivo estabilizador de hidratação em pastas de cimento Portland e demonstraram que o mesmo pode incorporar ar as pastas.

Em contrapartida, verifica-se que não ocorreu uma tendência dos resultados quanto à fonte de sulfato. Na presença de aditivo, o hemi-hidrato apresentou acréscimo de resistência de cerca de 40,80% em relação a mistura referência ao passo que nas pastas sem aditivo, a anidrita exibiu o maior valor de resistência, aproximadamente 15,90% em relação a mistura referência sem aditivo. Tais resultados podem ser atribuídos a dois fatores associados: a taxa de dissolução das fontes de sulfato e o mesmo tempo de avaliação das pastas (28 dias após a moldagem). Isto é, a hidratação do cimento Portland é influenciada pela taxa de dissolução das fontes de sulfato incorporada à matriz cimentícia. Por exemplo, o hemi-hidrato possui uma taxa de dissolução mais rápida (9,0 g/L) do que a anidrita (2,1 g/L) e por esse motivo favorece a geração de etringita mais rapidamente e tem influência no aumento de resistência inicial ao contrário da anidrita que apresenta incremento de resistência após 28 dias por ser menos solúvel que o aluminato (TZOUVALAS; DERMATAS; TSIMAS, 2004).

Figura 39 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland avaliadas aos 28 dias com a adição de 15% de FGD tratado termicamente



Fonte: Autora (2023)

De maneira análoga às propriedades mecânicas obtidas no ensaio de compressão axial aos 28 dias, ocorreu aumento do módulo de elasticidade em todas as pastas com adição do resíduo (Tabela 24). Isso indica o aumento da rigidez das pastas e a menor capacidade de deformação, ocasionando o aumento de fissuras quando submetida a tensões (JESUS *et al.*, 2019).

Tabela 24 – Módulo de elasticidade das pastas

Amostra	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
REF	14,12 ± 0,5
REF0,5%A	13,93 ± 0,2
15%FGD50°C	14,13 ± 0,3
15%FGD150°C	14,46 ± 0,4
15%FGD650°C	14,18± 0,9
15%FGD50°C0,5%A	14,19± 0,3
15%FGD150°C0,5%A	14,76 ± 0,6
15%FGD650°C0,5%A	14,55± 0,3

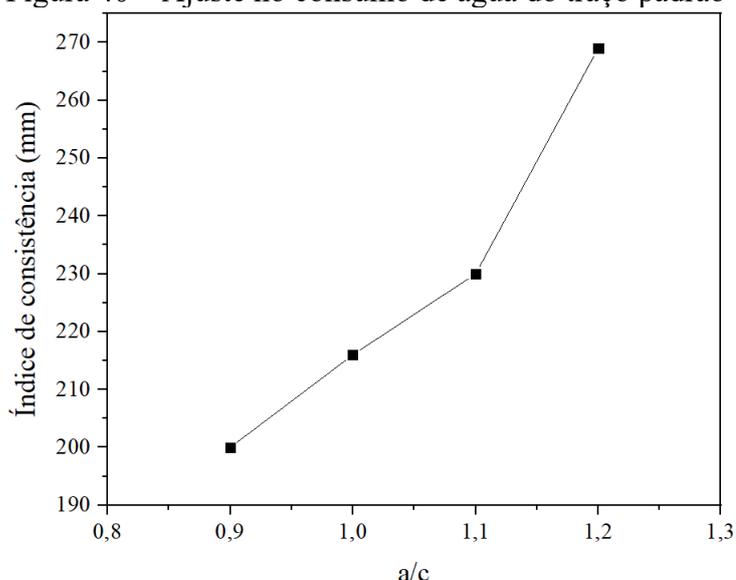
Fonte: Autora (2023)

## 5.2. ESTUDO EM ARGAMASSAS

### 5.2.1 Estudos preliminares em argamassa estabilizada

Foram utilizadas as três composições químicas do FGD e teores de adição do FGD de 0%, 2,5% e 15% para produzir as argamassas estabilizadas. Esses teores foram selecionados por apresentarem maior influência na fluidez das pastas. O agregado miúdo empregado seguiu a proporção de 6:1 (areia:FGD). Para o ajuste do consumo de água da mistura foram definidos teores de aditivos usuais verificados na literatura (0,3% aditivo incorporador de ar e 1% aditivo estabilizador de hidratação). O parâmetro estabelecido foi o espalhamento inicial de  $270 \pm 10$  mm e a relação a/c inicial foi de 0,9 com acréscimos de 0,1. A relação a/c selecionada foi 1,2, obtendo um índice de espalhamento de 269 mm como pode ser verificado na Figura 40.

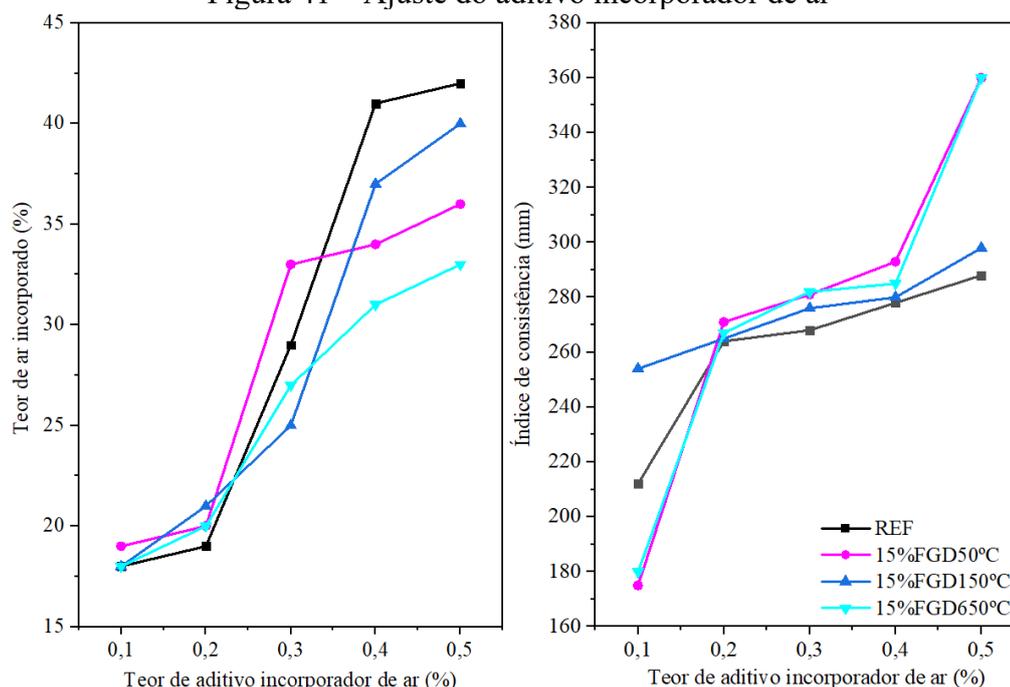
Figura 40 – Ajuste no consumo de água do traço padrão



Fonte: Autora (2023)

Após ajustar a relação água/aglomerante da mistura, definiu-se o teor de ar incorporado. Para tanto, fixou-se o aditivo estabilizador de hidratação em 1%, o teor de gesso FGD em 15% e a relação a/c em 1,2, conforme estabelecido anteriormente. O incorporador de ar foi testado nos teores sugeridos pelo fabricante, em doses de 0,1% até 0,5%, seguidas de medições do teor de ar incorporado. Esse procedimento foi realizado nas três composições químicas do gesso FGD em estudo e em mistura referência como pode ser observado na Figura 41.

Figura 41 – Ajuste do aditivo incorporador de ar



Fonte: Autora (2023)

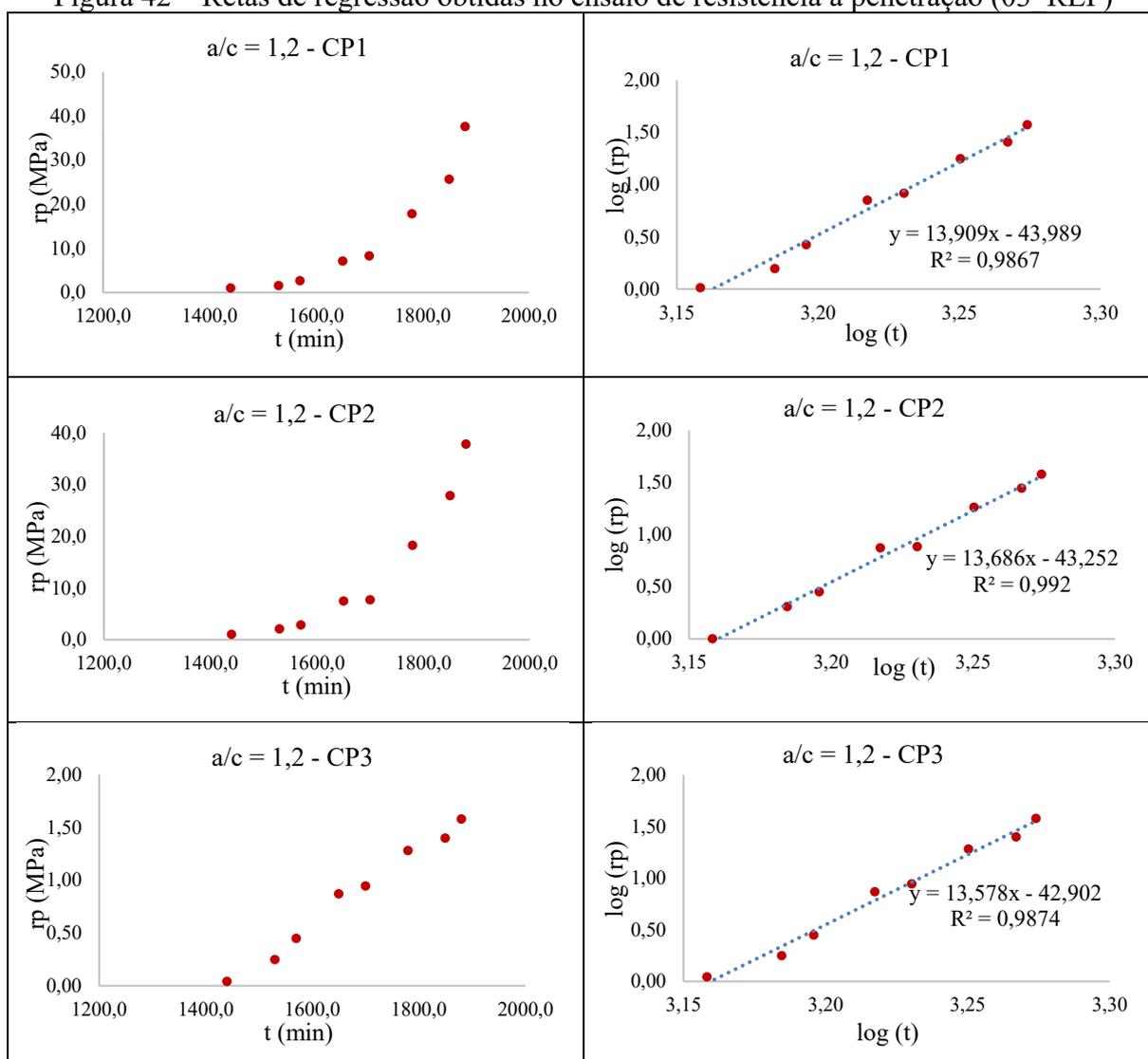
Com os resultados apresentados na Figura 41 é possível observar que o teor de ar incorporado com a adição do gesso FGD nos menores teores de aditivo não apresentou alterações significativas. Com a incorporação de 0,2% do aditivo, foi possível obter teores de ar incorporado de até 20% e índice de espalhamento médio dentro do fixado inicialmente variando de 264 a 271 mm, considerado viável ao estudo com base na literatura.

### 5.2.2. Ajuste dos tempos de pega

O ensaio de resistência à penetração foi realizado com o intuito de determinar os tempos de início e fim de pega em cada mistura de argamassa. Este ensaio foi realizado conforme os procedimentos da NBR NM 9 (ABNT, 2003) e os resultados foram obtidos por meio de método analítico apresentado na normativa.

Na Figura 42 é possível observar graficamente as curvas de desenvolvimento da resistência à penetração nos três corpos de prova ensaiados para a mistura referência com 0,3% de AEH (03\_REF) bem como as retas de regressão obtidas por meio do desenvolvimento da resistência à penetração na mistura referência. A temperatura ambiente no dia do ensaio foi de 25,7°C. Os resultados obtidos por meio das retas de regressão podem ser observados nas Tabelas 25 e 26. No ANEXO A estão apresentadas todas as retas de regressão obtidas no ensaio.

Figura 42 – Retas de regressão obtidas no ensaio de resistência à penetração (03 REF)



Fonte: Autora (2023)

Embora a NBR NM 9 (ABNT, 2003) indique que devem ser adotados como início e fim de pega os valores médios dos resultados individuais arredondados para valores múltiplos de cinco minutos, neste estudo foram adotados os valores médios sem arredondamento com o intuito de ter melhor exatidão na análise dos tempos de pega e na definição da dosagem do aditivo estabilizador de hidratação.

A aplicação deste método foi válida ao considerar que todas as retas de regressão obtidas na análise possuíam coeficiente de correlação ( $R^2$ ) maior ou igual a 0,98. Esta condição de utilização do método é estabelecida pela normativa utilizada. Os demais gráficos de desenvolvimento de resistência à penetração das argamassas em estudo bem como as retas de regressão estão apresentados no ANEXO A. Dessa forma, por meio das retas de regressão e

baseados na Equação 4 com os coeficientes obtidos para cada amostra, foi possível determinar os tempos de início e fim de pega. Na Tabela 25 estão descritos os resultados individuais de tempo de início de pega e fim de pega para cada mistura analisada.

Tabela 25 – Resultados individuais e média dos tempos obtidos no ensaio para o início de pega (0,3% AEH)

Mistura	CP1 (min)	CP2 (min)	CP3 (min)	Média (min)	Tempo (h:min)
Início de pega					
REF	1591	1585	1584	1587	26:27
03_D_025	2798	2745	2721	2755	45:55
03_D_15	4383	4370	4376	4376	72:56
03_H_025	2815	2729	2731	2758	45:58
03_H_15	4461	4463	4455	4460	74:20
03_A_025	2682	2669	2666	2672	44:32
03_A_15	4162	4149	4162	4158	69:18
Fim de pega					
REF	1846	1843	1844	1844	30:44
03_D_025	3241	3245	3091	3192	53:12
03_D_15	4791	4771	4831	4798	79:58
03_H_025	3248	3164	3156	3189	53:09
03_H_15	27,6	4749	4742	4739	82:09
03_A_025	3156	3157	3140	3151	52:31
03_A_15	4639	4611	4625	4625	77:50

Fonte: Autora (2023)

A Tabela 26 apresenta um resumo dos tempos de início, tempo de fim de pega e duração da pega (diferença entre o tempo de início e fim) em cada mistura da argamassa com dosagem de 0,3% aditivo estabilizador de hidratação.

Tabela 26 – Tempos obtidos no ensaio de resistência à penetração de início, fim e duração de pega

Mistura	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Duração de pega (h:m)
REF	1587	1844	4:17
03_D_025	2755	3192	7:17
03_D_15	4376	4798	7:20
03_H_025	2758	3189	7:11
03_H_15	4454	4739	7:53
03_A_025	2672	3151	7:58
03_A_15	4158	4625	7:47

Fonte: Autora (2023)

O uso de 0,3% de aditivo estabilizador de hidratação sem a incorporação do gesso FGD permite a utilização da argamassa em até 24 horas. Com o aumento da incorporação do resíduo, observa-se uma tendência do aumento do tempo para o início de pega das argamassas.

Tal comportamento também foi observado nas pastas. Todavia, embora ocorra um aumento de até 72 horas com a adição de 15% de FGD, a trabalhabilidade das pastas foi afetada ao longo do tempo como pode ser verificado na Tabela 27, o que inviabiliza a sua aplicação em tempos superiores a 48 horas por apresentar espalhamento inferior a 180 mm. Este critério foi usado para considerar a argamassa estabilizada ainda utilizável, com base no estudo de Guindani (2018). As pastas com 15% de FGD apresentam espalhamento superior a 180 mm, considerado adequado para a utilização.

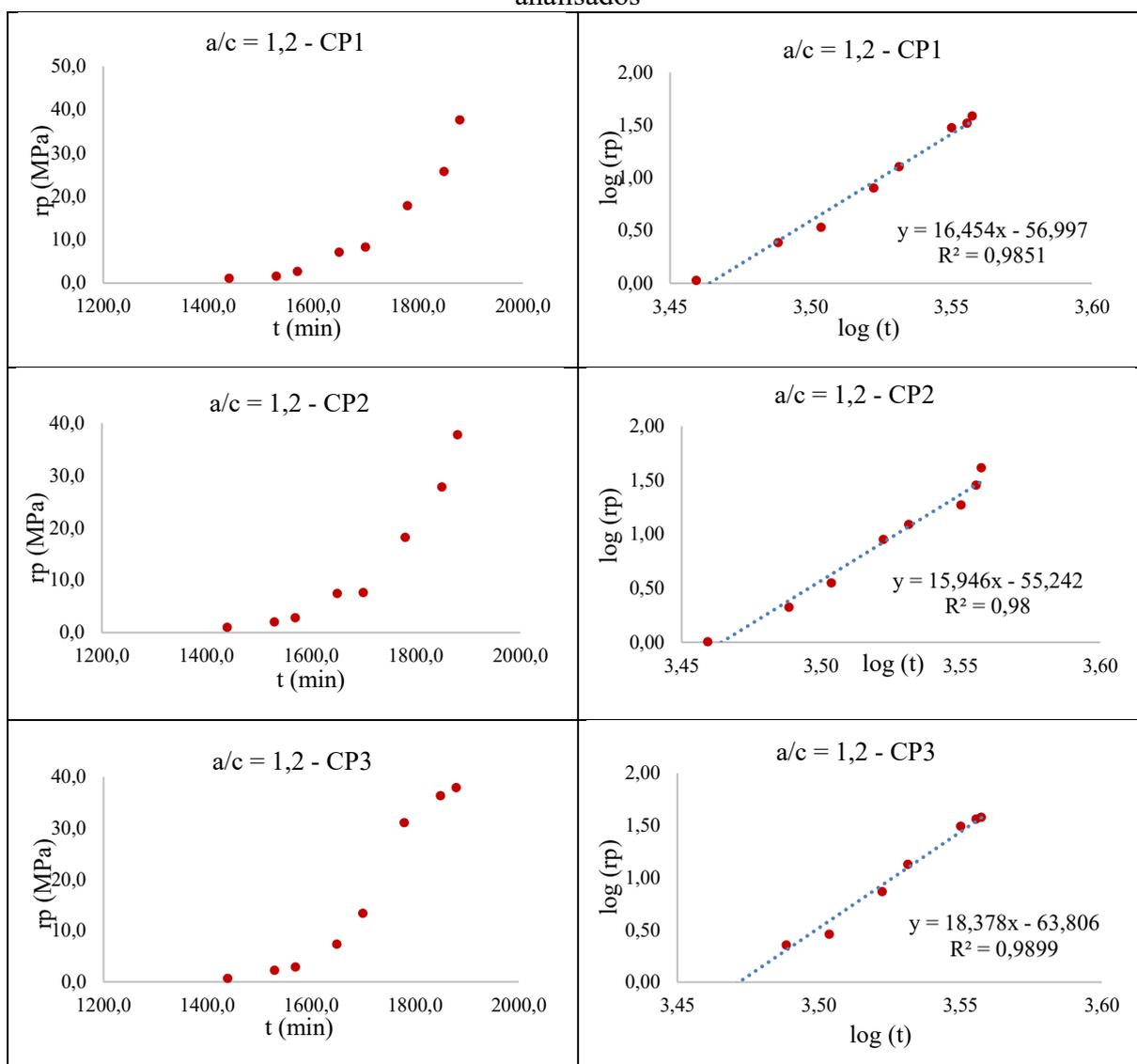
Tabela 27 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,3% de aditivo

<b>Mistura</b>	<b>0 horas</b>	<b>24 horas</b>	<b>48 horas</b>	<b>72 horas</b>
REF	268	245	Endureceu	Endureceu
03_D_025	269	249	Endureceu	Endureceu
03_D_15	261	254	193	150
03_H_025	264	245	Endureceu	Endureceu
03_H_15	260	250	186	156
03_A_025	265	246	Endureceu	Endureceu
03_A_15	262	248	182	151

Fonte: Autora (2023)

Dessa forma, o teor de aditivo estabilizador de hidratação de 0,6% foi testado como forma de obter tempos de estabilização superiores a 72 horas. Esse teor foi utilizado pelo mesmo ensaio nas amostras referência e com teor máximo de gesso FGD de 15%, como forma de avaliar o aumento do período de indução e analisar a manutenção da trabalhabilidade ao longo do tempo das argamassas produzidas. Os menores teores de adição de FGD não foram avaliados neste ensaio por apresentarem menor influência no aumento do tempo de pega no estudo em pasta. Na Figura 43 verifica-se graficamente as curvas de desenvolvimento da resistência à penetração nos três corpos de prova ensaiados para a mistura referência com 0,6% de AEH (REF) e mostra os gráficos das retas de regressão obtidas por meio do desenvolvimento da resistência à penetração.

Figura 43 – Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura referência nos três corpos de prova ensaiados (0,6% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



Fonte: Autora (2023)

Os resultados individuais do tempo de início de pega e do tempo de fim de pega para cada mistura analisada com 0,6% de AEH estão descritos na Tabela 28. O índice de consistência ao longo do tempo pode ser observado na Tabela 29.

Tabela 28 – Resultados individuais e média dos tempos obtidos no ensaio para o início de pega com 0,6% AEH

Mistura	CP1 (min)	CP2 (min)	CP3 (min)	Média (min)	Tempo (h:min)
Início de pega					
06 REF	3141	3151	3173	3155	52:35
06 D 15	4612	4612	4627	4617	76:59
06 H 15	4616	4624	4629	4623	77:30
06 A 15	4567	4568	4599	4578	76:18
Fim de pega					
06 REF	3561	3587	3550	3566	59:26
06 D 15	5108	5133	5090	5110	85:10
06 H 15	5069	5099	5074	5081	84:41
06 A 15	4861	4869	4862	4864	81:40

Fonte: Autora (2023)

Tabela 29 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,6% de aditivo

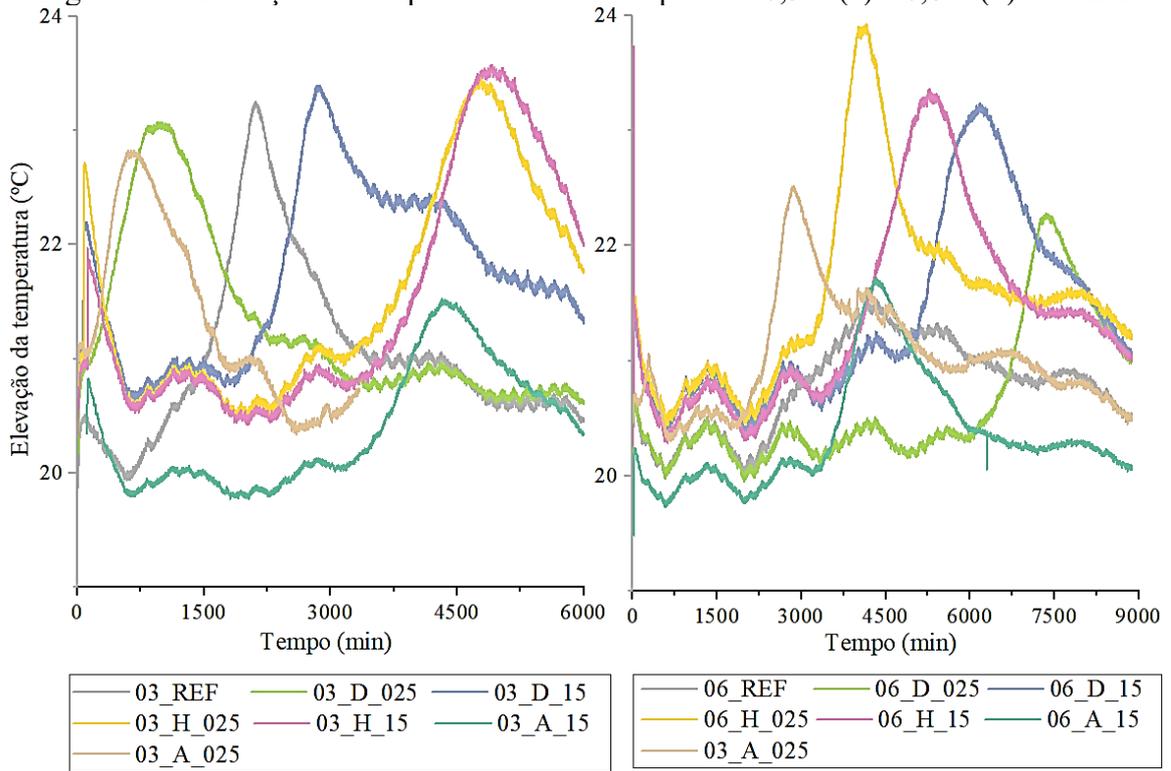
Mistura	0 horas	24 horas	48 horas	72 horas
REF	274	225	195	Endureceu
06 D 15	270	254	212	197
06 H 15	267	223	197	189
06 A 15	263	237	208	184

Fonte: Autora (2023)

Após a verificação dos tempos de pega pelo método de resistência a penetração, a cinética de hidratação das amostras também foi avaliada por calorimetria semi-adiabática. Com os resultados, foram produzidos gráficos da temperatura de cada amostra pelo tempo (Figura 44) com a finalidade de determinar os tempos de início de pega das amostras. Para tanto, foi traçada uma reta tangente paralela à subida da curva de temperatura. O ponto de intersecção entre a reta e o eixo x é considerado o ponto de início de pega. A partir deste parâmetro, pode-se calcular o tempo de duração, tempo decorrido entre o início da pega, e o momento em que a curva atinge o seu pico máximo, considerado o tempo de duração efetivo da reação.

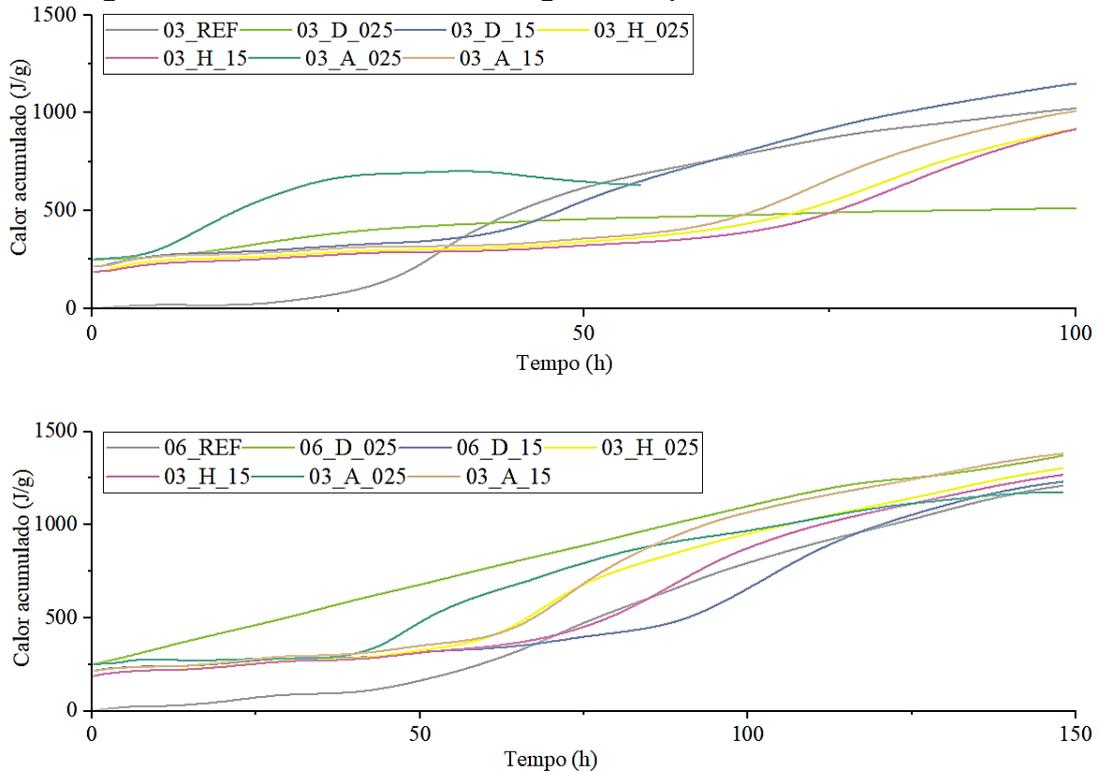
A Figura 45, por sua vez, apresenta o calor acumulado das amostras ao longo do tempo. A Tabela 30 apresenta a capacidade térmica e os tempos de início de pega das argamassas analisadas. Ressalta-se que as amostras 03\_D\_15, 03\_D\_025 e 03\_A\_025 foram ensaiadas no calorímetro após 49 horas da sua produção. As mesmas foram mantidas em ambiente controlado ( $23\pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $60\pm 5\%$ ) na sala de realização do ensaio, armazenadas em recipientes herméticos e inseridas em caixas de isopor para não ocorrer variação da temperatura. As demais amostras com 0,3% de AEH foram ensaiadas após 10 minutos de sua produção. As amostras com 0,6% de AEH foram ensaiadas após 24 horas no calorímetro.

Figura 44 – Elevação da temperatura versus tempo com 0,3% (a) e 0,6% (b) de AEH



Fonte: Autora (2023)

Figura 45 – Calor acumulado ao longo do tempo com 0,3% e 0,6% AEH



Fonte: Autora (2023)

Tabela 30 – Resultados do ensaio de calorimetria semi-adiabática das argamassas estabilizadas

Argamassa/ Composição	Capacidade térmica - Cs (J/K)	Início de pega (h: min)	T.max (°C)	T.máx (h)	DT (h)
03_REF	680,68	21:55	23.45	35,25	13,33
03_D_025	816,03	52:00	23.08	65,50	13,50
03_D_15	706,31	85:20	23.37	96,67	11,33
03_H_025	583,36	60:45	23.34	79,67	18,92
03_H_15	663,47	63:25	23.62	81,50	18,08
03_A_025	536,23	52:25	22.78	59,67	7,25
03_A_15	588,05	57:48	21.49	74,75	17,67
06_REF	706,4	61:30	21.50	98,08	36,58
06_D_025	662,19	123:30	22.25	133,83	10,33
06_D_15	704,63	107:30	23.47	121,83	14,33
06_H_025	684,26	89:25	23.75	99,42	10,00
06_H_15	702,81	92:35	23.38	112,00	19,42
06_A_025	671,02	78:25	22.51	86,75	8,33
06_A_15	671,48	91:55	21.69	102,33	10,42

Fonte: Autora (2023)

Com os resultados apresentados na Tabela 30, observa-se que o uso do gesso FGD proporcionou o aumento do tempo de início de pega de todas as misturas avaliadas em comparação a referência. Com o aumento da porcentagem do aditivo ocorreu o aumento do tempo de início de pega, que variou de 21:55 (horas: minutos) para a argamassa com 0,3% de AEH para 61:30 (horas: minutos) para a argamassa com 0,6% de aditivo. Os resultados obtidos por resistência à penetração apresentaram a mesma tendência (Tabela 26 e 28), onde ocorreu um aumento de 26:27 (horas:minutos) para 52:35 (horas:minutos) com o acréscimo de aditivo.

Ainda, o acréscimo do teor do gesso FGD de 2,5% para 15% aumentou o tempo de início de pega em todas as misturas, com exceção das misturas 06\_D\_025 e 06\_D\_15. Os resultados obtidos pelos dois métodos mostram que o gesso FGD pode auxiliar no controle do tempo de pega. A adição do resíduo reduz o teor de aditivo estabilizador necessário para a produção de argamassas estabilizadas de 24, 48 e 72 horas.

Ao observar que o uso do resíduo pode auxiliar no controle do tempo de pega, verifica-se que as dosagens com 0,3% de AEH com adição de gesso FGD podem ser empregadas para a produção de argamassas estabilizadas de 24 e 48 horas, a depender do teor de adição de FGD utilizado ao passo que as argamassas produzidas com 0,6% de AEH com adição de FGD podem ser utilizadas em situações que requerem tempo de estabilização de 72 horas.

As argamassas estabilizadas com o resíduo di-hidrato apresentaram os maiores tempos de início de pega no ensaio de calorimetria. Este resultado pode estar relacionado a superfície específica do resíduo (Blaine 1962 cm<sup>2</sup>/g, 1819 cm<sup>2</sup>/g e 2326 cm<sup>2</sup>/g para respectivamente di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita), isto é, à medida que a finura do resíduo aumenta, as reações de hidratação que consomem água iniciam mais cedo.

### 5.2.3. Consistência

Após os ajustes necessários, foram realizadas avaliações mais específicas das propriedades no estado fresco. O índice de espalhamento e as taxas de perda de índice de consistência (mm/h) das amostras com 0,3% de aditivo estabilizador de hidratação ao longo do tempo podem ser verificados nas Tabela 31. Os índices de consistência obtidos na etapa anterior, foram utilizados nesta análise do estudo.

Tabela 31 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,3% de AEH (24 e 48 horas)

Mistura	Índice de espalhamento (mm)				Índice de perda de espalhamento (mm/h)		
	0 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
REF	268	245	E*	E*	0,95	-	-
03_D_025	269	249	E*	E*	0,83	-	-
03_D_15	261	254	193	150	0,29	1,42	1,54
03_H_025	264	245	E*	E*	0,79	-	-
03_H_15	260	250	186	156	0,41	1,54	1,44
03_A_025	265	246	E*	E*	0,79	-	-
03_A_15	262	248	182	151	0,58	1,66	1,54

E\* - Endureceu

Fonte: Autora (2023)

Com os resultados de consistência obtidos para as misturas com 0,3% de aditivo estabilizador de hidratação (Tabela 31), observa-se que o incremento de FGD para 15% aumentou o tempo no estado fresco das argamassas estabilizadas, sendo possível leituras até 72 horas. No entanto, em tempos superiores a 48 horas o índice de espalhamento foi inferior a 180 mm.

Com o aumento da dosagem de 2,5% para 15% de FGD, as argamassas apresentaram menores índices de perda de espalhamento em 24 horas, sugerindo que o aumento do teor de FGD auxilia na manutenção da trabalhabilidade ao longo do tempo. Ainda, verifica-se que as

argamassas com resíduo apresentaram menores perdas de fluidez em comparação a mistura referência no tempo de 24 horas.

A Tabela 32 apresenta os resultados de índice de consistência e a taxa de perda de índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,6% de aditivo estabilizador de hidratação. Os resultados sugerem que o resíduo em análise contribui para o processo de estabilização das argamassas por apresentar menores índices de perda de espalhamento ao longo do tempo comparados a argamassa referência. O teor de 0,6% de AEH manteve as argamassas com resíduo no estado fresco até 72 horas, com índice de espalhamento superior a 180 mm, considerado adequado para utilização.

Tabela 32 – Índice de consistência ao longo do tempo das misturas com 0,6% de aditivo (72 horas)

Mistura	Índice de espalhamento (mm)				Índice de perda de espalhamento (mm/h)		
	0 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
REF	274	225	195	E*	2,04	1,64	-
06_D_025	273	250	210	188	0,96	1,31	1,18
06_D_15	270	254	216	197	0,67	1,12	1,01
06_H_025	271	224	194	181	1,95	1,60	1,25
06_H_15	267	223	197	189	1,83	1,46	1,08
06_A_025	269	231	198	180	1,58	1,48	1,23
06_A_15	263	237	208	184	1,08	1,15	1,10

E\* - Endureceu

Fonte: Autora (2023)

Ao observar os resultados da incorporação do gesso FGD no tempo inicial (Tabela 31 e Tabela 32), verifica-se o aumento da consistência com o acréscimo do teor de AEH de 0,3% para 0,6%. De forma comparativa, pode-se dizer que a argamassa de 0,6% de AEH (72h) é mais trabalhável que a argamassa de 0,3% AEH (24h e 48h) no tempo inicial, pois apresenta valores de índice de consistência superiores. Quanto ao teor de adição, as argamassas estabilizadas com 2,5% de FGD apresentaram um índice de consistência inicial superior aos obtidos para as argamassas com 15%. Esse comportamento condiz com o aumento da incorporação do resíduo para uma mesma relação água/cimento (1,2) que resulta em maior demanda de água. Ressalta-se que os resultados de consistência foram próximos, mostrando que a incorporação do resíduo no tempo inicial não diminuiu consideravelmente a consistência das argamassas estabilizadas e todas as argamassas encontraram-se na faixa de  $270 \pm 10$  mm.

As amostras com adição de FGD apresentaram menor perda de consistência comparadas a mistura referência ao longo do tempo. Além disso, os maiores valores de índice

de perda de espalhamento obtidos entre as argamassas estabilizadas produzidas com FGD são das amostras com hemi-hidrato (06\_H\_025 e 06\_H\_15). Esse comportamento também foi apresentado no estudo em pastas e atribuído a taxa de dissolução mais rápida do hemi-hidrato. Já as misturas com di-hidrato apresentaram maior manutenção da fluidez ao longo do tempo nos dois teores de aditivo estabilizador de hidratação analisados (0,3 e 0,6%).

#### 5.2.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado também foram avaliados ao longo do tempo. Na Tabela 33 pode ser observado os resultados de densidade de massa das argamassas estabilizadas nas Figuras 46 e Figura 47 os resultados de teor de ar incorporado. Os valores obtidos mostram que as argamassas aumentaram as densidades de massa ao longo do tempo de estabilização e o teor de ar incorporado diminuiu. Quanto à classificação da NBR 13281 (ABNT, 2023), estas argamassas estariam classificadas como D3.

Tabela 33 – Densidade de massa das argamassas estabilizadas ao longo do tempo de estabilização

Argamassa/ Composição	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )			
	0h	24h	48h	72h
03_REF	1538,21	1677,28	E*	E*
03_D_025	1545,70	1684,57	E*	E*
03_D_15	1596,92	1670,83	1714,76	1762,44
03_H_025	1552,15	1680,62	E*	E*
03_H_15	1556,11	1644,39	1685,61	1752,24
03_A_025	1555,28	1681,87	E*	E*
03_A_15	1538,21	1668,96	1678,12	1769,73
06_REF	1633,56	1678,12	1698,94	E*
06_D_025	1548,19	1635,85	1668,33	1687,49
06_D_15	1599,83	1672,70	1700,19	1699,15
06_H_025	1574,01	1653,13	1679,99	1713,51
06_H_15	1650,01	1683,12	1700,39	1705,18
06_A_025	1535,92	1645,01	1665,83	1707,89
06_A_15	1616,70	1680,62	1695,19	1702,28

E\* - Endureceu

Fonte: Autora (2023)

De modo geral, a densidade de massa das argamassas com 0,3% de AEH são menores que as de 0,6% de AEH, que se diferem somente pela presença do aditivo estabilizador de hidratação. Para verificar se há diferenças significativas, foi realizada a análise ANOVA nos resultados de densidade. Os resultados inferem que não há diferenças significativas entre os resultados ( $p > 0,05$ ) quanto ao teor de AEH, conforme apresentado na Tabela 34. Na análise

estatística também foi observada a influência das demais variáveis controláveis na densidade de massa e foi verificado que o teor de FGD utilizado apresentou diferenças significativas (Tabela 34 e 35), com maior média de densidade de massa no teor de 15% de FGD.

Tabela 34 – Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação e do teor de FGD na densidade de massa das argamassas estabilizadas no tempo 0h

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de AEH (A)	2519	1	2519	0,17	NS
Teor de FGD (B)	7311	2	3655	0,040	S
Composição química do FGD (C)	2868	3	956	0,57	NS
A x B	2629	2	1314	0,13	NS
AXC	1747	3	582	0,37	NS
BXC	280,24	2	140,121	0,88	NS
TOTAL	17354,4	13			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Tabela 35 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de densidade de massa relacionados ao teor de FGD

Variável Controlável	Teor de FGD (%)	Densidade de massa (Média)	1 (1538.2)	2 (1593.0)	3 (1550.6)	Comentário*
Teor de FGD	0	1538.210		0.041565	0.782976	S
	15	1592.963	0.041565		0.027704	
	2.5	1550.627	0.782976	0.027704		

\*S- Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

As Figuras 46 e 47 apresentam os resultados de teor de ar incorporado das argamassas estabilizadas em estudo com 0,3% e 0,6% de AEH, respectivamente. As amostras com 0,3% de AEH exibiram as maiores perdas de ar incorporado, com apenas 13,34% de ar incorporado em 72h para a mistura com 15% de anidrita. Já para as amostras com 0,6% de AEH e 15% de FGD, o teor de ar incorporado ficou em 16,5%, considerado adequado para o parâmetro estabelecido de teor de ar incorporado de  $18 \pm 2\%$  no final do período de estabilização.

Figura 46 – Teor de ar incorporado das argamassas estabilizadas com 0,3% de AEH de (a) 24 horas e (b) 48 horas

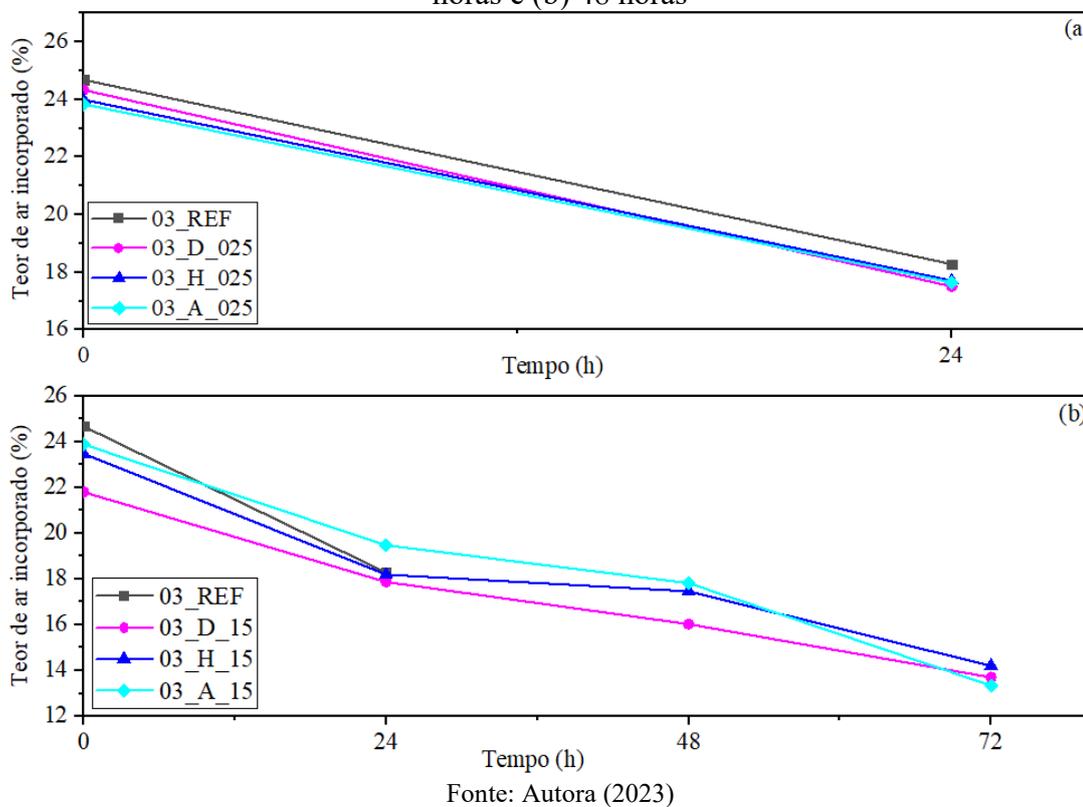
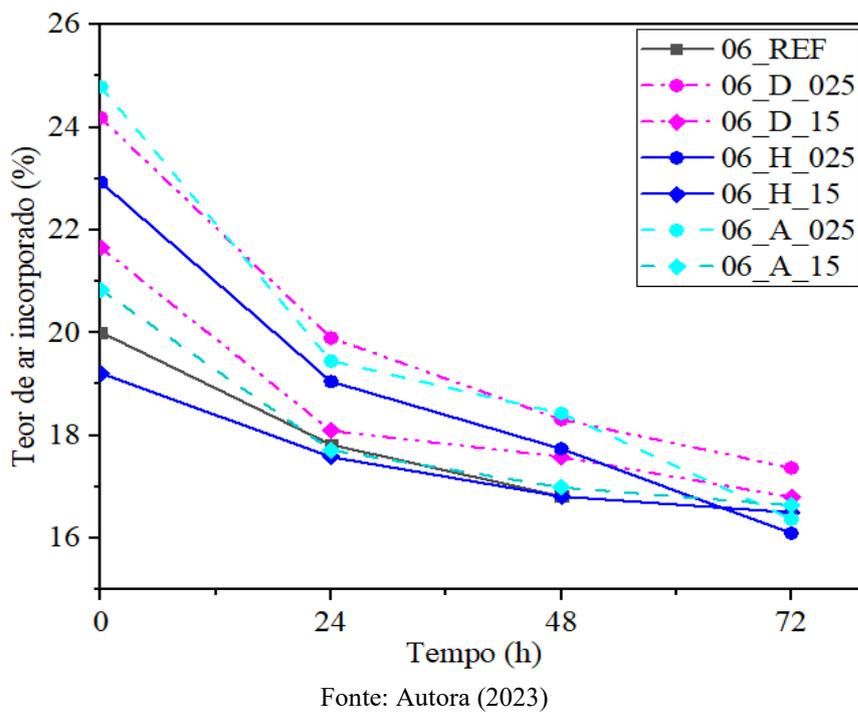
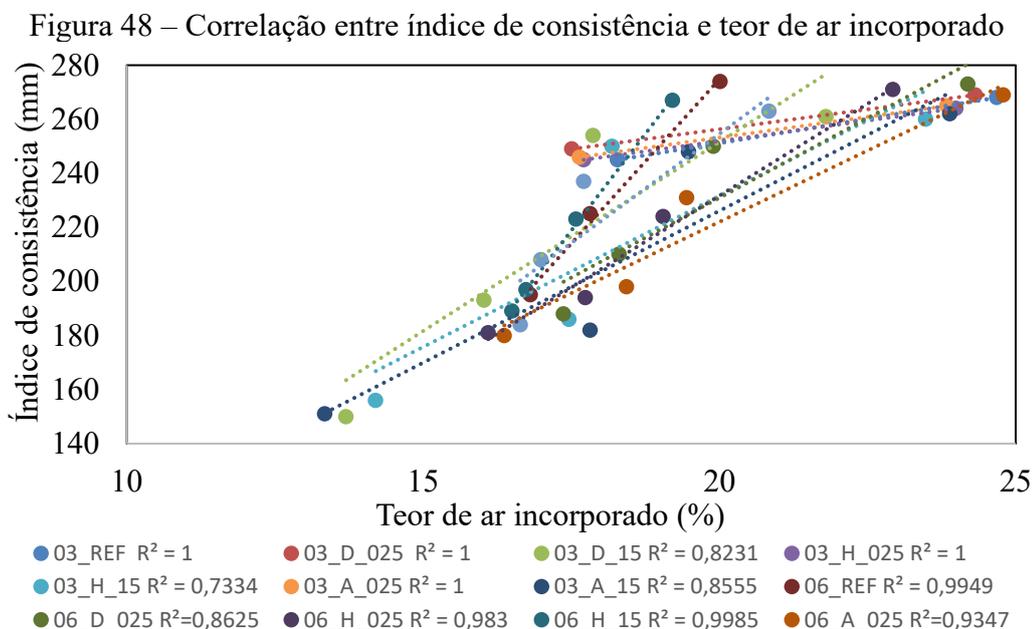


Figura 47 – Teor de ar incorporado das argamassas estabilizadas com 0,6% de AEH



Ao relacionar o teor de ar incorporado com os resultados de índice de consistência verificaram-se reduções dos índices de consistência e da fluidez com a redução do teor de ar incorporado, conforme apresentado na Figura 48.



Fonte: Autora (2023)

O ajustamento linear (Figura 48) resultou em  $R^2$  entre 0,7 e 1,0, sugerindo que há uma relação diretamente proporcional entre as variáveis apresentadas no gráfico. No entanto, no estudo em pastas, onde não foi utilizado aditivo incorporado de ar, ocorreram reduções significativas da fluidez ao longo do tempo. Dessa forma, percebe-se que a redução do teor de ar incorporado pode exercer influência na redução do índice de consistência, mas também existem outras variáveis que também influenciam tais reduções.

A análise ANOVA mostrou que não ocorreu influência significativa das variáveis controláveis individuais nos resultados de teor de ar incorporado (Figura 48) no tempo 0h. No entanto, quando avaliada a influência conjunta da composição química do FGD e do teor de AEH, foi observado diferenças significativas. O Teste Tukey não mostrou diferenças significativas entre as medias dessas variáveis (Tabela 36).

Tabela 36 - Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação, do teor de FGD e da composição química do FGD na densidade de massa das argamassas estabilizadas no tempo 0h

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de AEH (A)	10,098	1	10,098	0,077	NS
Teor de FGD (B)	10,550	2	4,275	0,21	NS
Composição química do FGD (C)	10,146	3	3,382	0,42	NS
A x B	1,087	2	0,544	0,82	NS
AXC	16,572	3	5,524	0,035	S
BXC	0,5327	3	0,266	0,066	NS
TOTAL	48,99	14			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Tabela 37 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados combinados de teor de AEH e composição química relacionados ao teor de ar incorporado no tempo 0h

Teor de AEH (%)	Composição química FGD (%)	1 (24,680)	2 (22,640)	3 (22,040)	4 (23,860)	5 (24,320)	6 (23,915)	7 (20,835)	8 (20,025)
0.3	S		0.700231	0.998820	0.994753	0.999989	0.996515	0.167473	0.082673
0.3	D	0.700231		0.825411	0.895571	0.837459	0.875886	0.630734	0.293061
0.3	H	0.998820	0.825411		0.999999	0.999995	1.000000	0.156054	0.066153
0.6	A	0.994753	0.895571	0.999999		0.999858		0.189444	0.079762
0.6	S	0.999989	0.837459	0.999995	0.999858		1.000000	0.229651	0.112870
0.6	D	0.996515	0.875886	1.000000	1.000000	0.999939	0.999939	0.178561	0.075310
0.6	H	0.167473	0.630734	0.156054	0.189444	0.229651	0.178561		0.984822
0.6	A	0.082673	0.293061	0.156054	0.079762	0.112870	0.075310	0.984822	

Fonte: Autora (2023)

### 5.2.5. Exsudação de água

As argamassas produzidas não apresentaram exsudação ao longo do tempo. Ao comparar com estudos anteriores que apresentaram exsudação como o de Zaleski (2022) que produziu argamassas estabilizadas com o mesmo tipo de cimento (CPII-F), com relação a/c próxima (1,3) e com aditivo estabilizador de hidratação com base química semelhante (gluconato de sódio e sacarose), foi observado que a principal diferença se encontra na redução do teor do aditivo estabilizador de hidratação utilizado. Essa redução foi de 0,85% e 1,2% para 0,3% e 0,6% de AEH. Ao diminuir o teor de aditivo estabilizador de hidratação, a viscosidade aumentou, o que diminui a tendência de movimentação de partículas e da água, reduzindo a probabilidade de exsudação. Outro fator que pode ter contribuído para os resultados

apresentados neste estudo é o aditivo incorporado de ar utilizado que pode ter influenciado na redução da exsudação (HARTMANN; JEKNAVORIAN; SILVA; BENINI, 2011).

### 5.2.6. Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

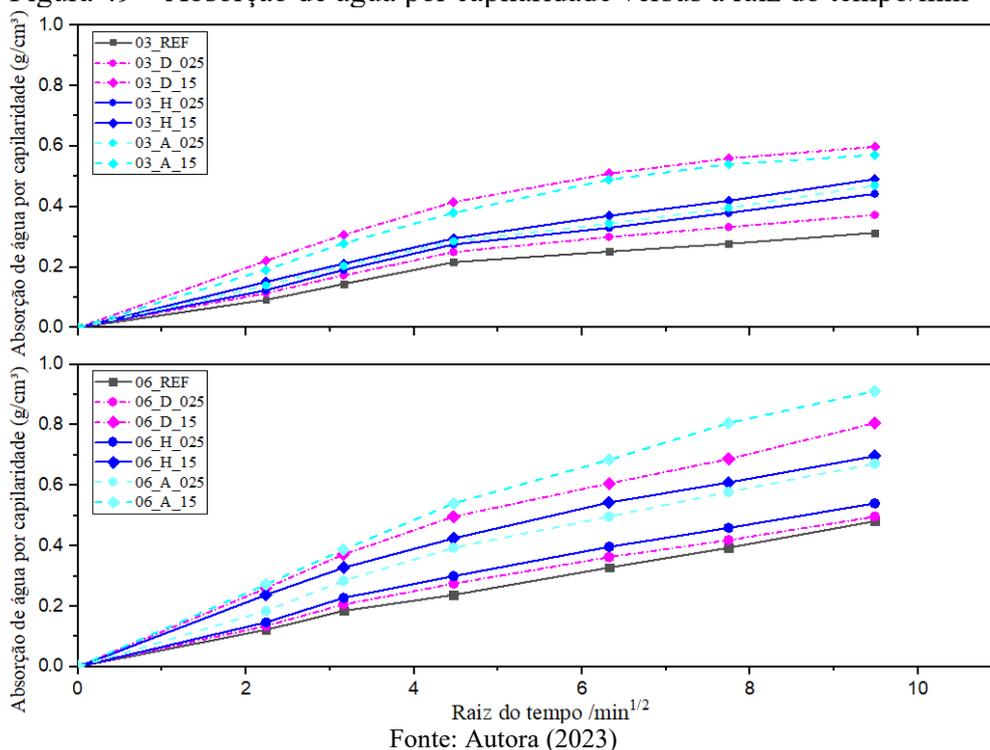
A Tabela 38 mostra o comportamento das argamassas estabilizadas quanto à absorção de água por capilaridade aos 28 dias após a moldagem, indicando que elevações do teor de gesso FGD aumentam os coeficientes de capilaridade. Quanto ao tempo de estabilização, observa-se que o incremento dos aditivos aumenta a absorção de água por capilaridade. De acordo com a classificação da ABNT NBR 13281 (ABNT, 2023), as argamassas em estudo são classificadas como C5 e C6.

Tabela 38 – Absorção de água por capilaridade

Argamassa/ Composição	Absorção de água por capilaridade – 10 min (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção de água por capilaridade – 90 min (g/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Norma NBR 13281 (Classificação)
03 REF	0,14	0,31	5,02	C5 (5.0 a 12,0)
03 D 025	0,17	0,37	5,96	
03 D 15	0,31	0,60	9,57	
03 H 025	0,19	0,44	7,07	
03 H 15	0,21	0,49	7,86	
03 A 025	0,20	0,47	7,53	
03 A 15	0,28	0,57	9,14	
06 REF	0,39	0,91	14,60	C6 > 10
06 D 025	0,21	0,50	7,95	C5 (5.0 a 12,0)
06 D 15	0,33	0,70	11,15	C6 > 10
06 H 025	0,23	0,54	8,65	C5 (5.0 a 12,0)
06 H 15	0,37	0,81	12,90	C6 > 10
06 A 025	0,18	0,48	7,70	C5 (5.0 a 12,0)
06 A 15	0,28	0,67	10,75	C6 > 10

Fonte: Autora (2023)

A Figura 49 apresenta a absorção de água por capilaridade versus a raiz do tempo/min<sup>1/2</sup>. Observa-se que as argamassas com adições de 15% de FGD apresentaram maior absorção capilar em comparação as misturas com 2,5% de FGD. O acréscimo da dosagem do aditivo estabilizador de hidratação de 0,3% para 0,6% aumentou a absorção capilar das argamassas analisadas. A argamassa referência apresentou menor absorção por capilaridade aos 90 min em comparação às argamassas com FGD, sugerindo maior quantidade de poros capilares devido a presença do resíduo.

Figura 49 – Absorção de água por capilaridade versus a raiz do tempo/ $\text{min}^{1/2}$ 

A partir dos resultados da análise ANOVA, constata-se que o aumento da adição do FGD e do teor de aditivo estabilizador de hidratação influenciaram de forma significativa os valores de absorção por capilaridade. Em contrapartida, o efeito combinado desses fatores não apresentou diferenças significativas como pode ser verificado na Tabela 39.

Tabela 39 – Análise ANOVA do efeito do teor de aditivo estabilizador de hidratação e do teor de FGD na absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de aditivo (A)	0,096	1	0,096	0,0042	S
Teor de FGD (B)	0,16	2	0,082	0,0029	S
Composição química do FGD (C)	0,092	3	0,032	0,37	NS
A x B	0,094	2	0,0047	0,5	NS
AXC	0,0081	3	0,0027	0,94	NS
BXC	0,014	2	0,007	0,73	NS
TOTAL	0,45	13			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Nas Tabelas 40 e 41 pode-se observar o teste de Tukey da absorção de água das argamassas estabilizadas de 24, 48 e 72 horas para as variáveis controláveis que apresentaram influência significativa nos resultados. O teste Tukey mostrou que os valores de absorção

capilar variam conforme o teor de FGD utilizado, apresentando diferenças significativas e mostrando a influência desse resíduo no transporte de água das argamassas estabilizadas. Observa-se maior absorção de água por capilaridade com a incorporação do FGD em comparação a mistura referência aos 90 minutos. O incremento do teor de FGD também aumenta a absorção de água da mistura. Ainda, verificou-se influência significativa do aumento do teor do aditivo estabilizador de hidratação no aumento da absorção de água por capilaridade.

Tabela 40 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de absorção de água por capilaridade relacionados ao teor de aditivo estabilizador de hidratação

Variável	Teor de aditivo (%)	Absorção de água por capilaridade (Média)	1 (0.464286)	2 (0.65871)	Comentário*
Teor de aditivo	0,3	0.46		0,001872	S
	0,6	0.66	0,001872		

\*S- Significativo; NS – Não significativa

Fonte: Autora (2023)

Tabela 41 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de absorção de água por capilaridade relacionados ao teor de FGD

Variável	Teor de FGD (%)	Absorção de água por capilaridade (Média)	1 (0.3950)	2 (0.6800)	3 (0.49833)	Comentário*
Teor de FGD	0	0.39		0,005620	0.297344	S
	2.5	0.49	0,005620		0,009971	
	15	0.68	0.297344	0,009971		

\*S- Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

### 5.2.7. Densidade de massa no estado endurecido

A obtenção da densidade das argamassas estabilizadas no estado endurecido consistiu na medida direta da massa pelo volume. Esse ensaio se tornou interessante ao considerar que as três composições químicas do resíduo avaliado apresentam diferentes massas específicas. Dessa forma, o objetivo foi avaliar a influência desse parâmetro na densidade das argamassas estabilizadas ensaiadas aos 28 dias após a moldagem. Para tanto, foi realizada a análise de variância ANOVA com o intuito de verificar se há influência da composição do FGD nos resultados de densidade de massa no estado endurecido. A Tabela 42 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 42 – Resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido (g/cm<sup>3</sup>)

Misturas	Média	D.P	CV (%)
03_REF	<b>1,55</b>	0,05	2,96
03_D_025	<b>1,43</b>	0,02	1,45
03_D_15	<b>1,38</b>	0,04	3,06
03_H_025	<b>1,42</b>	0,07	4,61
03_H_15	<b>1,41</b>	0,01	0,36
03_A_025	<b>1,40</b>	0,01	1,03
03_A_15	<b>1,39</b>	0,02	0,93
06_REF	<b>1,33</b>	0,00	0,18
06_D_025	<b>1,45</b>	0,03	1,77
06_D_15	<b>1,40</b>	0,02	1,18
06_H_025	<b>1,48</b>	0,11	7,57
06_H_15	<b>1,42</b>	0,02	1,42
06_A_025	<b>1,56</b>	0,06	3,87
06_A_15	<b>1,44</b>	0,01	0,76

Fonte: Autora (2023)

Quanto a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2023), estas argamassas são classificadas como M4. Na Tabela 43 são apresentados os resultados da análise estatística. Os resultados mostram que não há influência significativa quanto a composição química do FGD ( $p>0,05$ ).

Tabela 43 – Análise ANOVA do efeito da composição química, do FGD e dos teores de aditivo estabilizador e FGD na densidade de massa das argamassas em estudo

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de aditivo (A)	0,00071	1	0,00071	0,696	NS
Teor de FGD (B)	0,007	2	0,00381	0,41	NS
Composição química do FGD (C)	0,048	3	0,00075	0,92	NS
A x B	0,034	2	0,017	0,0014	S
AXC	0,036	3	0,012	0,028	S
BXC	0,00045	2	0,00022	0,962	NS
TOTAL	0,126	13			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

No entanto, o efeito combinado do teor de aditivo com o teor de FGD apresentou influência significativa nos resultados, como pode ser observado também no teste de Tukey (Tabela 44). As amostras com resíduo e com 0,6% de AEH apresentaram maiores densidades de massa quando comparadas com as argamassas de 0,3% de AEH. Quanto a mistura referência, foi observado comportamento contrário, onde a argamassa com 0,6% de AEH apresentou menor valor de densidade em comparação a mistura com 0,3% de AEH. O teor de aditivo e a

composição química apresentaram influência significativa apenas nos resultados de variância ANOVA quando combinados.

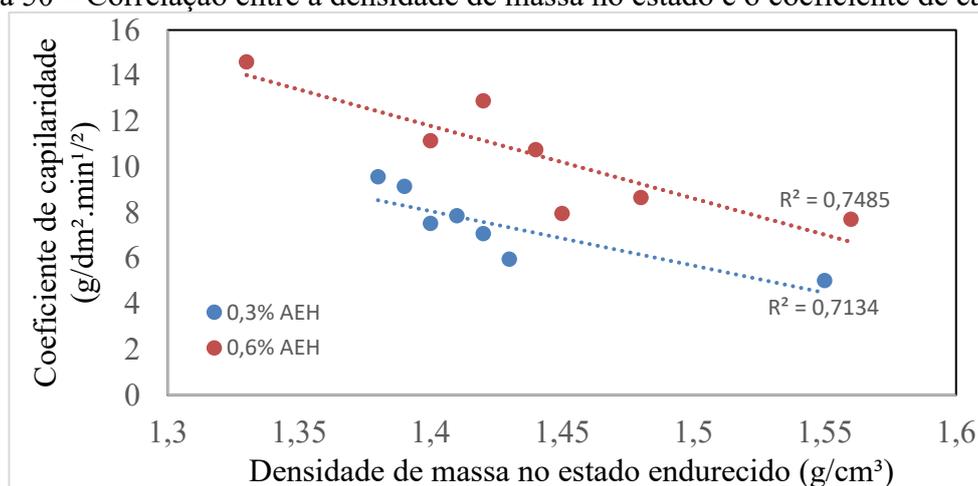
Tabela 44 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de densidade de massa no estado endurecido relacionadas ao teor de aditivo estabilizador de hidratação e o teor de FGD

Teor de FGD (%)	Teor de aditivo (%)	(1) 1.5500	(2) 1.3300	(3) 1.3933	(4) 1.4200	(5) 1.4167	(6) 1,4967
0	0.3		0,010867	0,023444	0,060056	0,053291	0,704773
0	0.6	0,010867		0,559386	0,248797	0,278195	0,016683
15	0.3	0,023444	0,559386		0,898737	0,938041	0,033816
15	0.6	0,060056	0,248797	0,898737		0,999993	0,130562
2.5	0.3	0,053291	0,278195	0,938041	0,999993		0,110251
2.5	0.6	0,704773	0,016683	0,033816	0,130562	0,110251	

Fonte: Autora (2023)

A Figura 50 apresenta a correlação entre a densidade de massa no estado endurecido e o coeficiente de capilaridade. Os resultados indicam uma boa correlação com  $R^2$ , superior a 0,7 nos dois teores de AEH analisados, indicando que, quanto mais densa for a argamassa endurecida, menor será a percolação de água pelos capilares.

Figura 50 – Correlação entre a densidade de massa no estado e o coeficiente de capilaridade

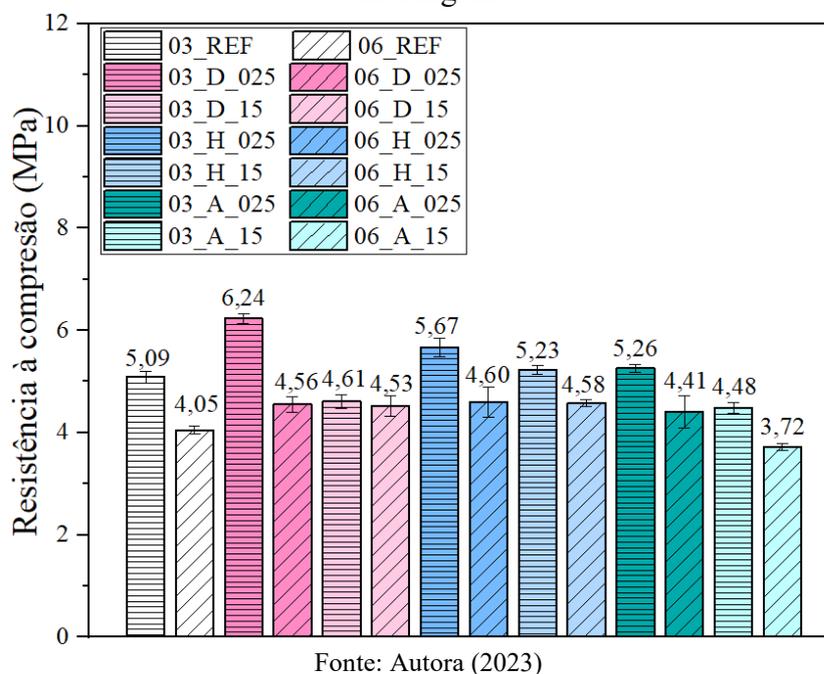


Fonte: Autora (2023)

### 5.2.8. Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

Assim como na etapa 01, com o objetivo de verificar a influência do gesso FGD e do tempo de estabilização sobre o desempenho mecânico das argamassas estabilizadas, avaliou-se a resistência mecânica 28 dias após a moldagem dos corpos de prova de acordo com o tempo de moldagem proposto no item 5.2.2, que variou em até 72 horas após o primeiro contato da água com o cimento. Os resultados estão apresentados na Figura 51. Quanto a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2023), estas argamassas estariam classificadas como P6.

Figura 51 – Resistência à compressão das argamassas estabilizadas aos 28 dias após a moldagem



As argamassas com 0,3% de aditivo estabilizador de hidratação, atribuídas ao tempo de estabilização de 24 e 48 horas, apresentaram resistências superiores a mistura referência, com exceção das argamassas 03\_D\_15 e 03\_A\_15, que exibiram redução de 9,48% e 11,91%. As amostras 03\_D\_025, 03\_H\_025, 03\_H\_15 e 03\_A\_025, apresentaram resistências à compressão superiores a mistura referência (03\_REF) em 22,50%, 11,33%, 2,65% e 3,39%, respectivamente.

As argamassas produzidas com 0,6% aditivo estabilizador de hidratação, atribuídas ao tempo de estabilização de 72 horas, também apresentaram resultados superiores a argamassa referência. Estes acréscimos foram de 12,5%, 11,78%, 13,63% e 13,04% para 06\_D\_025,

06\_D\_15, 06\_H\_025, 06\_H\_15, 06\_A\_025 e 0,6\_A\_15, respectivamente. A argamassa 0,6\_A\_15, em contrapartida, apresentou resistência inferior à referência em aproximadamente 8,17%. De modo geral, o aumento da resistência à compressão das argamassas com FGD em comparação a mistura referência sugere a contribuição da adição do resíduo para o aumento desta propriedade mecânica.

O aumento do teor de FGD para 15% reduziu os valores de resistência à compressão quando comparados as argamassas com 2,5%. Essa redução foi de 26,11%, 7,79% e 14,79% para as argamassas com 0,3% de AEH com adição de FGD dihidrato, hemihidrato e anidrita, respectivamente. A mesma tendência foi observada nas argamassas produzidas com 0,6% de AEH, as quais apresentaram valores menores de resistência à compressão com a adição de 15% em 0,68%, 0,52% e 15,7% para as amostras de dihidrato, hemihidrato e anidrita, respectivamente.

Em relação a composição química do FGD, observa-se que hemi-hidrato apresentou os maiores valores de resistência à compressão nas amostras com 0,6% de AEH quando comparados a mistura referência (06\_REF), apresentando acréscimos de até 13% na mistura 06\_H\_025. Já a anidrita apresentou os menores valores de resistência à compressão. O mesmo ocorreu para as argamassas com 0,3% de AEH, com exceção da amostra 03\_D\_025, que apresentou um acréscimo de 22,6% em comparação com a mistura 03\_REF.

O aumento do teor de AEH ocasionou redução da resistência à compressão em todas as argamassas estabilizadas em análise. Comportamento semelhante também foi observado em outros estudos que utilizaram diferentes teores de aditivos (JANTSCH, 2015; OLIVEIRA, 2017; GUINDANI 2018; ZALESKI, 2021).

A Tabela 45 apresenta a análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão das argamassas estabilizadas avaliadas neste estudo. Como pode ser verificado, apenas o teor de aditivo (A) apresentou influência significativa sob a variável dependente em análise. O teor de FGD (B), a composição química (C) e as interações (A x B, A x C e B x C) não exercem influência significativa nos valores de resistência à compressão.

Tabela 45 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão das argamassas estabilizadas

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de aditivo (A)	2,68	1	2,68	0,0057	S
Teor de FGD (B)	1,19	2	0,59	0,27	NS
Composição química do FGD (C)	0,86	3	0,29	0,62	NS
A x B	0,38	2	0,19	0,35	NS
AXC	0,017	3	0,0058	0,99	NS
BXC	0,21	2	0,10	0,81	NS
TOTAL	5,337	16			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Com os resultados apresentados na Tabela 45, foi realizada a análise de comparação múltipla de médias utilizando o Teste De Tukey na variável controlável que apresentou influência significativa na análise de variância. Os resultados do Teste de Tukey (Tabela 46) indicam que existe diferença significativa na variável dependente em questão.

Tabela 46 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de resistência à compressão das argamassas estabilizadas

Variável	Teor de aditivo (%)	Resistência à compressão (Média)	1	2	Comentário*
Teor de aditivo	0,3	5,22		0,005840	S
	0,6	4,35	0,005840		

\*S- Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias são apresentados na Figura 52. Verifica-se que as argamassas com 0,3% de aditivo estabilizador de hidratação, apresentaram maiores resistências à tração na flexão em comparação as amostras com maior teor de aditivo estabilizador de hidratação (0,6%). A mesma tendência foi observada nos resultados de resistência à compressão. Pela classificação da NBR 13281 (ABNT, 2023), estas argamassas estariam classificadas como R1 ( $\leq 1,5$ ), R3 (1,5 A 2,7) e R4 (2,0 a 3,5).

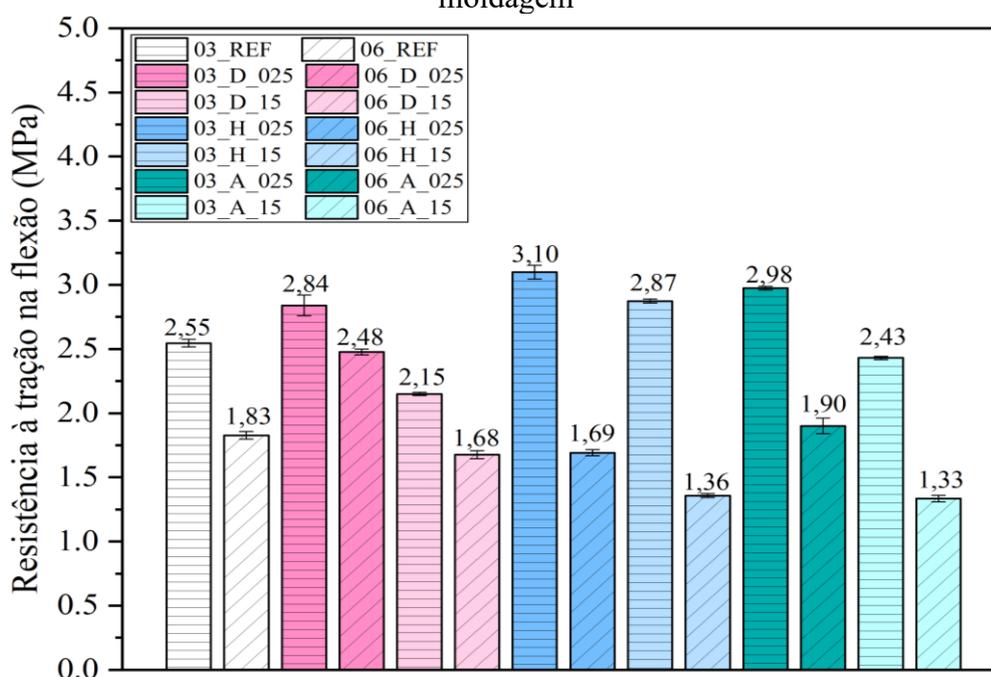
A incorporação de 2,5% de FGD nas argamassas com 0,3% AEH ocasionou o aumento das resistências à tração na flexão em comparação a mistura referência. Em contrapartida, o aumento do teor de FGD para 15% reduziu os valores de resistência, com exceção da amostra 03\_H\_15. Essas reduções foram de 15% e 4,70% em relação mistura referência para as amostras 03\_D\_15 e 03\_A\_15, respectivamente.

Nas argamassas estabilizadas com 0,6% de AEH, verifica-se aumento da resistência à tração na flexão de até 35% (06\_D\_025) para as misturas com 2,5% de FGD di-hidrato, com

exceção da mistura 06\_H\_025 que apresentou redução de 7,65% em relação a mistura referência. Já em 15% de adição do FGD, observam-se reduções de até 27,32% (06\_A\_15) em relação a mistura referência.

Quanto a composição química do FGD, não foi possível identificar uma tendência. Nas amostras com 0,3% de AEH os melhores resultados quanto à resistência à tração na flexão foram do hemi-hidrato, seguidos do dihidrato e da anidrita. Comportamento distinto ocorre ao aumentar o teor de aditivo estabilizador de hidratação para 0,6%. Nesta dosagem, o di-hidrato apresentou os melhores resultados, seguidos da anidrita e do hemi-hidrato. Por esse motivo, realizou-se a análise de variância ANOVA com a finalidade de identificar se a composição química exerce influência significativa sobre os resultados.

Figura 52 – Resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas aos 28 dias após a moldagem



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 47 apresenta a análise de variância dos resultados de resistência à tração das argamassas estabilizadas avaliadas neste estudo. Como pode ser observado, apenas o teor de aditivo (A) exerce influência significativa nos valores de resistência à tração na flexão. As demais variáveis e as interações entre elas não exercem influência significativa sob a variável dependente em análise.

Tabela 47 – ANOVA dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de aditivo (A)	2,10	1	2,10	0,015	S
Teor de FGD (B)	0,67,	2	0,23	0,091	NS
Composição química do FGD (C)	0,018	3	0,0059	0,99	NS
A x B	0,039	2		0,80	NS
AXC	0,57	3	0,19	0,40	NS
TOTAL	3,40	11			

S\* - Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Com o intuito de complementar a análise estatística, foi realizada a análise de comparação múltipla de médias utilizando o Teste De Tukey, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 47. Como o teor de aditivo apresentou influência significativa nos resultados de resistência a tração na flexão ( $p < 0,05$ ), a análise foi realizada apenas nesse resultado (Tabela 48). Os resultados obtidos na análise mostram que existe diferença significativa entre os teores de aditivo avaliados na variável dependente em questão. O teor de 0,3% apresenta valores maiores de resistência à tração na flexão.

Tabela 48 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estabilizadas

Variável	Teor de aditivo (%)	Resistência à tração na flexão (Média)	1	2	Comentário*
Teor de aditivo	0,3	2,70		0,001633	S
	0,6	1,82	0,001633		

\*S- Significativo; NS – Não significativo

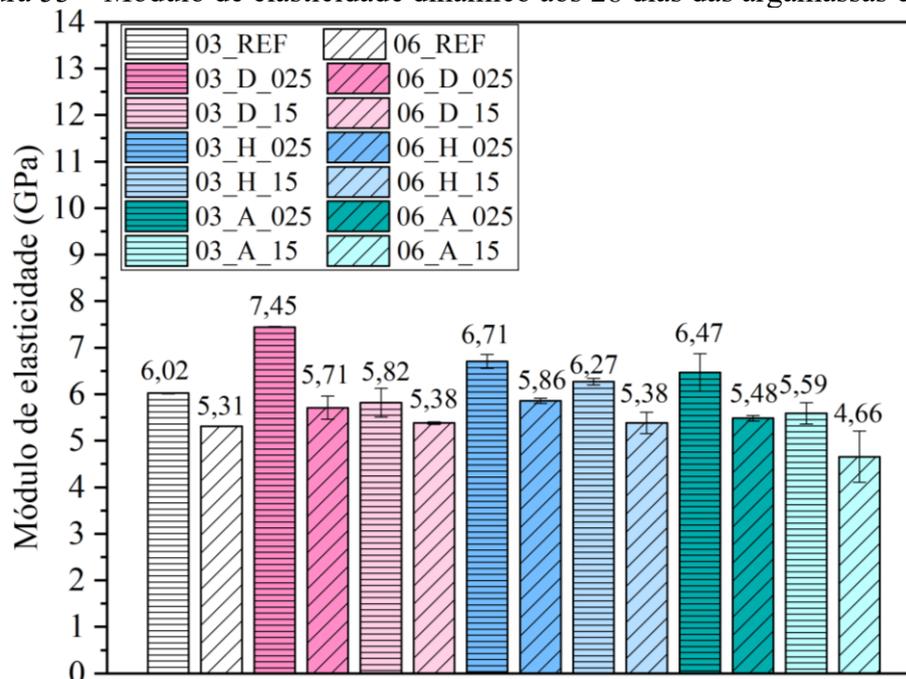
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.9. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado aos 28 dias após a moldagem das argamassas estabilizadas. Na Figura 53 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio. Os resultados mostram que ocorreu o aumento dos valores do módulo de elasticidade em comparação à mistura referência para as argamassas estabilizadas com 0,3% e 0,6% de aditivo estabilizador de hidratação, com exceção das amostras 03\_D\_15 E 06\_A\_15. Esse aumento foi de até 23,75% para a amostra 03\_D\_025 em comparação a referência e de 10,36 % para a argamassa 06\_H\_025.

De modo geral, as amostras com menor teor de AEH (0,3%) apresentaram maiores módulos de elasticidade em comparação as misturas com 0,6% de aditivo estabilizador de hidratação. O aumento do módulo normalmente está relacionado a uma argamassa mais rígida, apresentando maior suscetibilidade ao aparecimento de fissuras.

Figura 53 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas estabilizadas



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 49 apresenta a ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade. Verifica-se influência significativa do módulo de elasticidade nas variáveis controláveis de teor de aditivo e teor de FGD. Dessa forma, realizou-se o Teste de Tukey (Tabela 50). As demais variáveis não apresentam influência significativa sobre os resultados de módulo de elasticidade.

Tabela 49 – ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade

Variáveis controláveis	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Comentário*
Teor de aditivo (A)	2,10	1	2,10	0,005386	S
Teor de FGD (B)	1,8344	2	0,9172	0,023396	S
Composição química do FGD (C)	0,8175	3	0,2735	0,5832148	NS
A x B	0,1726	2	0,0863	0,578768	NS
AXC	0,0541	3	0,0180	0,985383	NS
TOTAL	4,98	11			

\*S- Significativo; NS – Não significativo

Fonte: Autora (2023)

Os resultados do teste de Tukey mostram maiores valores médios de módulo para os menores teores de FGD (2,5%) e aditivo estabilizador de hidratação (0,3%). Nas misturas com 0,6% de AEH, a incorporação do FGD influencia no aumento dos valores médios de módulo. Já nas amostras com 0,3% de AEH, apenas a adição de 2,5% de FGD apresenta aumento do módulo de elasticidade.

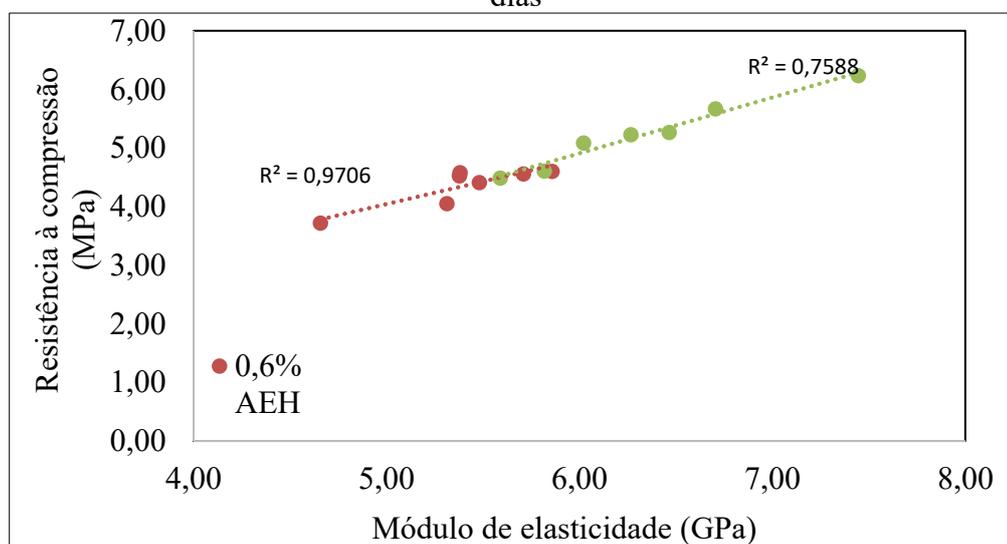
Tabela 50 – Teste de Tukey para comparação de médias dos resultados de módulo de elasticidade das argamassas estabilizadas

Teor de aditivo (%)	Teor de FGD (%)	Módulo (Média)	(1) 6,022	(2) 5,3140	(3) 5,8913	(4) 5,1393	(5) 6,8723	(6) 5,6836
0,3	0	6,022		0,776143	0,999577	0,420086	0,454562	0,966586
0,6	0	5,314	0,776143		0,777016	0,998293	0,060052	0,952411
0,3	15	6,87234	0,999577	0,777016		0,259799	0,100385	0,981560
0,6	15	5,68357	0,420086	0,998293	0,259799		0,004998	0,546923
0,3	2,5	5,8913	0,454562	0,060052	0,100385	0,004998		0,041648
0,6	2,5	5,13933	0,966586	0,952411	0,981560	0,546923	0,041648	

Fonte: Autora (2023)

De maneira análoga às propriedades mecânicas obtidas, a incorporação de FGD em argamassas estabilizadas também promoveu incrementos no módulo de elasticidade. A Figura 54 apresenta a correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade aos 28 dias. As argamassas com 0,3% e 0,6% de aditivo estabilizador de hidratação apresentaram boa correlação com  $R^2$  de 0,7588 e 0,9706, respectivamente.

Figura 54 – Correlação entre resistência à compressão com o módulo de elasticidade aos 28 dias



Fonte: Autora (2023)

### 5.2.10. Resistência potencial de aderência à tração

Na Tabela 51 estão apresentados os resultados de resistência potencial de aderência à tração. Com a análise, constatou-se que as argamassas estabilizadas 03\_A\_025, 06\_D\_15 e 06\_A\_025 apresentaram os melhores resultados quanto a essa propriedade, atendendo as prescritivas da NBR 13749 (ABNT, 2013), que exige como valor mínimo para revestimentos externos 0,30 MPa. As demais argamassas estabilizadas também atenderam aos requisitos da norma, enquadrando-se no valor mínimo de 0,20 MPa para paredes internas com acabamento de pintura ou base para reboco e tetos. Ainda, observam-se valores de resistência que variam de 0,24 MPa a 0,30 MPa, apresentando 20% de diferença entre as médias.

Tabela 51 – Resistência potencial de aderência à tração

Argamassa	Resistência Potencial de aderência à tração (MPa)	Valores pela norma NBR 13281	Tipo de ruptura	Configuração da ruptura	Porcentagem de ocorrência (%)
03_REF	0,25	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Superficial	Na argamassa	100
03_D_025	0,25	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Superficial	Na argamassa	100
03_D_15	0,25	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	80
03_H_025	0,27	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Superficial	Na argamassa	60
03_H_15	0,24	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	100
03_A_025	0,30	A3 ( $\geq 0,30$ MPa)	Superficial	Na argamassa	60
03_A_15	0,25	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	90
06_REF	0,22	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	90
06_D_025	0,27	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Superficial	Na argamassa	70
06_D_15	0,30	A1 ( $\geq 0,30$ MPa)	Superficial	Na argamassa	80
06_H_025	0,24	A1 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	80
06_H_15	0,25	A3 ( $\geq 0,20$ MPa)	Adesiva	Interface argamassa/ substrato	90
06_A_025	0,30	A1 ( $\geq 0,30$ MPa)	Superficial	Na argamassa	100
06_A_15	0,21	A3 ( $\geq 0,20$ MPa)	Superficial	Na argamassa	80

Fonte: Autora (2023)

As formas de rupturas dos corpos de prova apresentadas no ensaio ocorreram, de modo geral, na superfície (superficial) e na interface do substrato e argamassa (adesiva). Essa configuração não é desejável, pois pode indicar falha de estruturação (GONÇALVES, 2004).

Quanto a comparação dos resultados com outros estudos de argamassas estabilizadas, constatou-se valores superiores e inferiores ao encontrados nesse estudo. Jantsch (2015), por

exemplo, obteve valores de resistência potencial de aderência compreendidos entre 0,35 MPa para 36 horas e 0,09 MPa para 72 horas, não atendendo a ABNT NBR 13749:2013 no tempo de estabilização de 72 horas. Já Trevisol (2015) encontrou valores superiores aos obtidos neste estudo, compreendidos entre 0,46 a 0,40 MPa. Da mesma forma, Bauer et al., (2015) constatou valores de resistência potencial de aderência à tração compreendidos entre 0,51 a 0,52 MPa.

Macioski (2014) também avaliou esse parâmetro em argamassas com estabilização de 48 horas, em que o substrato utilizado foi a superfície de blocos de concreto e encontrou valores próximos a 0,2 MPa. O resultado é compatível com os observados nesse estudo para 48 horas (0,3% de AEH).

### **5.2.11. Susceptibilidade à fissuração**

Nas Tabelas 52 e 53 são apresentados os resultados obtidos na análise de susceptibilidade à fissuração das argamassas estabilizadas com 0,3% e 0,6% de AEH, respectivamente. Os resultados mostram que as argamassas estabilizadas apresentaram baixa suscetibilidade à fissuração quanto classificadas de acordo com o módulo de elasticidade, com exceção da mistura 03\_D\_025 com 0,3% de AEH e 2,5% de FGD, que se enquadra em média suscetibilidade.

Ao correlacionar o módulo de elasticidade com a resistência à tração na flexão ( $E/R_t$ ) das argamassas estabilizadas com 0,3% de AEH, também foi verificado baixa suscetibilidade à fissuração, com exceção das amostras 03\_D\_025 e 03\_D\_15. Da mesma forma, as argamassas com 0,6% de AEH apresentaram baixa e média suscetibilidade a fissuração, com exceção da amostra 06\_H\_15 que apresentou alta suscetibilidade à fissuração. Zaleski (2021) ao avaliar argamassas estabilizadas com fosfogesso por meio da correlação do módulo de elasticidade com a resistência à tração na flexão ( $E/R_t$ ) encontrou alta susceptibilidade à fissuração em todas as amostras analisadas. Esses resultados podem ser atribuídos aos valores obtidos de resistência à tração na flexão, pois baixos valores desse parâmetro acarretam o aumento da suscetibilidade à fissuração.

Observa-se ainda, que com o incremento do AEH, as possibilidades de fissuração se elevaram. Da mesma forma, Oliveira (2017) verificou que as maiores dosagens do AEH em argamassas estabilizadas aumentaram as possibilidades de fissuração.

Tabela 52 – Susceptibilidade à fissuração das argamassas aos 28 dias com 0,3% de AEH

Características (aos 28 dias)	Critérios de classificação quanto à fissuração						
	03_REF	03_D_025	03_D_15	03_H_025	03_H_15	03_A_025	03_A_15
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	6022	7445	5817	6705	6266	6466	5589
E/Rt*	2365,37	2621,89	2707,04	2163,42	2180,56	2173,079	2299,96

**Verde:** baixa susceptibilidade a fissuração; **Preto:** média susceptibilidade à fissuração; **Vermelho:** alta susceptibilidade a fissuração

Fonte: Autora (2023)

Tabela 53 – Suscetibilidade à fissuração das argamassas aos 28 dias com 0,6% AEH

Características (aos 28 dias)	Critérios de classificação quanto à fissuração						
	06_REF	06_D_025	06_D_15	06_H_025	06_H_15	06_A_025	06_A_15
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	5314	5710	5379	5858	5381	5482	4657
E/Rt*	2907,83	2305,27	3208,65	3462,72	3964,29	2884,08	3493,20

**Verde:** apresenta baixa susceptibilidade a fissuração; **Preto:** apresenta média susceptibilidade à fissuração; **Vermelho:** apresenta alta susceptibilidade a fissuração

Fonte: Autora (2023)

## 6. CONCLUSÃO

O potencial de utilização do resíduo proveniente do processo de dessulfurização de gases (FGD) como adição em argamassa estabilizada foi avaliado nessa pesquisa. Para sua utilização foram necessários processos de secagem, moagem e calcinação com a finalidade de obter as três composições químicas propostas: di-hidrato, hemi-hidrato e anidrita.

O estudo em pastas possibilitou a análise do efeito das composições químicas do FGD e dos aditivos nas misturas com cimento Portland. A tensão de cisalhamento, a tensão de escoamento e a viscosidade equivalente aumentaram na presença do FGD de acordo com a composição química do resíduo. O di-hidrato apresentou os menores valores de tensão de cisalhamento, tensão de escoamento dinâmica e viscosidade equivalente comparado às demais composições químicas do resíduo. Por esse motivo, em comparação ao hemi-hidrato e a anidrita infere-se que o di-hidrato favoreceu a fluidez, reduzindo o atrito interno entre as partículas e contribuindo positivamente para o tempo de estabilização.

Verifica-se que o aumento do teor de FGD reduz a fluidez das pastas. Os menores teores de adição de FGD (2,5% e 5%) analisados exibiram os maiores valores de fluidez inicial ao passo que os maiores teores de adição (10% e 15%) apresentaram reduções de até 55% da fluidez nas pastas com aditivo em comparação a mistura referência.

Em relação a cinética de hidratação, a adição de FGD nas pastas contribuiu para o aumento do tempo de início de pega, diminuiu os picos liberação de calor máximo e reduziu o grau de hidratação em comparação à pasta com cimento Portland, o que sugere a ocorrência de uma reação de hidratação mais lenta. O pico principal de calor diminuiu de 2,82 mW/g para até 2,38 mW/g nas pastas sem aditivo, e foi prorrogado de 3,6 horas para 4,55 horas. A mesma tendência de redução do pico de calor na presença do resíduo foi observada nas pastas com 0,5% de aditivo estabilizador de hidratação, o pico principal diminuiu de 2,53 mW/g para 1,43 mW/g e o tempo de início de pega foi prorrogado de 119 horas para 272 horas. O resíduo di-hidrato apresentou os menores tempos de início de pega entre as composições químicas analisadas, assim como os maiores picos de temperatura. Tal resultado sugere que o di-hidrato na matriz cimentícia aumenta a reatividade das pastas. No entanto, ao ser comparado com a mistura referência a adição do resíduo reduz a reatividade inicial, sendo favorável ao processo de estabilização.

A incorporação do aditivo estabilizador de hidratação reduziu a tensão de cisalhamento inicial das pastas, mostrando que esse aditivo pode reduzir o atrito interno entre as partículas

de cimento Portland e, conseqüentemente, favorecer a fluidez. No entanto, ao longo do período de estabilização, a tensão de cisalhamento tende a aumentar.

Quanto a resistência à compressão com adição de 15% de FGD observaram-se aumentos de resistência em relação a mistura referência de Cimento Portland. Esses acréscimos foram de 40,08%, 14,4% e 17,20% para o FGD hemi-hidrato, di-hidrato e anidrita, respectivamente. Comportamento que pode ser atribuído a maior taxa de dissolução do hemi-hidrato.

Com o estudo em argamassas estabilizadas foi possível verificar o efeito do incremento do FGD nas propriedades do estado fresco e endurecido e a sua compatibilidade com os aditivos. Os resultados obtidos por calorimetria e resistência a penetração evidenciaram que o gesso FGD pode auxiliar no controle do tempo de pega. A adição do resíduo contribuiu para o aumento do tempo de início de pega e poderia reduzir o teor de aditivo estabilizador necessário para a produção de argamassas estabilizadas de 48 (0,3% de AEH) e 72 horas (0,6% de AEH) quando comparados a mistura referência.

Em relação a consistência das argamassas com resíduo, o menor teor de adição (2,5%) resultou nos maiores valores de índice de consistência iniciais. Quando comparados a mistura referência, exibiram menor fluidez, apresentando características de um material poroso, que necessita de maior quantidade de água. Ao longo do tempo de estabilização, as argamassas com FGD apresentaram os menores índices de perda de consistência. O aumento do teor de AEH resultou no aumento dos valores de consistência.

Também ocorreu o aumento das densidades de massa ao longo do tempo de utilização e o teor de ar incorporado diminuiu. Com o acréscimo do teor de AEH de 0,3% para 0,6% foram observados aumentos nas densidades de massa das argamassas. Ainda, as amostras com 0,3% de AEH exibiram as maiores perdas de ar incorporado ao longo do tempo.

Com a incorporação e o aumento do teor de gesso FGD nas argamassas os coeficientes de capilaridade aumentaram, sugerindo maior quantidade de poros capilares devido a presença do resíduo. Observa-se ainda, que as argamassas com 0,6% de AEH apresentaram valores de absorção capilar superiores aos das amostras com 0,3% AEH. Ao correlacionar os resultados de absorção capilar com a densidade, verificou-se que quanto mais densa for a argamassa endurecida, menor será a percolação de água pelos capilares.

As argamassas estabilizadas apresentaram baixa e média suscetibilidade à fissuração, não apresentaram exsudação evidente/considerável ao longo do tempo e exibiram valores para

o potencial de aderência à tração que variaram de 0,24 MPa a 0,30 MPa, atendendo as prescritivas da normativa para paredes internas e tetos e revestimentos externos.

Em relação ao desempenho mecânico, o aumento do teor de FGD para 15% e do teor de aditivo para 0,6% reduziu os valores de resistência à compressão quando comparados as argamassas com os menores teores. O hemi-hidrato apresentou os maiores valores de resistência à compressão nas amostras com 0,6% de AEH quando comparados a mistura referência, apresentando acréscimos de até 13% na mistura 06\_H\_025. Já a anidrita apresentou os menores valores de resistência à compressão. O mesmo ocorreu para as argamassas com 0,3% de AEH e no estudo em pastas.

De maneira geral, o FGD contribuiu com o retardo dos tempos de pega e, em consequência, diminuiu os teores de aditivo estabilizador necessários para atingir os tempos de estabilização de 48 e 72 horas, apresentando efeito benéfico para o processo de estabilização das argamassas. Ainda, a adição de FGD proporcionou o aumento das propriedades mecânicas, principalmente nas argamassas com menor teor de aditivo estabilizador de hidratação (0,3% de AEH) em comparação a mistura referência. Por fim, para que seja possível a utilização do FGD em argamassas estabilizadas mais investigações devem ser realizadas.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Identificar a retenção de água em argamassas estabilizadas com adição de FGD;
- Avaliar a redução da dosagem de aditivo estabilizador de hidratação com o uso do FGD;
- Explorar os mecanismos da absorção das moléculas dos aditivos pelas partículas de cimento Portland e pelo FGD por meio de análises de íons de cálcio e teor de carbono livre (TOC);
- Aplicar diferentes conjuntos de aditivos, agregados e cimentos Portland com a finalidade de confirmar os resultados encontrados nessa pesquisa referentes ao efeito da adição do FGD em argamassas estabilizadas.

## REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em <https://abcp.org.br/cimento>. Acesso em 02 de maio de 2021.

ADRIEN, J.; MEILLE, S.; TADIER, S.; MAIRE, E.; SASAKI, L. In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 107-116, 2016.

ADU-AMANKWAH, S.; BLACK, L.; SKOCEK, J.; HAHA, M.B.; ZAJAC, M. Effect of sulfate additions on hydration and performance of ternary slag-limestone composite cements. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 451-462, 2018.

AİTCIN, P.; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. Woodhead Publishing, 2015.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. xxiv, 175 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

American Coal Ash Association. Coal Combustion Product (CCP) Production and Use in Survey Report 2016. **American Coal Ash Association**, Farmington Hills, MI, USA, 2019.

ANTONIAZZI, J. P. **O efeito dos aditivos incorporadores de ar e estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas**. 2019. 258p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós - graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2019.

ANTONIAZZI, J. P.; MOHAMAD, G.; CASALI, J.M.; SCHMIDT, P.R.B. Action of hydration stabilising admixture and air-entrained admixture in Portland cement pastes. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 249-262, 2020.

ANTONIAZZI, J. P.; MOHAMAD, G.; CASALI, J. M. Influence of cement type, air-entrained admixture and hydration stabilizing admixture on mortars' setting time. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2021.

ARGIZ, C.; MORAGUES, A.; MENÉNDEZ, E. Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 25-33, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos Sólidos - Classificação, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:2005**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:2005**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2005. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258:2005**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração - Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2005. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529:2013**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:2016**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:2017**: Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018**: Cimento Portland – Requisitos, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2019**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916:2021**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:2023**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro, 2023

ASTM C 1142 - 95 (2013) - Standard Specification for Extended Life Mortar for Unit Masonry. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, 1995.

ATAIE, F. F.; JUENGER, M.C.G.; TAYLOR-LANGE, S.C.; RIDING, K.A. Comparison of the retarding mechanisms of zinc oxide and sucrose on cement hydration and interactions with supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 128-136, 2015.

BAHAFID, S.; GHABEZLOO, S.; DUC, M.; FAURE, P.; SULEM, J. Effect of the hydration temperature on the microstructure of Class G cement: CSH composition and density. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 270-281, 2017.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em 16 ago 2021.

BARBOSA, W.; RAMALHO, R. P.; PORTELLA, K. F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: Hydration kinetics and rheological behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 304-310, 2018.

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.

BETIOLI, A. M.; GLEIZE, P.J.P.; SILVA, D.A.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry. **Cement and concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 440-445, 2009.

BISHOP, M.; BARRON, A. R. Cement hydration inhibition with sucrose, tartaric acid, and lignosulfonate: analytical and spectroscopic study. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 21, p. 7042-7049, 2006.

BOGUE, R. H. Calculation of the compounds in Portland cement. **Industrial and Engineering Chemistry**, Volume 1, Number 4, December 1929, Pages 192–197

Bp Statistical Review of World Energy, BP statistical review of world energy. Disponível em <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal.html>. Acesso em 25 de jun de 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 386** - Altera o art. 18 da Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA): Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 436**, de 22 de dezembro de 2011.

BREF, L. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. **European Commission**, 2006.

BRODNY, J.; TUTAK, M. Analysis of the diversity in emissions of selected gaseous and particulate pollutants in the European Union countries. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 582-595, 2019.

BRUERE, G. M. Air-entraining actions of anionic surfactants in portland cement pastes. **Journal of Applied Chemistry and Biotechnology**, v. 21, n. 3, p. 61-64, 1971.

BS 4721:1981 – Specification for ready-mixed building mortars – British Standard, 1981.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H.M.; LIVINGSTON, R.A.; NONAT, A.; SCHERER, G.W.; SCHWEITZER, J.S.; SCRIVENER, K.L.; THOMAS, J.J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

CAILLAHUA, M. C.; MOURA, F. J. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 2, p. 190-197, 2018.

CAMEO - Conservation & Art Materials Encyclopedia Online – Materials database - <http://cameo.mfa.org/wiki/Sucrose>. Acesso em 20 de novembro de 2022.

CAMPOS, G. M. ; CASALI, J. M. ; MACIOSKI, G. Estudo do tempo de início de pega de argamassas com aditivo estabilizador de hidratação. In: Anais do 55 Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado, 2013.

CAPPETO, J. E. A Performance Analysis of Repair Mortars for the Ayyubid Wall of Cairo. 2003.

CARPENTER, A. M. Advances in multi-pollutant control. **IEA Clean Coal Centre**, v. 11, 2013.

CARTUXO, F.; BRITO J.de; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J.R.; LEDESMA, E.F. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates–Influence of the superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 36-47, 2015.

CASALI, J. M.; MANN NETO, A.; ANDRADE, D. A.; ARRIAGADA, N. T. Avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa estabilizada para assentamento e revestimento. **In: IX Simpósio Brasileiro de Argamassas**, 2011, Minas Gerais, 2011.

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**, v. 18, n. 2, p. 33-52, 2018.

CASALI, J. M.; MEES, S.; OLIVEIRO, A.L.; BETIOLI, A.M.; CALÇADA, L.M. Propriedades mecânicas das argamassas estabilizadas: evolução com a idade e o grau de hidratação. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 263-283, 2020.

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

CHEN, Z.; POON, C. S. Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 791-803, 2017.

CHEN, Z.; LI, J. S.; POON, C. S. Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1447-1459, 2018.

CHEN, N.; WANG, P.; ZHAO, L.; ZHANG, G. Water retention mechanism of HPMC in cement mortar. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2918, 2020.

CORDOBA, P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. **Fuel**, v. 144, p. 274-286, 2015.

CORDOBA, P.; STAICU, L. C. Flue gas desulfurization effluents: An unexploited selenium resource. **Fuel**, v. 223, p. 268-276, 2018.

CORDOBA, P.; AYORA, C.; QUEROL, X. Evaluation of chemical stabilisation methods of coal-petcoke fly ash to reduce the mobility of Mo and Ni against environmental concerns. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111488, 2021.

CORTES, D. D.; KIM, H.K.; PALOMINO, A.M.; SANTAMARINA, J.C. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1142-1147, 2008.

DE CARVALHO, J. M. F.; DEFÁVERI, K.; MENDES, J.C.; SCHMIDT, W.; KÜHNE, H.; PEIXOTO, R.A.F. Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121640, 2021.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, v. 31, n. 7, p. 494-498, 1998.

HADDAD, de O. L. D.; NEVES, R.R; OLIVEIRA, P.V.; SANTOS, W.J.S.; JUNIOR, A.N.C.; SANTOS, W.J. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299-9314, 2020.

Directive (EU), 2015. 2015/2193 Regulating emissions of air pollutants. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193&rid=4>. Acesso em 05 de maio de 2021.

DU, L.; FOLLIARD, K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1463-1471, 2005.

FARINHA, C.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 194-206, 2015.

FARINHA, C. B.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1579-1594, 2019.

FENEUIL, B.; PITOIS, O.; ROUSSEL, N. Effect of surfactants on the yield stress of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 32-39, 2017.

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

GENG, G.; MYERS, R.J.; YU, Y.; SHAPIRO, D.A.; WINARSKI, R.; LEVITZ, P.E.; KILCOYNE, D.A.L.; MONTEIRO, P.J.M. Synchrotron X-ray nanotomographic and spectromicroscopic study of the tricalcium aluminate hydration in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Research**, v. 111, p. 130-137, 2018.

GIORDANI, C.; MASUERO, A. B. Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 574-587, 2019.

GOVIN, A.; BARTHOLIN, M.; BIASOTTI, B.; GIUDICI, M.; LANGELLA, V.; GROSSEAU, P. Modification of water retention and rheological properties of fresh state cement-based mortars by guar gum derivatives. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 772-780, 2016.

GONÇALVES, S. R. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso**. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2004

GU, C.; JI, Y.; ZHANG, Y.; YANG, Y.; LIU, J.; NI, T. Recycling use of sulfate-rich sewage sludge ash (SR-SSA) in cement-based materials: Assessment on the basic properties, volume deformation and microstructure of SR-SSA blended cement pastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124511, 2021.

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

GUO, X. L.; SHI, H. S. Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1471-1476, 2008.

GUO, S.; ZHANG, Y.; WANG, K.; BU, Y.; WANG, C.; MA, C.; LIU, H. Delaying the hydration of Portland cement by sodium silicate: Setting time and retarding mechanism. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 543-548, 2019.

GUO, X.; YANG, J.; XIONG, G. Influence of supplementary cementitious materials on rheological properties of 3D printed fly ash based geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103820, 2020.

HAN, D.; LEE, G.; YOON, S.; KIM, K. Viscosity influence on rising behavior of model air bubbles in fresh mortar. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 10-15, 2015.

HANJITSUWAN, S.; INJORHOR, B.; PHOO-NGERNKHAM, T.; DAMRONGWIRIYANUPAP, N.; LI, L.; SUKONTASUKKUL, P.; CHINDAPRASIRT, P. Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103760, 2020.

HAO, Y.; LI, Q.; PAN, Y.; LIU, Z.; WU, S.; XU, Y.; QIAN, G. Heavy metals distribution characteristics of FGD gypsum samples from Shanxi province 12 coal-fired power plants and its potential environmental impacts. **Fuel**, v. 209, p. 238-245, 2017.

HENKELS, P. J.; GYNOR, J. C. Characterizing synthetic gypsum for wallboard manufacture. **Preprints of Papers, American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry**, v. 41, n. CONF-960376-, 1996.

HEWLETT, P.; LISKA, M. (Ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete**. Butterworth-Heinemann, 2019.

HSU, S.; CHI, M.; HUANG, R. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 250-258, 2018.

HU, J.; GE, Z.; WANG, K. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 657-663, 2014.

INCE, C.; TAYANÇLI, S.; DEROGAR, S. Recycling waste wood in cement mortars towards the regeneration of sustainable environment. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123891, 2021.

JANSEN, G.H. **Caracterização microestrutural e determinação de propriedades higrotérmicas de argamassas com adição de cinzas pesadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2007.

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

JANTSCH, A. C. A.; MOHAMAD, G.; SCHMIDT, R. P. B.; ANTONIAZZI, J. P.; LÜBECK, A. Avaliação do comportamento de revestimentos em argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 81-99, 2021.

JESUS, S.; MAIA, C.; FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116844, 2019.

JIANG, L.; LI, C.; WANG, C.; XU, N.; CHU, H. Utilization of flue gas desulfurization gypsum as an activation agent for high-volume slag concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 589-598, 2018.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y.; LI, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 146-159, 2017.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019.

KE, G.; ZHANG, J.; TIAN, B.; WANG, J. Characteristic analysis of concrete air entraining agents in different media. **Cement and Concrete Research**, v. 135, p. 106142, 2020.

KHATIB, J. M.; WRIGHT, L.; MANGAT, P. S. External chemical shrinkage of pastes containing flue gas desulphurisation (FGD) waste. **Engineering sciences**, v. 6, n. 4, p. 1669-1675, 2011.

KHATIB, J. M.; MANGAT, P. S.; WRIGHT, L. Mechanical and physical properties of concrete containing FGD waste. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 11, p. 550-560, 2016.

KIM, Y.; HANIF, A.; USMAN, M.; PARK, W. Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics–Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 149-163, 2019.

KLEIN, N. S.; AGUADO, A.; TORALLES-CARBONARI, B. M.; REAL, L. V. Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 213-220, 2014.

KONG, D.; HUANG, S.; CORR, D.; YANG, Y.; SHAH, S. P. Whether do nano-particles act as nucleation sites for CSH gel growth during cement hydration. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 98-109, 2018.

KORALEGEDARA, N. H.; PINTO, P. X.; DIONYSIOU, D. D.; AL-ABED, S. R. Recent advances in flue gas desulfurization gypsum processes and applications – A review. **Journal of Environmental Management**, v. 251, p. 109572, 2019.

KURDOWSKI, Wieslaw. Special cements. In: **Cement and Concrete Chemistry**. Springer, Dordrecht, 2014. p. 603-659.

LEI, D.; GUO, L.; SUN, W.; LIU, J.; MIAO, C. Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 765-773, 2017.

LEI, L.; LI, R.; FUDDIN, A. Influence of maltodextrin retarder on the hydration kinetics and mechanical properties of Portland cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103774, 2020.

LI, J.; GUO, M.; XUE, Q.; POON, C. S. Recycling of incinerated sewage sludge ash and cathode ray tube funnel glass in cement mortars. **Journal of cleaner production**, v. 152, p. 142-149, 2017.

LI, C.; JIANG, L. Effect of flue gas desulfurization gypsum addition on critical chloride content for rebar corrosion in fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122963, 2021.

LIN, Y.; YAN, J.; WANG, Z.; FAN, F.; ZOU, C. Effect of silica fumes on fluidity of UHPC: Experiments, influence mechanism and evaluation methods. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 451-460, 2019.

LIU, H.; ELCHALAKANI, M.; KARRECH, A.; YEHA, S.; YANG, B. High strength flowable lightweight concrete incorporating low C3A cement, silica fume, stalite and macro-polyfelin polymer fibres. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122410, 2021.

LOZANO-LUNAR, A.; SILVA, P. R. da; BRITO, J. de; ÁLVAREZ, J.I.; FERNÁNDEZ, J.M.; JIMÉNEZ, J.R. Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 818-832, 2019.

LU, B.; QIAN, Y.; LI, M.; WENG, Y.; LEONG, K. F.; TAN, M. J.; QIAN, S. Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 1073-1084, 2019.

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, 2015.

MACIOSKI, G. **Avaliação do comportamento de argamassas estabilizadas para revestimento**. Trabalho Final de Curso (Graduação) - Engenharia Civil - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

MANDAL, P. K.; MANDAL, T. K. Anion water in gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). **Cement and Concrete Research**, 2002.

MANFROI, E. P. **Desenvolvimento de aglomerantes ecoeficientes com encapsulamento de metais pesados**. 2014. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2014.

MARCHON, D.; KAWASHIMA, S.; BESSAIES-BEY, H.; MANTELLATO, S.; NG, S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 96-110, 2018.

MATHIEU, Y.; TZANIS, L.; SOULARD, M.; PATARIN, J.; VIERLING, M.; MOLIÈRE, M. Adsorption of SO<sub>x</sub> by oxide materials: A review. **Fuel processing technology**, v. 114, p. 81-100, 2013.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 340-353, 2018.

MEJDI, M.; SAILLIO, M.; CHAUSSADENT, T.; DIVET, L.; TAGNIT-HAMOU, A. Hydration mechanisms of sewage sludge ashes used as cement replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 135, p. 106115, 2020.

MENDES, J. C.; MORO, T. K.; FIGUEIREDO, A. S.; SILVA, K. D. C.; SILVA, G. C.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 648-661, 2017.

MOHAUPT, A. F. **Influência do resíduo da dessulfuração de gases da coqueria em tijolos de solo-cimento utilizados na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

NABER, C.; BELLMANN, F.; SOWOIDNICH, T.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J. Alite dissolution and CSH precipitation rates during hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 283-293, 2019.

NAIK, T.R.; KUMAR, R.; CHUN, Y.; KRAUS, R.N. Utilization of Powdered Gypsum-Wallboard in Concrete. In: Proc. Int. Conf. **Sustain. Constr. mater. technol.** 2010.

NALET, C.; NONAT, A. Effects of functionality and stereochemistry of small organic molecules on the hydration of tricalcium silicate. **Cement and Concrete Research**, v. 87, p. 97-104, 2016.

NALET, C.; NONAT, A. Ionic complexation and adsorption of small organic molecules on calcium silicate hydrate: Relation with their retarding effect on the hydration of C<sub>3</sub>S. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 97-108, 2016.

NEN, E. A. Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test. 2004.

NETO, A.A.A M.; DJANIKIAN, J. G. **Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central**. EPUSP, 1999.

NIST, National Institute of Standards and Technology. Livro de Química na WEB - <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C526954&Mask=80>. Acesso em 08 de setembro de 2022.

OLIVA, M.; VARGAS, F.; LOPEZ, M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. **Journal of cleaner production**, v. 223, p. 1029-1041, 2019.

OLIVEIRA, V. C. de. **Estudo comportamental da formulação, dos requisitos, e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PAGNUSSAT, D. T.; VIDOR, D.; MASUERO, A. B. Avaliação de propriedades de argamassas estabilizadas ao longo do seu tempo de utilização. In: **4º Congresso Português de Argamassas e ETICS**. Coimbra, 2012.

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

PAPAGEORGIOU, A.; TZOUVALAS, G.; TSIMAS, S. Use of inorganic setting retarders in cement industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 183-189, 2005.

PARIS, J. M.; ROESSLER, J. G.; FERRARO, C. C.; DEFORD, H. D.; TOWNSEND, T. G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.

PCA, Portland Cement Association. Masonry Information. Mortar Cement: Product Data Sheet. EUA. Setembro, 2002a

PCA, Portland Cement Association. Masonry Information. Masonry Cement: Product Data Sheet. EUA. Setembro, 2002b.

PELLENQ, RJ-M.; LEQUEUX, N.; VAN DAMME, H. Engineering the bonding scheme in C-S-H: The iono-covalent framework. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 159-174, 2008.

PLANK, J.; BRANDL, A.; ZHAI, Y.; FRANKE, A. Adsorption behavior and effectiveness of poly (N, N-dimethylacrylamide-co-Ca 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonate) as cement fluid loss additive in the presence of acetone-formaldehyde-sulfite dispersant. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, n. 5, p. 4341-4347, 2006.

PUTHIPAD, N.; OUCHI, M.; ATTACHAIYAWUTH, A. Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 437-444, 2018.

QIAO, M.; CHEN, J.; YU, C.; WU, S.; GAO, N.; RAN, Q. Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 40-46, 2017.

QIAO, M.; SHAN, G.; CHEN, J.; WU, S.; GAO, N.; RAN, Q.; LIU, J. Effects of salts and adsorption on the performance of air entraining agent with different charge type in solution and cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118188, 2020.

RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H.; MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 710-717, 2014.

RAMÍREZ, A.; PAULI, J.; MOTA, B.; CASSELT, C.; SIMON, S.; SCHMIDT, W.; RESCH-GENGER, U. C3A passivation with gypsum and hemihydrate monitored by optical spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v. 133, p. 106082, 2020.

RATH, S.; OUCHI, M.; PUTHIPAD, N.; ATTACHAIYAWUTH, A. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 531-537, 2017.

RICHARDSON, I. G. The calcium silicate hydrates. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 137-158, 2008.

RILEM. 2018. Disponível em <https://www.rilem.net/news/296>. Acesso em 30 de outubro de 2022.

RODRIGUES FILHO, H.E. **Avaliação dos Requisitos Normativos das Argamassas Industrializadas Associados a Critérios de Emprego e Utilização**. Dissertação (Mestrado em Construções Cíveis) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ROMANO, R. C. de O.; TAKAHASHI, M. M.; LIBERATO, C. C.; PILLEGI, R. G. Viscosidade cinemática de pastas cimentícias com incorporadores de ar avaliadas em diferentes temperaturas. *Cerâmica*, 58, 58-65, 2012.

ROMANO, R. C. de O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ROMANO, R. C. de O.; DOS REIS TORRES, D.; PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

ROMANO, R. C. de O.; SCHREURS, H; BELIZÁRIO DA SILVA, F.; CARDOSO, F. A., SEMENSATO B. B. M. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. **Ambiente Construído**, 9, 109-118, 2021.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. do R.; SILVA, A. S.; BRITO, J.; ÁLVAREZ, J. I. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: the role of the aggregates. **Construction and Building materials**, v. 187, p. 907-922, 2018.

SCHACKOW, A.; FERRARI, A. K.; EFFTING, C.; ALVES, V. O.; GOMES, I. R. Stabilized mortar with air incorporator agent and plasticizer set retarder: performance measurement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 6, p. 1248-1259, 2019.

SCHANKOSKI, R. A.; MATOS, P.R.; PILAR, R.; PRUDÊNCIO, L.R.J.; FERRON, R. D. Rheological properties and surface finish quality of eco-friendly self-compacting concretes containing quarry waste powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120508, 2020.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

SCRIVENER, K. L.; OUZIA, A.; JUILLAND, P.; MOHAMED, A. K. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105823, 2019.

SCRIVENER, K. L. et al. (Ed.). Um guia prático para análise microestrutural de materiais cimentícios. Boca Raton, FL, EUA: Crc Press, 2016.

SCRIVENER, K. L.; QUENNOZ, A.; Interactions between alite and C<sub>3</sub>A-gypsum hydrations in model cements. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 46-54, 2013.

SHAH, H. A.; YUAN, Q.; ZUO, S. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete-a review. **Construction and Building Materials**, p. 121835, 2020.

SHAIKH, F. U. A.; MALI, S. Properties of stabilized recycled plastic concretes made with three types of cement. **Structural Concrete**, v. 17, n. 2, p. 287-297, 2016.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in crystal growth and characterization of materials**, v. 53, n. 1, p. 57-77, 2007.

SINGH, S. K.; KIRTHIKA, S. K.; SURYA, M. Agenda for use of alternative sands in India. **Indian Concr. Inst. J.**, v. 19, n. 3, p. 1-11, 2018.

SOUZA, A. T. CALDAS, R. B.; LUDVIG, P.; SANTOS, W. J. dos. The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118740, 2020.

SRIVASTAVA, Ravi K. **Controlling SO<sub>2</sub> Emissions—a Review of Technologies**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA/600/R-00/093; 2000.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B.; PAGNUSSAT, D. T.; KIRCHHEIM, A. P. Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 298-307, 2016.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261-271, 2018.

TAYLOR, H. F. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford, 1997.

TEIXEIRA, R. A. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): Avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M. Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 71-80, 2015.

THYMOTIE, A.; CHANG, T.; NGUYEN, H. Improving properties of high-volume fly ash cement paste blended with  $\beta$ -hemihydrate from flue gas desulfurization gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 120494, 2020.

TORRÉNS-MARTÍN, D.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Effect of sulfate content on cement mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 144-150, 2013.

TREVISOL, J. L. A. **Estudo Comparativo entre as Argamassas: Estabilizada Dosada em Central, Industrializada e Produzida em Obra por meio de Ensaio Físicos nos Estados Fresco e Endurecido**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Tecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (Institutos Lactec), Curitiba, 2015.

TZOUVALAS, G.; DERMATAS, N.; TSIMAS, S. Alternative calcium sulfate-bearing materials as cement retarders: part I. Anhydrite. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 11, p. 2113-2118, 2004.

VON DAAKE, H.; STEPHAN, D. Adsorption kinetics of retarding admixtures on cement with time controlled addition. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 119-126, 2017.

WALIA, M. K.; DICK, W. A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, v. 320, p. 67-73, 2018.

WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659-672, 2018.

WANG, Q.; CUI, X.; WANG, J.; LI, S.; LV, C.; DONG, Y. Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 35-44, 2017.

WANG, T.; WU, K.; WU, M. Development of green binder systems based on flue gas desulfurization gypsum and fly ash incorporating slag or steel slag powders. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120275, 2020.

WU, Q.; MA, H.; CHEN, Q.; HUANG, Z.; ZHANG, C.; YANG, T. Preparation of waterproof block by silicate clinker modified FGD gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 318-325, 2019.

XIE, E.; ZHOU, C.; SONG, Q.; ZENG, Q.; WANG, Z. The effect of chemical aging on water permeability of white cement mortars in the context of sol-gel science. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103812, 2020.

XU, L.; WU, K.; LI, N.; ZHOU, X.; WANG, P. Utilization of flue gas desulfurization gypsum for producing calcium sulfoaluminate cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 803-811, 2017.

YANG, H.; LONG, D.; ZHENYU, L.; YUANJIN, H.; TAO, Y.; XIN, H.; JIE, W.; ZHONGYUAN, L.; SHUZHEN, L. Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 276-283, 2019.

YANG, L.; JING, M.; LU, L.; ZHU, X.; ZHAO, P.; CHEN, M.; LI, L.; LIU, J. Effects of modified materials prepared from wastes on the performance of flue gas desulfurization gypsum-based composite wall materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119519, 2020.

YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Microstructure and mechanical properties of  $\beta$ -hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3149-3157, 2011.

ZAJAC, M.; ROSSBERG, A.; SAOUT, G.L.; LOTHENBACH, B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 99-108, 2014.

ZAJAC, M.; SKOCEK, J.; BULLERJAHN, F.; HAHA, M. B. Effect of retarders on the early hydration of calcium-sulpho-aluminate (CSA) type cements. **Cement and Concrete Research**, v. 84, p. 62-75, 2016.

ZALESKI, A. Avaliação do efeito do uso de fosfogesso e agente retentor de água no processo de estabilização e durabilidade de argamassas estabilizadas. 2021.

ZAREMBA, T.; MOKROSZ, W.; HEHLMANN, J.; SZWALIKOWSKA, A.; STAPIŃSKI, G. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 93, n. 2, p. 439-443, 2008.

ZHANG, H.; GAO, P.; ZHANG, Z.; PAN, Y. Influencing factors of parameters of air-void structure in fresh cement mortars. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 13, n. 4, p. 417-422, 2020.

ZHANG, W.; HAMA, Y.; NA, S. H. Drying shrinkage and microstructure characteristics of mortar incorporating ground granulated blast furnace slag and shrinkage reducing admixture. **Construction and building materials**, v. 93, p. 267-277, 2015.

ZHANG, X.; ZHANG, H.; GAO, H.; HE, Y.; JIANG, M. Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 245-255, 2019.

ZHANG, Y.; PAN, F.; WU, R. Study on the performance of FGD gypsum-metakaolin-cement composite cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 1-11, 2016.

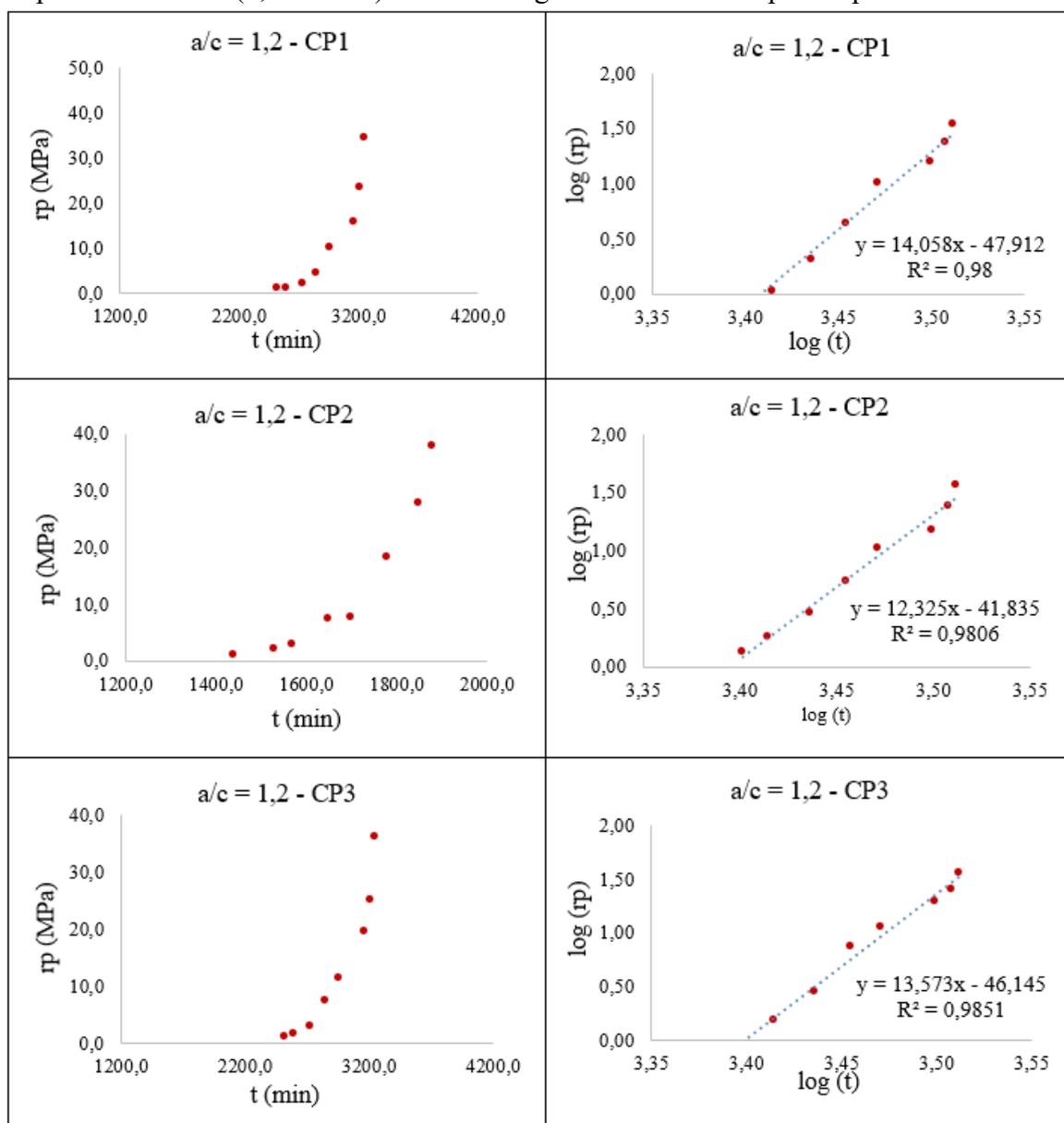
ZHAO, M.; ZHANG, X.; ZHANG, Y. Effect of free water on the flowability of cement paste with chemical or mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 571-579, 2016.

ZHU, P.; JIANG, L.; SHI, Y.; XU, N.; JIN, M. Influence of retarders on hydration and microstructure development of cement containing high-volume limestone powder. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 141, n. 2, p. 685-696, 2020

ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. The influence of the filler effect on the sulfate requirement of blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 126, p. 105918, 2019.

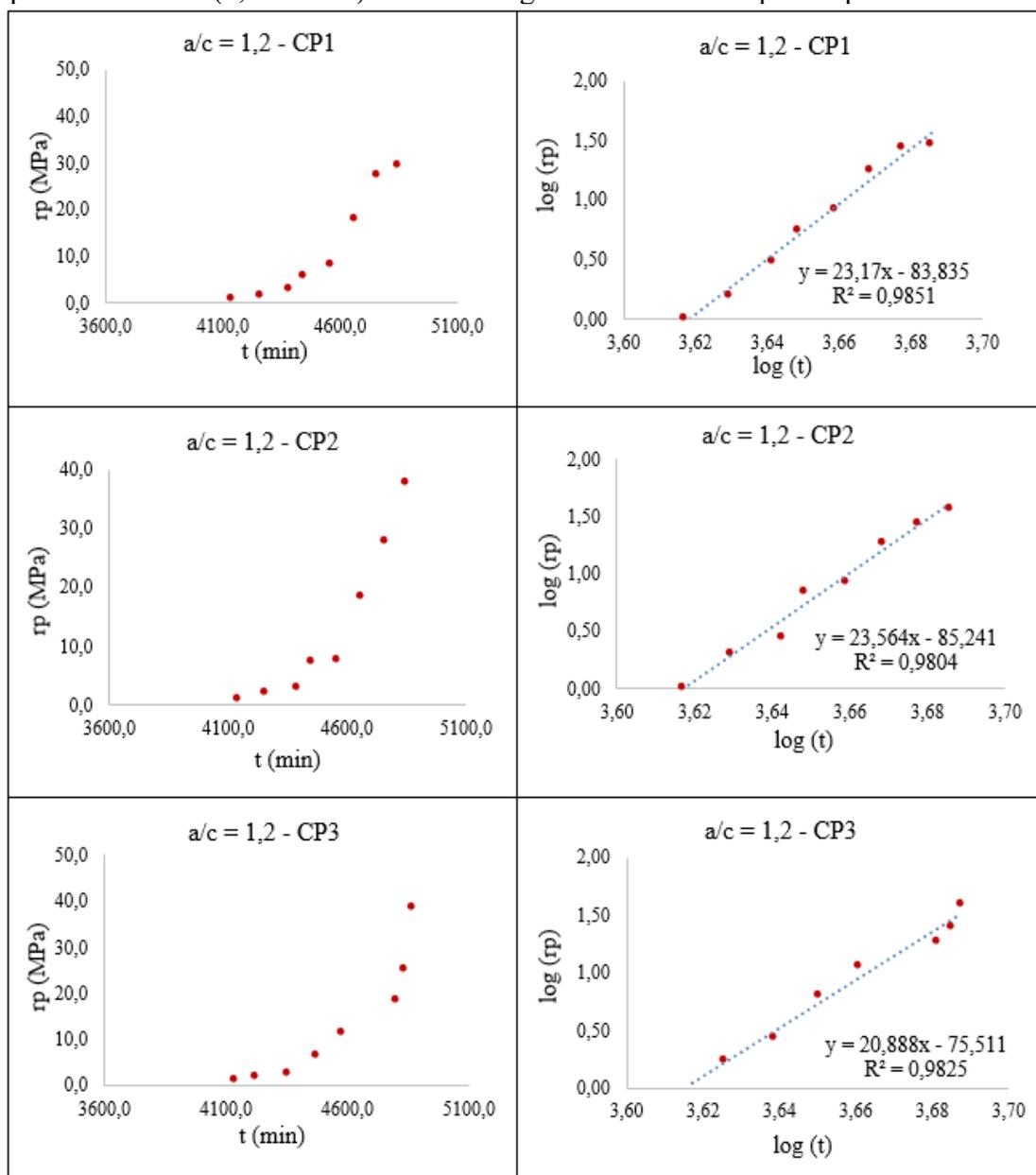
## ANEXO A – RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO E RETAS DE REGRESSÃO

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_D\_025) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



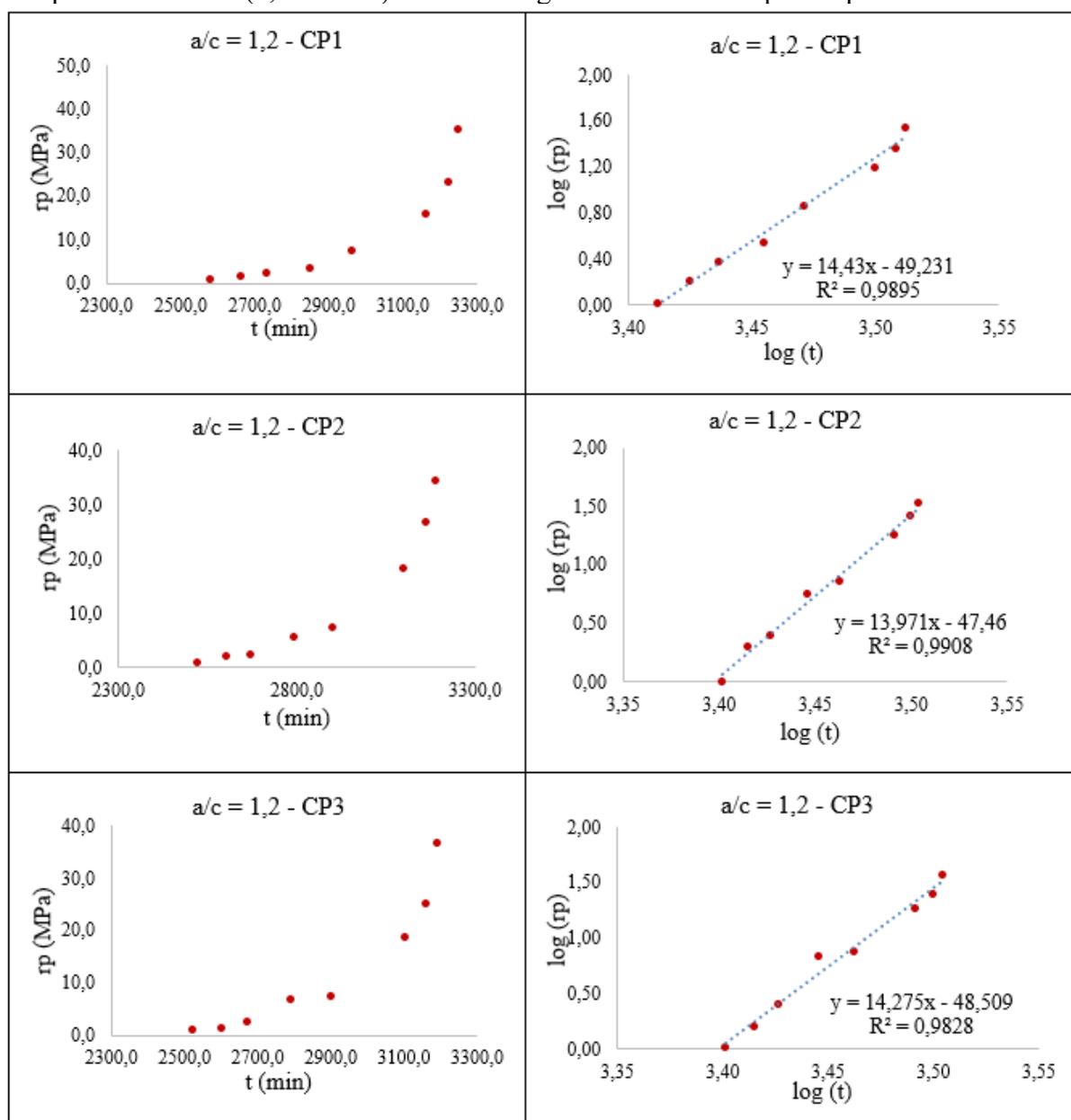
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_D\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



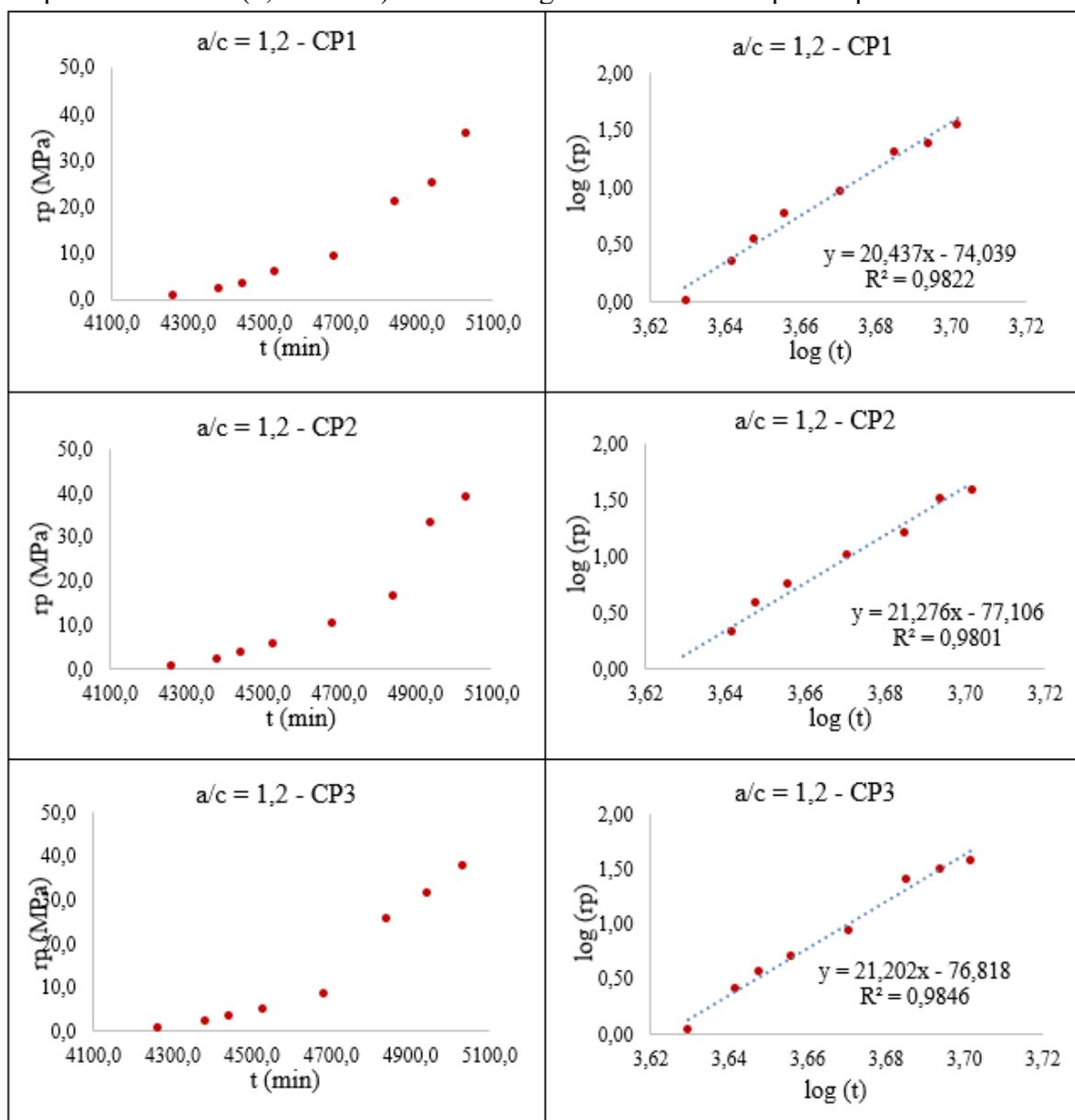
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_H\_025) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



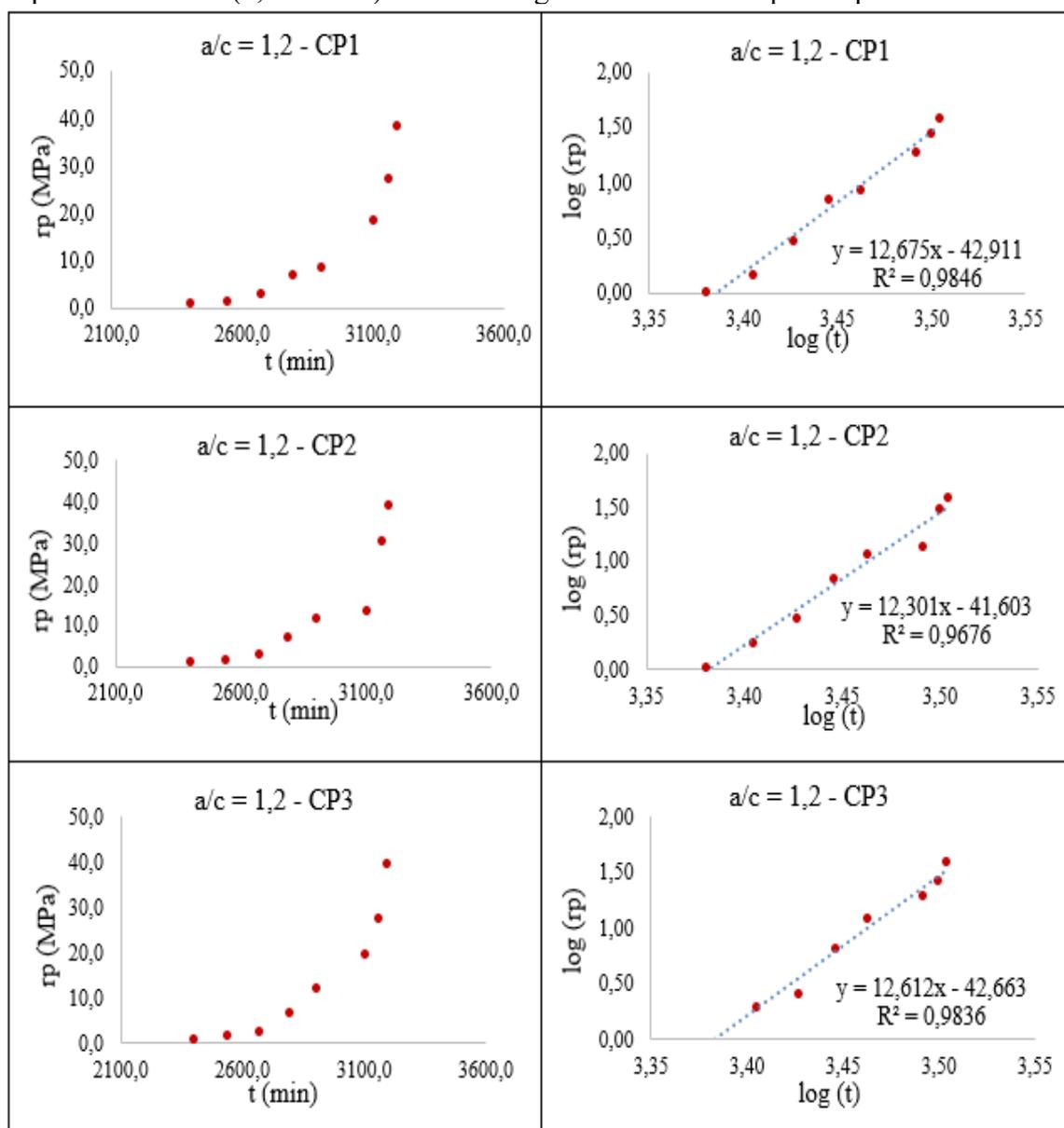
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_H\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



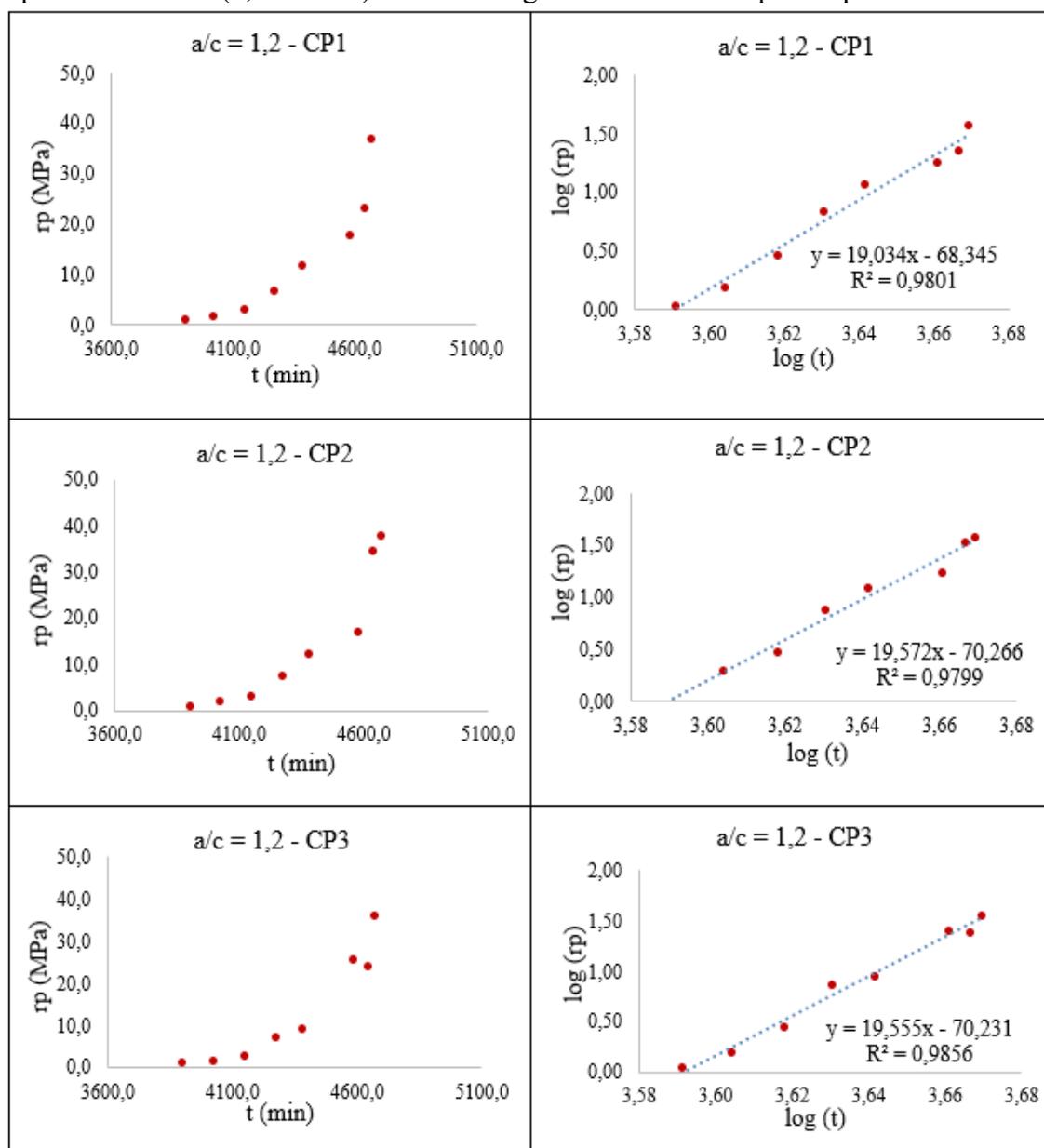
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_A\_025) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



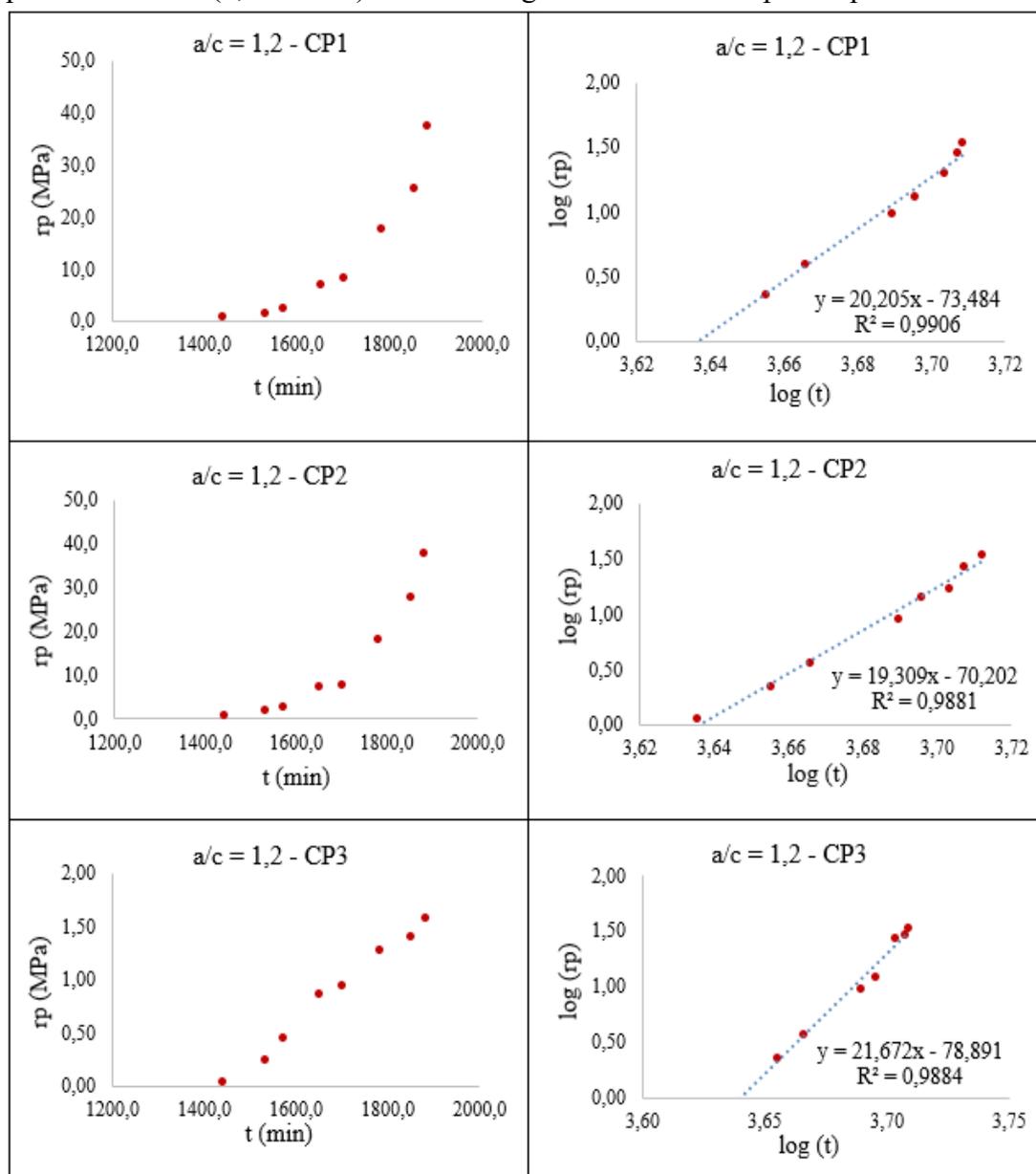
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (03\_A\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,3% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



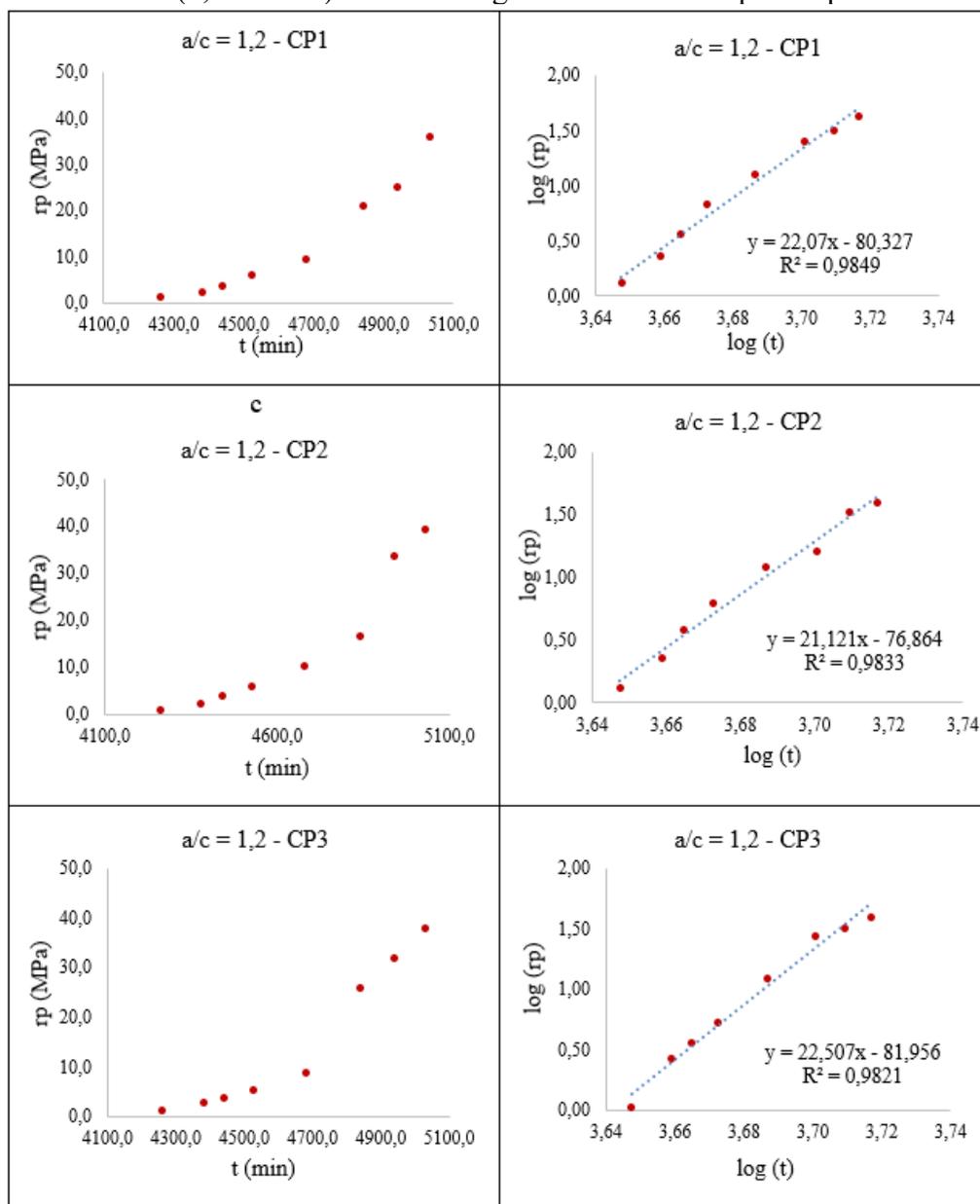
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (06\_D\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,6% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



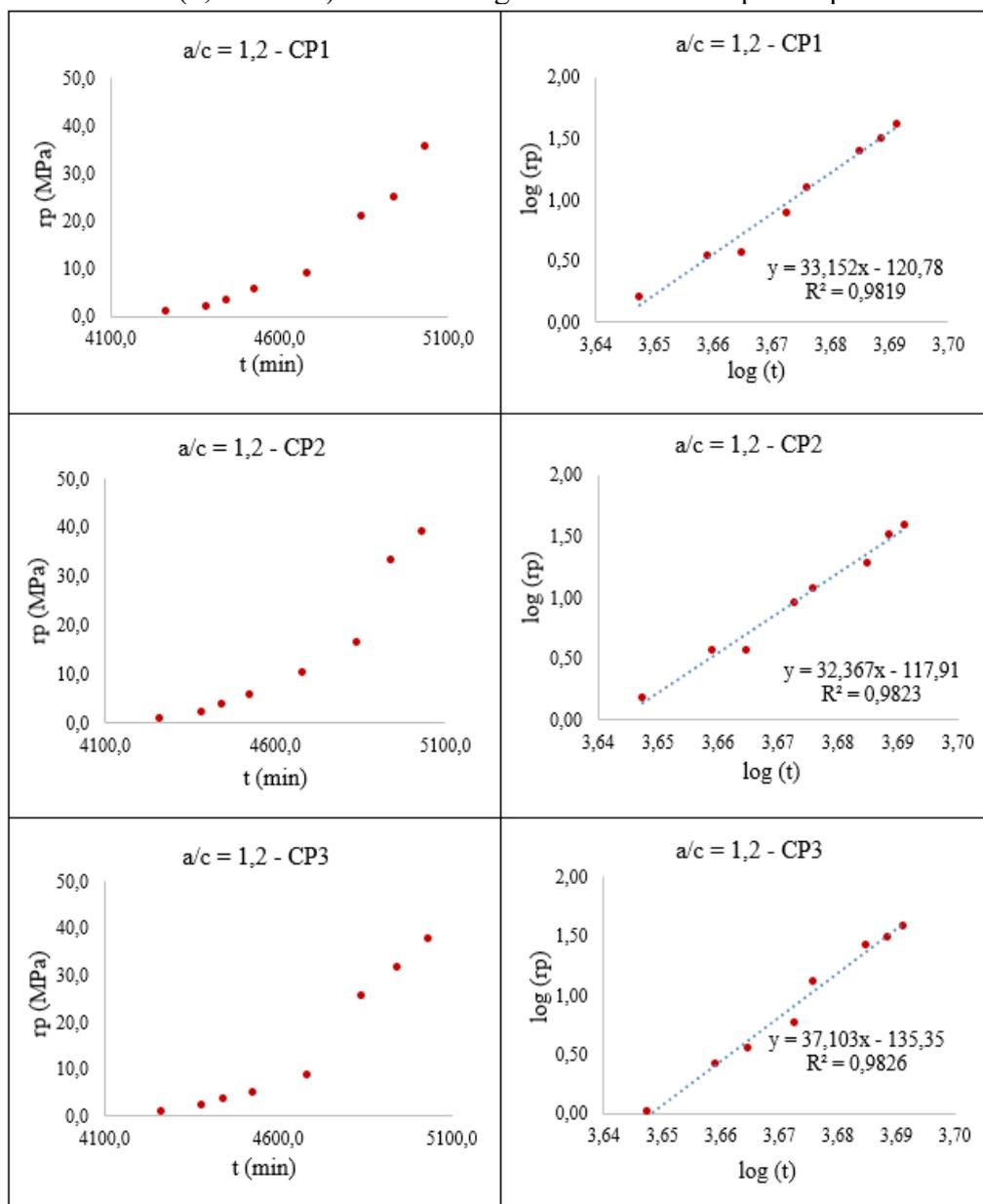
Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (06\_H\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,6% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



Fonte: Autora (2023)

Desenvolvimento da resistência à penetração para a mistura (06\_A\_15) nos três corpos de prova ensaiados (0,6% AEH) e retas de regressão dos três corpos de prova analisados



Fonte: Autora (2023)