

Análise do comportamento reológico de argamassas de revestimento pelo método de *squeeze-flow* sobre diferentes substratos

Rheological behavior analysis of rendering mortars using the squeeze-flow method on various substrates

Rafaella Salvador Paulino 

Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa 

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento reológico de argamassas de revestimento mista (traço 1:1:6, cimento:cal:areia, em volume), industrializada e estabilizada, quando aplicadas sobre diferentes substratos. As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e seu comportamento reológico foi avaliado pelo método *squeeze-flow*, empregando base metálica, bloco cerâmico e chapisco aplicado sobre o bloco cerâmico, nas velocidades de 0,1, 1 e 3 mm/s. Curvas de força por deslocamento foram desenhadas e, a partir delas, foram realizadas análises das transições entre os estágios elástico, plástico e de embricamento das argamassas. Os resultados indicaram que as argamassas estabilizadas apresentaram fases plásticas mais extensas em relação às demais, em todos os tipos de substratos. Todas as argamassas analisadas demonstraram uma capacidade inferior de espalhamento com o aumento da absorção de água inicial e rugosidade dos substratos. Embora existam limitações normativas, o comportamento reológico das argamassas foi influenciado tanto por suas características quanto pelos substratos. O ensaio de *squeeze-flow* sobre bloco cerâmico e chapisco demonstra a necessidade de se considerar a diversidade de substratos para análise do comportamento das argamassas de revestimento e para fornecer práticas construtivas mais aprimoradas.

Palavras-chave: Reologia. Comportamento reológico. Argamassa de revestimento. *Squeeze-flow*. Rugosidade.

Abstract

The research aimed to evaluate the rheological behavior of mixed rendering mortars (mix ratio 1:1:6, cement:lime, by volume), industrialized, and stabilized mortars when applied to different substrates. The mortars were characterized in their fresh state, and their rheological behavior was assessed using the squeeze-flow method, employing a metal base, a ceramic block, and plaster applied over the ceramic block, at speeds of 0.1, 1, and 3 mm/s. Force-displacement curves were plotted, and from these, analyses of the transitions between the elastic, plastic, and yield stages of the mortars were conducted. The results indicated that the stabilized mortars exhibited more extensive plastic phases compared to the others across all types of substrates. All analyzed mortars demonstrated a reduced spreading capacity with increased initial water absorption and roughness of the substrates. Although there are normative limitations, the rheological behavior of the mortars was influenced by both their characteristics and the substrates. The squeeze-flow test on the ceramic block and plaster highlights the need to consider the diversity of substrates for analyzing the behavior of rendering mortars and to provide improved construction practices.

¹Rafaella Salvador Paulino

¹Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Marienne do Rocio de Mello
Maron da Costa

²Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

Recebido em 27/11/23
Aceito em 17/04/24

Keywords: Rheology. Rheological Behavior. Coating mortars. Rendering mortars. *Squeeze-flow*. Roughness.

Introdução

O método *squeeze-flow* é empregado na caracterização reológica de diversas categorias de materiais, consistindo na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, com controle da velocidade e carga aplicadas (Costa *et al.*, 2020). Sua aplicabilidade se estende a diferentes configurações, sendo particularmente indicado para materiais heterogêneos sujeitos a condições semelhantes durante a aplicação prática. Distingue-se das técnicas reométricas tradicionais ao proporcionar uma análise focada na resposta do material sob compressão uniaxial (Grandes *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm utilizado esse método para investigar o comportamento reológico de argamassas de revestimento (Marvila *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2020; Stolz *et al.*, 2016), argamassas colantes (Fujii-Yamagata *et al.*, 2020; Azevedo *et al.*, 2017), argamassas reforçadas com fibras (Madeiros *et al.*, 2019), argamassas à base de cimento (Abu-Bakr *et al.*, 2024; Caldas *et al.*, 2023; Grandes *et al.*, 2021; Cardoso *et al.*, 2009), argamassas poliméricas (Nicolini *et al.*, 2021), concretos de ultra alto desempenho (Sadrmomtazi; Tajasosi; Tahmouresi, 2018), entre outros.

Neste contexto, o método de *squeeze-flow* tem se mostrado adequado para a avaliação reológica de argamassas devido à sua capacidade de analisar amostras com diversas consistências, distribuições de tamanho de partículas e teores de sólidos, mediante ajustes nos parâmetros e configurações na execução do ensaio (Cardoso *et al.*, 2009). As argamassas, devido às diversas finalidades de aplicação, estão sujeitas a distintas condições durante seu uso, como na mistura, aplicação manual, lançamento, bombeamento, projeção mecânica, espalhamento e acabamento (Grandes *et al.*, 2021). Embora a maioria das pesquisas tenham sido direcionadas à avaliação do comportamento reológico de diversas formulações de argamassas aplicadas em superfícies não absorventes, quando a argamassa é aplicada sobre substratos utilizados nas edificações, como de bloco cerâmico ou de concreto, a configuração do método se aproxima mais da realidade. Isso é capaz de proporcionar informações relevantes sobre a interação entre a argamassa e a superfície do substrato no desenvolvimento da aderência (Costa *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o espalhamento da argamassa é considerado como uma função linear da absorção do substrato, indicando que o espalhamento diminui à medida que a absorção de água pelo substrato aumenta (Costa, 2014). Além disso, após a aplicação da argamassa fresca sobre o substrato, diversos fatores influenciam o desempenho mecânico da argamassa endurecida. Esses fatores abrangem a molhagem do substrato pelo contato com a argamassa e a subsequente sucção capilar, o transporte de partículas mais finas para a interface devido ao fluxo capilar, o equilíbrio de umidade entre substrato e argamassa, a hidratação do cimento e a formação de uma fase sólida coesiva entre o substrato e a argamassa (Barbosa, 2010; Antunes, 2006).

Costa *et al.* (2020) analisaram o comportamento reológico de argamassas e sua resistência de aderência com substrato de bloco cerâmico. Verificaram uma redução do deslocamento (em torno de 60%) quando a argamassa era aplicada sobre substrato de bloco em comparação com uma placa não absorvente, e um aumento na resistência de aderência de 54% com o aumento do teor de água para a mesma composição de argamassa. Stolz *et al.* (2016) avaliaram a influência da textura do substrato e das características reológicas das argamassas na resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de argamassas de revestimento. Os resultados mostraram que o aumento da área de contato no substrato devido a diferentes texturas superficiais nem sempre resulta em aumento da resistência de aderência. Em vez disso, a reologia das argamassas de revestimento emerge como o principal determinante da capacidade de aderência, exigindo otimização da trabalhabilidade para garantir durabilidade do revestimento em resposta à rugosidade do substrato.

Considerando que a avaliação do desempenho e da durabilidade de revestimentos de argamassa envolve diversos ensaios, tanto na argamassa isoladamente quanto após sua aplicação em diferentes substratos (Bernardo *et al.*, 2020), este estudo objetivou investigar o comportamento reológico de argamassas de revestimento (mista, industrializada e estabilizada) por meio do ensaio de *squeeze-flow*, realizado em diferentes tipos de substratos. Estes incluíram a base metálica conforme o método normativo, bloco cerâmico comumente utilizado em alvenaria racionalizada e chapisco aplicado sobre a superfície do bloco cerâmico, utilizado como ponte de aderência entre a argamassa de revestimento e o substrato. A seleção destes substratos visou comparar o método normativo com aplicações mais representativas da realidade de obra e estimular pesquisas futuras correlacionando esses comportamentos com a resistência de aderência na interface argamassa/substrato.

Materiais e métodos

O programa experimental foi desenvolvido utilizando-se três diferentes tipos de argamassas de revestimento (mista – AM, industrializada – AI e estabilizada – AE), as quais foram caracterizadas no estado fresco e quanto ao seu comportamento reológico pelo método squeeze-flow. Na execução deste ensaio, foram utilizados três tipos de substratos (base metálica, bloco cerâmico e chapisco aplicado sobre a superfície do bloco cerâmico). Uma síntese do programa experimental é apresentada na Figura 1.

Argamassas

Argamassa mista

A argamassa mista (AM) utilizada era de traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), em volume. Para sua produção foi utilizado cimento Portland CP II-F-32, em conformidade com os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018), com massa específica de 3,09 g/cm³ (ABNT, 2017) e massa unitária de 1053,20 kg/m³ (ABNT, 2006), cujas especificações, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 1. A cal hidratada utilizada foi a CH III, cal dolomítica, composta de hidróxidos de cálcio e magnésio, atendendo aos requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), com massa específica de 2,66 g/cm³ e massa unitária de 593,52 kg/m³. O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa, proveniente do rio Paraná. A composição granulométrica e caracterização física da areia estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 1 - Programa experimental

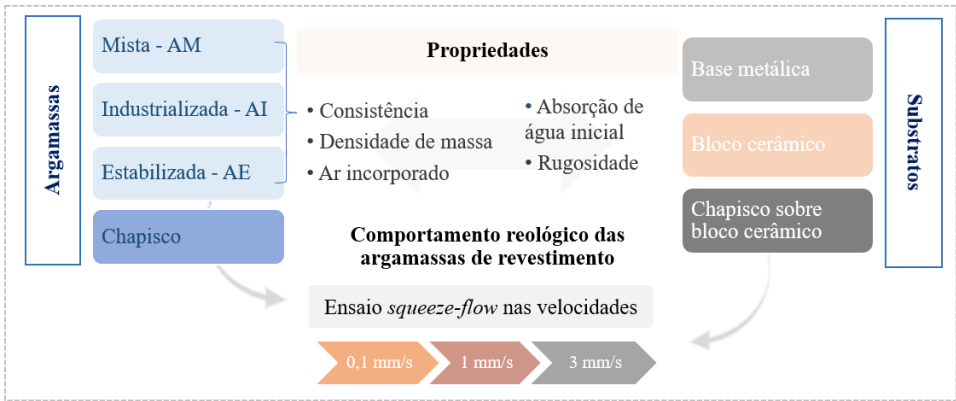


Tabela 1 - Especificações do CP II-F-32

CP II-F-32		Limite NBR 16697 (ABNT, 2018)
Características físicas		
Início do tempo de pega (min.)	216	≥ 60
Fim do tempo de pega (min.)	270	≤ 600
Superfície específica (cm ² /g)	3404	≥ 2600
Resíduo insolúvel (%)	1,43	≤ 7,5
Resistência à compressão - 1 dia (MPa)	15,9	N/A
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	30,2	≥ 10
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	35,5	≥ 20
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	41,8	≥ 32
Características químicas		
Al ₂ O ₃ (%)	4,31	-
SiO ₂ (%)	18,10	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2,95	-
CaO (%)	60,25	-
MgO (%)	2,59	N/A
SO ₃ (%)	2,55	≤ 4,5
Perda de fogo (%)	6,73	≤ 12,5
CaO livre (%)	1,73	-

Fonte: fabricante (2023).

Tabela 2 - Composição granulométrica e caracterização física da areia

Peneira	Massa retida (g)	% retida	Massa retida acumulada (g)	% retida acumulada	% passante acumulada
4,75	0,84	0	0,84	0	100
2,36	2,49	0	3,33	1	99
1,18	6,84	1	10,17	2	98
0,6	37,03	7	47,20	9	91
0,3	277,36	55	324,56	65	35
0,15	166,27	33	490,83	98	2
0,075	7,79	2	498,61	100	0
Fundo	0,56	0	499,17	100	0
Propriedades			Valor	Norma técnica	
Módulo de finura (-)			1,75	NBR 17054 (ABNT, 2022a)	
Dimensão máxima característica (mm)			1,18		
Classificação (-)			Fina		
Massa unitária solta (g/cm ³)			1,37	NBR 16972 (ABNT, 2021a)	
Massa unitária compactada (g/cm ³)			1,49		
Índice de vazios (%)			38,2		
Massa específica (g/cm ³)			2,65	NBR 16916 (ABNT, 2021b)	
Absorção (%)			0,90		
Material pulverulento (%)			1,33	NBR 16973 (ABNT, 2021c)	

Argamassa industrializada

A argamassa industrializada (AI) utilizada era do tipo massa pronta, disponibilizada em embalagens de 20 kg. A sua composição, de acordo com o fabricante, era feita por cimento Portland, areia de sílica e areia de carbonato de cálcio, nas faixas de concentração de 5-25%, 10-35% e 45-74%, respectivamente, além de aditivos químicos.

Argamassa estabilizada

A argamassa estabilizada (AE) foi fornecida por empresa consolidada na região. Era constituída de cimento, areia, água e aditivos incorporador de ar e inibidor de hidratação, de acordo com o fabricante. A argamassa foi transportada da central dosadora até a área externa do laboratório por caminhão betoneira, onde foi descarregada em caixas metálicas de capacidade de 0,5 m³. Foi disposta uma lâmina d'água de 2 cm sobre a mistura durante o período de estabilização, seguindo a recomendação do fabricante. As caixas foram adequadamente protegidas contra agentes externos.

Argamassa para chapisco

A argamassa empregada para o chapisco rolado era do tipo industrializada, disponibilizada em embalagens de 20 kg, cuja composição era feita por cimento, polímeros, agregados minerais e aditivos especiais, de acordo com o fabricante. As características e propriedades da argamassa para chapisco, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas no Quadro 1.

Substratos

Foram utilizados três tipos de substratos no programa experimental: base metálica, bloco cerâmico e chapisco aplicado sobre a superfície do bloco cerâmico. Os blocos cerâmicos, sendo comumente empregados na alvenaria racionalizada, possuíam furos verticais e dimensões nominais de (140 x 190 x 290) mm (largura x altura x comprimento), com uma taxa de absorção de água (AA) determinada em 21%. O preparo e a aplicação da argamassa de chapisco sobre o bloco cerâmico foram realizados de acordo com as instruções do fabricante. Foi utilizado um rolo de textura alta com movimentos de vaivém para cobrir uniformemente toda a superfície, com uma espessura aproximada de 3 mm. A caracterização dos substratos realizada em termos de absorção de água inicial (AAI) (ABNT, 2023) e a rugosidade superficial (ABNT, 2022b), determinada por meio de um perfilômetro (Mitutoyo, modelo SJ-410), estão apresentadas na Tabela 3.

Quadro 1 - Características e propriedades da argamassa para chapisco rolado

Propriedades físicas	
Consumo	$\pm 2,80 \text{ kg/m}^2$
Densidade fresca	$1,6 - 2,0 \text{ g/cm}^3$
Propriedades mecânicas	
Resistência de aderência à tração em laboratório	
3 dias	$\geq 0,4 \text{ MPa}$
28 dias	$\geq 0,6 \text{ MPa}$
Resistência de aderência à tração em campo	
3 dias	$\geq 0,3 \text{ MPa}$

Fonte: fabricante (2023).

Tabela 3 - Caracterização dos substratos em termos de rugosidade e absorção de água inicial

Substrato	Rugosidade (μm)					AAI ($\text{g}/194.\text{cm}^2/\text{min}$)		
	Ra	Rq	Rz	Desv. Pad.	CV (%)	Média	Desv. Pad.	CV (%)
Base metálica	0,476	0,610	3,309	0,019	3,90	-	-	-
	0,503	0,706	3,602					
Bloco cerâmico	1,820	2,396	9,420	0,138	8,01	0,26	0,05	19,93
	1,625	2,010	9,162					
Chapisco sobre bloco cerâmico	18,418	21,619	80,462	1,055	5,97	1,03	0,11	10,45
	16,926	19,804	72,028					

Note: Ra = valor médio; Rq = valor mínimo; e Rz = valor máximo.

Produção e caracterização das argamassas no estado fresco

As argamassas mista e industrializada foram preparadas em argamassadeira planetária, em ambiente de laboratório, seguindo o procedimento de mistura estabelecido pela NBR 16541 (ABNT, 2016a), com relação água/materiais secos de 0,20. A argamassa estabilizada foi fornecida pronta para uso e, previamente à sua utilização, era remisturada de forma manual, para melhorar sua trabalhabilidade no momento de aplicação. A caracterização do estado fresco das argamassas quanto à densidade de massa, teor de ar incorporado (ABNT, 2005) e índice de consistência (ABNT, 2016b) está apresentada na Tabela 4.

Comportamento reológico das argamassas pelo método *squeeze-flow*

As argamassas de revestimento foram ensaiadas em relação ao seu comportamento reológico pelo método *squeeze-flow*, de acordo com o estabelecido na NBR 15839 (ABNT, 2010). O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios com sistema hidráulico da marca EMIC, utilizando uma célula de carga de 20 kN. As amostras preparadas para os ensaios tinham 10 mm de altura e 101 mm de diâmetro, sendo testadas sobre a base metálica normativa (Figura 2a), substrato de bloco cerâmico (Figura 2b) e chapisco previamente aplicado sobre o bloco cerâmico (Figura 2c). A NBR 15839 (ABNT, 2010) especifica velocidades de deslocamento de 0,1 mm/s e 3 mm/s para o ensaio. Pesquisadores (Martins, 2021; Cardoso *et al.*, 2009) recomendam velocidades dentro deste intervalo (de 0,1 mm/s a 3 mm/s), pois essa faixa abrange os fenômenos práticos que ocorrem durante a aplicação da argamassa de revestimento ao substrato. Nesta pesquisa, foram utilizadas três velocidades de ensaio (0,1 mm/s, 1 mm/s e 3 mm/s) para permitir uma variedade de resultados e contribuir com a interpretação dos dados. Os ensaios foram realizados 10 minutos do início do processo de mistura das argamassas mista e industrializada e durante as primeiras 24 horas do recebimento da argamassa estabilizada. As Figuras 2d, 2e e 2f ilustram os termos dos ensaios.

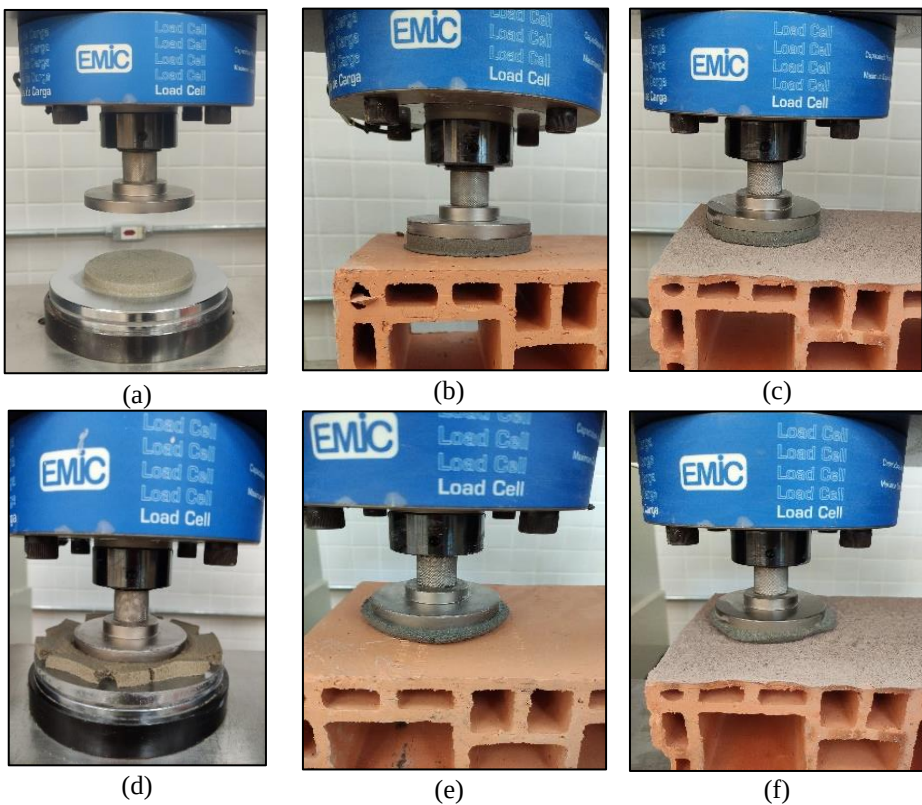
A partir das curvas obtidas no ensaio e seguindo a metodologia proposta por Martins (2021), foi possível determinar o deslocamento e a força nos pontos de transição do estágio elástico para o estágio plástico das argamassas (DE_{máx}, FE_{máx}) assim como nos pontos de transição do estágio plástico para o estágio de imbricamento das argamassas (DP_{máx}, FP_{máx}).

Tabela 4 - Valor médio, desvio-padrão e coeficiente de variação de diferentes propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco

Argamassa	Consistência (mm)			Densidade de massa (g/cm ³)			Ar incorporado (%)		
	Média	Desv. Pad.	CV (%)	Média	Desv. Pad.	CV (%)	Média	Desv. Pad.	CV (%)
AM	253 ^A	1,53	0,60	2,03 ^B	0,01	0,61	4 ^C	0,59	15,81
AI	262 ^A	2,08	0,79	1,93 ^B	0,01	0,45	16 ^C	0,38	2,40
AE	269 ^A	0,58	0,21	1,86 ^B	0,00	0,26	-	-	-
Análise estatística	^A $\rho = 5,41 \cdot 10^{-5}$			^B $\rho = 2,59 \cdot 10^{-9}$			^C $\rho = 4,09 \cdot 10^{-8}$		

Note: (-) dado não fornecido pelo fabricante; análise de variância (ANOVA) foi realizada com um nível de confiança de 95%; ^{A,B,C} estatisticamente significativo.

Figura 2 - Ensaio *squeeze-flow*, execução sobre: base metálica (a, d), bloco cerâmico (b, e), chapisco sobre bloco cerâmico (c, f)



As variações dos deslocamentos (Δ_D) e da força (Δ_F) foram determinadas a partir das Equações 1 e 2.

$$\Delta_D = DP_{\text{máx}} - DE_{\text{máx}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\Delta_F = FP_{\text{máx}} - FE_{\text{máx}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$DE_{\text{máx}}$ é o deslocamento elástico máximo;

$FE_{\text{máx}}$ é a força elástica máxima;

$DP_{\text{máx}}$ é o deslocamento plástico máximo; and

$FP_{\text{máx}}$ é a força plástica máxima.

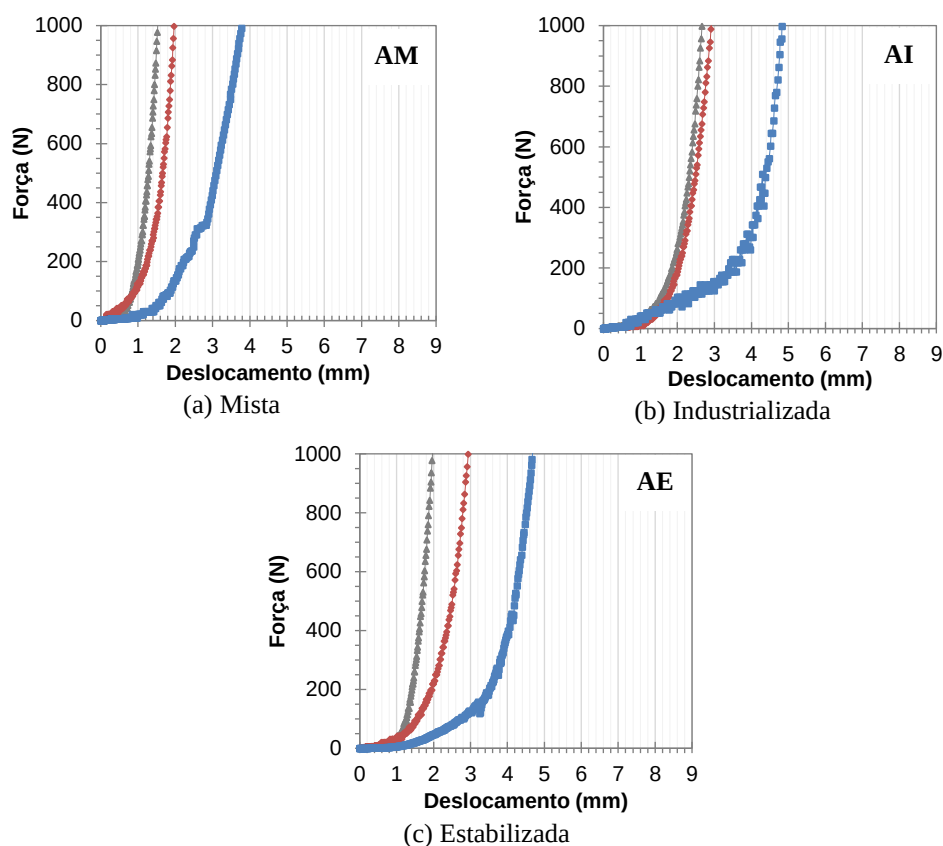
Resultados e discussões

Comportamento reológico das argamassas

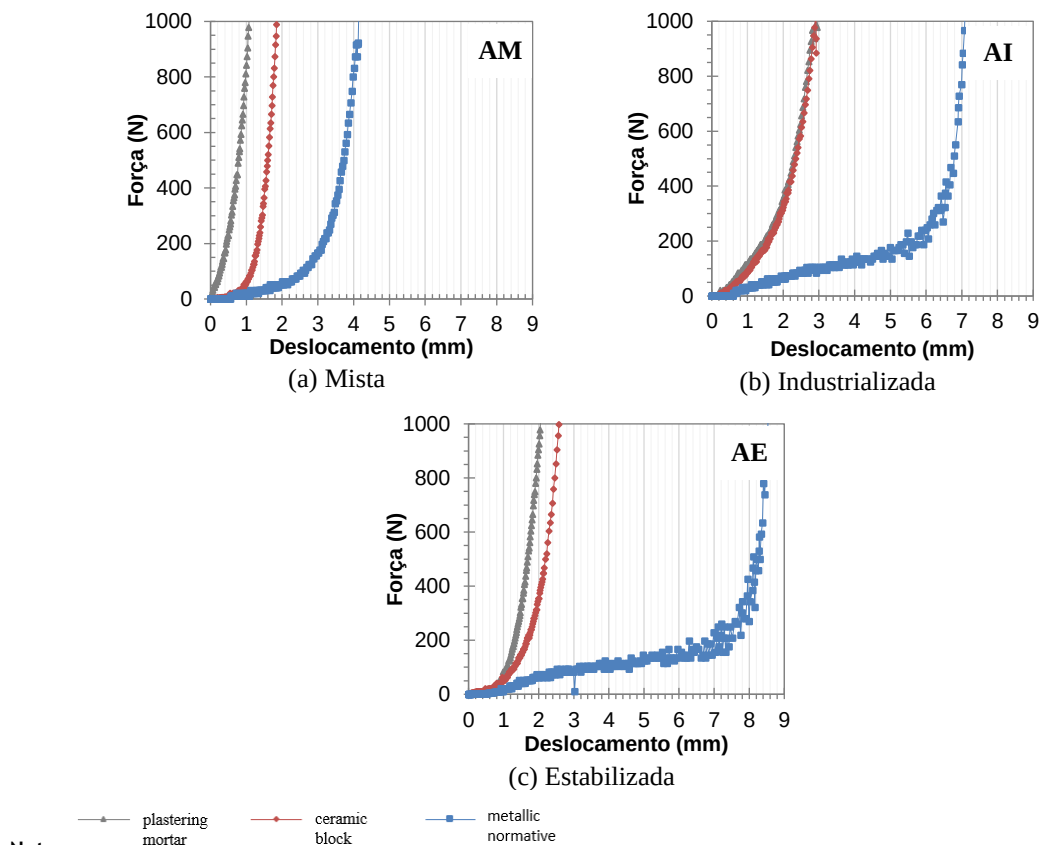
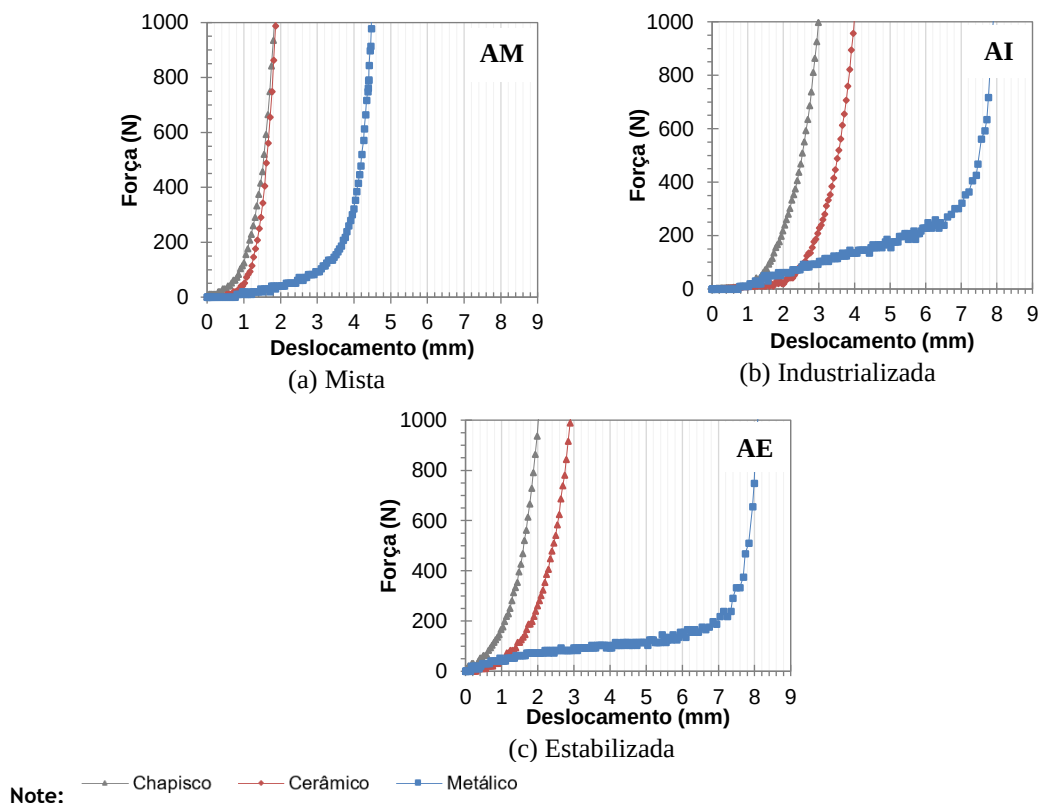
As curvas resultantes da caracterização reológica das argamassas mista, industrializada e estabilizada, pelo método squeeze-flow, avaliadas sobre três diferentes substratos (base metálica, bloco cerâmico e chapisco aplicado sobre a superfície do bloco cerâmico), estão apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5, para as velocidades de ensaio de 0,1, 1 e 3 mm/s, respectivamente.

A análise das curvas evidencia um comportamento análogo das argamassas mista, industrializada e estabilizada, quando ensaiadas sobre os três distintos substratos, considerando as variadas velocidades de ensaio. É possível observar uma maior capacidade de espalhamento das argamassas sobre a base metálica em comparação ao bloco cerâmico, seguido pelo substrato de chapisco aplicado sobre o bloco cerâmico, que apresentou um espalhamento mais restrito, nas três velocidades. Este fenômeno pode ser atribuído, em parte, à superfície irregular do chapisco, dificultando o deslizamento da argamassa, enquanto a superfície metálica, sendo não absorvente e lisa, favorece tal comportamento.

Figura 3 - Curvas do ensaio *squeeze-flow* para argamassas na velocidade de 0,1 mm/s



Note: — Chapisco — Cerâmico — Metálico

Figura 4 - Curvas do ensaio *squeeze-flow* para argamassas, na velocidade de 1 mm/sFigura 5 - Curvas do ensaio *squeeze-flow* para argamassas, na velocidade 3 mm/s

A rugosidade das superfícies apresentadas como caracterização dos substratos contribui para esta percepção. Ademais, a possível percolação de água pelas estruturas porosas do bloco cerâmico e do chapisco pode ter resultado em uma redução do teor total de água na amostra. A absorção de água pelo substrato contribui para uma maior resistência à deformação das argamassas, reduzindo sua capacidade de espalhamento durante o ensaio. De fato, a absorção de água inicial para o bloco cerâmico após a aplicação da camada de chapisco aumentou de 0,26 (g/194.cm²)/min para 1,03 (g/194.cm²)/min. Segundo Costa (2014), o espalhamento da argamassa é uma função linear da absorção do substrato, sugerindo que o espalhamento diminui conforme a absorção de água pelo substrato aumenta. Resultados semelhantes foram observados em pesquisas anteriores com argamassas (Hendrickx, 2009) e pastas de cimento (Barbosa, 2010). Além disso, a rapidez na perda de água, seja para o substrato ou para o ambiente, acelera a aproximação das partículas da argamassa, reduzindo a quantidade de fluido para mitigar as forças de atrito entre elas, dificultando assim o espalhamento do revestimento sobre o substrato. Portanto, a diminuição da mobilidade durante o espalhamento conduz ao enrijecimento da argamassa (Bernardo *et al.*, 2020).

Foi observado que as argamassas industrializada e estabilizada apresentaram um deslocamento superior nos três tipos de substratos em comparação com a argamassa mista, em todas as velocidades de ensaio. Este comportamento pode ser atribuído à presença de aditivos químicos, como o incorporador de ar, nas argamassas industrializada e estabilizada, os quais contribuem para uma maior fluidez do material. A introdução desse aditivo possivelmente influenciou a incorporação de ar durante o processo de mistura, resultando em um teor de ar mais significativo nas argamassas industrializada e estabilizada, e consequentemente, em uma menor densidade de massa quando comparadas à argamassa mista. É relevante destacar que devido ao fato de as argamassas comerciais apresentarem uma ampla diversidade de composições, geralmente há uma considerável variabilidade de suas propriedades no estado fresco (Grandes *et al.*, 2021). Nesta pesquisa, densidades de massa no estado fresco foram verificadas como 2,03 g/cm³, 1,93 g/cm³ e 1,86 g/cm³, para as argamassas mista, industrializada e estabilizada, respectivamente, acompanhadas de teores de ar incorporado de 4% e 16%, para as duas primeiras, respectivamente. Argamassas mistas geralmente atingem um valor máximo de 3% a 4% de ar incorporado nas misturas (Nakakura, 2004), o que pode ter contribuído para seu menor espalhamento, em comparação com as demais argamassas.

As curvas de carga-deslocamento obtidas a partir do ensaio squeeze-flow revelam três distintos comportamentos, categorizados em estágios. No estágio I ou estágio elástico, o material se comporta como sólido em pequenas deformações, associado à tensão de escoamento e à deformação elástica; no estágio II ou estágio plástico, ocorrem grandes deformações com pouco aumento da carga, associado à deformação radial elongacional, tensão de cisalhamento, deformação plástica e fluxo viscoso; no estágio III ou estágio de embricamento, são necessárias grandes cargas para aumentar pouco a deformação, associado a forças que restringem o fluxo pela proximidade das partículas e ao enrijecimento por deformação (Cardoso *et al.*, 2009). Observa-se, em todas as velocidades de ensaio quando executadas sobre bloco cerâmico ou chapisco, que as argamassas atingiram o estágio de endurecimento por deformação com baixo deslocamento, em comparação com a argamassa mista. O comportamento de embricamento está associado ao atrito entre as partículas, resultante da restrição geométrica ou aumento da concentração de sólidos na região central entre as placas, o que está relacionado à segregação líquido-sólido (Cardoso *et al.*, 2009). Na configuração do ensaio squeeze-flow, a segregação líquido-sólido emerge como o principal efeito associado ao comportamento de endurecimento por deformação. Adicionalmente, um novo fator foi introduzido: a absorção de água pelo bloco cerâmico e pela camada de chapisco sobre o bloco cerâmico.

Os resultados numéricos, juntamente com as equações lineares na mudança de fase do estágio I para o II e com as equações exponenciais na mudança de fase do estágio II para o III, estão apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 para as velocidades de ensaio de 0,1, 1 e 3 mm/s, respectivamente.

Na velocidade 0,1 mm/s, observou-se que as argamassas atingiram o estágio de embricamento com baixo deslocamento, variando de 0,61 mm a 1,0 mm para o ensaio executado sobre substrato de chapisco, de 0,51 a 1,07 mm, sobre substrato cerâmico e de 1,00 mm a 3,02 mm, sobre base metálica. Para as argamassas mistas, a transição para o estágio de embricamento ocorreu a aproximadamente 0,61 mm, 0,51 mm e 1,00 mm de deslocamento, sobre os substratos de chapisco, bloco cerâmico e base metálica, respectivamente. Em condições similares, para as argamassas industrializadas, essa transição ocorreu a cerca de 1,00 mm, 1,00 mm e 3,02 mm de deslocamento. As argamassas estabilizadas, por sua vez, apresentaram a transição para o estágio de embricamento a aproximadamente 0,93 mm, 1,07 mm e 1,20 mm de deslocamento, sobre chapisco, bloco cerâmico e base metálica, respectivamente. É relevante notar que as argamassas industrializadas e estabilizadas apresentaram os maiores valores de Δp , indicando um estágio plástico mais extenso. Esse resultado pode sugerir um comportamento mais favorável para a aplicação prática, uma vez que a capacidade de deformação sugere uma maior facilidade de espalhamento, especialmente quando associada a uma carga

mais baixa. Essa característica também implica um menor esforço exigido do operário na execução do serviço. Em termos de redução no deslocamento final, quando aplicadas sobre bloco cerâmico em comparação com a base metálica normativa, as argamassas mista, industrializada e estabilizada apresentaram reduções de cerca de 54%, 40% e 37%, respectivamente. Quando aplicadas sobre o chapisco, as reduções foram de aproximadamente 64%, 45% e 58%, respectivamente.

Na velocidade 1 mm/s, as argamassas apresentaram comportamento similar, atingindo o estágio de embricamento com baixo deslocamento, entre 0,04 mm e 0,66 mm para o ensaio executado sobre substrato de chapisco, de 0,53 a 0,71 mm, sobre substrato cerâmico e de 2,52 mm a 6,49 mm, sobre base metálica. As argamassas mistas apresentaram a transição para o estágio de embricamento a aproximadamente 0,04 mm, 0,53 mm e 2,52 mm de deslocamento, sobre os substratos de chapisco, bloco cerâmico e base metálica, respectivamente. Esses deslocamentos foram inferiores aos apresentados pelas argamassas industrializadas e estabilizadas nas mesmas condições. A transição para o estágio de embricamento das argamassas industrializadas ocorreu a aproximadamente 0,50 mm, 0,70 mm e 5,04 mm de deslocamento, sobre os substratos de chapisco, bloco cerâmico e base metálica, respectivamente, e para as argamassas estabilizadas, estas transições ocorreram a aproximadamente 0,66 mm, 0,71 mm e 6,49 mm de deslocamento. Os estágios plásticos mais extensos foram apresentados pela argamassa estabilizada, sobre os três tipos de substratos. Em termos de redução no deslocamento final, quando aplicadas sobre bloco cerâmico em comparação com a base metálica normativa, as argamassas mista, industrializada e estabilizada apresentaram reduções de cerca de 55%, 59% e 69%, respectivamente. Quando aplicadas sobre o chapisco, as reduções foram aproximadamente de 74%, 58% e 76%, respectivamente.

Tabela 5 - Pontos de mudança de estágio das argamassas, na velocidade de 0,1 mm/s

Subs-trato	Arga-massa	Estágio I/II				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DE _{máx} (mm)	FE _{máx} (N)	Equação linear	R ²			
Chapisco	AM	0,22	4,13	$y = 18,187x - 0,5079$	0,8916	0,39	16,35	1,53
	AI	0,30	6,36	$y = 20,285x + 0,0995$	0,8502	0,70	24,82	2,69
	AE	0,38	6,49	$y = 12,958x + 0,8128$	0,9339	0,55	3,90	1,97
Bloco cerâmico	AM	0,20	10,40	$y = 82,961x - 3,5497$	0,8823	0,31	31,20	1,98
	AI	0,30	3,95	$y = 8,2825x + 0,9263$	0,9351	0,70	6,45	2,93
	AE	0,20	4,33	$y = 26,07x - 1,2378$	0,8718	0,87	26,87	2,96
Base metálica	AM	0,51	6,28	$y = 11,639x + 0,7251$	0,9014	0,49	14,52	4,30
	AI	0,50	6,60	$y = 48,494x - 8,908$	0,9659	2,52	138,98	4,84
	AE	0,48	1,02	$y = 7,228x - 1,4718$	0,8464	0,72	9,25	4,68
Subs-trato	Arga-massa	Estágio II/III				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DP _{máx} (mm)	FP _{máx} (N)	Equação exponencial	R ²			
Chapisco	AM	0,61	20,48	$y = 2,7032e^{4,0851x}$	0,9728	0,39	16,35	1,53
	AI	1,00	31,18	$y = 3,8737e^{2,105x}$	0,9990	0,70	24,82	2,69
	AE	0,93	10,39	$y = 0,7754e^{3,7962x}$	0,9698	0,55	3,90	1,97
Bloco cerâmico	AM	0,51	41,59	$y = 13,459e^{2,1748x}$	0,9995	0,31	31,20	1,98
	AI	1,00	10,40	$y = 1,7501e^{2,2823x}$	0,9796	0,70	6,45	2,93
	AE	1,07	31,20	$y = 6,0295e^{1,7714x}$	0,9970	0,87	26,87	2,96
Base metálica	AM	1,00	20,80	$y = 7,1361e^{1,3329x}$	0,9436	0,49	14,52	4,30
	AI	3,02	145,58	$y = 5,237e^{1,051x}$	0,9663	2,52	138,98	4,84
	AE	1,20	10,27	$y = 3,5966e^{1,1905x}$	0,9964	0,72	9,25	4,68

Nota: $\Delta_D = DP_{\text{máx}} - DE_{\text{máx}}$ e $\Delta_F = FP_{\text{máx}} - FE_{\text{máx}}$, Df = deslocamento final.

Tabela 6 - Pontos de mudança de estágio das argamassas, na velocidade de 1 mm/s

Substrato	Argamassa	Estágio I/II				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DE _{máx} (mm)	FE _{máx} (N)	Equação linear	R ²			
Chapisco	AM	0,03	8,96	$y = 272,08x + 0,0992$	0,9545	0,01	1,44	1,09
	AI	0,20	10,40	$y = 65,565x - 3,9509$	0,8385	0,30	31,19	2,95
	AE	0,19	4,03	$y = 15,388x + 0,849$	0,9946	0,47	6,36	2,06
Bloco cerâmico	AM	0,19	3,11	$y = 16,349x + 0,075$	0,9887	0,34	7,29	1,87
	AI	0,30	10,36	$y = 64,071x - 5,9044$	0,8650	0,40	41,63	2,92
	AE	0,21	9,18	$y = 24,585x + 2,0807$	0,7883	0,51	16,47	2,61
Base metálica	AM	0,50	0,17	$y = 24,732x$	0,9404	2,02	93,42	4,14
	AI	0,61	11,30	$y = 33,601x - 4,3354$	0,9753	4,43	123,88	7,10
	AE	0,32	1,87	$y = 13,96x - 1,7935$	0,7626	6,17	174,91	8,55
Substrato	Argamassa	Estágio II/III				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DP _{máx} (mm)	FP _{máx} (N)	Equação exponencial	R ²			
Chapisco	AM	0,04	10,40	$y = 35,293e^{3,3169x}$	0,9773	0,01	1,44	1,09
	AI	0,50	41,59	$y = 31,101e^{1,2205x}$	0,9948	0,30	31,19	2,95
	AE	0,66	10,39	$y = 3,0123e^{3,0034x}$	0,9622	0,47	6,36	2,06
Bloco cerâmico	AM	0,53	10,40	$y = 1,7637e^{3,4982x}$	0,9894	0,34	7,29	1,87
	AI	0,70	51,99	$y = 24,139e^{1,2971x}$	0,9946	0,40	41,63	2,92
	AE	0,71	20,80	$y = 8,0192e^{1,8967x}$	0,9985	0,51	16,47	2,61
Base metálica	AM	2,52	93,59	$y = 1,8882e^{1,5011x}$	0,9960	2,02	93,42	4,14
	AI	5,04	135,18	$y = 1,6064e^{0,8552x}$	0,8629	4,43	123,88	7,10
	AE	6,49	176,78	$y = 0,2756e^{0,9185x}$	0,8397	6,17	174,91	8,55

Nota: $\Delta_D = DP_{máx} - DE_{máx}$ e $\Delta_F = FP_{máx} - FE_{máx}$, Df = deslocamento final.

Tabela 7 - Pontos de mudança de estágio das argamassas, na velocidade de 3 mm/s

Substrato	Argamassa	Estágio I/II				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DE _{máx} (mm)	FE _{máx} (N)	Equação linear	R ²			
Chapisco	AM	0,49	0,15	$y = 60,016x + 0,902$	0,9061	0,03	31,05	1,85
	AI	0,53	4,36	$y = 9,9551x + 1,0735$	0,9625	0,51	6,06	3,84
	AE	0,15	19,45	$y = 148,32x - 3,9825$	0,9598	0,88	157,33	2,03
Bloco cerâmico	AM	0,22	10,40	$y = 33,424x - 4,5775$	0,7460	0,80	41,59	1,92
	AI	0,37	5,17	$y = 11,107x - 1,0327$	0,8157	1,65	15,63	4,82
	AE	0,22	0,17	$y = 39,152x - 3,89$	0,9108	0,82	41,42	2,94
Base metálica	AM	0,71	0,15	$y = 36,092x - 16,346$	0,8880	2,79	155,83	4,48
	AI	0,77	8,46	$y = 39,016x - 15,601$	0,9858	5,75	230,71	8,32
	AE	0,22	9,75	$y = 20,944x + 19,134$	0,9265	5,82	146,23	8,09
Substrato	Argamassa	Estágio II/III				Δ_{def} (mm)	Δ_F (N)	Df (mm)
		DP _{máx} (mm)	FP _{máx} (N)	Equação exponencial	R ²			
Chapisco	AM	0,52	31,20	$y = 12,241e^{2,3402x}$	0,9428	0,03	31,05	1,85
	AI	1,04	10,42	$y = 4,9963e^{1,7559x}$	0,9793	0,51	6,06	3,84
	AE	1,03	176,78	$y = 36,701e^{1,6102x}$	0,9732	0,88	157,33	2,03
Bloco cerâmico	AM	1,02	51,99	$y = 6,6028e^{2,5208x}$	0,8066	0,80	41,59	1,92
	AI	2,02	20,80	$y = 1,5025e^{1,609x}$	0,9905	1,65	15,63	4,82
	AE	1,04	41,59	$y = 14,149e^{1,4414x}$	0,9094	0,82	41,42	2,94
Base metálica	AM	3,50	155,98	$y = 0,1426e^{1,9587x}$	0,9814	2,79	155,83	4,48
	AI	6,52	239,17	$y = 0,0062e^{1,588x}$	0,8644	5,75	230,71	8,32
	AE	6,04	155,98	$y = 0,0317e^{1,3084x}$	0,7732	5,82	146,23	8,09

Nota: $\Delta_D = DP_{máx} - DE_{máx}$ e $\Delta_F = FP_{máx} - FE_{máx}$, Df = deslocamento final.

Na velocidade de 3 mm/s, as argamassas também atingiram o estágio de embricamento com baixo deslocamento, variando de 0,52 mm a 1,04 mm para o ensaio realizado sobre o substrato de chapisco, de 1,02 mm a 2,02 mm sobre o substrato cerâmico e de 3,50 mm a 6,52 mm sobre a base metálica. Para as argamassas

mistas, a transição para o estágio de embricamento ocorreu aproximadamente a 0,52 mm, 1,02 mm e 3,50 mm de deslocamento, sobre os substratos de chapisco, bloco cerâmico e base metálica. Em condições semelhantes, para as argamassas industrializadas, as transições para o estágio de embricamento ocorreram a aproximadamente 1,04 mm, 2,02 mm e 6,52 mm de deslocamento. As argamassas estabilizadas, por sua vez, apresentaram a transição para o estágio de embricamento a aproximadamente 1,03 mm, 1,04 mm e 6,04 mm de deslocamento, sobre chapisco, bloco cerâmico e base metálica, respectivamente. É evidente que, para todas as velocidades de ensaio, quando o ensaio foi executado sobre a base metálica, a transição para o estágio de embricamento ocorreu com maiores deslocamentos, evidenciando a facilidade de espalhamento das argamassas sobre a superfície lisa. As argamassas mista, industrializada e estabilizada apresentaram reduções de aproximadamente 57%, 42% e 64%, respectivamente, no deslocamento final ao serem aplicadas sobre bloco cerâmico em relação à base metálica normativa. Quando executado sobre o chapisco, as reduções foram de cerca de 59%, 54% e 75%. Embora o procedimento normativo vigente para a execução do ensaio squeeze-flow não traga adaptações para simulação de comportamentos mais próximos da realidade, é sabido que grande parte dos blocos cerâmicos utilizados na execução de alvenaria de vedação apresentam capacidade de absorção de água e superfícies irregulares. Assim, a configuração do ensaio pelo método de squeeze-flow, quando a argamassa é aplicada sobre um substrato cerâmico, aproxima-se mais da realidade e pode fornecer informações relevantes sobre a interação entre a argamassa e a superfície do substrato no desenvolvimento posterior da aderência (Costa et al., 2020).

Conclusões

Esta pesquisa permitiu avaliar o comportamento reológico de argamassas de revestimento convencionais da construção civil em diferentes substratos. Conclui-se que tanto as propriedades da argamassa quanto as características do substrato influenciam o comportamento reológico. Todas as argamassas estudadas apresentaram menor capacidade de espalhamento sobre substrato cerâmico e de chapisco aplicado sobre bloco cerâmico em comparação com a base metálica, devido à irregularidade e capacidade de absorção de água desses substratos, em contraste com a superfície lisa e não absorvente da base metálica. A interação entre o teor de água da argamassa e a absorção capilar foi mais evidente em substratos de bloco cerâmico, especialmente com chapisco. As argamassas estabilizadas demonstraram fases plásticas mais amplas, seguidas pela argamassa industrializada e mista, em todos os três tipos de substratos, devido à presença de aditivos em sua composição, indicando um potencial para aplicação mais eficiente. Destaca-se a limitação do ensaio normativo em reproduzir com precisão as condições de aplicação em obras, onde os substratos geralmente não apresentam superfície lisa, como na placa metálica normatizada. Isso ressalta a importância de considerar a diversidade de substratos na formulação de argamassas, proporcionando contribuições significativas para o aprimoramento de práticas construtivas.

Referências

- ABU-BAKR, M. *et al.* Evaluation of mechanical properties and shear-bond strength of mortar containing natural extract admixture. **Construction and Building Materials**, v. 418, n. 135377, 2024.
- ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. São Paulo, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria: parte 2: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839**: argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: especificações geométricas do produto (GPS): rugosidade: método do perfil: termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2022b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 359–368, 2017.
- BARBOSA, W. da S. **Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos**. São Paulo, 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BERNARDO, H. M. *et al.* Efeito da absorção de água e do tipo de substrato no desempenho de argamassa de revestimento nos estados fresco e endurecido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 493–511, 2020.
- CALDAS, P. H. C. H. *et al.* Silica fume activated by NaOH and KOH in cement mortars: Rheological and mechanical study. **Construction and Building Materials**, v. 400, n. 132623, 2023.
- CARDOSO, F. A. *et al.* Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 748–753, 2009.
- CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. São Paulo, 2014. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- COSTA, E. B. C. *et al.* Squeeze-flow of mortars on brick substrate and its relation with bond strength. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120298, 2020.
- FUJII-YAMAGATA, A. L. *et al.* Evaluation of fresh adhesive mortars through various rheological and imaging techniques. In: MECHTCHERINE, V.; KHAYAT, K.; SECRIERU, E. (ed.). **Rheology and Processing of Construction Materials**. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- GRANDES, F. A. *et al.* Rheological behavior and flow induced microstructural changes of cement-based mortars assessed by Pressure Mapped Squeeze-flow. **Powder Technology**, v. 393, p. 519–538, 2021.
- HENDRICKX, R. **The adequate measurement of the workability of masonry mortar**. Leuven, 2009. Tese (Ph.D. in Civil Engineering) - Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2009.
- MARTINS, E. J. **Diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento utilizando métodos de empacotamento de partículas e comportamento reológico**. Curitiba, 2021. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

MARVILA, M. T. *et al.* Gypsum plaster using rock waste: A proposal to repair the renderings of historical buildings in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 250, n. 118786, 2020.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Improvement of repair mortars using multi-walled carbon nanotubes, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 172, n. 2, p. 71–84, 2019.

NAKAKURA, E. H. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo, 2004. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NICOLINI, A. *et al.* Rheological behavior of fresh latex polymeric mortar by squeeze-flow technique. **Construction and Building Materials**, v. 267, n. 121175, 2021.

SADRMOMTAZI, A.; TAJASOSI, S.; TAHMOURESI, B. Effect of materials proportion on rheology and mechanical strength and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1103–1112, 2018.

STOLZ, C. M. *et al.* Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars. **Construction and Buildings Materials**, v. 128, p. 298–307, 2016.

Rafaella Salvador Paulino

Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Coronel Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81531-980 Tel.: (41) 3361-3001 | E-mail: rafaellaspaulino@gmail.com

Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa

Conceitualização, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos.

Departamento de Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | E-mail: mariennemaron@gmail.com

Editor: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.