XIII SBTA
Simpósio Brasileiro de Tecnologia das ARGAMASSAS
11-13 | JUNHO | 2019 | GOIÂNIA | GO

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR

Tema: Tecnologia dos materiais
Grupo: 2

TICIANA DE A. MESQUITA[1], RAQUEL R. SANTOS[2], ANA RITA D. COSTA[3], FRANCISCO GABRIEL S. SILVA[4], VANESSA S. SILVA[5]

[1]Engenheira Civil, mesquitaticiana@gmail.com
[2]Graduanda, Universidade Federal da Bahia/UFBA, raquel.ramos.sts@hotmail.com
[3]Mestranda, Universidade Federal da Bahia/UFBA, rita.damasceno@ufba.br
[4]Prof. Dr., Universidade Federal da Bahia/UFBA, fgabriel.ufba@gmail.com
[5]Profª. Drª, Universidade Federal da Bahia/UFBA, vanessass@ufba.br

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o comportamento reológico de argamassas projetáveis. É abordada a análise dos parâmetros reológicos de tensão de escoamento, viscosidade plástica, tixotropia e variação do torque com o tempo, estimados através da reometria rotacional. Os resultados indicaram forte influência do teor de água e tipo de argamassa no comportamento reológico em razão do teor de ar incorporado e atrito entre as partículas. O aumento do teor de água ou um maior teor de aditivo em geral reduziram as tensões de escoamento e tixotropia das argamassas. Foi possível identificar as composições mais apropriadas para aplicação com projeção mecânica.

Palavras-chave: argamassa, projeção mecânica, trabalhabilidade, reologia, reometria rotacional.

REOLOGICAL CHARACTERIZATION OF PROJECTION MORTARS FROM METROPOLITAN REGION OF SALVADOR

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the rheological behavior of projectable mortar. The analysis of the rheological parameters of yield stress, plastic viscosity, thixotropy and torque variation over time, are estimated using rotational rheometry. The results indicated a strong influence of the water content and type of mortar on the rheological behavior due to the incorporated air content and interparticle friction. The increase in water content or a higher additive content generally reduced the yield stress and thixotropy of mortars. It was possible to identify the most suitable compositions for application with mechanical projection.

Keywords: mortar, mechanical projection, workability, rheology, rotational rheometry.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da reologia tem se tornado bastante relevante para a compreensão do comportamento dos materiais cimentícios, uma vez que a eficiência da argamassa no estado endurecido é fortemente influenciado pelas propriedades no estado fresco, que por sua vez, dependem fundamentalmente das características reológicas do material[1].

Do mesmo modo, a caracterização dos parâmetros reológicos das argamassas (viscosidade e tensão de escoamento) estão diretamente relacionados com as principais propriedades no seu estado fresco, que são: tixotropia, consistência e trabalhabilidade. Desse modo, se faz importante o seu estudo reológico, já que na falta dessas propriedades, a eficiência no estado endurecido não será garantida[1].

O objetivo do presente trabalho é apresentar a caracterização reológica de duas argamassas industrializadas da Região Metropolitana de Salvador específicas para projeção mecânica, aplicando a técnica da reometria rotacional. Serão estimados os parâmetros de tensão de escoamento, viscosidade plástica, tixotropia e variação do torque com o tempo, a fim de avaliar a influência da variação do teor de água, bem como do tipo de argamassa nas propriedades reológicas de cada composição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram utilizadas argamassas industrializadas próprias para projeção, doravante nomeadas de Argamassa A e Argamassa B, ambas compostas por cimento Portland, cal hidratada, agregados e aditivos químicos. As argamassas apresentam rendimento médio de 1700kg/m²/m e 1950kg/m²/m, respectivamente. As relações água/material anidro foram definidas em 0,17, 0,18 e 0,19. As seis amostras foram nomeadas de acordo com a denominação da argamassa e o valor da relação água/argamassa anidra. De acordo com seus fabricantes e com a NBR 13281[2], as argamassas apresentam classes de aplicação demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das argamassas

Classificações	Argamassa A	Argamassa B
Resistencia à compressão (Mpa)	4,0 a 6,5 (P4)	4,0 a 6,5 (P4)
Resistencia à tração na flexão (Mpa)	1,5 a 2,7 (R3)	1,5 a 2,7 (R3)
Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	1800 a 2200 (D5)	1600 a 2000 (D4)
Retenção de água (%)	80 a 90 (U3)	72 a 85 (U2)
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m³)	1600 a 2000 (M5)	1400 a 1800 (M4)
Coeficiente de capilaridade (g/dm².min1/2)	> 10,0 (C6)	5,0 a 12,0 (C5)
Resistencia potencial de aderência à tração (Mpa)	≥ 0,30 (A3)	≥ 0,30 (A3)

2.2. Métodos

As argamassas foram preparadas conforme a ABNT NBR 13276[3], com base no item 5.2.1 nesta normatização. O comportamento das argamassas foi caracterizado de acordo com os ensaios e suas respectivas normas técnicas, conforme apresentado no Quadro 1. Para a caracterização geral no estado fresco, foram produzidas argamassas com relação água/material anidro de 0,16.

Quadro 1 - Ensaios de caracterização das argamassas estudadas

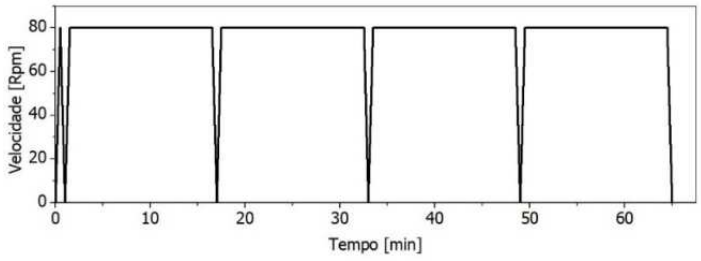
Técnicas de Caracterização	Norma
Massa Específica do Material Anidro	ABNT NBR NM 23: 2001
Índice de Consistência	ABNT NBR 13276: 2016
Retenção de Água	ABNT NBR 13277: 2005
Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado	ABNT NBR 13278: 2005
Reometria rotacional	ASTM C1749: 2017

2.2.1. Reometria rotacional

A caracterização reológica por reometria rotacional foi realizada em um reômetro de cilindros coaxiais modelo RN 4.1 da Rheotest. O equipamento possui recipiente cilíndrico com diâmetro interno de 0,120m, no qual a argamassa é inserida e o conjunto então encaixado no suporte de rotação. A medida do torque necessário para o cisalhamento da argamassa é obtida através de um receptor acoplado a uma paleta concêntrica com distância de 0,087m entre suas hastes e 0,071m de profundidade de penetração no material.

O perfil de solicitação aplicado foi o Patamar (Figura 1), baseado no método desenvolvido por Paiva[4] para caracterização de argamassas mistas. As medidas do primeiro ciclo de aceleração e desaceleração permitem estimar os parâmetros reológicos de tensão de escoamento, viscosidade plástica e tixotropia. Os valores de torque ao longo do ensaio possibilitam avaliar a evolução da plasticidade da argamassa com o tempo.

Figura 1 - Perfil em Patamar



Os parâmetros reológicos serão estimados a partir da aplicação da transformada de Reiner-Riwlin[5] com a utilização do modelo de Bingham recomendado pela norma ASTM C1749[6].

Esse desenvolvimento foi aplicado também por Mehdipour *et al.*[7] e permite calcular a tensão de escoamento e viscosidade plástica da mistura de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\tau_o = \frac{G}{4\pi h}\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)\frac{1}{ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{H}{4\pi^2 h}\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right) \quad (2)$$

Onde τ_0 e μ são, respectivamente, tensão de escoamento (Pa) e viscosidade plástica (Pa·s), G(Nm) e H(Nm·s) são os coeficientes linear e angular da curva torque versus velocidade rotacional aplicando o modelo do fluido de Bingham. O h(m) é a profundidade de penetração da paleta na argamassa, enquanto Ri(m) e Ro(m) referem-se, respectivamente, aos raios interno e externo do cilindro.

Além dos parâmetros de viscosidade plástica e tensão de escoamento, as curvas de fluxo permitem a análise do fenômeno de destruição estrutural da mistura através do cálculo da área de histerese. De acordo com Khayat *et al.*[8], essa área é proporcional à energia necessária para destruir a estrutura e promover o fluxo da mistura.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Massa específica do material anidro

Os resultados da caracterização das argamassas são apresentados na Tabela 2

Tabela 2 - Caracterização das argamassas

Propriedade	Argamassa A	Argamassa B
Massa Específica do Material Anidro	2800 kg/m³	2690 kg/m³
Índice de Consistência	0,295 m	0,248 m
Retenção de Água	80%	81%
Densidade de Massa	1881 kg/m³	1685 kg/m³
Teor de Ar Incorporado	14%	22%

Em geral, no mercado da construção civil, destina-se que a consistência de argamassa projetada seja de 0,300m. Por via disso, a argamassa A exibiu um resultado próximo do destinado (Tabela 2), diferentemente da argamassa B, com consistência 17% menor.

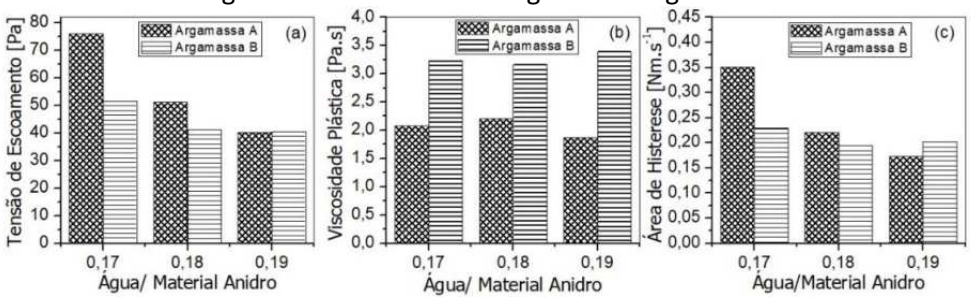
Pode-se afirmar também que as argamassas apresentam índice apropriado de retenção de água quando comparadas ao limite apresentado em sua respectiva normalização[2] (argamassas industrializadas devem apresentar no mínimo 80% de retenção de água).

A Norma Brasileira não determina uma classificação para o teor de ar incorporado para argamassas, entretanto, o Centro Tecnológico da Argamassa (CETA - UFBA) indica para argamassas de assentamento e revestimento teores de ar entre 8% e 17%. De acordo com o valor sugerido, apenas a argamassa B apresentou um teor de ar incorporado diferente do requerido, com valor maior que o limite máximo indicado.

3.2. Caracterização reológica por Reometria Rotacional

De modo geral, as tensões de escoamento (Figura 2a) reduziram com o aumento do teor de água nas composições. Este comportamento pode ser justificado pela ação lubrificante que a água apresenta sobre os grãos, reduzindo o atrito interpartícula e consequentemente facilitando o fluxo da mistura[9].

Figura 2 - Parâmetros reológicos das argamassas



As amostras de argamassa A apresentaram tensões de escoamento maiores quando comparadas às da argamassa B. Exceto das amostras 0,19, nas quais as tensões não variaram significativamente.

A fim de avaliar a influência do tipo de argamassa sobre os parâmetros reológicos obtidos, procedeu-se a prova de análise de variância (ANOVA), com grau de significância de 0,05 (Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros reológicos).

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros reológicos

Parâmetro	Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	Fcalc	Ftab
Tensão de Escoamento	Tratamentos	1	192,4363	192,4363	1,04	7,71
	Resíduo	4	740,4578	185,1145		
	Total	5	932,8941			
Viscosidade Plástica	Tratamentos	1	2,2128	2,2128	102,86	7,71
	Resíduo	4	0,0861	0,0215		
	Total	5	2,2988			
Área de Histerese	Tratamentos	1	0,0023	0,0023	0,53	7,71
	Resíduo	4	0,0178	0,0044		
	Total	5	0,0201			

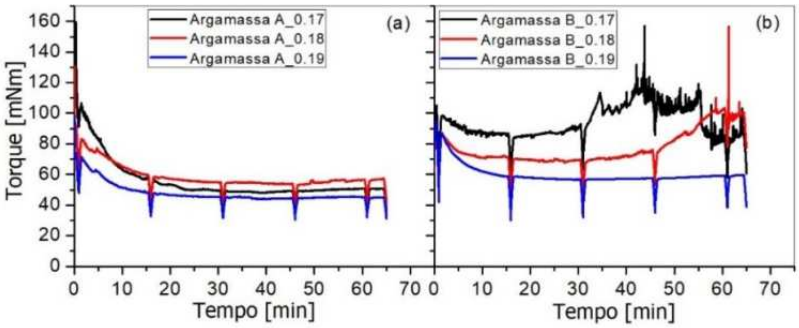
Com um nível de significância de 5%, os resultados sugerem diferenças significativas apenas em relação aos torques de escoamento e áreas de histerese. Contudo, não se observou relevância estatística nas diferenças entre as viscosidades plásticas.

Os valores de viscosidade (Figura 2b) das amostras de uma mesma argamassa não variaram significativamente, no entanto, quando comparação ocorre entre as argamassas de tipos diferentes, esta variação ocorre em cerca de 30% do valor do parâmetro. Apesar da influência do teor de ar e de água sobre as tensões de escoamento, o mesmo comportamento não foi observado com relação às viscosidades.

Observando as áreas de histerese das amostras da argamassa A (Figura 2c), os valores indicam que o aumento do teor de água reduziu significativamente a energia necessária para promover o cisalhamento do material. Diferentemente da argamassa B, na qual uma influência não foi evidente.

A Figura 3 apresenta os dados de torque ao longo do ensaio de reometria. As composições com relação água/material anidro de 0,19 apresentaram comportamentos muito semelhantes, embora sejam argamassas de tipos diferentes. Isto indica que um maior teor de água sobrepõe todos os outros fatores que influenciam os parâmetros reológicos.

Figura 3 - Torques ao longo do tempo de ensaio



Na Figura 3 é possível observar também uma redução dos valores de torque durante os dez minutos iniciais, decorrente da destruição da estrutura interna do material, até um valor de equilíbrio que se mantém até o fim do ensaio. Essa constância de torques ocorre em função da destruição completa da estrutura durante o cisalhamento ou quando há um equilíbrio entre a velocidade de destruição e reconstrução da mistura[10].

Curvas de torque versus tempo dos ensaios de reometria realizados por longos períodos por vezes apresentam um comportamento ascendente justificado pelo início dos processos de enrijecimento das misturas cimentíceas. No entanto, apesar das amostras da Argamassa B_0.17 e B_0.18 terem apresentado este desenvolvimento (Figura 3b), uma inspeção visual da amostra e da sua plasticidade após o ensaio sugerem que este não foi o ocorrido.

Esse comportamento pode ser explicado pela segregação da mistura em torno da haste de rotação do reômetro e pela formação de grânulos na composição (Figura 4), proporcionando

um aumento e redução dos valores de torque sem atingir um equilíbrio e dificultando a movimentação da haste. Este fator pode ser atribuído à quantidade de aditivo incorporador de ar na argamassa, uma vez que o teor encontrado foi elevado (22%), além da incorporação durante a reometria. Propiciando, portanto, a segregação da argamassa no recipiente e na paleta, uma vez que a argamassa se tornou bastante porosa após 30 minutos de ensaio.

Figura 4 - Acúmulo de material na haste de rotação do reômetro e grânulo de argamassa segregado da mistura (Argamassa B_0.17)



Como o propósito da reometria rotacional é simular as condições às quais as argamassas serão submetidas durante os processos de preparo, transporte e aplicação, o estudo da variação do torque com o tempo traz informações importantes sobre a eficiência do material. A argamassa B não apresentou comportamento adequado, indicando a instabilidade reológica como fator interveniente ao seu uso seguro e podendo gerar manifestações patológicas em sua aplicação.

4. CONCLUSÕES

Por meio dos parâmetros reológicos obtidos pela reometria rotacional, com um nível de significância de 5%, foi possível observar que o aumento dos teores água e de ar incorporado reduziram significativamente as tensões de escoamento e a energia necessária para promover o fluxo do material. Contudo, o mesmo comportamento não foi observado com relação às viscosidades, que não apresentaram relevância estatística nas diferenças entre seus valores.

Em relação às amostras estudadas, a argamassa do tipo A apresentou maior estabilidade, quando submetida às condições de aplicação, enquanto a argamassa B foi indicada como não adequada para revestimento projetado mecanicamente. A instabilidade dos seus valores de torque e grande segregação ao longo do ensaio pode se tornar uma dificuldade quando bombeada, levando à fixação do material nas paredes do mangote e provocando entupimento do mesmo, além da dificuldade de compatibilização do teor de água inserido na mistura com o comportamento da argamassa devido ao alto teor de ar incorporado.

Os dados permitiram um melhor entendimento do comportamento reológico das argamassas industrializadas e a publicação deste estudo visa dirimir os fatores limitantes à utilização da projeção mecânica e fortalecer sua implementação na indústria brasileira frente ao método convencional de aplicação manual do revestimento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CECHIN, Gabriela. **Análise de fatores que exercem influência na argamassa e no processo de projeção em revestimento de paredes**. 2017.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

3. 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, 2005.

4. PAIVA, H., SILVA, L. M., LABIRINCHA, J. A., & FERREIRA, V. M., **Caracterização reológica de argamassas**, Aveiro, Portugal, 2005.

5. REINER, M. **Deformation and flow: an elementary introduction to theoretical rheology**. HK Lewis, 1949.

6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1749-17a:** Standard guide for measurement of the rheological properties of hydraulic cementious paste using a rotational rheometer. West Conshohocken, 2017.

7. MEHDIPOUR, I.; KUMAR, A.; KHAYAT, K. H. Rheology, hydration, and strength evolution of interground limestone cement containing PCE dispersant and high volume supplementary cementitious materials. **Materials & Design,** v. 127, p. 54-66, 2017.

8. KHAYAT, K. H., SARIC-CORIC, M., LIOTTA, F., **Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete**, ACI Materials Journal, Title nº 99 M23, 2002.

9. SANTOS, C. C., **Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa de eixo helicoidal**, Dissertação de Mestrado, Brasília, 2003.

10. BANFILL, P. F., BHATTY, J. I., **A viscometric method of monitoring the effect of retarding admixtures on the setting of cement pastes**, Cement and Concrete Research, 64-72, v. 14, 1984.