AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ATRAVÉS DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*

ELIZIANE J. MARTINS[1], LEANDRO M. DE LIMA[2], MARIENNE R. M. M. COSTA[3]

[1] Universidade Federal do Paraná/UFPR, elizianej@hotmail.com
[2] Votorantim Cimentos, leonardomendonca1994@hotmail.com
[3]Prof. Dr., Universidade Federal do Paraná/UFPR, mariennemaron@gmail.com

RESUMO

Uma argamassa é dita como trabalhável quando consegue distribuir-se facilmente ao ser aplicada, sem segregar e permanecendo plástica até sua aplicação. Atualmente, há um investimento na pesquisa para que essa propriedade, grande parte pautada no empirismo, diminua a cada dia nos canteiros de obra. O objetivo do estudo é avaliar o comportamento reológica de formulações de argamassas distintas com o auxílio do ensaio de *squeeze flow*, onde os resultados estão pautados em um coeficiente que irá guiar tal propriedade de forma numérica.

Palavras-chave: argamassa de revestimento, trabalhabilidade, reologia.

NUMERICAL EVALUATION OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF COATING MORTARS THROUGH THE *SQUEEZE FLOW* TEST

ABSTRACT

A mortar is said to be workable when it can be easily distributed when applied, without segregating and remaining plastic until application. Currently, there is an investment in research so that this property, largely based on empiricism, decreases every day on construction sites. The objective of the study is to evaluate the rheological behavior of different mortar formulations with the aid of the *squeeze flow* test, where the results are based on a coefficient that will numerically guide this property.

Key-words: coating mortar, workability, rheology.

1. INSTRUÇÃO

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais importante das argamassas, no estado fresco, que resulta da conjunção de outras propriedades importantes como consistência, plasticidade, retenção e exsudação de água, coesão interna, tixotropia, massa específica e retenção de consistência [(1) (2)]. Além disso ela influenciará diretamente as propriedades no estado endurecido, como porosidade, resistências mecânicas e aderência, parâmetros importantes que promovem maior durabilidade e conforto das edificações [(3)]. No passado, a trabalhabilidade tinha como proposta principal, a facilidade do operário em trabalhar com a argamassa em sua aplicação[(4)]. Logo a forma de caracterização das argamassas era basicamente desenvolvida por ensaios do tipo monoponto, que acabavam não considerando

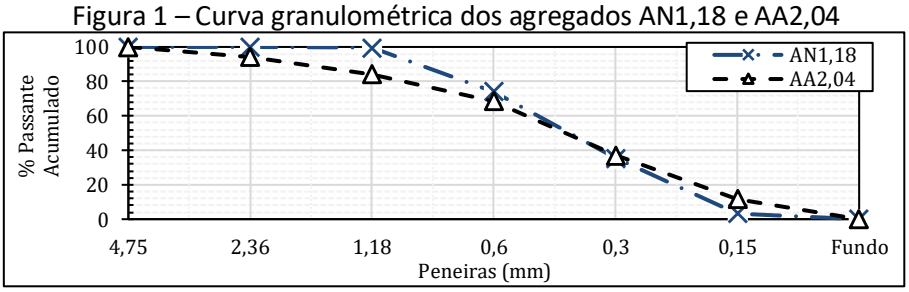
as solicitações extremas de cisalhamento que o material requer na prática[5]. Esses métodos de ensaios empregados não medem efetivamente a trabalhabilidade, mas seus resultados podem ser considerados apenas como valores indicativos desta propriedade[6]. Essa deficiência de parâmetros na análise da trabalhabilidade da argamassa conduzia o pedreiro a ajustar a consistência do material em obra, baseado em sua experiência e/ou numa avaliação visual do material no momento da aplicação.

Ao longo do tempo esse conceito de trabalhabilidade vem sendo aprimorado, visto que as argamassas não podem ser avaliadas simplesmente pelas suas propriedades intrínsecas, mais também de acordo com seu comportamento reológico [3]. Nesse contexto vem sendo cada vez mais utilizada a técnica que auxilia na análise do comportamento reológico das argamassas chamada *squeeze flow*. Assim, com os dados de saída do ensaio com *squeeze flow*, já é possível desenvolver numericamente as máximas deformações da argamassa em seu estado plástico (Δdef.), que facilita a comparação entre as curvas resultantes deste ensaio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na produção das argamassas de revestimento selecionadas, foram o cimento Portland CP II F 32 (massa específica de 3,08g/cm³), a cal hidráulica, (massa específica de 2,45g/cm³) e dois diferentes tipos de agregados miúdos. O primeiro agregado foi o natural (AN) que teve características como: módulo de finura (-) de 1,87(AN1,87), dimensão máxima característica de 1,18mm, densidade 2,51g/cm³, massa unitária de 1,55g/cm³, índice de vazios de 37,9%, e percentual de material pulverulento (MP) de 1,6%. Já o segundo foi o agregado artificial (AA): módulo de finura (-) de 2,04 (AA2,04), dimensão máxima característica de 4,75mm, densidade 2,53g/cm³, massa unitária de 1,45g/cm³, índice de vazios de 42,37%, e MP de 3,86%.

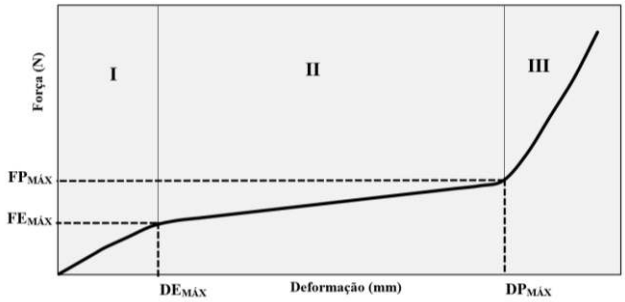
Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados AN1,18 e AA2,04



Fonte: Os autores (2023)

Foram utilizadas três formulações (traços em volume 1:1:6, 1:2:6 e 1:2:9) de argamassas para avaliação experimental. Para cada formulação foram utilizados dois tipos de agregados (AN1,87 e AA2,04) e quatro relações a/ms: 0,17, 0,20, 0,23 e 0,26. A partir dos resultados obtidos nos ensaios de *squeeze flow*[7], foi possível determinar os pontos de mudança de estágio, tanto do estágio I para o estágio II (FEmax e DEmax), quanto do estágio II para o estágio III (FPmax e DPmax), conforme figura 2.

Figura 2 - Gráfico obtido no ensaio de *squeeze flow*.



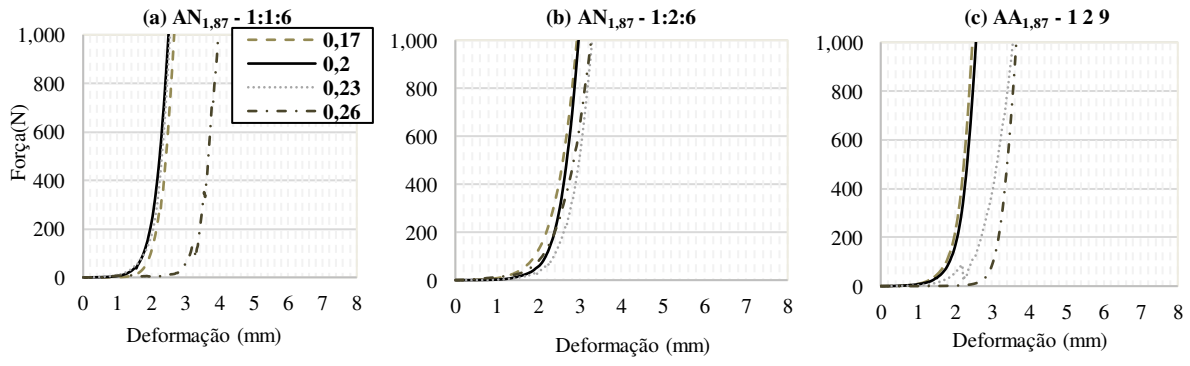
Fonte: CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005 adaptado.

O DEmáx (limite de escoamento) foi calculado matematicamente com o auxílio do *software Excel*, com base em uma reta, partindo do ponto zero ao ponto de mudança de comportamento, obtendo assim a reta que melhor represente este trecho elástico, buscando o melhor ajuste, para um coeficiente de determinação R^2 mais próximo de 1. Já o cálculo do estágio II para o III , com os pontos impressos do ensaio, traça-se uma curva exponencial da curva obtido (estágio III) até o limite máximo R^2, sendo este o valor correspondente ao ponto que caracteriza o início do estágio de embricamento, o DPmáx[3]. Para a análise das curvas resultantes do ensaio de *squeeze flow*, quanto maior o Δdef., mais extenso será o estado plástico (estágio II) e melhor será o desempenho de aplicação das argamassas de revestimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da figura 3 e tabela 1 é possível visualizar os dados obtidos através do *squeeze flow* para as argamassas com agregado AN1,87 e os pontos de mudança de estágios desenvolvidos com a argamassa e respectivos Δdef.

Figura 3 – Resultado dos ensaios de *squeeze flow* para as argamassas com agregado $AN_{1,87}$: (a) 1:1:6; (b) 1:2:6; (c) 1:2:9



Fonte: Os autores (2023)

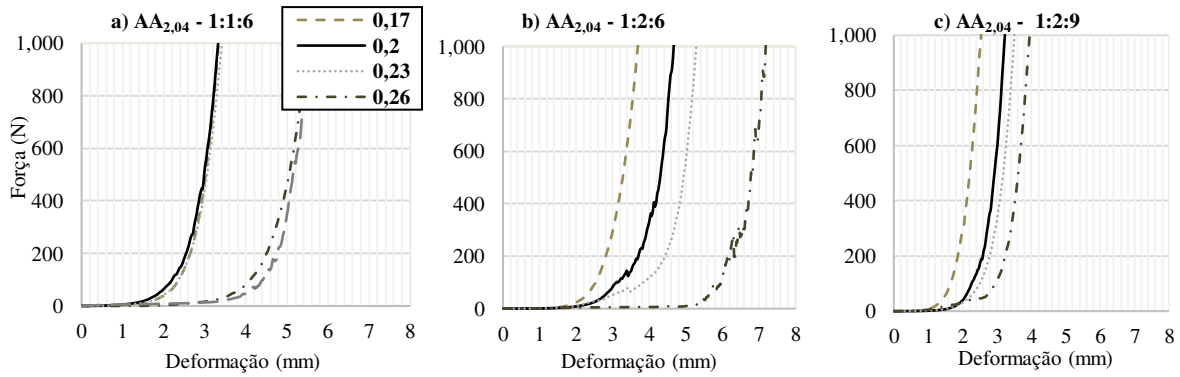
Tabela 1 - Δdef. através do ensaio de *squeeze flow* para $AN_{1,87}$

Formulações (traços em volume)	a/ms	Estágio I/II			Estágio II/III			ΔF (N) FPmáx-FEmáx	Δdef. (mm) PDmáx-EDmáx
		$DE_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	R^2	$DP_{máx}$ (mm)	$FP_{máx}$ (N)	R^2		
1:1:6	0,17	0,006	0,07	0,82	0,851	0,30	0,98	0,30	0,85
1:1:6	0,20	0,022	0,13	0,99	1,001	5,50	0,99	5,40	0,98
1:1:6	0,23	0,006	0,06	0,84	1,035	10,40	0,99	10,30	1,03
1:1:6	0,26	0,015	0,13	0,88	2,201	6,90	0,99	6,80	2,19
1:2:6	0,17	0,006	0,06	0,75	1,185	8,20	0,99	8,10	1,18
1:2:6	0,20	0,031	0,13	0,86	1,385	9,60	0,99	9,50	1,35
1:2:6	0,23	0,031	0,13	0,85	2,051	40,6	0,99	40,40	2,02
1:2:6	0,26	0,022	0,27	0,99	2,535	270,4	0,99	270,10	2,51
1:2:9	0,17	0,015	0,13	0,97	0,718	3,40	0,99	3,30	0,70
1:2:9	0,20	0,010	0,14	0,97	0,768	3,90	0,99	3,70	0,76
1:2:9	0,23	0,015	0,13	0,85	1,285	7,90	0,99	7,80	1,27
1:2:9	0,26	0,018	0,13	1,00	1,879	44,70	0,99	44,60	1,86

Fonte: Os autores (2023)

Nota-se que para todas as formulações ensaiadas o acréscimo de água resultou em um aumento no Δdef, mesmo que pequeno. O acréscimo elevado de fluidez em a/ms 0,26 visualizado nas formulações 1:1:6, pode ser justificado por um excesso de água na mistura que pode ter provocado a separação de fases na argamassa. O impacto de uma granulometria com pouca continuidade e a falta de finos podem ter sido uma das causas que impactaram negativamente na fluidez e na falta de coesão de todos as formulações desenvolvidas. Assim, os pontos de mudança de estágio, onde Δdef da maioria das argamassas desse conjunto ficou entre 0,98mm a 2,510mm de deformação e carga máxima de 270,41, pela falta de coesão da mistura. A formulação 1:2:6 foi a que apresentou os maiores valores de Δdef, para todas as relações a/ms. Essa proporção foi a que apresentou um maior volume da cal, o que pode ter sido a causa desse comportamento um pouco mais trabalhável que as demais formulações. Outra observação a ser elencada é quanto a Δdef entre a relação a/ms de 0,17 e 0,20 que foi muito parecida em todas as formulações ensaiadas, podendo ser justificada por alguns fatores, como por exemplo a falta de finos na mistura. A figura 4 e a tabela 2 demonstram os resultados do ensaio de *squeeze flow* e os pontos de mudança de estágios desenvolvidos com a argamassa com agregado artificial AA2,04.

Figura 4 – Resultado dos ensaios com *squeeze flow* para agregado $AA_{2,04}$: (a) 1:1:6; (b) 1:2:6; (c) 1:2:9



Fonte: Os autores (2023)

Tabela 2 - Δdef. através do ensaio de *squeeze flow* para $AA_{2,04}$

Formulação	a/ms	Estágio I/II			Estágio II/III			ΔF (N)	Δdef. (mm)
		$DE_{máx}$ (mm)	$FE_{máx}$ (N)	R^2	$DP_{máx}$ (mm)	$FP_{máx}$ (N)	R^2	FPmáx-FEmáx	PDmáx-EDmáx
1:1:6	0,17	0,008	0,14	0,99	0,93	2,51	0,99	2,37	0,924
1:1:6	0,20	0,017	0,20	0,97	1,83	42,13	0,99	41,93	1,811
1:1:6	0,23	0,008	0,14	0,74	2,10	19,64	0,99	19,51	2,091
1:1:6	0,26	0,004	0,07	1,00	3,51	35,63	0,99	35,56	3,511
1:1:6	0,29	0,015	0,27	1,00	3,62	25,67	0,99	25,40	3,603
1:2:6	0,17	0,001	0,07	1,00	2,47	86,16	0,99	86,10	2,467
1:2:6	0,2	0,031	0,14	0,79	2,68	39,63	0,99	39,49	2,653
1:2:6	0,23	0,006	0,07	0,84	3,50	66,25	0,98	66,18	3,496
1:2:6	0,26	0,003	0,07	1,00	4,40	7,11	0,97	7,04	4,398
1:2:9	0,17	0,022	0,14	0,99	1,70	118,75	0,98	118,61	1,679
1:2:9	0,2	0,010	0,07	1,00	2,25	97,14	0,99	97,07	2,242
1:2:9	0,23	0,022	0,14	0,99	2,52	104,59	0,99	104,45	2,496
1:2:9	0,26	0,003	0,07	1,00	2,53	46,60	0,99	46,54	2,532
1:2:9	0,29	0,054	0,34	0,90	2,83	18,29	0,99	17,95	2,781

Fonte: Os autores (2023)

Apesar do agregado CS2,04 apresentar-se de natureza artificial, sua quantidade de finos (MP: 3,86%) é de aproximadamente três vezes superior ao agregado natural (AN1,87) dessa pesquisa (MP: 1,6%). Entretanto, o CS2,04 por ser lavado essa porcentagem de finos acaba sendo reduzida consideravelmente quando comparada aos agregados artificiais sem esse tipo de tratamento. Nota-se que as curvas do ensaio de *squeeze flow* mostram-se mais deformáveis, onde a maioria das argamassas desenvolvidas com CS2,04 obtiveram uma faixa maior de deformações, o que não ocorreu nas argamassas desenvolvidas com agregado natural. A análise referente à formulação 1:1:6, que resulta em argamassas menos deformáveis, já era esperada por conta da quantidade reduzida de aglomerante. Entretanto conforme o acréscimo de água percebe-se que as formulações vão se comportando mais deformáveis. Já para a formulação 1:2:6, onde há maior quantidade de aglomerante em relação ao agregado, é possível observar que resultados referentes a plasticidade mais próxima da argamassa ideal para aplicação, exceto a a/ms de 0,26 onde a curva de *squeeze*

flow exibe um ruído que é característico da separação de fases que o excesso de água tende a causar na mistura comprimida pelas placas do *squeeze flow*. Por fim, para a formulação 1:2:9 nota-se que o acréscimo de água provoca um pequeno acréscimo nas deformações, comparado a formulação 1:2:6.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados pode-se concluir-se que foi possível reduzir a subjetividade da análise do comportamento reológico utilizando-se o ensaio de *squeeze flow*, a partir de um coeficiente (Δdef) que possibilita o comparativo numérico entre as curvas resultantes deste ensaio. Esse coeficiente auxilia na análise de trabalhabilidade das argamassas, de forma que quanto maior o seu valor, maior é a facilidade do pedreiro na aplicação deste material, ou seja, mas trabalhável será a argamassa.

Quando analisadas o Δdef, foram identificadas pequenas variações, mesmo quando há variação no tipo de formulação. Em contrapartida, uma diferença maior nos resultados de Δdef. foi identificada quando havia a mudança de tipos de agregados. As formulações desenvolvidas com o agregado CS2,04 foram as que apresentaram maiores Δdef, em comparação com as demais formulações.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Engenharia Civil PPGECC da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Votorantim Cimentos por auxiliarem na viabilidade dessa pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OATES, J. (1998). **Lime and limestone: chemistry and technology, production and uses.** Wiley, New York.
2. ASTM C 270-04. **Standard specification for mortar for unit masonry.** West Conshohocken (2004).
3. CARDOSO, F.A, JONH, V. M, PILEGGO, R.G. **Rheological behavior of mortars under different squeezing rates.** Cement and Concrete Research 39, 748–753, 2009.
4. RILEM. MR-3. **The Complex Workability – Consistence – Plasticity.** France, 1982.
5. HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Técnicas de caracterização reológica de concretos.** Concreto e Construção, v. 47, p. 108-124, 2007.
6. SILVA, C. SOUZA, V.C. FERREIRA, T. OLIVEIRA, A.M. **Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassa de revestimento cimentício produzidas com aditivo químico plastificantes.** 22º CBECIMAT XXII - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15839: **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológico pelo método *squeeze flow*.** Rio de Janeiro. 6p, 2010.