

Influência da viscosidade da solução
ativadora alcalina na trabalhabilidade
de argamassas geopoliméricas

Influence of the viscosity of the alkaline activator solution on the workability of geopolymer mortars

Alexandre Magno Alves de Oliveira¹, Dylmar Penteado Dias²,
Fernando Cesar Coelho França²

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

e-mail: o-alexandre@live.com, dylmar@uenf.br, fernandocesarcoelho@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avaliou a influência da viscosidade da solução ativadora alcalina na trabalhabilidade de argamassas geopoliméricas. Para isso, oito argamassas foram confeccionadas utilizando metacaulim comercial como precursor, areia e dois tipos simples de solução alcalina ativadora. A trabalhabilidade foi avaliada por meio do ensaio em mesa de consistência (*flow-table*), baseado na NBR 13276 (2010), e por meio do ensaio de *squeeze-flow*, baseado na NBR 15839 (2016). Os resultados indicaram que o tipo de ativador utilizado têm influência na viscosidade da solução alcalina e esta afeta a viscosidade da argamassa geopolimérica. Ambos ensaios, *flow-table* e *squeeze-flow*, mostraram-se representativos e seguiram a mesma tendência de queda na trabalhabilidade das argamassas com o aumento da viscosidade da solução ativadora.

Palavras-chave: argamassa geopolimérica, solução alcalina, trabalhabilidade, viscosidade.

ABSTRACT

This work evaluated the influence of the viscosity of the alkaline activator solution on the workability of geopolymeric mortars. For this, eight mortars were made using commercial metakaolin as a precursor, sand and two simple types of activator alkaline solution. The workability was evaluated through the flow-table test, based on NBR 13276 (2016), and through the squeeze-flow test, based on NBR 15839 (2010). The results indicated that the type of activator used has influence on the viscosity of the alkaline solution and this affects the viscosity of the geopolymer mortars. Both flow-table and squeeze-flow tests proved to be representative and followed the same downward trend in the mortar workability as the viscosity of the activator solution increases.

Keywords: geopolymer mortar, alkaline solution, workability, viscosity.

1. INTRODUÇÃO

Geopolímeros são materiais cimentícios sintetizados por meio da mistura de um precursor, fonte de aluminossilicato, com uma solução alcalina [1]. A geopolimerização pode ser dividida em três etapas: (1) dissolução das fases amorfas do precursor pelo ataque alcalino, quebrando as ligações Si-O-Si, Al-O-Al e Si-O-Si; (2) transporte, orientação e condensação das espécies iônicas em monômeros; (3) policondensação e polimerização dos monômeros em uma estrutura cristalina ou semi-cristalina tridimensional polimérica, formada por ligações Si-O-Al-O [2]. A solução ativadora alcalina pode ser simples ou composta. Uma solução simples possui apenas um tipo de soluto. Já a composta possui dois ou mais tipos de solutos. Geralmente, a solução alcalina é resultado de uma mistura de hidróxidos e/ou silicatos de metais alcalinos/alcalinos terrosos.

Os geopolímeros apresentam um grande campo de aplicação devido às suas propriedades, como:

elevada resistência ao ataque de ácidos; à temperatura elevada; ao ataque de álcalis; e o desenvolvimento de elevada resistência mecânica nas primeiras idades [2,3,4,5].

Argamassa geopolimérica pode ser entendida como o produto da incorporação de agregado miúdo ao geopolímero. No estado fresco, uma argamassa tem a trabalhabilidade como sua principal propriedade [6]. Adequada trabalhabilidade proporciona maior facilidade no manuseio, aplicação e regularização da argamassa. Quando a trabalhabilidade não é adequada, a argamassa pode se apresentar muito seca, áspera ou excessivamente fluida, comprometendo sua aplicação. Além do mais, pode apresentar segregação, exsudação excessiva ou baixa aderência [7].

A trabalhabilidade de uma argamassa é de difícil mensuração, pois depende de diversos parâmetros. Um dos principais é a consistência, que pode ser entendida como a resistência da argamassa a deformações impostas [8].

Em argamassas há uma relação direta entre consistência e viscosidade [5,9]. Esta última pode ser entendida como a medida da resistência da argamassa fresca ao escoamento. Nos geopolímeros, a solução ativadora alcalina pode possuir diversos componentes e concentrações molais; com isso, diferentes viscosidades. A viscosidade da solução ativadora alcalina pode influenciar a viscosidade da argamassa geopolimérica, influenciando a consistência que, por sua vez, afeta a trabalhabilidade.

Deste modo, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência da viscosidade da solução ativadora alcalina na trabalhabilidade de argamassas geopoliméricas. As amostras foram avaliadas por meio do ensaio em mesa de consistência (*flow-table*) e por meio do método do *squeeze-flow*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material precursor utilizado foi o metacaulim (MC) comercial, obtido junto à empresa Metacaulim do Brasil. O MC é uma pozolana oriunda da calcinação, à cerca de 650°C, da rocha caulim ou de argilas caulínicas [10]. Para a determinação da composição química do MC utilizou-se a fluorescência de raios X - FRX (Tabela 2), em um equipamento Shimadzu EDX-700. Para identificação das fases cristalinas do MC utilizou-se a difratometria de raios X - DRX (Figura 2), em um equipamento Rigaku Última IV, com um passo de 0,02° para o intervalo entre 3 e 60 ° (2 θ). O comportamento térmico do MC foi determinado por meio de análise térmica diferencial e análise térmica gravimétrica (Figura 3), em um equipamento RB 3000 da BP Engenharia. O intervalo de temperatura foi de 30 até 1000°C, com taxa de aquecimento de 12,5°C/min.

A areia utilizada como agregado miúdo, na composição das argamassas, foi proveniente do rio Paraíba do Sul, extraída na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. Determinou-se sua granulometria (Figura 4) e módulo de finura.

Utilizou-se dois tipos simples de solução alcalina: uma contendo hidróxido de sódio (NaOH) e outra contendo hidróxido de potássio (KOH). O NaOH e o KOH foram adquiridos na Distribuidora de Produtos Químicos São Lázaro, com 98,5% e 98% de pureza, respectivamente. A água foi destilada, para se evitar contaminações por cloro, flúor ou outros elementos comuns na água da rede de abastecimento.

Foram avaliadas oito composições diferentes de argamassas. A formulação, em massa, de cada composição respeita a seguinte expressão:

Precursor : ativador/precursor : areia : água/sólido : solução/precursor.

A relação água/sólido é a relação água/(ativador+precursor). Já a relação solução/precursor é a relação (água+ativador)/precursor. Nestas relações não se considerou a areia.

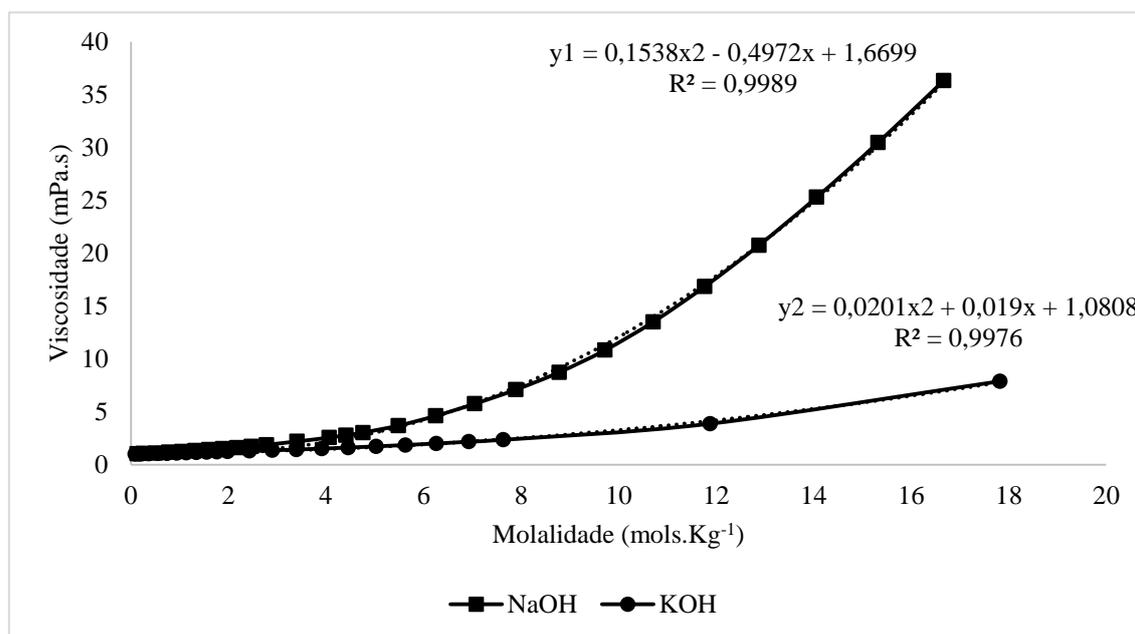
Os constituintes de cada argamassa são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Constituintes de cada argamassa.

ARGAMASSA	ATIVADOR	PRECURSOR	ATIVADOR/ PRECURSOR	AREIA	ÁGUA/SÓLIDO	SOLUÇÃO/ PRECURSOR
Na25	NaOH	1	0,25	1	0,35	0,50
Na30			0,30			0,53
Na35			0,35			0,57
Na40			0,40			0,62
K25	KOH	1	0,25	1	0,35	0,50
K30			0,30			0,53
K35			0,35			0,57
K40			0,40			0,62

O aumento da relação ativador/precursor, por meio do aumento da massa de ativador, afeta a relação água/sólido, pois estas são interdependentes. Assim, para manter esta última constante foi necessário incrementar a massa de água. Este incremento leva a um aumento da massa da solução e, conseqüentemente, de seu volume.

Com os valores em massa dos constituintes da solução alcalina é possível determinar a sua concentração molal ou molalidade, n.º de mols do soluto dividido pela massa de solvente. Existe relação entre a molalidade de uma solução e sua viscosidade. O gráfico apresentado na Figura 1 foi elaborado por meio de dados experimentais obtidos de acordo com [11], para soluções aquosas de NaOH e KOH a 20°C. Nota-se que para uma mesma molalidade as soluções de NaOH apresentam maiores viscosidades. Essa diferença se torna ainda mais expressiva com o aumento da molalidade da solução.


Figura 1: Viscosidade de soluções alcalinas de NaOH e KOH a 20°C.

As soluções alcalinas de cada argamassa foram mantidas em laboratório à temperatura de 20°C até o momento de execução das moldagens. Assim, foi possível o uso da equação de tendência fornecida na Figura 1 para se estimar a viscosidade destas soluções (Tabela 3).

Para se mensurar a trabalhabilidade de uma argamassa, o índice de consistência determinado em mesa de espalhamento é um dos métodos mais difundidos. No entanto, alguns pesquisadores [12,13,14] questionam seu emprego para ampla gama de argamassas atualmente existentes no mercado. Cabe salientar que a correlação feita entre trabalhabilidade e consistência é imprecisa, visto que as argamassas geralmente consideradas com boa trabalhabilidade pelos profissionais pedreiros dependem do teor de ar incorporado e

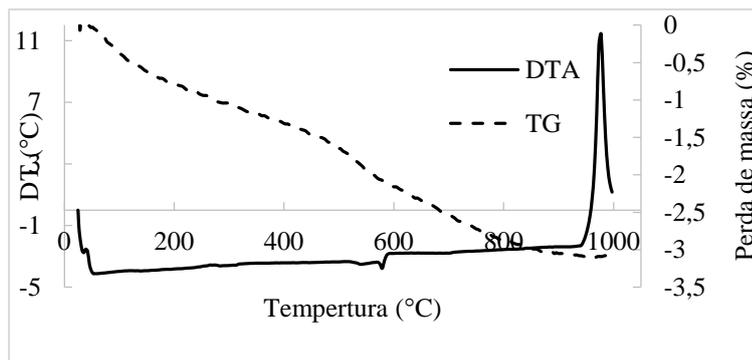


Figura 3: Análise térmica diferencial e térmica gravimétrica do MC.

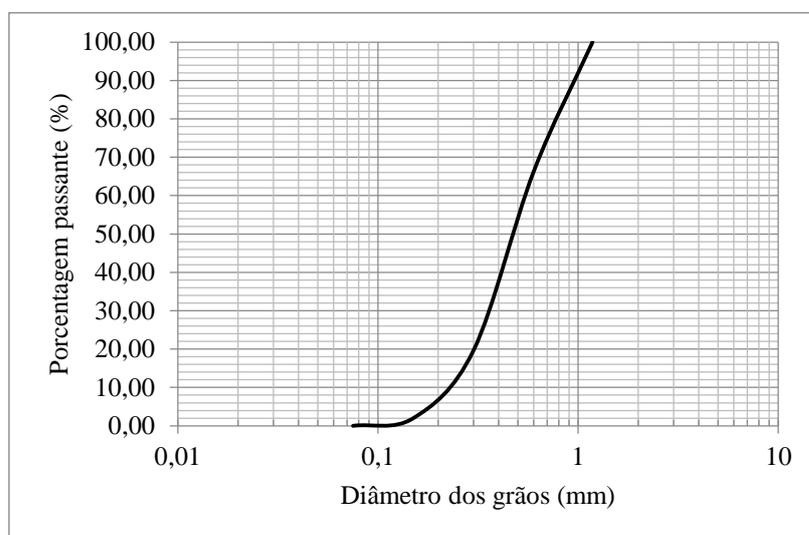


Figura 4: Curva granulométrica da areia.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a viscosidade das diferentes soluções ativadoras alcalinas. As soluções de NaOH apresentaram maior molalidade quando comparadas com as de KOH. Esse fato ocorre porque a massa molar do NaOH é menor que a do KOH. As argamassas Na25 e K25, por exemplo, possuem em suas soluções ativadoras a mesma massa de água e de hidróxido; porém, como o NaOH possui menor massa molar, a solução da argamassa Na25 terá maior número de mols e, portanto, maior molalidade.

Tabela 3: Viscosidade da solução ativadora alcalina de cada argamassa.

ARGAMASSA	MOLALIDADE DA SOLUÇÃO ATIVADORA (mols.Kg ⁻¹)	EQUAÇÃO	VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO ATIVADORA (mPa.s)
Na25	14,20	y1	25,64
Na30	16,67		36,11
Na35	18,62		45,72
Na40	20,41		55,60
K25	10,13	y2	3,34
K30	11,88		4,14
K35	13,29		4,87
K40	14,55		5,61

Além disso, a Tabela 3 mostra que, para um aumento da molalidade, as soluções de NaOH possuem aumento muito maior da viscosidade do que as de KOH. Assim, ao se trabalhar com relações, em massa, na solução alcalina, pode-se estar negligenciando o efeito da molalidade na viscosidade da solução ativadora. Ao se comparar as argamassas Na40 e K40, por exemplo, tem-se que a molalidade da solução ativadora da Na40 é 1,4 vezes maior que a da K40; porém, a viscosidade da primeira solução é cerca de 10 vezes maior que a da segunda.

As argamassas com NaOH, presentes na Figura 5, apresentaram menor índice de consistência quando comparadas com as de KOH. Provavelmente este comportamento é devido às diferenças na viscosidade da solução alcalina de cada argamassa. Como exemplo, a argamassa Na40 possui solução ativadora com viscosidade de 55,60 mPa.s, já a K40 possui solução ativadora com viscosidade de 5,61 mPa.s. Essa disparidade reflete na diferença de mais de 50 mm entre os índices de consistência dessas argamassas.

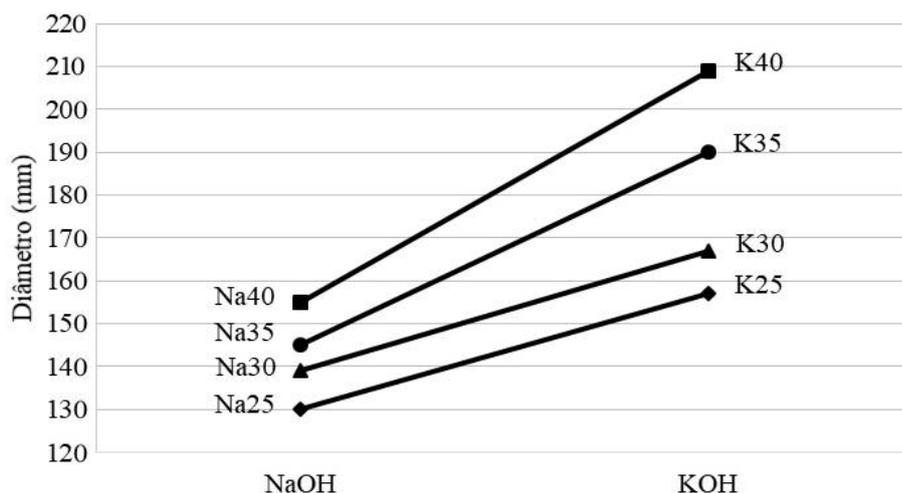


Figura 5: Índice de consistência das argamassas (flow-table).

O aumento da relação ativador/precursor, de 0,25 a 0,40, gerou aumento do índice de consistência (Figura 6), apesar do aumento da viscosidade da solução. Isto ocorre porque para maior massa de hidróxido há aumento da massa de água, para que se mantenha constante a relação água/sólido; com isso, aumenta-se a relação solução/precursor. O maior volume de solução provoca maior fluidez à argamassa. Caso as relações não fossem interdependentes, um aumento do teor de hidróxido levaria a um aumento da molalidade da solução alcalina. Com isso, de acordo com a Figura 1, a solução seria mais viscosa e a argamassa teria menor índice de consistência. Mesmo com esse aumento da relação solução/precursor, as argamassas ativadas por NaOH apresentaram os menores índices de consistência, fato motivado pelas maiores viscosidades de suas soluções ativadoras alcalinas.

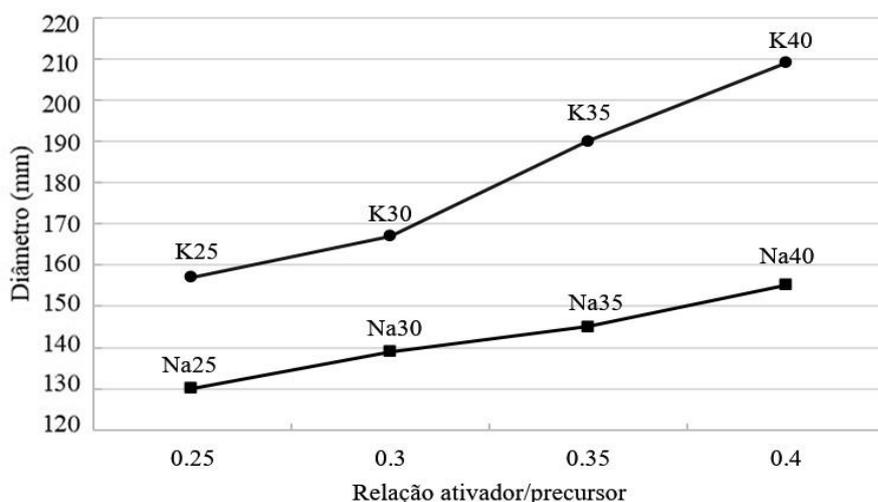


Figura 6: Influência da relação ativador/precursor no índice de consistência (flow-table).

O comportamento reológico das argamassas, obtido pelo método do *squeeze-flow*, é dado por uma curva de carga aplicada *versus* deslocamento. A NBR15839:2010 [23] orienta a limitar o deslocamento a 9,0 mm e a carga a 1 kN. Os resultados obtidos para este ensaio estão mostrados na Figura 7, onde cada argamassa está identificada ao lado de sua curva.

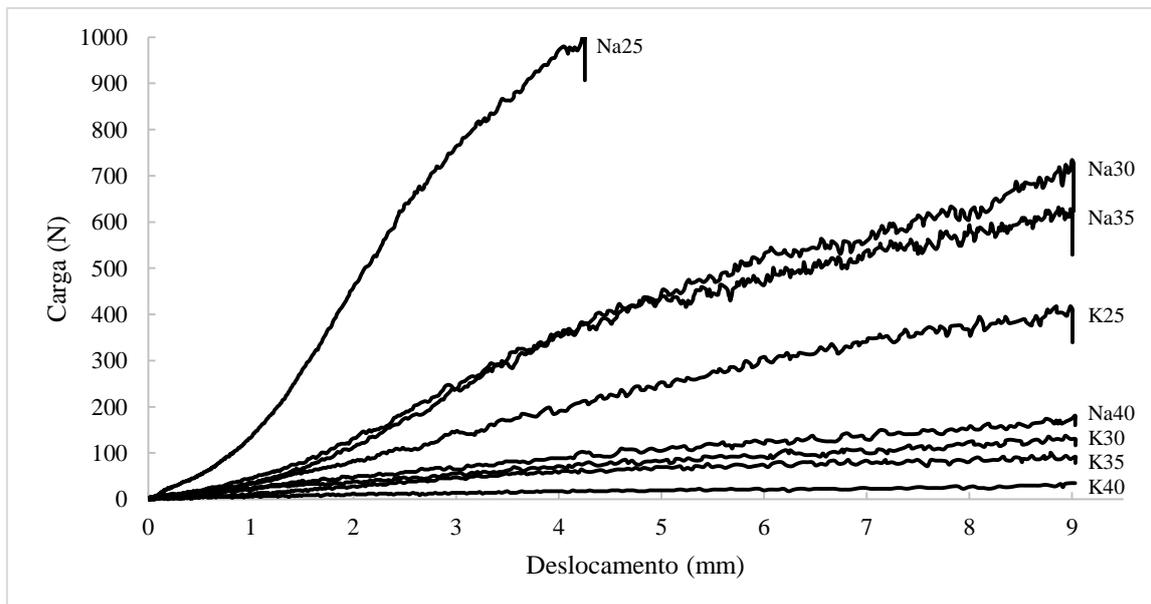


Figura 7: Curva do *squeeze-flow* das diferentes argamassas.

Por meio da curva característica de cada argamassa é possível inferir sobre sua trabalhabilidade. Cargas de compressão maiores para um mesmo deslocamento indicam argamassas mais viscosas, e maior viscosidade reflete menor trabalhabilidade [24]. Portanto, quanto menor for a viscosidade da argamassa maior será a facilidade de aplicação e regularização [19]. Observa-se semelhança com os resultados do *flow-table*. Com o aumento do índice de consistência houve redução da inclinação da curva das argamassas no *squeeze-flow*, tanto para a série ativada por NaOH quanto para a ativada por KOH. A argamassa Na40 foi a única ativada por NaOH com menor viscosidade que uma argamassa ativada por KOH (K25). Como já citado, a maior relação solução/precursor da argamassa Na40 contribuiu para este comportamento. Somente a curva da argamassa Na25 foi limitada pela carga, sendo todas as demais limitadas pelo deslocamento.

A Figura 8 mostra a carga máxima apresentada por cada argamassa. Quando se compara os pares de argamassas com a mesma relação solução/precursor, nota-se os menores valores de carga máxima para aquelas ativadas por KOH. Assim, o tipo de ativador tem grande influência na viscosidade da solução alcalina, que por sua vez reflete na viscosidade da argamassa e, conseqüentemente, na sua trabalhabilidade.

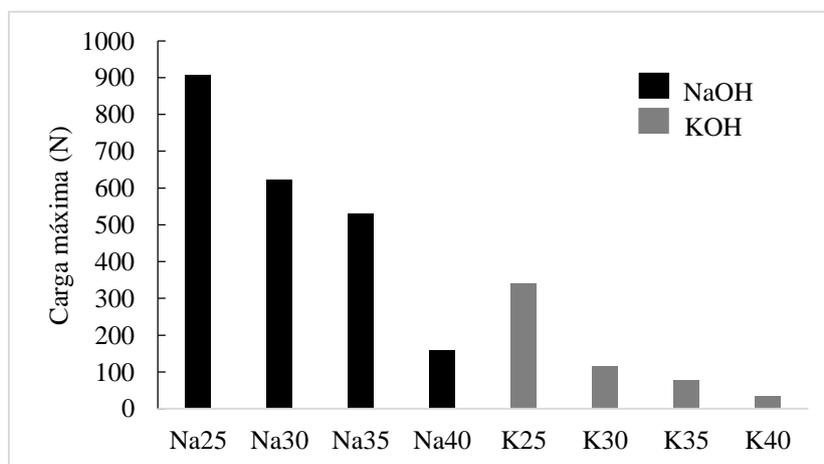


Figura 8: Carga máxima nas argamassas (*squeeze-flow*).

Para os dois ensaios, *flow-table* e *squeeze-flow*, as argamassas tiveram comportamento semelhante. O aumento da viscosidade da solução ativadora, para uma mesma relação solução/precursor, implicou em argamassas mais viscosas e, conseqüentemente, menos trabalháveis. Na prática, a argamassa Na25 apresentará grande dificuldade de espalhamento em comparação à K25. Já a argamassa K40 é fluida em excesso, prejudicando a aplicação e regularização. Apesar das limitações, o *flow-table* apresentou resultados que seguem a mesma tendência do *squeeze-flow*, mostrando que para argamassas geopoliméricas este ensaio tem caráter representativo. Contudo, o método do *squeeze-flow*, devido a sua característica, foi capaz de apresentar o comportamento reológico de cada argamassa, sendo mais preciso para investigar a influência da viscosidade da solução na trabalhabilidade de cada argamassa.

4. CONCLUSÕES

O estudo da trabalhabilidade das argamassas, por meio da determinação do índice de consistência (*flow-table*), e também pelo método do *squeeze-flow*, mostraram-se representativos. Em ambos ensaios verificou-se queda na trabalhabilidade das argamassas com o aumento da viscosidade das soluções ativadoras alcalinas.

A consistência de cada argamassa foi afetada não só pela viscosidade da solução, mas também pela relação solução/precursor.

As argamassas ativadas por NaOH, no geral, apresentaram as maiores viscosidades. Ao se trabalhar com relações dos constituintes em massa, acaba-se por negligenciar a diferença na massa molar dos hidróxidos. Assim, para soluções de mesma massa, porém com molalidades totalmente distintas, conferem viscosidades muito distintas das soluções. Contudo, mesmo se fossem utilizadas soluções com mesma molalidade, a natureza do hidróxido ainda modificaria a viscosidade da solução.

Finalmente, para mesma quantidade em massa, o uso de hidróxido de potássio ao invés de hidróxido de sódio proporciona às argamassas maior trabalhabilidade.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] LUUKKONEN, T., ABDOLLAHNEJAD, Z., YLINIEMI, J., *et al.*, “One-part alkali-activated materials: A review”, *Cement and Concrete Research*, v.103, pp. 21-34, 2018.
- [2] AIKEN, T.A., SHA, W., KWASNY, J., *et al.*, “Resistance of geopolymer and Portland cement based systems to silage effluent attack”, *Cement and Concrete Research*, v. 92, pp. 56–65, 2017.
- [3] ALBITAR, M., MOHAMED ALI, M. S., VISINTIN, P., *et al.*, “Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes”, *Construction and Building Materials*, v. 136, pp. 374–385, 2017.
- [4] SHI, C., SHI, Z., HU, X., *et al.*, “A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates”, *Materials and Structures*, v. 48, pp. 621–628, 2015.
- [5] SARKER, P. K., KELLY, S., YAO, Z. “Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete”, *Materials & Design*. v. 63, pp. 584–592, 2014.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C270-14 (2014), Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM International.
- [7] BAUER, E. Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. 1. ed. Brasília: LEM-UnB - SINDUSCON/DF. 2005.
- [8] RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS, RILEM. MR-3 (1982), The Complex Workability – Consistence – Plasticity. France.
- [9] RAGO, F., CINCOTTO, M. A. *Influência do Tipo de cal hidratada na reologia de pastas*. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil BT/PCC/233, 1999.
- [10] LI, C., SUN, H., LI, L. “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements”, *Cement and Concrete Research*, v. 40, pp. 1341-1349, 2010.
- [11] WAYNES, W. M. Handbook of Chemistry and Physics. 95. ed. CRC. 2014-2015.
- [12] NAKAMURA, E. H., CINCOTTO, M. A. *Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento*. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de

Construção Civil BT/PCC/359, 2004.

- [13] BANFILL, P. F. G., “Rheology of fresh cement and concrete”, *Rheology Reviews*, pp. 61-130, 2006.
- [14] CASCUDO, O., CARASEK, H. “Controle de produção de argamassas industrializadas em obra empregando o método de penetração do cone”, In: *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, Lisboa, Portugal, 22-23 Novembro 2007.
- [15] CAVANI, G. R., ANTUNES, R. P. N., JOHN, V. M. “Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade de argamassas mistas”, In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, pp. 110-119, Salvador, Agosto 1997.
- [16] GOMES, A. M., NERO, J. M. G., APPLETON, J. A. S. “Novo método para a avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas”, In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, pp. 83-91, Goiânia, 1995.
- [17] SILVA, N. G., CAMPITELI, V. C. “Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas”, In: *XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído*, Florianópolis, Brasil, 23-25 Agosto 2006.
- [18] CARDOSO, F. A., PILEGGI, R. G., JOHN, V. M. “Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze-flow*”, In: *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, pp. 121-143, Florianópolis, Brasil, 23-25 Maio 2005.
- [19] ANTUNES, R. P. N., JOHN, V. M., PILEGGI, R. G. “Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por *squeeze-flow*”, In: *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, pp. 158-179, Florianópolis, Brasil, 23-25 Maio 2005.
- [20] CARDOSO, F. A., PILEGGI, R. G., JOHN, V. M. “*Squeeze-flow* aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil BT/PCC/545, 2010.
- [21] SILVA, R. P., BARROS, M. M. S. B., PILEGGI, R. G., *et al.*, “Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow”, In: *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, pp. 106-120, Florianópolis, Brasil, 23-25 Maio 2005.
- [22] 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.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15839 (2010), Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos - Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro.
- [24] CARDOSO, F. A., *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*, Tese de D. Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2009.