

AValiação DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS DE CIMENTO POR MEIO DE ENSAIOS OSCILATÓRIOS: ESTUDO DO TIPO DE ADITIVO QUÍMICO

Andrielli M. de Oliveira^{1*}, Jéssica R. dos Santos¹, Alexandre de Castro² e Oswaldo Cascudo¹

¹ *Departamento de Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil*

² *ELETRONBRAS FURNAS, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil*

Palavras-chave: Reologia, Ensaio Oscilatório, Pasta de Cimento, Aditivo Químico, Reômetro.

Resumo. Estudos reológicos são interessantes para estudos e análises da ação fluidificante de aditivos químicos. Esses aditivos químicos podem diminuir a viscosidade das misturas e reduzir a demanda de água, o que é muito atraente do ponto de vista de durabilidade de materiais cimentícios. Dessa forma, é objetivo avaliar o comportamento reológico de pastas de cimento, por meio da propriedade de módulo elástico G' , sob interveniência do tipo de aditivo químico (plastificante RA1 e superplastificante RA2). Esses aditivos possuem mesma base química (polícarboxilato) e diferentes teores de sólidos em suspensão. As pastas foram produzidas com CP V-ARI e relação água/ligante 0,55. Por meio da análise dos resultados, foi possível inferir que o aditivo superplastificante foi mais compatível com o cimento utilizado do que o aditivo plastificante. O aditivo superplastificante retardou o tempo de pega da mistura (aproximadamente 50 minutos) e a manteve mais trabalhável por muito mais tempo. Este comportamento pode ser desejável em algumas aplicações de campo e em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto, por exemplo. Em termos de desempenho, podemos elucidar a seguinte sequência de desempenho em relação ao módulo elástico: pasta com aditivo superplastificante, pasta com aditivo plastificante e pasta de referência (sem aditivo).

Endereços de e-mail: andriellimorais@ufg.br*, santos_rodrigues@discente.ufg.br, ocascudo@ufg.br, alexensp@furnas.com.br.

EVALUATION OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTES THROUGH OSCILLATORY TESTS: STUDY OF THE TYPE OF CHEMICAL ADMIXTURE

Keywords: Rheology, Oscillatory Tests, Cement Paste, Chemical Admixture, Rheometer.

Abstract. Rheological studies are interesting for studies and analysis of the fluidizing action of chemical admixtures. These chemical admixtures can minimize the viscosity of the mixtures and reduce the demand of water. This is very attractive from the point of view of durability of cementitious materials. Thus, the aim of the paper is to evaluate the rheological behavior of cement pastes, through the property of elastic modulus G' , under the intervention of the types of chemical admixtures (plasticizer RA1 and superplasticizer RA2). These admixtures are based on polycarboxylate and they have had different levels of solids in suspended. The pastes were produced with Brazilian Portland Cement type CP V-ARI and a water/binder ratio of 0.55. Through the analysis of the results, it was possible to infer that the superplasticizer chemical admixture was more compatible with the cement used than the plasticizer chemical admixture. Superplasticizer chemical admixture delayed the setting time of the mixture (approximately 50 minutes) and kept it more workable for much longer time. This behavior may be desirable in some field applications and in operations of preparing, mixing, transporting and molding of concrete, for example. In terms of performance, it was possible to elucidate, in descending order of performance, related to elastic modulus: paste with superplasticizer chemical admixtures, paste with plasticizer chemical admixtures and reference paste (without chemical admixtures).

1 INTRODUÇÃO

Ensaio de reologia são muito interessantes e importantes em diversas indústrias, como a alimentícia, a cosmética e beleza, a farmacêutica, a de bebidas, a de tintas, de petróleo, de aditivos químicos, dentre outros. A reologia pode auxiliar na fabricação de produtos, na determinação de seu controle de qualidade, na manutenção de sua vida útil e na escolha de sua textura e fluidez.

Dentre os ensaios reológicos possíveis de serem realizados em pastas cimentícias, tem-se o ensaio oscilatório. Ele é também chamado de teste dinâmico e associa a velocidade angular com a deformação oscilatória resultante. Esse tipo de ensaio é comumente utilizado para analisar a cinética e o desenvolvimento de reações de hidratação de pastas de cimento ao longo do tempo [5]. Também esse ensaio mede propriedades ainda no período viscoelástico do material, uma vez que o módulo elástico G' independe da deformação aplicada [32].

Estudos reológicos com pastas e argamassas de cimento Portland com o uso de aditivos químicos, analisando-se a interveniência do tipo, da base química e de seu teor/quantidade vêm sendo desenvolvidos, inclusive com análises tecnológicas de investimento e benefícios técnicos vinculados às misturas. Diversos tipos de aditivos químicos, inclusive com bases de éter de policarboxilato, melanina, naftaleno, naftaleno sulfonado, lignosulfonato, resina poli acrílica, resina melamínica, poli acrilato e poli acrílico vêm sendo testados em matrizes cimentícias [1, 2, 5, 7–11, 13, 14, 17–21, 24–35].

Ao mesmo tempo, estudos relacionam o tipo de aditivos, adições minerais e a reologia com comportamento estrutural, moldabilidade e impressões 3D. Isso demonstra a importância do comportamento reológico dos materiais, sua aplicação e sua correlação com propriedades no estado endurecido [6, 12, 33].

Dessa forma, é objetivo avaliar o comportamento reológico de pastas de cimento, por meio do módulo elástico, sob interveniência do tipo de aditivo químico (plastificante e superplastificante). As pastas foram produzidas com CP V-ARI e relação água/ligante de valor igual a 0,55.

Estudos reológicos com matrizes cimentícias são relevantes, sobretudo no Brasil em que poucos estudos neste campo vêm sendo desenvolvidos. Esses estudos são balizadores para entender a dinâmica do comportamento de hidratação do cimento Portland e seu limite para trabalhabilidade e adensabilidade quando aplicados em concretos.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidas pastas com relação água/ligante (a/lig), e neste caso, água/cimento também de 0,55, escolhidas com base em pesquisas desenvolvidos no Grupo de Estudos em Durabilidade (GEDur-UFG) [15, 16, 22]. Foi utilizado cimento CP V-ARI RS com massa específica de $2,97 \text{ g/cm}^3$ e área específica de $5,83 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Também dois tipos de aditivos químicos dispersantes à base de policarboxilatos, a saber: um RA2 - redutor de água tipo 2 (superplastificante) com 32,82% de teor de sólidos e um plastificante RA1 - redutor de água tipo 1 (plastificante) [3], com 19,67% de teor de sólidos, designados no presente trabalho de *A* e *B* foram utilizados, respectivamente. Esses aditivos são muito utilizados de forma comercial em uma empresa de produção de concreto (concreteira) na região de Goiânia/GO.

A partir de ensaios de fluxo realizados anteriormente [23], foram definidos os teores ótimos desses aditivos, os quais foram: 0,7% e 0,5%, em relação à massa de cimento, para os respectivos aditivos *A* e *B*, respectivamente.

O procedimento de mistura, em resumo, consistiu em colocar água e aditivo, previamente misturados ao recipiente com cimento. A mistura manual desses materiais foi realizada com o

auxílio de uma espátula durante um minuto, seguida por uma mistura mecânica, utilizando um misturador modelo IKA RW 20 digital, durante três minutos com rotação aproximada de 2500 rpm. Foi preparada aproximadamente 120 mililitros de pasta em cada mistura (utilizando sempre 100 gramas de cimento).

Para os ensaios reológicos, utilizou-se um reômetro do tipo rotacional modelo AR G2, fabricante TA *Instruments*, vinculado a um computador que emitiu resultados de taxa de cisalhamento de forma gráfica, simultaneamente ao ensaio. Para a obtenção de dados, controle dos parâmetros do ensaio e tratamento de dados, utilizou-se os *softwares Rheology Advantage Instrument Control AR e TRIOS da TA Instruments*.

O ensaio oscilatório executado consistiu na execução de dois ciclos com duas rampas em cada ciclo, sendo: a primeira rampa com aceleração da taxa de cisalhamento (indo de zero a 400 s^{-1}) e a segunda com desaceleração (caindo de 400 s^{-1} para zero). Em cada rampa, foram obtidos 30 pontos com os dados citados anteriormente. Essa primeira parte do ensaio tem o objetivo de ajustar o material à geometria e prepará-lo para a próxima etapa, sendo que as duas primeiras rampas foram descartadas já que a mistura estava ainda sendo homogeneizada e tendo aderência às placas do reômetro. Adicionalmente, as amostras foram submetidas a deformações por um período de seis horas para obtenção dos valores de módulo elástico.

Por meio de ensaios de fluxo anteriores [24], já se tem a informação de que essas pastas tem um comportamento pseudo plástico típico de pastas de cimento, uma vez que a medida em que se acrescentou aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento tiveram tendência de redução de valor, já que o material ganhou fluidez e, conseqüentemente, aumentou a trabalhabilidade. As pastas de cimento foram estáveis e trabalháveis, inclusive até mesmo na análise tátil-visual.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de viscosidade e da tensão de cisalhamento das pastas estudadas, obtidas a partir da média das duas últimas rampas da primeira etapa do ensaio. Nas Figuras 1 a 2 estão apresentadas as curvas de tempo *versus* módulo elástico (G') para cada condição de estudo.

O ensaio oscilatório, também conhecido como ensaio de varredura de deformação, forneceu como resultado, curvas que demonstram o comportamento elástico (módulo elástico que determina o início da pega) das pastas cimentícias, durante o incremento da frequência de deformação.

Tabela 1: Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento das pastas estudadas, de acordo com o aditivo utilizado

Pasta		Teor de Aditivo (%) em relação à massa de cimento	Viscosidade [Pa·s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]
	REF 0,55	0,0	0,296	116,70
Relação a/lig 0,55	Aditivo A Superplastificante	0,7	0,071	28,22
	Aditivo B Plastificante	0,5	0,153	60,19

A literatura relata [4] valores de tensão de escoamento para pastas de cimento de 10 a 100 Pa, viscosidade de 0,01 a 1 Pa·s e de ruptura estrutural significativa. Comparando os dados da Tabela 1 com literatura, os valores de viscosidade obtidos estão próximos à faixa sugerida por Banfill [4], demonstrando que os aditivos têm efeitos mais drásticos na tensão do que na

viscosidade propriamente dita, sendo ainda sim, influente.

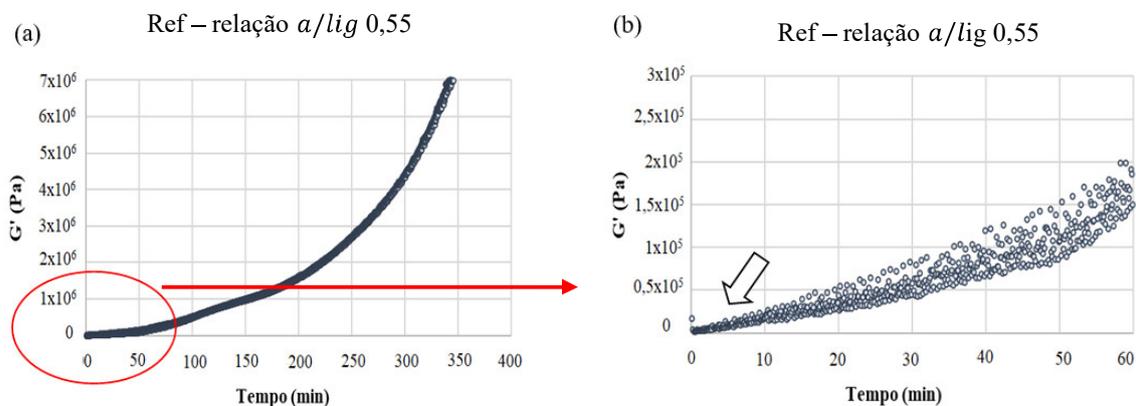


Figura 1: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento referência com relação a/lig 0,55: (a) com duração de aproximadamente 6 horas (360 minutos) e (b) ampliação da primeira hora de ensaio

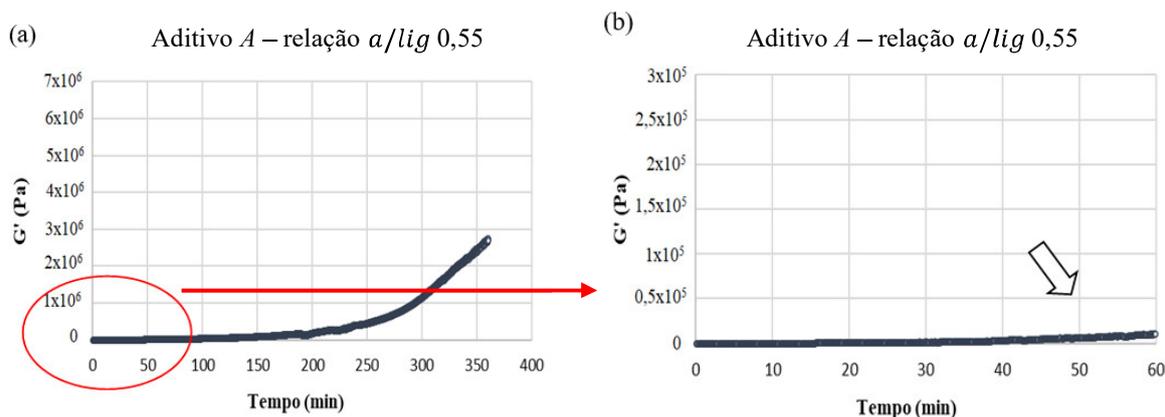


Figura 2: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento com relação a/lig 0,55 e 0,7% do aditivo A - superplastificante: (a) com duração de aproximadamente 6 horas (360 minutos) e (b) na primeira hora do ensaio

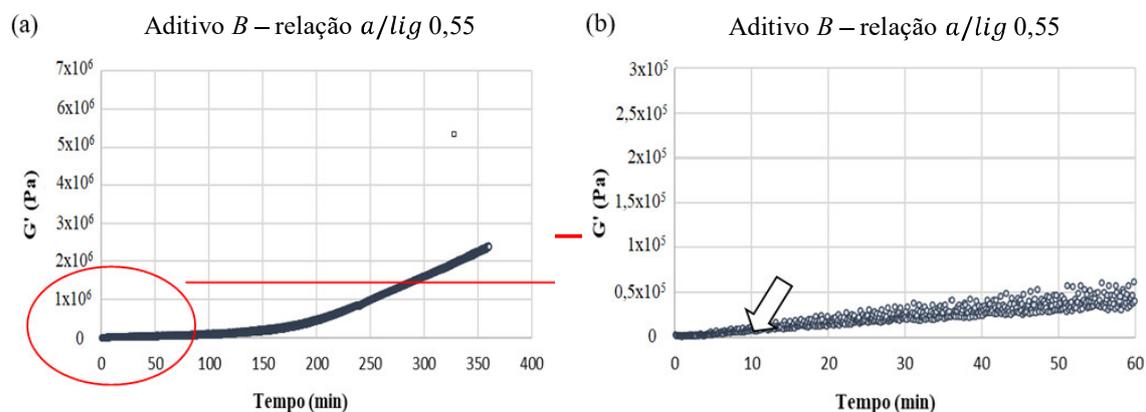


Figura 3: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento com relação a/lig 0,55 e 0,5% do aditivo B - plastificante: (a) com duração de 6 horas (360 minutos) e (b) na primeira hora do ensaio

Fazendo-se uma primeira análise com os resultados do ensaio na pasta de referência com relação a/lig de 0,55 (Figura 1), é possível observar que o processo de consolidação da pasta

se iniciou antes mesmo dos primeiros dez minutos de ensaio (Figura 1b), demonstrando que a pasta logo perdeu fluidez. Entretanto, é uma consolidação mais dispersa, onde os processos de solidificação da pasta vão ocorrendo aos poucos. Além disso, todo o seu processo de hidratação ocorreu de forma suave, visto que a sua curva tendeu a ser exponencial (Figura 1a).

Já as Figuras 2 e 3 demonstram o comportamento das pastas com o uso de um superplastificante (aditivo *A*) e o uso de um plastificante (aditivo *B*), respectivamente. Por meio das Figuras 2 e 3, foi possível notar o quanto os aditivos influenciaram de forma diferente entre si o comportamento da pasta de cimento. O aditivo *A* retardou o início do processo de consolidação da pasta para um tempo próximo de cinquenta minutos, enquanto que o aditivo *B* tem pouco efeito sobre a pasta (se comparado à pasta de referência), com início do processo de pega próximo de dez minutos de ensaio (Figuras 2b e 3b).

Com isso, foi possível inferir que, mesmo com o uso dos aditivos estudados, os produtos de hidratação da pasta foram sendo formados logo na primeira hora após a mistura de seus componentes. Além disso, as curvas com aditivos foram menos abruptas, ao contrário das curvas da pasta de referência.

Por meio das Figuras 1, 2 e 3, também é possível observar com clareza, o efeito dos aditivos químicos nos valores do módulo elástico para as pastas estudadas. A pasta de referência confirmou a sua consolidação de forma mais rápida, como esperado. Isto foi possível de ser notado pelo formato mais exponencial da curva e isso denotou endurecimento mais rápido desta pasta.

No que tange ao aditivo *A* (superplastificante) (Figura 2) no teor de 0,7% em relação à massa de cimento, observou-se um comportamento que retardou o tempo de pega da mistura (aproximadamente 50 minutos) e a manteve mais fluida (observe a curva menos abrupta, com dados mais organizados e menos dispersos) por muito mais tempo. A pasta com aditivo *A* manteve-se mais trabalhável com o tempo, sendo um comportamento desejável neste estudo e interessante em aplicações de campo, em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento. Adicionalmente, a pasta com aditivo *B* (plastificante) (Figura 3) foi mais fluida que a pasta sem aditivos com o avançar do tempo.

Em resumo, o melhor desempenho do aditivo *A* (superplastificante) foi esperado em relação ao aditivo *B* (plastificante), inclusive pelo seu maior teor de sólidos em comparação a pasta sem aditivos.

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões, com base nos resultados obtidos, podem ser listadas:

- o aditivo *A* (superplastificante) com maior teor de sólidos foi mais compatível com o cimento CP V-ARI do que o aditivo *B* (plastificante), uma vez que a sua cinética de hidratação foi condizente com o esperado para esse tipo de aditivo químico;
- a pasta com o melhor resultado da cinética de hidratação avaliada foi a pasta com 0,7% do aditivo *A*, a qual apresentou um retardo nas reações de pega e endurecimento de quase 50 minutos, se comparada com a pasta de referência (sem aditivos);
- a pasta com aditivo *A* foi mais fluida e trabalhável por mais tempo (este desempenho foi esperado e desejável e pode ser interessante em algumas aplicações em campo e em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento de concretos); e
- em termos de desempenho, podemos elucidar em ordem decrescente em relação ao G' : pasta com aditivo superplastificante (*A*), pasta com aditivo plastificante (*B*) e pasta de referência (sem aditivo).

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFMG/EECA/LABITECC. Os autores expressam agradecimento a todos esses parceiros, bem como ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas concedidas aos pesquisadores autores deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] L. B. Agostinho. *Estudo reológico de pastas de cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil, 2017.
- [2] L. B. Agostinho, A. C. Pereira, E. F. Silva e R. D. Toledo Filho. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosílica. *Journal of Building Engineering*, 34:102024, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102024>.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 11768–1:2019 *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2019.
- [4] P. F. G. Banfil. *The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review*. 11th International Cement Chemistry Congress, 61–130, 2003.
- [5] A. M. Betioli Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil, 2007.
- [6] J. Bonilla-Cruz, M. A. Ávila-Lopez, F. E. L. Rodríguez, A. Aguilar-Elguezabal e T. E. Lara-Ceniceros. 3D printable ceramic pastes design: correlating rheology & printability. *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 13:6033–6039, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.029>.
- [7] O. Burgos-Montes, M. M. Alonso e F. Puertas. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 48:417–423, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>
- [8] F. C. Ferraris, K.H. Obla e R. Hill. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31:245–255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00454-3).
- [9] E. Guneyisi, M. Gesoglu, A. Al-Goody e S. Ipek. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 95:29–44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.142>.
- [10] F. Han, S. Pu, Y. Zhou, H. Zhang e Z. Zhang. Effect of ultrafine mineral admixtures on the rheological properties of fresh cement paste: a review. *Journal of Building Engineering*, 51, 1:104313, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104313>.
- [11] I. Janotka, F. Puertas, M. Palacios, M. Kuliffayova e C. Varga. Metakaolin sand-blended-cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 24:791–802, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.028>.

- [12] K. Kondepudi, K. V. L. Subramaniam, B. Nematollahi, S. H. Bong e J. Sanjayan. Study of particle packing and paste rheology in alkali activated mixtures to meet the rheology demands of 3D Concrete Printing. *Cement and Concrete Composites*, 131:104581, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104581>.
- [13] O. Koutný, D. Snoeck, F. V. D. Vurst e N. Belie. Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. *Cement and Concrete Research*, 88:29–40, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.009>.
- [14] L. Kucharska e M. Moczko Influence of silica fume on the rheological properties of the matrices of high-performance concretes. *Advances in Cement Research*, 6, 24:139–145, 1994. <https://doi.org/10.1680/adcr.1994.6.24.139>.
- [15] R. C. Lopes. *Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal De Goiás, Goiânia – GO, Brasil, 2022.
- [16] R.C. Lopes, A.M. Oliveira e O. Cascudo. Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos como Parâmetro de Durabilidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência Mecânica e sem Adições Minerais. In: *Congressos Latino-Americano De Patología De La Construcción Y Congressos De Control De Calidad En La Construcción*, 16: 2124–2134, 2022.
- [17] S. M. Mansour, M. T. Abadlia, K. Bekkour e I. Messaoudene. Improvement of Rheological Behaviour of Cement Pastes by Incorporating Metakaolin. *European Journal of Scientific Research*, 42, 3:442–452, 2010.
- [18] A. Mohammed, S. Rafiq, W. Mahmood, R. Noaman, H. Al-Darkazali, K. Ghafor e W. Qadir. Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanosilica. *Journal of Materials Research and Technology*, 9:10941–10956, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.083>.
- [19] N. S. Msinjili, W. Schmidt, B. Mota, S. Leinitz e H. C. Kühne, A. Rogge. The effect of superplasticizers on rheology and early hydration kinetics of rice husk ash-blended cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 150:511–519, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.197>.
- [20] M. Nehdi, S. Mindess e P. C. Aytcin. Statistical modelling of the micro filler effect on the rheology of composite cement pastes. *Advances in Cement Research*, 9, 33:37–46, 1997. <https://doi.org/10.1680/adcr.1997.9.33.37>.
- [21] S. Ng e H. Justnes. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 65:41–54, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.005>.
- [22] A. M. Oliveira e O. Cascudo. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192:467–477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>.
- [23] A. M. Oliveira, O. Cascudo e J.R. Santos. Estudo Reológico: Viscosidade Plástica e Tensão de Cisalhamento de Pastas de Cimento Analisando a Influência do Tipo e do Teor de Aditivos Químicos. In: *Anais do 63º CBC – CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Anais... 63º CBC, Brasília, IBRACON: São Paulo, p.1–15.

- [24] A. Papo e L. Piani. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 34:2097–2101, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.017>.
- [25] C. K. Park, M. H. Noh e T. H. Park. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35:842–849, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.002>.
- [26] F. Puertas, H. Santos, M. Palacios e S. M. Ramírez. Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*, 17, 2:77–89, 2005.
- [27] M. Sahmaran, H. Christianto e I. O. Yaman. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement Concrete Research*, 28:432–440, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>.
- [28] T. M. Salem. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes. *Cement and Concrete Research*, 32:1473–1481, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00809-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00809-8).
- [29] F. N. Santos, S. R. G. Sousa, A. J. F. Bombard e S. L. Vieira. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using mixture design of experiments. *Construction and Building Materials*, 143:92–103, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.001>.
- [30] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza e W. L. Repette. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23:2487–2491, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005>.
- [31] N. Shanahan, V. Tran, A. Williams e A. Zayed. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture. *Construction and Building Materials*, 123:745–753, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.094>.
- [32] M. A. Schultz e L. J. Struble. Use of oscillatory shear to study flow behavior of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 23,2:273–282, 1993. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90092-N](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90092-N).
- [33] H. Valera, G. Barluenga, I. Palomar e A. Sepulcre. Synergies on rheology and structural build-up of fresh cement pastes with nanoclays, nanosilica and viscosity modifying admixtures. *Construction and Building Materials*, 308:125097, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125097>.
- [34] H. Vikan e H. Justnes. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. *Cement and Concrete Research*, 37:1512–1517, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.012>.
- [35] X. Zhang e J. Han. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30:827–830, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00236-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00236-2).