

DOI: <https://doi.org/10.48195/sepe2025.30173>

CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE SÍNTESE E O COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE GEOPOLÍMEROS DE METACALIM

Maria Fernanda Dornelles Howes^{1*}, Gabriela Iansen¹, Ânella de Oliveira Meirelles¹, Caroline Vitória Mahl Affonso¹, Jéssica Pithan Borges¹, Rafaela de Medeiros Dupont¹, Vinícius Vieira¹, Erich David Rodriguez²

RESUMO

Geopolímeros são ligantes inorgânicos, caracterizados por apresentar uma estrutura amorfa e de natureza cerâmica. São produzidos a partir da síntese entre uma fonte de aluminossilicatos em pó (precursor) e uma solução alcalina (ativador). Devido à natureza reativa do precursor e ao uso de matérias primas com elevada estabilidade termoquímica, os geopolímeros quando adequadamente formulados podem apresentar elevada resistência mecânica, estabilidade térmica (acima dos 800 °C) e estabilidade química frente a agentes agressivos. Ademais, suas propriedades em estado fresco, semelhantes às dos cimentos convencionais, permitem a conformação de geometrias complexas e os torna materiais ideais para aplicações de alto desempenho, como revestimentos refratários, encapsulação de resíduos, produção de peças com expostas a ambientes agressivos e aplicação na manufatura aditiva (impressão 3D). Para quaisquer aplicações, o comportamento reológico da pasta fresca é um parâmetro decisivo, pois determina os limites de trabalhabilidade e conformação, a estabilidade dimensional e a capacidade de deposição contínua. Este estudo visa avaliar sistematicamente as propriedades reológicas de pastas geopoliméricas sintetizadas a partir de metacaulim, ativado por soluções de silicato de potássio e KOH. Investigou-se a influência de três parâmetros fundamentais de síntese: a concentração de álcalis (% K₂O), o módulo de solução Ms (relação molar SiO₂/K₂O) e a relação água/ligante (a/l). Sete formulações distintas foram desenvolvidas mediante a variação controlada desses parâmetros. A caracterização reológica foi conduzida por meio de ensaios oscilatórios de varredura de amplitude (AST) e varredura de frequência (FST), para quantificar os módulos viscoelásticos (G' e G''), o limite viscoelástico linear (LVE) e ângulo de fase (δ). Os resultados demonstraram maior influência da % K₂O e Ms quando comparados a influência da relação a/l. A maior rigidez foi apresentada para o menor teor alcalino (15 % K₂O), com G' 3,54 vezes maior do que o obtido para a maior concentração (25 % K₂O).

Palavras-chave: Reometria oscilatória, Módulo viscoelástico, Potássio, Rigidez, Fluidez.

¹ Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brasil.

² Coordenador: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brasil.

INTRODUÇÃO

No contexto de materiais avançados, os geopolímeros se destacam como alternativa viável e sustentável, oferecendo menor pegada de carbono que o cimento Portland e evitando a elevada demanda energética associada à produção de materiais cerâmicos ($> 1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$) (KRIVEN et al., 2024; PROVIS; VAN DEVENTER, 2008). Esses materiais apresentam rede tridimensional inorgânica e amorfa, com potencial para atingir elevadas resistências mecânicas, estabilidade térmica e durabilidade química. Ademais, permitem a incorporação de subprodutos industriais como precursores e/ou partículas, o que contribui para a valorização de resíduos e para a transição rumo a uma economia mais sustentável (GIANNOPOULOU et al., 2023; HUSEIEN et al., 2018; NEMALEU et al., 2023; TAHWIA et al., 2022).

Devido às suas propriedades no estado endurecido, a literatura apresenta uma diversidade de aplicações possíveis para estes ligantes, como revestimentos refratários, encapsulação de resíduos e manufatura aditiva (BASKAR et al., 2023; MURALI, 2023; XIE; GUO; XUE, 2025). Contudo, a efetiva utilização dos geopolímeros para aplicações de alto desempenho depende não apenas das propriedades no estado endurecido, mas também do seu comportamento em estado fresco. As propriedades reológicas do ligante são determinantes para a trabalhabilidade e condicionam processos de moldagem, lançamento, adensamento e acabamento (DE GASPERI et al., 2021; FENSTERSEIFER et al., 2023; MEZGER, 2010).

A partir disso, a caracterização reológica de pastas geopoliméricas tem se consolidado com o uso de reometria rotacional, principalmente, e oscilatória, que permitem avaliar o comportamento no estado fresco de forma precisa, mesmo sob pequenas deformações e frequências (AUTEF et al., 2013; BRITO et al., 2018; HALASTA; ROVNANIK; MIKHAILOVA, 2019; OUYANG et al., 2021; PUNDIENÉ et al., 2020). Enquanto os testes rotacionais descrevem o fluxo sob diferentes taxas de cisalhamento, simulando situações de mistura, bombeamento ou extrusão, os ensaios oscilatórios fornecem informações sobre o caráter viscoelástico do sistema, determinando parâmetros como módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G'') e o limite viscoelástico linear (LVE) (MEZGER, 2010). Em aplicações práticas, esses ensaios permitem avaliar o comportamento relevante para a conformação de geometrias complexas, a deposição contínua em camadas e a manutenção das propriedades mecânicas ao longo do tempo. Nesse contexto, a reologia fornece o suporte conceitual para interpretar a deformação e o escoamento, com a reometria oscilatória trazendo foco para propriedades fundamentais de rigidez. Entretanto, observa-se que a literatura ainda apresenta um número reduzido de estudos empregando essa configuração de ensaio em geopolímeros, o que limita a comparação de resultados e reforça a necessidade de investigações adicionais (NAIR et al., 2019; PANDA; UNLUER; TAN, 2018; WANG et al., 2023; ZHONG; ZHANG, 2022).

Para os geopolímeros, três fatores se destacam como determinantes para o comportamento reológico: (i) a concentração de ativação ou teor alcalino ($\% \text{K}_2\text{O}$), que regula a dissolução do precursor e a taxa de polimerização; (ii) o módulo de solução M_s ($\text{SiO}_2/M_2\text{O}$; M sendo o metal alcalino), que altera o balanço entre espécies monoméricas e oligoméricas de silício e, conseqüentemente, a rigidez inicial da suspensão; e (iii) a relação água/ligante (a/l), responsável por controlar a viscosidade e a dispersão das partículas. A variação controlada desses parâmetros possibilita investigar as transições de comportamento viscoelástico e as condições de estabilidade da pasta (DE GASPERI et al., 2021; POULESQUEN; FRIZON; LAMBERTIN, 2011; SEGURA et al., 2022; WANG et al., 2023).

A partir disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar sistematicamente o comportamento reológico de pastas geopoliméricas formuladas a partir de metacaulim e ativadas por soluções de íons potássio. Foram consideradas as três variáveis fundamentais de

síntese: a concentração de álcalis (% K₂O), o módulo de solução (Ms = SiO₂/K₂O) e a relação água/ligante (a/l). A caracterização foi conduzida por meio de ensaios oscilatórios de varredura de amplitude (AST) e de frequência (FST), permitindo quantificar os módulos viscoelásticos, identificar o LVE e analisar a tixotropia e a recuperação estrutural das pastas. A análise sistemática desses fatores fornece subsídios para avaliação de geopolímeros por reometria oscilatória, favorece que estudos futuros avancem na investigação de outros parâmetros de síntese e oferece um referencial comparativo para pesquisas em sistemas geopoliméricos.

METODOLOGIA

As formulações foram produzidas a partir de um caulim da região (Rio Grande do Sul) calcinado a 750 °C, como precursor, com as caracterizações físicas apresentadas na Tabela 1. A Figura 1, com o difratograma de raios-X (DRX) retrata a característica amorfa do metacaulim, necessária para adequadas reações de geopolimerização. As soluções ativadoras foram preparadas pela mistura de hidróxido de potássio sólido (KOH), com pureza de 85 %, e silicato de potássio comercial (Tabela 2). As proporções de KOH e silicato foram ajustadas de forma a variar a concentração de álcalis, expressa em % K₂O em relação à massa de precursor, bem como o módulo de solução (relação molar SiO₂/K₂O). Além disso, foi modificada a relação água/ligante (a/l), de modo a avaliar seu impacto no comportamento reológico. Ao todo, foram desenvolvidas sete formulações, dispostas na Tabela 3, de forma a avaliar a influência de cada parâmetro.

Tabela 1 – Propriedades físicas do metacaulim

Massa específica (kg/m ³)	Superfície específica BET (m ² /kg)	Tamanho médio de partícula Dv[4,3] (µm)
2.530	13,23	39,00

Tabela 2 – Caracterização do fabricante para o silicato de potássio

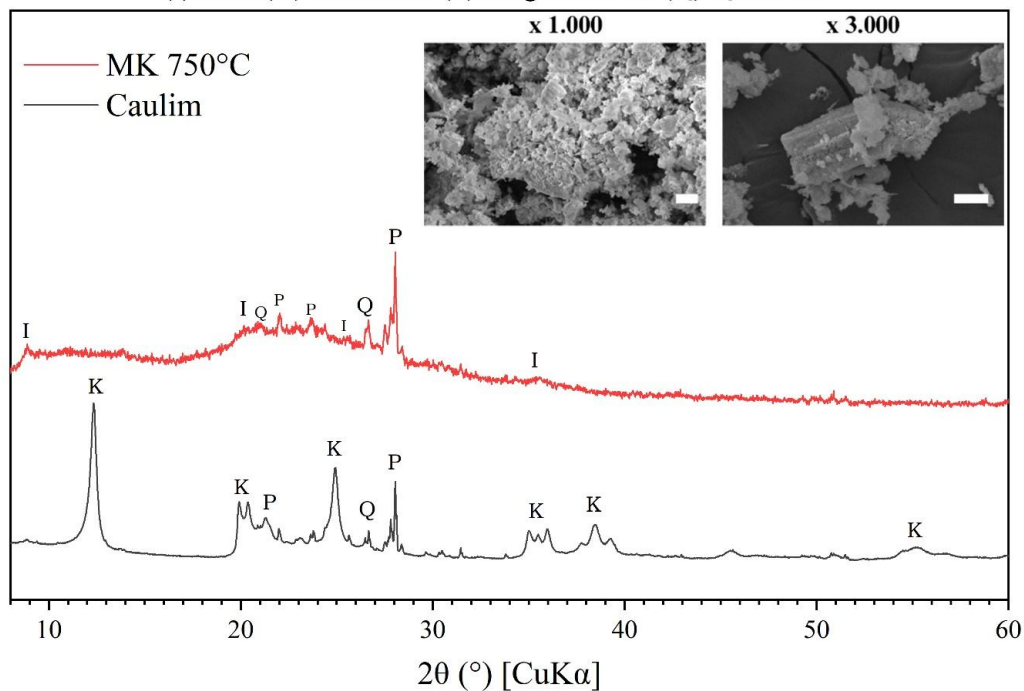
SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Ms ($\frac{SiO_2}{K_2O}$)	H ₂ O (%)
25,68	13,02	1,92	61,30

Tabela 3 – Formulações avaliadas

Nomenclatura	% K ₂ O	Ms	a/l
25K-1,25-0,35	25	1,25	0,35
20K-1,25-0,35	20	1,25	0,35
15K-1,25-0,35	15	1,25	0,35
25K-1,00-0,35	25	1,00	0,35
25K-0,75-0,35	25	0,75	0,35
25K-1,25-0,40	25	1,25	0,40
25K-1,25-0,45	25	1,25	0,45

Figura 1 – Difratoograma de Raios-X do metacaulim

(I) Ilita; (K) Kaolinita; (P) Plagioclasses; (Q) Quartzo;



A solução ativadora foi preparada previamente, com dissolução do KOH em silicato de potássio e repouso por 24 horas, de modo a garantir o equilíbrio químico antes da homogeneização. As misturas foram realizadas em agitador mecânico por 5 minutos até a obtenção de pastas homogêneas. Imediatamente após a mistura, as amostras foram transferidas para o reômetro oscilatório (HAAKE Mars 40, Thermo Scientific), equipado com geometria de placas paralelas serrilhadas de 25 mm de diâmetro e gap fixo de 2,0 mm. A temperatura de ensaio foi mantida constante em 25 °C.

Foram aplicados dois protocolos reológicos. O primeiro consistiu em ensaios de varredura de amplitude (AST), realizados aos 5 min após a conclusão da mistura, tempo padronizados para as demais composições a fim de haver comparabilidade entre os resultados. Os ensaios de varredura de amplitude foram conduzidos em frequência fixa de 10 Hz, com deformação variando de 0,001 % a 75 %. Esses ensaios permitiram determinar a região linear viscoelástica (LVE) e a deformação crítica para o início de ruptura estrutural da matriz. Na sequência, foram realizados ensaios de varredura de frequência (FST), com deformação fixa de 0,01 % dentro da região LVE, variando-se a frequência entre 0,1 e 60 Hz, realizados aos 10 min após a conclusão da mistura para todas as composições. Os parâmetros analisados foram o módulo de armazenamento (G'), que expressa a resposta elástica associada à rigidez da pasta; o módulo de perda (G''), relacionado à dissipação viscosa de energia durante a deformação; o limite do regime viscoelástico linear (LVE), que define a faixa de deformações em que a estrutura mantém comportamento linear (elástico) sem ruptura significativa; e o ângulo de fase ($\tan \delta$), obtido pela razão entre G'' e G' , utilizado para indicar o balanço entre os comportamentos elástico e viscoso.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de varredura de amplitude (AST) das pastas de metacaulim evidenciam que tanto a concentração do ativador alcalino quanto o módulo de solução (M_s) influenciam de maneira significativa a rigidez estrutural do material no estado fresco. Como pode ser observado na Figura 2, o aumento da concentração de K_2O para 25 % resultou em menores módulos de armazenamento (G') e de perda (G''), indicando pastas menos rígidas e com menor resistência à deformação. Reduções na concentração para 20 % e 15 % de K_2O promoveram um aumento progressivo de G' e G'' , dentro da região do intervalo viscoelástico linear (LVE) até deformações de aproximadamente 0,1 %. Esse comportamento demonstra que concentrações mais baixas favorecem a estruturação da pasta, aumentando sua rigidez, efeito também observado na literatura para ativador de potássio (DE GASPERI et al., 2021).

O efeito da concentração de íons alcalinos observado neste estudo, obtido com o uso de geometria de placas paralelas, apresenta divergências em relação aos resultados reportados na literatura (STEINS et al., 2012; VANCE et al., 2014). Essa diferença pode ser atribuída, em grande parte, às distintas configurações de ensaio empregadas, visto que a maioria dos trabalhos utiliza reometria rotacional, cujas condições experimentais influenciam diretamente a leitura dos parâmetros de viscosidade e rigidez (FENSTERSEIFER et al., 2023). A maior fluidez observada em sistemas com alta concentração de potássio pode ser atribuída ao raio iônico do potássio (K^+). A grande área superficial do K^+ resulta em uma densidade de carga superficial menor em maiores quantidades. Isso diminui a atração entre os íons e as cargas negativas na superfície das partículas precursoras, como o metacaulim, resultando em menor viscosidade da mistura. A adsorção de cátions na superfície das partículas e as forças de Van der Waals tornam-se menos significativas à medida que o espaçamento entre as partículas aumenta, reduzindo as rigidezes (DE GASPERI et al., 2021).

De maneira análoga, a variação do módulo de solução (Figura 3) mostrou que valores mais altos de M_s (1,25) geram pastas menos rígidas, enquanto a redução do M_s (para 1,00 ou 0,75) resulta no aumento dos módulos G' e G'' . Esse efeito pode ser atribuído ao equilíbrio entre álcalis e sílica na solução, de modo que menores valores de M_s favorecem a formação de uma rede geopolimérica mais densa e coesa, aumentando a rigidez do geopolímero.

Por outro lado, a razão água/ligante (Figura 4) apresentou efeito relativamente menor sobre a rigidez, quando comparada à influência da concentração do ativador ou do M_s . A adição de água aumentou a trabalhabilidade das pastas ao reduzir levemente G' e G'' , mas não foi capaz de alterar de forma significativa a estrutura reológica das pastas.

Em todas as composições testadas, não foi observado o ponto de crossover ($G' = G''$) ao longo da faixa de deformação avaliada (terceiro gráfico das Figuras 2 a 4). Os módulos de armazenamento (G') permaneceram superiores aos módulos de perda (G''), indicando um comportamento predominantemente elástico do material, mesmo sob deformações aplicadas. Esse comportamento evidencia a ausência de transição para o escoamento plástico nas condições experimentais estudadas. Provis *et al.* destacam que geopolímeros frequentemente apresentam $G' > G''$ devido à rápida formação de uma rede tridimensional de aluminossilicato (PROVIS; BERNAL, 2014).

Figura 2 – Ensaio de varredura de amplitude (AST) para as diferentes concentrações de ativação

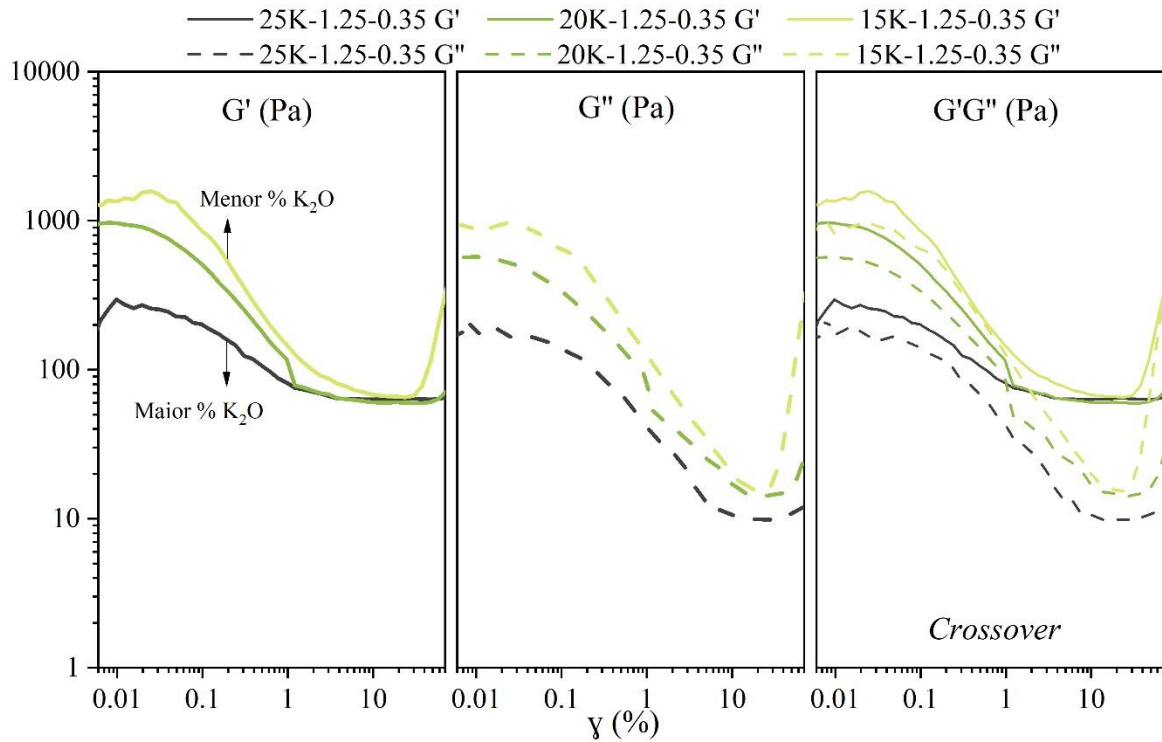


Figura 3 – Ensaio de varredura de amplitude (AST) para os diferentes módulos de solução

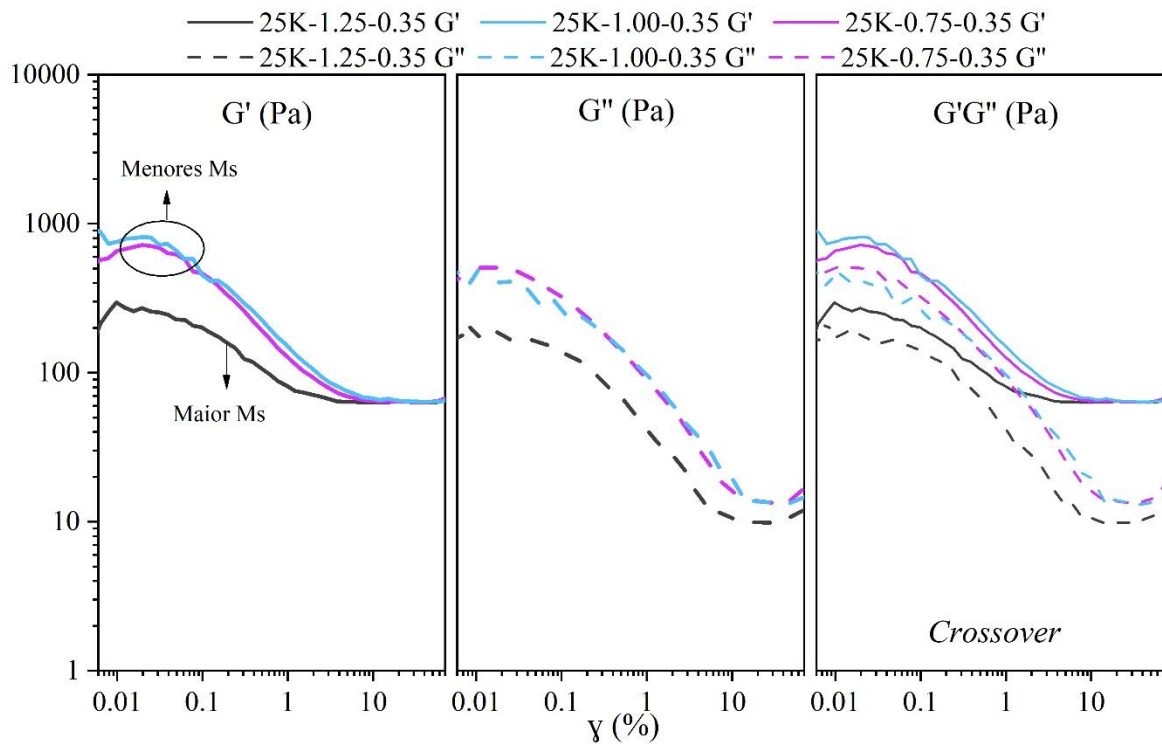
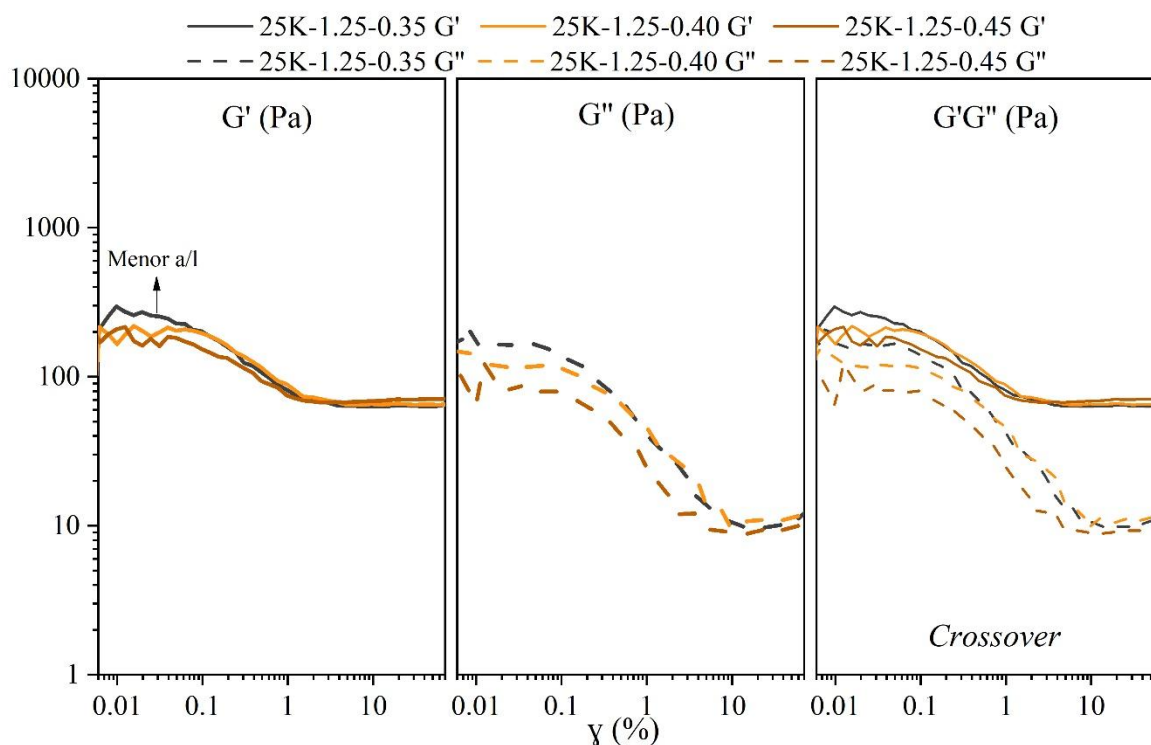


Figura 4 – Ensaio de varredura de amplitude (AST) para as diferentes relações água/ligante



A análise do limite viscoelástico linear (LVE), apresentada na Tabela 4, é crucial para fixar a deformação e validar os resultados obtidos nos ensaios de varredura de frequência. Conforme os dados, todas as formulações apresentaram um limite de LVE superior a 0,01%, a deformação fixa utilizada para a varredura de frequência. Esse resultado confirma que o teste foi conduzido estritamente dentro do regime linear elástico do material. Sob essas condições, a rede estrutural da pasta permanece inalterada (plasticamente) pela deformação aplicada, garantindo que os valores medidos dos módulos de armazenamento (G') e de perda (G'') representam as propriedades intrínsecas da amostra.

A comparação de G' em $\gamma = 0,01\%$ permite quantificar diferenças de rigidez entre as formulações. A formulação com menor concentração de álcalis (15 % K_2O) exibiu um aumento de 354% para G' em relação à formulação com maior concentração, indicando um ganho substancial de rigidez ao reduzir o teor alcalino. Em contrapartida, o aumento da relação a/l resultou em redução do G' na faixa de 30-40 %, evidenciando que a adição de água reduz as rigidezes, porém com impacto menos pronunciado em comparação ao efeito da concentração de álcalis.

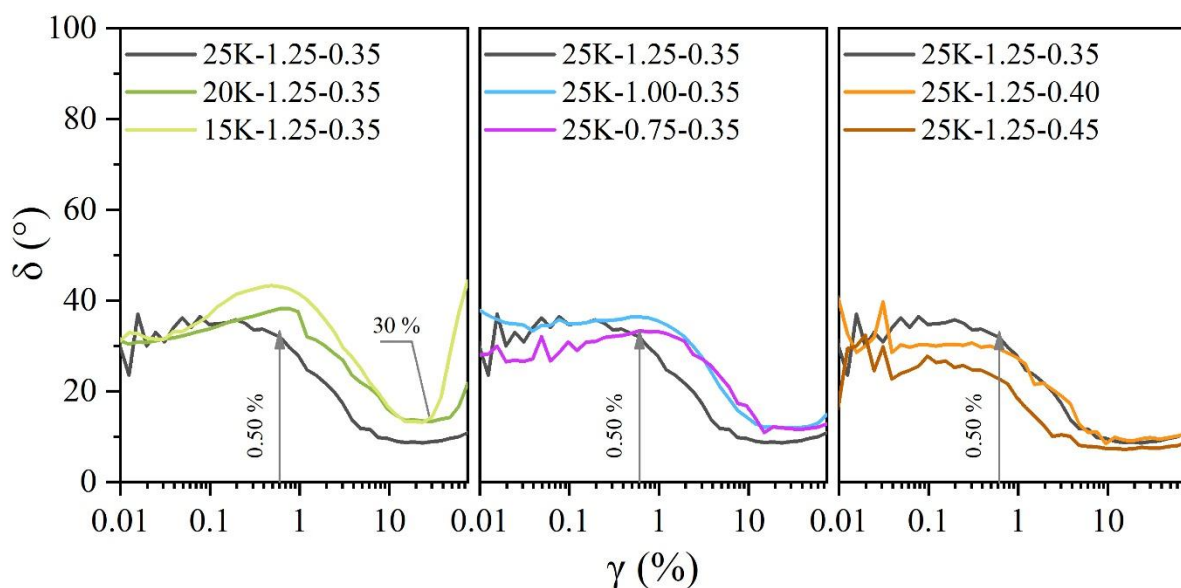
Tabela 4 – Limite linear visco elástico e módulo de armazenamento (G') em $\gamma = 0,01\%$

Formulação	LVE (%)	G' em $\gamma = 0,01\%$ (Pa)
25K-1,25-0,35	0,0123	296
20K-1,25-0,35	0,0299	963
15K-1,25-0,35	0,0125	1345
25K-1,00-0,35	0,0124	763
25K-0,75-0,35	0,0299	655
25K-1,25-0,40	0,0125	166
25K-1,25-0,45	0,0138	209

O ângulo de fase (δ) fornece uma métrica direta do balanço entre as componentes elásticas (G') e viscosas (G''). Valores reduzidos de δ indicam uma resposta predominantemente elástica, associada à maior rigidez, enquanto valores elevados refletem comportamento mais viscoso, favorecendo a fluidez inicial. Em termos práticos, esse parâmetro auxilia na compreensão da relação entre processabilidade e estabilidade da matriz durante o estado fresco.

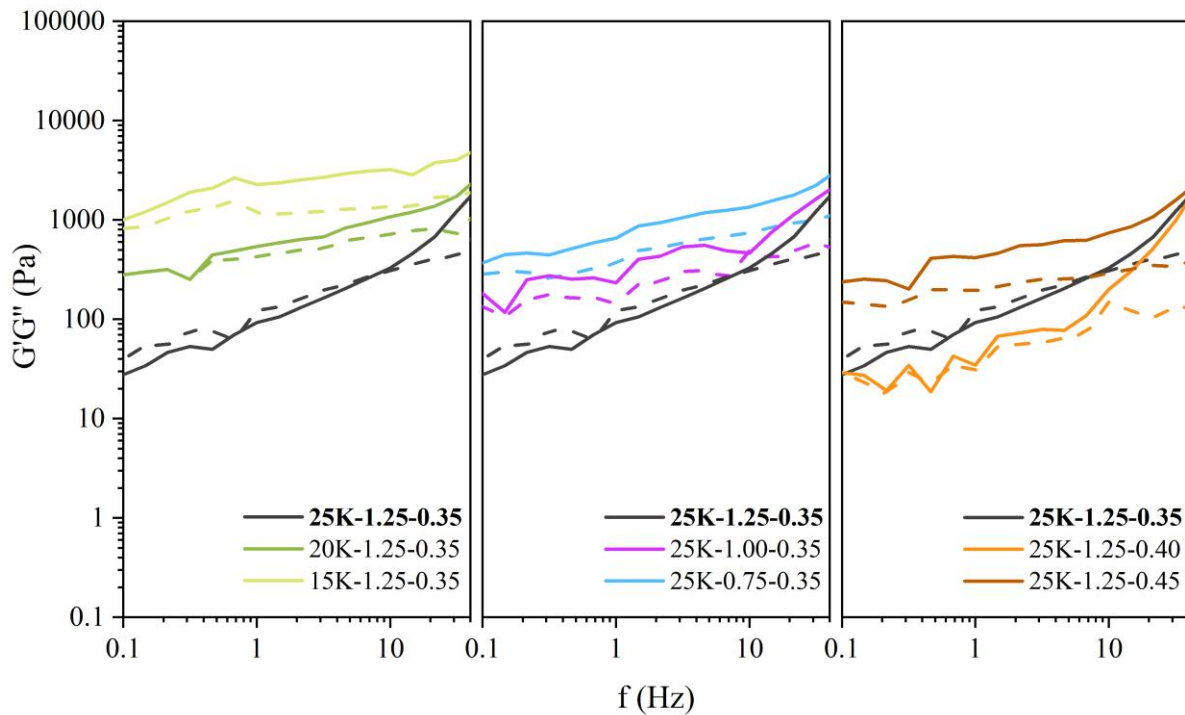
Para o ângulo de fase não existiu uma diferença significativa entre as diferentes formulações. A formulação com menor % K_2O apresentou um pico mais proeminente no ângulo de fase, que coincide com a queda no gráfico da varredura de amplitude (AST), indicando uma transição de comportamento de sólido para viscoso/fluido. Em altas deformações ($\sim 30\%$), a pasta 15K-1,25-0,35 volta a se comportar de maneira mais sólida. Para as demais formulações, o ângulo de fase apenas reduziu, sugerindo que os valores de rigidez se aproximam sob maiores deformações, levando a um comportamento mais fluido (viscoso) do que elástico.

Figura 5 – Ângulos de fase obtidos para todas as formulações em AST



No ensaio de varredura de frequências (FST), Figura 6, todas as pastas geopoliméricas mantiveram predominância do caráter elástico, com G' superior a G'' em toda a faixa analisada. A redução da concentração de K_2O de 25% para 15% levou a um incremento dos módulos viscoelásticos, sobretudo em baixas frequências (< 1 Hz), indicando a maior rigidez. De forma semelhante, a diminuição do Ms de 1,25 para 0,75 também resultou em maiores valores de G' e G'' . Além disso, observou-se o aumento progressivo de ambos os módulos com a frequência, comportamento característico de sistemas viscoelásticos que se tornam mais resistentes sob sollicitações rápidas. Para frequências superiores a 30 Hz, as diferenças entre as formulações tornam-se pouco expressivas, com resposta mecânica semelhante independentemente dos parâmetros de síntese.

Figura 6 – Ensaio de varredura de frequências para todas as formulações



CONCLUSÕES

As análises reológicas das pastas de metacaulim ativadas com potássio permitiram tirar as seguintes conclusões sobre o impacto dos parâmetros de formulação:

- A concentração de ativação (% K_2O) foi o fator que mais influenciou a reologia, com a diminuição da concentração de 25% para 15% resultando em um aumento significativo nos módulos de armazenamento (G') e de perda (G''), o que indica maior rigidez da pasta;
- A redução do módulo de solução (M_s) promoveu um aumento nos módulos viscoelásticos, sugerindo que soluções com menor razão silicato/álcalis também favorecem a formação de uma rede mais rígida e menos trabalhável;
- A relação água/ligante (a/l) apresentou o menor efeito para reduzir os módulos de rigidez;
- Em todas as formulações, as pastas exibiram um comportamento predominantemente elástico, com G' sempre superior a G'' , e a ausência do ponto de crossover ($G' = G''$) demonstrando a tendência ao comportamento mais sólido (elástico) do que líquido (viscoso);
- Por fim, a varredura de frequência mostrou que tanto G' quanto G'' aumentaram para maiores velocidades, indicando que as pastas se tornam mais rígidas sob deformações rápidas, uma característica típica de materiais viscoelásticos.

REFERÊNCIAS

AUTEF, A. et al. Influence of metakaolin purities on potassium geopolymer formulation: The existence of several networks. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 408, n. 1, p. 43–53, 2013.

BASKAR, P. et al. A Review on Fresh, Hardened, and Microstructural Properties of Fibre-Reinforced Geopolymer Concrete. **Polymers**, v. 15, n. 6, 2023.

BRITO, W. D. S. et al. Evaluation of the rheological and mechanical behavior of the synthesized geopolymer with residue waste [Avaliação do comportamento reológica e mecânico de geopolímero sintetizado com reaproveitamento de resíduo]. **Revista Materia**, 2018.

DE GASPERI, J. et al. Temporal dynamics of rheological properties of metakaolin-based geopolymers: Effects of synthesis parameters. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123145, 2021.

FENSTERSEIFER, E. J. et al. Fresh properties of fly ash-based geopolymer: the role of the testing conditions on the rheological measurements. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 26, p. 7082–7096, 2023.

GIANNOPOULOU, I. et al. High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. **Journal of Building Engineering**, v. 72, n. February, p. 106575, 2023.

HALASTA, L.; ROVNANIK, P.; MIKHAILOVA, O. Effect of geopolymer composition on the mechanical and rheological properties. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 583, n. 1, 2019.

HUSEIEN, G. F. et al. Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 307–317, 2018.

KRIVEN, W. M. et al. Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 107, n. 8, p. 5159–5177, 2024.

MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. [s.l: s.n.]. v. 59

MURALI, G. Recent research in mechanical properties of geopolymer-based ultra-high-performance concrete: A review. **Defence Technology**, n. April, 2023.

NAIR, S. A. O. et al. Linking fresh paste microstructure, rheology and extrusion characteristics of cementitious binders for 3D printing. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 102, n. 7, p. 3951–3964, 2019.

NEMALEU, J. G. D. et al. Low-temperature high-strength lightweight refractory composites: Pore structures and insulating properties. **Ceramics International**, v. 49, n. 14, p. 23510–23521, 2023.

OUYANG, G. et al. Rheokinetics and fluidity modification of alkali activated ultrafine metakaolin based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121268, 2021.

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 307–314, 1 nov. 2018.

POULESQUEN, A.; FRIZON, F.; LAMBERTIN, D. Rheological behavior of alkali-activated metakaolin during geopolymerization. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 357, n. 21, p. 3565–3571, 2011.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. [s.l.] Woodhead Pub., 2008.

PUNDIENÉ, I. et al. The role of temperature and activator solution molarity on the viscosity and hard structure formation of geopolymer pastes. **Construction and Building Materials**, n. xxxx, p. 121661, 2020.

SEGURA, I. P. et al. Influence of sodium-based activators and water content on the fresh and hardened properties of metakaolin geopolymers. **SN Applied Sciences**, v. 4, n. 10, 2022.

TAHWIA, A. M. et al. Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating

recycled waste glass. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. June, p. e01393, 2022.
WANG, W. et al. Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: Role of alkali content, modulus, and water–binder ratio. **Construction and Building Materials**, v. 367, n. November 2022, 2023.

XIE, Y.; GUO, Y.; XUE, J. Development of a sustainable engineered geopolymer composite with mitigated autogenous shrinkage, enhanced mechanical performance, and improved thermal behaviour by recycled concrete powder. **Powder Technology**, v. 460, n. March, p. 121087, 2025.

ZHONG, H.; ZHANG, M. **3D printing geopolymers: A review**. **Cement and Concrete Composites** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2022.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

Este trabalho de acesso aberto está licenciado sob Creative Commons - Atribuição (CC BY 4.0).