cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Relações entre Razões Molares, Comportamento Reológico e Resistência à Compressão de Geopolímeros Contendo Chamote de Porcelanato

Leonardo Ferreira Junior[1]; Sabrina Luana Dias Pereira[1]; Alex Neves Junior[2]; Priscila Lemes[1]
[1]Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu/PR; [2]Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT

Introdução

• A produção de cimento Portland responde por 5–8% das emissões globais de CO_2eq, motivando o desenvolvimento de geopolímeros por ativação alcalina de aluminossilicatos.

• O chamote de porcelanato (CH), subproduto rico em SiO_2 (74,99%), Al_2O_3 (18,04%) e fase vítrea amorfa (45,7%), destaca-se como precursor complementar ao metacaulim (MK), mas há divergências sobre sua atuação reativa ou inerte.

Objetivos

Correlacionar a composição química (FRX), mineralógica (DRX) e granulométrica (DLS) dos precursores e as razões molares das pastas (SiO_2/Al_2O_3, Na_2O/SiO_2 e Na_2O/Al_2O_3) com a reologia no estado fresco (Herschel-Bulkley e tixotropia) e a resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 1. Delineamento experimental (% em massa), razões molares, consistência (K) e resistência (fc, 28d). *Limites experimentais e faixa molar clássica de Davidovits (1991).

Mistura	%NaOH (10M)	%Na_2SiO_3	%MK	%CH	SiO_2/Al_2O_3	Na_2O/SiO_2	Na_2O/Al_2O_3	K (HB) [Pa·s^n]	fc 28d [MPa]
M01	15,0	26,0	26,0	33,0	5,37	0,30	1,58	315,6	**35,2**
M02	13,0	26,0	37,3	23,7	4,61	0,26	1,21	514,4	**36,4**
M03	13,0	31,7	40,0	15,3	4,47	0,29	1,29	72,1	**57,1**
M04	14,2	26,0	40,0	19,8	4,42	0,28	1,25	380,4	**54,4**
M05 ★	**10,0**	**30,0**	**40,5**	**19,5**	**4,51**	**0,23**	**1,05**	**562,5**	**76,7**
M06	13,0	26,0	30,8	30,2	5,05	0,26	1,33	398,6	**45,7**
M07	15,0	26,6	32,9	25,4	4,85	0,30	1,45	164,0	**43,8**
M08 ★	**10,0**	**30,0**	**40,0**	**20,0**	**4,54**	**0,23**	**1,06**	**525,0**	**67,3**
M09	14,1	31,3	30,9	23,7	5,07	0,31	1,55	204,0	**53,4**
Ref.*	10-15	26-31,7	26-40,5	15,3-33	3,3-4,5	0,20-0,48	0,80-1,60	72-563	Méd: 52,2

Metodologia

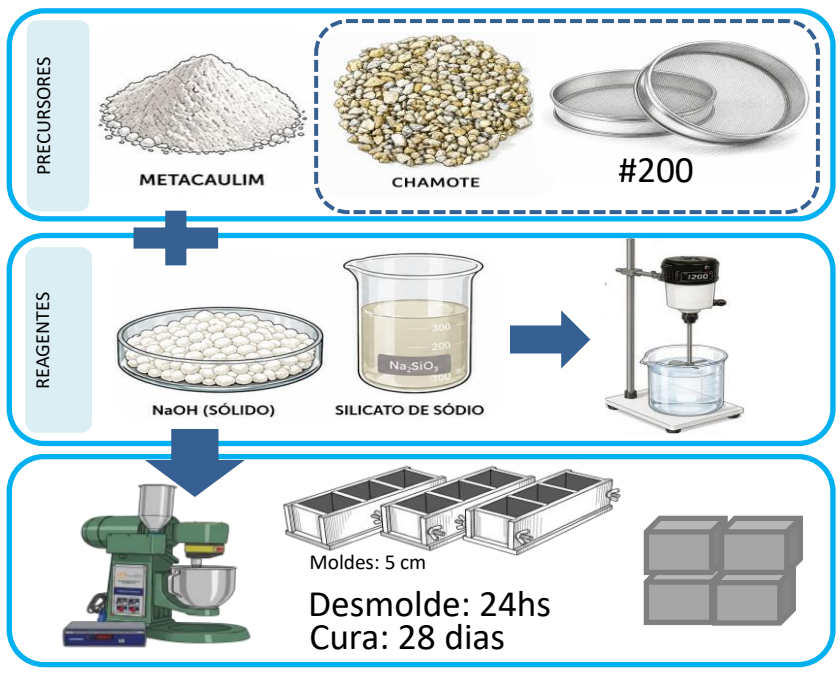


Figura 1. Fluxograma experimental de preparação, ativação alcalina, moldagem e cura das 9 formulações (4× réplicas = 36 CPs cúbicos de 50 mm).

Caracterizações:

- **Composição Química: FRX**
- **Caracterização mineralógica: DRX**
- **Tamanho médio de partícula: DLS**
- **Comportamento Reológico: Reometria**
- **Resistência Mecânica à Compressão**

Resultados e Discussão

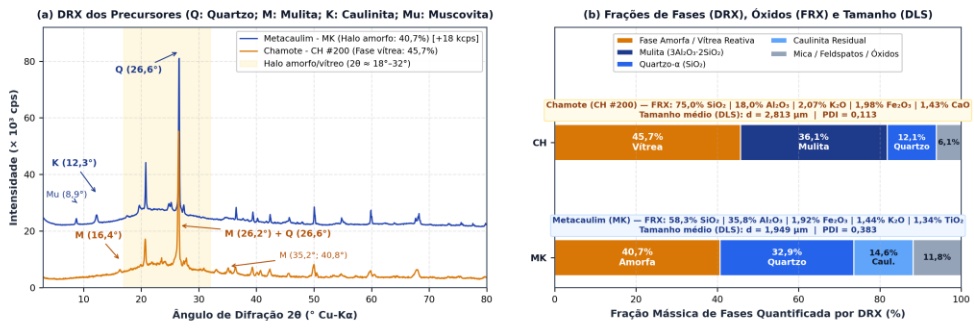


Figura 2. (a) Difratogramas de DRX do metacaulim (MK) e chamote (CH); (b) quantificação de fases (40,7% amorfa no MK; 45,7% fase vítrea e 36,1% mulita no CH), óxidos principais por FRX e tamanho médio por DLS.

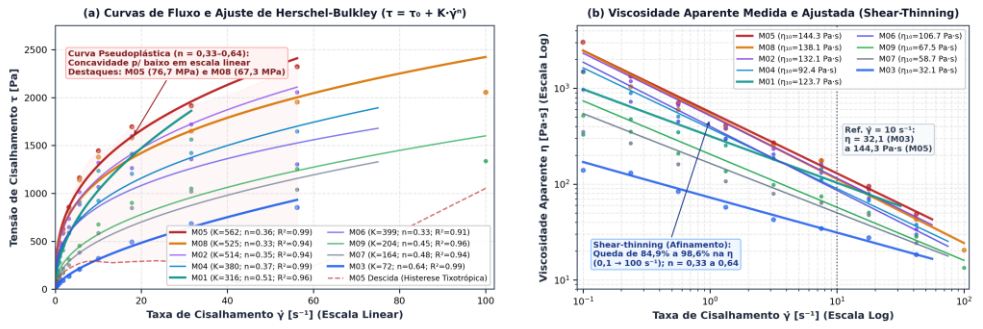


Figura 3. (a) Curvas de fluxo em escala linear evidenciando a concavidade pseudoplástica real do modelo de Herschel-Bulkley (n = 0,33–0,64) e histerese tixotrópica; (b) viscosidade aparente com queda de 84,9–98,6% (0,1 a 100 s^{-1}).

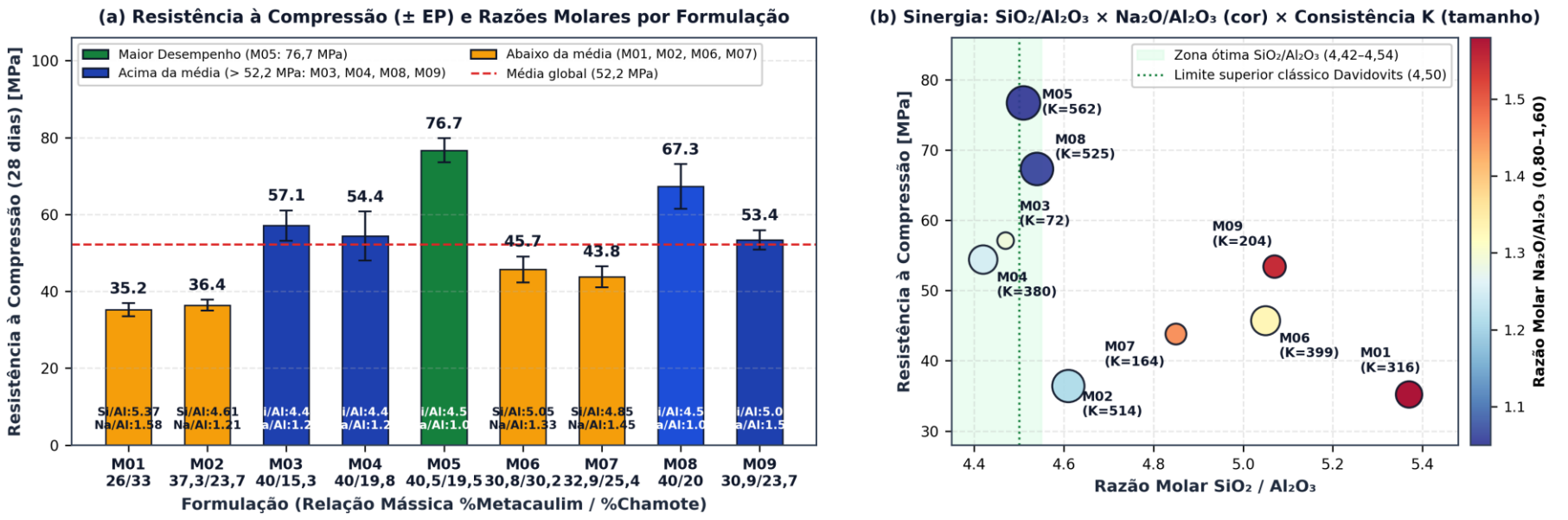


Figura 4. (a) Resistência à compressão aos 28 dias (± erro padrão) e razões molares por formulação; (b) correlação integrada entre SiO_2/Al_2O_3, Na_2O/Al_2O_3 (cor) e índice de consistência K (diâmetro), destacando os máximos desempenhos em M05 (76,7 MPa) e M08 (67,3 MPa).

Conclusões

• **Caracterização dos precursores (FRX, DRX e DLS):** O CH combina 74,99% SiO_2 e 45,7% de fase vítrea amorfa com fases cristalinas rígidas de mulita (36,1%) e quartzo (12,1%), além de granulometria monodispersa (2,81 µm; PDI 0,113) complementar ao MK fino polidisperso (1,95 µm; PDI 0,383; 40,7% amorfo).

• **Adequação reológica (pseudoplasticidade e tixotropia):** Todas as pastas são pseudoplásticas (n = 0,33–0,64) e tixotrópicas (queda de 84,9–98,6% na η), condição ideal para o processamento: o afinamento sob cisalhamento facilita a moldagem e a expulsão de ar aprisionado, enquanto a recuperação tixotrópica e a alta consistência (K = 525–562 Pa·s^n em M08 e M05) evitam a segregação das partículas no repouso.

• **Razões molares e resistência mecânica (28 dias):** A resistência variou de 35,2 MPa (M01) a 76,7 MPa (M05). Os melhores desempenhos (M05: 76,7 MPa; M08: 67,3 MPa) aliaram ~40% MK e ~20% CH, SiO_2/Al_2O_3 próximo ao limite superior clássico (4,51–4,54) e menores razões Na_2O/Al_2O_3 (1,05–1,06) e Na_2O/SiO_2 (0,23).

• **Hipótese sobre o papel do chamote:** Os resultados sugerem que, em teores de ~20%, o CH contribui favoravelmente, efeito possivelmente atribuído à reatividade parcial de sua fase vítrea (45,7%) aliada ao reforço físico por mulita/quartzo (48,2%); já o excesso de CH (25–33%) e NaOH (15%) eleva SiO_2/Al_2O_3 (4,85–5,37) e Na_2O/Al_2O_3 (1,45–1,58), reduzindo a resistência (35,2–43,8 MPa).

Referências e Agradecimentos

BAYER OZTURK, Z.; CIRIK, R.; ATABEY, İ. İ. Sustainable environment approach by the usage of ceramic pottery waste in geopolymer mortar. Int. J. Environ. Sci. Technol., v. 20, p. 7577–7588, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-023-04939-0.

CHENG, D. et al. Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. Nature Communications, v. 14, art. 8213, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x.

CONSTÂNCIO TRINDADE, A. C. et al. Optimizing the design parameters for chamotte particle-reinforced geopolymers. Journal of the American Ceramic Society, v. 107, n. 9, p. 6045–6059, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/jace.19909.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, v. 37, p. 1633–1656, 1991. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01912193.

REIG, L. et al. Influence of the activator concentration and calcium hydroxide addition on the properties of alkali-activated porcelain stoneware. Construction and Building Materials, v. 63, p. 214–222, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.023.

UNILA
LINDEN nanotechnology
ARAUCÁRIA AGÊNCIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DO PARANÁ