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

Avaliação Reológica de Pastas Cerâmicas a Base de Al_2O_3 e SiO_2 para Manufatura Aditiva via Direct Ink Writing (DIW)

Farias, T. W. B[1]; Camargo, I. L.[2]; Colombo, P.[3]; Luz, A. P[1]

[1] Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Rodovia Washington Luís (SP-310), Km 235, Sao Carlos, SP, Brasil.
[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Av. dos Três Poderes, Salto, SP, Brasil.
[3] Universidade de Pádua (UniPD), Departmento de Engenharia Indústrial (DII), Via Marzolo 9, Pádua, 35131, Itália.

Introdução

A Manufatura Aditiva via *Direct Ink Writing* (DIW ou *Robocasting*) é uma técnica de fabricação baseada na extrusão de pastas, que se destaca pelo baixo custo, pelo potencial de redução de desperdício e pela versatilidade quanto às matérias-primas utilizadas, desde que apresentem propriedades reológicas adequadas. No entanto, existem desafios a serem superados, como a estabilidade dimensional dos filamentos e a necessidade de controle rigoroso da reologia.

Este trabalho investigou o comportamento reológico de diferentes formulações à base do sistema Al_2O_3–SiO_2, utilizando caulim e sílica coloidal como fontes de SiO_2, com o objetivo de desenvolver pastas com propriedades reológicas adequadas ao processo *DIW* para a fabricação de componentes cerâmicos densos e estruturais à base de Al_2O_3–mulita.

Metodologia

Tabela 1. Materiais utilizados para a produção das pastas (*inks*).

Matérias-primas	Descrição	Fornecedor
Alumina	Al_2O_3, CT 3000SG, d_{50} = 0,6 µm	Almatis
Caulim	MCP 400, d_{50} = 6,8 µm	INCOMGEL Mineração
Sílica Coloidal	Levasil CS40-120, densidade relativa = 1,2–1,4 g/cm³	Nouryon
Dispersante	Dolapix CE64	Zschimmer & Schwarz
Ligante	Methocel A4M	Dow Chem.
Gelificante	Polietilenoimina, Mn ≈ 1800 g/mol e Mw ≈ 2000 g/mol	Sigma-Aldrich-Merck

Tabela 2. Formulações avaliadas no estudo.

Formulação	Matérias-primas (%)				
	Alumina	Caulim	Sílica Coloidal*	H_2O	Dispersante
AK	49,3	24,3	-	26,4	0,45
AKCS	57,9	12,5	14,2	15,3	0,45

*40%p de sólidos.

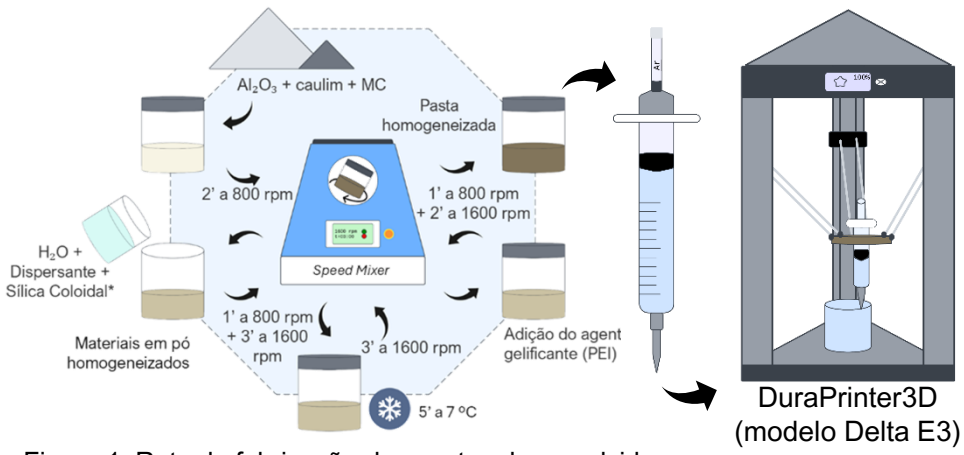


Figura 1. Rota de fabricação das pastas desenvolvidas.

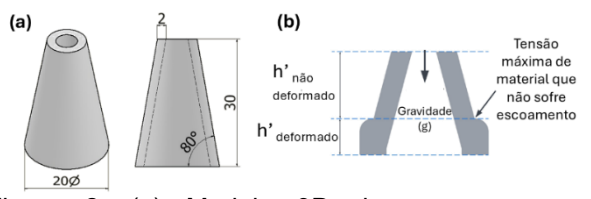
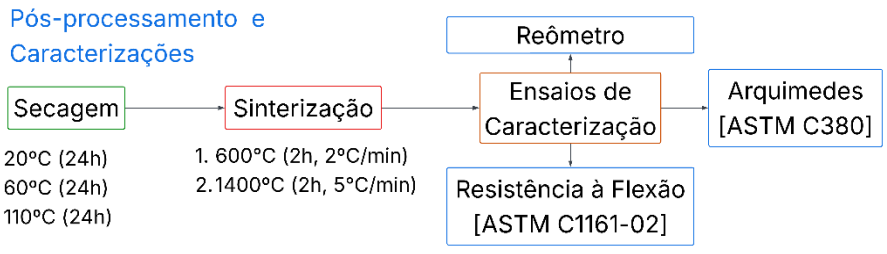


Figura 2. (a) Modelo 3D do cone com as dimensões (mm) e (b) esquematização do efeito da gravidade sobre a deformação de uma pasta com reduzida capacidade de autossustentação.

Parâmetros de Impressão

- Diâmetro do bico: 1,2 mm
- Velocidade de impressão: 36 mm/s;
- Altura da camada: 0,96 mm



Resultados e Discussão

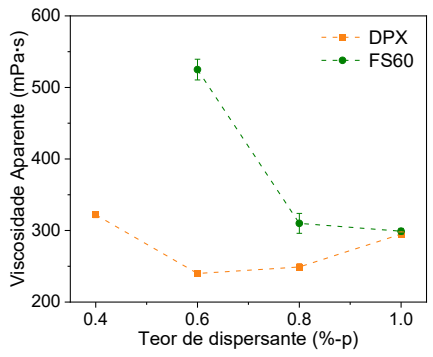
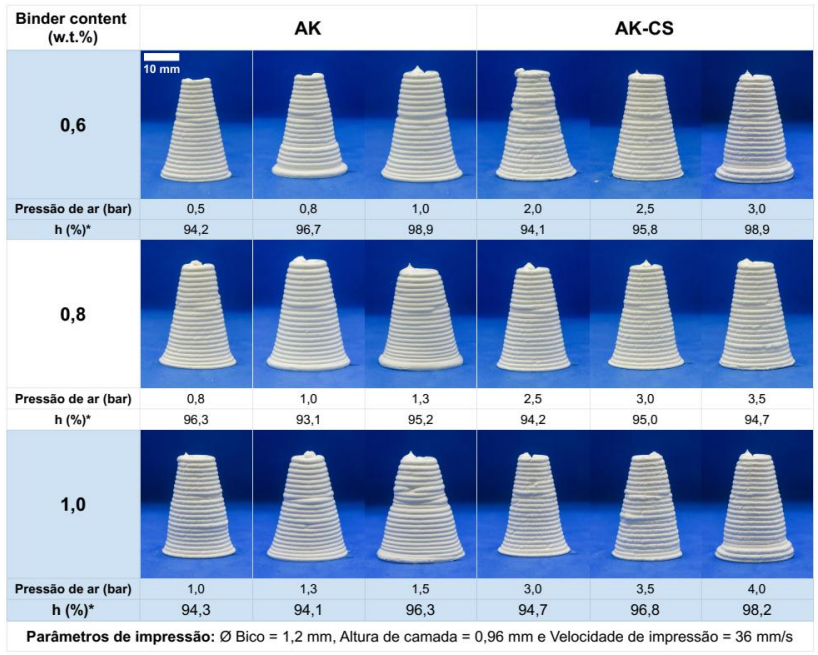


Figura 3. Viscosidade aparente *versus* teor de dispersante (0,4 – 1,0%-p) das suspensões cerâmicas (45%vol. de sólidos, Al_2O_3 + caulim + H_2O) produzidas com os dispersantes os Dolapix® CE64 (DPX) e Castment® FS60 (FS60), medidas a uma taxa de 30 s^{-1}.



*h = % de altura do cone em relação a altura projetada.

Figura 4. Influência do teor de metilcelulose (MC, 0,6 – 1,0 %peso) e da pressão de extrusão na capacidade de impressão de cones padronizados impressos sem sílica coloidal (AK) e com sílica coloidal (AK-CS).

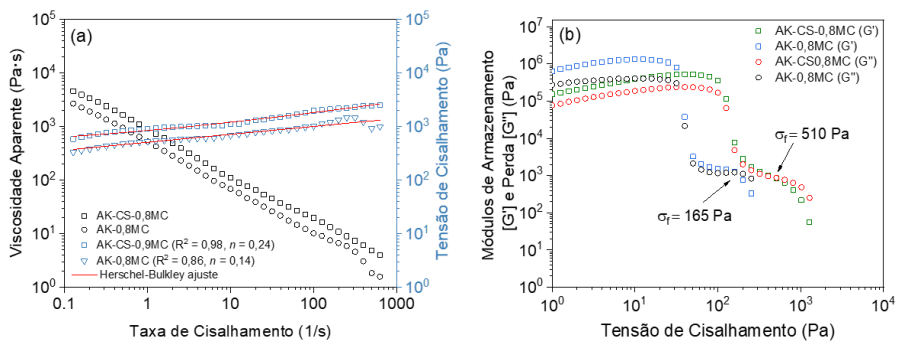


Figura 5. (a) Viscosidade e tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento; (b) Módulos de armazenamento (G') e módulo de perda (G'') em fundação da tensão de cisalhamento. σ_f = Tensão de fluxo.

Tabela 3. Propriedades dos espécimes* sinterizados: Variação Volumétrica Dimensiona (VVD); Porosidade Aparente (Pa); Densidade Aparente (Da) e Tensão de Ruptura a Flexão (TRF).

Formulação	VVD (%)	Pa (%)	Da (g/cm³)	TRF (MPa)
AK-0,8MC	-23,40 ± 2,22	23,61 ± 3,85	2,40 ± 0,37	45,3 ± 15,3
AKCS-0,8MC	-28,89 ± 1,91	18,97 ± 0,33	2,53 ± 0,02	47,6 ± 4,4

*Barras com dimensões 56 x 3,75 x 5 mm³

Conclusões

- Dispersante: Dolapix (0,6%p);
- Modificador reológico: 0,8%p de metilcelulose + 0,05%p de PEI – concentrações ideais. A adição de sílica coloidal promoveu aumento da viscosidade;
- Comportamento reológico: ambas as composições apresentaram comportamento pseudoplástico (n<1) e exigiram baixas pressões de extrusão (0,8 – 3,5 bar);
- Adição de CS: favoreceu a densificação dos espécimes sinterizados a 1400 °C, resultando em menor porosidade aparente (18,97 ± 0,33%), maior densidade aparente (2,53 ± 0,02 g/cm³) e resistência à flexão de 47,6 ± 4,4 MPa, além de menor dispersão dos resultados, sugerindo maior homogeneidade microestrutural.