



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Rio Grande do Sul

Manufatura Aditiva Livre de Solventes e Ligantes de Cerâmicas Derivadas de Polímeros: Otimização Reológica e Desempenho Estrutural

Revisão do Artigo: Viswanadha et al., *Additive Manufacturing*, 2025

Acad. Bruno Kenji Nishitani Egami
Orientador: Profº Dr. Douglas A. Simon

Manufatura Aditiva - PPGTEM 2025/02
IFRS Campus Farroupilha

20 de novembro de 2025

Roteiro da Apresentação

Inovação: A Formulação Binder-Free

Reologia e Estabilidade da Tinta

Desempenho Térmico e Mecânico

Conclusão

Referências

O Desafio da Manufatura Aditiva de Cerâmicas

- As Cerâmicas de Carbetto de Silício (SiC) são críticas para aplicações aeroespaciais devido à alta resistência e resiliência térmica.
- O processo DIW (Direct Ink Writing) é promissor, mas a maioria das tintas depende de:
 - **Ligantes (Binders):** Exigem *de-binding* térmico, causando retração irregular e rachaduras.
 - **Solventes:** Voláteis, introduzem toxicidade, e sua evaporação induz instabilidades estruturais (empenamento, microfissuras e poros).

Inovação Central do Artigo

- **Abordagem Livre de Solventes e Ligantes (*Solvent- and Binder-free*)** [2, 5].
- **Material Chave:** Utilização do **polycarbosilano SMP-10** [5].
 - O SMP-10 atua como o **precursor cerâmico** e a **fase líquida** para ligar as nanopartículas de β -SiC [2, 5].
 - Simplifica o pós-processamento, minimizando defeitos estruturais [4, 5].

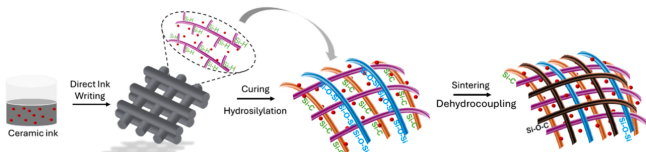


Figura: Esquema do processo DIW livre de ligantes e solventes.

Otimização Reológica para o DIW

- A tinta ideal deve ser ***shear-thinning*** para extrusão suave [6].
- Deve ter elasticidade suficiente para **reter a forma** após a deposição [6, 7].

extbfCritério de Printabilidade
(Ponto de Gel):

- O critério crucial é o **Ponto de Gel** ($G' = G''$) ser **superior a 1000 Pa** [8, 9].
- **Resultado:** A tinta com **60 wt% SiC** mostrou excelente retenção, superando o limite [9, 10].

extbfModelos Teóricos: Delimitam

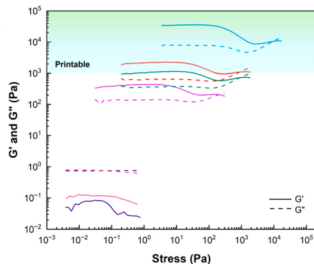


Figura: Curvas de Módulo de Armazenamento (G') e Módulo de Perda (G'') em função do *stress* (Ponto de Gel).

Limites de Estabilidade Estrutural (h_{max})

- O artigo investigou a **Altura Máxima Imprimível (h_{max})** [11, 12].
- **Suporte Lateral (d_w):** Maior espaçamento levou a h_{max} reduzida (≈ 7 mm). O espaçamento reduzido é crucial para estruturas mais altas [14, 15].
- **Largura da Camada Base (l_w):** Camadas base mais largas aumentaram a h_{max} (≈ 20 mm) [2, 16].

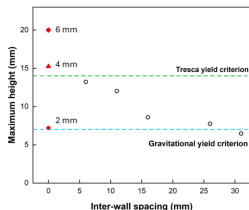


Figura: Imagens das estruturas impressas (SEM) e gráfico da altura máxima (h_{max}) versus espaçamento de parede (d_w).

Transformação de Fase e Retração

■ Pós-Processamento:

Sinterizadas a 1500°C e 2300°C [20].

■ Fases (XRD): β -SiC

predominante a 1500°C.

Transformação para α -SiC a 2300°C [21].

■ Retração: A 2300°C, a retração é maior e **anisotrópica**, com alta retração fora do plano ($\approx 17\%$) [15, 22].

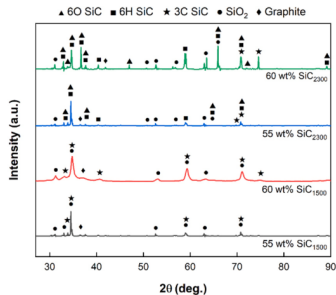


Figura: Padrões de Difração de Raios X (XRD) comparando as fases a 1500°C e 2300°C.

Propriedades Mecânicas e Térmicas

■ Resistência Mecânica (Compressão):

- Amostras sinterizadas a 1500°C mostraram maior resistência (média 9.62 MPa) em comparação com 2300°C .
- A maior retração a 2300°C explica parte da perda de resistência.

■ Isolamento Térmico:

Microestrutura mais porosa a 1500°C melhora o isolamento térmico.

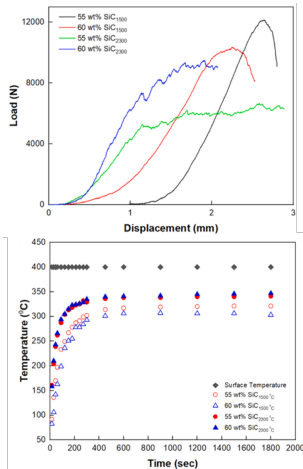


Figura: Comparação da resistência à compressão e do desempenho de isolamento térmico.

Conclusões Chave

- O método **DIW livre de solventes e ligantes** é uma abordagem conveniente e eficiente para cerâmicas avançadas [2, 15].
- A **reologia** é o fator limitante. A printabilidade ideal requer um **Ponto de Gel** $> 1000 \text{ Pa}$ [8, 25].
- A **estabilidade estrutural** é altamente dependente da geometria [2, 15, 26].
- **Resultado Surpreendente:** O tratamento térmico a 1500°C forneceu **melhores propriedades mecânicas e isolamento térmico** do que a 2300°C [23, 24].

Relevância e Perspectivas Futuras

- Este trabalho fornece a fundação para equilibrar printabilidade, isolamento térmico e desempenho mecânico [15].
- O uso do DIW com formulações livres de solventes aprimora o controle sobre a evolução microestrutural [2, 15].

Referências

- VISWANADHA, P. et al. Solvent- and binder-free additive manufacturing of polymer-derived ceramics: Rheological optimization and structural performance. *Additive Manufacturing*, v. 84, p. 104278, 2025.

Obrigado.