

# Estudo reológico de suspensões de caulim e validação de um reômetro capilar de baixo custo

Bruno Kenji Nishitani Egami<sup>1</sup>, Prof. Dr. André Zimmer<sup>2</sup>, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Lupinacci Villanova<sup>1\*</sup>

\*Orientadora

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) - Campus Farroupilha

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) - Campus Feliz

---

**Palavras-chave:** Reologia, Suspensões Cerâmicas, Reômetro Capilar.

## 1 INTRODUÇÃO

A ciência e engenharia de materiais estabelecem que as propriedades de um material são uma consequência de sua estrutura e de como ele é processado. Nos materiais cerâmicos, essa relação é particularmente importante. O sucesso de processos de fabricação via úmida, como colagem, extrusão e atomização, depende diretamente do controle das propriedades de fluxo da suspensão, o que constitui o campo de estudo da reologia. A reologia surge, portanto, como uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de suspensões que sejam, ao mesmo tempo, concentradas e fluidas, um requisito para obter produtos finais densos e com boa resistência mecânica [Reed \(1995\)](#).

Recentemente, a manufatura aditiva (AM), ou impressão 3D, tem emergido como uma tecnologia versátil para a fabricação de cerâmicas. Dentre as técnicas de AM, destaca-se a *Direct Ink Writing* (DIW), também conhecida como *Robocasting*, que consiste na extrusão de pastas viscosas camada por camada para construir um objeto tridimensional [Witte \(2022\)](#). Este método se caracteriza pelo uso de pastas com alta concentração de sólidos e comportamento pseudoplástico, permitindo a consolidação das camadas depositadas [Shahzad e Lazoglu \(2021\)](#). A impressão 3D cerâmica oferece elevada liberdade geométrica, possibilitando a criação de estruturas complexas que seriam inviáveis por métodos tradicionais [Oliveira e Santos \(2024\)](#).

O sucesso da impressão 3D por DIW depende de um controle reológico rigoroso. Conforme destacado por [Pires et al. \(2023\)](#), as pastas devem atender a requisitos específicos, como comportamento pseudoplástico que permita o escoamento pelo bico e rápida recuperação da viscosidade para suportar as camadas subsequentes sem deformar (*buildability*). Nesse contexto, a caracterização reológica precisa do material base é um passo fundamental.

Este estudo, desenvolvido no âmbito do Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais do IFRS, aborda um problema de pesquisa central: a caracterização reológica precisa, fundamental para o avanço de tecnologias como a impressão 3D cerâmica, frequentemente depende de equipamentos comerciais de alto custo, o que limita o acesso à pesquisa e ao desenvolvimento de novos materiais. Para enfrentar essa barreira, o trabalho estabelece um duplo objetivo: primeiramente, caracterizar o comportamento de suspensões de caulim-água, servindo como uma base de conhecimento; e, em paralelo, desenvolver e validar um reômetro capilar de baixo custo como uma ferramenta alternativa e acessível para essa análise, posicionando-se como uma etapa fundamental para futuras aplicações em manufatura aditiva.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 2.1.1 Materiais e Preparação das Amostras

O caulim industrial utilizado nos ensaios foi adquirido da empresa BRX Minérios (São Caetano do Sul/SP). As suspensões foram preparadas inserindo-se as massas pré-determinadas de caulim e água destilada em um saco plástico. A mistura foi então homogeneizada por agitação manual até a obtenção de uma pasta uniforme. Este método também facilitou a alimentação dos reômetros, cortando-se uma extremidade do saco para transferir a pasta. As concentrações de caulim e água, em percentuais de massa, são detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulações das suspensões de caulim analisadas.

Amostra	% de Caulim (Sólidos)	% de Água
A	75,0%	25,0%
B	70,0%	30,0%
C	67,5%	32,5%
D	65,0%	35,0%
E	62,5%	37,5%
F	60,0%	40,0%

Amostras com teor de sólidos superior a 67,5% (A e B) foram descartadas por apresentarem baixa plasticidade, resultando em uma massa seca e sem coesão ("farofa"), inviável para os ensaios.

#### 2.1.2 Equipamentos de Análise Reológica

Foram utilizados dois equipamentos para a caracterização reológica das suspensões Figura 1. Um reômetro Anton Paar, modelo MCR 102, com geometria de pratos paralelos (25 mm de diâmetro) foi utilizado como equipamento de referência e serviu de base para comparação com o reômetro capilar de baixo custo desenvolvido.

### 2.2 DESENVOLVIMENTO DO REÔMETRO CAPILAR DE BAIXO CUSTO

O reômetro capilar de baixo custo foi desenvolvido com foco em replicabilidade e precisão para operar em taxas de cisalhamento mais elevadas. Sua estrutura principal utiliza um corpo de PVC, pistão e capilares fabricados por impressão 3D. O sistema de medição de pressão é composto por uma célula de carga customizada (com *strain gauges* e um módulo amplificador HX711), gerenciada por um microcontrolador Arduino. O controle do ensaio e a análise de dados são automatizados por um conjunto de scripts em Python, que gerenciam a aquisição de dados, realizam a calibração do sensor, calculam os parâmetros reológicos com as devidas correções, ajustam os dados a modelos matemáticos e geram relatórios e gráficos comparativos. O esquema de funcionamento do sistema está ilustrado na Figura 2.

A documentação completa do projeto, incluindo diagramas, códigos e modelos 3D, está disponível em [Egami \(2025\)](#).



(a) Reômetro rotacional comercial.



(b) Reômetro capilar de baixo custo.

Figura 1 – Equipamentos utilizados para a análise reológica.

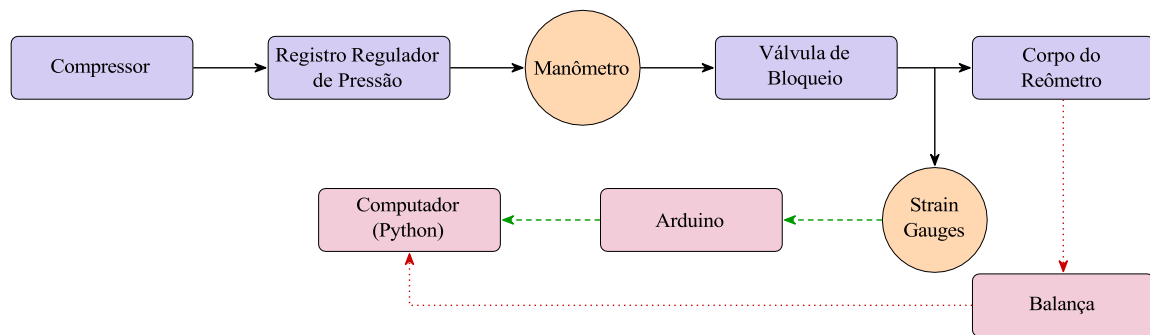


Figura 2 – Esquema de funcionamento do reômetro capilar, mostrando a linha pneumática (sólida), a linha de aquisição de dados automática (tracejada) e as linhas de coleta e entrada de dados manual (pontilhada).

### 2.2.1 Cálculos Reológicos do Reômetro Capilar

A análise reológica busca descrever a relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) e a viscosidade ( $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ ). Em um reômetro capilar, estes parâmetros são obtidos indiretamente a partir de grandezas experimentais: a pressão de extrusão ( $P$ ), a massa de material extrudado ( $m$ ) em um determinado tempo ( $t$ ), e as dimensões do capilar (raio  $R$  e comprimento  $L$ ).

O primeiro parâmetro, a **tensão de cisalhamento na parede** ( $\tau_w$ ), é derivado de um balanço de forças no escoamento dentro do capilar, onde a força gerada pela pressão é equilibrada pela força de atrito viscoso na parede, conforme a equação de [Barnes, Hutton e Walters \(1989\)](#):

$$\tau_w = \frac{P \cdot R}{2 \cdot L} \quad (1)$$

O segundo parâmetro é a **taxa de cisalhamento aparente na parede** ( $\dot{\gamma}_{aw}$ ), calculada a partir da vazão volumétrica ( $Q$ ). O termo *aparente* é utilizado porque sua derivação pressupõe um perfil de velocidade parabólico, que é estritamente válido apenas para fluidos Newtonianos [Reed \(1995\)](#):

$$\dot{\gamma}_{aw} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \quad (2)$$

Como as suspensões cerâmicas são fluidos não-Newtonianos (pseudoplásticos), seu perfil de velocidade é mais achatado, resultando em uma taxa de cisalhamento real na parede superior à aparente. Para corrigir essa distorção, aplica-se a **correção de Weissenberg-Rabinowitsch**, que converte o valor aparente ( $\dot{\gamma}_{aw}$ ) no valor verdadeiro ( $\dot{\gamma}_w$ ), conforme a equação de [Barnes, Hutton e Walters \(1989\)](#):

$$\dot{\gamma}_w = \frac{\dot{\gamma}_{aw}}{4} \left( 3 + \frac{d(\ln \dot{\gamma}_{aw})}{d(\ln \tau_w)} \right) \quad (3)$$

O termo diferencial na equação representa o inverso da inclinação da curva de fluxo em um gráfico log-log e é calculado numericamente a partir dos dados experimentais. Outras correções, como a de Bagley (perdas de pressão na entrada) e Mooney (deslizamento na parede), embora relevantes [Barnes, Hutton e Walters \(1989\)](#) e previstas no modelamento dos scripts, não foram aplicadas no escopo deste trabalho.

## 2.2.2 Procedimento Experimental

Os ensaios no reômetro capilar foram realizados utilizando-se um capilar com 2 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Foram analisadas as amostras com 35%, 37,5% e 40% de água (correspondentes às Amostras D, E e F, com 65%, 62,5% e 60% de sólidos, respectivamente). Não foi possível realizar o ensaio nas amostras com teor de água inferiores a 35% (Amostras C, B e A) em razão da limitação de pressão do conjunto bem como da baixa plasticidade das formulações. A alta concentração de sólidos dessas amostras demanda uma tensão de cisalhamento para o escoamento mais elevada do que o equipamento consegue desenvolver.

Para este estudo, a correção de Weissenberg-Rabinowitsch foi aplicada para converter a taxa de cisalhamento aparente em seu valor verdadeiro, garantindo maior precisão na análise do comportamento do fluido. No entanto, as correções de **Bagley** e **Mooney** não foram realizadas, sendo esta uma simplificação adotada para o escopo deste trabalho. A ausência das correções pode introduzir um desvio nos valores absolutos de tensão e viscosidade, mas não invalida a comparação das tendências de comportamento entre os equipamentos.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados comparativos dos ensaios reológicos são apresentados na Figura 3.

A análise dos gráficos revela pontos relevantes. Primeiramente, para todas as amostras e em ambos os equipamentos, observa-se um comportamento não-newtoniano do tipo pseudoplástico (*shear-thinning*), onde a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Este é o comportamento característico para suspensões de caulim, conforme documentado na literatura [Wang, Zentar e Wang \(2019\)](#), [Castro \(2016\)](#), [Araújo, França e Barbato \(2008\)](#).

O principal resultado da análise é a validação do reômetro capilar. Ao comparar os dados da amostra de 60% de caulim (Amostra F) obtidos no MCR102 (círculos roxos) e no reômetro capilar (losangos amarelos), nota-se uma boa concordância na faixa de sobreposição das taxas de cisalhamento. As curvas de fluxo e de viscosidade de ambos os equipamentos apresentam grande proximidade, o que confere confiabilidade aos dados gerados pelo dispositivo de baixo custo, especialmente em taxas de cisalhamento mais altas (acima de  $100 \text{ s}^{-1}$ ), onde reômetros capilares são tipicamente mais eficazes.

A Tabela 2 resume os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley, ajustados a partir dos dados obtidos com o reômetro de baixo custo para as três concentrações analisadas.

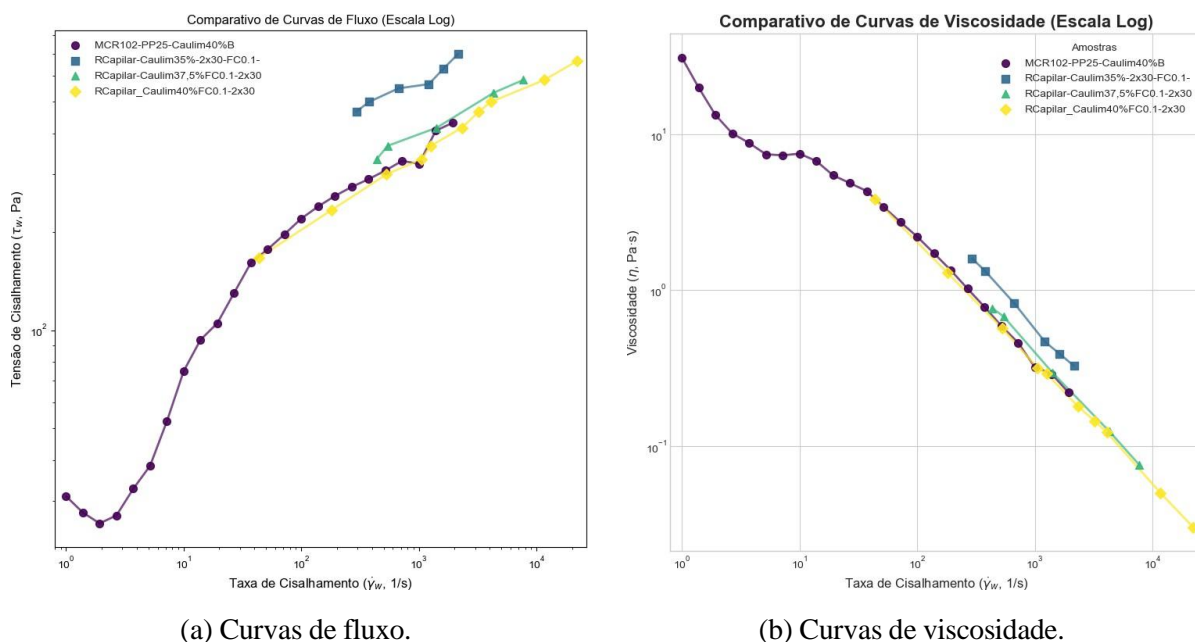


Figura 3 – Resultados reológicos comparativos obtidos no reômetro comercial (MCR102) e no reômetro capilar de baixo custo. Em (a), as curvas de Tensão de Cisalhamento vs. Taxa de Cisalhamento. Em (b), as curvas de viscosidade aparente vs. Taxa de Cisalhamento.

Tabela 2 – Parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley para as amostras analisadas no reômetro capilar de baixo custo.

Amostra	% Sólidos	$\tau_0$ (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)
F	60,0%	≈ 0	77,58	0,22
E	62,5%	6,31	103,90	0,19
D	65,0%	451,35	0,09	1,02

Os parâmetros da Tabela 2 quantificam o efeito da concentração de sólidos. O aumento expressivo da tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), de quase zero para mais de 450 Pa com o aumento de 5% nos sólidos, justifica a impossibilidade de ensaiar as amostras mais concentradas, cuja resistência inicial ao fluxo excedeu a capacidade do equipamento. O índice de comportamento ( $n < 1$ ) confirma o caráter pseudoplástico das suspensões, e o aumento geral da consistência está em acordo com a literatura [Barbato et al. \(2008\)](#).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho validou um reômetro capilar de baixo custo para a análise de suspensões cerâmicas, demonstrando boa concordância com um equipamento comercial de referência. As suspensões de caulim exibiram o esperado comportamento pseudoplástico, com a consistência aumentando acentuadamente com a concentração de sólidos, o que foi corroborado tanto pelos resultados quanto pelos limites operacionais do equipamento desenvolvido. A metodologia estabelecida demonstra a viabilidade de utilizar ferramentas acessíveis para pesquisa de materiais e serve como base para futuros trabalhos na otimização de pastas cerâmicas para manufatura aditiva.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. S.; FRANÇA, S. C. A.; BARBATO, C. N. Estudo reológico de polpas de caulim da região borborema-seridó. In: **XVI Jornada de Iniciação Científica - CETEM**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 43–49. Disponível em: <<http://bit.ly/3JKDf2z>>. Acesso em: 03 set. 2025.
- BARBATO, C. N. et al. Studies of kaolin rheology. In: **IX Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales**. San Juan, Argentina: [s.n.], 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/464ciOK>>. Acesso em: 03 set. 2025.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87469-6.50001-9>>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- CASTRO, C. **Propriedades reológicas de misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- EGAMI, B. K. N. **Desenvolvimento de um Reômetro Capilar de baixo custo**. [S.l.]: GitHub, 2025. <[https://github.com/bruno-egami/Reometro\\_Capilar](https://github.com/bruno-egami/Reometro_Capilar)>.
- OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, T. G. Demystifying “absolute truths” of additive manufacturing. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 54, p. 57–62, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.07.008>>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- PIRES, L. S. O. et al. Controlling properties of ceramic formulations for porcelain robocasting. **Ceramics International**, v. 49, p. 4764–4774, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.366>>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- SHAHZAD, A.; LAZOGLU, I. Direct ink writing (diw) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 225, p. 109249, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109249>>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- WANG, H.; ZENTAR, R.; WANG, D. Rheological characterisation of kaolinite clay: experimental study. **AJCE**, v. 37, n. 1, p. 184–190, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.26168/ajce.37.1.40>>. Acesso em: 14 jul. 2025.
- WITTE, D. D. **Clay Printing**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-658-37161-6>>. Acesso em: 14 jul. 2025.