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

Avaliação de Lubrificantes Aquosos à Base de Grafeno em Ensaios de Compressão de Anel a Morno: Um Estudo Comparativo sobre a Redução do Fator de Atrito

Santi, S.; Kley, F. O.; Dalla Nora, J. V.; Franco, M. S.; Nunes, R. M.; Rocha, A. da S.; Ivaniski, T. M.
Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Contato: thiago.ivaniski@ufrgs.br

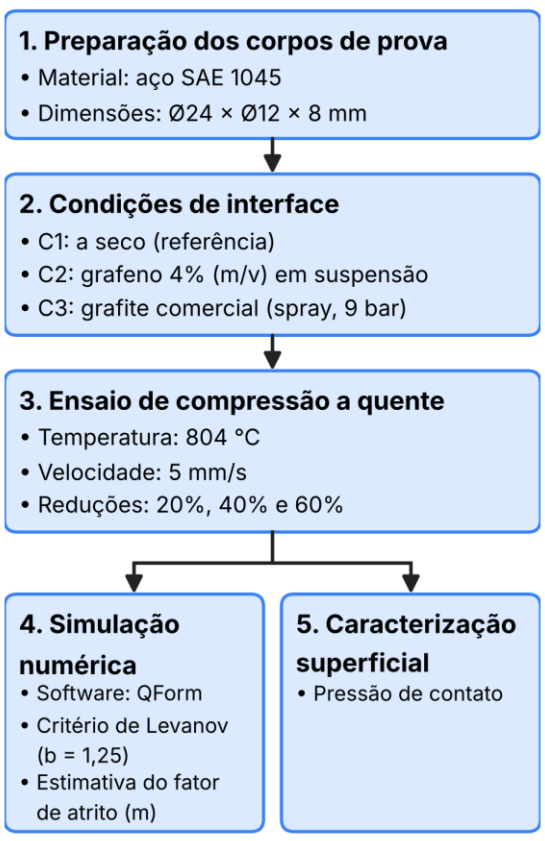
Introdução

O atrito na conformação a morno afeta o escoamento e o acabamento. Suspensões aquosas de grafeno são alternativas ao grafite [1]. O ensaio do anel, calibrado numericamente, permite comparar a lubrificação para um material e uma temperatura específicos [2, 3].

Objetivos

Avaliar o efeito de diferentes condições de interface (a seco, suspensão de grafeno e lubrificante industrial/grafite) sobre o fator de atrito cisalhante, o escoamento lateral e a pressão máxima de contato no forjamento a morno de anéis de aço SAE 1045 a 804 °C, correlacionando o comportamento tribológico com os regimes de deformação.

Metodologia



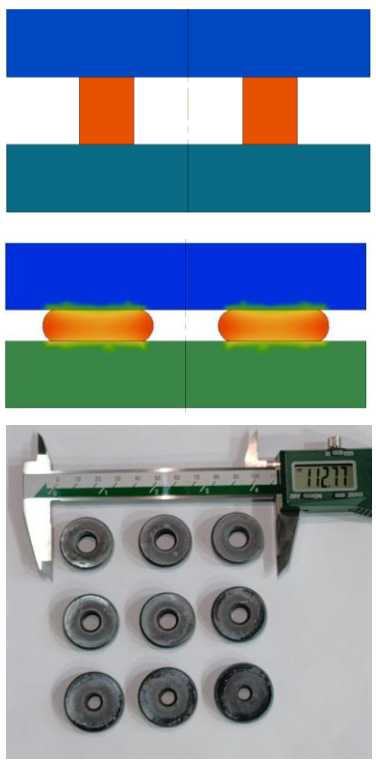


Figura 2. Modelo anel MEF e anéis forjados.

Figura 1. Diagrama metodológico

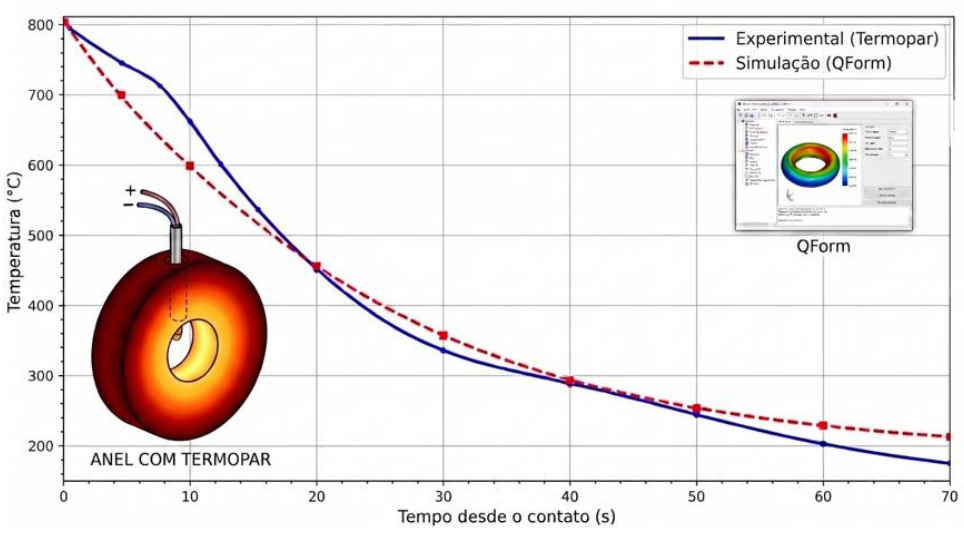


Figura 3. Calibração térmica do modelo numérico.

Resultados e Discussão

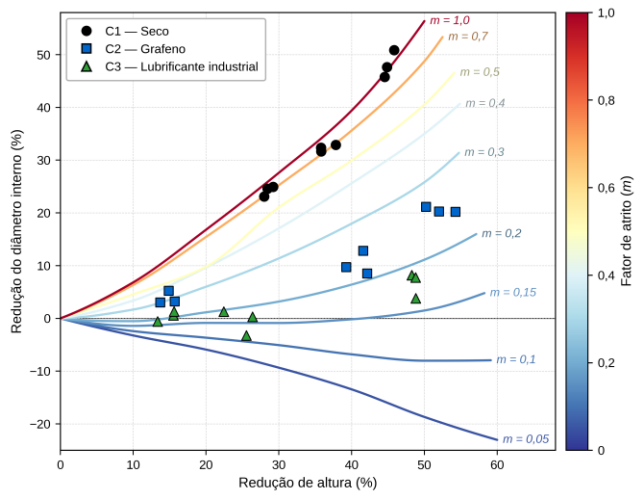


Figura 2. Nomograma do SAE 1045 a 804 °C. Pontos: ensaios. Curvas: QForm/Levanov. C3: grafite comercial.

Conforme a **Figura 4**, as condições de menor atrito (**lubrificante industrial** C3, $m \approx 0{,}182$, e **grafeno em suspensão aquosa** C2, $m \approx 0{,}264$) suprimem a restrição ao escoamento, gerando menores reduções do diâmetro interno frente à condição a **seco** (C1, $m = 0{,}750$), alinhada a $m \geq 0{,}7$.

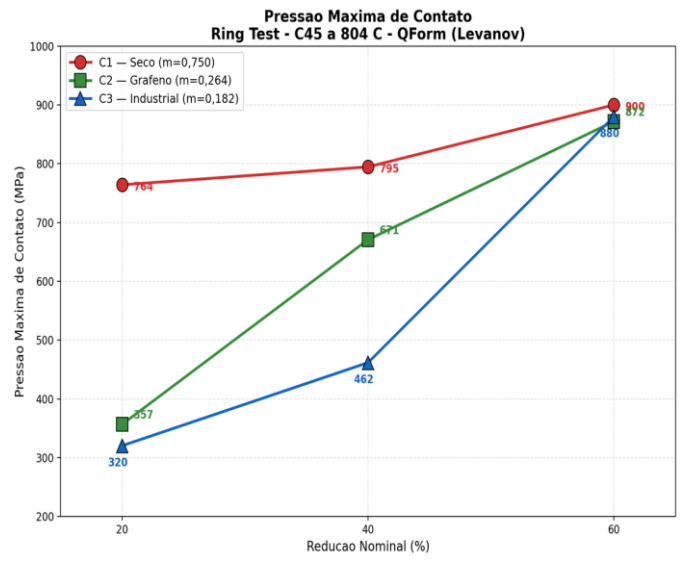


Figura 3. Pressão máxima de contato em diferentes níveis de redução nominal de altura na simulação numérica.

Conforme a **Figura 5**, a redução do atrito diminui expressivamente a pressão de contato em deformações moderadas (20% e 40%), mas as curvas convergem em altas reduções (60%) devido ao encruamento, evidenciando a eficácia de lubrificantes avançados em regimes moderados.

Conclusões

Eficiência Tribológica: Lubrificantes avançados (grafeno e industrial) reduzem expressivamente a restrição ao escoamento e as pressões interfaciais face à condição a seco.

Efeito da Deformação: Em deformações moderadas (20% e 40%), o atrito dita a pressão de contato (ex: queda de 795 para 462 MPa), mas em altas reduções (60%) a restrição geométrica domina, convergindo as curvas para ≈ 870–900 MPa.

Referências e agradecimentos

[1] RESTUCCIA, P.; RIGHI, M. Tribochemistry of graphene on iron and its possible role in lubrication of steel. Carbon, v. 106, p. 118–124, 2016.
[2] RAO, K. P.; SIVARAM, K. R. S. A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves. Journal of Materials Processing Technology, v. 37, p. 295–318, 1993.
[3] SOFUOĞLU, H.; RASTY, J. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. Tribology International, v. 32, n. 6, p. 327–335, 1999.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) – Edital 10/2024, processo nº 25/2551-0000945-6.