Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

COMPÓSITOS PIEZOELÉTRICOS PVDF-PZT: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO E DA TEMPERATURA NA RESPOSTA ELÉTRICA PARA POTENCIAIS APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO INDUSTRIAL

Steckel, L.[1]; Bergmann, C. P.[2]; Alves, A. K.[3]. [1]Bolsista do PRH 13/UFRGS, curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGE3M), Porto Alegre – RS. E-mail: leticia.steckel@ufrgs.br [2]Docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. E-mail: bergmann@ufrgs.br [3]Docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. E-mail: annelise.alves@ufrgs.br

1. MOTIVAÇÃO

- Equipamentos e tubulações do setor de petróleo, gás natural, biocombustíveis e energia estão sujeitos a vibrações e deformações, tornando o monitoramento relevante para a confiabilidade operacional e a manutenção baseada em condição.
- Materiais piezoelétricos convertem solicitações mecânicas em sinais elétricos, enquanto compósitos PVDF–PZT combinam a flexibilidade da matriz polimérica com a elevada resposta piezoelétrica da fase cerâmica [1–3].
- Entretanto, seu desempenho depende da composição, organização das fases e condições de operação, incluindo a temperatura. Compreender essas relações é fundamental para selecionar materiais para futuros sensores industriais [2,3].

CONFIABILIDADE OPERACIONAL

PREVENÇÃO DE FALHAS

MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO

SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA



2. OBJETIVOS

- Desenvolver compósitos PVDF–PZT contendo 5, 10, 25 e 50 vol.% de PZT;
- Correlacionar composição, estrutura, morfologia e resposta elétrica;
- Avaliar a influência da temperatura na resposta de polarização;
- Estabelecer relações entre composição, organização das fases, resposta elétrica e temperatura como critérios de seleção de materiais para futuros sensores de monitoramento industrial.

3. APLICAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E ENERGIA

A aplicação potencial dos materiais estudados está no desenvolvimento de elementos sensores de vibração e deformação para equipamentos e tubulações utilizados na produção, no transporte e no processamento de petróleo, gás natural e biocombustíveis [3].





Bombas



Compressores



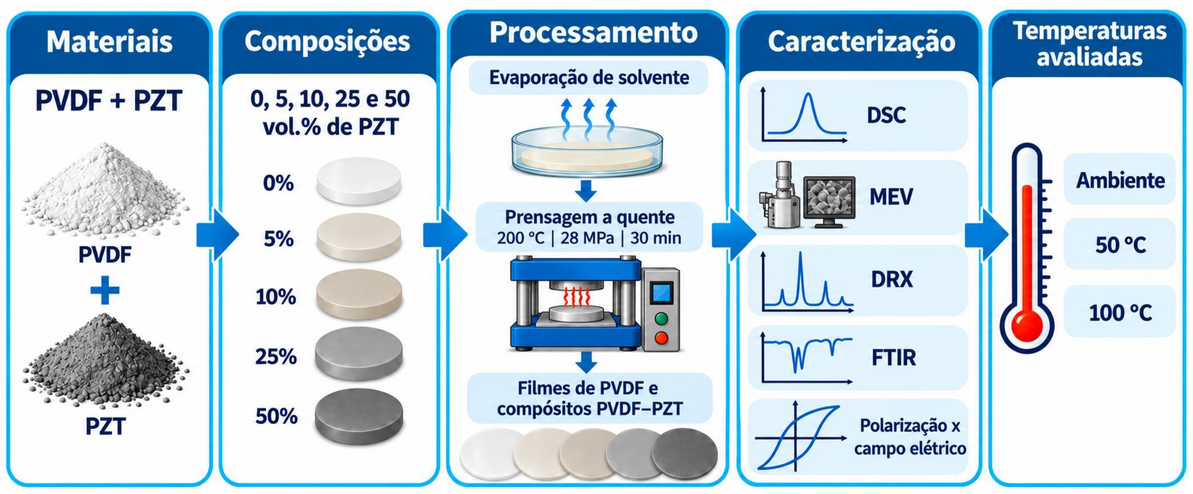
Tubulações

GANHOS POTENCIAIS PARA O SETOR

- ✓ redução de paradas não programadas;
- ✓ potencial redução de custos de manutenção;
- ✓ prolongamento da vida útil dos equipamentos;
- ✓ apoio à prevenção de falhas e vazamentos;
- ✓ redução de desperdícios energéticos e materiais.



4. MATERIAIS E MÉTODOS



5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Morfologia e estrutura

PVDF: matriz polimérica
5-PZT: domínios predominantemente isolados
25-PZT: condição intermediária
50-PZT: agrupamentos mais extensos
O DRX confirmou a manutenção da estrutura perovskita do PZT.

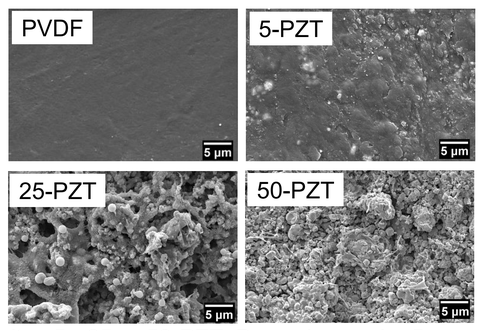


Figura 1. MEV do PVDF e dos compósitos 5-, 25- e 50-PZT. Barra de escala: 5 µm.

5.2 Fração eletroativa

A prensagem a quente elevou a fração eletroativa relativa do PVDF [4]: **42,3% → 70,9%**
Maior valor para compósitos: **10-PZT → 80,1%**

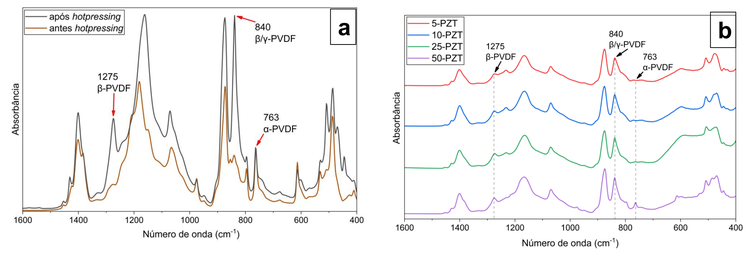


Figura 2. FTIR: (a) PVDF antes/depois da prensagem; (b) compósitos PVDF–PZT.

5.3 Resposta elétrica × composição

Nos ciclos bipolares a 1 Hz e ±10 kV/mm, o aumento de 25 para 50 vol.% de PZT resultou em:
25 → 50 vol.% PZT
P_{max}: **0,603 → 0,844 µC/cm²**
P_r: **0,450 → 0,346 µC/cm²**

RESULTADO-CHAVE: 25-PZT apresentou a maior polarização remanente entre as composições avaliadas, mesmo contendo metade da fração cerâmica de 50-PZT.

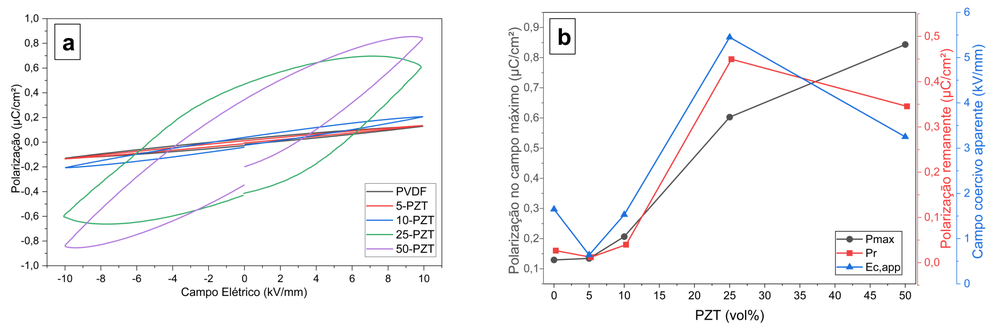


Figura 3. (a) Ciclos P–E a 1 Hz e ±10 Kv/mm; (b) P_{max}, P_r e $E_{c,app}$ em função do teor de PZT.

5.4 Efeito da temperatura

O aquecimento intensificou a resposta elétrica de 25-PZT, especialmente a 100 °C, sem implicar necessariamente maior desempenho piezoelétrico.

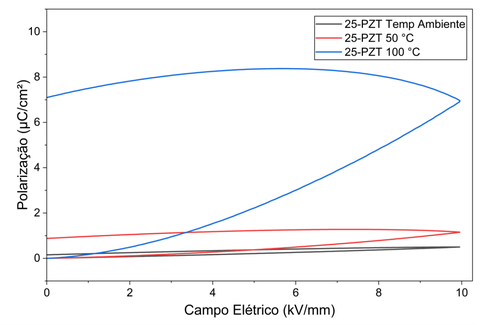


Figura 4. Curvas unipolares de 25-PZT em temperatura ambiente, 50 e 100 °C (1 Hz; 10 kV mm⁻¹).

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- O aumento do teor de PZT alterou a organização da fase cerâmica e a resposta elétrica dos compósitos.
- Os máximos de fração eletroativa, P_r e P_{max} ocorreram em composições distintas, evidenciando que uma única composição não maximiza simultaneamente todas as respostas.
- 25-PZT apresentou a maior P_r nas condições avaliadas, mesmo contendo metade da fração cerâmica de 50-PZT.
- A temperatura modificou significativamente a resposta elétrica de 25-PZT e deve ser considerada na seleção do material.
- Perspectiva: avaliar as composições selecionadas em elementos sensores sob solicitações mecânicas e condições térmicas representativas da aplicação.

A seleção de um compósito piezoelétrico para monitoramento industrial deve considerar simultaneamente composição, organização das fases e condição térmica, e não apenas maximizar o teor de fase cerâmica.

REFERÊNCIAS

[1] KAWAI, H. The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride). Jpn. J. Appl. Phys., 8, 975–976, 1969.
[2] MARTINS, P.; LOPES, A. C.; LANCEROS-MÉNDEZ, S. Electroactive phases of PVDF: determination, processing and applications. Prog. Polym. Sci., 39, 683–706, 2014.
[3] TRESSLER, J. F.; ALKOY, S.; NEWNHAM, R. E. Piezoelectric sensors and sensor materials. J. Electroceram., 2, 257–272, 1998.
[4] GREGORIO JR., R.; CESTARI, M. Effect of crystallization temperature on PVDF crystalline phase and morphology. J. Polym. Sci. B, 32, 859–870, 1994.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/02558-6 (PRH13/UFRGS).