

## SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ELEMENTOS DE VEDAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA: CRITÉRIOS DE DESEMPENHO, DEGRADAÇÃO E VIABILIDADE ECONÔMICA

Mateus de Sousa Zanzi<sup>1,\*</sup>, Giovani Silveira de Magalhães Martins<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Thermal Fluid and Flow Group, UFSC, Joinville

<sup>2</sup>UniSenai, Joinville

### 1. Introdução

Elementos de vedação elastoméricos são componentes fundamentais em sistemas de energia, responsáveis por assegurar a estanqueidade e a segurança operacional em sistemas de energia como trocadores de calor, células combustíveis e sistemas pressurizados. A integridade desses componentes é constantemente desafiada por condições severas de temperatura, compressão mecânica e exposição a meios quimicamente agressivos. Na literatura especializada, a falha de uma vedação não é vista apenas como um evento isolado, mas como uma consequência de processos degradativos complexos que resultam em perda de eficiência, contaminação de fluidos e elevados custos de manutenção [1]. Por essa razão, a seleção de materiais para componentes de vedação, como FKM, HNBR e NBR, deve ser fundamentada em uma análise técnica profunda que considere a cinética de envelhecimento e a durabilidade em serviço.

O envelhecimento termo-oxidativo é o principal mecanismo de degradação em elastômeros operando sob alta temperatura. Este processo envolve reações simultâneas de cisão de cadeias e reticulação, que alteram a rede polimérica e, conseqüentemente, as propriedades macroscópicas do material [2]. Em sistemas de vedação, essas mudanças estruturais manifestam-se através do aumento da dureza e da deformação permanente [3]. A literatura aponta que a análise isolada de uma propriedade pode ser insuficiente; é necessário compreender como a relaxação de tensão e a perda de elasticidade comprometem a força de vedação ao longo do tempo [4].

### 2. Metodologia

A metodologia para avaliação desses materiais baseia-se em ensaios de envelhecimento acelerado, utilizando o *compression set* (CS) como um dos principais indicadores de fim de vida útil. Historicamente, valores de CS próximos a 80% são adotados como o limite crítico [5,6], indicando que o elastômero perdeu sua capacidade de exercer a contrapressão necessária para vedar [7]. Além disso, a aplicação do princípio de Superposição de Tempo-Temperatura (TTS), fundamentado em conceitos clássicos de viscoelasticidade [8], permite converter dados obtidos em laboratório sob temperaturas elevadas em estimativas confiáveis de vida útil para condições operacionais reais. Esse modelo é essencial para a engenharia de projeto, pois possibilita a comparação direta entre diferentes famílias de elastômeros sob uma mesma janela de operação.

### 3. Resultados e Discussão

Ao comparar os materiais, a borracha de NBR tende a se destacar pelo baixo custo, porém apresenta limitações significativas em temperaturas elevadas devido à presença de insaturações em sua cadeia principal, o que facilita a oxidação [9]. Em contrapartida, a borracha de HNBR surge como uma alternativa intermediária robusta. O processo de hidrogenação reduz drasticamente as ligações duplas, conferindo ao material uma resistência superior ao calor e mantendo propriedades mecânicas estáveis por períodos mais longos do que o NBR convencional. Já o FKM (fluoroelastômero) representa o patamar mais elevado de desempenho, demonstrando estabilidade termo-oxidativa excepcional mesmo em ambientes térmicos severos. Estudos indicam que o FKM pode manter sua funcionalidade em temperaturas onde elastômeros nitrílicos (NBR e HNBR) falhariam precocemente, justificando seu uso em aplicações críticas onde a confiabilidade é prioritária [10].

Outro fator determinante na seleção é o efeito de Limitada da Difusão por Oxidação (DLO). Em seções transversais mais espessas e em temperaturas elevadas, a taxa de consumo de oxigênio na superfície devido as reações de oxidação pode ser superior à taxa de difusão para o interior do material, gerando gradientes de envelhecimento e heterogeneidade nas propriedades mecânicas [11]. Esse fenômeno é particularmente relevante

\*Autor correspondente: mateus.zanzi@t2f.ufsc.br

para vedações de grande porte, onde a degradação superficial pode mascarar o estado real do interior do material e, portanto, do elemento de vedação. Assim, critérios de seleção modernos devem considerar não apenas a temperatura global, mas também a geometria do componente e como o efeito de DLO pode impactar a integridade estrutural da vedação.

Sob o ponto de vista econômico, a seleção orientada pela durabilidade é mais eficaz do que a baseada apenas no custo inicial de aquisição. Embora a borracha de FKM possua um valor de mercado superior, sua maior vida útil reduz a frequência de intervenções para substituição, minimizando o risco de paradas não programadas que, em sistemas de energia de grande porte, possuem custos sistêmicos altíssimos. A borracha de HNBR posiciona-se como a solução de melhor custo-benefício para condições intermediárias, enquanto a de NBR permanece uma escolha racional apenas para aplicações de baixa severidade térmica e fácil acesso para manutenção. Assim, o projeto de sistemas de energia deve adotar uma abordagem holística, integrando modelos de previsão de vida útil e análise de degradação para garantir o menor custo total de propriedade ao longo do ciclo de vida do equipamento. Em suma, a contribuição deste trabalho é reforçar que a seleção de materiais para vedação deve ser guiada por critérios científicos sólidos. A integração de ensaios de envelhecimento representativos (como CS), monitoramento de propriedades e modelos de extrapolação das propriedades para previsão do tempo de vida fornecem a base necessária para decisões de engenharia que priorizem a segurança e a eficiência energética. Ao alinhar a expectativa de vida útil com a realidade operacional e o impacto econômico, é possível otimizar o desempenho de sistemas de energia, garantindo que o material escolhido suporte as demandas térmicas e mecânicas sem comprometer a estabilidade do sistema.

#### 4. Referências

- [1] A. Kömmling, M. Jaunich, P. Pourmand, D. Wolff, M. Hedenqvist, Analysis of O-Ring Seal Failure under Static Conditions and Determination of End-of-Lifetime Criterion, *Polymers* 11 (2019) 1251. <https://doi.org/10.3390/polym11081251>.
- [2] H. Patel, S. Salehi, R. Ahmed, C. Teodoriu, Review of elastomer seal assemblies in oil & gas wells: Performance evaluation, failure mechanisms, and gaps in industry standards, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 179 (2019) 1046–1062. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.019>.
- [3] A. Kömmling, M. Jaunich, D. Wolff, Revealing effects of chain scission during ageing of EPDM rubber using relaxation and recovery experiment, *Polymer Testing* 56 (2016) 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.026>.
- [4] K.T. Gillen, R. Bernstein, M. Celina, The challenges of accelerated aging techniques for elastomer lifetime predictions, in: *Rubber Fiber Plastics*, Nashville, 2015: p. Part 1.
- [5] M.S. Zanzi, E.L. de Souza, G.B. Dutra, K.V. Paiva, J.L.G. Oliveira, T.V. Cunha, A.S. Monteiro, Service lifetime prediction of nitrile butadiene rubber gaskets used in plate heat exchangers, (2022) 10.
- [6] A. Kömmling, M. Jaunich, D. Wolff, Effects of heterogeneous aging in compressed HNBR and EPDM O-ring seals, *Polymer Degradation and Stability* 126 (2016) 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2016.01.012>.
- [7] A. Kömmling, M. Jaunich, P. Pourmand, D. Wolff, U.W. Gedde, Influence of Ageing on Sealability of Elastomeric O-Rings, *Macromol. Symp.* 373 (2017) 1600157. <https://doi.org/10.1002/masy.201600157>.
- [8] J.D. Ferry, *Viscoelastic properties of polymers*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, Canada, 1980.
- [9] M.C. Celina, Review of polymer oxidation and its relationship with materials performance and lifetime prediction, *Polymer Degradation and Stability* 98 (2013) 2419–2429. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.06.024>.
- [10] E. Linde, F. Nilsson, M. Barrett, M.S. Hedenqvist, M.C. Celina, Time- and Feedback-Dependent DLO Phenomena in Oxidative Polymer Aging, *Polymer Degradation and Stability* 189 (2021) 109598. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2021.109598>.

 **SIMPEX**  
+  
**4ºMOBICIT**

# CONEXÕES QUE MOVEM o FUTURO

*Energia e Inteligência para Cidades Vivas*

Realização:

**UniSENAI**

**INSTITUTO SENAI**  
DE INOVAÇÃO

**INSTITUTO SENAI**  
DE TECNOLOGIA

 **fapesc**  
Fundação de Amparo à  
Pesquisa e Inovação do  
Estado de Santa Catarina

Apoio:

**Even3**

- [11] E.L. De Souza, M. De Sousa Zanzi, K.V. De Paiva, J.L. Goes Oliveira, G.M. De Oliveira Barra, G.B. Dutra, Experimental and numerical analyses of thermo-oxidative aging in NBR and EPDM rubber with different lengths, *Polymer* 334 (2025) 128694. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128694>.