

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE VÁLVULAS REVESTIDAS COM POLÍMEROS FLUORADOS E VÁLVULAS FEITAS COM SUPERLIGAS DE NÍQUEL EM AMBIENTES CORROSIVOS SEVEROS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

A COMPARATIVE STUDY OF FLUOROPOLYMER-LINED VALVES AND NICKEL SUPERALLOY VALVES IN SEVERE CORROSIVE ENVIRONMENTS: A SYSTEMATIC REVIEW

Dyêgo Henrique Azevedo Amorim¹
Aureliano Xavier dos santos²

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre o desempenho de válvulas industriais fabricadas com superligas de níquel e válvulas revestidas com polímeros fluorados que operam em ambientes altamente corrosivos. A análise de 28 estudos selecionados revelou que superligas ricas em cromo e molibdênio, como Hastelloy C-276 e BC-1, apresentam elevada resistência em meios contendo HF, HCl e H₂SO₄, devido à formação de películas passivas estáveis. Em contraste, ligas como Monel 400 e Inconel 600 mostram maior susceptibilidade à ruptura de passividade em ambientes com íons F⁻ e Cl⁻. Por outro lado, os revestimentos de politetrafluoretileno (PTFE) e perfluoroalcoxi PFA demonstram excelente inércia química, porém sua eficiência depende da integridade física do revestimento e das condições de operação. A revisão sistemática também identificou escassez de estudos que avaliem revestimentos fluorados em condições industriais reais, evidenciando a necessidade de pesquisas adicionais. Portanto, conclui-se que a seleção do material deve considerar não apenas a compatibilidade química, mas também os efeitos da temperatura, pressão e riscos mecânicos associados ao processo.

Palavras-chave: corrosão; superligas de níquel; fluoropolímeros; válvulas industriais.

ABSTRACT

This work presents a systematic review on the performance of industrial valves manufactured from nickel-based superalloys and valves coated with fluoropolymer materials operating in highly corrosive environments. The analysis of 28 selected studies revealed that superalloys rich in chromium and molybdenum, such as Hastelloy C-276 and BC-1, exhibit high resistance in media containing HF, HCl, and H₂SO₄ due to the formation of stable passive films. In contrast, alloys such as Monel 400 and Inconel 600 show greater susceptibility to passive-film breakdown in environments containing F⁻ and Cl⁻ ions. On the other hand, polytetrafluoroethylene (PTFE) and perfluoroalkoxy (PFA) coatings demonstrate excellent chemical inertness; however, their effectiveness depends on the physical integrity of the coating and the operating conditions. The systematic review also identified a scarcity of studies evaluating fluoropolymer coatings under real industrial conditions, highlighting the need for further research. Therefore, it is concluded that material selection must consider not only chemical compatibility but also the effects of temperature, pressure, and mechanical risks associated with the process.

Keywords: corrosion; nickel superalloys; fluoropolymers; industrial valves.

¹ Bacharelando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande. Docente da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho.

INTRODUÇÃO

As indústrias de processo como química, petroquímica e de mineração, desempenham um papel principal no desenvolvimento tecnológico e econômico. Isso porque no centro dessas indústrias existe uma complexa rede de tubulações, onde o controle preciso de fluidos com alto potencial corrosivo é uma demanda constante. Nesse cenário, as válvulas industriais deixam de ser apenas componentes e se tornam dispositivos principais para eficiência e segurança de toda a operação (Sotoudeh, 2020).

O grande desafio, no entanto, é que esses componentes operam no limite, constantemente expostos a ambientes que promovem a degradação por corrosão. De acordo com Sotoudeh (2020), falhas de válvulas industriais expostas a meio ambiente agressivo resultam em desligamentos não planejados da planta, vazamentos de substâncias perigosas e impactos graves em HSE (Health, Safety and Environment). Além disso, Mazumder (2020) indica que a corrosão de equipamentos industriais gera custos elevados, vida útil reduzida e risco ambiental. Por fim, conforme Kaźmierczak *et al.* (2025), paradas inesperadas devido a falhas técnicas comprometem a estabilidade do cronograma de produção e causam perdas financeiras significativas.

Para enfrentar a corrosão, a engenharia de materiais oferece diferentes caminhos, e a escolha da solução ideal está longe de ser simples. De um lado, destacam-se as válvulas ou componentes construídos com superligas de níquel, esses materiais são a referência nas indústrias (Wang *et al.*, 2025), apresentando alta resistência mecânica e um desempenho excepcional contra diversos tipos de corrosão, mesmo em altas temperaturas. O principal obstáculo, no entanto, é seu custo de aquisição, que pode se tornar uma dificuldade para muitas aplicações (Santos *et al.*, 2021).

Por outro lado, temos a alternativa das válvulas com revestimentos poliméricos. Essa tecnologia se destaca pelo custo mais acessível e, principalmente, por uma excelente resistência química, tornando-as uma opção

viável para o transporte de muitos dos fluidos mais corrosivos da indústria (Rodrigues *et al.*, 2022). Contudo, por sua natureza polimérica, estes materiais possuem limites operacionais mais restritos quando comparados às ligas metálicas, e a integridade do seu revestimento é um fator crítico para o bom desempenho do equipamento (Chen *et al.*, 2019).

O objetivo geral deste trabalho é, portanto, realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre o desempenho comparativo entre válvulas com revestimentos em polímeros fluorados e válvulas fabricadas com superligas de níquel em ambientes altamente corrosivos

Para alcançar este propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as condições típicas de operação em que ambos os tipos de válvulas são empregados;
- Coletar e analisar dados sobre resistência química, vida útil, falhas operacionais, custo e manutenção;
- Avaliar a compatibilidade dos materiais com diferentes tipos de agentes corrosivos (ex: HF, HCl, H₂SO₄).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a condução desta revisão sistemática, é fundamental estabelecer os conceitos que formam a base deste estudo. A seguir, serão abordados o fenômeno da corrosão e as duas principais classes de materiais em análise: superligas de níquel e polímeros fluorados.

Corrosão em ambientes industriais severos

A corrosão é definida como o processo de degradação que um material, majoritariamente metálico, sofre ao interagir com o seu ambiente por meio de reações químicas ou eletroquímicas. Embora o termo seja predominantemente associado aos metais, a definição também pode ser estendida para abranger a deterioração de materiais não metálicos, como a oxidação de polímeros ou a perda de resistência da madeira (Gentil, 1996, p. 1). Por ser um processo

termodinamicamente espontâneo, a corrosão altera de forma prejudicial as propriedades originais de um material, comprometendo seu desempenho e integridade estrutural. O estudo deste fenômeno é, portanto, de importância central para a engenharia moderna, visto que falhas por corrosão podem levar a paradas de planta, riscos à segurança e poluição ambiental (Mazumder, 2020).

A manifestação morfológica da corrosão é um aspecto crucial para o diagnóstico e a seleção de estratégias de mitigação em válvulas industriais (Verma et al., 2017a; Verma et al., 2017b). A forma mais comum é a corrosão uniforme, caracterizada pela deterioração homogênea em toda a superfície exposta a um meio corrosivo (Shwetha et al., 2024), que exige o manejo da taxa de perda de espessura. Em contraste, a corrosão por placas representa um ataque não uniforme, concentrando-se em áreas específicas e formando placas de desgaste (Gentil, 1996, P. 39). Contudo, o mecanismo mais crítico é a corrosão puntiforme ou por pite, uma corrosão localizada que, ao formar pequenas cavidades, pode comprometer a integridade do componente com perda de massa mínima, sendo frequentemente induzida pela alta concentração de cloretos (Smialowska, 1986). Este mecanismo é particularmente perigoso em válvulas e tubulações, pois pode causar vazamentos súbitos e perigosos (Firouzi et al., 2021).

A severidade da corrosão em ambientes industriais é determinada primariamente pela natureza química do fluido e por fatores operacionais como temperatura, pressão e concentração (Kubo et al., 2013). Esses fluidos agressivos têm a capacidade de degradar rapidamente materiais como o aço carbono e aços inoxidáveis austeníticos (Mazumder, 2020), tornando a seleção de materiais de engenharia para válvulas e tubulações, um processo ditado diretamente pela compatibilidade com o agente químico específico (Mathias, 2015). No contexto de desafios severos, destacam-se três ácidos inorgânicos críticos. O ácido sulfúrico H_2SO_4 , amplamente fabricado, possui uma corrosividade complexa que varia com a concentração e temperatura (Kubo et al.,

2013), podendo atuar como oxidante em certas condições (Ou et al., 2025), mas sendo um ácido redutor severamente agressivo quando diluído ou aquecido (Ou et al., 2025). O ácido clorídrico HCl é particularmente difícil de se manusear devido ao íon cloreto (Cl^-), que é pequeno, altamente penetrante e volátil (Hou et al., 2024) e notório por sua capacidade de romper a camada passiva de aços inoxidáveis (Guo et al., 2022). Já o ácido fluorídrico HF é um agente químico singularmente agressivo, vital para processos petroquímicos e para a fabricação de fluoropolímeros (Guo et al., 2023), atacando severamente aços inoxidáveis e a maioria das ligas (Guo et al., 2022). A resistência adequada a esse ácido é alcançada apenas com um grupo seleto de materiais, incluindo as superligas de níquel-cobre (como a família Monel) e os polímeros fluorados (como PTFE e PFA) (Guo et al., 2022), o que fundamenta a comparação entre essas duas classes de materiais para o presente estudo.

Comparativo entre as superligas de níquel e os polímeros fluorados

Uma das principais abordagens para o controle de fluidos corrosivos, buscando otimização de custo, é o uso de válvulas com revestimentos poliméricos (Rodrigues et al., 2022). Esta estratégia combina a resistência estrutural de um corpo metálico (como aço carbono ou aço inoxidável) com a inércia química de um revestimento interno de polímero fluorado, que atua como uma barreira de proteção em contato direto com o fluido (Rodrigues et al., 2022). Essa barreira protetora é crucial para a integridade da válvula (Akram et al., 2020). Os fluoropolímeros se destacam pela notável estabilidade química e resistência a agentes agressivos devido à forte ligação carbono-flúor (C-F) em sua estrutura molecular (Cui et al., 2014). O PTFE (Politetrafluoretileno) é a principal referência pela resistência à corrosão, inclusive ao ataque do ácido sulfúrico, e apresenta elevada estabilidade química e térmica, além de baixo atrito (Xu et al., 2023). O PFA (Perfluoroalcóxi), com propriedades similares (Argazinski et al., 2010), é preferido por formar revestimentos de baixa porosidade e alta densidade, o que suporta serviço

contínuo e ampla resistência química, no entanto, sua estrutura favorece a permeação (ou penetração) de substâncias corrosivas através do material (Li *et al.*, 2022), uma desvantagem crucial que limita sua aplicação onde a contaminação ou a falha do metal base por permeação não é tolerável.

Além do desempenho químico, o comportamento mecânico das válvulas revestidas também influencia sua confiabilidade em ambientes agressivos. Como o revestimento em PTFE ou PFA não possui função estrutural, toda a resistência mecânica depende do metal base, enquanto o polímero atua apenas como barreira química. Em condições com ciclos de pressão, vibração ou variação térmica, pequenos esforços podem gerar microfissuras, ou perda localizada do revestimento, reduzindo drasticamente sua eficiência. Estudos como os de Akram *et al.* (2020), Li *et al.* (2022) e Xu *et al.* (2023) mostram que defeitos microscópicos e tensões mecânicas aceleram a degradação do filme polimérico, especialmente quando o meio contém fluoretos ou cloretos, o que reforça a necessidade de controle operacional e inspeção periódica nesses equipamentos.

A alternativa das superligas de níquel se fundamenta na fabricação do corpo da válvula, suas juntas e sedes com um material que possui resistência inerente ao meio corrosivo (Shi *et al.*, 2024). Essas ligas de alto desempenho são desenvolvidas para operar com segurança em condições extremas de temperatura, estresse mecânico e ambientes quimicamente agressivos (Badea *et al.*, 2025). As ligas a base níquel são selecionadas por combinarem elevada resistência mecânica com uma notável estabilidade superficial em aplicações de corrosão (Gibadullina *et al.*, 2025). Os elementos de liga atuam de forma sinérgica: o Cobre (Cu) é essencial para a resistência, notadamente em ácido fluorídrico (HF) (Dai *et al.*, 2020), como na família Monel. O Cromo (Cr) é fundamental por promover a formação de uma camada passiva de óxido (Cr_2O_3), fina, aderente e autorregenerativa na superfície do material (Makuch, 2020). Além disso, o Molibdênio (Mo) é adicionado para aumentar significativamente a resistência à corrosão,

atuando como um inibidor do mecanismo de corrosão por pite (ex: Hastelloy C-276) (Dai *et al.*, 2020), sendo o principal elemento de liga da família Hastelloy (Dai *et al.*, 2020). Esta resistência inerente garante um desempenho superior em condições extremas, superando as limitações de permeação e temperatura dos revestimentos poliméricos.

A elevada resistência das superligas de níquel está diretamente ligada ao mecanismo de passivação. Em meio oxidante, elementos como Cr e Mo formam uma película fina e estável de óxidos (Cr_2O_3 e MoO_2), que atua como barreira contínua contra a penetração de espécies agressivas. Essa camada é autorregenerativa, podendo se recompor rapidamente quando sofre dano mecânico ou abrasivo. De acordo com Hou *et al.* (2024), ligas com maior homogeneidade microestrutural mantêm filmes passivos mais densos e resistentes, reduzindo a suscetibilidade a pites e à ruptura de passividade em meios contendo Cl^- e F^- .

METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido como uma revisão sistemática da literatura, com abordagem metodológica norteada pelo protocolo PRISMA, partindo da identificação de um determinado tema. A busca e a seleção dos estudos ocorreram entre outubro e dezembro de 2025, por meio de consultas às bases de dados Scopus, Web of Science, Scielo, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI e Springer.

A pesquisa foi guiada pela pergunta central sobre o desempenho comparativo entre válvulas revestidas com polímeros fluorados e as de superligas de níquel em ambientes corrosivos severos. Para isso, foi utilizado o modelo PICO:

- P(População): Válvulas industriais operando em ambientes severos e corrosivos.
- I(Intervenção): Utilização de válvulas revestidas com polímeros fluorados.
- C(Comparação): Uso de válvulas revestidas com superligas de níquel.
- O(Outcome): Análise do desempenho técnico-econômico comparativo.

A partir dessa estrutura, a definição dos termos de busca combinando palavras-chave em inglês para a consulta nas bases de dados conforme os blocos abaixo:

- População (Contexto): industrial valve, corrosive environment, severe service, hydrofluoric acid, HF acid compatibility, hydrochloric acid, sulfuric acid.
- Intervenção (Polímeros): "fluoropolymer coated valves", "lined valve", "polymer lining", PTFE valves
- Comparação (Superligas): "nickel alloy valves", superalloy, Hastelloy, Inconel, Monel
- Outcome (Desfecho): performance, "corrosion resistance", "operating conditions", cost

Esses termos foram combinados com operadores booleanos (AND, OR) e curingas (*), resultando na construção de uma string de busca robusta, como a exemplificada a seguir: (("fluoropolymer*" OR PTFE) AND valve*) AND (("nickel alloy*" OR Hastelloy) AND valve*) AND (corrosion* OR "HF acid"). Foi necessário adaptar a aplicação da string em certas bases de dados que impunham limites técnicos, como o número máximo de operadores booleanos. Nesses casos, a consulta foi dividida utilizando os recursos da busca avançada para manter a consistência da estratégia.

Para a seleção dos artigos, foram estabelecidos os seguintes critérios de inclusão e exclusão:

Critérios de inclusão

- Estudos que realizam comparação direta ou apresentam dados sobre algum dos materiais em ambiente corrosivo severo.
- Publicações nos formatos de artigos científicos, normas, teses e dissertações.
- Artigos publicados em inglês.
- Estudos publicados nos últimos 20 anos.

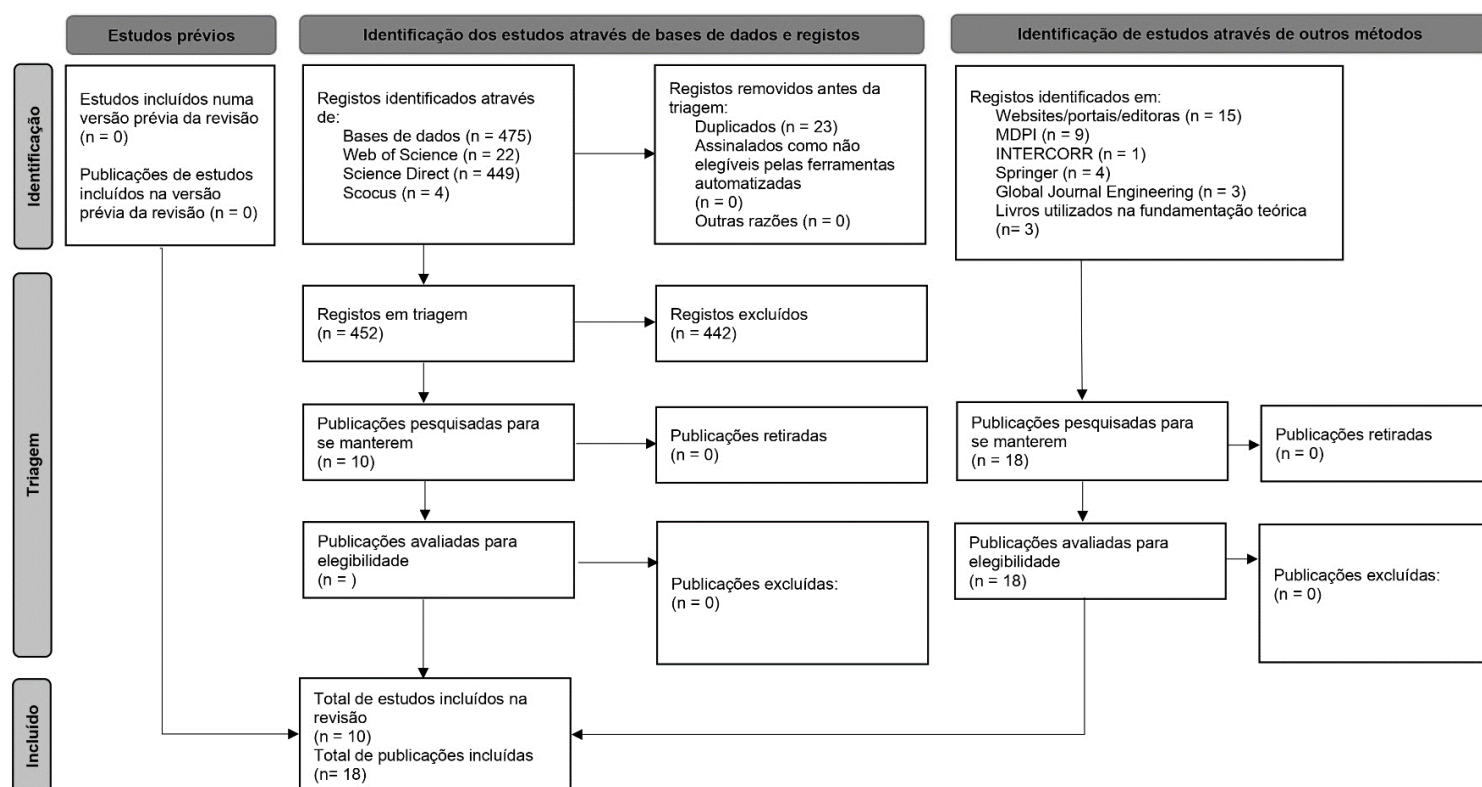
Critérios de exclusão

- Artigos de revisão, livros, editoriais e material de marketing.
- Estudos que não apresentam dados quantitativos.
- Trabalhos publicados fora do período de tempo estipulado ou em outro idioma.

Os resultados obtidos a partir das strings de busca foram submetidos a um processo de filtragem em duas etapas. A primeira consistiu na análise dos títulos e resumos, na qual foram selecionados apenas os trabalhos cujo escopo era condizente com o desta revisão. Posteriormente, os artigos remanescentes passaram por uma leitura analítica completa, resultando em um portfólio final de 28 estudos relevantes. A Figura 1 apresenta o fluxograma PRISMA contendo os dados do processo de busca.

Figura 1 - Fluxograma PRISMA do processo de seleção dos estudos.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

A revisão sistemática realizada permitiu identificar padrões consistentes sobre o comportamento de ligas de níquel e materiais concorrentes em ambientes corrosivos severos, destacando principalmente o papel da composição química, da microestrutura e da interação entre diferentes agentes agressivos. Nos estudos que avaliaram superligas expostas a soluções contendo HF e misturas com cloretos, observou-se que a corrosão está fortemente associada à ação combinada entre os íons F^- e Cl^- . Conforme descrito por Guo *et al.* (2022), as ligas Monel 400 e Inconel 600 sofrem ruptura acelerada da película passiva nesse tipo de meio, apresentando aumento de corrosão superior a duas vezes para a Monel e mais de dez vezes para o Inconel, enquanto o Hastelloy C-276 mantém um desempenho significativamente superior devido à estabilidade do filme protetor rico em MoO_2 . Segundo esses autores, essa diferença reforça o papel determinante do molibdênio na resistência das ligas Ni-Cr-Mo em meios contendo fluoretos, uma vez que a presença

desse elemento favorece a formação de óxidos mais estáveis e menos permeáveis, capazes de bloquear a penetração de espécies agressivas.

A importância da composição química é ainda mais evidente em estudos que analisaram ligas Ni-Cr-Mo com microestruturas heterogêneas. Conforme relatado por Hou *et al.* (2024), variações locais na distribuição de Mo e Cr tendem a produzir microcélulas galvânicas capazes de intensificar a corrosão localizada, sobretudo quando o íon F^- atua como agente despassivador. Nessas condições, filmes dominados por fluoretos metálicos tornam-se frágeis e permeáveis, favorecendo a penetração do eletrólito e prejudicando a integridade das ligas. Os resultados convergem para a ideia de que materiais com distribuição homogênea de Mo e com microestrutura livre de fases intermetálicas secundárias (como σ) apresentam melhor estabilidade em HF, enquanto ligas com segregações sofrem pites, perda de passividade e maior variabilidade de desempenho eletroquímico.

O comportamento das superligas em ácido sulfúrico quente também revela

diferenças importantes. Segundo Ou *et al.* (2025), a comparação entre Hastelloy B-3 e Hastelloy BC-1 mostra que, embora ambas sejam desenvolvidas para atuar em ambientes redutores de H_2SO_4 , o BC-1 apresenta desempenho superior, evidenciado por menor profundidade de ataque intergranular e maior estabilidade térmica, características atribuídas ao seu teor mais elevado de cromo. Em contrapartida, os mesmos autores destacam que o B-3 demonstra maior sensibilidade à corrosão intergranular, sobretudo em soluções aquecidas entre 70 e 100 °C, comportamento relacionado à ocorrência de transformações de fase e à precipitação de compostos que empobrecem localmente o material em molibdênio.

Os estudos conduzidos em ambientes offshore contendo os íons Cl^- , CO_2 e H_2S complementam essa análise ao demonstrarem que ligas a base de ferro (incluindo duplex e superduplex), apresentam significativa degradabilidade quando submetidas simultaneamente a haletos e tensões mecânicas, resultando em mecanismos críticos como HISC (Hydrogen Induced Stress Cracking) e SCC (Stress Corrosion Cracking). Conforme apresento por Martin & Sofronis (2022), o mecanismo de fratura causado pela absorção de hidrogênio pelo metal enquanto ele está submetido a tensões elevadas, levando ao aparecimento de trincas. Por outro lado, Loto, C. A. (2017), afirma que, a SCC está relacionada a formação de trincas em um material devido à combinação simultânea de tensão mecânica (tensão residual ou aplicada) e um ambiente corrosivo específico. Conforme discutido por Sotoudeh (2020), grande parte das falhas observadas em válvulas utilizadas em operações submarinas decorre tanto da inadequação do material selecionado ao meio corrosivo quanto da interação entre corrosão e esforços operacionais. Em contraste, o autor destaca que superligas de níquel, como o Inconel 625 e outras ligas ricas em Cr-Ni-Mo, demonstram maior confiabilidade estrutural e taxas de falha consideravelmente menores nessas condições, sendo por isso recomendadas para sedes, discos e demais componentes críticos de válvulas de controle aplicadas em ambientes offshore severos.

Um resultado particularmente relevante foi apresentado por Guo *et al.* (2023), que avaliaram o comportamento das ligas em condições de corrosão na fase vapor de HF. Diferentemente do que ocorre em solução aquosa, os autores observaram que a exposição ao vapor promove a formação e deposição de produtos de corrosão que alteram o balanço iônico da superfície metálica, reduzem o pH local e intensificam ataques pontuais, tornando o meio significativamente mais agressivo. Segundo esses pesquisadores, ligas Ni-Cu do tipo Monel sofrem deterioração acentuada quando submetidas ao vapor de HF, em razão da formação de fluoretos instáveis e da perda progressiva da integridade da película protetora. Esse comportamento evidencia que a resistência apresentada em HF líquido não garante o mesmo desempenho em HF na fase vapor, uma distinção fundamental para a seleção adequada de válvulas utilizadas em unidades de alquilação e em processos de craqueamento fluido.

Apesar da robustez das evidências relacionadas às superligas de níquel, a revisão revelou uma lacuna considerável na literatura quando se trata de válvulas revestidas com polímeros fluorados. Segundo Xu *et al.* (2023), os estudos disponíveis concentram-se predominantemente na caracterização de filmes de PTFE aplicados sobre substratos metálicos, analisando propriedade de permeação, estrutura superficial e estabilidade térmica, mas sem reproduzir as condições reais de operação de válvulas industriais. Na mesma direção, Akram *et al.* (2020) destacam que, embora revestimentos de PTFE e PFA apresentem excelente estabilidade química em meios contendo HF, HCl e ácido sulfúrico diluído, comportamento atribuído à forte ligação carbono-flúor e à baixa energia superficial desses materiais. Como apontado por Li *et al.* (2022), a permeação de espécies agressivas, particularmente em revestimentos de PFA, e a perda de desempenho sob temperaturas mais elevadas representam fatores de risco relevantes na utilização desses polímeros em equipamentos industriais. Além disso, os autores ressaltam que a integridade física do revestimento é determinante para o

desempenho do componente. Em ambientes industriais, defeitos microscópicos como arranhões, cavidades, regiões de baixa adesão ou pequenas falhas de continuidade podem permitir o contato direto do fluido corrosivo com o metal base, o que leva a processos de degradação acelerada. Esse comportamento é especialmente crítico quando o meio contém fluoretos ou haletos, capazes de atacar o substrato metálico mesmo em concentrações extremamente baixas, resultando em falhas rápidas e potencialmente catastróficas no equipamento.

Conforme Sotoodeh (2021), a seleção entre superligas de níquel e revestimentos fluoropoliméricos não deve ser encarada como uma escolha direta, mas sim como uma decisão dependente do regime de operação. Segundo Guo *et al.* (2022) e Ou *et al.* (2025), superligas com elevados teores de molibdênio e cromo apresentam desempenho superior em ambientes contendo HF, HCl e H₂SO₄ quente, especialmente sob alta temperatura, pressão e presença de haletos mistos. De acordo com Akram *et al.* (2020) e Xu *et al.* (2023), os fluoropolímeros constituem uma solução eficiente e econômica para regimes moderados, desde que a integridade do revestimento seja garantida e as condições de serviço permaneçam abaixo dos limites térmicos do material. Como apontado por Li *et al.* (2022) e por Rodrigues *et al.* (2022), falhas relatadas em válvulas revestidas estão frequentemente associadas à perda localizada do revestimento, e não à química do material, reforçando a necessidade de estudos mais robustos envolvendo ciclos de pressão, abrasão e variação térmica. Por fim, conforme Mazumder (2020), análises comparativas devem considerar não apenas a composição do fluido, mas também fatores operacionais e mecânicos, constituindo uma base técnica sólida para recomendações de seleção de materiais em ambientes corrosivos severos.

CONCLUSÃO

A revisão sistemática realizada demonstrou que válvulas fabricadas com superligas de níquel, especialmente ligas Ni-Cr-Mo como Hastelloy C-276 e BC-1,

apresentam desempenho superior em ambientes corrosivos severos contendo HF, HCl e H₂SO₄ quente, devido à formação de películas passivas estáveis, elevada resistência à corrosão localizada e maior estabilidade térmica. Em contraste, ligas como Monel 400 e Inconel 600 apresentaram maior suscetibilidade à ruptura de passividade na presença combinada de fluoretos e cloretos, evidenciando que a composição química e a homogeneidade microestrutural são determinantes para a integridade do material. Por outro lado, revestimentos fluoropoliméricos como PTFE e PFA sobressaem devido à elevada inércia química, combinada a um custo relativamente baixo, mas seu desempenho depende totalmente da integridade física do revestimento e é limitado por fatores como temperatura, abrasão e permeação.

Diante desses resultados, conclui-se que a seleção entre superligas de níquel e revestimentos fluoropoliméricos não deve ser universal, mas condicionada ao regime de operação. Superligas são mais indicadas para condições severas de alta temperatura, pressão e presença de haletos mistos, enquanto fluoropolímeros se mostram viáveis em condições moderadas e controladas, desde que o revestimento permaneça íntegro. A revisão também evidenciou uma lacuna importante na literatura: a ausência de estudos em escala industrial avaliando o desempenho real de válvulas revestidas com fluoropolímeros, indicando a necessidade de pesquisas aplicadas que considerem ciclos térmicos, abrasão, pressurização e vida útil. Assim, a escolha do material deve considerar não apenas a compatibilidade química, mas também fatores operacionais, riscos mecânicos, manutenção e custo ao longo do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

AKRAM, W. *et al.* Characterization of PTFE film on 316L stainless steel deposited through spin coating and its anticorrosion performance in multi acidic mediums. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13020388>.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/2/388>. Acesso em: 29 mar. 2026.

ARGAZINSKI, J. K. *et al.* Fluoropolymers for the chemical processing industry applications. In: INTERCORR – CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 2010, Fortaleza. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABRACO, 2010. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2010/INTERCORR2010_148.pdf. Acesso em: 29 mar. 2026.

BADEA, T.-A.; DOMBROVSKI, M. The influence of alloying elements on the hot corrosion behavior of nickel-based superalloys. **Materials**, v. 18, p. 1996, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18091996>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/9/1996>. Acesso em: 29 mar. 2026.

CHEN, L. *et al.* Water-repellent fluoropolymer-based coatings. **Coatings**, v. 9, n. 5, p. 293, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9050293>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/293>. Acesso em: 29 mar. 2026.

CUI, Z.; DRIOLI, E.; LEE, Y. M. Recent progress in fluoropolymers for membranes. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 1, p. 164-198, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007967001300085X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

FIROUZI, A. *et al.* Failure of corrosion affected buried cast iron pipes subject to water hammer. **Engineering Failure Analysis**, v. 120, p. 104993, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104993>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135063072030467X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GIBADULLINA, A. F. *et al.* The effect of long-term aging on the mechanical properties of corrosion-resistant nickel-based alloys for their application in nuclear technologies. **Applied Sciences**, v. 15, p. 6133, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15116133>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6133>. Acesso em: 29 mar. 2026.

GUO, C. *et al.* Corrosion mechanisms of nickel-based alloys in chloride-containing hydrofluoric acid solution. **Engineering Failure Analysis**, v. 140, p. 106580, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106580>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135063072200427X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

GUO, C. *et al.* The deterioration effects of corrosion product deposition on Ni-Cu alloy in hydrofluoric acid vapor phase. **Corrosion Science**, v. 219, p. 111256, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111256>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X2300262X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

GUO, Q. *et al.* PTFE porous membrane technology: a comprehensive review. **Journal of Membrane Science**, v. 664, p. 121115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121115>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037673882200781X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

HOU, D. *et al.* Effect of Cr on the microstructure and corrosion behavior of nickel-based alloys in hydrochloric acid. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 32, p. 2867-2881, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542400085X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

KAŹMIERCZAK, P. *et al.* The impact of downtime on the stability of the production schedule. **Applied Sciences**, v. 15, p. 150, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010150>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/1/150>. Acesso em: 29 mar. 2026.

KUBO, S. *et al.* Corrosion resistance of structural materials in high-temperature aqueous sulfuric acids in thermochemical water-splitting iodine-sulfur process. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 16, p. 6577-6585, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.118>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991300693X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

LI, B. H. *et al.* Beyond graphene: anticorrosion performance of fluorographene-filled perfluoroalkoxy alkane composite coatings for condensing heat exchanges. **Progress in Organic Coatings**, v. 165, p. 106748, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106748>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030094402200057X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

LOTO, C. A. Stress corrosion cracking: characteristics, mechanisms and experimental study. **Moroccan Journal of Chemistry**, v. 5, n. 4, p. 622-640, 2017. DOI: <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v5i4.8724>. Disponível em: <https://revues.imist.ma/index.php/morjchem/article/view/8724>. Acesso em: 29 mar. 2026.

MAKUCH, N. The importance of phase composition for corrosion resistance of borided layers produced on nickel alloys. **Materials**, v. 13, p. 5131, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13225131>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5131>. Acesso em: 29 mar. 2026.

MARTIN, M. L.; SOFRONIS, P. Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: a review. **Journal of Natural Gas Science and**

Engineering, v. 101, p. 104547, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104547>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187551002200085X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

MATHIAS, A. C. **Válvulas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MAZUMDER, M. A. J. Global impact of corrosion: occurrence, cost and mitigation. **Global Journal of Engineering Sciences**, v. 5, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.05.000618>. Disponível em: <https://irispublishers.com/gjes/pdf/GJES.MS.I.D.000618.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2026.

OU, G. *et al.* Failure analysis and corrosion resistance of carbon steel pipelines in concentrated sulfuric acid. **Metals**, v. 15, p. 506, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15050506>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/5/506>. Acesso em: 29 mar. 2026.

RODRIGUES, A. P. *et al.* Analysis of the chemical behavior at the molecular level of lined pipes with fluoropolymers. **SN Applied Sciences**, v. 4, n. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05119-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-022-05119-4>. Acesso em: 29 mar. 2026.

SANTOS, G. *et al.* Evaluation of solidification cracking of Ni-based alloy dissimilar welds. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 115, p. 119-129, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/61581>. Acesso em: 29 mar. 2026.

SHI, S. *et al.* Corrosion damages of nickel-based alloy G3. **Corrosion Communications**, v. 15, p. 42-51, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2023.09.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article>

[/pii/S27729222300057X](https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258). Acesso em: 29 mar. 2026.

SHWETHA, K. M. *et al.* A review on corrosion inhibitors. **Results in Surfaces and Interfaces**, v. 16, p. 100258, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266684592400030X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

SOTOODEH, K. A review and analysis of industrial valve material failures due to corrosion. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 21, p. 261-267, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01064-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-020-01064-9>. Acesso em: 29 mar. 2026.

VERMA, C.; EBENSO, E. E.; QURAISHI, M. A. Corrosion inhibitors. **Journal of Molecular Liquids**, v. 248, p. 927-942, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.094>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016773221733674X>. Acesso em: 29 mar. 2026.

VERMA, C.; EBENSO, E. E.; QURAISHI, M. A. Ionic liquids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 233, p. 403-414, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732217304194>. Acesso em: 29 mar. 2026.

WANG, D. *et al.* Recent advances in tool coatings. **Coatings**, v. 15, n. 1, p. 8, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15010008>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/15/1/8>. Acesso em: 29 mar. 2026.

XU, K. *et al.* Acid permeability related corrosion protection. **Corrosion Science**, v. 217, p. 112171, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.112171>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X23001777>. Acesso em: 29 mar. 2026.

YANG, K.-R. *et al.* Mechanical property comparison. **Applied Sciences**, v. 11, p. 9308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199308>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/19/9308>. Acesso em: 29 mar. 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força durante esta jornada, à minha família pelo apoio incondicional, aos meus amigos pelo incentivo diário e ao meu orientador pela dedicação e orientação. Sou grato também a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.