ESTUDO DA CORROSÃO DO AÇO API 5L X70 EM SOLUÇÃO SALINA NACE 177B SATURADA COM CO_2

Rhuan Fellipe Fernandes de Oliveira[1], Eduardo Norberto Codaro[2], Rosinei Batista Ribeiro[3], Rafaella Nogueira Freire[4].

[1] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Química e energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá - SP, 12516-410, Brasil, rhuan.fernandes@unesp.br.
[2] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Química e energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá - SP, 12516-410, Brasil, eduardo.codaro@unesp.br.
[3] Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Coordenaria Geral de Pós-graduação, Extensão e Pesquisa, Rua dos Bandeirantes, 169, Bom Retiro, São Paulo, Brasil, rosinei.ribeiro@cps.sp.gov.br.
[4] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Química e energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá - SP, 12516-410, Brasil, rafaella.freire@aluno.cps.sp.gov.br

Resumo
Este trabalho avaliou o comportamento corrosivo do aço API 5L X70 exposto a meio contendo CO_2, considerando diferentes tempos e condições de exposição. Os ensaios foram realizados em meio líquido e gasoso, nos períodos de 12, 24, 72 e 120 horas, sendo avaliadas a perda de massa e a taxa de corrosão. A evolução dos produtos de corrosão foi caracterizada por difração de raios X (DRX), enquanto a morfologia e a composição superficial foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS). Os resultados de DRX indicaram a presença de ferro (Fe) e carbonato de ferro ($FeCO_3$), com aumento da intensidade dos picos de siderita ao longo do tempo de exposição. As análises por MEV evidenciaram a evolução de produtos inicialmente descontínuos e de baixa aderência para estruturas mais desenvolvidas e cristalinas. As maiores taxas de corrosão foram observadas, de modo geral, na fase líquida, associadas à maior disponibilidade de eletrólito e CO_2 dissolvido. Conclui-se que o comportamento corrosivo do API 5L X70 é influenciado pelo tempo e pela condição de exposição, bem como pela evolução e características dos produtos de corrosão, destacando-se a formação progressiva de $FeCO_3$.
Palavras-chave: Aço API 5L X70; NACE 177B; Corrosão doce; CO_2.

Área do Conhecimento: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Introdução

A corrosão constitui uma das principais preocupações da indústria de petróleo e gás devido aos custos associados à manutenção e substituição de dutos e equipamentos. Embora os aços carbono e de baixa liga sejam amplamente utilizados pela combinação de propriedades mecânicas, disponibilidade e custo, apresentam resistência limitada em ambientes contendo CO_2, H_2S e água (International Energy Agency, 2013). Esses agentes favorecem diferentes mecanismos de corrosão, destacando-se a sweet corrosion, associada a ambientes ricos em CO_2, e a sour corrosion, relacionada à presença de H_2S. A influência conjunta desses gases ainda apresenta complexidades quanto à distinção entre esses mecanismos (Iannuzzi et al., 2017).

A presença de CO_2, água e sais dissolvidos pode favorecer a corrosão generalizada e localizada dos aços utilizados em dutos. A corrosão localizada está relacionada a diferenças eletroquímicas na superfície, especialmente na presença de inclusões e constituintes microestruturais, podendo resultar em pites e outros tipos de ataque (Popoola et al., 2013). Na corrosão generalizada, ocorre a dissolução da matriz metálica e a formação de produtos de corrosão, como siderita ($FeCO_3$) e mackinawita (FeS), cuja estabilidade pode influenciar a evolução do processo corrosivo (Smith; Craig, 2005).

Em ambientes de exploração de petróleo e gás cada vez mais severos, os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), como os da classe API 5L, destacam-se pela elevada resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade, possibilitando a utilização de menores espessuras de parede nos dutos

(Godefroid et al., 2014). Entretanto, características como composição química e microestrutura podem influenciar significativamente seu comportamento corrosivo em meios contendo CO_2.

Dentre esses materiais, o aço API 5L X70 apresenta elevada resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade, sendo empregado em sistemas que exigem elevada capacidade de transporte. Entretanto, seu desempenho em ambientes contendo CO_2 depende da interação entre suas características microestruturais e as condições do meio corrosivo (Kahyarian et al., 2017). Assim, compreender a formação e evolução dos produtos de corrosão é fundamental para avaliar seu comportamento em ambientes sujeitos à sweet corrosion.

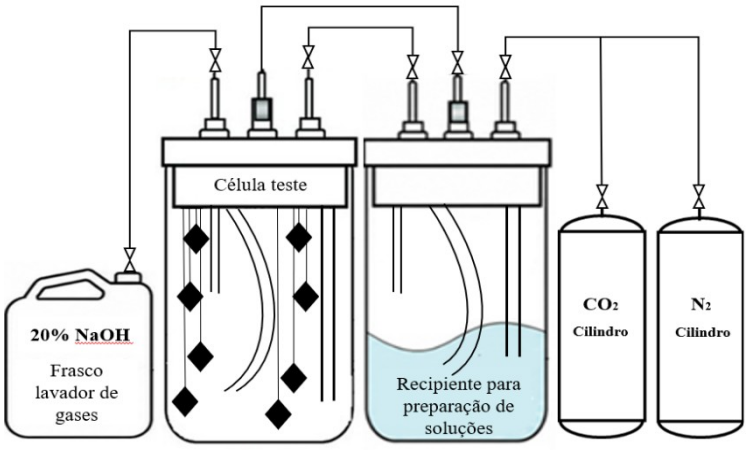
Nesse contexto, técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios X (DRX), associadas à determinação da perda de massa e da taxa de corrosão, permitem avaliar a interação entre o aço e o meio corrosivo. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento corrosivo do aço API 5L X70 exposto a meio contendo CO_2, considerando diferentes condições e tempos de exposição, com ênfase na evolução dos produtos de corrosão e sua relação com a taxa de corrosão.

Metodologia

A caracterização microestrutural do aço API 5L X70 foi realizada por meio de preparação metalográfica convencional, as amostras foram lixadas com lixas de carbeto de silício (granulometria de 100 a 2500), polidas com alumina (1 µm, 0,05 µm e 0,25 µm) e submetidas a ataque químico com Nital 2% para revelação da microestrutura. A análise foi conduzida em microscópio óptico invertido Axiovert 40 MAT, com ampliação de até 1000× e aquisição automatizada de imagens.

Para estudar a corrosão dos aços, foi realizado um ensaio de corrosão em laboratório, onde dois recipientes foram utilizados para cada teste, um contendo a solução da NACE 177-B que é composta por 50 g de NaCl, 23,85 mL de CH_3COOH, 4,1 g de CH_3COONa e 1 L de água destilada e o outro contendo 8 corpos de prova previamente pesados do mesmo tipo de aço, posicionados conforme mostrado na Figura 1. Os recipientes e a garrafa de lavagem de gases foram colocados dentro de uma capela de exaustão de laboratório equipada com um detector de CO_2.

Figura 1 - Representação esquemática da montagem do teste de corrosão.



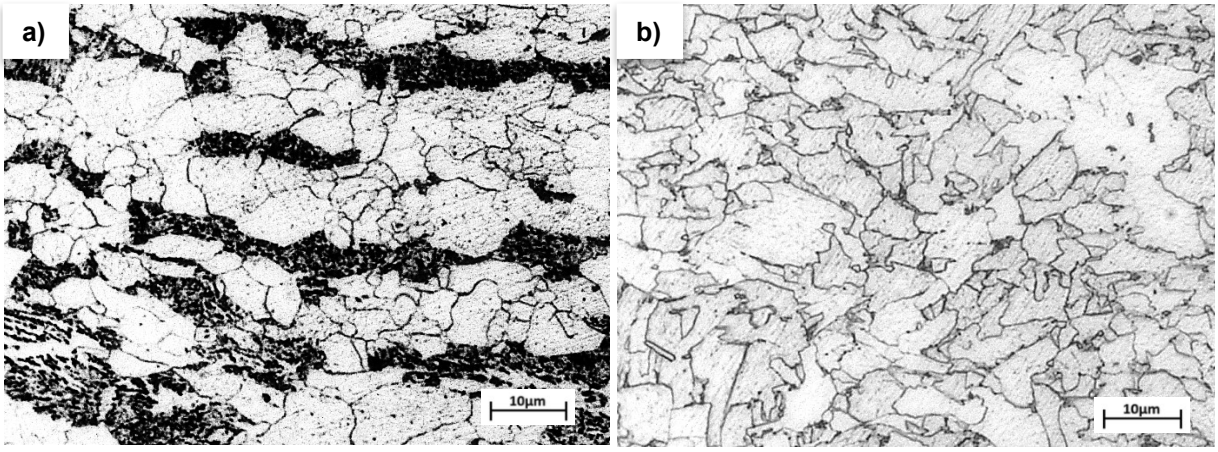
Fonte: Os autores, (2026).

Os ensaios de corrosão em meio contendo CO_2 foram realizados em tempos de exposição de 24, 72 e 120 horas, sob condições controladas. Inicialmente, o sistema foi desaerado por purga com N_2, garantindo a remoção do oxigênio dissolvido. Em seguida, a solução foi saturada com CO_2, promovendo a formação de ácido carbônico, a redução do pH e a formação de produtos como carbonato de ferro.

Resultados

A análise metalográfica do aço API 5L X70 nas condições MO e MS evidenciou diferenças marcantes na microestrutura, o X70 MO apresentou matriz ferrítica com grãos mais grosseiros e presença de bandeamento (Figura 1"a"), indicando maior ductilidade, porém menor resistência mecânica e possível heterogeneidade associada ao processamento e segregação química, enquanto o X70 MS apresentou ferrita mais refinada e homogênea, com perlita intergranular, característica de maior controle termomecânico, resultando em maior resistência mecânica devido ao refinamento de grão e maior densidade de contornos (Figura 1 "b").

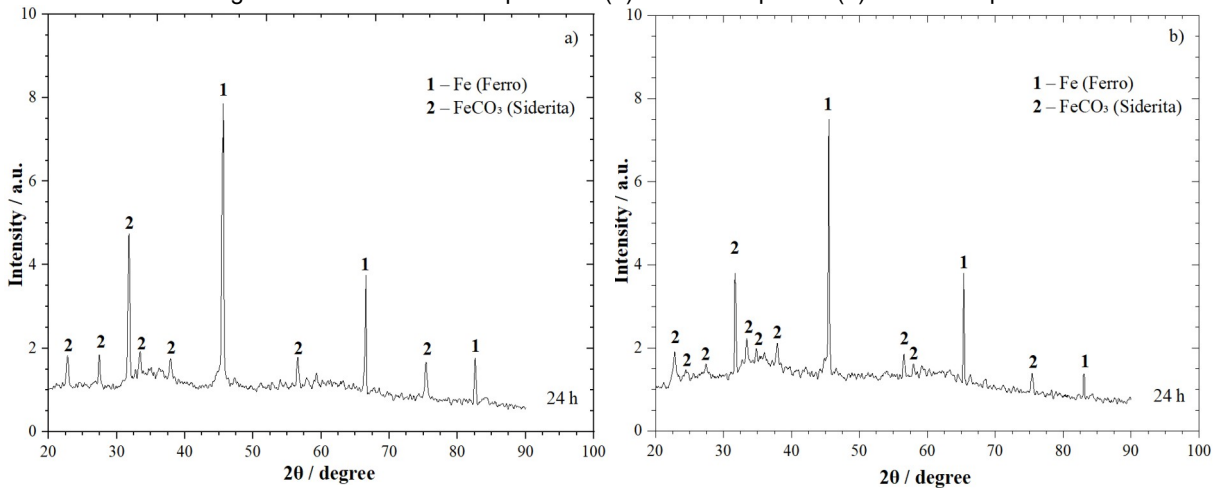
Figura 2 - Microestrutura do aço API 5L X70 MO e MS.



Fonte: Os autores (2026).

Após 24 horas de exposição em meio contendo CO_2, nas condições de meio líquido e vapor, evidenciaram a presença de picos característicos de ferro (Fe) e carbonato de ferro ($FeCO_3$). Esses resultados indicam o início da formação de produtos de corrosão sobre a superfície do aço, com destaque para a formação de siderita ($FeCO_3$), característica de processos de corrosão por CO_2. Nesse estágio inicial de exposição, o filme formado apresenta-se ainda em processo de desenvolvimento, não sendo completamente contínuo ou uniforme sobre a superfície, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Resultado DRX após 24 h (a) em meio líquido e (b) no meio vapor.

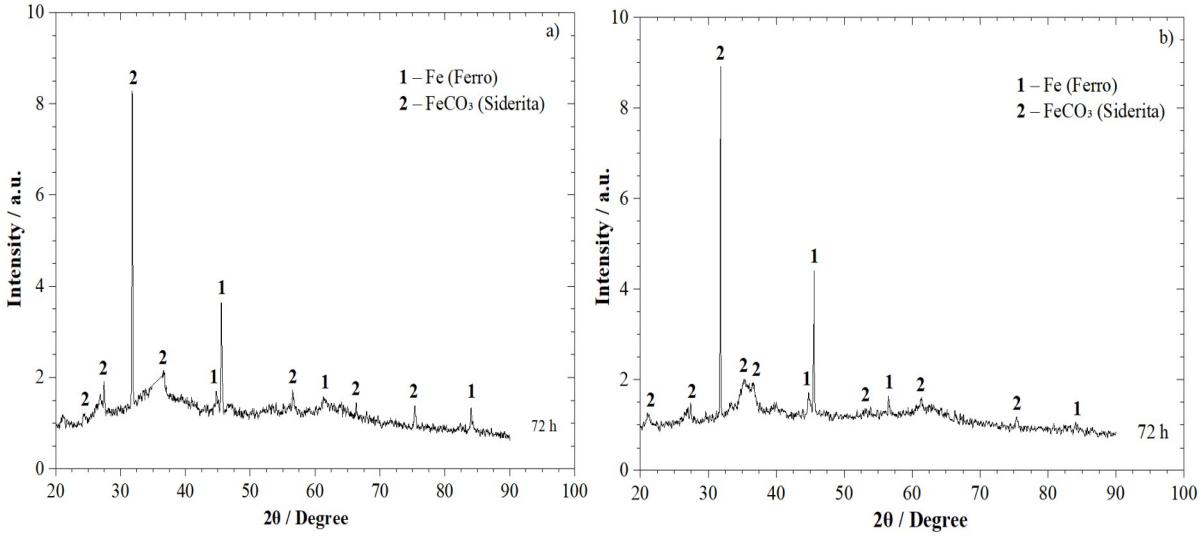


Fonte: Os autores (2026).

Após 72 horas de exposição em meio contendo CO_2, os difratogramas evidenciam uma evolução significativa dos produtos de corrosão, caracterizada pela redução da intensidade relativa dos picos associados ao ferro (Fe) e pelo aumento dos picos correspondentes à siderita ($FeCO_3$). Esse comportamento indica o avanço do processo de corrosão e a formação progressiva de produtos de

corrosão sobre a superfície do aço, com maior desenvolvimento da fase $FeCO_3$ ao longo do período de exposição, conforme demonstra a Figura 4.

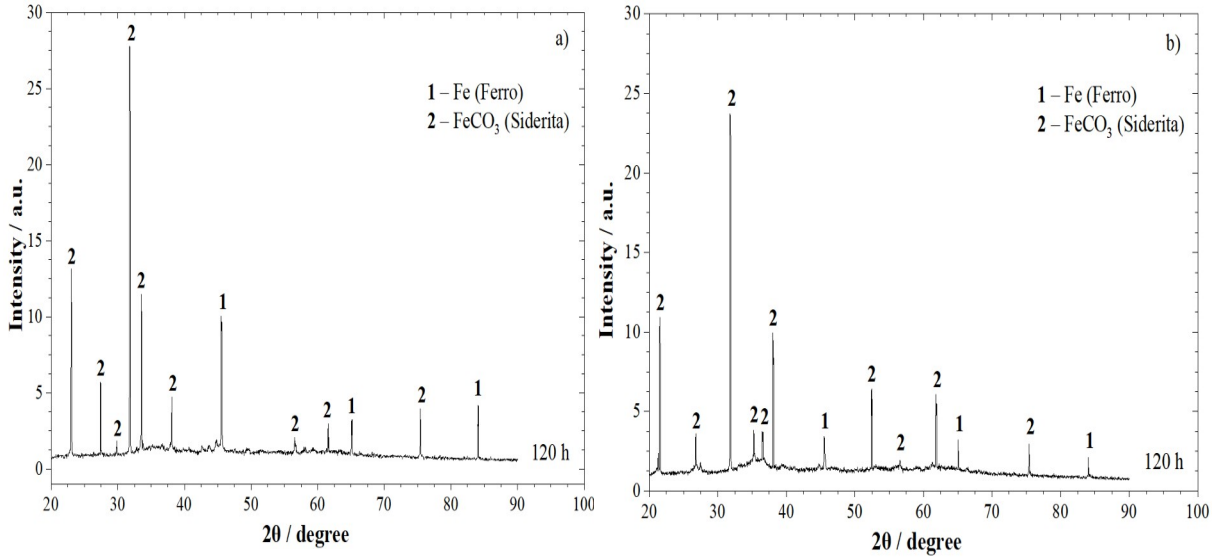
Figura 4 - Resultado DRX após 72 h (a) em meio líquido e (b) no meio vapor.



Fonte: Os autores (2026).

Com o aumento do tempo de exposição para 120 horas, observou-se uma evolução progressiva dos produtos de corrosão formados sobre as superfícies do aço API 5L X70. Em comparação aos períodos iniciais de exposição, verificou-se o desenvolvimento de uma camada de corrosão mais estruturada, com a presença de regiões de aspecto predominantemente cristalino, associadas principalmente à formação de carbonato de ferro ($FeCO_3$). Esse comportamento evidencia a progressão do processo de corrosão ao longo do tempo, com o crescimento e a consolidação da fase $FeCO_3$ na camada de produtos de corrosão, conforme apresentado na Figura 5.

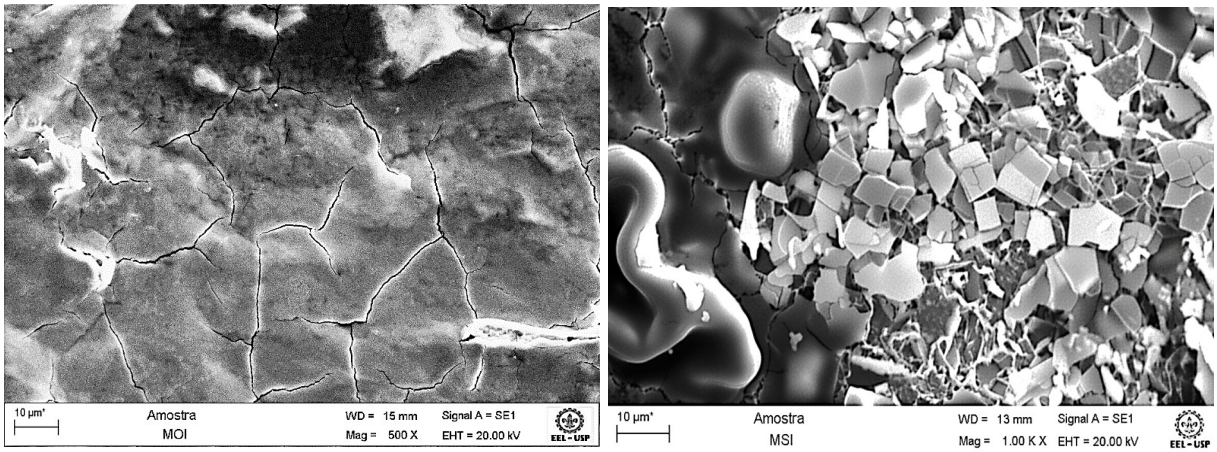
Figura 5 - Resultado DRX após 120 h (a) em meio líquido e (b) no meio vapor.



Fonte: Os autores (2026).

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciaram a evolução morfológica dos produtos de corrosão formados sobre o aço API 5L X70 ao longo da exposição em meio contendo CO_2. Após 24 horas, observaram-se filmes ainda incipientes, descontínuos e de baixa aderência, indicando a predominância do processo de dissolução ativa do substrato. Com o aumento do tempo de exposição, verificou-se o desenvolvimento progressivo da camada de corrosão, sendo observadas, após 120 horas, estruturas mais desenvolvidas e regiões de aspecto predominantemente cristalino, associadas à formação de $FeCO_3$. Esses resultados corroboram a evolução identificada por DRX, indicando o crescimento progressivo dos produtos de corrosão e a participação da siderita na formação da camada superficial.

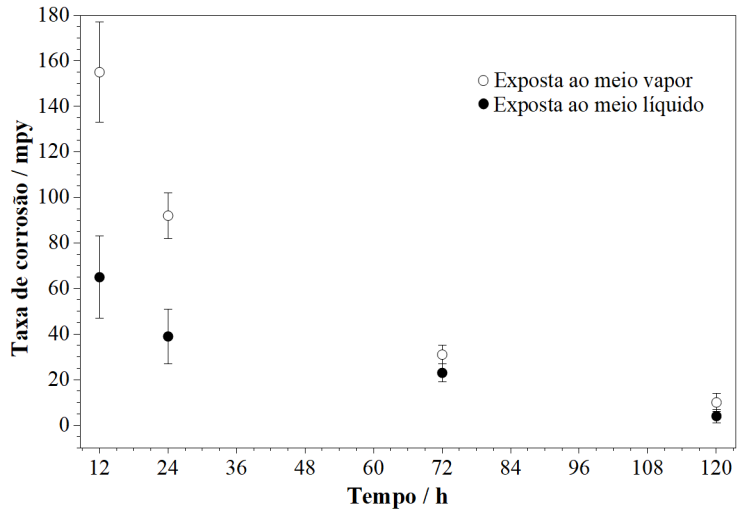
Figura 6 - Resultado MEV MS e MO após 120 h no meio líquido.



Fonte: Os autores (2026).

A análise da taxa de corrosão do aço API 5L X70 foi realizada em função do tempo de exposição, considerando as condições de fase líquida e gasosa. De modo geral, observou-se que as taxas de corrosão apresentaram comportamento dependente tanto do tempo de exposição quanto da condição de exposição, sendo, em geral, mais elevadas na fase líquida em comparação à fase gasosa. Esse comportamento está relacionado à maior disponibilidade de eletrólito e de CO_2 dissolvido na fase líquida, favorecendo a ocorrência das reações eletroquímicas associadas ao processo de corrosão, conforme demonstra a Figura 7.

Figura 7 - Resultado da taxa de corrosão após 12, 24, 72 e 120 horas de exposição ao meio líquido e vapor.



Fonte: Os autores (2026).

Discussão

Os resultados evidenciaram a evolução progressiva da corrosão do aço API 5L X70 em meio contendo CO_2. Após 24 horas, os difratogramas apresentaram Fe e $FeCO_3$, indicando o início da formação de siderita. Em 72 horas, observou-se redução relativa dos picos de Fe e aumento dos picos de $FeCO_3$, evidenciando o desenvolvimento dos produtos de corrosão por meio da interação entre Fe^{2+} e espécies carbonatadas (Smith, 2015; Kahyarian et al., 2016).

As análises por MEV corroboraram essa evolução, mostrando inicialmente filmes descontínuos e de baixa aderência e, em maiores tempos de exposição, estruturas mais desenvolvidas e cristalinas, associadas à formação de $FeCO_3$. Entretanto, a presença de siderita não garante uma camada completamente protetora, pois sua eficiência depende das características morfológicas e da continuidade do filme (Smith, 2015).

As taxas de corrosão foram, de modo geral, superiores na fase líquida, o que pode ser atribuído à maior disponibilidade de eletrólito e CO_2 dissolvido, favorecendo as reações eletroquímicas de dissolução do ferro (Popoola et al., 2013). A tendência de estabilização ou redução observada em determinadas condições pode estar relacionada ao desenvolvimento dos produtos de corrosão, especialmente do $FeCO_3$. Assim, os resultados de DRX, MEV/EDS e taxa de corrosão indicam que o comportamento do API 5L X70 é influenciado pelas condições de exposição e pela evolução da camada de produtos de corrosão, destacando-se a siderita como uma fase importante nesse processo.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que o aço API 5L X70 apresentou evolução progressiva do processo corrosivo durante a exposição ao meio contendo CO_2, sendo observada influência do tempo e da condição de exposição sobre a formação e desenvolvimento dos produtos de corrosão. As análises de DRX identificaram a presença de Fe e $FeCO_3$, com aumento da participação da siderita nos maiores tempos de exposição, indicando sua formação e crescimento progressivo sobre a superfície. As análises de MEV/EDS corroboraram essa evolução, evidenciando a transformação de produtos inicialmente descontínuos e pouco aderentes em estruturas mais desenvolvidas e com características cristalinas. As maiores taxas de corrosão foram observadas, de modo geral, na fase líquida, indicando maior severidade dessa condição devido à maior disponibilidade de eletrólito e CO_2 dissolvido. A evolução da siderita pode contribuir para a redução ou estabilização da taxa de corrosão em determinadas condições, embora sua capacidade protetora dependa das características morfológicas e da continuidade da camada formada. Dessa forma, conclui-se que o comportamento corrosivo do API 5L X70 resulta da interação entre as condições de exposição, a dissolução do substrato e a formação e evolução dos produtos de corrosão, destacando-se o $FeCO_3$ como uma das principais fases formadas durante a exposição ao meio contendo CO_2.

Referências

GODEFROID, L. B.; DIAS, L. A.; GONÇALVES, A. M. B. **Aços API: microestrutura, propriedades mecânicas e soldabilidade**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 11, n. 2, p. 147–154, 2014.

IANNuzzi, M.; BARNoush, A.; JOHNSEN, R. **Materials and corrosion trends in offshore and subsea oil and gas production.** npj Materials Degradation, v. 1, p. 2, 2017.

KAHYARIAN, Aria; ACHOUR, Mohsen; NESIC, Srdjan. **CO_2 corrosion of mild steel**. In: EL-SHERIK, A. M. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies – Production and Transmission. Cambridge: Elsevier, 2017. cap. 7, p. 149–190.

POPOOLA, A. P. I.; GREMA, A. S.; LATONA, P.; LAWAL, A. S.; BALOGUN, A. S. **Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation**. International Journal of Industrial Chemistry, v. 4, p. 35, 2013.

SMITH, L.; CRAIG, B. B. Paper No. 05646. **Practical corrosion control measures for elemental sulfur containing environments. Corrosion** [Internet], 2005. p. 20. Disponível em:

http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=NACE-05646 . Acesso em: 09 de ago. de 2026.