



Reconectando Pessoas,
Ciências, Artes e
Tecnologia

Anais do

XI Congresso de Engenharias da UFSJ

Part of ISSN 2237-0358

Conteúdo disponível em: doi.org/10.29327/1317088.11-1



CARACTERIZAÇÃO DE PRODUTOS DE CORROSÃO EM AMBIENTES COM CO₂

Bárbara Lana de Resende ⁽¹⁾ (barbaralanarc@gmail.com)

Rhuan Costa Souza ^(1, 2) (rhuanmecufsj@gmail.com)

Alysson Helton Santos Bueno ⁽¹⁾ (alyssonbueno@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – DEMEC – São João del-Rei (MG)

⁽²⁾ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – DCM – Leopoldina (MG)

RESUMO: Os dutos de exploração utilizados pela indústria de óleo e gás frequentemente transportam fluidos ricos em contaminantes corrosivos, como o gás dióxido de carbono (CO₂). Esse gás é responsável pelo mecanismo de corrosão denominado de *Sweet Corrosion*, o qual é causa de cerca de 60% das falhas relatadas nesse setor industrial. No mecanismo de corrosão por CO₂ pode ocorrer a formação de produtos de corrosão com características protetivas, de modo a reduzir a taxa de corrosão do material. Entretanto, a precipitação, estabilidade e capacidade protetiva desses filmes pode ser afetada por fatores como a temperatura e a presença de sais na solução. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da temperatura e da concentração de íons cloreto na formação de filmes de produtos de corrosão sobre a superfície de amostras de aço carbono API X65, em ambientes com CO₂. Para isso, ensaios foram realizados em uma autoclave sob pressão de 5 bar de CO₂, temperaturas de 25°C ou 120°C e concentração de 600 ppm de íons cloreto, sendo que à temperatura de 120°C também foi avaliada a concentração de 60000 ppm desses íons. Os ensaios tiveram duração total de 48 horas. Anteriormente à realização dos ensaios, a caracterização da microestrutura do aço API X65 foi realizada através da Microscopia Óptica. Após a realização dos ensaios, as amostras foram caracterizadas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com a finalidade de verificar se houve a formação de produtos de corrosão sobre a superfície metálica, bem como analisar a morfologia dos filmes formados. Os resultados mostraram que a formação de filmes de produtos de corrosão é favorecida em temperaturas elevadas, uma vez que na condição ensaiada à temperatura de 25°C não houve formação de filme, enquanto nas condições ensaiadas à temperatura de 120°C foram observados cristais com morfologia semelhante ao carbonato de ferro (siderita), produto de corrosão característico da *sweet corrosion*. Além disso, verificou-se que a concentração de íons cloreto influenciou na morfologia dos cristais de siderita precipitados sobre a superfície metálica na temperatura de 120°C, de modo que na condição ensaiada com 600 ppm de íons cloreto os cristais de carbonato de ferro fossem maiores do que os cristais formados na condição ensaiada com 60000 ppm.

PALAVRAS-CHAVE: *sweet corrosion*, produtos de corrosão, temperatura, cloreto.



Os autores são os únicos detentores dos direitos autorais.

São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

25-29 de setembro de 2023

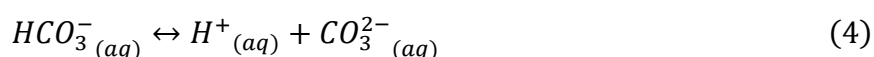
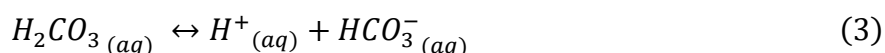
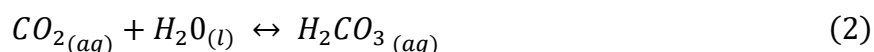
[B.L. Resende](#), [C.M. Vale](#) & [R.J. Silva](#) (Organização & Edição)

1. INTRODUÇÃO

Os dutos utilizados pela indústria petrolífera são comumente fabricados com ligas de aço carbono (OBOT *et al.*, 2023^a), principalmente devido a sua relação custo-benefício (SOUZA, 2022). Tais tubulações transportam fluidos que contêm contaminantes corrosivos como os gases dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S), bem como sais e hidrocarbonetos (SANTOS *et al.*, 2021). Dessa forma, o aço carbono é continuamente exposto a esses contaminantes corrosivos, os quais podem favorecer a corrosão interna das tubulações e, consequentemente, provocar a falha dessas (ASKARI *et al.*, 2019).

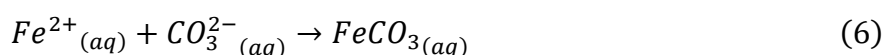
O mecanismo de corrosão gerado pelo CO₂ (*Sweet Corrosion*) é frequentemente encontrado nas tubulações do setor petrolífero, uma vez que esse gás se faz presente nos ambientes de exploração tanto pela geologia natural quanto pela sua injeção nos poços como método de recuperação de petróleo (FERREIRA *et al.*, 2016; OBOT *et al.*, 2023^b). Além disso, é importante destacar que esse tipo de corrosão é responsável por cerca de 60% das falhas relatadas no setor de óleo e gás (LOPES *et al.*, 2003).

Segundo Barker *et al.* (2018), a *sweet corrosion* é consequência da dissolução do dióxido de carbono em água (reação 1), a qual proporciona a formação do ácido carbônico (reação 2). Esse ácido se caracteriza por se dissociar rapidamente em contato com superfícies metálicas (MOZART, 2016; SOUZA, 2017), de modo a favorecer a formação dos íons bicarbonato, carbonato e hidrônio no meio (reações 3 e 4). Dessa forma, segundo Gupta *et al.* (2022), há um aumento da cinética das reações eletroquímicas entre o aço e o meio e, consequentemente, ocorre a dissolução anódica do ferro (reação 5).



Segundo Obot (2020), os íons ferrosos, provenientes da reação anódica (reação 5), reagem com os íons carbonato (reação 4) formando o produto de corrosão denominado de Carbonato de

Ferro ou Siderita (FeCO_3), processo apresentado na reação 6. Quando o limite de saturação desse composto é ultrapassado, pode ocorrer a precipitação da siderita sólida sobre a superfície metálica (reação 7) e, assim, dependendo das condições do meio, pode-se formar uma camada com características protetivas – a qual atua impedindo a difusão das espécies envolvidas no processo corrosivo e, conseqüentemente, diminuindo a taxa de corrosão do metal (NESIC, 2007; OLVERA-MARTÍNEZ *et al.*, 2015).

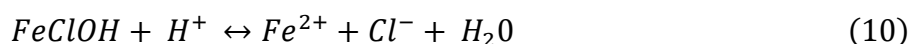
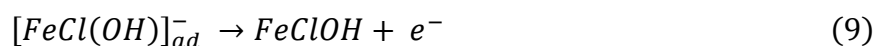
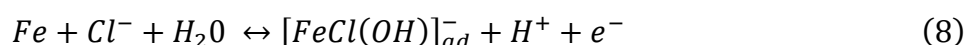


Fatores como a temperatura do meio, pressão parcial de CO_2 , pH da solução e química da água podem influenciar na morfologia, estabilidade e capacidade protetiva do carbonato de ferro sobre o metal (NESIC, 2007; OBOT *et al.*, 2020; BARKER *et al.*, 2018). De acordo com os autores Lee (2004) e Xhanari *et al.* (2021), a solubilidade da siderita diminui para valores de pH entre 5 e 7, de modo a favorecer a formação de uma camada uniforme e com características protetivas sobre a superfície metálica. Ademais, segundo Yin *et al.* (2008), em menores valores de pH ocorre uma maior taxa de corrosão dos metais, uma vez que há uma maior concentração de íons H^+ no meio.

Sobre a influência da temperatura, de acordo com Silva (2012), em condições de temperatura favoráveis, a corrosão causada pelo CO_2 pode ocasionar a formação de produtos de corrosão estáveis, que proporcionam a proteção do metal e resultam em uma baixa taxa de corrosão. No entanto, em certas situações, podem ser gerados produtos de corrosão instáveis ou porosos, o que pode ser prejudicial ao material, uma vez que pode haver a formação de um par galvânico entre o precipitado e o metal exposto ao meio corrosivo. Para Nesic (2007), o aumento da temperatura acelera a cinética de formação do filme de carbonato de ferro e, conseqüentemente, reduz a taxa de corrosão. Segundo Carreira (2016), temperaturas elevadas (maiores que 60°C) favorecem a formação de filmes densos e cristalinos de siderita, de forma a promover a proteção do metal.

Segundo Almeida (2014), também pode haver a presença de íons cloreto (Cl^-) nos fluidos transportados pela indústria de óleo e gás, uma vez que a técnica de injeção da água do mar no interior dos poços é utilizada com a finalidade de extrair petróleo. Na literatura, é relatado que a presença desse íon no meio pode atuar reduzindo a solubilidade do dióxido de carbono, de modo

a proporcionar menores taxas de corrosão visto que a formação do ácido carbônico é reduzida (ALMEIDA *et al.*, 2016; HAN *et al.*, 2011). Além disso, segundo Liu *et al.* (2014), os íons cloreto podem provocar o deslocamento dos produtos de corrosão aderidos sobre a superfície metálica, uma vez que esse íon possui um raio pequeno e consegue adentrar o filme. Além disso, segundo esse mesmo autor, os íons Cl^- podem alterar a morfologia desses produtos. Por outro lado, Zhang *et al.* (2016) relata que o aumento do teor de íons cloreto no meio intensifica o processo corrosivo, uma vez que a adesão da siderita é prejudicada e o meio corrosivo pode agir nas falhas do filme, aumentando a taxa de corrosão dessas áreas. As reações 8, 9 e 10 apresentam o processo de ativação dos íons cloreto e, consequentemente, a dissolução anódica do metal.



Nesse sentido, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a formação dos filmes de produtos de corrosão sobre a superfície das amostras de aço carbono API X65, sob diferentes temperaturas e teores de cloreto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de estudar o mecanismo de corrosão causado pelo dióxido de carbono (CO_2), ensaios foram realizados em uma autoclave sob pressão de 5 bar de CO_2 , temperaturas de 25°C ou 120°C e sem presença de oxigênio no sistema. A Figura 1 esquematiza o sistema utilizado para a realização dos ensaios, onde: (1) entrada de gás na célula de condicionamento; (2) válvula de segurança; (3) entrada de gás na célula de ensaio; (4) saída da solução (após término do ensaio); (5) manômetro; (6) amostras eletroquímicas (metodologia não apresentada nesse estudo); (7) tubo em aço para termopar; (8) amostras de perda de massa (utilizadas para caracterização dos produtos de corrosão); (9) purga da célula de ensaio; (10) linha de transferência de solução e (11) purga da célula de condicionamento.

As soluções utilizadas para a realização dos ensaios foram preparadas com 1,8 litros de água destilada e diferentes teores de íons cloreto, conforme é apresentado na tabela de condições de ensaio (Tabela 1). Após o preparo da solução, essa foi armazenada na célula de

condicionamento, onde foi pré-aquecida à temperatura de 50°C (apenas nas condições C2 e C3) e foi borbulhado o gás dióxido de carbono por duas horas, a fim de desaerar a solução. Posteriormente, a solução foi transferida para a célula de ensaio, onde foi pressurizada à pressão de 5 bar de CO₂ e aquecida até a temperatura de ensaio (Tabela 1). Os ensaios das condições avaliadas neste trabalho tiveram duração total de 48 h.

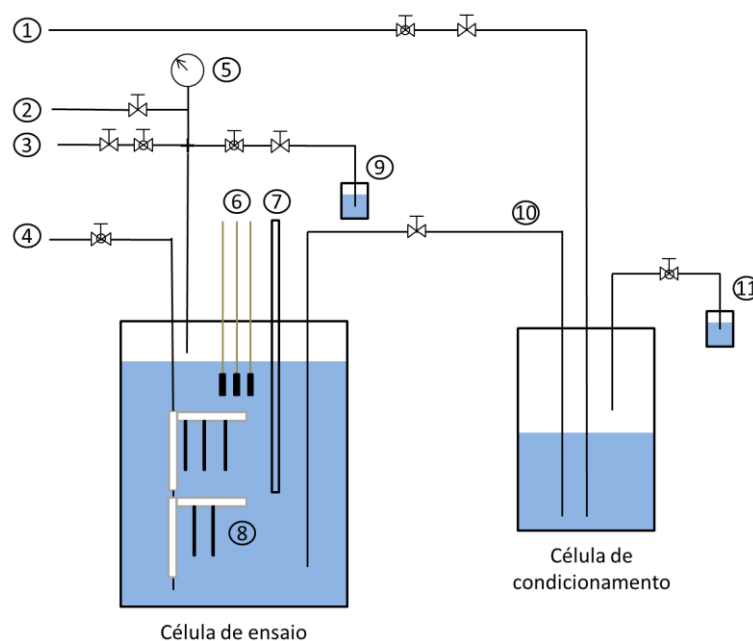


FIGURA 1. Autoclave utilizada. **Fonte:** Autoria própria.

TABELA 1. Condições de ensaio.

Condição	Teor de cloreto	Temperatura
C1	600 ppm	25°C
C2	600 ppm	120°C
C3	60.000 ppm	120°C

2.1. Caracterização da microestrutura do aço

Antes da realização dos ensaios, a caracterização metalográfica do aço API X65 foi realizada através de um microscópio óptico de luz refletida da marca Olympus, modelo BX51. Para isso, as amostras foram preparadas até a lixa #1500, polidas com alumina 1 e 0,3 µm e atacadas com solução de Nital 3% por 10 segundos.

2.2. Preparação das amostras

Em cada ensaio, foram utilizadas cinco amostras retangulares de aço API X65, com dimensões de 70x20x2 mm³, a fim de avaliar a precipitação de produtos de corrosão sobre a superfície metálica no processo de *sweet corrosion* (amostras de perda de massa). Essas amostras foram preparadas até a lixa #600, lavadas com água destilada, secas com ar quente e armazenadas em um dessecador a vácuo até a realização do ensaio.

2.3. Caracterização dos produtos de corrosão

Após a realização dos ensaios, a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada, através do microscópio HITACHI TM 3000, com o objetivo de verificar se houve a precipitação dos produtos de corrosão característicos da *sweet corrosion* sobre a superfície das amostras e, em caso positivo, analisar a morfologia dos cristais formados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, será apresentada a caracterização da microestrutura do aço que foi utilizado para a realização dos ensaios em meios com CO₂. Posteriormente, os produtos de corrosão formados sobre as amostras serão analisados quanto a sua morfologia e composição. As discussões acerca dos resultados obtidos serão realizadas ao longo da exposição desses.

3.1. Caracterização microestrutural do aço

A Figura 2 apresenta a caracterização metalográfica do aço API X65, onde é possível identificar ferrita e perlita distribuídas uniformemente. Também é possível perceber que as colônias de perlita fina (coloração escura) estão localizadas preferencialmente nos contornos de grão de ferrita (coloração clara).

Na literatura (FARELAS *et al.*, 2010; SUN *et al.*, 2012; ZHAO *et al.*, 2016), é relatado que a liberação de íons ferrosos (Fe²⁺) durante a reação anódica do aço (reação 5) é proveniente da dissolução da ferrita da microestrutura do material. Em sua pesquisa, Sun *et al.* (2012) explica que a ferrita reage anteriormente às porções de cementita (Fe₃C) devido ao fato da ferrita possuir um potencial mais eletronegativo. Consequentemente, a área exposta de cementita aumenta à medida em que o processo corrosivo avança, de modo a elevar a força eletromotriz desse par

galvânico e favorecer a corrosão da fase ferrítica. Assim, ocorre a formação de uma camada residual de cementita sobre a superfície metálica, a qual é relatada na literatura como sendo frágil, porosa e com baixa capacidade protetiva.

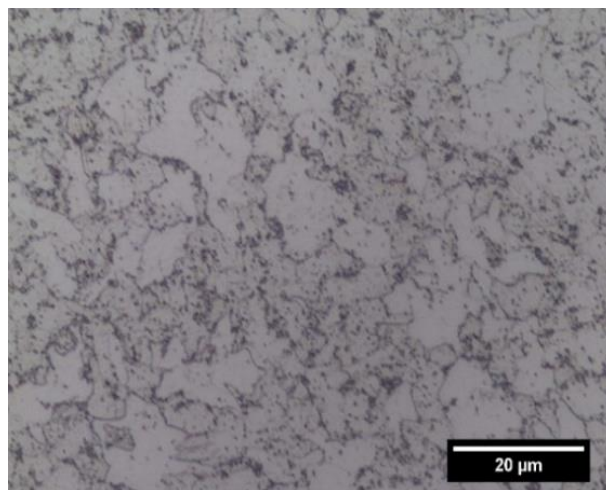


FIGURA 2. Microestrutura do aço API X65. **Fonte:** Autoria própria.

Alguns autores (DUGSTAD, 1998; CROLET *et al.*, 1999) ainda relatam a ocorrência de um fenômeno denominado "acidificação localizada" devido ao fato de as reações catódicas ocorrerem nas proximidades das fases de cementita enquanto as reações anódicas ocorrem próximas às fases de ferrita. Dessa forma, há uma modificação do eletrólito nessas áreas microscópicas, de modo que nos pontos catódicos o meio aquoso se torna mais alcalino e nos pontos anódicos tende a ser mais ácido. Consequentemente, a continuidade do processo corrosivo é favorecida.

Em contrapartida, de acordo com Kermani (2014), após a camada de cementita residual atingir certa espessura, essa pode atuar como uma barreira para o transporte de íons da solução para a superfície ativa do aço e vice-versa. Além disso, esse autor relata que a camada de Fe_3C é uma região favorável para a ancoragem dos cristais de FeCO_3 que podem ser formados durante o processo corrosivo de *sweet corrosion*.

3.2. Caracterização dos produtos de corrosão

A Figura 3 apresenta as imagens de MEV da superfície das amostras ensaiadas nas condições C1, C2 e C3, com ampliações de 400x.

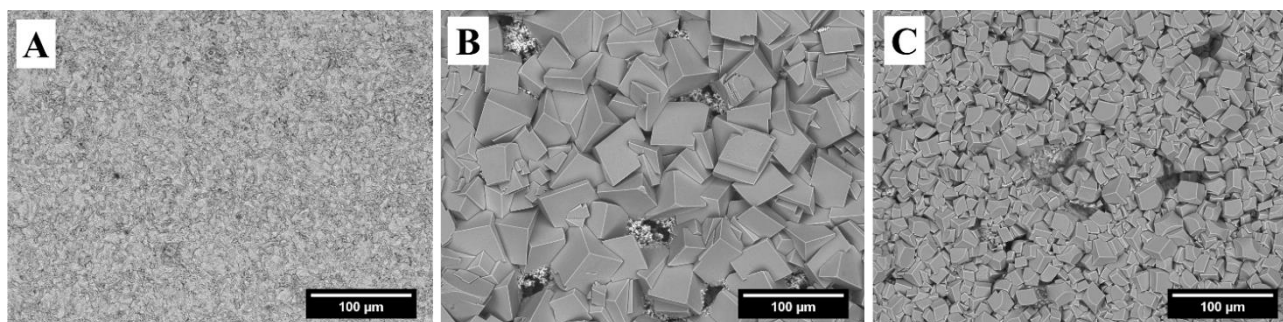


FIGURA 3. Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras analisadas nas condições (A) C1, (B) C2 e (C) C3. **Fonte:** Autoria própria.

Na Figura 3-A, é possível observar que não ocorreu a precipitação de produtos de corrosão sobre a superfície do material à temperatura de 25°C. Tal fato corrobora com a literatura, uma vez que a formação de uma camada densa de produtos de corrosão sobre o metal é relatada em temperaturas superiores à 60°C (NESIC, 2007; CARREIRA, 2016). Além disso, verifica-se que houve uma dissolução uniforme da superfície do aço na temperatura de 25°C.

Em contrapartida, nas Figuras 3-B e 3-C verifica-se a presença de produtos de corrosão com morfologia semelhante à do carbonato de ferro sobre a superfície metálica (BARKER *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2019). Esse fato reforça que a formação de um filme denso e cristalino de siderita ocorre em altas temperaturas, conforme discutido anteriormente. Além disso, é possível perceber que o filme de produto de corrosão formado sobre a superfície do aço apresenta porosidades tanto na condição C2 quanto na condição C3, de forma a deixar parte do substrato do metal exposto ao mecanismo corrosivo.

Na literatura é relatado que, em ambientes com a presença do gás CO₂, a temperatura desempenha um papel crucial nas reações e nos mecanismos corrosivos. Seu efeito é especialmente significativo na solubilidade do gás dióxido de carbono em soluções aquosas e, conseqüentemente, na ionização do ácido carbônico (ALMEIDA *et al.*, 2016). Essa alteração, por sua vez, afeta a concentração das espécies iônicas presentes na solução, podendo modificar o pH do meio.

Estudos realizados por Elgaddafi *et al.* (2015) e Zheng *et al.* (2015) destacaram que, na ausência de precipitação e formação de produtos de corrosão sobre a superfície metálica – o que normalmente ocorre na fase inicial dos processos corrosivos, a temperatura acelera a cinética de todos os processos envolvidos. Isso inclui reações eletroquímicas e processos de transporte de

massa entre a solução e o metal. Por esse motivo, na condição C1 – onde não houve a precipitação de produtos de corrosão (Figura 3-A) – o material apresenta dissolução ativa mas, possivelmente, sofre uma taxa de corrosão menor que as condições ensaiadas em maiores temperaturas.

É evidente que o aumento da temperatura tem um efeito favorável na precipitação de produtos de corrosão (Figuras 3-A e 3-B). Esse aumento na precipitação de cristais de FeCO_3 com a temperatura está de acordo com os estudos realizados por Tanupabrungsun *et al.* (2013), nos quais as taxas de corrosão iniciais foram significativamente mais altas para todas as condições avaliadas pelos pesquisadores. Esse processo corrosivo inicial resulta na liberação de maiores concentrações de íons reagentes dos produtos de corrosão na solução (reação 6), favorecendo a cinética da reação de formação de FeCO_3 .

A Figura 4 mostra uma ampliação de 1200x das amostras ensaiadas nas condições C1 e C2, através da qual é possível observar a superfície sem a formação de filme e com o substrato do metal deteriorado na condição ensaiada à 25°C (Figura 4-A), bem como os cristais de FeCO_3 precipitados na condição a 120°C (Figura 4-B).

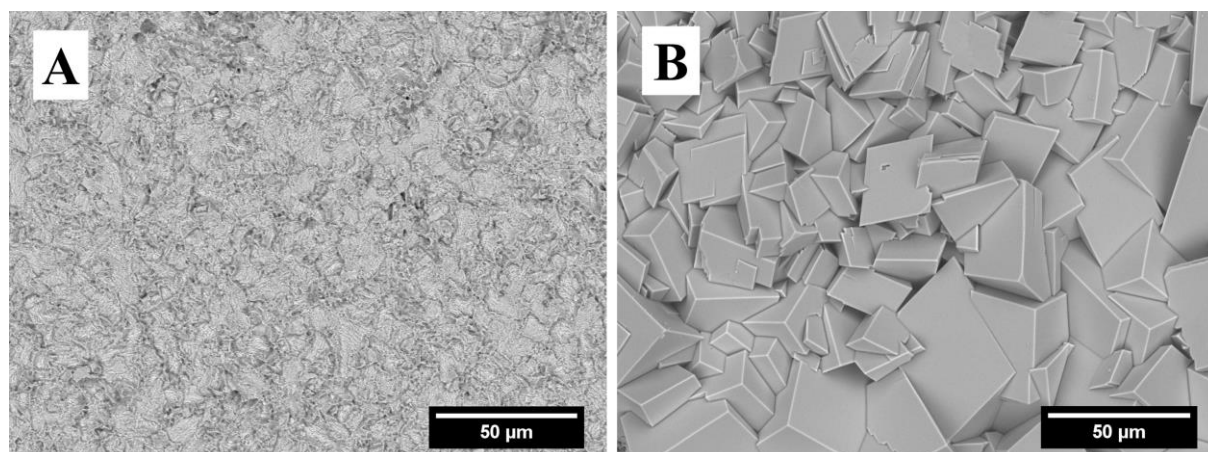


FIGURA 4. Ampliações de 1200x da superfície das amostras ensaiadas nas condições (A) C1 e (B) C2. **Fonte:** Autoria própria.

Com a formação de filmes de produtos de corrosão sobre a superfície metálica, a taxa de corrosão é reduzida pois o carbonato de ferro atua como uma barreira ao contato do substrato ativo com o eletrólito, impedindo a difusão dos íons do substrato para a solução. Segundo Elgaddafi *et al.* (2015), a explicação para a maior facilidade de precipitação e capacidade de proteção do

FeCO_3 com o aumento da temperatura reside na baixa solubilidade do íon carbonato num meio aquoso quando as temperaturas são mais elevadas.

Ao se analisar a condição C3 (Figura 3-C), observa-se que o aumento do teor de cloreto influenciou principalmente na morfologia dos cristais de FeCO_3 . De acordo com Han *et al.* (2011), o cloreto diminui a solubilidade do CO_2 na solução, ocasionando uma redução das taxas de corrosão. Com uma menor quantidade de CO_2 dissolvido, menor será a quantidade de ácido carbônico (H_2CO_3) no meio, e conseqüentemente há uma redução das taxas de corrosão, uma vez que o aço está sujeito à condições menos agressivas. O cloreto alterou significativamente a morfologia e o tamanho dos cristais de carbonato de ferro precipitados sobre a superfície, conforme pode ser observado ao comparar as Figuras 4-B e 5. Essa influência dos íons cloreto na morfologia dos produtos de corrosão é relatada por Liu *et al.* (2014).

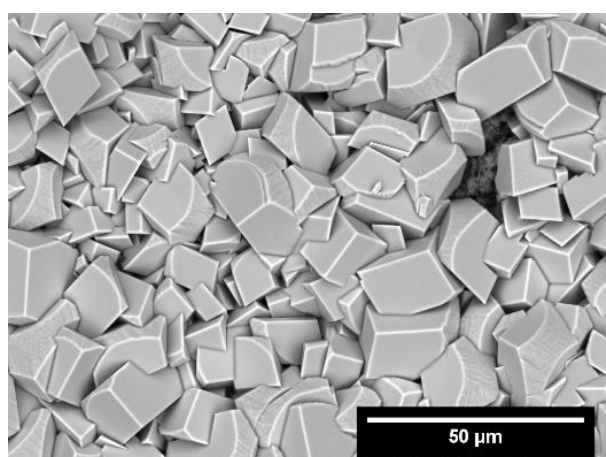


FIGURA 5. Ampliação da superfície da amostra ensaiada na condição C3. **Fonte:** Autoria própria.

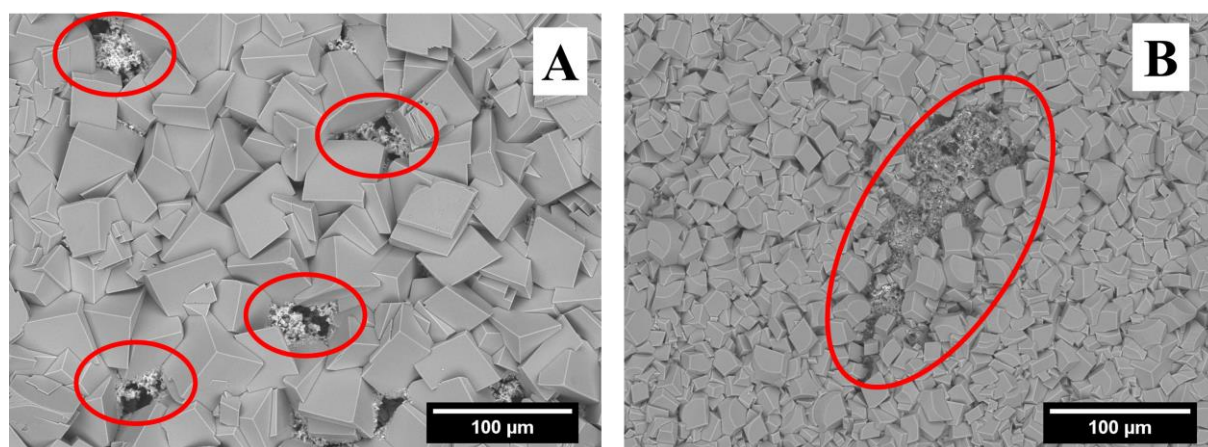


FIGURA 6. Porosidades nos filmes formados nas condições (A) C2 e (B) C3. **Fonte:** Autoria própria.

É importante destacar que os filmes formados sobre a superfície metálica nas condições ensaiadas à 120°C (condições C2 e C3) podem ter contribuído para com a redução das taxas de corrosão do metal. Entretanto, os filmes formados nessas condições, possivelmente, não são protetivos o suficiente para mitigar o mecanismo corrosivo, uma vez que foram identificados poros nesses filmes que mantinham parte do substrato exposto ao meio corrosivo (Figura 6).

4. CONCLUSÕES

- Na condição avaliada à temperatura de 25°C não houve a formação de um filme de produto de corrosão sobre o metal. Em contrapartida, nas condições avaliadas à temperatura de 120°C verificou-se a presença de um filme com morfologia semelhante a siderita. Dessa forma, verificou-se que a formação da camada de carbonato de ferro é favorecida em maiores temperaturas, conforme os relatos presentes na literatura.
- Observou-se que o filme de produto de corrosão formado nas duas condições ensaiadas à temperatura de 120°C apresenta porosidades, de modo a expor parte do substrato ao meio corrosivo. Tal fato pode representar que o filme de carbonato de ferro formado sobre as amostras possivelmente atuou reduzindo a taxa de corrosão do metal mas não é capaz de cessar totalmente o processo corrosivo.
- Verificou-se que os cristais de siderita formados nas condições ensaiadas à 120°C possuem diferenças quanto ao seu tamanho, deixando evidente a influência da concentração de íons cloreto na morfologia dos cristais de carbonato de ferro precipitados sobre o material.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela FAPEMIG (processo APQ-02540-21) e pelo CNPq (processos 405505/2021-3, 150663/2022-6 e 125349/2022-0), os quais possibilitaram o desenvolvimento deste estudo.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. C.; CYSNE, P. M. P.; SILVA, P. V. G.; Garcia, R. F.; BANDEIRA, M. C. E.; MATTOS, O. R. O efeito da alta concentração de cloreto na corrosão pelo CO₂. INTERCORR 2016, 2016.

ALMEIDA, V. M. D. L. Estudo da Influência do Número de Acidez Total e Teor de Enxofre Total nas Frações Destiladas no Processo de Corrosão em Aços do Tipo AISI 1020 e AISI 316. Dissertação de Mestrado em Química – Universidade Federal do Espírito Santo, 125 p., 2014.

ASKARI, M.; ALIOFKHAZRAEI, M.; AFROUKHTEH, S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019.

BARKER, R.; BURKLE, D.; CHARPENTIER, T.; THOMPSON, H.; NEVILLE, A. A review of iron carbonate (FeCO₃) formation in the oil and gas industry. *Corrosion Science*, 2018.

CARREIRA, A. Estudo da influência de diferentes parâmetros na formação do filme protetor no aço-carbono API 5L X-65. Dissertação de Mestrado em Química Tecnológica - Universidade de Lisboa, 94 p., 2016.

CROLET, J. L.; THEVENOT, N.; DUGSTAD, A. Role of Free Acetic Acid on the CO₂ Corrosion of Steels. *Corrosion*, 1999.

DUGSTAD, A. Mechanism of Protective Film Formation During CO₂ Corrosion of Carbon Steel. *Corrosion*, 1998.

ELGADDAFI, R. *et al.* Modeling and experimental study of CO₂ corrosion on carbon steel at elevated pressure and temperature. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015.

FARELAS, F.; GALICIA, M.; BROWN, B.; NESIC, S.; CASTANEDA, H. Evolution of dissolution processes at the interface of carbon steel corroding in a CO₂ environment studied by EIS. *Corrosion Science*, 2010.

FERREIRA, L. R. M.; KLOK, S. M., PONTE, H. A.; FARELAS, F. A formação da camada protetora de FeCO₃ e o controle da corrosão por CO₂ em condições de fluxo turbulento. *Química Nova*, 2016.

GUPTA, K. K.; HARATIAN, S.; GUPTA, S.; MISHIN, O. V.; AMBAT, R. The effect of cooling rate-induced microstructural changes on CO₂ corrosion of low alloy steel. *Corrosion Science*, 2022.

HAN, J.; CAREY, J.W.; ZHANG, J. Effect of sodium chloride on corrosion of mild steel in CO₂-saturated brines. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011.

KERMANI, B. Depiction of Metallurgical Parameters as Governing CO₂ Corrosion. *Corrosion*, 2014.
LEE, K. A mechanistic modelling of CO₂ corrosion of mild steel in the presence of H₂S. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - *Ohio State University*, 156 p., 2004.

LIU, Q. Y.; MAO, L. J.; ZHOU, S. W. Effects of chloride content on CO₂ corrosion of carbon steel in simulated oil and gas well environments. *Corrosion Science*, 2014.

LOPEZ, D. A.; PEREZ, T.; SIMISON, S. N. The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO₂ corrosion. A state-of-the-art appraisal. *Materials and Design*, 2003.

MOZART, P. C. Formação da camada de carbonato de ferro (FeCO₃) na corrosão com dióxido de carbono (CO₂). Departamento de Engenharia Química e de Materiais, PUC-RIO, 2016.

NESIC, S. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – A review. *Corrosion Science*, 2007.

OBOT, I. B.; ONYEACHU, I. B.; UMOREN, S. A. QURAISHI, M. A.; SOROUR, A. A.; CHEN, T.; ALJEABAN, N.; WANG, Q. High temperature sweet corrosion and inhibition in the oil and gas industry: Progress, challenges and future perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020.

OBOT, I. B.; SOROUR, A. A.; MALEDE, Y. C.; CHEN, T.; WANG, Q.; ALJEABAN, N. A review study on the challenges and progress of corrosion inhibitor testing under extreme conditions in the oil and gas industries. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023^b.

OBOT, I. B.; SOROUR, A. A.; VERMA, C.; AL-KHALDI, A.; RUSHAID, A. S. Key parameters affecting sweet and sour corrosion: Impact on corrosion risk assessment and inhibition. *Engineering Failure Analysis*, 2023^a.

OLVERA-MARTÍNEZ, M. E.; MENDOZA-FLORES, J.; GENESCA, J. CO₂ corrosion control in steel pipelines. Influence of turbulent flow on the performance of corrosion inhibitors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015.

SANTOS, B. A. F.; SERENARIO, M. E. D.; SOUZA, R. C.; OLIVEIRA, J. R.; VAZ, G. L.; GOMES, J. A. C. P.; BUENO, A. H. S. The electrolyte renewal effect on the corrosion mechanisms of API X65 carbon steel under sweet and sour environments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021.

SILVA, V. G. Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão do Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750 Soldado pelo Processo TIG Orbital em meios contendo Cl⁻, CO₂ e H₂S. Dissertação de mestrado – Universidade Federal Fluminense, 94 p., 2012.

SOUZA, R. C. Avaliação da formação dos filmes de FeCO₃ e FeS na corrosão do aço carbono API X65 em condições de pressão e temperatura elevadas, contendo CO₂ e H₂S. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de São João del-Rei, 119 p., 2017.

SOUZA, R. C. Avaliação experimental e computacional do sistema de gaiola rotatória empregado na corrosão do aço API X65 em meios contendo CO₂ e H₂S. Tese de Doutorado em Física e Química dos Materiais – Universidade Federal de São João del-Rei, 260 p., 2022.

SOUZA, R. C.; SANTOS, B. A. F.; GONÇALVES, M.C.; MENDES, E.P.; SIMÕES, T.A.; OLIVEIRA, J.R.; VAZ, G.L.; CALDEIRA, L.; GOMES, J.A.C.P.; BUENO, A.H. The role of temperature and H₂S

(thiosulfate) on the corrosion products of API X65 carbon steel exposed to sweet environment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019.

SUN, J.B.; ZHANG, G.A.; LIU, W.; LU, M.X. The formation mechanism of corrosion scale and electrochemical characteristic of low alloy steel in carbon dioxide-saturated solution. *Corrosion Science*, 2012.

TANUPABRUNGSUN, T.; BROWN, B.; NESIC, S. Effect of pH on CO₂ Corrosion of Mild Steel at Elevated Temperatures. *Nace Corosion*, 2013.

XHANARI, K.; WANG, Y.; YANG, Z.; FINŠGAR, M. A Review of Recent Advances in the Inhibition of Sweet Corrosion. *The Chemical Record*, 2021.

YIN, Z. F. *et al.* Corrosion behaviour of SM 80SS tube steel in stimulant solution containing H₂S and CO₂. *Electrochimica Acta*, 2008.

ZHANG *et al.* Effect of Cl-accumulation on corrosion behavior of steels in H₂S/CO₂methyldiethanolamine (MDEA) gas sweetening aqueous solution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016.

ZHAO, W.; ZOU, Y.; MATSUDA, K.; ZOU, Z. Characterization of the effect of hydrogen sulfide on the corrosion of X80 pipeline steel in saline solution. *Corrosion Science*, 2016.

ZHENG, Y.; NING, J.; BROWN, B.; YOUNG, S. N. D. Mechanistic study of the effect of iron sulfide layers on hydrogen sulfide corrosion of carbon steel. *Nace Corosion*, 2015.

CHARACTERIZATION OF CORROSION PRODUCTS IN CO₂ ENVIRONMENTS

Bárbara Lana de Resende ⁽¹⁾ (barbaralanarc@gmail.com)

Rhuan Costa Souza ^(1, 2) (rhuanmecufsj@gmail.com)

Alysson Helton Santos Bueno ⁽¹⁾ (alyssonbueno@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Federal University of São João del-Rei (UFSJ) – DEMEC – São João del-Rei (MG), Brazil

⁽²⁾ Federal Center for Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG) – DCM – Leopoldina (MG), Brazil

ABSTRACT: Exploration pipelines in the oil and gas industries usually transport fluids with high concentrations of corrosive contaminants such as carbon dioxide gas (CO₂). This gas is responsible for the corrosion mechanism called Sweet Corrosion, which is the cause of about 60% of reported failures in the industrial sector. Under sweet corrosion, the formation of corrosion products can occur, and a possible product of interest consists of a protective film that may reduce the corrosion rate of the material. The precipitation, stability, and protective capacity of this film can be influenced by factors such as temperature and the presence of salts in the solution. In this sense, the goal of this work is to evaluate the influence of temperature and concentration of chloride ions on the formation of corrosion product films on the surface of API X65 carbon steel samples in environments containing CO₂. For this, tests were carried out in an autoclave under pressure of 5 bar of CO₂ and temperatures of 25°C or 120°C. Under the experimental condition at 25°C, the influence of chloride ions on a concentration of 600 ppm was investigated; whilst for the 120°C condition the concentrations of 600 ppm and 60000 ppm were evaluated. All the tests lasted 48 hours. Before carrying out the tests, the characterization of the API X65 steel microstructure was carried out using Optical Microscopy. After the completion of the tests, the samples were characterized using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique to verify whether there was a formation of corrosion products on the metallic surface, as well as to analyze the morphology of the formed films. The results showed that the formation of films of corrosion products is favored at high temperatures, since in the condition tested at a temperature of 25°C there was no film formation, while in the conditions tested at a temperature of 120°C crystals with morphology similar to iron carbonate (siderite), a characteristic product of sweet corrosion. In addition, it was verified that the concentration of chloride ions influenced the morphology of the siderite crystals precipitated on the metallic surface at a temperature of 120°C, so that in the condition tested with 600 ppm of chloride ions, the iron carbonate crystals were larger than the crystals formed in the condition tested at 60000 ppm.

KEYWORDS: sweet corrosion, corrosion products, temperature, chloride.