

1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta e discute os resultados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais realizados com os cupons metálicos submetidos a diferentes formulações de fluidos de perfuração. As análises abrangeram aspectos quantitativos, como a perda de massa dos corpos de prova, e qualitativos, como a inspeção visual e a caracterização morfológica por microscopia confocal. Também foram avaliadas as propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração antes e após o envelhecimento em forno rotativo. A abordagem estabelece comparações entre os fluidos testados, e sua influência na corrosão do aço AISI 316L.

1.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

A avaliação do comportamento reológico dos fluidos de perfuração antes (AE) e após o envelhecimento térmico (DE) possibilita compreender a estabilidade das formulações ao longo do tempo de exposição às condições simuladas de reservatório (Caenn et al., 2011). Os fluidos FBA1, FBA2, FBG1 e FBG2 foram submetidos à análise reológica antes e depois do envelhecimento (após 7 dias). Os resultados obtidos para estas análises antes e depois do envelhecimento (A.E./D.E), encontram-se na 1.

| Parâmetros avaliados | Fluidos formulados (A.E./D.E.) | | | | Valores de referência |
|--|--------------------------------|-------|-------------|-------------|-----------------------|
| | FBA1 | FBA2 | <u>FBG1</u> | <u>FBG2</u> | |
| L600^a | 58/44 | 58/41 | 63/58 | 74/70 | 45/54 |
| L300^b | 44/35 | 44/46 | 44/39 | 50/45 | 28/36 |
| L6^c | 10/5 | 10/5 | 8/7 | 8/8 | 8/12 |
| L3^d | 8/4 | 8/4 | 6/6 | 7/6 | 7/11 |
| Gi (lb/100ft²)^e | 10/7 | 9/7 | 7/7 | 9/8 | 10/15 |
| Gf (lb/100ft²)^f | 14/6 | 15/6 | 10/10 | 16/11 | 14/20 |
| VP (cP)^g | 14/9 | 14/5 | 19/19 | 24/25 | 17/18 |
| LE (lb/100ft²)^h | 30/26 | 30/31 | 25/20 | 26/20 | 11/18 |

^aL600 = Leitura a 600 rpm no Viscosímetro Fann 35A; ^bL300 = Leitura a 300 rpm no Viscosímetro Fann 35A; ^cL6 = Leitura a 6 rpm no Viscosímetro Fann 35A; ^dL3 = Leitura a 3 rpm no Viscosímetro Fann 35A; ^eGi = Gel inicial (10 segundos) no Viscosímetro Fann 35A; ^fGf = Gel final (10 minutos) no Viscosímetro Fann 35A; ^gVP = viscosidade plástica; ^hLE = limite de escoamento.

Tabela 1: Propriedades reológicas obtidas para os fluidos de perfuração aquosos e base glicerina formulados

Segundo normas API, para fluidos de perfuração aditivados é recomendável que os valores de L3 (reologia a baixas taxas de cisalhamento) sejam elevados para garantir uma boa capacidade de transporte e sustentação dos cascalhos no interior do poço (MOREIRA et al., 2007). Considerando que durante a perfuração do poço ocorre a incorporação de sólidos ao fluido é importante ressaltar que as propriedades reológicas podem ser alteradas para valores mais elevados. Devido a isso, normalmente inicia-se a perfuração de uma dada fase com baixos valores de L600 e L3 (fluido inicial) e com o progresso da perfuração acompanha-se o contínuo aumento dessas propriedades (MOREIRA et al., 2007). Por outro lado, valores de gel inicial e final não podem ser nem muito elevados, nem muito abaixo dos valores estipulados pelo API (3-12 lbf/100ft² para Gi e 8-20 lbf/100ft² para Gf). Se Gi e Gf forem muito elevados, ao reiniciar-se a perfuração após uma parada, uma alta viscosidade exigiria grande esforço mecânico e se forem muito baixo podem ocasionar o entupimento do poço devido a não sustentação dos cascalhos (BARROS et al., 2007). Observa-se pela Tabela 6 que os fluidos base aquosa (FBA1 e FBA2) apresentaram valores de L3 e Gf de dentro do limite mínimo de referência antes do envelhecimento. Enquanto os fluidos base glicerina (FBG1 e FBG2), cuja diferença está na proporção de sólidos e polímeros apresentaram valores de L3 e Gf próximos aos valores de referência. De forma geral houve uma diminuição de todos os parâmetros reológicos após o envelhecimento em virtude do tempo de 7 dias que os fluidos ficaram no forno rotativo à 94 ° C. De acordo

com Moreira et al. (2007) pode-se iniciar uma perfuração de uma dada fase com baixos valores de L600 e L3 (fluido inicial) e com o progresso da perfuração acompanha-se o contínuo aumento dessas propriedades. Para uma melhor visualização dos dados relativos à viscosidade plástica e limites de escoamento dos fluidos avaliados, plotou-se os gráficos das 1 e 2. O gráfico apresentado na 1 ilustra a variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento, permitindo comparar os diferentes fluidos formulados e o gráfico da 2 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento.

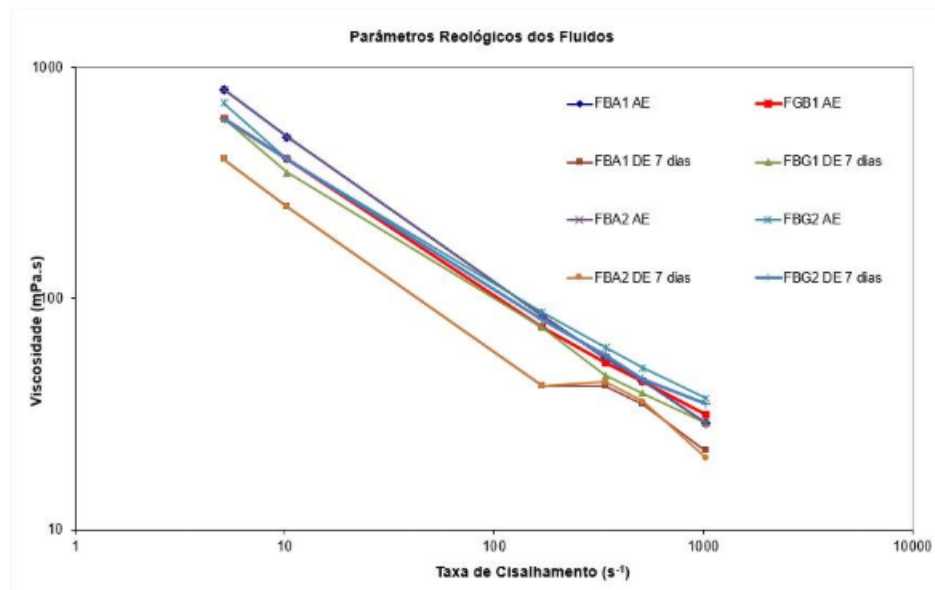


Figura 1: Variação da viscosidade versus taxa de cisalhamento para os quatro fluidos testados antes e após o envelhecimento

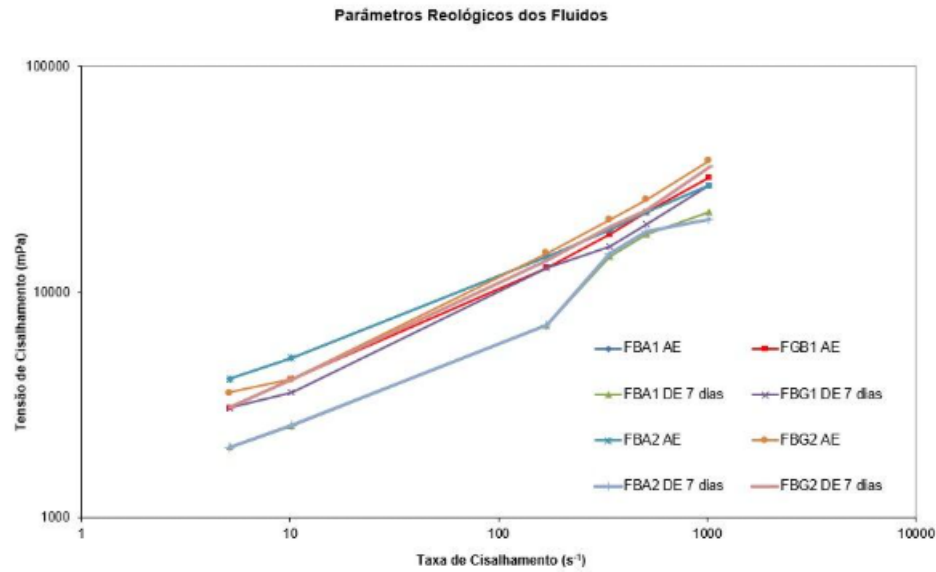


Figura 2: Variação da tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento para os quatro fluidos testados antes e após o envelhecimento

A viscosidade plástica é considerada como a medida da resistência interna para fluir um fluido, como resultado da interação dos sólidos que estão presentes em um fluido de perfuração (SAVINS et al., 1954). Valores de VP abaixo de 10 cP não são adequados para fluidos de perfuração e é indicativo de que o LE está muito alto e isso pode levar a um estado de floculação para os sólidos presentes. Por outro lado, valores de VP muito acima de 10 cP (alta viscosidade) pode gerar sobrecarga para o sistema de bombeamento de fluido (PETROBRAS, 1998). No gráfico da Figura 11 (viscosidade em função da taxa de cisalhamento), observa-se que todas as formulações apresentam redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, o que caracteriza um comportamento pseudo-plástico típico. Esse tipo de comportamento é desejável em fluidos de perfuração, pois permite que o fluido escoe facilmente sob altas taxas de cisalhamento (como nas regiões próximas à broca ou nas bombas) e, ao mesmo tempo, mantenha alta viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, favorecendo a suspensão dos cascalhos quando o fluido está em repouso (CAENN, 2011; THOMAS, 2004). Ao comparar os resultados antes (AE) e após o envelhecimento térmico (DE, 7 dias), nota-se uma redução significativa da viscosidade aparente nos fluidos após envelhecimento, especialmente os fluidos base aquosa (FBA1 e FBA2). Essa diminuição indica uma perda de estabilidade reológica das formulações provavelmente devido a degradação térmica de algum dos aditivos utilizados na formulação. Segundo Davoodi et al. (2023), os polímeros empregados em fluidos de perfuração devem oferecer resistência térmica e à salinidade para manter a estabilidade reológica em condições adversas. Quando tais requisitos não são atendidos, pode ocorrer

degradação dos aditivos e consequente perda de desempenho do fluido. De modo geral, a redução mais acentuada nas baixas taxas de cisalhamento indica que o envelhecimento (por um período de 7 dias) afetou principalmente a estrutura tridimensional do fluido, responsável pela manutenção dos sólidos em suspensão. Adicionalmente, o gráfico da Figura 12 (tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento) complementa a análise reológica dos fluidos formulados. As curvas apresentadas indicam um aumento não linear da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa de cisalhamento, confirmando o comportamento não-newtoniano pseudoplástico dos fluidos analisados (CAENN, 2011). Antes do envelhecimento térmico (AE), os fluidos exibem maiores valores de tensão de cisalhamento em baixas taxas, o que reflete um limite de escoamento mais elevado e, portanto, uma estrutura interna mais coesa. Esse comportamento é desejável, pois está associado à capacidade do fluido de sustentar cascalhos e sólidos perfurados em suspensão quando o escoamento é interrompido (THOMAS, 2004). Após o envelhecimento térmico de 7 dias (DE), observa-se uma redução significativa da tensão de cisalhamento, especialmente nas regiões de baixas taxas de cisalhamento. Essa mudança pode estar associada à degradação térmica dos agentes viscosificantes e tixotrópicos, resultando em redução do limite de escoamento e da força gel. De acordo com Darley e Gray (1988), essa diminuição reflete a quebra parcial da rede estrutural do fluido, tornando-o mais suscetível à sedimentação de sólidos e à perda de desempenho sob condições de alta temperatura. Notou-se que os fluidos base glicerina mantiveram curvas mais próximas antes e após o envelhecimento de 7 dias, sugerindo maior estabilidade térmica dos aditivos empregados. Esse comportamento indica que os componentes presentes nessas formulações possuem maior resistência à degradação térmica e química, sendo mais adequados para uso em poços de alta temperatura e pressão (MALGARESI et al., 2018). Outro ponto relevante refere-se à formulação FBG2, que possui maior teor de sólidos e sais dissolvidos. Apesar dessa diferença composicional, o aumento da concentração de sólidos não alterou de forma significativa o perfil reológico quando comparado ao FBG1. Tal resultado evidencia que a presença de glicerina garante estabilidade ao sistema, minimizando o impacto do teor de sólidos sobre o comportamento viscosimétrico. De forma geral, esta análise confirma que os fluidos à base de glicerina apresentam desempenho superior no que diz respeito à manutenção de suas propriedades reológicas após o envelhecimento, enquanto os fluidos à base de água demonstraram maior sensibilidade térmica e perda de estabilidade ao longo do tempo, conforme demonstrado por Bueno (2018).

1.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CORROSIVO DOS FLUIDOS NO AÇO

A seleção de fluidos de perfuração apropriados é essencial para o sucesso da operação de perfuração (ABDELSATTAR et al., 2020). Os fluidos de perfuração à base de água (WBM) são os mais adequados de todos os tipos e são amplamente utilizados na indústria por ser significativo e ecologicamente correto (ABDOLLAHI et al., 2018). No entanto, fluidos WBM são considerados corrosivos durante o processo de perfuração, pois podem ser contaminados com aceleradores de corrosão, como O₂, CO₂, H₂S, sais e ácidos orgânicos (GROWCOCK e HARVEY, 2005; DE LA FUENTE et al., 2007; ABDELSATTAR et al., 2020). A avaliação do potencial corrosivo dos fluidos de perfuração avaliados neste trabalho foi realizada por meio da comparação entre a massa inicial e a massa final dos cupons metálicos após o ensaio de imersão (KUTZ, 2005; MALARET, 2022) em cada um dos fluidos de perfuração utilizados como meios corrosivos neste estudo. Os dados obtidos permitiram calcular a perda de massa absoluta de cada amostra, servindo como base para a determinação da taxa de corrosão. Essa medida fornece uma estimativa direta do grau de agressividade de cada fluido sobre o aço inoxidável AISI 316L. A 2 apresenta as massas inicial e final dos cupons metálicos após sete dias de imersão nos fluidos de perfuração a 94 °C, permitindo o cálculo da perda de massa em gramas. Já a Tabela 8 mostra as respectivas taxas de corrosão expressas em milésimos de polegada por ano (mpy), obtidas com base no tempo de exposição, área superficial e densidade do material, de acordo com a equação 2.

| Relação Cupom/Fluido | Massa inicial (g) | Massa final (g) | Perda de massa (g) |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Cupom 07 (Imerso no FBA1) | 12,216 | 12,190 | 0,026 |
| Cupom 10 (Imerso no FBA2) | 12,272 | 12,259 | 0,013 |
| Cupom 06 (Imerso no <u>FBG1</u>) | 12,638 | 12,617 | 0,021 |
| Cupom 02 (Imerso no <u>FBG2</u>) | 12,392 | 12,277 | 0,115 |

Tabela 2: Perda de massa dos cupons de aço submetidas aos fluidos base glicerina e água

| Relação Cupom/Fluido | Taxa de corrosão (mpy) |
|----------------------------------|------------------------|
| Cupom 07 - Imerso no FBA1 | 3,720 |
| Cupom 10 - Imerso no FBA2 | 1,861 |
| Cupom 06 - Imerso no <u>FBG1</u> | 2,995 |
| Cupom 02 - Imerso no <u>FBG2</u> | 16,399 |

Tabela 3: Taxa de corrosão obtida para cada cupom submetido aos diferentes fluidos de perfuração durante 7 dias

A Figura 13 apresenta graficamente o comportamento da taxa de corrosão em função da formulação dos fluidos de perfuração, facilitando a visualização comparativa entre os diferentes meios.

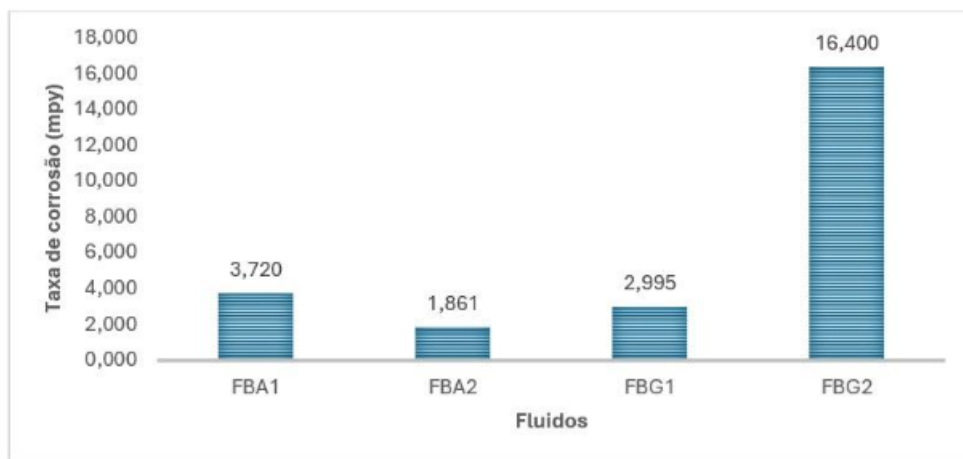


Figura 3: Visualização gráfica da taxa de corrosão de cupons de aço inoxidável imersos em diferentes fluidos de perfuração

De modo geral, observa-se que os cupons imersos nos fluidos FBA1, FBA2 e FBG1 apresentaram baixas perdas de massa (0,013 - 0,026 g) e taxas de corrosão inferiores a 4 mpy, indicando comportamento considerado não severo segundo critérios da NACE RP0775 (2005) que classifica taxas maiores que 10 mpy como aceitáveis para corrosão uniforme e maiores que 15 mpy no caso de corrosão por pite (Tabela 2). Considerando apenas os fluidos à base de água, notou-se que o FBA2, o qual contém o inibidor de corrosão, foi o que apresentou menor perda de massa (0,013 g) e menor taxa de corrosão (1,861 mpy). Por outro lado, o cupom imerso no fluido FBG2 apresentou uma perda de massa significativamente maior (0,115 g), resultando em uma taxa de corrosão de 16,399 mpy, valor que representa uma condição de corrosão severa (Tabela 2). Esse resultado sugere

menor eficiência protetiva do sistema fluido-metal, possivelmente associada à composição química deste fluido, o qual contém maior teor de sais, cloretos livres, maior teor de sólidos e sem adição de inibidor de corrosão (Tabela 5). Já o fluido FBG1 apresentou uma taxa de corrosão menor que o FBA1, mas superior à do FBA2, o que pode ser atribuído à menor condutividade da glicerina em relação à água, mas sem a presença de inibidores. Santos (2019), avaliaram o poder corrosivo de fluidos à base de glicerina e à base de olefina de baixo e alto peso (maior teor de cloreto e sais) em amostras de ferro fundido niquelado. Os resultados do estudo mostraram que o fluido base glicerina de alto peso apresentou taxa de corrosão cerca de onze vezes maior que o fluido base olefina de alto peso, enquanto o fluido base glicerina de baixo peso, apresentou taxa de corrosão cerca de 20% maior que o fluido base olefina de baixo peso, evidenciando o poder corrosivo dos fluidos contendo maior teor de cloreto e sólidos. Iyasara e Ovri (2015) também observaram maior perda de massa (0,052 g em 7 dias de exposição) e maior taxa de corrosão (5,14 mpy) para fluidos aquosos contendo maior teor de sal em comparação com fluidos à base de óleo (0,02 g de perda de massa e 1,98 mpy em 7 dias de exposição). Segundo os autores, a maior perda de peso associada ao fluido à base de água salgada foi resultado da alta concentração de íons cloreto, os quais têm efeitos concomitantes de alta indução de corrosão. Os íons Cl^- combinam-se com os íons de ferro (II) (Fe^{2+}) do aço para produzir FeCl_2 (produto sólido), que reage posteriormente com o oxigênio e a água dissolvidos. Portanto, fluidos à base de água (WBM), especialmente aqueles contendo cloretos, tendem a ser mais agressivos que fluidos à base de óleo (OBM) e fluidos sintéticos, devido à maior condutividade iônica do meio (Iyasara e Ovri, 2015). Mameng et al., (2014) estudaram sobre as propriedades corrosivas da exposição a íons cloro em diferentes aços inoxidáveis e mostraram que uma alta concentração de íons cloro resulta em maior corrosão, como ocorreu com o aço em contato com o fluido FBG2 avaliado neste trabalho. Adicionalmente, Azeez et al., (2022) relatam que o poder inibidor de aditivos poliméricos e surfactantes, tais como CMC, influenciam diretamente a taxa de corrosão, pois tais componentes podem formar filmes protetores na superfície metálica, reduzindo a penetração de espécies corrosivas. De forma semelhante, polissacarídeos aniônicos (como goma xantana) tendem a adsorver na superfície do aço, formando uma camada viscoelástica que pode dificultar o transporte difusivo de espécies corrosivas (O_2 , íons Cl^-) até o metal, causando um efeito protetor indireto. Quando essa camada se mantém íntegra, reduz a taxa de corrosão (MOBIN e RIZVI, 2016). Isto pode ter contribuído, em adição à presença de inibidor de corrosão, para aumentar o efeito anticorrosivo do fluido de perfuração FBA2.

1.3 RELAÇÃO ENTRE REOLOGIA, COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CORROSÃO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

A composição dos fluidos de perfuração tem influência direta sobre suas propriedades reológicas e, consequentemente, sobre o seu potencial corrosivo (Shokoya et al., 1996). Os fluidos formulados (Tabela 5) apresentam variações significativas quanto ao tipo de fase líquida (salmoura ou salmoura glicerinada), concentração de sólidos (NaCl, CaCO₃, outros) e presença de aditivos protetores (inibidor de corrosão), o que explica o desempenho distinto observado nos ensaios reológicos e de corrosão. Os fluidos FBA1 e FBA2, formulados com salmoura como fase contínua e teores elevados de goma xantana (2,1 g) e hidroxipropil amido (HPA, 5,5 g), exibiram alta viscosidade e limites de escoamento elevados antes e após o envelhecimento térmico. Esses resultados indicam uma estrutura coloidal mais coesa, capaz de sustentar sólidos em suspensão e resistir à degradação térmica. A presença de HPA e goma xantana favorece a formação de uma rede polimérica estável, conferindo comportamento pseudoplástico e tixotrópico típico de fluidos de boa qualidade (CAENN, 2011). Além disso, o fluido FBA2 contém 0,5 g de inibidor de corrosão, o que explica sua baixa taxa de corrosão (1,861 mpy), evidenciando que a combinação entre estabilidade reológica e aditivação química anticorrosiva atua sinergicamente na proteção metálica (HUANG et al., 2021). Os fluidos FBG1 e FBG2, em contrapartida, apresentam fase líquida composta por glicerina e salmoura, menor concentração de polímeros e maior fração de sólidos (CaCO₃). A formulação FBG2 contém 35 g de NaCl, responsável por elevar a condutividade elétrica do sistema e, portanto, intensificar os processos corrosivos (IYASARA e OVRI, 2015). O sal também pode promover a desestabilização da goma xantana e a ruptura de ligações hidrogênio, acelerando a degradação térmica e química do fluido (DAVOODI et al., 2023). Além disso, provavelmente a presença de altos teores de CaCO₃ (50 g) contribua para a abrasividade e formação de depósitos sobre o metal, o que pode intensificar a corrosão localizada. No entanto, esta hipótese não foi avaliada neste trabalho. Essa combinação de fatores justifica o pior desempenho do fluido FBG2, que apresentou a maior taxa de corrosão (16,399 mpy). Quando se faz uma comparação entre fluidos base aquoso e fluidos à base de glicerina avaliados neste trabalho, nota-se que a diferença observada nas taxas de corrosão entre FBA1 (3,720 mpy) e FBG1 (2,995 mpy) pode ser explicada, em primeiro lugar, pelo teor de salmoura: FBA1 contém maior volume de salmoura (350 mL) que FBG1 (175 mL), o que eleva a condutividade do meio e a atividade de Cl⁻, favorecendo mecanismos de corrosão generalizada e localizada (SAFIAN et al., 2024). Em segundo lugar, a presença de glicerina em FBG1 contribui para

a redução da agressividade ao diminuir a atividade da água (NAKAGAWA e OYAMA, 2019), reduzir a solubilidade de oxigênio e aumentar a espessura da camada limite viscosimétrica adjacente ao metal (PALCUT et al., 2023), o que limita o transporte difusivo de espécies corrosivas. De acordo com Nakagawa e Oyama (2019), a ligação de hidrogênio na água com o glicerol é forte e o movimento difusivo da água é retardado pela interação com o glicerol. Portanto, essa forte interação da água com o glicerol leva a uma menor atividade da água. Diversos estudos investigaram o efeito do glicerol no comportamento de corrosão de materiais metálicos (CHI-UCÁN et al., 2014; AL ZUBAIDI et al., 2018; SIVABALAN et al., 2020). Constatou-se que o glicerol pode atuar como um hidrato de gás com dupla função e inibidor de corrosão (SIVABALAN et al., 2020). Uma vantagem do glicerol é sua alta viscosidade. A viscosidade de soluções de água e glicerol aumenta com o aumento da concentração de glicerol (TAKAMURA et al., 2012) e esse aumento da viscosidade pode diminuir a difusão de íons na solução, reduzindo assim a taxa de corrosão (PALCUT et al., 2023). Assim, a combinação de menor salinidade + efeito físico da glicerina é uma possível explicação para a menor taxa de corrosão observada em FBG1. Importante ressaltar que a maior concentração de polímeros (HPA e goma xantana) em FBA1 não garantiu proteção superior, possivelmente porque a elevada força iônica da salmoura (350 mL) comprometeu a adsorção estável do polímero na superfície metálica (CAENN, 2011; DAVOODI et al., 2023; MOBIN et al., 2016).

1.4 AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CUPONS DE AÇO POR INSPEÇÃO VISUAL

A avaliação visual dos cupons metálicos, mostrada na Figura 14, complementa os resultados quantitativos das taxas de corrosão (Tabela 8 e Figura 13), permitindo identificar diferenças qualitativas no ataque sofrido em função da composição dos fluidos. Em todos os casos, os cupons mantiveram aspecto metálico e homogêneo, indicando corrosão predominantemente uniforme e de baixa intensidade. Entretanto, pequenas diferenças de coloração e pequenas áreas de escurecimento evidenciam variações no grau corrosivo dos meios.



Figura 4: Comparação visual dos cupons de aço submetidos às diferentes formulações de fluidos de perfuração

A análise da Figura 14 mostra que o cupom 07 (fluido FBA1) apresentou leve escurecimento e perda de brilho, o que está de acordo com sua taxa de corrosão intermediária (3,720 mpy). Esse comportamento está associado à maior salinidade do fluido, composto por 350 mL de salmoura, que eleva a condutividade eletrolítica e a atividade dos íons Cl^- , favorecendo mecanismos de corrosão generalizada (XU et al., 2022). O cupom 10 (fluido FBA2) exibiu a superfície mais uniforme e brilhante entre os fluidos à base aquosa, o que confirma a menor taxa de corrosão (1,861 mpy). Esse desempenho superior é atribuído à presença do inibidor de amônio quaternário, que atua por adsorção catódica e formação de filme protetor estável, reduzindo a transferência de carga entre o metal e o meio corrosivo (GONI et al., 2024). Em relação aos cupons imersos nos fluidos base glicerina, notou-se que o cupom 06 (fluido FBG1) manteve coloração uniforme e sem sinais evidentes de pite, compatível com a taxa de 2,995 mpy. Esse resultado evidencia o efeito mitigador da glicerina, que reduz a atividade da água, a solubilidade do oxigênio e a difusão de espécies agressivas através do aumento da viscosidade (PALCUT et al., 2023). Assim, mesmo com menor teor de polímeros, o meio de menor condutividade e mais viscoso resultou em corrosão controlada. Por outro lado, o cupom 02 (fluido FBG2) apresentou escurecimento acentuado, sugerindo maior ataque superficial, coerente com a taxa de corrosão mais elevada (16,399 mpy). Embora esse fluido contenha glicerina, o teor elevado de CaCO_3 (50 g) e a adição de NaCl (17,5 g) aumentaram significativamente a condutividade e favoreceram o aparecimento de corrosão localizada (IYASARA e OVRI, 2015). Esses resultados demonstram que a corrosividade dos fluidos é resultado da interação entre composição

química, estabilidade reológica e mecanismos de adsorção superficial. Formulações que equilibram viscosidade, baixa salinidade e aditivos anticorrosivos eficazes apresentam desempenho superior (DAVOODI et al., 2023).

1.5 AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CUPONS DE AÇO POR MICROSCOPIA ÓPTICA CONFOCAL

A Figura 15 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal dos cupons metálicos antes (branco) e após os ensaios de corrosão. Para cada cupom foram registradas duas imagens, correspondentes a regiões distintas do mesmo cupom, de modo a evidenciar a uniformidade (ou heterogeneidade) do ataque corrosivo ao longo da superfície. Os cupons do branco exibem uma superfície homogênea, caracterizada por marcas paralelas decorrentes do lixamento mecânico realizado antes da análise e ausência de produtos de corrosão. Essa superfície é adotada como referência para fins comparativos.

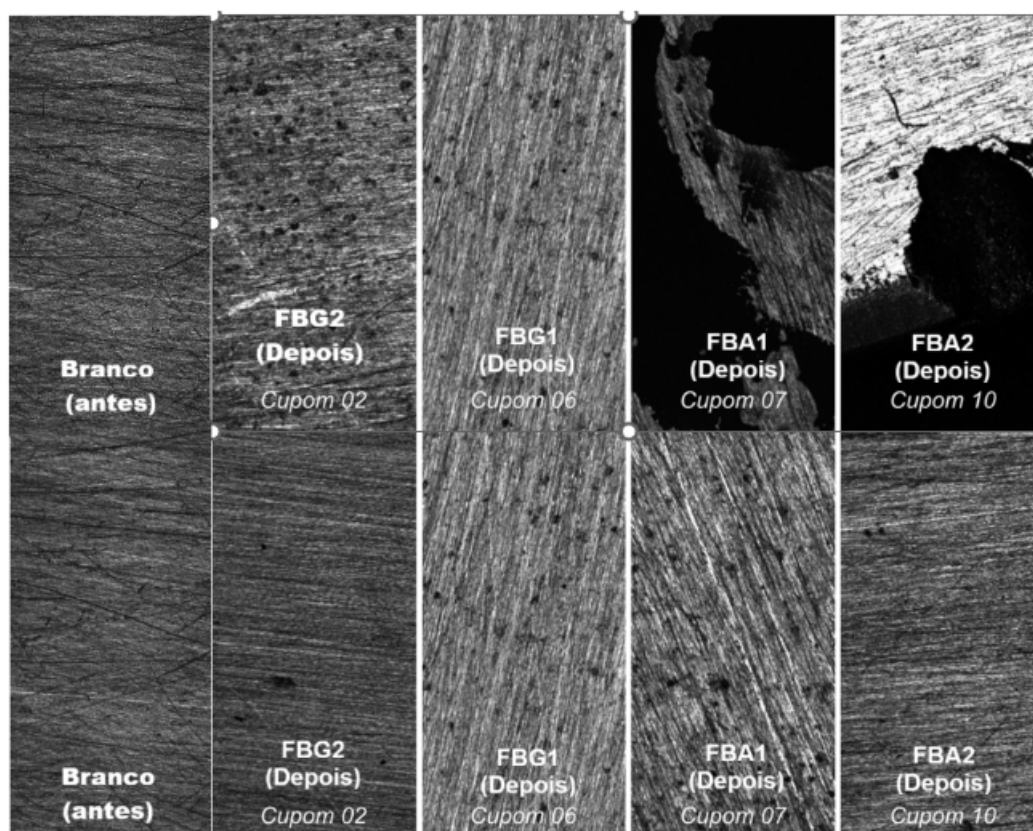


Figura 5: Micrografias dos cupons de aço obtidas por microscopia óptica confocal em dois pontos distintos

A análise da Figura 15 mostra que após o ensaio são observadas algumas diferenças

entre os cupons imersos nos diferentes fluidos de perfuração. Observa-se nos cupons expostos ao fluido FBG2 (Cupom 02), que apresentou a maior taxa de corrosão (16,399 mpy), muitas regiões escuras, aumento da rugosidade e perda evidente de material, em comparação ao branco. A distribuição relativamente difusa desses danos, sem a formação dominante de cavidades profundas e isoladas, indica uma possível corrosão generalizada. Essa morfologia é compatível com meios contendo concentrações elevadas de cloretos, como é o caso do fluido FBG2, nos quais ocorre dissolução uniforme da superfície metálica (JONES, 1996; SAFIAN et al., 2024). Já o cupom 06, imerso no fluido FBG1, apresentou taxa intermediária (2,995 mpy). Suas micrografias mostram preservação parcial das marcas de lixamento, com discretas áreas de ataque distribuídas ao longo da superfície. A ausência de cavidades profundas e a relativa uniformidade da degradação sugerem corrosão uniforme moderada (JONES, 1996; GENTIL e CARVALHO, 2022). Para o fluido FBA1 (cupom 07), cuja taxa atingiu 3,720 mpy, a microscopia revelou deslocamentos marcantes e cavidades irregulares, indicando formação de áreas de dissolução preferencial. Essa morfologia, caracterizada por heterogeneidade superficial, é compatível com corrosão localizada, o que é compatível com este tipo de fluido à base de salmoura (JONES, 1996; SAFIAN et al., 2024). Por fim, o cupom 10, imerso no fluido FBA2, exibiu a menor taxa de corrosão (1,861 mpy). A análise morfológica revela apenas pequenas áreas de desgaste superficial e rugosidade aumentada, sem formação de pites definidos ou regiões de corrosão severa. Esses aspectos indicam corrosão predominantemente uniforme de baixa intensidade, compatível com a presença de um filme inibidor mais estável, capaz de retardar tanto a dissolução anódica quanto a difusão de espécies agressivas, possivelmente devido a presença do inibidor de amônio quaternário (GONI et al., 2024). Assim, a integração entre a taxa de corrosão (perda de massa) e a morfologia superficial observada confirma a coerência dos resultados, o qual pode ser resumido como segue, de acordo com Gentil e Carvalho et al., (2022):

- (i) FBG2 promoveu o ataque mais agressivo, de caráter generalizado;
- (ii) FBG1 resultou em corrosão uniforme moderada;
- (iii) FBA1 apresentou sinais claros de corrosão localizada;
- (iv) FBA2 demonstrou o melhor desempenho anticorrosivo, associado a um ataque uniforme leve.

Essa abordagem integrada é amplamente recomendada na literatura, pois a interpretação dos mecanismos corrosivos depende tanto da cinética de perda de material quanto da

textura superficial resultante, permitindo identificar padrões não detectáveis apenas pela análise gravimétrica (Jones, 1996; Gentil e Carvalho, 2022).