REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CORROSÃO EM PISTÕES AUTOMOTIVOS UTILIZANDO MISTURA DE COMBUSTÍVEIS EM DIFERENTES PROPORÇÕES

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CORROSION IN AUTOMOTIVE PISTONS EXPOSED TO FUEL BLENDS IN DIFFERENT PROPORTIONS

Engenharias • 04/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793795842

Fabrícia Nunes de Jesus[1]

Erico Ernane Germano Lobão[2]

Caio Lucas Rola Dias[3]

Agostinho Ferreira[4]

RESUMO

A crescente utilização do etanol como combustível automotivo no Brasil torna relevante investigar seus efeitos sobre os materiais metálicos dos sistemas de combustão, especialmente a corrosão de componentes como os pistões. Este trabalho avaliou a corrosão em pistões de liga alumínio-silício (Al-Si) expostos à gasolina comum, à gasolina aditivada, ao etanol comercial e à mistura de 50% de gasolina com 50% de etanol. Os corpos de prova foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e submetidos a ensaio de imersão de três meses, com monitoramento semanal de pH, temperatura, umidade e diferença de potencial elétrico (DDP). Todos os combustíveis promoveram alterações superficiais, e a mistura gasolina-etanol 50% apresentou os maiores indícios de atividade corrosiva, evidenciados pelos maiores valores médios de DDP, maior variação de pH e alterações morfológicas mais pronunciadas. O EDS indicou elevada presença de oxigênio nas superfícies expostas, sugerindo formação de óxidos e hidróxidos de alumínio. Os resultados indicam que o aumento da concentração de etanol pode intensificar a corrosão da liga Al-Si, favorecendo a degradação da camada passiva de óxido.

Palavras-chave: Etanol; Gasolina; Corrosão; Motor Ciclo Otto; Pistão.

ABSTRACT

The growing use of ethanol as an automotive fuel in Brazil raises questions about its effects on the metallic materials used in combustion systems, particularly regarding corrosion processes that may compromise components such as automotive pistons. This study evaluated corrosion in aluminum-silicon (Al-Si) alloy pistons exposed to regular gasoline, additive-treated gasoline, commercial ethanol, and a 50% gasoline/50% ethanol blend. Specimens were characterized regarding mass, surface area, and morphology by

scanning electron microscopy (SEM), then subjected to a three-month immersion test, with weekly monitoring of pH, temperature, humidity, and electric potential difference (EPD). All fuels caused surface alterations, and the gasoline/ethanol blend showed the greatest corrosive activity, evidenced by higher EPD values, greater pH variation, and more pronounced morphological changes. Energy-dispersive spectroscopy (EDS) indicated elevated surface oxygen, suggesting aluminum oxide and hydroxide formation. The results indicate that increasing ethanol concentration in gasoline blends can intensify corrosion of the Al-Si alloy by degrading its passive oxide layer.
Keywords: Ethanol; Gasoline; Corrosion; Otto cycle engine; Piston.

1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis ainda respondem por parcela expressiva da matriz energética brasileira (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [ANP], 2024), mas preocupações ambientais e de segurança energética têm impulsionado a transição para fontes renováveis, hoje próximas de 50% da matriz nacional, acima da média global (Ministério de Minas e Energia [MME], 2025).

Nesse cenário, o etanol consolidou-se como biocombustível amplamente utilizado em motores do ciclo Otto, sobretudo em misturas com a gasolina. A elevação progressiva do teor de etanol na gasolina comercial brasileira, de 27% para 32%, conforme a ANP (2024) e do MME (2026), torna relevante compreender seus efeitos sobre os materiais metálicos dos sistemas de combustão, em particular os pistões, componentes submetidos a elevadas temperaturas, pressões e contato direto com o combustível e seus produtos de combustão.

A literatura já descreve mecanismos gerais de corrosão de ligas de alumínio em combustíveis oxigenados (Ambrozin et al., 2009; Frauches-Santos et al., 2014), mas são escassos os estudos que avaliem, de forma experimental e comparativa, o efeito de diferentes proporções de etanol-gasolina, incluindo formulações aditivadas, sobre pistões automotivos reais; essa é a lacuna abordada neste trabalho. Coloca-se, assim, a seguinte problemática: de que forma o aumento da concentração de etanol na gasolina impacta a corrosão e a durabilidade dos pistões automotivos? Parte-se da hipótese de que o incremento do teor de etanol agrava os efeitos corrosivos, em razão da água absorvida pelo combustível, que propicia reações eletroquímicas de deterioração metálica, ainda que estudos apontem benefícios da adição controlada de etanol sobre emissões e combustão (Brito-Franco et al., 2020).

A justificativa do estudo reside no crescimento do uso de misturas etanol-gasolina no setor automotivo brasileiro, impulsionado por fatores econômicos e ambientais, e na necessidade de assegurar a confiabilidade e a durabilidade dos motores diante desse cenário. Assim, esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar experimentalmente o processo de corrosão em pistões automotivos expostos a gasolina com diferentes concentrações de etanol. Como objetivos específicos, buscou-se: padronizar e preparar corpos de prova de pistões automotivos; caracterizar a microestrutura das superfícies antes e após a exposição por microscopia eletrônica de varredura (MEV); submeter as amostras a diferentes concentrações de etanol na gasolina; monitorar variáveis experimentais (massa, pH, temperatura, umidade e diferença de potencial elétrico); e comparar a intensidade e a natureza da corrosão entre as diferentes concentrações avaliadas.

Em termos metodológicos, a pesquisa classifica-se como aplicada, de enfoque quali-quantitativo, objetivo explicativo e procedimento técnico experimental, fundamentada principalmente nos trabalhos de Tillmann (2013), Catunda (2013), Gentil (2022), Ambrozin (2009) e ANP (2024).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Contexto Energético Brasileiro e Fundamentos da Corrosão em Ligas Al-Si Utilizadas em Pistões Automotivos

No Brasil, a adição de etanol anidro à gasolina é uma prática consolidada desde a década de 1970, constituindo uma estratégia relevante para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis. Atualmente, a proporção de etanol anidro na gasolina brasileira é regulamentada pelas autoridades competentes, tendo sido historicamente estabelecida em torno de 27% em volume, com perspectivas de ampliação conforme as políticas nacionais de transição energética (Ambrozin et al., 2009; ANP, 2024; MME, 2024). Nesse contexto, a ampla utilização de veículos com tecnologia *flex fuel* reforça a importância do etanol na matriz de transportes brasileira e sua contribuição para a segurança energética nacional (MME, 2025).

A utilização de combustíveis contendo etanol também torna relevante a investigação da compatibilidade entre esses combustíveis e os materiais empregados nos sistemas automotivos, especialmente aqueles submetidos a condições severas de temperatura, pressão e exposição a espécies potencialmente corrosivas. Entre esses materiais, destacam-se as ligas de alumínio-silício (Al-Si), amplamente utilizadas na fabricação de pistões devido

à combinação favorável de propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas. Essas ligas apresentam, em geral, uma matriz dúctil de alumínio (fase α) associada a partículas ou regiões ricas em silício, cuja presença contribui para a redução do coeficiente de expansão térmica e para o aumento da resistência ao desgaste. As ligas hipoeutéticas, com teores de silício tipicamente entre 8% e 12% em massa, são particularmente relevantes para aplicações automotivas, nas quais a estabilidade dimensional e o desempenho mecânico são requisitos importantes (Callister; Rethwisch, 2014; Krieger Filho, 2018; Padilha, 2020). A composição química dessas ligas, estabelecida de acordo com as especificações aplicáveis, influencia diretamente suas propriedades e seu desempenho em serviço (ABNT, 2017).

Apesar de suas vantagens tecnológicas, o alumínio apresenta suscetibilidade à corrosão em determinadas condições ambientais. Sua resistência à corrosão decorre, principalmente, da formação espontânea de uma película superficial de óxido, constituída predominantemente por alumina (Al_2O_3), que atua como barreira entre o metal e o meio. A estabilidade dessa película depende de fatores como pH, temperatura e composição química do eletrólito. Em meios suficientemente ácidos ou alcalinos, bem como na presença de espécies agressivas, a camada passiva pode sofrer dissolução ou ruptura localizada, favorecendo a exposição do substrato metálico e o desenvolvimento de processos corrosivos, como a corrosão por pites (Fontana, 1986).

A dissolução anódica do alumínio pode ser representada pela seguinte semirreação:

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$$ Equação 1 — Oxidação anódica do alumínio

Nas ligas Al-Si, o comportamento eletroquímico é condicionado não apenas pelas características do meio, mas também pela heterogeneidade microestrutural do material. A diferença de comportamento eletroquímico entre a matriz de alumínio e as fases ricas em silício pode favorecer a formação de microcélulas galvânicas, dependendo da composição do eletrólito e das condições de exposição. Nessas condições, a matriz de alumínio pode atuar como região anódica, enquanto as partículas de silício podem favorecer as reações catódicas, promovendo a dissolução preferencial do alumínio nas regiões adjacentes às partículas. Esse processo pode contribuir para a iniciação e a propagação da corrosão localizada, comprometendo a integridade superficial do material (Revie; Uhlig, 2011; Kaufman, 2019).

Dessa forma, a compreensão conjunta da composição química, da microestrutura e dos mecanismos de passivação e corrosão das ligas Al-Si constitui uma base importante para avaliar sua durabilidade em aplicações automotivas. Essa abordagem também permite estabelecer os fundamentos para investigar a influência de meios associados ao uso de combustíveis contendo etanol sobre o comportamento corrosivo desses materiais.

2.2. Interação Combustível-Metal: Efeito Higroscópico do Etanol e Papel dos Aditivos

O pistão tem contato direto com o combustível durante a compressão e a combustão da mistura ar-combustível (Brunetti, 2012), e está sujeito a compostos agressivos como óxidos de enxofre, resíduos de combustão incompleta e água condensada (Gentil, 2022; Krieger Filho, 2018). A adição de etanol normalmente intensifica esse potencial corrosivo, em razão de seu caráter

higroscópico, que absorve umidade do ambiente e do sistema de armazenamento e forma um meio eletrolítico mais favorável às reações eletroquímicas (Ambrozin et al., 2009; Frauches-Santos et al., 2014; Chaves, 2013). Já os aditivos detergentes e dispersantes da gasolina comercial tendem a reduzir o acúmulo de depósitos no sistema de alimentação, atenuando parcialmente esse efeito (Santos et al., 2018).

2.3. Mecanismos de Corrosão

A corrosão eletroquímica envolve a transferência de elétrons entre regiões anódicas e catódicas de uma superfície metálica em contato com um eletrólito, com liberação de íons metálicos e redução de espécies catódicas, tipicamente H^+ ou O_2, a depender do pH e da aeração do meio, sendo mais intensa quanto maior a concentração de oxigênio e menor o pH; a diferença de potencial entre essas regiões é indicativo direto da atividade eletroquímica do sistema (Gentil, 2022). Já a corrosão química ocorre por reação direta entre o material e o meio agressivo, sem geração de corrente elétrica.

2.4. Técnicas de Ensaio e Caracterização da Corrosão

O ensaio de imersão constitui método padronizado para avaliação da corrosão de metais em meios líquidos, permitindo o cálculo da taxa de corrosão a partir da perda de massa ao longo de um período estabelecido (ASTM G31, 2021). A norma ASTM G1 (2022) padroniza os procedimentos de limpeza pós-ensaio, remoção dos produtos de corrosão e determinação da perda de massa, etapa fundamental para a confiabilidade dos resultados. A caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV), associada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS), permite identificar a

natureza e a severidade do ataque corrosivo, evidenciando aspectos como perda de brilho, formação de pites e alterações na topografia superficial, além da composição elementar das regiões analisadas, tipicamente oxigênio (associado a óxidos), silício (da liga Al-Si) e eventuais resíduos do meio de ataque (Ambrozin et al., 2009; Devavid, 2007). A densidade do material, necessária ao cálculo da taxa de corrosão, pode ser determinada pelo método da proveta graduada, baseado no princípio de Arquimedes, pela razão entre a massa da amostra e o volume de líquido deslocado (Callister, 2020).

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa classifica-se, quanto à natureza, como aplicada; quanto ao enfoque, como quali-quantitativa; quanto ao objetivo, como explicativa; e quanto ao procedimento técnico, como experimental (Gil, 2018; Lakatos; Marconi, 2011). O trabalho foi conduzido inicialmente por meio de revisão bibliográfica e, na sequência, por investigação experimental voltada à avaliação do comportamento corrosivo de corpos de prova de pistões automotivos em contato com gasolina contendo diferentes proporções de etanol, analisando variações de microestrutura, massa, formação de óxidos e alterações dimensionais (Gerhardt; Silveira, 2009).

3.1. Materiais

Os materiais empregados neste estudo compreenderam um pistão automotivo de veículo de passeio, constituído por liga de alumínio-silício (Al-Si) hipoeutética, fornecido pela empresa TotalVolks, e os combustíveis utilizados como meios de exposição: gasolina comum (E27), gasolina aditivada (E27), etanol hidratado comercial (E100) e

mistura E50 (50% gasolina comum e 50% etanol). Os corpos de prova foram obtidos por usinagem do pistão, seguindo um procedimento padronizado de preparação que assegurou a uniformidade das amostras para os ensaios experimentais. Adicionalmente, foi mantido um grupo controle em atmosfera ambiente, sem exposição aos combustíveis. Os principais materiais, reagentes e equipamentos utilizados encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Materiais e equipamentos utilizados

Material / Equipamento	Especificação / Função
Pistão automotivo	Liga Al-Si hipoeutética (≈ 8-12% Si)
15 corpos de prova	Dimensões aproximadas de 30 × 30 × 30 mm
Gasolina comum (E27)	Meio corrosivo de ensaio (3 CPs)
Gasolina aditivada	Meio corrosivo de ensaio (3 CPs)
Etanol hidratado (E100)	Meio corrosivo de ensaio (3 CPs)
Mistura E50	Meio corrosivo de ensaio (3 CPs)
Grupo controle	Exposição apenas ao ar atmosférico (3 CPs)
Frascos de vidro com tampa	15 unidades, capacidade de 150 mL
Proveta graduada com rolha	Capacidade de 100 mL
Balança analítica	Resolução de 0,0001 g
Paquímetro digital Mitutoyo	Medição dimensional dos CPs
pHmetro digital portátil (BOMVICK)	Monitoramento do pH (± 0,1 unidade)

Termo-higrômetro (HTC-1)	Temperatura (± 1 °C) e umidade (± 5%)
Multímetro Foxlux FX-MD	Medição de DDP (± 0,8% da leitura + 2 dígitos)
Torno mecânico IMOR / lâmina de serra	Corte dos CPs e preparação para MEV
Água deionizada / ácido nítrico concentrado	Limpeza dos CPs (ASTM G1)
MEV, modelo VEGA 3 LMU	Caracterização morfológica superficial

Fonte: Autores (2026).

Para cada meio corrosivo foram realizadas exposições em triplicata, conforme diretrizes da ASTM G31 (2021), possibilitando a análise da repetibilidade dos resultados. A Tabela 2 apresenta a divisão dos corpos de prova por tipo de combustível.

Tabela 2. Divisão dos corpos de prova por tipo de combustível

Grupo (corpos de prova)	**Meio de exposição**
Grupo A (10, 12, 15)	E27 — gasolina comercial brasileira (27% de etanol anidro)
Grupo B (2, 5, 9)	Gasolina aditivada (E27, com aditivos de limpeza e proteção)
Grupo C (3, 6, 7)	E100 — etanol comercializado, sem adição de gasolina
Grupo D (8, 13, 14)	E50 — mistura de 50% gasolina comum e 50% etanol

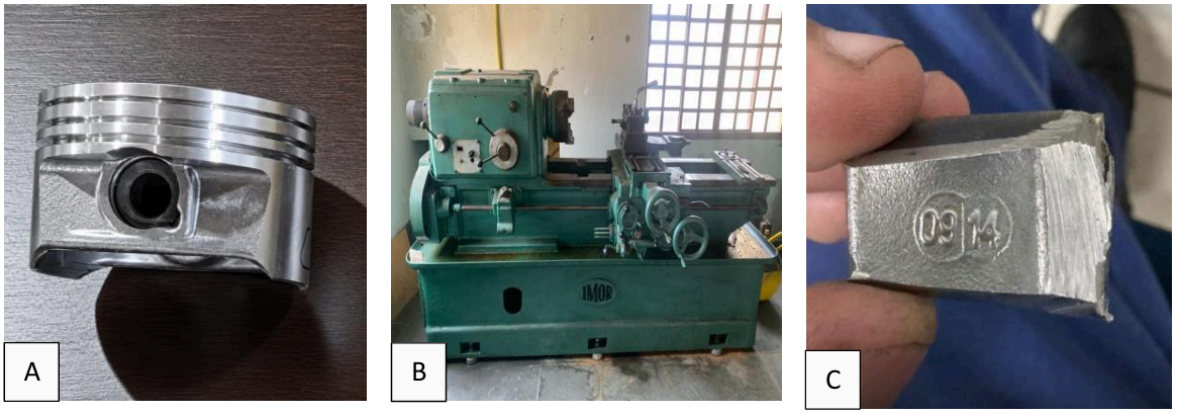
Grupo E (1, 4, 11)	Controle — condições atmosféricas, sem contato com combustível

Fonte: Autores (2026).

3.2. Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de um pistão automotivo por usinagem em torno mecânico, sendo preparados com dimensões padronizadas e adequadas à realização dos ensaios. Previamente às análises, as amostras foram submetidas a um procedimento de limpeza com água deionizada, secagem em estufa a 90 °C por 30 minutos e acondicionas em dessecador até atingirem a temperatura ambiente, a fim de evitar interferências decorrentes da umidade. As dimensões e a massa inicial dos corpos de prova foram determinadas utilizando instrumentos devidamente calibrados e com resolução compatível com as exigências do método experimental.

Figura 1. Preparação dos corpos de prova a partir do pistão automotivo



Fonte: Autores (2026).

3.3. Ensaio Corrosivo por Imersão

Os corpos de prova foram imersos em frascos de vidro individuais contendo os respectivos combustíveis (E27, gasolina aditivada, E100 e E50), conforme a metodologia proposta por Oliveira (2013) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2021), permanecendo em imersão por um período de 90 dias.

Figura 2. Corpos de prova imersos nos combustíveis



Fonte: Autores (2026).

3.4. Monitoramento das Variáveis Experimentais

Ao longo dos 90 dias de ensaio, foram monitoradas semanalmente as seguintes variáveis, conforme recomendações de Gentil (2022) e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2021): (i) temperatura ambiente, com termo-higrômetro digital (± 1 °C); (ii) umidade relativa do ar, com o mesmo instrumento (± 5%); (iii) potencial hidrogeniônico (pH), com pHmetro digital calibrado (± 0,1 unidade), utilizado como parâmetro comparativo entre os grupos experimentais, considerando que o conceito de pH é rigorosamente definido para soluções aquosas, de modo que os valores obtidos em meios não aquosos, como a gasolina, devem ser interpretados como indicadores comparativos e não como medidas termodinamicamente equivalentes entre os diferentes combustíveis; e (iv) diferença de potencial elétrico (DDP) entre os corpos de prova e o meio, com multímetro digital Foxlux FX-MD (±

0,8% da leitura + 2 dígitos). Todos os dados foram registrados em planilhas eletrônicas, organizados por variável, tempo de exposição e condição de ensaio.

3.5. Determinação da Densidade e da Taxa de Corrosão

A densidade da liga Al-Si foi determinada experimentalmente pelo método do deslocamento de volume: 20,00 mL de água destilada foram adicionados a uma proveta graduada (V_1); um corpo de prova de massa conhecida (7,4757 g) foi imerso, elevando o volume para 22,80 mL (V_2); o volume deslocado (2,80 cm^3) permitiu calcular a densidade pela razão massa/volume, resultando em 2,67 g/cm^3, valor utilizado nos cálculos da taxa de corrosão de todos os grupos.

Ao término dos 90 dias, os corpos de prova foram retirados dos recipientes e submetidos à limpeza conforme a norma ASTM G1 (2022), com água potável, água deionizada e ácido nítrico a 65%, seguida de secagem em estufa (50 °C, 30 min) e resfriamento em dessecador com sílica gel. A massa final foi determinada em balança analítica, e a taxa de corrosão foi calculada a partir da perda de massa, da área superficial exposta, do tempo de ensaio e da densidade do material, segundo a metodologia da ASTM G31 (2021), pela relação $CR = (365.000 \times \Delta M) / (A \times T \times D)$, em que CR é a taxa de corrosão (mm/ano), ΔM a perda de massa (g), A a área exposta (mm^2), T o tempo de exposição (dias) e D a densidade do material (g/cm^3). A constante 365.000 resulta da combinação do fator de anualização (365 dias/ano) com a conversão de unidades de área (mm^2 para cm^2) e de espessura (cm para mm) exigida pela formulação geral da norma ASTM G1 (2022), sendo equivalente à constante $K = 8,76 \times 10^4$ definida por essa norma para tempo de exposição em horas.

3.6. Caracterização Microestrutural por MEV/EDS

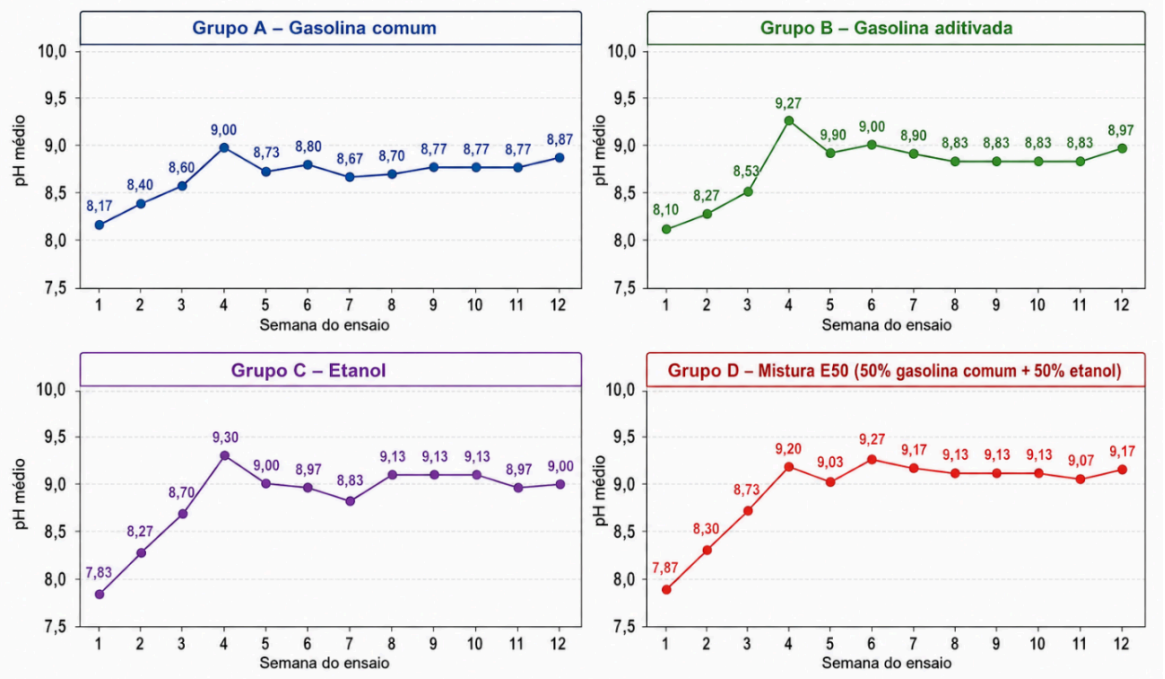
A caracterização morfológica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, modelo VEGA 3 LMU) antes do ensaio, como referência, e novamente após os 90 dias de imersão. Os corpos de prova pós-ensaio foram seccionados com lâmina de serra, lavados com água deionizada, secos em estufa (50 °C, 30 min) e acondicionados em dessecador. As micrografias foram obtidas com ampliação de 2000x, e a espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS) determinou a composição química das regiões analisadas, identificando elementos associados aos produtos de corrosão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Avaliação do Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH foi monitorado semanalmente ao longo dos 90 dias de ensaio, com o objetivo de acompanhar alterações físico-químicas dos meios decorrentes da interação entre os combustíveis e as amostras metálicas, uma vez que tais variações podem influenciar a estabilidade da camada passiva de óxido da liga Al-Si, como mostrado no Gráfico 1.

Gráfico 1. Evolução do pH médio ao longo das semanas: A) Gasolina comum; B) Gasolina aditivada; C) Etanol e D) Mistura de gasolina comum e etanol, 50%:50%.



Fonte: Autores, (2026)

De modo geral, todos os combustíveis apresentaram aumento gradual do pH nas primeiras semanas, seguido de estabilização entre aproximadamente 8,6 e 9,3. No Grupo A (gasolina comum), o pH variou de 8,17 na primeira semana para cerca de 8,87 ao final do ensaio. O Grupo B (gasolina aditivada) apresentou elevação inicial até 9,27 na quarta semana, com posterior estabilização em torno de 8,90, indicando elevada estabilidade química dos combustíveis à base de gasolina. O Grupo C (etanol) evoluiu de 7,83 para cerca de 9,30 na quarta semana, mantendo-se entre 8,90 e 9,20 nas semanas seguintes.

O Grupo D (mistura E50) apresentou o comportamento mais distinto, com oscilações mais pronunciadas ao longo do ensaio e os maiores valores individuais registrados, a amostra D1 atingiu pH 9,8. Esse comportamento pode ser atribuído à absorção de umidade pelo etanol e ao consequente aumento da condutividade elétrica do meio (Ambrozin et al., 2009), já que a água absorvida atua como eletrólito, favorecendo reações de oxidação e redução na superfície metálica. Frauches-Santos et al. (2014) destacam ainda que misturas

de gasolina e etanol apresentam maior suscetibilidade à oxidação de hidrocarbonetos e à formação de compostos oxigenados durante a exposição prolongada.

Embora o etanol puro seja frequentemente associado a maior corrosividade em razão de seu caráter higroscópico, os resultados indicaram que a mistura E50 apresentou comportamento mais crítico que o E100 puro, efeito atribuído à combinação entre gasolina, etanol e água absorvida, que favorece a formação de um meio com maior transporte iônico e mais propício à ruptura da camada passiva de Al_2O_3 e ao desenvolvimento de microcélulas eletroquímicas na liga Al-Si (Ambrozin et al., 2009; Brito-Franco et al., 2020).

4.2. Avaliação da Diferença de Potencial (DDP)

A diferença de potencial (DDP) foi monitorada semanalmente durante o período experimental com o objetivo de acompanhar possíveis alterações elétricas decorrentes da exposição dos corpos de prova aos diferentes combustíveis. De maneira geral, os valores permaneceram na faixa de décimos de milivolt (mV), apresentando pequenas variações ao longo das doze semanas de ensaio.

Os corpos de prova imersos em gasolina comum apresentaram os maiores valores de DDP, variando aproximadamente entre 0,07 e 0,21 mV, com tendência de aumento nas primeiras semanas, seguida de estabilização até o final do experimento. Para a gasolina aditivada, os valores permaneceram entre 0,03 e 0,13 mV, enquanto as amostras expostas ao etanol apresentaram as menores variações, situando-se entre 0,05 e 0,11 mV durante todo o período experimental. A mistura E50 (50% gasolina comum e 50% etanol)

apresentou valores relativamente elevados desde o início do ensaio, variando entre 0,13 e 0,16 mV, com comportamento praticamente constante ao longo do monitoramento.

Embora essas diferenças indiquem tendências distintas de resposta elétrica entre os meios avaliados, a amplitude das variações observadas foi reduzida e compatível com a sensibilidade do método de medição empregado. Assim, os resultados de DDP foram interpretados apenas de forma qualitativa, sendo utilizados como um parâmetro auxiliar para o acompanhamento do comportamento eletroquímico dos sistemas, sem constituir um indicador quantitativo da intensidade do processo corrosivo.

Segundo Ambrozin et al. (2009), misturas contendo gasolina e etanol tendem a apresentar maior condutividade elétrica em razão da presença de água absorvida pelo etanol e do aumento da mobilidade iônica do meio, favorecendo a ocorrência de reações eletroquímicas. Sob essa perspectiva, os maiores valores de DDP observados para a gasolina comum e, principalmente, para a mistura E50 são compatíveis com um ambiente mais favorável ao desenvolvimento dessas reações. Entretanto, conforme discutido por Revie e Uhlig (2011) e Gentil (2022), a diferença de potencial, isoladamente, não permite quantificar a intensidade da corrosão, uma vez que o processo depende simultaneamente de fatores como composição da liga, disponibilidade de eletrólitos, estabilidade da película passiva, condições ambientais e características microestruturais do material.

Dessa forma, a interpretação do comportamento corrosivo neste estudo foi fundamentada principalmente nos resultados de perda de massa e nas modificações superficiais observadas por

microscopia eletrônica de varredura (MEV), que constituem evidências experimentais mais robustas da degradação da liga de alumínio. Nesse contexto, os resultados de DDP foram empregados como uma ferramenta complementar de monitoramento, corroborando qualitativamente as tendências observadas nas demais análises realizadas.

4.3. Monitoramento da Temperatura e da Umidade Relativa

A temperatura ambiente permaneceu entre 22 °C e 26 °C durante todo o ensaio, sem variações bruscas. Como o aumento de temperatura tende a elevar a mobilidade iônica e acelerar as reações de corrosão (Gentil, 2022; Revie; Uhlig, 2011), essa amplitude reduzida sugere influência limitada dessa variável, atribuindo-se os resultados predominantemente às características dos combustíveis avaliados.

A umidade relativa indicou presença contínua de umidade no ambiente, fator relevante para sistemas contendo etanol dado seu caráter higroscópico: segundo Ambrozin et al. (2009), a absorção de umidade aumenta a condutividade elétrica do meio e intensifica os processos corrosivos, o que é coerente com as maiores oscilações de pH e os maiores níveis de degradação observados no Grupo D. Embora não controlada artificialmente, a umidade permaneceu suficiente para possibilitar essa absorção pelos combustíveis contendo etanol.

4.4. Determinação da Taxa de Corrosão

A taxa de corrosão foi determinada com base na perda de massa, na área superficial e no tempo de exposição de cada corpo de prova, conforme a metodologia da ASTM G31 (2021). A Tabela 3 apresenta a

diferença mássica registrada para cada corpo de prova ao final dos 90 dias de ensaio.

Tabela 3. Diferença mássica dos corpos de prova

Corpo de prova	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Diferença de massa (g)
A1	16,7124	16,7067	-0,0057
A2	13,1967	13,1919	-0,0048
A3	17,5483	17,5453	-0,0030
B1	13,0157	13,0101	-0,0056
B2	13,0607	13,0547	-0,0060
B3	13,1427	13,1361	-0,0066
C1	16,5946	16,5829	-0,0117
C2	18,1499	18,1401	-0,0098
C3	19,0221	18,9998	-0,0223
D1	7,1197	6,9434	-0,1763
D2	7,2574	7,2438	-0,0136
D3	7,1316	6,9162	-0,2154
E1	9,9583	9,9583	0
E2	11,7890	11,7890	0
E3	7,4757	7,4757	0

Fonte: Autores (2026).

A Tabela 4 apresenta a taxa de corrosão calculada para cada grupo, classificada segundo os intervalos propostos por Gentil (2022): baixa corrosividade (< 0,025 mm/ano), corrosividade moderada (0,025-0,12 mm/ano), alta corrosividade (0,13-0,25 mm/ano) e corrosividade severa (> 0,25 mm/ano). Ressalta-se que essa escala foi originalmente proposta com base majoritariamente em dados de corrosão de aço carbono em ambientes atmosféricos e aquosos industriais, sendo aqui empregada de forma comparativa e adaptada ao sistema liga de alumínio-combustível, e não como validação direta de severidade absoluta nesse contexto específico.

Tabela 4. Taxa de corrosão por corpo de prova

Corpo de prova	Área (mm^2)	Tempo (d)	Densidade (g/cm^3)	Taxa de corrosão (mm/ano)
A1	827,69	90	2,67	0,01046
A2	918,14	90	2,67	0,00794
A3	928,30	90	2,67	0,00491
B1	1064,00	90	2,67	0,00799
B2	896,22	90	2,67	0,01017
B3	742,83	90	2,67	0,01350
C1	731,60	90	2,67	0,02429
C2	955,20	90	2,67	0,01558
C3	808,22	90	2,67	0,04191
D1	831,41	90	2,67	0,32209
D2	515,69	90	2,67	0,04010

D3	595,20	90	2,67	0,54970
E1-E3	-	90	2,67	0 (sem variação de massa)

Fonte: Autores (2026), com classificação adaptada de Gentil (2022).

O Grupo A (gasolina comum, E27) apresentou as menores taxas, entre 0,00491 e 0,01046 mm/ano (média ≈ 0,00777 mm/ano), de baixa corrosividade. O Grupo B (gasolina aditivada) apresentou taxa média semelhante (≈ 0,01055 mm/ano), também baixa, sugerindo que os aditivos não intensificaram o processo, atribuível à baixa condutividade elétrica da gasolina e à limitada disponibilidade de espécies agressivas no meio.

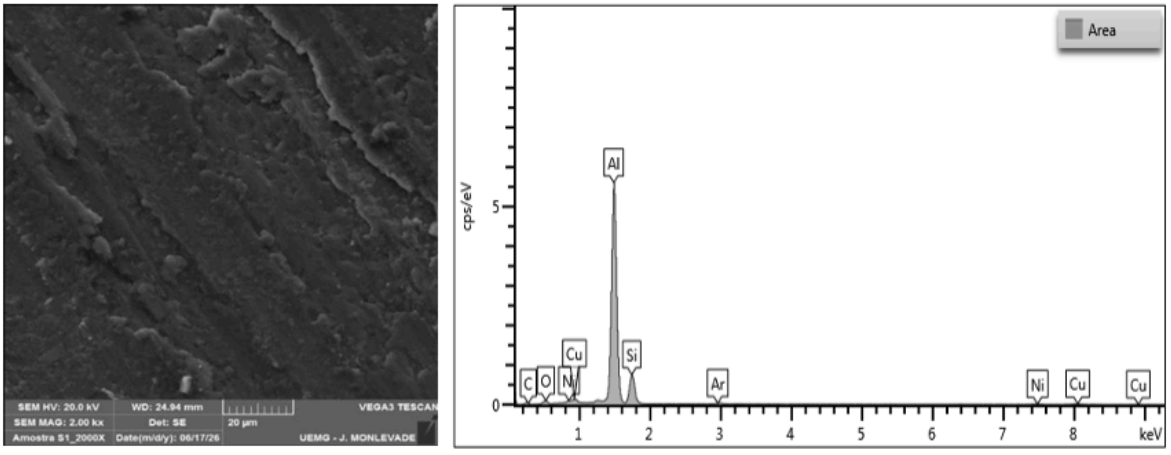
O etanol puro (Grupo C) apresentou aumento expressivo, entre 0,01558 e 0,04191 mm/ano (média ≈ 0,02726 mm/ano), corrosividade moderada explicada pelo caráter higroscópico do etanol, que aumenta a condutividade do meio e facilita a degradação da camada passiva de óxido. O comportamento mais crítico ocorreu no Grupo D (E50), com taxas entre 0,04010 e 0,54970 mm/ano (média ≈ 0,3040 mm/ano, coeficiente de variação de aproximadamente 84%), classificado como corrosividade severa e atribuído à combinação de gasolina, etanol e água absorvida, favorecendo um meio mais condutivo e propício a microcélulas eletroquímicas. A elevada dispersão entre réplicas recomenda cautela na interpretação absoluta dessa média e reforça a necessidade de mais réplicas em estudos futuros.

4.5. Caracterização Morfológica por MEV e EDS

Para facilitar a comparação dos efeitos dos combustíveis, os resultados foram organizados em cinco grupos: amostras de referência (antes do ensaio), Grupo A (gasolina comum), Grupo B (gasolina aditivada), Grupo C (etanol) e Grupo D (mistura E50).

A amostra de referência (Figura 3) apresentou superfície homogênea, com sulcos de preparação metalográfica e ausência de ataque corrosivo (pites, cavidades ou dissolução localizada). O EDS confirmou a composição da liga Al-Si, com alumínio, silício, cobre e níquel (elementos de liga) e oxigênio associado à camada passiva natural de Al_2O_3.

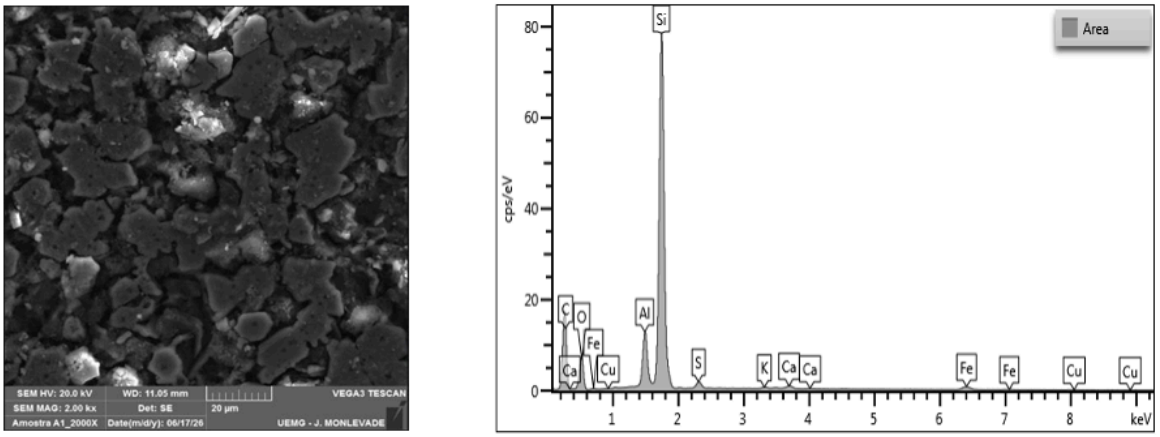
Figura 3. Micrografia MEV (2000x) e espectro EDS da amostra antes do ensaio imersivo



Fonte: Autores, (2026)

Após 90 dias no Grupo A (gasolina comum), a amostra A1 (Figura 4) apresentou alteração discreta, com sulcos de preparação menos visíveis e partículas dispersas, sem ataque severo ou cavidades profundas. O EDS confirmou Al e Si, além de oxigênio, carbono, enxofre, ferro, cálcio e potássio, compatível com a baixa taxa de corrosão do grupo.

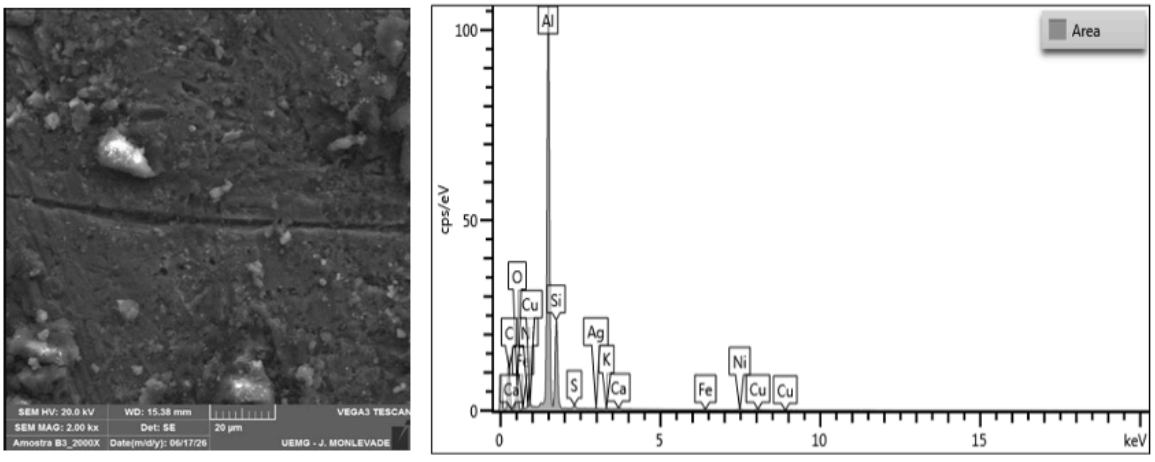
Figura 4. Micrografia MEV e espectro EDS do corpo de prova A1 após ensaio imersivo



Fonte: Autores, (2026)

No Grupo B (gasolina aditivada), a amostra B3 (Figura 4) apresentou morfologia heterogênea, com partículas aderidas e sulcos ainda evidentes, sem corrosão localizada severa. O EDS revelou alumínio, oxigênio, silício, carbono, magnésio, cobre, ferro, níquel, potássio, cálcio, enxofre e prata, os três últimos possivelmente associados a resíduos dos aditivos detergentes e dispersantes.

Figura 4. Micrografia MEV e espectro EDS do corpo de prova B3 após ensaio imersivo

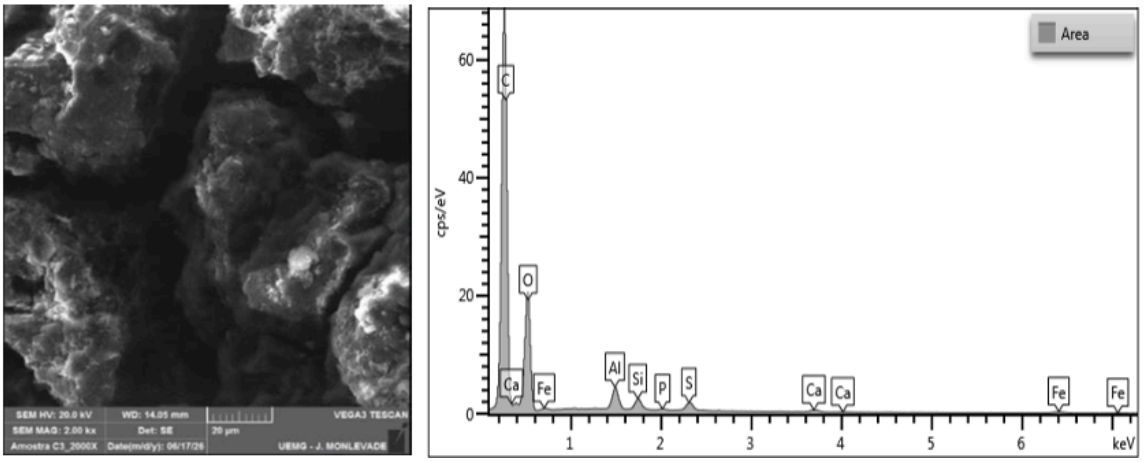


Fonte: Autores, (2026)

A amostra C3 (Grupo C, etanol; Figura 5) apresentou superfície intensamente modificada, recoberta por camada espessa e irregular

de produtos de corrosão, mais rugosa e heterogênea que nos grupos anteriores, com indícios de dissolução localizada da camada passiva. O EDS evidenciou predominância de carbono e oxigênio, picos de alumínio atenuados, e presença de enxofre, fósforo, cálcio e ferro, possíveis pontos preferenciais para microcélulas eletroquímicas.

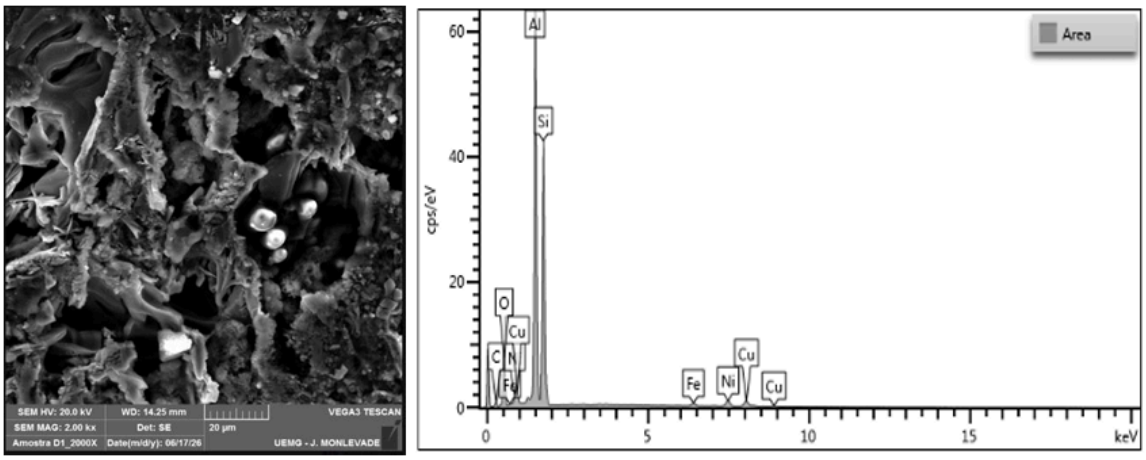
Figura 5. Micrografia MEV e espectro EDS do corpo de prova C3 após ensaio imersivo



Fonte: Autores, (2026)

No Grupo D (E50), a amostra D1 (Figura 6) apresentou a alteração morfológica mais expressiva, com estruturas lamelares, aglomerados irregulares, cavidades e depósitos globulares, indicando degradação mais intensa que nos demais combustíveis. O EDS revelou alumínio e silício, além de oxigênio, carbono, cobre, ferro e níquel; a coexistência de alumínio exposto e produtos de oxidação sugere formação ativa de óxidos e hidróxidos, enquanto ferro, cobre e níquel, associados a fases intermetálicas, podem favorecer microcélulas galvânicas e intensificar a corrosão localizada.

Figura 6. Micrografia MEV e espectro EDS do corpo de prova D1 após ensaio imersivo



Fonte: Autores, (2026)

De modo geral, as micrografias por MEV evidenciaram diferenças significativas no comportamento corrosivo da liga Al-Si entre os combustíveis. Gasolina comum e aditivada apresentaram alterações discretas, com manutenção da integridade superficial e da camada passiva de óxido. Etanol e, mais intensamente, a mistura E50 apresentaram as alterações mais pronunciadas, com maior formação de depósitos, rugosidade e recobrimento por produtos de corrosão, achados consistentes com os resultados de perda de massa, DDP e taxa de corrosão, e que confirmam que o aumento da concentração de etanol intensifica a agressividade do meio sobre a liga estudada.

Como limitação deste estudo, destaca-se que os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente (22-26 °C), consideravelmente inferior à temperatura de operação real de um pistão automotivo, da ordem de 90 °C ou mais quando consideradas as condições médias de funcionamento do motor. Como reações eletroquímicas tendem a se acelerar com o aumento da temperatura, os valores absolutos de taxa de corrosão aqui obtidos não devem ser extrapolados diretamente para a condição real de operação do motor, servindo principalmente como parâmetro de comparação relativa entre os combustíveis avaliados.

CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente a influência de diferentes combustíveis sobre o comportamento corrosivo de uma liga de alumínio-silício utilizada em pistões automotivos, buscando compreender os efeitos do aumento da concentração de etanol na integridade do material. Com base nas análises de perda de massa, pH, diferença de potencial elétrico (DDP), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS), verificou-se que os diferentes combustíveis promoveram distintos níveis de alteração superficial na liga estudada: embora todos os meios tenham provocado algum grau de degradação, a intensidade desses efeitos variou de acordo com a composição do combustível.

As amostras expostas à gasolina comum e à gasolina aditivada apresentaram as menores modificações superficiais, evidenciando manutenção da camada passiva de alumínio e menor formação de produtos de corrosão. Em contrapartida, as amostras expostas ao etanol e, sobretudo, à mistura contendo 50% de etanol e 50% de gasolina apresentaram maior degradação superficial, caracterizada pela formação de depósitos, aumento da rugosidade, recobrimento por produtos de corrosão e maior atividade eletroquímica.

Dessa forma, o problema de pesquisa foi respondido: o aumento da concentração de etanol influencia diretamente o comportamento corrosivo da liga de alumínio do pistão, sendo a mistura de gasolina com 50% de etanol o meio mais agressivo entre os avaliados. Os objetivos específicos propostos também foram plenamente alcançados, incluindo a preparação dos corpos de prova, a realização dos ensaios de imersão, o monitoramento das variáveis

experimentais e a caracterização microestrutural antes e após a exposição aos combustíveis.

Como contribuição, este trabalho amplia o conhecimento sobre a interação entre combustíveis automotivos e ligas de alumínio em motores do ciclo Otto, fornecendo dados que podem subsidiar pesquisas futuras sobre corrosão em sistemas automotivos e reforçando, para a Engenharia Mecânica, a importância da seleção adequada de materiais frente a combustíveis alternativos. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios com períodos de exposição mais longos e em temperatura controlada, próxima à de operação real dos motores (em torno de 90 °C), além da investigação de outras proporções de etanol na gasolina e de diferentes ligas metálicas e revestimentos protetivos utilizados em componentes automotivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024.** Brasília, DF: ANP, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Considerações sobre o aumento da mistura de etanol anidro na gasolina para E30 e E35.** Brasília, DF: ANP, 2024.

AMBROZIN, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R. Corrosão de materiais metálicos em combustíveis contendo etanol. **Química Nova,** São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1910-1916, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15905: Motores de combustão interna de ignição por centelha — Pistões monolíticos de liga leve de alumínio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G31-21: Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BRITO-FRANCO, A. Corrosion Behaviour of Aluminium Alloys in Ethanol-Gasoline Blends. **Energies,** Basel, v. 13, n. 21, p. 5544, 2020.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna.** 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CATUNDA, C. E. G. **Motores de combustão interna.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

CHAVES, R. T. **Estudo do uso de misturas de etanol-gasolina em motores de ignição por centelha.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DEVAVID, E. S. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras — materiais biológicos.** Campina Grande: EMBRAPA Algodão, 2007.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering.** 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; PEREIRA, M. C.; D'ELIA, E. Corrosão em sistemas de combustíveis automotivos: mecanismos, monitoramento e controle. **Revista Virtual de Química,** v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

GENTIL, V. **Corrosão.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Métodos laboratoriais para avaliação de corrosão em combustíveis etanol-base.** São Paulo: IPT, 2021.

KAUFMAN, J. G. **Introduction to Aluminum Alloys and Tempers.** Materials Park: ASM International, 2019.

KRIEGER FILHO, G. C. **Análise de falhas em componentes metálicos.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** São Paulo: Atlas, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Evolução das misturas de etanol na matriz automotiva.** Brasília, DF: MME, 2024.

OLIVEIRA, E. M. **Avaliação da corrosão em chapas de aço carbono com e sem revestimento organometálico, em contato com os sistemas gasolina/etanol e diesel/biodiesel.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades.** Rio de Janeiro: LTC, 2020.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Uhlig's Corrosion Handbook.** 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

SANTOS, C. A. L.; TIROEL, L. C. O.; OLIVEIRA, E. C.; ALMEIDA, N. L. O estado da arte da corrosão pelo etanol combustível. In: INTERNATIONAL CORROSION MEETING, 7., 2018, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABRACO, 2018.

TILLMANN, C. A. C. **Motores de combustão interna.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

---

[1] Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade João Monlevade. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Engenheiro Mecânico pela Universidade do Estado de Minas Gerais. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Engenheiro Mecânico pela Universidade do Estado de Minas Gerais. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade João Monlevade.
E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail