

Avaliação da corrosividade do etanol combustível e remoção de ácido acético utilizando resinas de troca iônica: estudos de equilíbrio, cinética e curvas de ruptura

Chrysttian M. S. Garcia¹, Estevan D. Cruz¹, Francisco D. Vezaro¹, Alex Schulz¹,
Ederson R. Abaide¹, Flávio D. Mayer¹

¹Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, Rio Grande do Sul
(chrysttian.garcia@acad.ufsm.br)

Resumo: A presença de ácidos orgânicos no etanol combustível pode aumentar significativamente sua corrosividade sobre os sistemas automotivos de combustível. Este estudo avaliou a relação entre a composição do etanol e a corrosão de válvulas injetoras de combustível de aço inoxidável, além de investigar a remoção de ácido acético do etanol combustível utilizando resinas de troca iônica. Ensaaios de imersão de longa duração (90 dias a 70 °C) foram realizados e revelaram ausência de corrosão visível no etanol anidro, enquanto o etanol hidratado promoveu corrosão severa acompanhada por concentrações de ácido acético superiores a 900 mg•L⁻¹. Amostras comerciais de etanol também apresentaram corrosão quando a acidez total aumentou para até 498,6 mg•L⁻¹. Testes com etanol sintético confirmaram que o aumento da concentração de ácido acético intensificou a corrosão e que as interações entre etanol e metal podem promover a formação de ácidos, atingindo até 372,6 mg•L⁻¹ mesmo em soluções inicialmente livres de ácido. Para mitigar esse problema, foi avaliado o desempenho de adsorção das resinas Amberlite IRA-67 e IRA-96. A IRA-67 apresentou desempenho superior, atingindo o equilíbrio de adsorção entre 60 e 90 minutos e capacidades máximas de adsorção entre 14 e 25 mg•g⁻¹. A resina manteve boa seletividade na presença de ácidos concorrentes e reteve cerca de 85% de sua capacidade de adsorção após cinco ciclos de regeneração. Em amostras reais de etanol combustível, a remoção de ácido acético variou entre 30 e 41%, reduzindo as concentrações para valores inferiores aos limites regulatórios. Experimentos contínuos em leito fixo mostraram eficiências iniciais de remoção superiores a 95%, com a ruptura da coluna (*breakthrough*) ocorrendo após aproximadamente 50 minutos. Os resultados confirmaram a viabilidade da tecnologia de troca iônica para a purificação de etanol combustível e podem ser utilizados no desenvolvimento de um filtro para aplicação em postos de combustíveis ou em sistemas automotivos de injeção de combustível.

Palavras-chave: Etanol combustível; Ácido acético; Corrosão; Resinas de troca iônica

INTRODUÇÃO

Diante dos desafios de redução de emissões de CO₂ na atmosfera e das preocupações com o declínio dos recursos fósseis, destaca-se o aumento do uso de fontes de energia renovável, como o etanol, porque reduz as emissões de gases de efeito estufa em 40 a 62% em comparação com combustíveis fósseis (Lopes et al., 2016). Os Estados Unidos da América e o Brasil são os maiores produtores mundiais de etanol (Canterle et al., 2023), respondendo por 61,40 bilhões e 37 bilhões de litros em 2024, respectivamente (Agência Nacional do Petróleo, 2023).

Impurezas, água e ácidos orgânicos podem ser encontrados no etanol obtido de biomassa. Alguns compostos presentes no etanol podem causar corrosão de componentes do motor, como água, metanol, resíduos ácidos, cloretos e sulfatos (Styarini et al., 2013). Devido à sua alta hidrofiliabilidade, o etanol pode aumentar o teor de água em sistemas de combustível automotivo, e o ácido acético produzido

pela oxidação de compostos orgânicos pode promover aumento da corrosão de componentes metálicos (Ren et al., 2025; Tan et al., 2025). Infelizmente, parte do ácido acético pode permanecer no etanol após os processos de destilação e desidratação ou ser formado após períodos relativamente longos de armazenamento. Outros ácidos orgânicos comumente encontrados em combustível etanólico são ácido fórmico, propiônico e n-butírico (Wongsurakul et al., 2022).

Em paralelo com o aumento do uso de etanol como combustível renovável, muitos estudos avaliaram o comportamento corrosivo deste biocombustível em diversos metais e ligas. A maioria das pesquisas avalia a corrosão de aço carbono ou aços de baixa liga em contato com etanol ou misturas etanol-gasolina (Abel; Virtanen, 2015; Radi et al., 2019; Ren et al., 2025). A corrosão de aço carbono a partir de etanol combustível com diferentes teores de água, cloreto e ácido acético foi avaliada em estudo anterior (Lou; Singh, 2010), demonstrando a forte



relevância do teor de água na indução da corrosão. Além disso, é notável que maiores teores de ácido acético no etanol levaram a uma área de ataque maior durante o processo de corrosão (Abel; Virtanen, 2015).

Para remover compostos que conferem características corrosivas ao etanol combustível, diferentes métodos foram utilizados, como extração com fluido supercrítico, troca iônica, eletrodialise, extração e métodos utilizando membranas em sistemas pressurizados (Morselli et al., 2024; Wu et al., 2021). Alguns métodos, como neutralização e destilação, são amplamente utilizados industrialmente, mas enfrentam problemas econômicos e ambientais, uma vez que as baixas concentrações de ácido acético em caldos fermentados requerem consumo significativo de energia. A presença de fosfatos, cloretos, sulfatos e proteínas, que podem interferir na etapa de purificação, também deve ser considerada no processo de separação a jusante (Roncal et al., 2025).

Uma tecnologia que requer baixo consumo de energia para a etapa de purificação do etanol é a troca iônica (TI). Esta tecnologia de separação utiliza resinas de troca iônica, compostas por um polímero com grupos funcionais carregados positiva ou negativamente para remover contaminantes diluídos. A remoção de ácidos de meios aquosos e orgânicos utilizando resinas de troca iônica tem sido considerada um processo eficiente e econômico, incluindo aplicações em bioseparações de ácidos orgânicos, como ácido acético presente em caldos fermentados aquosos (Karekar; Srinivas; Ahring, 2022). Entretanto, a literatura apresenta uma lacuna no que diz respeito ao uso de resinas de troca iônica para remoção de ácido acético de etanol combustível, sendo os estudos nesta área ainda limitados.

Dado o contexto atual e a necessidade de remover contaminantes do etanol combustível para evitar problemas de corrosão em peças do motor automotivo, este estudo visa avaliar o efeito corrosivo de amostras de etanol combustível derivado de milho obtidas em diferentes regiões do Brasil em válvulas injetoras de combustível em aço inoxidável, bem como a composição destas amostras, relacionando o efeito dos teores de água e ácidos orgânicos (acético e fórmico) no processo de corrosão. Com base nesta avaliação e informações de estudos recentes da literatura, avaliou-se a capacidade de adsorção das resinas IRA-67 e IRA-96 para a remoção de ácido acético de etanol combustível.

Assim, este trabalho investigou o comportamento corrosivo de amostras de etanol combustível de diferentes regiões do Brasil em válvulas injetoras de aço inoxidável, buscando

correlacionar os efeitos da água e de ácidos orgânicos com a corrosão. Paralelamente, avaliou-se o desempenho de duas resinas de troca iônica (Amberlite IRA-67 e IRA-96) na remoção de ácido acético, verificando seu potencial como solução para a purificação desse combustível.

MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais foram delineados para investigar a corrosão de válvulas injetoras de aço inoxidável em contato com diferentes amostras de etanol e avaliar estratégias de remoção de ácidos orgânicos mediante adsorção com resinas de troca iônica. As etapas foram estruturadas em três eixos complementares: ensaios de corrosão por imersão prolongada, caracterização das soluções etanólicas e avaliação da eficiência de tratamento por adsorção.

Os experimentos utilizaram etanol anidro de grau analítico obtido de fornecedor certificado, ácidos orgânicos de alta pureza, e válvulas de aço inoxidável provenientes de empresa do setor automotivo. Ensaios de corrosão foram conduzidos com o objetivo de avaliar a integridade de válvulas injetoras de combustível em aço inoxidável imersas em diferentes amostras de etanol. Estes ensaios foram realizados em um aparato experimental construído com base nas diretrizes da norma ASTM G31-21 (2021) (Figura 1). O sistema consistiu em um frasco volumétrico de fundo redondo contendo a solução etanólica (1), aquecido por uma manta térmica elétrica ajustada para manter a temperatura em 70 ± 3 °C (2). Para prevenir perdas por evaporação, um condensador vertical (3) foi acoplado ao frasco, conectado a um banho ultra-termostático (4). As amostras metálicas (5) foram fixadas por fios de nylon (6) e cuidadosamente suspensas dentro do frasco, garantindo imersão total na solução durante todo o experimento. O conjunto inteiro foi suportado por um suporte universal (7), garantindo estabilidade durante a operação contínua. As coletas de etanol foram feitas em intervalos definidos para monitorar alterações na composição química da solução.

Foram testadas amostras comerciais de etanol coletadas diretamente em destilarias de milho e postos de combustível, juntamente com soluções sintéticas preparadas com concentrações conhecidas de ácido acético. A avaliação da remoção de ácidos orgânicos foi conduzida através de ensaios de adsorção em lote utilizando duas resinas de troca iônica de caráter fracamente básico, com investigações sistemáticas das melhores condições operacionais. Os estudos abrangeram avaliação da dosagem ideal de adsorvente, determinação de parâmetros cinéticos testados contra três modelos matemáticos diferentes, e obtenção de isotermas de equilíbrio ajustadas a diferentes modelos teóricos

para compreender os mecanismos de sorção. Parâmetros termodinâmicos foram calculados para caracterizar a natureza espontânea, exotérmica ou endotérmica do processo.

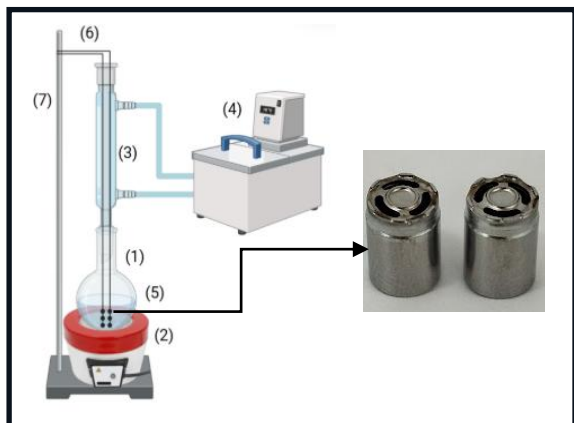


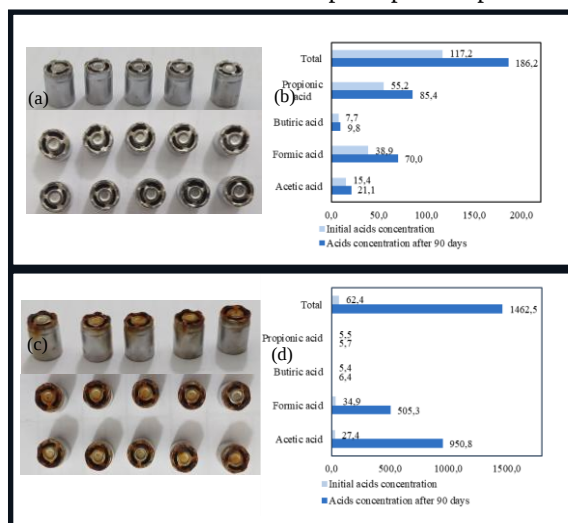
Figura 1. Aparato experimental do ensaio de corrosão de válvulas injetoras de combustível em aço inoxidável.

Testes adicionais examinaram como a presença simultânea de outros ácidos orgânicos influencia a adsorção preferencial do ácido acético, e foram realizados ciclos de regeneração das resinas para avaliar a viabilidade de reutilização do material. Experimentos de separação em coluna foram conduzidos sob fluxo contínuo em equipamento pressurizado, onde soluções etanólicas contendo ácido acético foram recirculadas sob condições controladas de temperatura e vazão. A quantificação de ácido acético foi realizada por cromatografia gasosa com detector de ionização de chama, utilizando uma série de padrões sintéticos para construir curvas de calibração na faixa de concentração esperada. As resinas foram caracterizadas por espectroscopia de infravermelhos para identificar os grupos funcionais presentes e elucidar os mecanismos de interação com os ácidos adsorvidos. Análises estatísticas foram realizadas por regressão não linear para determinar os parâmetros cinéticos e de equilíbrio obtidos experimentalmente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de corrosão e composição do etanol: Nos ensaios com válvulas injetoras submersas em etanol de milho anidro, a inspeção visual não revelou sinais de corrosão. A superfície permaneceu íntegra, com brilho metálico preservado, e os teores de ácidos orgânicos não apresentaram variação estatisticamente significativa entre o início e o fim do ensaio (90 dias) como pode ser visto na Figura 2.a. Em contrapartida, as amostras de etanol de milho hidratado apresentaram sinais claros de corrosão agressiva, com coloração amarelada e precipitado sólido aderido, além de aumento expressivo na concentração de ácidos orgânicos, com destaque para

o ácido acético, que ultrapassou $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, e o ácido fórmico, como pode ser visto na Figura 2.c. Esses dois ácidos foram os principais responsáveis



pelo aumento da acidez.

Figura 2. Válvulas injetoras de combustível em aço inoxidável testadas com amostras de etanol anidro (a, b) e etanol hidratado (c, d) coletadas em diferentes destilarias em diferentes regiões do Brasil, mostrando as concentrações de ácidos medidas antes e após o ensaio de corrosão.

A maior formação de ácidos orgânicos no etanol hidratado pode ser explicada por uma cadeia oxidativa bem estabelecida: o etanol sofre oxidação pelo oxigênio dissolvido, formando acetaldeído como intermediário, que por autooxidação resulta em ácido acético (Lv et al., 2012). A água atua como facilitadora do processo, pois aumenta a condutividade iônica da solução, promove reações eletroquímicas na interface metal-solução e intensifica a instabilidade do filme passivo. No etanol anidro, a ausência de água limita essas rotas de degradação (Lou; Singh, 2010).

As amostras comerciais de Mato Grosso (MT) e Goiás (GO) apresentaram corrosão nas partes metálicas, com escurecimento progressivo das superfícies. Na amostra de MT, a acidez total aumentou de $94,2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (dia 0) para $498,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (dia 90), com destaque para a elevação do ácido acético ($36,7$ para $365,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Já a amostra do Rio Grande do Sul não apresentou sinais visuais de corrosão, com variação mínima da acidez total ($22,9$ para $23,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), indicando baixa atividade corrosiva.

Curiosamente, nas soluções sintéticas, a solução controle, sem adição de ácido acético, foi a que apresentou a maior concentração final, atingindo $372,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Esse resultado reforça a hipótese de que o contato entre etanol e metal é capaz de desencadear reações de degradação que levam à

formação espontânea de compostos ácidos, sugerindo que o metal atua como catalisador na oxidação do etanol (Lou; Singh, 2010).

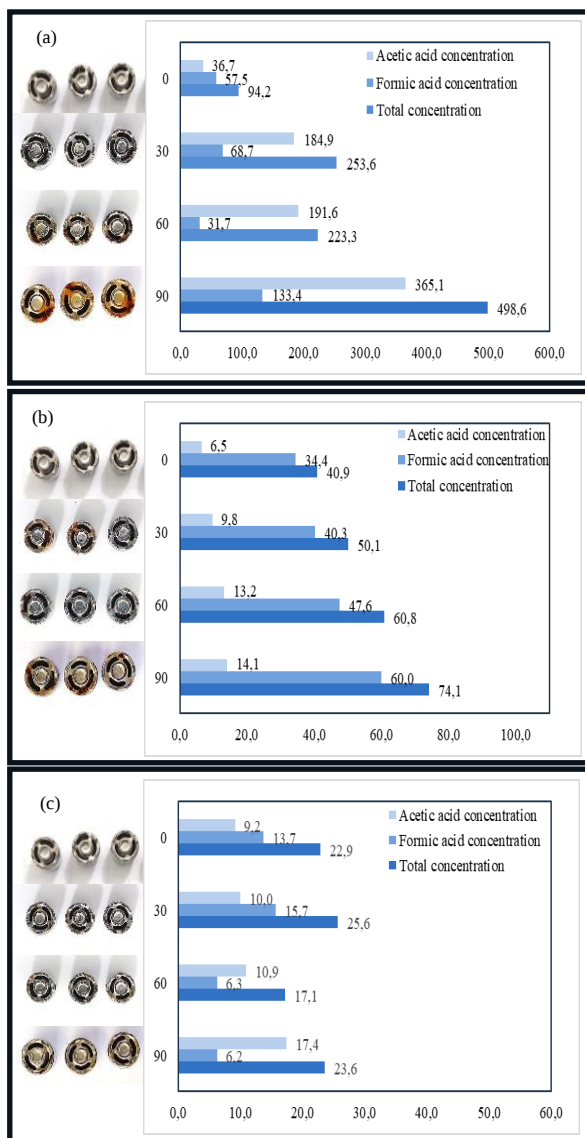


Figura 3. Válvulas injetoras de combustível em aço inoxidável utilizadas em ensaios com etanol hidratado proveniente dos estados de Mato Grosso (a), Goiás (b) e Rio Grande do Sul (c), avaliadas em quatro períodos de exposição, com suas respectivas concentrações de ácidos.

Ensaio de adsorção: O aumento da dosagem da resina IRA-67 de 0,5 para 5 g•L⁻¹ elevou a eficiência de remoção de cerca de 30% para aproximadamente 58%, devido à maior disponibilidade de sítios ativos. Por outro lado, a capacidade de adsorção (q_t) diminuiu de aproximadamente 17 para 3 mg•g⁻¹, fenômeno associado à subutilização do adsorvente quando o número de sítios excede a quantidade de soluto. A IRA-67, funcionalizada com grupos amina terciária, apresentou desempenho superior à IRA-96, uma vez que esses grupos formam ligações de

hidrogênio fracas e reversíveis com o ácido, favorecendo tanto a adsorção seletiva quanto a regeneração (Rebecchi et al., 2016). A dosagem ótima da IRA-67 foi estabelecida em 1,389 g•L⁻¹.

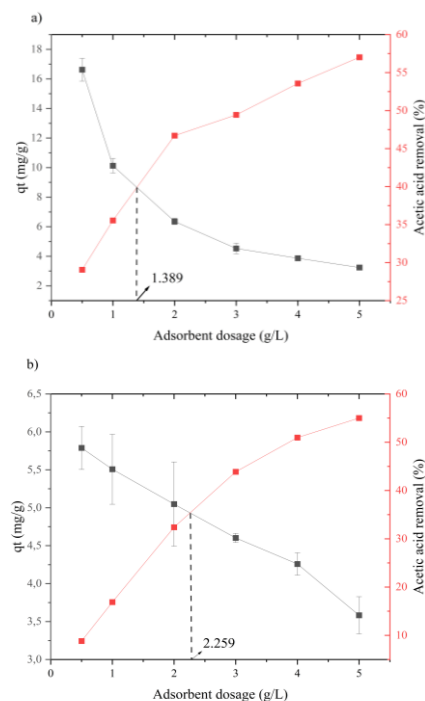


Figura 4. Efeito da dosagem na adsorção de ácido acético em amostras de resina de troca iônica, IRA-67 (a), IRA-96 (b) ($C_0 = 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 25 °C, 150 RPM e 24 h).

A cinética de adsorção foi avaliada pelos modelos de pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO) e Elovich. O equilíbrio foi atingido em 60 min para 20 mg•L⁻¹ e em cerca de 90 min para 50 mg•L⁻¹ (Figura 5). O modelo PSO foi o que melhor representou os dados experimentais, com os maiores valores de R^2 ajustado (0,986 e 0,998) e os menores valores de qui-quadrado reduzido e erro relativo absoluto, indicando que a adsorção no sítio ativo é a etapa dominante.

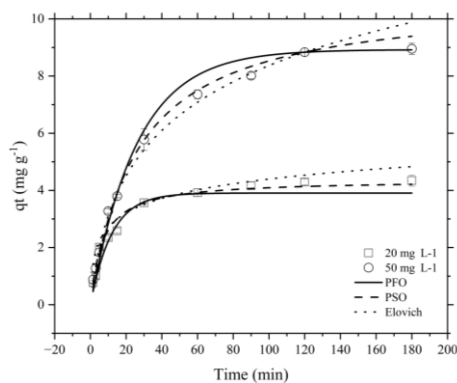


Figura 5. Curvas cinéticas para a adsorção de ácido acético na resina IRA-67 (25 °C e dosagem de 1,389 g•L⁻¹).

As isotermas de equilíbrio, obtidas a 10, 25 e 40 °C, foram ajustadas aos modelos de Langmuir, Freundlich e Sips. O modelo de Sips apresentou o melhor desempenho geral (R^2 ajustado acima de 0,992), combinando a saturação finita de Langmuir com a flexibilidade de Freundlich para descrever superfícies heterogêneas. Os valores de $q_{\text{máx}}$ estimados por Sips foram fisicamente consistentes, variando de 14 a 25 mg•g⁻¹. O parâmetro n , inferior a 1 em todas as temperaturas (0,44; 0,26 e 0,14), indica superfície altamente heterogênea e intensificação da competição entre etanol e ácido acético pelos sítios ativos com o aumento da temperatura.

Tabela 1. Parâmetros do modelo de Sips para a adsorção de ácido acético na resina IRA-67.

Parâmetro	10 °C	25 °C	40 °C
$q_{\text{máx}}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	47,48	24,87	14,31
K_S	$1,76 \times 10^{-4}$	$9,78 \times 10^{-6}$	$1,08 \times 10^{-9}$
n	0,4445	0,2628	0,1419
R^2 ajustado	0,9920	0,9971	0,9987

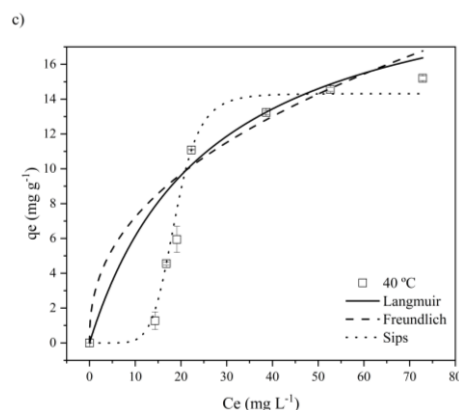
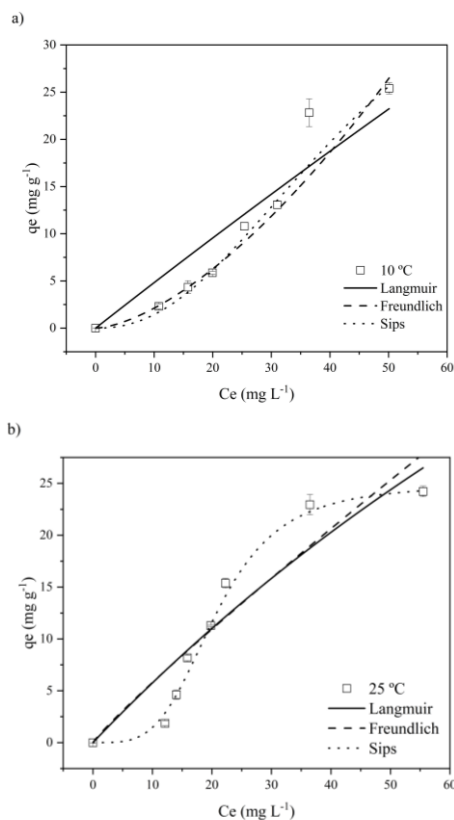


Figura 6. Curvas de isoterma para a adsorção de ácido acético em resina IRA-67: 10 °C (a), 25 °C (b) e 45 °C (c) (dosagem de adsorvente de 1,389 g•L⁻¹ e 2 h).

A análise termodinâmica indicou valores negativos de ΔG em todas as temperaturas (-16,86; -19,76 e -21,02 kJ•mol⁻¹), confirmando a espontaneidade do processo. A entalpia positiva ($\Delta H = +22,71$ kJ•mol⁻¹) reflete o balanço líquido de múltiplos fenômenos no meio etanólico, incluindo a ruptura da camada de solvatação do ácido e o deslocamento das moléculas de etanol da superfície da resina. A elevada variação de entropia ($\Delta S = +140,6$ J•mol⁻¹•K⁻¹) constitui a principal força motriz do processo, atribuída à liberação de moléculas de etanol durante a adsorção (Anasthas; Gaikar, 2001).

A caracterização estrutural da resina Amberlite IRA-67 por espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FT-IR) fornece uma elucidação abrangente dos grupos funcionais presentes na matriz polimérica e esclarece as modificações moleculares associadas à adsorção de ácidos orgânicos. No espectro da resina virgem, observam-se bandas características que confirmam a presença dos grupos funcionais esperados: vibrações de estiramento O-H (3447–3425 cm⁻¹) relacionadas a grupos hidroxila e água adsorvida, estiramento alifático de C-H da cadeia acrílica (2949–2720 cm⁻¹), grupos carbonila residuais (1652 cm⁻¹), e notavelmente, as bandas de estiramento C-N correspondentes a aminas terciárias (1305–1100 cm⁻¹), o grupo funcional responsável pela troca iônica.

Após o processo de adsorção, o espectro FT-IR exibe mudanças sistemáticas que refletem diretamente a interação entre a resina e os ácidos orgânicos. O deslocamento e alargamento da banda de O–H para 3472–3445 cm^{-1} sugerem fortalecimento das ligações de hidrogênio entre os grupos carboxila dos ácidos e os grupos hidroxila e nitrogênio da resina. A região de estiramento de C–H permanece essencialmente inalterada, indicando que a estrutura acrílica não sofre degradação. As bandas de estiramento C–N exibem deslocamentos sutis, consistentes com protonação parcial de aminas terciárias e formação de pares iônicos, sem indicar protonação completa da resina.

Os resultados indicam que o processo é dominado por quimissorção e não por mecanismos governados exclusivamente por forças físicas de baixa energia. O mecanismo central envolve troca iônica, na qual ocorre transferência de próton do ácido para a amina terciária, formando complexo iônico. Em solventes orgânicos, onde a constante dielétrica baixa minimiza dissociação de ácidos, o mecanismo dominante envolve formação de complexo ligado por hidrogênio entre o próton ácido e o par de elétrons isolado do nitrogênio amina (interação ácido-base de Lewis). A energia associada a este tipo de interação é substancialmente maior que a de forças de Van der Waals, realçando sua natureza química.

A superioridade das resinas fracamente básicas comparadas às fortemente básicas para adsorção de ácidos carboxílicos de meios orgânicos tem explicação estrutural: em grupos amônio quaternário, impedimento estérico previne formação efetiva de ligações de hidrogênio, enquanto aminas terciárias participam prontamente de ligações de hidrogênio com o próton ácido. Adicionalmente, a força de interação moderada de aminas terciárias permite regeneração efetiva sem dano estrutural à resina.

O etanol introduz efeitos competitivos que influenciam o mecanismo de adsorção. Como etanol é capaz de atuar como doador e aceitador de ligações de hidrogênio, compete com ácido acético pelos grupos amina da resina, reduzindo a capacidade geral de adsorção e contribuindo para heterogeneidade de superfície, consistente com o ajuste superior do modelo de isoterma de Sips observado.

A adsorção de ácido acético em Amberlite IRA-67 em meio etanólico envolve múltiplos mecanismos concorrentes: ligações de hidrogênio entre grupos carboxila e amina, transferência parcial de próton formando pares iônicos, e adsorção competitiva de etanol. Diferentemente de sistemas aquosos onde troca iônica clássica domina, o meio etanólico favorece ligações de hidrogênio e

interações ácido-base de Lewis como mecanismos primários de adsorção.

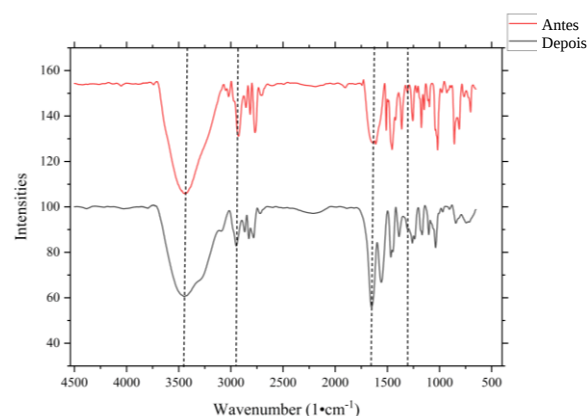


Figura 7. Espectros de FT-IR da resina Amberlite IRA-67 antes e após utilização.

Nos ensaios com adsorção competitiva, a IRA-67 manteve bom desempenho mesmo na presença de outros ácidos orgânicos: o ácido butírico causou a maior interferência (redução de 62% para 47% na remoção), enquanto os ácidos, fórmico e propiônico tiveram impacto mínimo. A resina também demonstrou boa estabilidade, mantendo cerca de 85% da capacidade original após cinco ciclos de regeneração com solução de NaOH 3%, como pode ser visto na Figura 8.

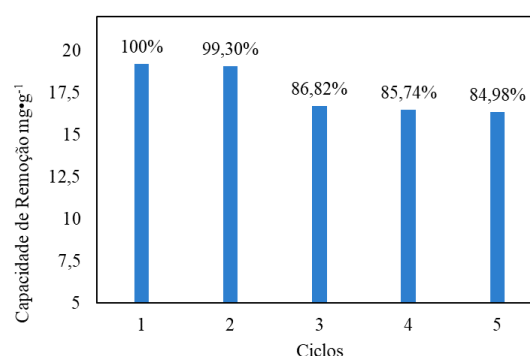


Figura 8. Capacidade de remoção e eficiência na reutilização da resina IRA-67 considerando cinco ciclos de remoção de ácido acético.

Em amostras reais, a remoção de ácido acético variou de 30 a 41%. Segundo a Resolução ANP nº 907 de 2022, a acidez máxima permitida no etanol combustível é de 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Agência Nacional do Petróleo, 2022). As amostras 1 e 3, com concentrações iniciais de 35,3 e 36,2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (acima do limite regulatório), foram reduzidas a 21,0 e 22,0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ após uma única etapa de adsorção, atingindo plena conformidade (Tabela 2). Isso demonstra que o tratamento por troca iônica pode converter etanol não conforme em produto adequado à comercialização em uma única etapa.

Tabela 2. Concentração de ácido acético e eficiência de remoção com a resina IRA-67 em amostras de etanol combustível.

Amostra	Antes (mg•L ⁻¹)	Depois (mg•L ⁻¹)	Remoção
1 (MS)	35,3	21,0	41%
2 (GO)	7,5	5,2	30%
3 (MT)	36,2	22,0	39%

Os ensaios em coluna de leito fixo indicaram eficiência de remoção inicial superior a 95%, com o ponto de ruptura (breakthrough) ocorrendo após aproximadamente 50 min de operação (Figura 3). Ao final do ensaio, após 240 min, a concentração no efluente se aproximou do valor inicial, indicando a saturação da coluna. Esse perfil é característico de sistemas de leito fixo, nos quais a zona de transferência de massa se desloca ao longo da coluna até a saturação, sendo essencial para o correto dimensionamento de sistemas contínuos (Wu et al., 2021).

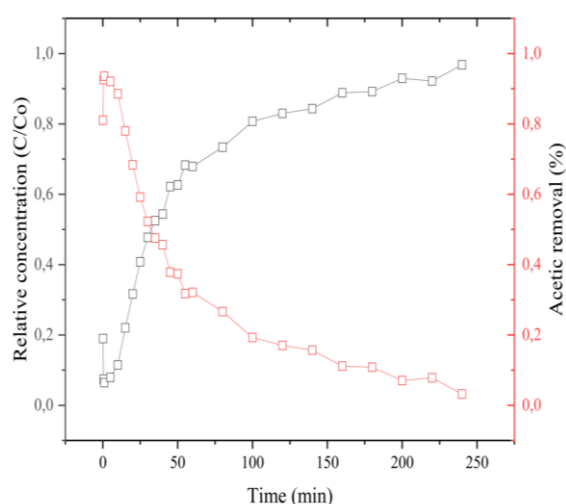


Figura 9. Curva de ruptura (breakthrough) da resina IRA-67 em coluna de leito fixo.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram claramente o papel crítico dos ácidos orgânicos, particularmente o ácido acético, na corrosividade do etanol combustível em materiais metálicos amplamente utilizados em sistemas de injeção automotiva. A exposição prolongada de válvulas injetoras em aço inoxidável a diferentes amostras de etanol revelou que o aumento da acidez, especialmente de ácidos de cadeia curta como ácido acético e fórmico, está diretamente associado à intensificação do processo corrosivo.

A avaliação da remoção de ácido acético utilizando resinas de troca iônica demonstrou que a Amberlite IRA-67, funcionalizada com grupos de amina terciária, apresentou o melhor desempenho entre os materiais testados, tanto em soluções preparadas em laboratório quanto em amostras reais de etanol comercial. A eficiência do processo de adsorção foi confirmada através de estudos cinéticos, de equilíbrio e termodinâmicos, com o modelo de pseudo-segunda ordem e a isoterma de Sips fornecendo a melhor descrição dos dados experimentais. A análise termodinâmica revelou um processo dirigido por entropia, onde a liberação de solvente fornece o principal motor termodinâmico para a adsorção espontânea apesar da mudança de entalpia endotérmica. A resina também se mostrou eficaz mesmo na presença de outros ácidos orgânicos, experimentando apenas reduções moderadas na capacidade, enquanto demonstrou boa regenerabilidade com manutenção significativa da eficiência após múltiplos ciclos de reuso.

Testes conduzidos em um sistema de leito fixo operando sob fluxo contínuo reforçaram o potencial desta tecnologia como alternativa viável para aplicações em escala industrial, demonstrando eficiência inicial de remoção elevada e comportamento característico de materiais com zonas de transferência de massa bem definidas. Notavelmente, o tratamento foi capaz de reduzir as concentrações de ácido acético em amostras de etanol combustível não-conformes aos níveis dentro dos limites regulatórios da ANP através de uma única etapa de processamento.

Assim, este trabalho confirma a viabilidade técnica da aplicação de resinas de troca iônica na purificação de etanol combustível, contribuindo diretamente para a redução dos efeitos corrosivos e a melhoria da qualidade do biocombustível. Os resultados apresentados fornecem suporte relevante para o desenvolvimento de estratégias industriais voltadas à proteção de componentes metálicos, promovendo maior durabilidade do sistema e segurança no uso do etanol como combustível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FUNDEP por meio do programa MOVER (Projeto nº 27192*53), da Marelli Sistemas Automotivos Ltda. e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 315671/2023-8)..

REFERÊNCIAS

ABEL, Jörg; VIRTANEN, Sannakaisa. Corrosion of martensitic stainless steel in ethanol-containing gasoline: Influence of contamination by chloride,



H₂O and acetic acid. **Corrosion Science**, v. 98, p. 318–326, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP no 907, de 18 de novembro de 2022 - DOU de 23-11-2022. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. Produção e Fornecimento de Biocombustíveis. 2023.

ANASTHAS, H. M.; GAIKAR, V. G. Adsorption of acetic acid on ion-exchange resins in non-aqueous conditions. **Reactive and Functional Polymers**, v. 47, n. 1, p. 23–35, 2001.

CANTERLE, Joseane Ortiz Breitenbach *et al.* Stress corrosion cracking in fuel-grade ethanol: The role of the testing methodology. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 280, n. November 2022, 2023.

KAREKAR, Supriya C.; SRINIVAS, Keerthi; AHRING, Birgitte K. Batch screening of weak base ion exchange resins for optimized extraction of acetic acid under fermentation conditions. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 11, n. June, 2022.

LOPES, Mario Lucio *et al.* Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 64–76, 2016.

LOU, Xiaoyuan; SINGH, Preet M. Role of water, acetic acid and chloride on corrosion and pitting behaviour of carbon steel in fuel-grade ethanol. **Corrosion Science**, v. 52, n. 7, p. 2303–2315, 2010.

LV, Huisheng *et al.* Removal of acetic acid from fuel ethanol using ion-exchange resin. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 12, p. 7299–7307, 2012.

MORSELLI, Elena *et al.* Recovery of carboxylic acids from actual effluent by using sequential cationic-anionic adsorption steps at semi pilot scale. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, 2024.

RADI, Polyana Alves *et al.* Tribocorrosion and corrosion behavior of stainless steel coated with DLC films in ethanol with different concentrations of water. **Ceramics International**, v. 45, n. 7, p. 9686–9693, 2019.

REBECCHI, Stefano *et al.* Volatile fatty acids recovery from the effluent of an acidogenic digestion process fed with grape pomace by adsorption on ion

exchange resins. **Chemical Engineering Journal**, v. 306, p. 629–639, 2016.

REN, Xiaohui *et al.* Experimental investigation of the corrosion behavior of Q235 steel in ethanol-gasoline blends. **Chemical Engineering Science**, v. 313, n. March, 2025.

RONCAL, Tomás *et al.* Recovery and purification of acetic acid from extremely diluted solutions using a mixed bed ion exchange resin - technical feasibility. **RSC Advances**, v. 15, n. 1, p. 477–488, 2025.

STYARINI, Dyah *et al.* Determination of organic impurities in lignocellulosic bioethanol product by GC-FID. **Energy Procedia**, v. 32, p. 153–159, 2013.

TAN, Bochuan *et al.* Insight into anti-corrosion mechanism of copper in 0.5 M sulfuric acid solution via microwave-assisted synthesis of carbon quantum dots as novel inhibitors. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 43, n. December 2024, 2025.

WONGSURAKUL, Peerawat *et al.* Comprehensive Review on Potential Contamination in Fuel Ethanol Production with Proposed Specific Guideline Criteria. **Energies**, v. 15, n. 9, 2022.

WU, Haoran *et al.* Performance characterization of nanofiltration, reverse osmosis, and ion exchange technologies for acetic acid separation. **Separation and Purification Technology**, v. 265, n. November 2020, 2021.