EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Efeito da regeneração com ácido clorídrico na remoção de ferro de resinas de troca iônica utilizadas na purificação de gelatina

Josyane Kelly Naomi Imamura Marques
PPG em Engenharia de Produção – Unesp/FEB
Gustavo Henrique Marques
PPG em Engenharia de Produção – Unesp/FEB
Isadora Branquinho Veronez
Graduada em Engenharia Química - Unifran
Carlos do Amaral Razzino
Departamento de Engenharia de Produção – Unesp/FEB
Vívian Karina Bianchini
Departamento de Engenharia de Produção – Unesp/FEB

Resumo: Os trocadores iônicos são equipamentos que abrigam colunas preenchidas com resinas de troca iônica, utilizadas em processos de separação e purificação nos setores farmacêutico, químico e alimentício. Entretanto, o acúmulo de ferro e outras impurezas pode saturar as resinas, comprometendo sua eficiência e vida útil e tornando necessária sua regeneração. Este estudo investigou a eficácia da regeneração ácida com ácido clorídrico (HCl) na remoção de ferro de resinas utilizadas na produção de gelatina. A metodologia foi conduzida em escala laboratorial, reproduzindo condições do processo industrial, com amostras submetidas ao tratamento com HCl a 5% e avaliadas antes e após a regeneração. Foram realizadas análises de retenção de umidade, exame óptico da integridade das esferas e determinação de ferro por espectrofotometria UV-Vis, utilizando tiocianato de potássio (KSCN) como agente complexante. Os resultados indicaram aumento da capacidade de retenção de umidade após o tratamento, com valores entre 45,99% e 47,67%, em comparação aos valores de 41,80% a 44,84% antes da regeneração. A análise óptica revelou redução da porcentagem de esferas perfeitas, de 96%–98% para 94%–97%, indicando leve alteração física. A análise por UV-Vis evidenciou concentrações de ferro entre 550,31 e 764,51 mg/L nas soluções após o tratamento, demonstrando sua liberação pela ação do ácido. Conclui-se que a regeneração com HCl favoreceu a remoção parcial de ferro, com leve aumento da retenção de umidade, embora tenha causado leve alteração física nas esferas.

Palavras-chave: Resinas de troca iônica, Regeneração, Ácido Clorídrico, Ferro, Gelatina.

Effect of hydrochloric acid regeneration on iron removal from ion-exchange resins used in gelatin purification

Abstract: Ion exchangers are units containing columns packed with ion-exchange resins, used in separation and purification processes within the pharmaceutical, chemical, and food industries. However, the accumulation of iron and other impurities can saturate the resins, compromising their efficiency and lifespan, thereby necessitating regeneration. This study investigated the efficacy of acid regeneration using hydrochloric acid (HCl) for removing iron from resins used in gelatin production. The methodology was conducted at a laboratory scale, replicating industrial process conditions; samples were treated with 5% HCl and evaluated both before and after regeneration.

Analyses included moisture retention, optical examination of bead integrity, and iron determination via UV-Vis spectrophotometry using potassium thiocyanate (KSCN) as a complexing agent. Results showed an increase in moisture retention capacity following treatment—ranging from 45.99% to 47.67%—compared to pre-regeneration values of 41.80% to 44.84%. Optical analysis revealed a decrease in the percentage of perfect beads (from 96%–98% to 94%–97%), indicating slight physical alteration. UV-Vis analysis detected iron concentrations between 550.31 and 764.51 mg/L in the post-treatment solutions, demonstrating iron release driven by the acid. It is concluded that HCl regeneration facilitated partial iron removal with a slight increase in moisture retention, despite causing slight physical alteration to the beads.

Keywords: Ion-exchange resins, Regeneration, Hydrochloric acid, Iron, Gelatin.

1. Introdução

No Brasil, a gelatina é obtida principalmente de subprodutos da indústria da carne, aproveitando a grande produção nacional, especialmente de bovinos. É um produto obtido por meio da hidrólise parcial do colágeno presente nas peles, e seu processo de produção é composto por diversas etapas, incluindo pré-tratamento da matéria-prima, extração, purificação e secagem. Ao longo dessas etapas, impurezas podem comprometer suas propriedades funcionais e a qualidade do produto, podendo afetar características como viscosidade, teor de cinzas, capacidade de gelificação, cor e sabor. Desse modo, a utilização de trocadores iônicos desempenha um papel importante na purificação da gelatina (POPPE, 1992).

Os trocadores iônicos são equipamentos que abrigam as colunas preenchidas com resinas de troca iônica, nas quais ocorrem a troca de íons presentes em uma solução. Segundo Costa et al. (2022), o processo de troca iônica consiste na passagem de uma solução por um leito de resinas. Durante o contato direto, os íons indesejáveis presentes na solução são substituídos pelos íons na resina, que possuem grupos funcionais específicos e, por isso, alta seletividade por determinados íons. Dessa forma, ocorre a retenção dos íons de interesse pela resina e a liberação dos íons originalmente presentes em sua estrutura para a solução.

Após sucessivos ciclos de tratamento, ocorre o acúmulo de íons e outras espécies retidas na resina de troca iônica, levando à sua saturação e à consequente redução da capacidade de troca. A resina de troca iônica saturada passa então por um processo conhecido como regeneração, no qual é tratada com uma solução regenerante, contendo íons que substituam os íons retidos na resina, a fim de recarregá-la e restabelecer seus sítios de troca (MOUNTADAR et al., 2019).

A regeneração intensiva com reagentes químicos remove as impurezas que não são completamente eliminadas durante as lavagens convencionais com água inerte. A escolha do reagente químico adequado para a regeneração depende do tipo de poluição presente nas resinas, e utilizam-se soluções de sal, peróxido de hidrogênio, água clorada, soluções alcalinas e ácido clorídrico, entre outros. Em alguns casos, água quente ou vapor podem ser empregados como reforço (DOROZH, 2012).

Entre as contaminações mais frequentes, os óxidos de ferro exigem uma abordagem específica. Testes realizados com ácido clorídrico (HCl) a 8-10%, especialmente quando inibidos por urotropina, mostraram bons resultados, alcançando até 77% de remoção dos óxidos de ferro presentes no material (DOROZH, 2012).

Embora a literatura reconheça a utilização do HCl na remoção de óxidos de ferro de resinas de troca iônica, foi observado que ainda há necessidade de avaliar, em condições representativas da aplicação industrial na purificação de gelatina, os efeitos da regeneração ácida simultaneamente sobre a remoção de ferro e sobre as características físicas da

resina, especialmente sua retenção de umidade e integridade das esferas, considerando sua possível reutilização no processo.

Diante dessa problemática, a questão problema que a pesquisa procura responder é: Como a regeneração química com ácido HCl influencia a remoção de ferro e as características das resinas de troca iônica utilizadas na purificação de gelatina, considerando sua possível reutilização no processo?

Nesse contexto, o estudo teve como objetivo avaliar a eficácia da regeneração ácida utilizando ácido clorídrico (HCl) na remoção de ferro presente em resinas de troca iônica empregadas na purificação de gelatina. A metodologia adotada replicou as condições do processo industrial em escala laboratorial, com o objetivo de avaliar a eficácia da regeneração ácida na remoção de ferro das resinas. Foram realizadas análises de retenção de umidade, exame óptico da integridade das esferas e determinação de ferro por espectrofotometria UV-Vis, utilizando tiocianato de potássio como agente complexante.

Este artigo está estruturado em cinco seções. A primeira apresenta a contextualização do tema, a delimitação do problema de pesquisa e o objetivo do trabalho. A segunda seção descreve os procedimentos metodológicos, incluindo o método e os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. A terceira seção apresenta os conceitos centrais que fundamentam o estudo, contemplados na revisão teórica. Na quarta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. A quinta seção contempla as conclusões do trabalho, retomando os principais achados em relação ao objetivo proposto. Por fim, são apresentadas as referências das obras e dos autores que fundamentaram o desenvolvimento da pesquisa.

2. Materiais e Métodos

A pesquisa caracteriza-se como aplicada quanto à natureza, quantitativa quanto à abordagem e experimental quanto ao método. Diante do problema de saturação das resinas, buscou-se avaliar o efeito da regeneração ácida com ácido clorídrico (HCl) na remoção de ferro e nas características da resina, considerando sua possível reutilização nos trocadores iônicos empregados no processo de purificação de gelatina.

O procedimento experimental reproduziu, em escala laboratorial, condições selecionadas do processo industrial. As resinas utilizadas foram coletadas de um trocador iônico de leito fixo, constituído por vaso de aço inoxidável e operando em uma linha de produção de gelatina com capacidade média de 8.000 L/h. O trocador é preenchido com resina poliacrílica macroporosa aniônica fraca, utilizada no equipamento há aproximadamente 10 meses e empregada periodicamente no tratamento do caldo de gelatina para remoção de ferro.

O experimento teve início com a coleta de amostras de resina da coluna de troca iônica. Foram utilizadas seis amostras de 50 g, distribuídas em duas condições experimentais, com três amostras em cada condição: três amostras foram submetidas apenas à água deionizada, constituindo a condição controle, sem regeneração ácida, e três foram submetidas ao tratamento com HCl, constituindo a condição de regeneração ácida. Foram avaliadas como variáveis-resposta a capacidade de retenção de umidade, a integridade das esferas da resina e a concentração de Fe(III) no sobrenadante.

Para a preparação das três amostras da condição controle, foram adicionados 100 mL de água deionizada a um béquer contendo 50 g da resina coletada.

Para as três amostras submetidas à regeneração ácida, foram utilizados 13,5 mL de HCl a 37% para o preparo da solução ácida. Inicialmente, foram adicionados 86,5 mL de água deionizada a um béquer de 400 mL, previamente posicionado no interior de uma capela com exaustão e inserido em uma bandeja contendo água, para auxiliar na dissipação do

calor gerado durante a diluição. Em seguida, os 13,5 mL de HCl foram cuidadosamente adicionados à água deionizada, com auxílio de uma pipeta automática. Após a homogeneização, os 100 mL da solução preparada foram transferidos para um frasco contendo 50 g da resina coletada.

Todas as amostras foram agitadas manualmente com auxílio de um bastão de vidro durante 15 minutos, visando à homogeneização e ao contato entre a resina e as respectivas soluções. Em seguida, foram mantidas em repouso por 24 horas, sob as mesmas condições experimentais.

Como referência para comparação dos resultados, foi utilizada uma amostra adicional de resina sem uso, hidratada em água deionizada e submetida às mesmas condições de preparação das amostras controle.

2.1 Capacidade de Retenção de Umidade

As resinas, retiradas das amostras tratadas apenas com água deionizada e também as tratadas com HCl, foram submetidas a um processo de pesagem inicial, utilizando 50 g de material úmido. Em seguida, as amostras foram secas em um forno a 105°C até atingirem massa constante, o que permitiu a determinação precisa da capacidade de retenção de umidade. A capacidade de retenção de umidade foi calculada com base na diferença entre as massas das resinas úmidas e secas, com base na equação (1) proposta por Wei e Zheng (2026), em porcentagem.

$$Capacidade\ de\ retenção\ de\ umidade\ (\%) = \frac{base\ úmida - base\ seca}{base\ seca}\ x\ 100 \qquad (1)$$

2.2 Exame Óptico – Esferas Perfeitas (%)

As resinas coletadas foram submetidas à análise de esferas perfeitas por microscopia óptica, com o objetivo de quantificar o percentual de esferas intactas. Para isso, o microscópio foi ajustado com uma ampliação de 100x, e 100 esferas de resina foram dispostas em uma placa de análise, garantindo imagens focadas e nítidas das resinas sobre a superfície da placa. Durante a observação, foram contabilizadas as esferas com deformidades, trincas ou outras imperfeições. A porcentagem de esferas perfeitas foi então calculada pela razão entre o número de esferas sem defeitos (total analisado menos as esferas com defeitos) e o número total de esferas analisadas, multiplicada por 100.

2.3 Análise UV-Vis

Para a determinação do ferro, as amostras foram submetidas a centrifugação por cinco minutos, com o objetivo de separar os sólidos suspensos do sobrenadante. Posteriormente, o sobrenadante foi submetido à análise por espectrofotometria UV-Vis, utilizando o KSCN como agente complexante. A solução de KSCN foi preparada na concentração de 0,15 mol/L. Para a construção da curva de calibração, foi utilizada uma solução padrão de cloreto de ferro(III) ($FeCl_3$), na concentração de 400 ppm.

A concentração de 0,15 mol/L de KSCN foi adotada com base nos estudos de Najib e Hayder (2011), que indicaram essa concentração como adequada para a formação do complexo entre Fe(III) e SCN^- sem interferências, mantendo a absorção estável no comprimento de onda de 480 nm, correspondente ao máximo de absorção do complexo $[Fe(SCN)_6]^{3-}$. Dessa forma, a concentração de 0,15 mol/L foi adotada para garantir uma análise precisa e a detecção eficiente de ferro nas amostras tratadas, confirmando a presença de íons Fe^{3+} através da intensidade da banda de 480 nm.

Para o preparo da solução de KSCN, foram pesados 1,46 g do reagente, posteriormente dissolvidos em água destilada em um balão volumétrico de 100 mL. Desse modo, obteve-

se uma solução final de KSCN a 0,15 mol/L, pronta para reagir com os íons de ferro nas amostras.

Para a quantificação do ferro nas amostras, utilizou-se a técnica de espectrofotometria UV-Vis, construindo uma curva de calibração para o Fe(III) a partir de uma solução padrão de cloreto férrico a 400 ppm. Essa solução foi preparada dissolvendo-se 10 mg de Fe (III) em um balão volumétrico de 25 mL, completando o volume com água destilada.

A partir da solução padrão, foram preparados seis pontos de concentração: 20, 30, 40, 50, 75 e 100 ppm. Para cada ponto da curva, foram realizadas as respectivas diluições, considerando-se o fator de diluição de 8:1. As soluções obtidas foram submetidas à reação com KSCN e, posteriormente, analisadas por espectrofotometria UV-Vis no comprimento de onda de 480 nm.

3. Referencial Teórico

3.1 Resinas de troca iônica

As resinas de troca iônica são materiais poliméricos insolúveis capazes de realizar a troca de íons entre a resina e uma solução. Esse processo depende da concentração dos íons presentes e da afinidade dessas espécies pela matriz da resina (ALEXANDRATOS, 2009). A troca iônica pode ser utilizada em processos de substituição, separação e remoção de íons, sendo aplicada em diferentes processos de purificação.

As resinas podem ser classificadas quanto ao tipo de íon trocado, às características físicas e à composição da matriz. Quanto ao tipo de íon, podem ser catiônicas, quando realizam a troca de íons positivos, aniônicas, quando trocam íons negativos, ou de leito misto, quando combinam os dois tipos de resina (RICHARDSON et al., 2002; MARIN et al., 2024).

Quanto às características físicas, destacam-se as resinas do tipo gel e as macroporosas. As resinas do tipo gel apresentam uma estrutura mais homogênea e dependem do transporte dos solutos pela própria fase polimérica. Já as resinas macroporosas possuem uma rede permanente de poros, favorecendo a difusão dos solutos no interior das partículas (LI; SENGUPTA, 2000). A estrutura dessas resinas está relacionada ao processo de fabricação e pode influenciar seu comportamento durante os processos de troca e regeneração (BADIA et al., 2023).

Em relação à composição da matriz, destacam-se as resinas à base de poliestireno e poliacrílico. As resinas poliestirênicas são geralmente obtidas pela copolimerização de estireno e divinilbenzeno, que atua como agente de reticulação e contribui para a formação da estrutura insolúvel (CHEN et al., 2021). As resinas poliacrílicas, por sua vez, utilizam polímeros derivados de acrilatos ou metacrilatos e apresentam maior caráter hidrofílico, podendo influenciar o conteúdo de água, a difusão dos íons e o comportamento durante a regeneração (WIERCIK; GARBOWSKI; CHROBOT, 2024).

Assim, as características químicas e físicas das resinas estão diretamente relacionadas ao seu comportamento durante a troca iônica e os processos de regeneração. A composição da matriz, a estrutura dos poros e os grupos funcionais podem influenciar a interação com os íons e as propriedades do material. Por isso, a avaliação da resina após a regeneração é importante para verificar não apenas a remoção das espécies retidas, mas também a manutenção de características como a retenção de umidade e a integridade das partículas.

3.2 Regeneração: limpeza das resinas de troca iônica

Durante a operação dos trocadores iônicos, as resinas acumulam íons e podem sofrer contaminação por substâncias como ferro, sílica, ácidos húmicos, cromo e cobre. Esses contaminantes podem formar depósitos na superfície dos grânulos, obstruindo poros e canais e dificultando a difusão dos íons para o interior da resina, o que reduz sua eficiência de troca (DOROZH, 2012).

Quando a quantidade de íons retidos atinge a capacidade de troca da resina, ela é considerada esgotada e necessita ser regenerada. Esse processo consiste na utilização de soluções com elevada concentração iônica, capazes de remover os íons acumulados e recuperar parte da capacidade funcional da resina. Dependendo da aplicação, podem ser utilizados ácidos minerais ou soluções salinas concentradas como agentes regenerantes (MARIN et al., 2024).

Entre os agentes empregados na regeneração, destaca-se o ácido clorídrico (HCl), que pode contribuir para a remoção de contaminantes metálicos, especialmente compostos de ferro, favorecendo a recuperação dos sítios de troca da resina. Em determinados processos, o hidróxido de sódio (NaOH) também pode ser utilizado em uma etapa complementar de regeneração, contribuindo para a remoção de contaminantes e recuperação das condições funcionais do material (DOWNEY, 2018).

Dessa forma, a regeneração é fundamental para manter o desempenho das resinas e possibilitar sua reutilização nos trocadores iônicos. Além de recuperar sua capacidade de troca, uma regeneração eficiente pode contribuir para prolongar a vida útil das resinas e reduzir custos relacionados à substituição do material (DOWNEY, 2018; MARIN et al., 2024).

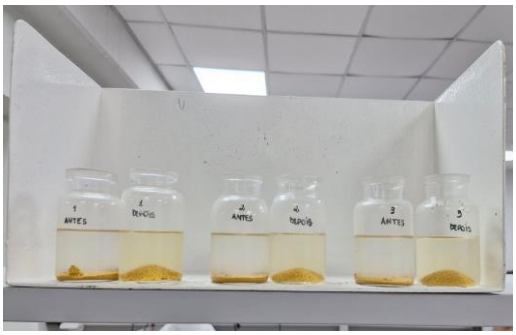
4. Resultados e Discussão

A avaliação da resina envolveu procedimentos quantitativos e, também qualitativos complementares.

4.1 Resultados Qualitativos

Nas amostras submetidas à regeneração ácida, observou-se uma coloração mais amarelada, que pode estar associada à presença de ferro liberado durante a interação da solução de HCl com as resinas. Além disso, após o tratamento, as resinas apresentaram aspecto mais uniforme e ausência de aglomerações, diferentemente do observado nas amostras tratadas apenas com água, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Antes x Depois da regeneração ácida

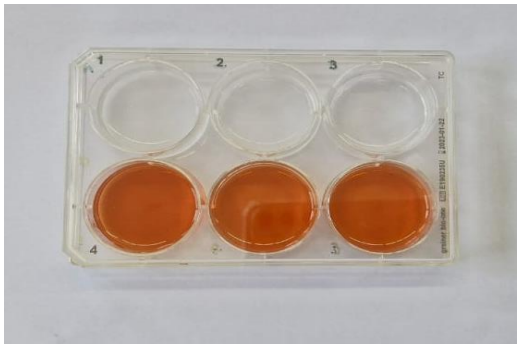


Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Após submeter as amostras centrifugadas ao agente complexante KSCN a 0,15 mol/L, observou-se a formação de uma coloração avermelhada nas três amostras analisadas após

a regeneração ácida, indicando a presença de íons Fe^{3+} nas soluções sobrenadantes. Em contraste, as amostras analisadas antes da regeneração permaneceram incolores, não apresentando evidência visual de Fe^{3+} no sobrenadante. Esses resultados sugerem que o tratamento com HCl promoveu a liberação de parte do ferro anteriormente retido nas resinas, transferindo-o para a solução sobrenadante durante o processo de regeneração. Esse resultado é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Antes (incolor) x depois (avermelhado) da regeneração ácida



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.2 Resultados Quantitativos

A retenção de umidade apresentou valores entre 41,80% e 44,84% antes do tratamento e entre 45,99% e 47,67% após a regeneração. Os valores mais baixos antes da regeneração podem ser atribuídos ao acúmulo de contaminantes que interferem na retenção de água nos sítios ativos da resina. Desse modo, o ligeiro aumento observado após a regeneração (próximo ao valor da resina nova) sugere que a remoção de ferro e outros contaminantes metálicos durante o processo de regeneração liberou sítios ativos na resina, facilitando a retenção de água. Os dados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidade de Retenção de Umidade

Amostras		Úmido (g)	Seco (g)	Umidade (%)
Branco		50	33,42	49,61
Antes	1	50	34,52	44,84
	2	50	35,26	41,80
	3	50	34,98	42,94
Depois	1	50	33,86	47,67
	2	50	34,12	46,54
	3	50	34,25	45,99

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Na análise óptica das esferas da resina, a amostra de controle (branco) apresentou uma porcentagem elevada de esferas perfeitas (99%), indicando a qualidade da resina antes do uso. Já nas amostras analisadas antes e após o tratamento com ácido, as porcentagens de esferas perfeitas nas amostras diminuíram, tendo variação de 96% a 98% e 94% a 97%, respectivamente. Essas variações ligeiramente inferiores podem ser indicativas do impacto do processo de regeneração nas propriedades físicas da resina. Os dados obtidos estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Esferas Intactas (%)

Amostras		Esferas na placa	Esferas disformes	Esferas perfeitas (%)
Branco		100	1	99
	1	100	2	98
Antes	2	100	2	98
	3	100	4	96
	1	100	6	94
Depois	2	100	3	97
	3	100	4	96

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

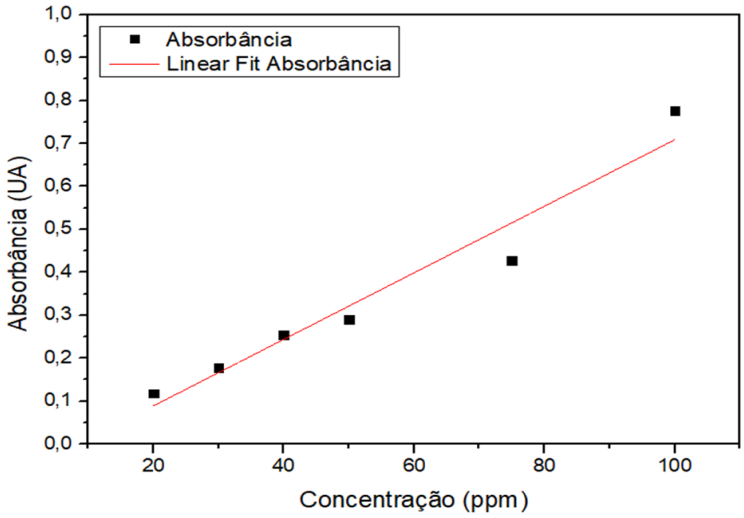
Para a análise por UV-Vis, os resultados obtidos dos seis pontos para a curva de calibração estão apresentados na Tabela 3, enquanto o gráfico da curva de calibração pode ser visualizado na Figura 3, mostrando a relação entre a concentração de Fe(III) e a absorbância.

Tabela 3 – Dados da curva de calibração

Ponto	Fe(III) (mg/L)	Abs (480 nm)
1	100	0,78473
2	75	0,43658
3	50	0,29997
4	40	0,26339
5	30	0,18716
6	20	0,12564

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Figura 3 – Curva de calibração



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Com a curva de calibração estabelecida, foi possível analisar as seis amostras, seguindo o mesmo procedimento de diluição (8:1) para garantir consistência nas medições, o que permitiu determinar a concentração de ferro presente em cada amostra por meio da curva de calibração.

Na análise por UV-Vis, os valores de ferro no sobrenadante passaram de aproximadamente 102,11–117,76 mg/L antes do tratamento para 550,31–764,51 mg/L após a regeneração. O aumento da concentração de ferro na solução, associado à coloração avermelhada observada com KSCN, indica que parte do ferro anteriormente retido na resina foi liberada para a solução durante o tratamento, e, portanto, houve redução da contaminação da resina, embora não tenha sido completamente eliminada. Os dados obtidos pela espectrofotometria estão na Tabela 4.

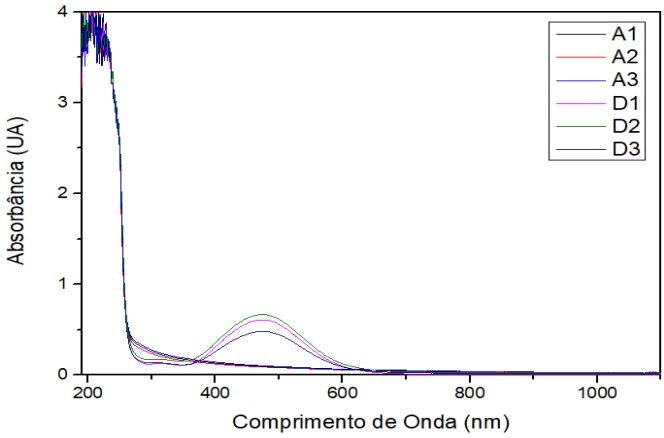
Tabela 4 – Dados UV-Vis

Amostras		Fe(III) (mg/L)	Abs (480 nm)
Antes	1	117,76	0,103100
	2	102,11	0,089404
	3	108,13	0,094675
Depois	1	695,07	0,608550
	2	764,51	0,669350
	3	550,31	0,481810

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A absorbância das amostras após a regeneração, que variou entre 0,481810 e 0,669350, reforçou a presença de íons Fe^{3+}, confirmando a eficácia do método em detectar metais nas amostras. A Figura 4 ilustra esses dados, evidenciando as absorbâncias detectadas e os valores obtidos nas análises.

Figura 4 – Dados UV-Vis



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

No espectro, as curvas de absorbância para as amostras "Antes" (A1, A2, A3) da regeneração ácida apresentaram absorbâncias baixas (entre 0,089 e 0,103), sem picos pronunciados nem desenvolvimento visível de coloração com o tiocianato de potássio (KSCN). Esse comportamento sugere que o ferro não estava presente como íons Fe^{3+} ou que as concentrações eram insuficientes para provocar a reação. Em contraste, as amostras "Depois" da regeneração ácida (D1, D2, D3) exibiram picos claros de absorbância, acompanhados da coloração avermelhada característica, evidenciando que o tratamento com ácido clorídrico foi eficaz em liberar o ferro. A absorbância elevada observada nessas amostras é um indicativo da contaminação moderada por ferro, corroborando as informações previamente mencionadas sobre a concentração de contaminantes nas amostras.

5. Conclusões

Este estudo avaliou a eficácia da regeneração ácida com ácido clorídrico (HCl) a 5% na remoção de ferro de resinas de troca iônica utilizadas na purificação de gelatina, considerando também seus efeitos sobre a retenção de umidade e a integridade das esferas, tendo em vista a possível reutilização do material no processo. Para isso, amostras de resina em operação foram tratadas, em escala laboratorial, com água deionizada e com HCl, e avaliadas por meio de análise de retenção de umidade, exame óptico e espectrofotometria UV-Vis com KSCN.

A capacidade de retenção de umidade das resinas não foi comprometida pelo tratamento ácido; ao contrário, apresentou ligeiro aumento, aproximando-se do valor da resina nova (branco), o que indica a recuperação dessa característica após a regeneração. Já a análise óptica das esferas evidenciou leves alterações físicas nas resinas após o tratamento, o que pode comprometer seu desempenho em sucessivos ciclos de regeneração e utilização.

Após o tratamento com HCl, observou-se um aumento na concentração de íons Fe^{3+} no sobrenadante, evidenciado tanto pela coloração obtida com KSCN quanto pelos resultados de espectrofotometria UV-Vis, denotando uma liberação parcial do ferro acumulado na resina durante o processo de purificação da gelatina.

Os resultados indicam que o processo de regeneração com HCl favoreceu a remoção parcial de ferro das resinas, com impactos levemente negativos sobre sua estrutura física e com ligeiro aumento da capacidade de retenção de umidade, o que pode ser representativo para a reutilização dessas resinas no processo produtivo. No entanto, a detecção de ferro nas amostras pós-regeneração reforça a necessidade de monitoramento desses parâmetros ao longo dos ciclos de utilização, para evitar comprometimento da eficiência a longo prazo.

O estudo contribui não apenas para avaliar a remoção de ferro das resinas de troca iônica após a regeneração ácida com HCl, mas também para avaliar possíveis alterações nas características da resina decorrentes do tratamento, considerando parâmetros como retenção de umidade e integridade das partículas.

Embora os resultados obtidos indiquem que a regeneração com ácido clorídrico favoreceu a remoção parcial do ferro acumulado nas resinas de troca iônica, algumas limitações devem ser consideradas. O estudo foi realizado com um número reduzido de amostras e avaliou as características da resina após um único procedimento de regeneração, não sendo possível determinar, a partir dos resultados obtidos, seu comportamento em ciclos sucessivos de utilização e regeneração. Além disso, a possibilidade de reutilização da resina não foi avaliada diretamente por meio de um novo ciclo de purificação de gelatina, sendo analisados apenas parâmetros relacionados à sua condição após o tratamento.

Outra limitação está relacionada à avaliação da integridade das partículas, realizada por exame óptico. Embora esse procedimento tenha permitido identificar alterações visuais nas esferas, análises complementares poderiam fornecer informações mais detalhadas sobre possíveis alterações estruturais e funcionais da resina. Da mesma forma, a determinação da concentração de ferro demonstrou a ocorrência de remoção parcial do contaminante, porém não permitiu estabelecer a eficiência do processo em diferentes condições operacionais.

Nesse sentido, pesquisas futuras podem avaliar diferentes concentrações de ácido clorídrico, tempos de contato e condições de regeneração, buscando identificar condições que proporcionem maior remoção de ferro com menor alteração das características da resina. Também se recomenda a realização de ensaios com ciclos sucessivos de regeneração e reutilização, acompanhando a concentração de ferro, a integridade das partículas, a retenção de umidade e a capacidade de troca iônica. A comparação entre

diferentes agentes regenerantes e a realização de ensaios em escala piloto ou diretamente no trocador industrial também podem contribuir para uma avaliação mais ampla da eficiência e da viabilidade do processo de regeneração.

Referências

ALEXANDRATOS, S. D. Ion-exchange resins: a retrospective from Industrial and Engineering Chemistry Research. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 1, p. 388-398, 2009. DOI: 10.1021/ie801242v.

BADIA, J. H. et al. Role of ion-exchange resins in hydrogenation reactions. **Catalysts**, v. 13, n. 3, p. 624, 2023. DOI: 10.3390/catal13030624.

CHEN, Y. G. et al. Application of modern research methods for the physicochemical characterization of ion exchangers. **Materials**, v. 14, n. 22, p. 7067, 2021. DOI: 10.3390/ma14227067.

COSTA, E. D. J.; SANTOS, E. N. F.; MELO, C. M. T. Utilização de resinas de troca iônica para redução de sólidos totais e turbidez. **Revista Inova Ciência & Tecnologia**, Uberaba, v. 8, e0221156, 2022. DOI: 10.46921/rict2022-1156.

DOROZH, O. A. **Theory of sorption and membrane processes in power plants**. Odessa: Odessa National Polytechnic University, 2012.

DOWNEY, D. D. Ion exchange resin: pilot and resin testing. In: **EXTRACTION 2018: Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy**. Cham: Springer, 2018. p. 2093-2106. Disponível em: https://www.purolite.com/pt/index/core-technologies/industry/hydrometallurgy/ion-exchange-resin-pilot-and-resin-testing. Acesso em: 9 set. 2026.

LI, P.; SENGUPTA, A. K. Intraparticle diffusion during selective sorption of trace contaminants: the effect of gel versus macroporous morphology. **Environmental Science & Technology**, v. 34, n. 24, p. 5193-5200, 2000. DOI: 10.1021/es001299o.

MARIN, N. M. et al. Current trends in development and use of polymeric ion-exchange resins in wastewater treatment. **Materials**, v. 17, n. 23, p. 5994, 2024. DOI: 10.3390/ma17235994.

MOUNTADAR, S. et al. Desalination of spent ion-exchange resin regeneration solutions by suspension freeze crystallization. **Desalination**, v. 468, 114059, 2019. DOI: 10.1016/j.desal.2019.06.025.

NAJIB, F. M.; HAYDER, O. I. Study of Stoichiometry of Ferric Thiocyanate Complex for Analytical Purposes Including F--Determination. **Iraqi National Journal of Chemistry**, v. 42, p. 135-155, 2011.

POPPE, J. Gelatin. In: IMESON, A. (ed.). **Thickening and gelling agents for food**. London: Blackie Academic & Professional, 1992. p. 98-123.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. Ion exchange. In: RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. **Coulson and Richardson's chemical engineering**: particle technology and separation processes. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. v. 2, p. 1053-1075. DOI: 10.1016/B978-0-08-049064-9.50029-1.

WEI, X.; ZHENG, H. Effects of Physical Modification Methods on Physicochemical, Structural and Functional Characteristics of Insoluble Dietary Fiber from Okara. **Foods**, v. 15, n. 14, p. 2456, 2026. DOI: 10.3390/foods15142456.

WIERCIK, P.; GARBOWSKI, T.; CHROBOT, P. The study of humic substances' impact on anion exchangers. **Materials**, v. 17, n. 6, p. 1237, 2024. DOI: 10.3390/ma17061237.