

Partículas magnéticas estabilizadas com fécula de mandioca e cera de carnaúba como alternativa na remoção de petróleo em águas¹

Magnetic particles stabilized with cassava starch and carnaúba wax as an alternative for oil removal in waters

Ellen dos Santos Alves²Manuela Michelon Tomasin³Maria Angélica Thiele Fracassi⁴

Resumo

A exploração de petróleo em ambientes marinhos oferece riscos de derramamentos com escala global de impacto aos ecossistemas. Uma forma de reverter esse cenário, são as utilizações de partículas magnéticas como adsorventes do líquido contaminante. Essas partículas oferecem baixa toxicidade, biocompatibilidade e degradação natural. No entanto é essencial que se alcance a estabilidade das mesmas e a afinidade da superfície com o contaminante a ser removido, o que demanda revestimentos com moléculas. O estudo buscou avaliar a eficácia de partículas magnéticas estabilizadas com fécula de mandioca e revestidas com cera natural (PMAC) na adsorção de óleo. O protótipo aplicou o método de coprecipitação, e incorporação de fécula de mandioca e da cera para potencializar essa adsorção. Resultados experimentais demonstraram um significativo potencial para a remediação de ambientes contaminados, com taxas de remoção de petróleo bruto em água acima de 85%.

Palavras-chave: Adsorventes magnéticos; Recursos naturais; Remoção de petróleo.

Abstract

Oil exploration in marine environments poses risks of global-scale oil spills that have a significant impact on ecosystems. One way to address this issue is by using magnetic particles as adsorbents for the contaminating liquid. These particles offer low toxicity, biocompatibility, and natural degradation. However, it is essential to achieve their stability and surface affinity with the liquid to be removed, which requires coatings with molecules. The study aimed to evaluate the effectiveness of magnetic particles stabilized with cassava starch and coated with natural wax (MPSW) in oil adsorption. The prototype applied the coprecipitation method and incorporated cassava starch and wax to enhance this adsorption. Experimental results demonstrated a significant potential for remediating contaminated environments, with crude oil removal rates in water exceeding 85%.

Keywords: *Magnetic adsorbents; Natural resources; Petroleum removal.*

- 1 O presente artigo é um trabalho de conclusão do Curso Técnico de Química da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo – RS, Brasil, sob orientação da Profa. Maria Angélica Thiele Fracassi.
- 2 Técnica em química pela Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo, RS, Brasil. Email: 20000112@liberato.com.br. <https://orcid.org/0009-0005-5271-7948>
- 3 Estudante do Curso Técnico de Química pela Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo, RS, Brasil. Email: 20000120@liberato.com.br. <https://orcid.org/0009-0001-6448-5188>
- 4 Mestre em microbiologia agrícola e do ambiente pela Universidade federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), graduada em Ciências Biológicas - Licenciatura plena pela universidade do Vale dos Sinos (Unisinos) e professora do Curso Técnico em Química na FETLSVC. Email: angelica@liberato.com.br. <https://orcid.org/0000-0003-1729-6509>

1 Introdução

O petróleo, também conhecido como óleo cru, é uma mistura complexa de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos (Petrobras, 2014). A Indústria do petróleo e gás no Brasil corresponde a 13% do PIB nacional e 50% da oferta interna de energia (Agência Nacional de Petróleo, 2020). O risco de derramamentos de petróleo é uma realidade que não pode ser ignorada, pois os combustíveis fósseis ainda são a base da matriz energética mundial. A expansão da demanda de óleo resulta no aumento da atividade exploratória, do transporte e armazenamento do material, elevando a probabilidade de vazamentos (Chen *et al.*, 2019).

Com o rápido crescimento da indústria petrolífera, os derramamentos de óleo são cada vez mais frequentes e prejudiciais quanto aos seus impactos ambientais, afetando até mesmo a economia (Craig *et al.*, 2012). Por exemplo, o mundialmente conhecido acidente de derramamento de óleo do navio *DeepWater Horizon* contaminou 2500 quilômetros quadrados de oceano, matando milhares de animais marinhos em 2010 (Feng *et al.*, 2021). De acordo com Araújo, Ramalho e Melo (2020), esses resíduos prejudicam a passagem de oxigênio e são bioacumulativos no organismo dos seres vivos, o que resulta na perda de atividades metabólicas indispensáveis para a preservação da vida marinha.

Atualmente, o magnetismo como método de adsorção promove um alto potencial para a sua utilização na descontaminação ambiental em meios aquosos (Santos, 2020). Materiais magnéticos são altamente eficazes na movimentação dentro de áreas contaminadas e na remoção de poluentes, quando combinadas com outros materiais, e assim, permitem a gestão eficiente dos produtos resultantes desse processo, garantindo sua segurança e tornando-as adequadas para a limpeza ambiental em ambientes aquáticos (Goulart *et al.*, 2016).

Estudos de Hu *et al.* (2010) desenvolveram nanotubos de carbono magnéticos, buscando a facilitação com a atividade magnética no processo de filtração e, assim, aliar à eficiência dos materiais de carbono. Contudo, a viabilidade econômica na produção desses materiais não é totalmente viável (Melo, 2016).

Sob esse prisma, as nanopartículas magnéticas têm sido bastante exploradas devido ao seu baixo custo e produção sustentável (Fortin *et al.*, 2007), além de contarem com exclusivas propriedades físicas e químicas (Prill; Yusan, 2022). Os nanoadsorventes derivados da magnetita (Fe_3O_4) são os mais estudados, em função de possuírem características como alta força de superparamagnetismo, baixa densidade e facilidade na preparação, sendo o de coprecipitação mais simples de executar (Souza Jr. *et al.*, 2010). No estudo de Zhu *et al.* (2010), aplicou-se as nanopartículas de óxido de ferro com silicone para a facilitação da remoção do óleo. Ademais, o material magnético, para a remoção de óleo, foi empregado funcionalizando-o com ligantes hidrofóbicos, como o ácido oleico e ácido palmítico (Fernandes, 2019). Devido à facilidade de oxidação da magnetita, é fundamental a estabilização do material com moléculas orgânicas ou inorgânicas, conforme Ali *et al.* (2016), além de possibilitar a adição de características específicas no material, conforme os procedimentos escolhidos (Sun *et al.*, 2014).

A escolha dos materiais a serem aplicados nos nanoadsorventes devem ter sua renovabilidade e natureza sustentável avaliadas, a fim de se produzir compostos adsorventes de óleos (Wu *et al.*, 2021). O amido vem atraindo muito interesse na área de despoluição devido ao seu baixo custo, biocompatibilidade, atoxicidade e facilidade de modificações químicas (Alvarado *et al.*, 2021). Essas características, juntamente com a sua estrutura química, se propõem como solução para problemas ambientais complexos. Segundo Stan *et al.* (2019), aplicou-se o amido como estabilizador de nanopartículas de magnetita e a análise de BET (Brunauer-Emmett-Teller),

utilizada para estudar a superfície de adsorção em sólidos, concluiu que aquelas nanopartículas com amido possuíam uma superfície muito maior do que aquelas sem o polissacarídeo. Outrossim, Prill e Yusan (2022) identificaram alta estabilidade e alto magnetismo mantidos após o processo de incorporação do amido nos nanoadsorventes de óxido de ferro.

A reciclabilidade do material é um fator de extrema importância para viabilizar suas aplicações. Nessa perspectiva, a estabilidade desempenha um papel fundamental na obtenção dessa propriedade, e o custo total do adsorvente representa uma vantagem significativa. O fato de um material poder ser utilizado mais de uma vez tem um impacto positivo no meio ambiente (Stan *et al.*, 2019). Nessa perspectiva, o estudo de Perez *et al.* (2019), pôde realizar até 4 ciclos de uso na remoção de Pb (II) com nanopartículas de óxido de ferro associadas ao amido carboximetilado, demonstrando a possibilidade de reutilização de materiais associados ao polissacarídeo.

Quando o amido é aplicado em partículas magnéticas, a afinidade com óleo não é possível, logo, surge a necessidade de uma superfície que seja repelente à água. Recentemente, a cera de carnaúba vem atraindo muita atenção por ser um modificador hidrofóbico natural (Wu *et al.*, 2021). A cera natural possui propriedades hidrofóbicas devido a sua composição formada por ácidos graxos e alcoóis, além de ser uma planta abundante no território brasileiro, mais especificamente na região nordeste do país (M. Jr.; Marques, 2009). No trabalho de Wu *et al.* (2021), a cera foi utilizada para revestir a superfície de algodão pré-tratado incorporado com nanopartículas de magnetita e obteve-se 98,3% de eficiência na limpeza de óleos em meios aquosos.

Percebe-se que a contaminação de águas com poluentes hidrofóbicos é uma preocupação mundial que afeta severamente o ambiente, comprometendo também a vida dos seres vivos. Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais biodegradáveis e eficientes na remoção de petróleo torna-se essencial. Logo, este estudo buscou desenvolver um novo método biodegradável por meio de partículas de óxido de ferro (Fe_3O_4) associadas fécula de mandioca e hidrofobilizadas com a cera de carnaúba para tratar águas contaminadas por petróleo. Assim, essas partículas serão denominadas PMAC (Partículas Magnéticas com Amido e Cera de Carnaúba), considerando que a fécula de mandioca é uma forma específica de amido.

Dessa forma, têm se como questão norteadora da pesquisa, os adsorventes magnéticos revestidos com fécula de mandioca e cera natural (PMAC) podem ser um método viável e eficaz para a remoção de petróleo? A partir do exposto, o objetivo do presente trabalho foi realizar a síntese das PMAC para determinar a sua eficácia na remoção de petróleo em água. Ademais, buscou-se avaliar as condições químicas por meio da análise de Espectroscopia de Infravermelho a fim de verificar os grupos hidrofílicos e hidrofóbicos presentes na estrutura molecular do material, da mesma forma que foi feito em Fernandes (2019).

2 Materiais e métodos

2.1 Síntese das PMAC

As PMAC foram obtidas por meio do método de Shah *et al.* (2021), com algumas mudanças, partindo de 65 gramas de ferro em pó e 200 mL de HCl 25%. A mistura passou por aquecimento em agitação a 80°C com 700 rpm durante uma hora e foi seguido da adição de hidróxido de sódio 7M até o pH 12, medido com fita universal, ocasionando a precipitação do

Fe₃O₄. Em seguida, o precipitado filtrado foi aquecido a 70°C em estufa por cerca de 3 horas, para completa secagem e resfriada em temperatura ambiente.

O precipitado foi adicionado em soluções de fécula de mandioca de várias concentrações (2, 3,5 e 5%) preparadas antecipadamente (a 60°C em água quente), sob agitação intensa a 70°C por três horas. Após esse tempo, a solução restante foi resfriada por 24 horas até a formação de um gel. Os géis foram lavados 10 vezes com água deionizada e levados à estufa por 3 horas a 70°C.

Após esse processo, com a cera de carnaúba, realizou-se a emulsão com base no método de Wu *et al.* (2021). Foram utilizadas 5 g de cera misturadas com álcool cetosteárico a 90°C, enquanto a água fervente foi adicionada durante constante agitação a 700 rpm. A emulsão de cera de carnaúba foi diluída em água deionizada até obter uma concentração de 2,5% (m/m). Posteriormente, os adsorventes modificados com fécula de mandioca foram umedecidos com a cera de carnaúba 2,5% a temperatura ambiente e agitadas por 30 minutos para completo absorvimento. Em seguida, o composto resultante foi colocado em estufa a 60°C durante 12h. Por fim, as PMAC, já secas, foram novamente aquecidas na estufa a 120°C por 1 hora.

2.2 Testes de adsorção

Para realizar os testes de adsorção, uma série de placas de Petri foram preenchidas com 20 mL de solução aquosa contaminada com petróleo. Nas placas de Petri, foram adicionados 20 mL de água deionizada e em torno de 0,5g de petróleo bruto, obtendo uma concentração de 2,5% (m/v) no meio líquido. O adsorvente foi colocado em contato com os líquidos, depois, o petróleo adsorvido foi quantificado por meio de método de Soxhlet, descrito originalmente por Franz von Soxhlet em 1879 (Soxhlet, 1879).

Após o tempo de contato, o material foi removido com auxílio de um ímã revestido com papel-alumínio. O petróleo, juntamente com as PMAC que foram retiradas através da atração pelo campo magnético, foram colocados em um cartucho e levados para a extração por soxhlet em que foram realizados ciclos durante cerca de uma hora.

Com o objetivo de quantificar os valores de petróleo removido, foi realizada a pesagem das vidrarias vazias e a pesagem após a extração seguido de estufa a 70°C/h. Ademais, foram consideradas as perdas da massa de petróleo volatilizada (voláteis leves) com a estufa e as possíveis alterações causadas pela extração da cera ao entrar em contato com o solvente.

2.3 Espectroscopia de Infravermelho

Com o intuito de analisar o material magnético produzido, realizou-se sua análise no espectrômetro de infravermelho, a fim de comprovar os grupos hidrofílicos provenientes da fécula de mandioca e os grupos hidrofóbicos originados da cera de carnaúba presentes. A análise foi realizada no espectro de infravermelho do laboratório de espectrometria do Curso Técnico de Química da Fundação Liberato, após a etapa de produção do material.

3 Resultados e discussões

3.1 Manutenção do magnetismo

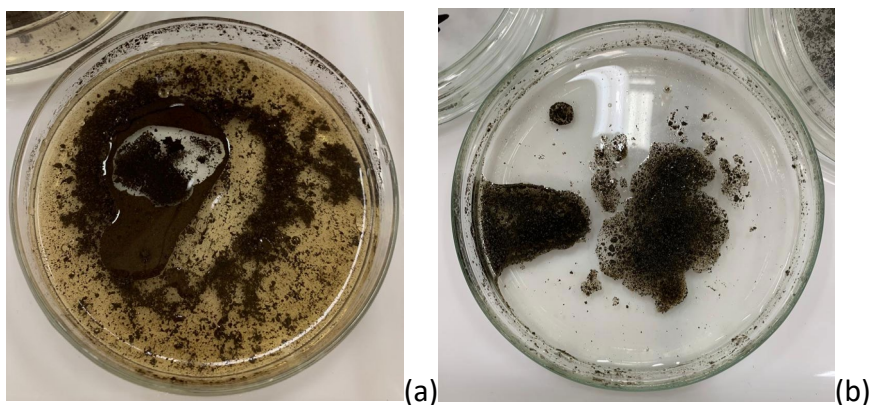
Em todas as etapas da produção das PMAC, como na incorporação da fécula de mandioca e revestimento com cera de carnaúba, foi testada a resposta ao ímã do material. A movimentação

das partículas magnéticas na presença do ímã indicou a preservação da propriedade magnética. Logo, em nenhuma etapa, houve a perda do magnetismo do material.

3.2 Estabilização do óxido de ferro com a fécula de mandioca

Foram realizadas incorporações nas partículas magnéticas com diferentes concentrações de fécula de mandioca, como 2, 3,5 e 5%. Visualmente, aquelas com as menores proporções (2 e 3,5%) apresentaram aspectos de oxidação, devido à coloração amarelada na água, como é possível observar na figura 1a com 3,5% de fécula de mandioca, diferenciando-se daquela com a maior proporção (5%) (figura 1b), que se manteve estável no meio aquoso.

Figura 1 - (a) 3,5% de fécula de mandioca. (b) 5% de fécula de mandioca

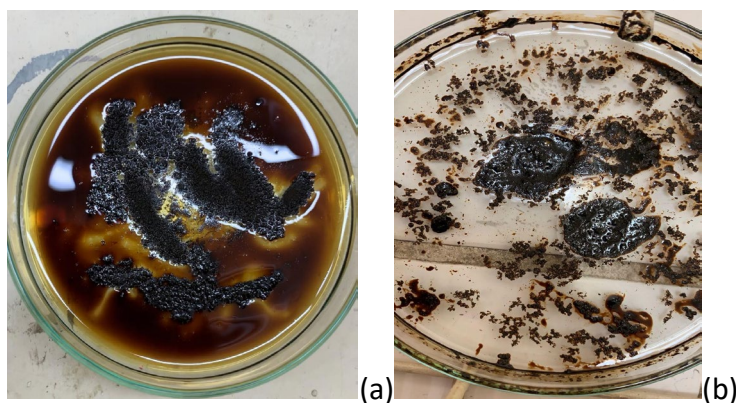


Fonte: As autoras (2023).

3.3 Testes de adsorção

Para realizar a quantificação dos testes de adsorção, o método de extração de óleos com aparelho de Soxhlet foi utilizado. A figura 2a apresenta as PMAC (incorporadas a 5% de fécula de mandioca) inseridas na placa de Petri contendo água e petróleo na superfície, e, mesmo espalhando o material, pode-se perceber que as PMAC têm forte atração entre si e começam a se aglomerar. Após o tempo de repouso, o contato entre o material e o meio contaminado promove a formação de núcleos (figura 2b).

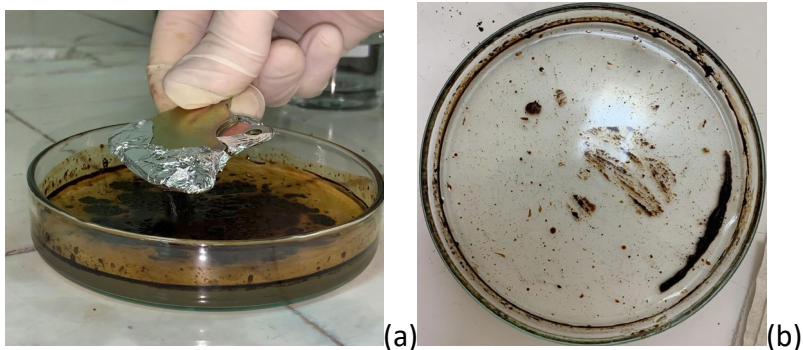
Figura 2 - (a) PMAC recém adicionadas no meio contaminado com petróleo. (b) após seis horas de repouso



Fonte: As autoras (2023).

Ademais, com os núcleos já formados (figura 3a), foi possível realizar a remoção do petróleo aderido na superfície dos adsorventes por meio do ímã, assim, a figura 3b demonstra o meio aquoso com a limpeza já realizada.

Figura 3 - (a) remoção com ímã. (b) meio aquoso após a limpeza com ímã



Fonte: As autoras (2023).

Logo, foi possível realizar as quantificações dos valores de petróleo removidos, em que foram testadas diferentes quantidades de PMAC 5% (PMAC com 5% de fécula de mandioca), de 0,5 e 0,75 gramas (tabela 1).

Tabela 1 – Quantidades de água deionizada, petróleo, PMAC 5% e percentuais de remoção de petróleo

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Água D. (mL) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Petróleo (g) | 0,5233 | 0,5264 | 0,5080 | 0,5207 | 0,5080 | 0,5521 |
| PMAC 5% (g) | 0,4973 | 0,5008 | 0,5050 | 0,7521 | 0,7630 | 0,7533 |
| % de remoção (m/m) | 77,05% | 84,94% | 61,95% | 83,68% | 76,74%* | 86,60% |

Nota: * ocorreram perdas durante a transferência do petróleo removido para o aparelho Soxhlet.

Fonte: As autoras (2023).

Com os dados obtidos acima, realizou-se as médias das triplicatas e seus intervalos com 95% de confiança com os valores de 0,5 e 0,75g, resultando em, respectivamente, $74,65 \pm 13,22$ e $82,34 \pm 5,73\%$ de remoção de petróleo em água, conforme representado na tabela 2.

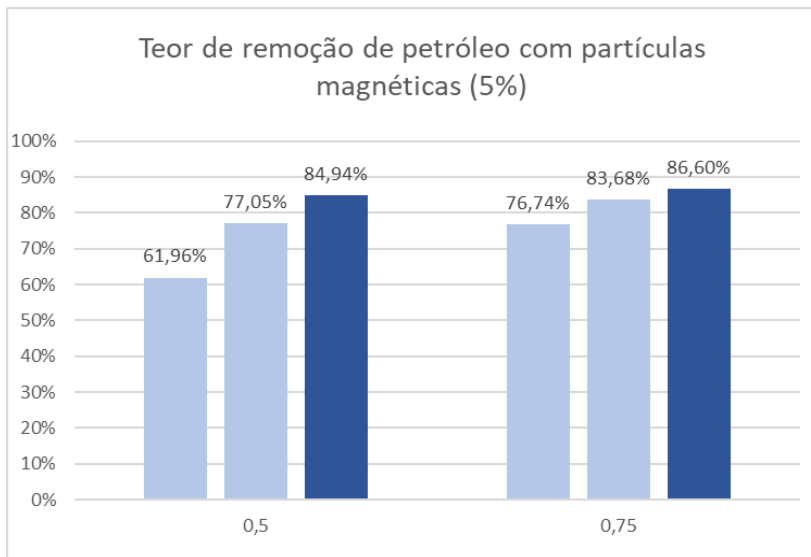
Tabela 2 - Média de teor de remoção de petróleo com PMAC

| PMAC (g) | Remoção de petróleo em água (% m/m) |
|----------|-------------------------------------|
| 0,5 | $74,65 (\pm 13,22)\%$ |
| 0,75 | $82,34 (\pm 5,73)\%$ |

Fonte: As autoras (2023).

A partir desses valores, foi possível construir um gráfico com os valores de remoção do petróleo com as PMAC 5% (figura 4).

Figura 4 - Gráfico das PMAC 5% X porcentagem de remoção de petróleo



Fonte: As autoras (2023).

O teste 6 obteve o resultado mais eficiente, dentre os aqui analisados, na remoção de petróleo em água contaminada, com 86,60%. Cabe ressaltar que, ainda que o ensaio 5 tenha sido feito com quantidade de PMAC similar ao ensaio 5 (cerca de 0,75g), devido a perdas ocorridas na transferência do petróleo removido para o aparelho de Soxhlet, o teor de extração ficou abaixo dos ensaios 4 e 6.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em consonância com aqueles obtidos por Santos (2020), cuja aplicação de nanopartículas de óxido de ferro magnético puras, ou seja, sem a presença de um estabilizante ou hidrofobilizante, obteve em torno de 75% de eficiência.

Fernandes (2019), obteve uma eficiência de remoção de óleo de motor de 39,4% com o uso de nanopartículas de magnetita que foram funcionalizadas com materiais hidrofóbicos (ácido oleico/ácido palmítico). Valor inferior aos obtidos nos resultados menos eficientes desta pesquisa (ensaios 3 e 4).

No estudo de Wu *et al.* (2021) foram aplicadas nanopartículas magnéticas a algodão e cera de carnaúba, obtendo 98,3% na extração de óleos, sendo considerado um método de absorção, demonstrando alta eficiência no processo.

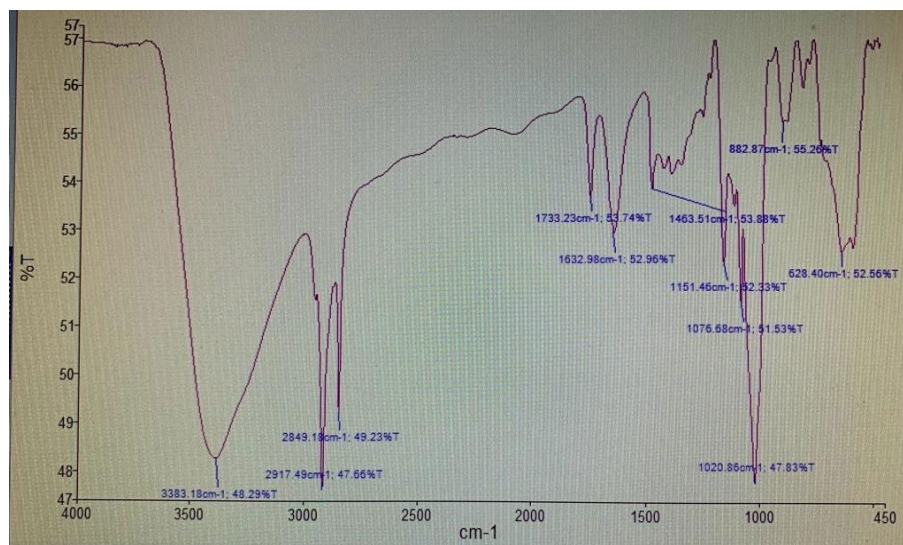
O presente estudo demonstrou resultados muito satisfatórios até o presente momento, uma vez que o melhor teor de petróleo removido em meio aquoso foi de 86,60%.

3.4 Espectroscopia de Infravermelho

Foi realizada uma análise de Espectroscopia de Infravermelho, conforme feito em Fernandes (2019) com as PMAC, no qual os resultados estão representados na figura 5. Os números de onda encontrados e suas respectivas atribuições podem ser comparados aos estudos

de Cavalcante (2019), Leite, Peres e Silveira (2013) e Henriques (2012), em que o espectro de infravermelho obtido contém na figura 5. As bandas provenientes da fécula de mandioca, são: 3383,18 e 1632,98 correspondem a grupos hidroxilas (OH), em 1733,23 associa-se a grupos de carbonila (C=O), com 1151,46 (C-O-C) e 1076,68 (C-O) representam ligações glicosídicas, e por fim, a banda 882,87 caracteriza deformação de grupos CH₂. Com a presença da cera natural, identificou-se em 2917,49 e 2849,18 grupos alquil (CH₂ e CH₃), em 1463,51 atribui-se a grupos de deformação de CH₂ e CH₃ e, por fim, em 628,40 corresponde a deformações do grupo CH₂.

Figura 5 - Espectro de infravermelho das partículas estabilizadas com fécula de mandioca 5% e revestidas com cera de carnaúba



Fonte: As autoras (2023).

4 Considerações finais

As PMAC podem ser aplicadas na remediação ambiental. O material apresenta facilidade na preparação, considerável força magnética e uma capacidade promissora de remoção de petróleo em meio aquoso, removendo 86,60%. Foi constatado que a preparação do composto não afetou a estrutura da magnetita, indicando também que as propriedades magnéticas do óxido de ferro foram preservadas. Foi demonstrado que as PMAC apresentaram uma natureza apolar que pode ser controlada para ajustar a afinidade química entre o petróleo e o composto.

Os resultados também mostraram que a concentração da solução de fécula de mandioca impactou diretamente no aspecto da água utilizada que se tornou amarelada quando não houve a devida estabilização, devido à oxidação do ferro. Além disso, a presença da cera revestida na superfície foi muito importante para maximizar a capacidade de remoção de petróleo, devido à maior atração entre o composto. Ainda há possibilidades a serem exploradas a fim de melhorar a taxa de remoção do petróleo em meio aquoso, tais como, melhorar o processo de estabilização com fécula de mandioca e cera de carnaúba, utilizar ímãs com maior intensidade de campo magnético — visto que neste trabalho foi empregado um ímã doméstico comum, com campo estimado entre 100 e 300 gauss (ou 0,01–0,03 tesla), considerado baixo para separações magnéticas —, e estabelecer a melhor relação entre a quantidade de PMAC por volume de petróleo. Sob esse prisma, o trabalho atende principalmente as ODS 6 e 14, referentes aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil da ONU, que relatam a proteção da vida

marítima, além de reduzir significativamente a poluição de ambientes marinhos e eliminar o despejo de produtos perigosos (Nações Unidas Brasil, 2022).

Como próximos passos, sugere-se a realização de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de verificar e determinar o tamanho das PMAC obtidas neste trabalho; bem como fazer uma análise de custo/viabilidade do material obtido.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Especial ANP 20 anos**. Brasília: ANP, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/especial-anp-20-anos>. Acesso em: 24 out. 2023.

ALI, A. *et al.* Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. **Nanotechnology, Science and Applications**, v. 9, p. 49-67, 2016. DOI:10.2147/NSA.99986.

ALVARADO, N. *et al.* Two fascinating polysaccharides: chitosan and starch: some prominent characterizations for applying as eco-friendly food packaging and pollutant remover in aqueous medium: progress in recent years: a review. **Polymers**, v. 13, n. 11, p. 1737, 2021. DOI: 10.3390/polym13111737.

ARAÚJO, M. E.; RAMALHO, C. W. N.; MELO, P. W. Pescadores artesanais, consumidores e meio ambiente: consequências imediatas do vazamento no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, n. 1, 2020. DOI: 10.1590/0102-311X00230319. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/66t7BVfM6X4pBBCJwLcqmf/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2023.

CAVALCANTE, C. E. C. **Caracterização de propriedades da cera de carnaúba para aplicação na faixa de frequência micro-ondas como substrato de antenas de microfita**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: <https://ppgee.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/61/2019/03/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Carlos-Eduardo.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

CHEN, J. *et al.* Oil spills from global tankers: Status review and future governance. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 20-32, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.020.

CRAIG, A. P. *et al.* Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, n. 1, p. 75-86, 2012.

FENG, Z. *et al.* Recent progress in the use of graphene/polymer composites to remove oil contaminants from water. **New Carbon Materials**, v. 36, n. 2, p. 235-252, 2021. DOI: 10.1016/S1872-5805(21)60018-5. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60018-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60018-5). Acesso em: 27 mar. 2023.

FERNANDES, Y. L. **Síntese e aplicação de nanopartículas funcionalizadas para a remoção de óleos em meio aquoso**. 2019. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/56212>. Acesso em: 05 ago. 2023.

FORTIN J. P. *et al.* Size-sorted anionic iron oxide nanomagnets as colloidal mediators for magnetic hyperthermia. **Journal of the American Chemical Society**, v. 129, n. 9, p. 2628-2635, 2007. DOI:10.1021/ja067457e.

GOULART, A. *et al.* Química verde na indústria de exploração e produção (E&P) de petróleo. **Revista de Química Industrial**, n. 753, p. 10-13, 2016.

HENRIQUES, A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro**: hematita, goethita e magnetita. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8XTQXL>. Acesso em: 22 out. 2023.

HU, J. *et al.* Plasma-induced grafting of cyclodextrin onto multiwall carbon nanotube/iron oxides for adsorbent application. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 114, n. 20, p. 6779-6785, 2010. DOI:10.1021/jp911424k.

LEITE, D. C.; PERES, G. L.; SILVEIRA, N. P. Caracterização de complexos metálicos de amilopectina modificada por UV-VIS e FT-IR. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 12., 2013, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Polímeros, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/81836>. Acesso em: 22 out. 2023.

MELO, N. H. **Utilização de carvão ativado e nanopartículas de magnetita na adsorção do corante reativo azul BF-5G**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/6455>. Acesso em: 31 mar. 2023.

M. JR., J. A.; MARQUES, L. G. A cera de carnaúba. **Cadernos de Prospecção**, v. 2, n. 1, p. 36-38, 2009. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/11545/pdf_27. Acesso em: 12 out. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 out. 2023.

PEREZ, T. *et al.* Efficient removal of lead ions from water by magnetic nanosorbents based on manganese ferrite nanoparticles capped with thin layers of modified biopolymers. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, p. 102892-1028104, 2019. DOI:10.1016/j.jece.2019.102892.

PETROBRAS. **FISPQ petróleo**: ficha de informações de segurança de produtos químicos. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/especial-anp-20-anos>. Acesso em: 10 out. 2023.

PRILL, B.; YUSAN, S. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles functionalized with different starch types. **Particulate Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 521-530, 2022. DOI:10.1080/02726351.2021.1967536. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726351.2021.1967536>. Acesso em: 02 abr. 2023.

SANTOS, K. G. **Remoção de biodiesel com óxido de ferro magnético**. 2020. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2020. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5019>. Acesso em: 25 maio 2023.

SHAH, N. *et al.* Synthesis and characterization of starch coated natural magnetic iron oxide nanoparticles for the removal of methyl orange dye from water. **Letters in Applied NanoBioScience**, v. 10, n. 4, p. 2750-2759, 2021. DOI:10.33263/LIANBS104.27502759. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351436729_Synthesis_and_Characterization_of_Sta

rch_Coated_Natural_Magnetic_Iron_Oxide_Nanoparticles_for_the_Removal_of_Methyl_Orange_Dye_from_Water. Acesso em: 20 mar. 2023.

SOUZA JR., F. G. *et al.* A magnetic composite for cleaning of oil spills on water. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 295, n. 10, p. 942-948, 2010. DOI:10.1002/mame.201000090.

STAN, M. *et al.* Starch-coated green synthesized magnetite nanoparticles for removal of textile dye Optilan Blue from aqueous media. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 100, p. 65-73, 2019. DOI:10.1016/j.jtice.2019.04.006.

SOXHLET, F. Método de extração contínua com solvente. **Dingler's Polytechnisches Journal**, v. 232, p. 461-465, 1879.

SUN, S. *et al.* Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis and surface coating techniques for biomedical applications. **Chinese Physics B**, v. 23, n. 3, p. 037503, 2014. DOI:10.1088/1674-1056/23/3/037503.

WU, D. *et al.* Solvent-free processing of eco-friendly magnetic and superhydrophobic absorbent from all-plant-based materials for efficient oil and organic solvent sorption. **Science of The Total Environment**, v. 800, p. 149558, 2021. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.149558.

ZHU, Q. *et al.* Fast and selective removal of oils from water surface via highly hydrophobic core-shell Fe₂O₃@ C nanoparticles under magnetic field. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 2, n. 11, p. 3141-3146, 2010. DOI:10.1021/am1006194.