

Mapeando pesquisas sobre aplicação de partículas magnéticas na remoção de óleo em água: análise de pesquisas entre 2000 e 2018

Mapping research on the application of magnetic particles in the removal of oil in water: analysis of research between 2000 and 2018

Mapeando investigaciones sobre aplicación de partículas magnéticas en la remoción de aceite en agua: análisis de investigaciones entre 2000 y 2018

Willbryenner Pereira Marques

Universidade Federal do Espírito Santo - Campus São Mateus, Brasil

E-mail: will.pm3@hotmail.com

Eduardo Perini Muniz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-4786>

Universidade Federal do Espírito Santo - Campus São Mateus, Brasil

E-mail: eduardo.muniz@hotmail.com

Recebido: 11/07/2018 – Aceito: 14/08/2018

Resumo

A demanda por tecnologias que visam tratar efluentes que possuem óleo emulsionado ou acidentes com derramamento de óleo é crescente. Por isso, o uso de nanotecnologias tem sido constantemente abordado a fim de solucionar tais problemas. A magnetita tem sido geralmente usada como substrato magnético devido seu baixo custo e citotoxicidade. A fim de avaliar o andamento das pesquisas que visam utilizar Fe_3O_4 para remoção de óleo emulsionado, foi realizado uma revisão bibliométrica usando a plataforma *Web of Science*. Com base nos dados obtidos após o refinamento da pesquisa, observou-se que estudos voltados para essa área são poucos, mas os resultados têm se mostrado promissores.

Palavras-chave: bibliometria; óxido de ferro; remoção de óleo.

Abstract

The demand for technologies aimed at treating effluents containing emulsified oil or accidents with oil spills is increasing. Therefore, the use of nanotechnologies has been constantly addressed in order to solve such problems. Magnetite has generally been used as magnetic substrate because of its low cost and cytotoxicity. In order to evaluate the progress of the researches to use Fe_3O_4 to remove emulsified oil, a bibliometric revision was carried out using the Web of Science platform. Based on the data

obtained after the refinement of the research, it has been observed that studies aimed at this area are few, but the results have shown promise.

Keywords: bibliometric; iron oxide; removal of oil.

Resumen

La demanda de tecnologías destinadas a tratar efluentes que poseen aceite emulsionado o accidentes con derrame de aceite es creciente. Por eso, el uso de nanotecnologías ha sido constantemente abordado para solucionar estos problemas. La magnetita se ha utilizado generalmente como sustrato magnético debido a su bajo costo y citotoxicidad. Con el fin de evaluar el progreso de las investigaciones que buscan utilizar Fe₃O₄ para remoción de aceite emulsionado, se realizó una revisión bibliométrica usando la plataforma Web of Science. Con base en los datos obtenidos después del refinamiento de la investigación, se observó que estudios orientados hacia esa área son pocos, pero los resultados se han mostrado prometedores.

Palabras clave: bibliometría; óxido de hierro; eliminación de aceite.

1. Introdução

A água tem um papel importante na produção de óleo e gás, sendo a injeção de água sob alta pressão necessária para aumentar a produtividade. Quando utilizada na extração do petróleo, a água retorna para a superfície contaminada por gotículas de óleo e hidrocarbonetos dissolvidos devido o contato com o petróleo e o gás na rocha reservatório (WANG et al., 2013). Antes que essa água seja descarregada no meio ambiente, ela deve ser tratada a fim de remover as impurezas e minimizar os riscos para o meio ambiente e a sociedade (JIANG et al., 2015; LÜ et al., 2016).

O tratamento da água é crucial para atender as regulamentações ambientais (FARD et al., 2016) e impõe desafios na gestão de recursos hídricos (KUMAR et al., 2015). Além disso, o estudo de tratamento da água tem gerado uma crescente demanda devido a frequentes acidentes envolvendo derramamento de óleo (REDDY et al., 2016; CALCAGNILE et al., 2002), o descarregamento de óleo também pode ser oriundo de atividades industriais (MIRSHAHHASSEMI et al., 2017).

Entretanto, o tratamento e a recuperação da água poluída com óleo são difíceis e depende de diversos fatores como o tipo de óleo derramado, o tipo de corpo hídrico poluído, sua turbulência e temperatura (FRANCO et al., 2014).

As práticas atuais para remoção de óleo se baseiam em separação gravimétrica e por malhas de metal, as quais requerem um trabalho extensivo (REDDY et al., 2016). Novas técnicas já vêm sendo propostas como o tratamento eletroquímico, a microfiltração e o reator de membrana, e embora apresentem um grande progresso, ainda possuem limitações como alto custo operacional e baixa taxa de remoção (MIRSHAHHASSEMI et al., 2017).

Por isso, tem-se observado que nos anos recentes abordagens usando nanotecnologias vem sendo desenvolvidas no intuito de remediar o derramamento de óleo (PAVÍASANDERS et al., 2013), como a utilização materiais sorventes com uma grande área superficial. Nanopartículas de óxido de ferro, como a magnetita (Fe_3O_4), são geralmente usadas como substrato magnético devido seu baixo custo e citotoxicidade e boa biocompatibilidade (LÜ et al., 2016).

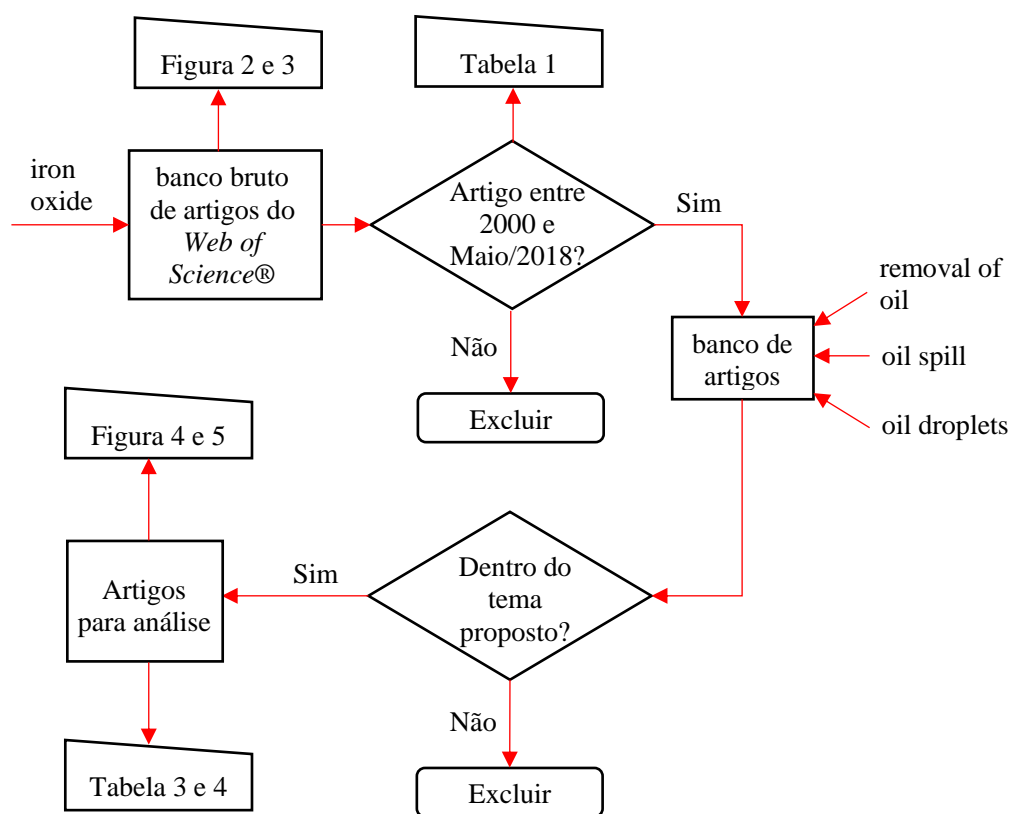
Esse trabalho visa avaliar por meio de uma revisão bibliométrica os estudos recentes que desenvolvem materiais empregando nanopartículas magnéticas de óxido de ferro para remoção de óleo emulsionado em água.

2. Metodologia

Foi realizado uma revisão bibliométrica utilizando a plataforma Web of Science®. A busca consistiu primeiramente por trabalhos publicados entre 1945 e 2018 que tinha como tópico a palavra-chave “*iron oxide*”. Como pode ser observado na **Figura 1**, outras etapas foram realizadas a fim de restringir algumas variáveis.

A pesquisa foi refinada para trabalhos publicados no formato de artigo entre 2000 e Maio/2018 seguindo o fluxograma apresentado. Além disso, foi fornecido palavras-chaves, “*removal of oil*”, “*oil droplets*” e “*oil spill*”, para serem combinadas com “*iron oxide*”. Posteriormente, foi avaliado o conteúdo dos artigos, sendo aqueles que não se alinham com a pesquisa removidos do banco de artigos. Os artigos foram organizados entre os 10 mais citados entre 2000 e Maio/2018, e os mais citados para cada ano. Por fim, foi feito um breve resumo do tema proposto para cada um desses artigos.

Figura 1: Etapas de refinamento da revisão bibliométrica.



Fonte: Próprio autor.

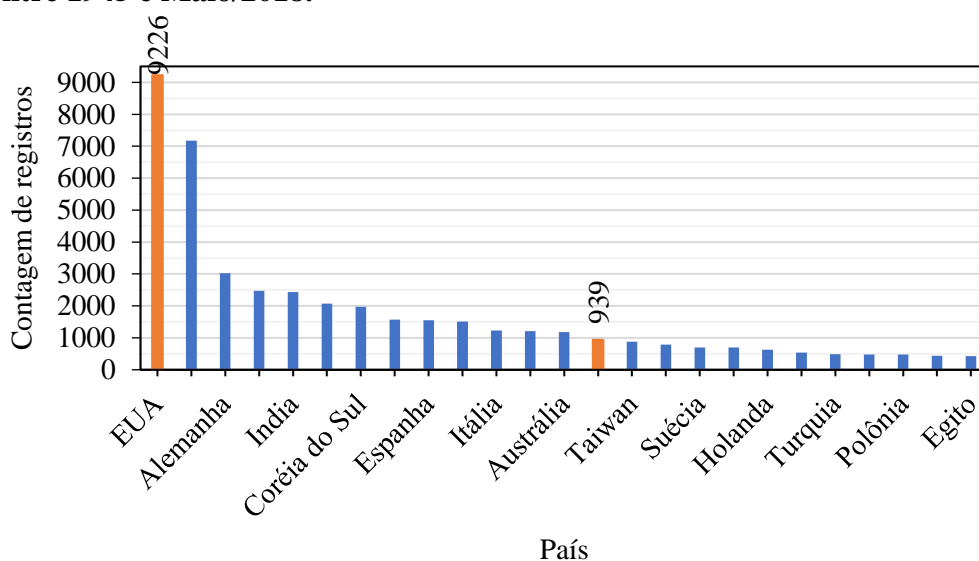
3. Resultados e discussões

Utilizou-se a plataforma *Web of Science* para o desenvolvimento dessa revisão bibliométrica, na qual foi realizada uma busca por trabalhos entre os anos de 1945-Maio/2018 utilizando a palavra-chave “*iron oxide*”, retornando como resultado 39900 trabalhos publicados como mostra a **Figura 2**.

Além disso, pode ser visto, pela **Figura 2**, que os Estados Unidos foi o país que mais pesquisou esse assunto nesse período, cerca de 9226 registros, enquanto que o Brasil encontra-se na 14^o posição com 939 registros, representando 2,353% do total de registros para esse período.

O artigo mais antigo disponível no *Web of Science* sobre óxido de ferro foi publicado em 1945 por MCLAUGHLIN et al. cujo título é “Iron oxide dust and the lungs of silver finishers”.

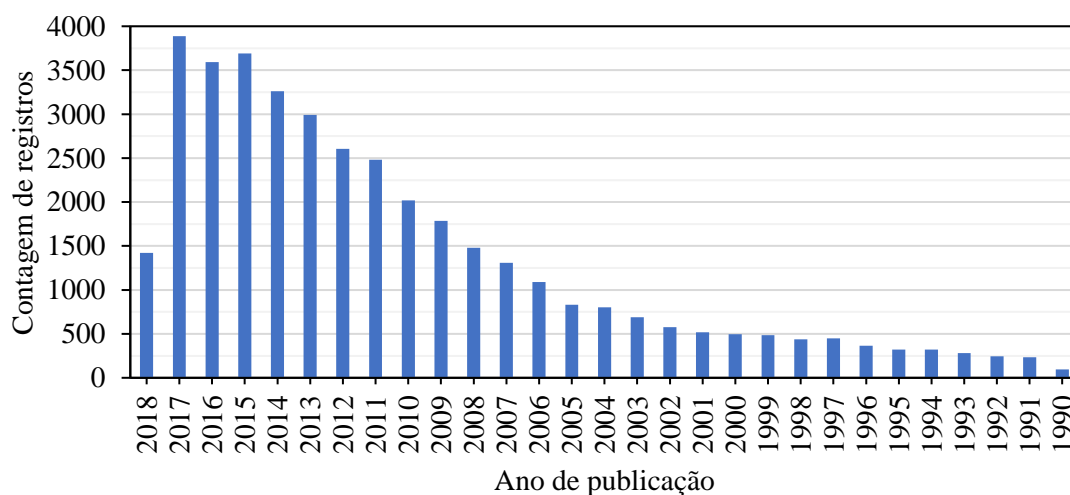
Figura 2: Publicações de trabalhos relacionados a óxidos de ferro de acordo com os países entre 1945 e Maio/2018.



Fonte: Adaptado da plataforma *Web of Science*.

Na **Figura 3** apresentam-se dados de trabalhos publicados entre 1990 até Maio/2018, podendo-se notar um crescente interesse em pesquisar temas relacionados a óxidos de ferro.

Figura 3: Trabalhos publicados entre 1990-Maio/2018 utilizando “iron oxide” como palavra chave.



Fonte: Adaptado da plataforma *Web of Science*.

A fim de delinear os trabalhos selecionados, foi separado apenas os artigos publicados entre 2000 e Maio/2018, reduzindo o número de registros para 30062, cerca de 24,66%. A **Tabela 1** mostra os 10 artigos mais citados.

Tabela 1: Artigos mais citados entre 2000 e Maio/2018.

#	Título	Autores	Número de citações
1	Monodisperse MFe ₂ O ₄ (M = Fe, Co, Mn) nanoparticles	SUN et al. (2004)	2322
2	Analysis of XPS spectra of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ ions in oxide materials	YAMASHITA et al. (2008)	1413
3	Tat peptide-derivatized magnetic nanoparticles allow in vivo tracking and recovery of progenitor cells	LEWIN et al. (2000)	1362
4	Noninvasive detection of clinically occult lymph-node metastases in prostate cancer	HARISINGHANI et al. (2003)	1241
5	Monodisperse magnetic single-crystal ferrite microspheres	DENG et al. (2005)	1187
6	Multifunctional inorganic nanoparticles for imaging, targeting, and drug delivery	LIONG et al. (2008)	1180
7	In vitro toxicity of nanoparticles in BRL 3A rat liver cells	HUSSAIN et al. (2005)	1163
8	Artificially engineered magnetic nanoparticles for ultra-sensitive molecular imaging	LEE et al. (2007)	1160
9	Self-assembled 3D flowerlike iron oxide nanostructures and their application in water treatment	ZHONG et al. (2006)	1138
10	Comparison of arsenic(V) and arsenic(III) sorption onto iron oxide minerals: Implications for arsenic mobility	DIXIT et al. (2003)	1121

Fonte: Próprio autor.

Entretanto, muitos artigos abordam áreas de pesquisas diferentes daquela de interesse. Áreas como radiologia nuclear, farmacologia, bioquímica/biologia molecular, neurologia, entre outras, representam cerca de 17,4% dos 30062 artigos. Dos 10 artigos mais citados, 6 artigos são provenientes do EUA, 2 da China e é contabilizado 1 artigo para cada um: Holanda, Austrália e Coréia do Sul.

No trabalho desenvolvido por Sun et al. (2004), foi apresentado de forma detalhada a síntese e a caracterização de nanopartículas de Fe₃O₄ e MFe₂O₄ (com M=Co ou Mn, por exemplo), sendo seu tamanho ajustável de 3 a 20 nm de diâmetro mudando a temperatura de reação ou o metal precursor. É pontuado que as reações do metal acetilacetonato com 1,2-hexadecanodiol, ácido oleico e oleilamina são realizadas sob altas temperaturas. Além disso, as nanopartículas hidrofóbicas, ao ser misturas com um surfactante bipolar, podem tornar-se hidrofílicas, permitindo a preparação de dispersões. As informações estruturais das nanopartículas de Fe₃O₄ foram obtidas por meio de microscopia eletrônica de transmissão de

alta resolução (HRTEM). Foi também averiguado oxidação Fe_3O_4 para Fe_2O_3 a fim de confirmar a formação de Fe_3O_4 . Por fim, averiguou-se que na temperatura ambiente as nanopartículas de Fe_3O_4 são superparamagnéticas.

Observado que os artigos apresentados que abordam óxidos de ferro são muito variados, outras palavras chaves foram combinadas (**Tabela 2**) com a anterior no intuito de refinar a pesquisa, resultando em 36 artigos.

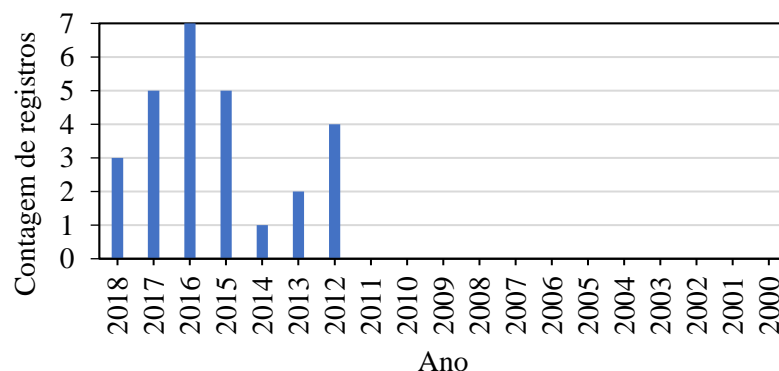
Tabela 2: Conjunto de combinações de palavras chaves utilizadas no *Web of Science*.

#	Combinação
1	TOPIC("iron oxide") and TOPIC("removal of oil")
2	TOPIC("iron oxide") and TOPIC("oil droplets")
3	TOPIC("iron oxide") and TOPIC("oil spill")
TS=("iron oxide" AND ("removal of oil" OR "oil droplets" OR "oil spill"))	

Fonte: Próprio autor.

Na plataforma, 36 artigos foram contabilizados nesse período após o refino da pesquisa. A partir de uma breve avaliação desses artigos, observou-se que 9 artigos se encontravam fora do tema proposto, sendo, portanto, retirados da análise final. A quantidade de artigos publicados para cada ano entre 2000 e Maio/2018 é mostrado na **Figura 4**.

Figura 4: Artigos publicados entre 2000-Maio/2018.

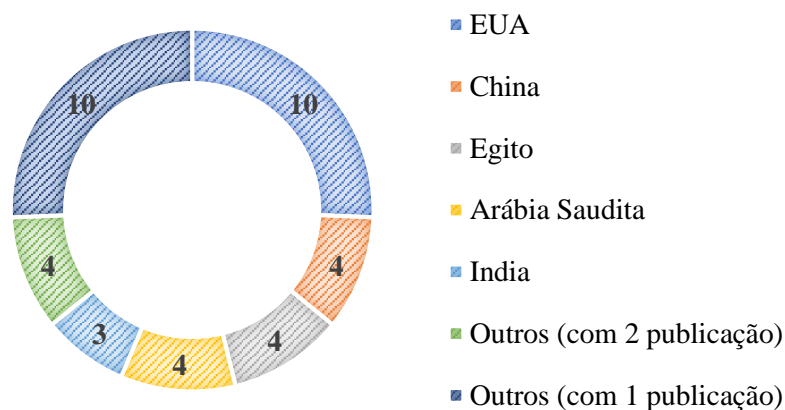


Fonte: Adaptado da plataforma *Web of Science*.

Como pode ser visto na **Figura 4**, a partir de 2012 houve um aumento no interesse na utilização de nanopartículas magnéticas na separação de mistura óleo-água. Quando se trata dos artigos publicados entre 2000 e Maio/2018 relacionado com a utilização de óxido de ferro

para remoção de óleo em água, conforme a **Figura 5**, os EUA mantem-se na 1^o posição com 10 publicações enquanto que o Brasil, com 1 publicação, encontra-se no mesmo patamar com outros 9 países como Austrália, Canadá, Inglaterra, Alemanha, entre outros.

Figura 5: Publicações de artigos sobre aplicação de óxidos de ferro na remoção de óleo de acordo com os países entre 2000 e Maio/2018.



Fonte: Adaptado da plataforma *Web of Science*.

Dos 27 artigos publicados nesse período, separou-se os 10 mais citados (**Tabela 3**) e o artigo mais citado para cada ano desse período (**Tabela 4**) a fim de analisar o conteúdo de cada um artigo.

Tabela 3: Artigos mais citados entre 2000 e Maio/2018 utilizando como a palavra chave “iron oxide” combinada com “removal of oil”, “oil droplets” e “oil spills”.

#	Título	Autores	Número de citações	Média de citações por ano
1	Magnetically Driven Floating Foams for the Removal of Oil Contaminants from Water	Calcagnile et al. (2012)	308	44,14
2	Removal of oil droplets from contaminated water using magnetic carbon nanotubes	Wang et al. (2013)	47	7,83
3	Robust Magnetic/Polymer Hybrid Nanoparticles Designed for Crude Oil Entrapment and Recovery in Aqueous Environments	Pavia-Sanders et al. (2013)	45	7,67
4	Effect of Adsorbed Amphiphilic Copolymers on the Interfacial Activity of Superparamagnetic Nanoclusters and the Emulsification of Oil in Water	Yoon et al. (2012)	38	5,43
5	SPION/beta-cyclodextrin core-shell	Kumar et al.	35	8,75

	nanostructures for oil spill remediation and organic pollutant removal from waste water	(2015)		
6	Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents	Fard et al. (2016)	28	9,33
7	Iron: a Versatile Element to Produce Materials for Environmental Applications	Teixeira et al. (2012)	27	3,86
8	Removal of oil from water using magnetic bicomponent composite nanofibers fabricated by electrospinning	Jiang et al. (2015)	26	6,5
9	Remotely triggered release from composite hydrogel sponges	Zadrazil et al. (2012)	17	2,43
10	Coconut shell based activated carbon-iron oxide magnetic nanocomposite for fast and efficient removal of oil spills	Raj e Joy (2015)	15	3,75

Fonte: Próprio autor.

Calcagnile et al. (2012) aborda a utilização de espumas de poliuretano funcionalizadas com nanopartículas de óxido de ferro e partículas de politetrafluoroetileno para separação de óleo da água. Observou-se que essa funcionalização combinada aumenta a velocidade de absorção do óleo, bem como apresenta responsividade magnética. Além disso, pelo material ser leve, esse flutua na água, facilitando o processo de tratamento de águas poluídas por óleo.

O projeto, fabricação e avaliação laboratorial de nanotubos de carbono de paredes múltiplas decorados com nanopartículas de magnetita por meio da co-precipitação usado na separação de óleo-água é abordado por Wang et al. (2013). É relatado que a remoção de óleo é feita por meio de duas etapas e que, a partir dos dados obtidos no experimento, tanto a cinética quanto o equilíbrio do processo de separação pode ser descrito pelo modelo de Langmuir. Pontua-se que após a separação, os nanotubos de carbono podem ser rapidamente recuperados por meio de uma lavagem com etanol, recuperando o óleo separado também.

Foi estudado por Pavia-Sanders et al. (2013) a utilização de um material orgânico anfifílico com um núcleo de partículas inorgânicas. Foi construído uma casca magnética reticulada de nanopartículas Knedel utilizando ácido oleico estabilizado por nanopartículas de óxido de ferro como componente magnético inorgânico hidrofóbico, e para o componente orgânico utilizou-se um copolímero dibloco anfifílico de poliestireno-*b*-poli(ácido acrílico) (PS-*b*-PAA). Essa nanopartícula apresentou uma eficiente capacidade de sorção, 10 vezes a sua massa seca inicial, superando outros materiais empregados nesse campo que apresentam cerca de 4 vezes a capacidade de absorção de óleo em relação a massa seca do material.

Nanopartículas superparamagnéticas de óxido de ferro com uma casca de um copolímero dibloco anfifílico de poliestireno-*b*-poli(ácido acrílico) (PS-*b*-PAA) foram sintetizadas e caracterizadas por Yoon et al. (2012). Pela significativa redução na tensão superficial da interface dodecano-água foi possível constatar uma grande adsorção de nanopartículas e interação entre moléculas de óleo e água na interface. É pontuado que essa habilidade de adsorção na interface óleo-água pode possuir grande utilidade prática em melhorar a remoção de óleo emulsionado em água.

Kumar et al. (2015) abordou a síntese, a capacidade de recuperação e de reusabilidade de nanopartículas superparamagnéticas de Fe₃O₄ (SPION) e seus nanocompósitos com β-ciclodextrina (SPION/β-CD). A performance do tratamento foi avaliada com base da degradação do Bisfenol A (Bisphenol A – BPA), alcançando 82,55% de degradação através da fotodegradação sob iluminação solar. Sendo que a capacidade de retenção de óleo foi de 7,2 g/g de nanocompósito. É informado que a capacidade de recuperação de óleo foi mantida alta para 5 ciclos consecutivos, caindo de 7,2 g/g para 6,1 g/g após os 5 ciclos. As nanoestruturas podem ser removidas magneticamente e o óleo removido utilizando etanol.

Fard et al. (2016) estudou o efeito de nanotubos de carbono dopados e não dopados com nanopartículas adsorventes de Fe₂O₃ na separação de óleo de gasolina emulsionado em água. Os nanotubos de carbono foram caracterizados usando microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG), análise termogravimétrica, difratometria de raio-X, método de adsorção de BET (Brunauer, Emmett e Teller) e potencial zeta. Esse novo material mostrou-se promissor no processo de separação de partículas de óleo em água. Além disso, foi proposto a separação dos nanotubos de carbono da água por meio da filtração com areia.

O único artigo brasileiro é o 9º mais citado como mostrado na **Tabela 3**. Esse artigo desenvolvido por Teixeira et al. (2012) aborda as diversas aplicações dos diferentes estados de oxidação do ferro. Para cada fase do ferro, propriedades físico-químicas únicas permitem uma vasta aplicação tecnológica e ambiental. O grupo investigou o uso da magnetita de espinélio inversa, Fe₃O₄, para a reação de Fenton. Pode-se citar como características da magnetita: é magnética; contém na sua estrutura Fe²⁺ que é um importante doador de elétrons; e sua estrutura octaédrica provê uma química redox interessante devido sua possibilidade de acomodar Fe²⁺ e Fe³⁺.

Além disso, foi investigado a utilização das fases de ferro para produção de materiais magnéticos como adsorventes e suporte de catalisadores. É citado que muitas indústrias geram resíduos ricos em Fe, podendo ser usado em diversas aplicações ambientais. Para remoção de óleo, é informado que a argila vermiculita possui um baixo custo e uma estrutura porosa altamente desenvolvida, havendo relatos de que esse material é muito eficaz para esse emprego. Outras pesquisas propuseram revestir/hidrofobizar esses materiais magnéticos com polímeros como resina epóxi e poliestireno a fim de melhorar a capacidade de remoção de óleo.

Jiang et al (2015) produziram um composto magnético nanofibroso de poliestireno (PE)/fluoreto de polivinilideno (PVDF) com uma incorporação seletiva de nanopartículas de óxido de ferro (Fe_3O_4) no PE. Essa incorporação de nanopartículas de Fe_3O_4 ocorreu principalmente para prover propriedade magnética ao compósito e então tornar-se possível a recuperação do material sorvente. Foi observado que as nanofibras apresentam uma estrutura altamente porosa. A capacidade de sorção do compósito foi boa, de 35 a 40 g/g, demonstrando um grande potencial na remoção de óleo em água e recuperação do material sorvente.

Zdražil et al. (2012) fabricou um hidrogel termosensível de poli(N-isopropilacrilamina) (PNIPAm) reticulado com metileno bis-acrilamida (MBA), possuindo a habilidade de se submeter a variações de volume de aproximadamente 50%. Nanopartículas de óxido de ferro foram adicionadas a estrutura do hidrogel tornando-se possível desencadear a variação de volume do hidrogel remotamente ao submeter o compósito a um campo magnético de radiofrequência, aquecendo as nanopartículas que dissipam energia pela relaxação de Brown e a relaxação de Néel. É comentado que o aumento na habilidade de aquecimento das nanopartículas de óxido de ferro pode ser atribuída a alta resistência de movimento na matriz do hidrogel. O hidrogel acaba encolhendo ao sofrer um aumento na temperatura e subsequentemente, gotículas de óleo encapsuladas podem ser espremidas para fora. Os resultados mostraram que a liberação do óleo ocorre de forma gradual ao longo do ciclo de variação do volume e que a quantidade de óleo liberado foi de 8-15% v/v, sendo que o tamanho das microgotículas encapsuladas afetam essa quantidade.

Tabela 4: Artigos mais citados para cada ano entre 2000 e Maio/2018 utilizando como a palavra chave “*iron oxide*” combinada com “*removal of oil*”, “*oil droplets*” e “*oil spills*”.

#	Título	Autores	Data de Publicação	Número de citações
1	Preparation of magnetic hydrophobic polyvinyl alcohol (PVA)-cellulose nanofiber (CNF) aerogels as effective oil absorbents	Xu et al.	Fev/2018	1
2	Radiation crosslinked magnetized wax (PE/Fe ₃ O ₄) nano composite for selective oil adsorption	Ghobashy et al.	Mar/2017	6
3	Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents	Fard et al.	Jun/2016	28
4	SPION/beta-cyclodextrin core-shell nanostructures for oil spill remediation and organic pollutant removal from waste water	Kumar et al.	Nov/2015	35
5	Solid-stabilized emulsion formation using stearyl lactylate coated iron oxide nanoparticles	Vengsarkar et al.	Set/2014	2
6	Removal of oil droplets from contaminated water using magnetic carbon nanotubes	Wang et al.	Ago/2013	47
7	Magnetically Driven Floating Foams for the Removal of Oil Contaminants from Water	Calcagnile et al.	Jun/2012	308

Fonte: Próprio autor.

Foi preparado por Raj e Joy (2015) um nanocompósito magnético por meio da técnica de coprecipitação usando carvão ativado, obtido pelo processo de pirólise da casca de coco, e nanopartículas de óxido de ferro. Observou-se que o material apresenta boa capacidade de retenção de óleo, podendo ser recuperado para reuso após tratamento por calor ou extração por solvente.

Xu et al. (2018) preparou um aerogel de álcool polivinílico (PVA)/celulose nanofibrilada (CNF), o qual foi tratado com metiltriclorosilano (MTS) por meio da técnica de deposição química a vapor, modificando assim a sua superfície, dotando-o de hidrofobicidade e oleofilicidade. Também foi dispersado nanopartículas de Fe₃O₄ na superfície da fibra a fim de que apresentasse boa resposta magnética. Os resultados demonstraram que esse material possui grande porosidade e seletividade, e a capacidade de absorção do aerogel de PVA/CNF

hidrofobizado e magnetizado foram de 59 a 136 vezes o seu próprio peso, sendo maior do que outros materiais magnéticos para absorção de óleo. Sua propriedade magnética permite que seja direcionado para a região poluída e que rapidamente absorva o óleo. Constatou-se pelos testes que para 30 ciclos houve pouco perda nas propriedades mecânicas.

Ghobashy et al. (2017) observou um comportamento oleofóbico de uma cera de polietileno/Fe₃O₄, a qual foi capaz de adsorver o óleo de uma mistura rapidamente. A síntese dessa cera magnetizada partiu da conversão do polietileno de baixa densidade (PEBD) termoplástico em cera de polietileno foi utilizado 2 métodos: primeiro ocorreu o processo de radiólise e posteriormente a termólise. Foi misturado 30% de magnetita (Fe₃O₄) com a cera pelo método de fundição e em seguida a mistura derretida foi derramada em um banho ultrassônico a fim de obter briquetes de nanocompositos de cera de polietileno magnetizado. Devido a sua propriedade magnética, os briquetes da cera podem ser controlados e removidos com um ímã externo para reuso.

Vengsarkar et al. (2014) investigou o efeito das características fundamentais das partículas e a química de agentes estabilizantes na estabilidade de emulsões de Pickering. Para isso, foi sintetizado nanopartículas de óxido de ferro que foram funcionalizadas com estearoil lactilato de sódio (SSL). Foi avaliado a capacidade das nanopartículas revestidas com dupla camada em estabilizar uma emulsão óleo-em-água. Esse material se mostrou eficiente na geração de emulsões de Pickering estáveis, apresentando um potencial de aplicação na remediação e remoção de óleo derramado.

Com base nos dados coletados e as análises dos artigos, foi avaliado as forças e fraquezas, que são fatores internos, bem como as oportunidades e ameaças, que são condições externas que podem contribuir ou prejudicar o desenvolvimento do trabalho. Essa avaliação foi feita por meio da matriz SWOT, que é apresentada na **Tabela 5**.

Tabela 5: Matriz SWOT sintetizando as observações feitas nos trabalhos aqui explorados.

Positivo	Negativo
Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none">- Magnetita tem baixo custo e citotoxicidade- Os materiais possuem grande capacidade de remoção de emulsão de óleo em água- Propriedade magnética permite recuperação	<ul style="list-style-type: none">- Não foi observado testes em grande escala- Processo de fabricação dos materiais é complexo

do material - Podem ser usados em diversos ciclos - Tecnologia eficiente para remoção de óleo	
Oportunidades	Ameaças
- Estudos são bem recentes (Há muitos caminhos a serem explorados)	- Pouco incentivo no desenvolvimento de pesquisa nessa área

Fonte: Próprio autor.

Ao longo da pesquisa pode-se observar que os materiais funcionalizados com óxido de ferro possui grande seletividade e capacidade de absorção, sendo também mencionado a possibilidade de recuperar o material devido sua propriedade magnética, permitindo sua reutilização.

Foi observado que as pesquisas aplicadas na utilização de óxido de ferro para tratamento de emulsão de óleo em água são bem recentes, apresentando uma boa oportunidade na implementação de novos programas de pesquisa nessa área.

Considerações finais

A intenção desse trabalho foi mostrar que embora estudos que visam utilizar nanopartículas de óxido de ferro sejam bastante recentes, esses já demonstram resultados bastante positivos no que tange a capacidade de sorção do óleo. Além disso, é feita uma síntese dos trabalhos já realizados nessa área em âmbito global, servindo como material de rápida consulta em novas pesquisas.

Observou-se por meio da revisão bibliométrica que há um crescente interesse no desenvolvimento de pesquisa de novos materiais para remoção de emulsão de óleo em água. Embora, tenha sido constatado poucos estudos que visam aplicar nanopartículas de óxido de ferro nessa área após realizado o refinamento da pesquisa realizada no *Web of Science*. Isso pode implicar em uma grande gama de caminhos a serem trilhados no aperfeiçoamento dos materiais já fabricados.

Como já visto nos artigos aqui reportados, os materiais desenvolvidos apresentam boa capacidade de sorção, e são facilmente recuperados devido suas propriedades magnéticas, tendo grande potencial no uso para tratamento de acidentes com derramamento de óleo ou para efluentes que possuem óleo emulsionado.

Embora haja trabalhos que apontam alguns pontos positivos para essa tecnologia em escala laboratorial, é importante que pesquisas sejam feitas em grande escala destacando o custo-benefício para implantação desse processo.

Referências

CALCAGNILE, Paola et al. Magnetically driven floating foams for the removal of oil contaminants from water. **ACS nano**, v. 6, n. 6, p. 5413-5419, 2012.

FARD, Ahmad Kayvani et al. Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents. **Chemical Engineering Journal**, v. 293, p. 90-101, 2016.

FRANCO, Camilo A.; CORTÉS, Farid B.; NASSAR, Nashaat N. Adsorptive removal of oil spill from oil-in-fresh water emulsions by hydrophobic alumina nanoparticles functionalized with petroleum vacuum residue. **Journal of colloid and interface science**, v. 425, p. 168-177, 2014.

GHOBASHY, Mohamed Mohamady; ELHADY, M. A. Radiation crosslinked magnetized wax (PE/Fe₃O₄) nano composite for selective oil adsorption. **Composites Communications**, v. 3, p. 18-22, 2017.

JIANG, Zhe et al. Removal of oil from water using magnetic bicomponent composite nanofibers fabricated by electrospinning. **Composites Part B: Engineering**, v. 77, p. 311-318, 2015.

KUMAR, Amit et al. SPION/ β -cyclodextrin core-shell nanostructures for oil spill remediation and organic pollutant removal from waste water. **Chemical Engineering Journal**, v. 280, p. 175-187, 2015.

LÜ, Ting et al. Thermosensitive poly (N-isopropylacrylamide)-grafted magnetic nanoparticles for efficient treatment of emulsified oily wastewater. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 688, p. 513-520, 2016.

MIRSHAHGHASSEMI, Seyyedali et al. Application of high gradient magnetic separation for oil remediation using polymer-coated magnetic nanoparticles. **Separation and Purification Technology**, v. 179, p. 328-334, 2017.

PAVÍA-SANDERS, Adriana et al. Robust magnetic/polymer hybrid nanoparticles designed for crude oil entrapment and recovery in aqueous environments. **ACS nano**, v. 7, n. 9, p. 7552-7561, 2013.

RAJ, Kovummal Govind; JOY, Pattayil Alias. Coconut shell based activated carbon-iron oxide magnetic nanocomposite for fast and efficient removal of oil spills. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 3, n. 3, p. 2068-2075, 2015.

REDDY, P. Madhusudhana et al. Robust polymer grafted Fe₃O₄ nanospheres for benign removal of oil from water. **Applied Surface Science**, v. 368, p. 27-35, 2016.

SUN, Shouheng et al. Monodisperse MFe₂O₄ (M= Fe, Co, Mn) nanoparticles. **Journal of the American Chemical Society**, v. 126, n. 1, p. 273-279, 2004.

TEIXEIRA, Ana Paula C. et al. Iron: a versatile element to produce materials for environmental applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 9, p. 1579-1593, 2012.

VENGSAKAR, Pranav S.; ROBERTS, Christopher B. Solid-stabilized emulsion formation using stearyl lactylate coated iron oxide nanoparticles. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 10, p. 2627, 2014.

WANG, Haitao et al. Removal of oil droplets from contaminated water using magnetic carbon nanotubes. **Water research**, v. 47, n. 12, p. 4198-4205, 2013.

YOON, Ki Youl et al. Effect of adsorbed amphiphilic copolymers on the interfacial activity of superparamagnetic nanoclusters and the emulsification of oil in water. **Macromolecules**, v. 45, n. 12, p. 5157-5166, 2012.

ZADRAŽIL, Aleš; TOKÁROVÁ, Viola; ŠTĚPÁNEK, František. Remotely triggered release from composite hydrogel sponges. **Soft Matter**, v. 8, n. 6, p. 1811-1816, 2012.