

Hidrogéis compósitos poliméricos com possível aplicação no controle de permeabilidade em reservatórios de petróleo: uma revisão

Polymeric composite hydrogels with potential application in permeability control of oil reservoirs: a review

Kaique A. B. Pereira^{1*}, Priscila F. Oliveira¹ e Claudia R. E. Mansur¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Brasil.

*Autor para correspondência: kaiquebrayner@gmail.com

Recebido em: 09/10/2019, Aceito em: 18/11/2019, Publicado em: 21/12/2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2019.v11.p.107-127>

RESUMO

No cenário energético mundial, as companhias petrolíferas exibem enormes gastos com tecnologias em busca de novas regiões para exploração de petróleo. Portanto, prolongar o tempo de operação nos reservatórios já existentes se tornou uma boa alternativa para atender a demanda de óleo e controlar as adversidades geradas pelas operações de baixa eficiência. Para isso, a técnica de controle de conformidade vem sendo muito discutida no intuito de melhorar a eficiência de varrido e diminuir a água de produção indesejada. Dentre os métodos químicos existentes, os géis poliméricos exibem a capacidade de bloquear as regiões fraturadas ou heterogêneas presentes em reservatórios com problemas de permeabilidade. No entanto, a autonomia destes hidrogéis ainda não foi completamente estabelecida por conta das drásticas condições encontradas nesses reservatórios. Neste contexto, agentes de reforço vêm sendo utilizados para a elaboração de hidrogéis poliméricos compósitos, os quais buscam melhorar as propriedades frente aos sistemas convencionais. Dentre os sistemas de reforço estão: nano-sílica, argila, nanotubos de carbono, cinzas volantes de carvão, partículas de asfaltenos, nanocristais de celulose, óxido de grafeno, dentre outras. No geral, a presença destes componentes contribui de maneira semelhante, portanto deve-se considerar o custo e, principalmente, o uso de materiais ecológicos não prejudiciais ao meio-ambiente.

Palavras-chave: Controle de permeabilidade, reservatórios fraturados e hidrogéis nanocompósitos.

ABSTRACT

In the world energy scenery, the oil companies exhibit huge spending on technologies in search of new oil explorations regions. Therefore, extending the operating time in the existing reservoirs has become a good alternative to comply the oil demand and control the adversities generated by the low efficiency operations. For this, the conformance control techniques have been much discussed in order to improve the efficiency of sweeping and to decrease unwanted water production. Among existing chemical methods, polymer gels exhibit the ability to block as fractured or heterogeneous regions present in reservoirs with permeability problems. However, the autonomy of these hydrogels has not been completely established due to the drastic conditions found in these reservoirs. In this context, reinforcing agents have been used for the elaboration of polymeric composite hydrogels, which seek to benefit the properties compared to conventional systems. Among the reinforcing agents are: nano-silica, clay, carbon nanotubes, coal fly ashes, asphaltene particles, cellulose nano-crystals, graphene oxide, among others. The presence of these components contribute in a similar way, so the cost and especially the use of environmentally friendly materials should be considered.

Keywords: Permeability control, fractured reservoir and nanocomposite hydrogels.

INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás exibe um enorme gasto com tecnologias em busca de regiões promissoras à exploração, como as localizações em fundo de oceanos e regiões polares, pois muitos dos poços têm ultrapassado seu pico de produção que leva a uma diminuição constante no rendimento (TONGWA; BAOJUN, 2015). Além disso, o constante aumento na quantidade de poços maduros que apresentam uma menor taxa de recuperação de óleo tem se tornado uma preocupação, também, devido à geração de um grande volume de água de produção indesejada.

Por este motivo, técnicas de recuperação avançada de petróleo (EOR) vêm sendo cada vez mais requisitado, pois permitem alterar as características de formação da rocha reservatório e o mecanismo de deslocamento de óleo, melhorando a eficiência do varrido e, conseqüentemente, podendo levar a uma maior taxa de recuperação de petróleo (LAKATOS; LAKATOS-SZABO, 2008; BAI *et al.*, 2015).

No entanto, tais técnicas podem interferir na vida útil destes poços através de fraturas nas rochas-reservatório, as quais geram regiões de alta permeabilidade, que promovem a heterogeneidade da região (estratificação geológica, fraturamento induzido, etc), também denominadas *thief zones*. Desta maneira, boa parte do fluido de arraste injetado tende a circular de forma rápida e ineficiente, prejudicando o deslocamento dos hidrocarbonetos de maneira uniforme à região produtora (FENG *et al.*, 2010; CHUNG *et al.*, 2011; BAI *et al.*, 2015; SUN *et al.*, 2016).

Dentre outras adversidades, ocorrem a corrosão de tubulações, as questões ambientais, o encarecimento das operações e, em última instância, o fechamento antecipado de poços que ainda contenham volumes significativos de óleo (CHUNG *et al.*, 2011; EL-KARSANI *et al.*, 2014; GOUDARZI *et al.*, 2015; ABDULBAKI *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2011; ALDHAHERI *et al.*, 2016).

Assim sendo, prolongar o tempo de operação nestes reservatórios se tornou uma grande alternativa para a indústria de petróleo e gás no que se refere aos gastos com exploração de novas regiões, pois os reservatórios já existentes podem, ainda, apresentar quantidades significativas de óleo que não foram extraídos pelos métodos convencionais, o que torna viável a otimização da produção em locais que possuíram um histórico com alto desempenho (LIU *et al.*, 2010; CHUNG *et al.*, 2011; ABDULBAKI *et al.*, 2014; TONGWA; BAOJUN, 2015).

Para isso, diversas tecnologias que buscam a recuperação avançada, otimização de arraste e controle de conformidade são estudadas. Este controle é voltado principalmente para a alteração do perfil rochoso e a diminuição da permeabilidade de rochas, bloqueando a passagem dos fluidos injetados através das regiões altamente permeáveis. Neste contexto, dentre os métodos químicos utilizados, hidrogéis poliméricos vêm sendo objeto de estudo (AL-MUNTASHERI *et al.*, 2009; CHUNG *et al.*, 2011; EL-KARSANI *et al.*, 2014; ABDULBAKI *et al.*, 2014; GOUDARZI *et al.*, 2015; ALDHAHERI *et al.*, 2016).

No entanto, as maiores dificuldades encontradas para a aplicação destes sistemas estão relacionadas com: i) a falta de controle do tempo de gelificação (tempo que o sistema demora para se tornar um gel); ii) a diluição dos sistemas gelificantes; iii) a perda dos componentes por adsorção nas rochas durante a injeção e, principalmente, iv) a desestabilização em condições severas de temperatura e de salinidade, encontradas nos reservatórios (GOUDARZI *et al.*, 2015; TONGWA; BAOJUN, 2015).

Os obstáculos encontrados para o uso destes sistemas gelificantes remetem à constante necessidade de adequação destes materiais à aplicação. Então, hidrogéis nanocompósitos vêm sendo amplamente estudados por apresentarem melhores propriedades em relação aos convencionais, principalmente em relação às estabilidades térmica e mecânica dos sistemas obtidos, que corroboram para a eficiência de bloqueio e recuperação do óleo (SERIGHT *et al.*, 2003; ALDHAHERI *et al.*, 2016; ADEWUNMI *et al.*, 2018; LASHARI *et al.*, 2018).

Por conta da simplicidade do processo, o emprego de hidrogéis tem demonstrado resultados cada vez mais promissores, o que torna crescente os estudos nesta área (ALDHAHERI *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2016).

Para se verificar a relevância do estudo de géis poliméricos no controle de conformidade de reservatórios de petróleo, foi feito um levantamento da quantidade de artigos desenvolvidos por ano, utilizando-se o site de pesquisa Science Direct e, como palavras-chave, “*polymer gels*” e “*conformance control*”. O resultado obtido é representado na Figura 1, onde pode-se verificar o crescente interesse no desenvolvimento de pesquisa neste ramo. A quantidade de artigos encontrados foi de 10.407, dos quais, somente no ano de 2018, foram publicados 1004. Ainda, até o mês de maio de 2019, já haviam sido disponibilizados mais de 300 artigos científicos.

Sendo assim, este trabalho teve o objetivo de realizar um levantamento bibliográfico sobre hidrogéis nanocompósitos poliméricos que possivelmente poderiam ser utilizados no controle de conformidade de reservatórios de petróleo, abordando suas principais características, aplicações e diferenças destes sistemas frente aos convencionais.

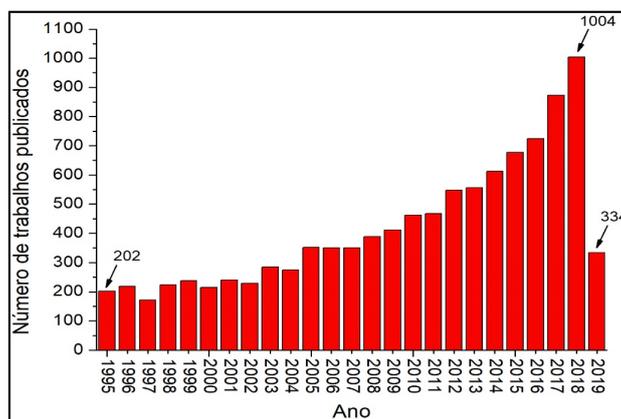


Figura 1. Evolução da quantidade de trabalhos publicados do ano de 1995 a 2019 com as palavras-chave: Polymer gels e Conformance control. Fonte: Science Direct, 2019.

HIDROGÉIS PARA CONTROLE DE CONFORMIDADE EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Durante a última década, os géis têm se mostrado uma categoria de materiais fascinante em razão das diferentes características estruturais adquiridas. Por esse motivo, vem propiciando a produção de trabalhos de pesquisa que envolvem o desenvolvimento, a avaliação e a aplicação nas mais diversas áreas de estudo (ROGOVINA *et al.*, 2008; NAYAK; DAS, 2018).

O gel é um sistema semi-sólido hidrofílico oriundo de polímeros que compõem uma estrutura em forma de rede tridimensional, a qual engloba um constituinte líquido (água), responsável pelo seu caráter elástico (RATHOD; MEHTA, 2015).

No geral, os géis possuem as seguintes propriedades: (1) massa molar infinita; (2) são insolúveis e infusíveis e (3) capacidade de inchar reversivelmente, ou encolher (até 1000 vezes o volume inicial). Tais fatores dependem da constituição polimérica, tipo de matriz, natureza do reticulante, tamanho, solvente utilizado, dentre outros (NAYAK; DAS, 2018).

Em decorrência das suas propriedades, a aplicação como agentes selantes em regiões fraturadas dos reservatórios de petróleo tem sido crescente. O efeito de bloqueio ocorre quando as moléculas poliméricas são interligadas por uma ligação química promovida por um agente reticulante, formando a estrutura tridimensional que permite o material se manter inchado pela presença de água (VARGAS-VASQUES; ROMERO-ZERÓN, 2008).

Portanto, para este fim, os géis costumam conter na composição o polímero com um agente de reticulação, o qual é responsável pelo processo de gelificação. Desta forma, adquirem a capacidade de bloquear regiões através da formação de uma barreira contra fluxo, a qual auxilia o processo de recuperação de óleo ao promover o deslocamento do fluido injetado para outras regiões não percorridas anteriormente, onde existe petróleo disponível, conforme o mecanismo representado na Figura 2 (VARGAS-VASQUES; ROMERO-ZÉRON, 2008; EL-KARSANI *et al.*, 2014; TONGWA; BAOJUN, 2015; ZHU *et al.*, 2017).

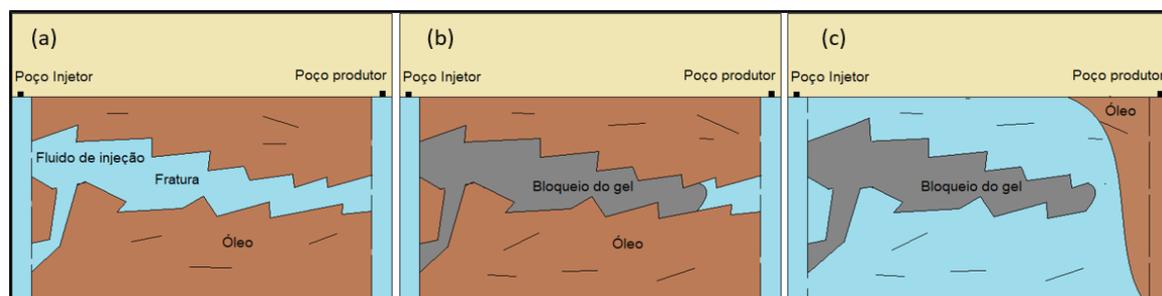


Figura 2. (a) O fluxo do fluido injetado segue por zonas de maior permeabilidade; (b) Formação do gel nos caminhos preferenciais do meio poroso; (c) O fluido passa a percorrer zonas de menor permeabilidade, melhorando a eficiência do varrido. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os polímeros utilizados para compor estes géis precisam, necessariamente, conter em sua estrutura sítios ativos capazes de formar ligações cruzadas com a espécie reticulante. Para isso, são observados os grupos funcionais e/ou, em caso de substâncias iônicas, a carga predominante. As suas origens incluem, principalmente, os naturais e os sintéticos, que podem ser modificados quimicamente com o intuito de aumentar a resistência às condições hostis de reservatório, como temperatura e salinidade, por exemplo (MORADHI-ARAGHI, 2000).

Neste contexto, os polímeros hidrossolúveis são amplamente utilizados, destacando-se aqueles à base de poli(acrilamida) (PAM) e seus derivados, como por exemplo, o copolímero de acrilamida e acrilato (AM-co-AA), mais conhecida como poli(acrilamida parcialmente hidrolisada) (HPAM); o copolímero de acrilamida e ácido 2-acrilamido-2-metilpropano sulfônico (AM-co-AMPS) e, também, o copolímero de acrilamida e tert-butilacrilato (AM-co-tBA), representados na Figura 3. Estes polímeros são usualmente citados pelo fato de formarem ligações cruzadas com alguns agentes reticulantes (AL-MUNTASHERI *et al.*, 2007; TESSAROLLI *et al.*, 2014; SUN *et al.*, 2016).

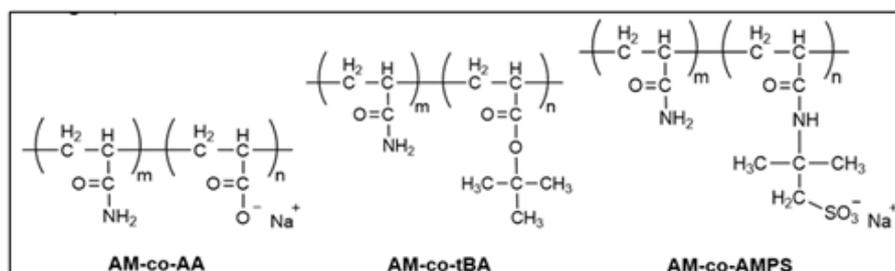


Figura 3. Estrutura química dos copolímeros comumente utilizados na confecção de hidrogéis. Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito aos agentes de reticulação, os de natureza metálica à base de Al^{+3} , Cr^{+3} e Zr^{+4} são mencionados para a formulação de géis com polímeros aniônicos, formando ligações iônicas entre os cátions multivalentes e os sítios negativos dos polímeros (MORADHI-ARAGHI, 2000; AL-MUNTASHERI *et al.*, 2007; HE *et al.*, 2015).

Por exemplo, os compostos à base de cromo (III) costumavam ser utilizados pelo mecanismo de complexação deste metal com os grupos carboxilatos (RCOO⁻) presentes em cadeias poliméricas de poli(acrilamidas hidrolisadas e derivados (SYDANSK, 1988; REDDY *et al.*, 2003; VARGAS-VASQUES; ROMERO-ZERÓN, 2008; KARIMI *et al.*, 2014; BRATTEKAS *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2016). No entanto, as adversidades que apresentavam incluíam, principalmente, a instabilidade térmica, questões ambientais associadas à sua forma oxidada, Cr (VI), e o tempo de gelificação imprevisível destes materiais que dependia do contra-íon associado ao cromo (III) (REDDY *et al.*, 2003). No geral, tais agentes promoviam ligações de baixa estabilidade térmica, o que inviabilizava o uso destas formulações de hidrogéis em reservatórios que apresentavam condições mais drásticas.

Por outro lado, os agentes reticulantes de natureza orgânica envolvem a ocorrência de ligações covalentes com os grupos funcionais do polímero, unindo duas ou mais cadeias poliméricas. Sendo mais estáveis termicamente, foram reportadas aplicações desses sistemas em temperaturas de até 156 °C (JIA *et al.*, 2012; LENJI *et al.*, 2018; JIA *et al.*, 2017). Este comportamento pode ser atribuído à formação de ligações mais resistentes entre os polímeros e os agentes reticulantes (AL-MUNTASHERI *et al.*, 2007; JIA *et al.*, 2012; SENGUPTA *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2017; JIA; CHEN, 2018).

Um dos componentes mais usuais nesta classe é a polietilenoimina (PEI). Ela é considerada um composto ambientalmente correto, pois exibe baixa toxicidade, além de apresentar uma boa estabilidade térmica. O seu mecanismo de reticulação com polímeros contendo o grupo acrilamida na estrutura ocorre por meio da interação do nitrogênio presente na PEI e o grupo carbonila destes pela reação de transamidação, conforme a Figura 4 (JIA *et al.*, 2012).

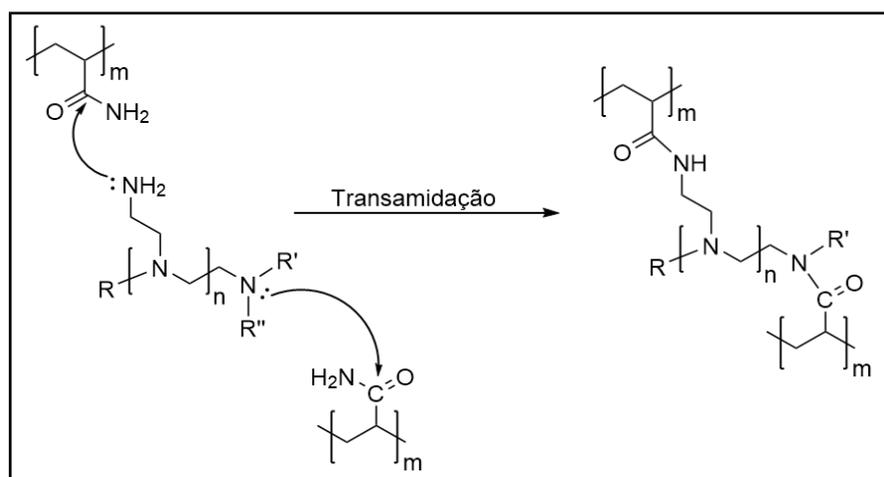


Figura 4. Polímeros contendo o grupo amida reagem com a PEI pelo mecanismo de transamidação. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a formação de hidrogéis nos reservatórios de petróleo, diferentes mecanismos vêm sendo estudados. Em um primeiro tipo podem ser citados aqueles que apresentam o mecanismo de reticulação *in-situ*, os quais foram propostos visando a sua formação no interior do reservatório.

Porém, alguns obstáculos envolveram, principalmente, a falta no controle do tempo de gelificação, a instabilidade, a diluição do agente gelificante no meio atuante e, também, a perda dos componentes por adsorção em rochas porosas (GOUDARZI *et al.*, 2015; TONGWA; BAOJUN, 2015).

Nas últimas décadas, foram implantadas as partículas de géis pré-formados (PPG) em busca de minimizar as incertezas quanto ao tempo de gelificação e perda por adsorção. Neste caso, o polímero já reticulado é injetado em condições de superfície, como uma suspensão de partículas finas e, ao ocorrer o contato com a água presente no reservatório, estas partículas apresentam o inchamento. Desta forma, a concentração dos componentes durante a injeção não seria alterada (GOUDARZI *et al.*, 2015; TONGWA; BAOJUN, 2015).

Apesar das melhorias, a autonomia para a aplicação de hidrogéis no controle de conformidade em reservatórios heterogênicos com condições drásticas ainda não foi completamente obtida. Portanto, no cenário atual, ainda existe a necessidade de se desenvolver tecnologias que melhorem a eficiência deste tipo de tratamento nas variadas regiões de exploração existentes (GOUDARZI *et al.*, 2015; TONGWA; BAOJUN, 2015; ALDHAHERI *et al.*, 2016).

Os obstáculos encontrados na aplicação dos sistemas gelificantes remetem à constante adequação destes materiais ao uso. Para isso, os hidrogéis nanocompósitos vêm sendo amplamente estudados por apresentarem melhores propriedades em relação aos convencionais (ADEWUNMI *et al.*, 2018; LASHARI *et al.*, 2018).

Com o uso dos materiais de reforço, muitos trabalhos têm demonstrado respostas positivas no que diz respeito à estabilidade térmica e às propriedades mecânicas, onde as principais cargas utilizadas para sistemas géis encontradas na literatura foram: nano-sílica (ZHU *et al.*, 2014; SUN *et al.*, 2015; XIN *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2018; LASHARI *et al.*, 2018), argila (OKAY, OPPERMANN, 2007; AALAIE *et al.*, 2008; HELVACIOGLU *et al.*, 2011; TONGWA *et al.*, 2012; YAN *et al.*, 2017), nanotubos de carbono (SATARKAR *et al.*, 2010; EVINGUR; PEKCAN, 2014; SUDHA *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2016; ADEWUNMI *et al.*, 2016), cinzas volantes de carvão (ADEWUNMI *et al.*, 2014; JIANG *et al.*, 2014A; ADEWUNMI *et al.*, 2018; SINGH *et al.*, 2018), asfaltenos (LIU *et al.*, 2015; HASANKHANI *et al.*, 2019), dentre outros (ZHOU *et al.*, 2011; GE *et al.*, 2018). Os principais trabalhos de hidrogéis para aplicação no controle de permeabilidade em reservatórios de petróleo são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Trabalhos voltados ao desenvolvimento de hidrogéis para a aplicação específica em reservatórios de petróleo.

Autores	Agente de reforço
Sun <i>et al.</i> , 2015; Ma <i>et al.</i> , 2017; Chen <i>et al.</i> , 2018; Lashari <i>et al.</i> , 2018; Zareie <i>et al.</i> , 2019	Sílica
Zolfaghari <i>et al.</i> , 2006; Aalaie <i>et al.</i> , 2008; Singh; Mahto, 2017	Na ⁺ -montmorilonita
Tongwa; Baojun, 2015	Ca ⁺² -montmorilonita
Tongwa <i>et al.</i> , 2012	Laponita
Adewunmi <i>et al.</i> , 2014; Adewunmi <i>et al.</i> , 2018; Singh <i>et al.</i> , 2018	CFA
Liu <i>et al.</i> , 2015; Hasankhani <i>et al.</i> , 2019	Partículas de asfaltenos

HIDROGÉIS NANOCOMPÓSITOS DE NANO-SÍLICA

A dispersão de nano-sílica em polímeros hidrossolúveis para formar hidrogéis nanocompósitos tem atraído grande atenção. Esta carga mostrou ser um eficiente agente de reforço estrutural para sistemas poliméricos devido à sua alta capacidade de interação com esses sistemas. Estas cargas atuam efetivamente com polímeros de caráter polar, como a HPAM e seus derivados, favorecendo uma interação com as macromoléculas e, conseqüentemente, conferindo o reforço microestrutural (MAGHZI *et al.*, 2013.; ZHU *et al.*, 2014; XIN *et al.*; 2015.; CHEN *et al.*, 2018; ZAREIE *et al.*, 2019).

A combinação polímero-carga exhibe novas propriedades por conta de fortes interações entre as moléculas poliméricas e a sílica, as quais são atribuídas à formação de ligações hidrogênio entre o grupo carbonila, ou outros grupos polares, e o silanol (SiOH) presente na superfície da nano-partícula (LAI *et al.*, 2016; MA *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2018; HU *et al.*, 2015); LASHARI *et al.*, 2018).

Além de promover o reforço na estrutura do material, a sua presença na matriz polimérica beneficia a adsorção nas rochas de reservatório, resultando de forma mais eficiente nas regiões preenchidas. O mecanismo de ação destes hidrogéis compósitos contam com o melhor efeito de barreira desta nano-carga (CHEN *et al.*, 2018).

No que se refere à desestabilização dos hidrogéis, um dos principais motivos da perda de eficiência de bloqueio é a ocorrência de sinerese, que é comumente observado em condições drásticas de reservatório. Este fenômeno é compreendido pela separação da água e da fase orgânica resultando na perda das propriedades. Assim sendo, inibir este processo se tornou fundamental para estender a duração do tratamento de conformidade.

A ocorrência de sinerese não se relaciona restritamente a hidrogéis orgânicos, mas também inorgânicos. Em menores teores de polímero, o efeito é mais pronunciado, porque está associado com a relaxação do estresse elástico configuracional das macromoléculas (NEERAJ *et al.*, 2017).

Lashari e colaboradores (2018) prepararam sistemas gelificantes a partir de um polímero derivado da poliácridamida, resorcinol/hexametilenotetramina como reticulante químico e SiO₂ como material de reforço. Neste estudo, foi visto que o compósito apresentou melhor resistência térmica, mecânica e promoveu o atraso da sinerese do gel até o período de 90 dias. Além disso, foi destacada a diminuição do tempo de gelificação, ou seja, as soluções viscosas se tornaram géis mais rapidamente.

Estudos realizados por Chen e pesquisadores (2018), demonstraram o efeito do teor de nano-sílica sob a taxa de sinerese em hidrogéis PAM/PEI, onde constatou que a concentração de 1% desta carga levou a ausência de perda de água em até 180 dias, à temperatura de 130 °C. Ainda, corroborou para a diminuição no tempo de gelificação de 27 h para 12 h.

Hu e colaboradores (2017) melhoraram as propriedades reológicas da HPAM através da inserção da nano-sílica, aumentando a viscosidade e o comportamento viscoelástico do sistema obtido. Por exemplo, os módulos elástico (G') e viscoso (G'') aumentaram drasticamente na presença de 0,8% m/v da carga, o que foi atribuído à diminuição do tempo de relaxação molecular devido a interações das macromoléculas com SiO₂.

Ma e contribuintes (2017) compararam o efeito da nano-sílica sob a microestrutura dos géis à base de HPAM e PEI, conseguindo observar através da morfologia do sistema uma boa interação da carga com a matriz polimérica. Ainda, de acordo com imagens obtidas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (SEM), o hidrogel convencional apresentou a estrutura fina, enquanto que o nanocompósito uma estrutura mais densa.

Sun e pesquisadores (2015) prepararam hidrogéis à base de HPAM/acetato de cromo e nano-sílica, observando o efeito deste material sobre as propriedades viscoelásticas. Neste estudo, foi avaliado que a concentração de 10% m/v da nanocarga aumentou significativamente a diferença das componentes elásticas (G') e viscosas (G''). Por exemplo, G' do hidrogel convencional foi deslocado de 7,6 Pa para 1754 Pa, exercendo um importante papel no caráter elástico dos hidrogéis nanocompósitos.

Os íons provenientes dos sais presentes na água de injeção costumam exibir impacto negativo em soluções poliméricas, pois quando aumentam a concentração das espécies iônicas no meio, a repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas é reduzida, levando a um menor volume hidrodinâmico e, conseqüentemente, diminuição da viscosidade.

Hu e contribuintes (2015) observaram que, para uma solução de concentração 0,25% m.v⁻¹ de um polímero hidrofílico derivado de PAM na presença de 0,60% m.v⁻¹ da sílica, ocorreu o aumento significativo da tolerância aos sais, sendo atribuída às ligações polímero-SiO₂ que possuem a capacidade de prevenir a queda da repulsão eletrostática. Ainda, por este motivo, foi visto que G' e G'' aumentaram em relação às soluções na ausência do nanomaterial.

Maurya e colaboradores (2016) também observaram que a presença de nano-partículas de sílica em sistemas de PAM apresentou melhora significativa quanto à resistência ao cisalhamento e à estabilidade da dispersão polimérica, frente à interferência dos sais.

HIDROGÉIS NANOCOMPÓSITOS DE ARGILAS

Outro material muito utilizado como agente de reforço em hidrogéis poliméricos são as argilas da família das esmectitas, composta, basicamente, por grupos silicatos e íons metálicos (AVALOS *et al.*, 2009; HE *et al.*, 2010).

A estrutura destes argilominerais é formada por uma camada central de hidróxido de alumínio entre duas camadas de óxido de silício, cuja carga resultante se torna negativa. Por isso, a junção entre as camadas é feita através do balanceamento de cargas por cátions trocáveis na estrutura (Na⁺, Ca⁺², Mg⁺² e K⁺). Esta interação ocorre por força de Van der Waals e é responsável por manter a interação entre as lamelas (ANIRUDHAN; RAMACHANDRAN, 2015).

Dentre os diversos tipos destes argilominerais, os mais mencionados para aplicação em hidrogéis poliméricos têm sido a bentonita, montmorilonita e a laponita. Este destaque se dá por serem amigáveis no ponto de vista ambiental, existirem de forma abundante na natureza e, também, por possuírem uma estrutura passível de modificações químicas, o que possibilita sua utilização, não só para hidrogéis, mas em diversas áreas (AALAIE *et al.*, 2008; HIBINO, 2010; BELTRAN *et al.*, 2013; HE *et al.*, 2015; ANIRUDHAN; RAMACHADRAN, 2015).

As camadas destes materiais possuem uma considerável superfície de contato, o que torna o seu uso altamente atraente em dispersões poliméricas, gerando nanocompósitos com propriedades mecânicas melhoradas (TONGWA *et al.*, 2012; RAJAEI *et al.*, 2017; MOURYCOVA *et al.*, 2018) e, também, maior estabilidade térmica (LIANG *et al.*, 2000; SINGH; MAHTO, 2017).

O mecanismo de interação da montmorilonita com um polímero hidrofílico é descrito por Aalaie e colaboradores (2012), onde o grupamento acrilamida da poliacrilamida se liga à superfície da carga através de ligações hidrogênio entre os prótons da amida presente no polímero e o oxigênio da argila. Ainda, na presença de agentes reticulantes metálicos, ocorrem interações iônicas meio ao entrelaçamento polimérico.

Liang e colaboradores (2000) usaram argila para preparar hidrogéis à base de poli(N-isopropilacrilamida) que exibiram maior grau de inchamento e melhoria nas propriedades térmicas quando comparados aos sistemas convencionais, o que foi relacionado com a capacidade da argila de inibir a água no interior da estrutura do hidrogel, resultando em maior inchamento.

Além do fator de inchamento, a permanência destes hidrogéis em condições de elevada temperatura é significativa ao melhor desempenho. Por isso, Singh e Mahto (2017) avaliaram a influência da montmorilonita natural em hidrogéis à base de poliacrilamida gelificados com amido, onde puderam constatar através da análise termogravimétrica melhorias nas propriedades térmicas frente aos hidrogéis convencionais.

Este efeito foi relatado em outro estudo, podendo ser justificado pela ocorrência de ligações não apenas com os agentes reticulantes, mas também com as cargas, o que pode ter levado à maior quantidade de interações, conferindo resistência ao material (YEH *et al.*, 2004).

A avaliação dos hidrogéis nanocompósitos de poliacrilamida-argila também foi discutida pela resposta reológica do material, onde a componente elástica (G') apresentou variação com a quantidade de argila utilizada. No estudo de Zolfaghari e colaboradores (2006) foi mostrado que, após se atingir o platô de interações, o gel com maior quantidade da carga exibiu maior valor desse módulo, demonstrando que os pontos de junção das macromoléculas com as argilas promoveram o aumento da componente elástica do sistema.

Rajaei e colaboradores (2017) investigaram a capacidade de adsorção de hidrogéis nanocompósitos à base de PAM/cromo em meio arenítico, onde foi constatado que a concentração de 1000 ppm do argilomineral foi o valor limite para o aumento da capacidade de adsorção, e, acima desta, sugeriu-se ter ocorrido a formação de agregados adsorvidos no arenito, o que diminuiu a superfície de adsorção do hidrogel nanocompósito.

Aalaie e colaboradores (2008) produziram géis com 5000 ppm de AM-co-AMPS, 500 ppm de acetato de cromo e montmorilonita em diferentes teores, observando uma diminuição no tempo de gelificação e o aumento da razão entre os módulos de armazenamento (G') e de perda (G''), conhecida como fator de perda, $\tan(\delta)$.

Neste estudo, o hidrogel nanocompósito com 4000 ppm de argila exibiu $\tan(\delta)$ em torno de 0,12; enquanto que o convencional um valor de 0,03. Os autores justificaram que a adição das nanopartículas aumentou mais significativamente G'' do que G' , indicando que o equilíbrio dinâmico de adsorção/dessorção das nanopartículas pelas cadeias poliméricas aumentou a taxa de dissipação de energia armazenada.

Ainda, Tongwa e colaboradores (2012) demonstraram que o caráter elástico dos géis poliméricos tendeu a aumentar com a inserção de maiores teores da argila Laponita em 0,8% de HPAM, passando de 10 Pa para 14.000 Pa com 10% da carga, destacando-se, ainda, que estes géis foram obtidos exclusivamente pela interação polímero-argila, isto é, com a ausência de agente reticulante químico, o que é um fator interessante no ponto de vista econômico.

HIDROGÉIS NANOCOMPÓSITOS DE NANOTUBOS DE CARBONO

Os nanotubos de carbono (CNTs) vieram à tona no ramo científico nas últimas décadas e o interesse por estes materiais têm crescido significativamente para a aplicação em sistemas poliméricos, estando relacionado com a elevada área de contato, o que os tornam altamente anisotrópicos. Além disso, podem ser orientados nas matrizes poliméricas para se obter respostas elétricas e mecânicas desejadas (LUO *et al.*, 2010; SHARMA *et al.*, 2010; VURAL *et al.*, 2010; EVINGUR; PEKCAN, 2014).

Estes materiais passaram a atrair atenção de pesquisadores devido às propriedades, tais como: a alta rigidez, resistência térmica e mecânica, excelente condutividade elétrica, dentre outras (JIANG *et al.*, 2014b). Por este motivo, apresentam altíssimo valor nos campos da ciência e tecnologia de materiais como a nanotecnologia (DU *et al.*, 2007).

Esta carga é constituída por cilindros estruturalmente compostos por planos de grafite, enrolados, com diâmetro em escala nanométrica. Podem ser obtidos através do rolamento de folhas de grafeno sobre uma estrutura tubular, classificando-se como tubos de camada única (single-walled carbono nanotubes - SWCNT) ou tubos de múltiplas camadas (multi-walled carbono nanotubes - MWCNT) (KIM *et al.*, 2010; MENSAH *et al.*, 2015).

As propriedades adquiridas com o uso dos CNTs estão relacionadas com a capacidade de interação, onde a sua aplicação, assim como de outras cargas de reforço, depende estreitamente da relação do nanoconstituente e o polímero utilizado. Sua superfície, facilmente funcionalizável, permite a melhoria nos quesitos solubilidade e compatibilidade. Por serem materiais que exibem alta força axial, promovem alterações em testes tensionados e, devido a sua flexibilidade, corroboram para mudanças na dureza dos compósitos poliméricos em geral (SHARMA *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2016).

Satarkar e colaboradores (2010) sintetizaram e caracterizaram hidrogéis nanocompósitos de nanotubos de carbono com paredes múltiplas (MWCNTs) com variações de 0-5% do teor da carga, onde constatou o aumento linear do módulo G' . Neste estudo, 0 e 1% do nanomaterial não promoveram melhoria na durabilidade, enquanto que em 5%, aumentaram significativamente a estabilidade.

Sudha e colaboradores (2014) prepararam hidrogéis de PAM/bis-acrilamida na razão 10/1 e MWCNT nas concentrações de 0,2 até 4% m.v⁻¹, deixando as amostras evaporarem à temperatura ambiente para medir o grau de desidratação, onde puderam constatar que o compósito com 4% de MWCNT exibiu menor perda de água na estrutura.

Segundo Vural e colaboradores (2010), as propriedades reológicas de materiais viscoelásticos em suspensão com nanotubos de carbono (CNTs) são indicadores altamente sensíveis a respeito do estado de agregação e dispersão destas cargas, onde a formação da microestrutura interconectada com o polímero promove respostas significativas do comportamento dos fluidos.

Estes mesmos autores avaliaram a influência das cargas CNTs, carvão negro, e grafite na microestrutura de géis poliméricos de poli(etileno glicol) monoacrilato (PEGMA), podendo-se constatar que na presença dos nanotubos, os sistemas exibiram o módulo de armazenamento (G') superior a todos os outros compósitos, o que foi associado à alta superfície de contato destes materiais (VURAL *et al.*, 2010).

Luo e colaboradores (2010) obtiveram hidrogéis com poli(ácido metacrílico) na presença do reticulante N,N'-metilenobisacrilamida e MWCNTs em 0,25 até 2% m.v⁻¹, onde puderam avaliar que a amostra com maior teor do agente de reforço apresentou G' de 12,46 KPa, enquanto que o hidrogel sem MWCNTs G' foi igual a 1,77 KPa.

Chen e colaboradores (2013) desenvolveram hidrogéis à base de poli(N-isopropilacrilamida) (PNIPAAm) e MWCNTs, reticulados com N,N,N',N'-tetrametilenodiamina (TEMED), onde foi detectado que o módulo elástico (G') aumentou significativamente, enquanto o grau de inchamento diminuiu, indicando um acréscimo na força-gel dos materiais.

Li e pesquisadores (2016) demonstraram a influência de cargas MWCNT sobre a viscoelasticidade de hidrogéis de poli(acrilamida) (PAA), podendo-se constatar que estas cargas tiveram uma contribuição significativa no G' , funcionando como agente de reforço na microestrutura do material.

HIDROGÉIS COMPÓSITOS DE CINZAS VOLANTES DE CARVÃO

As cinzas volantes são partículas finas provenientes da combustão do carvão pulverizado em usinas geradoras de energia elétrica. Neste processo, as substâncias minerais associadas ao carvão, como a argila e quartzo, são carregadas na forma de cinza pelos gases de combustão (WANG; WU, 2006; JIANG *et al.*, 2014a).

Desta maneira, as características dessas cinzas estão relacionadas com o teor dos elementos silício, ferro, alumínio e cálcio. Esta composição pode ser variada de acordo com a origem do processo de obtenção, onde sofrem influência, principalmente, do grau de pulverização dado ao carvão, das condições aplicadas e, também, dos aditivos utilizados durante o processo de queima (FAUZI *et al.*, 2016).

Os hidrogéis compósitos formados por cinzas volantes de carvão (CFA) são inovações visando o aumento da eficiência de sistemas gelificantes. Diferentemente de outras cargas, estes podem ser facilmente incorporado em géis poliméricos, estão altamente disponíveis em indústrias termoelétricas e são de baixo custo. Quanto a sua utilização, exerce uma influência significativa sobre a cinética de gelificação, na força e nas propriedades morfológicas dos hidrogéis (ADEWUNMI *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2018).

Este comportamento está correlacionado com o fato da CFA conter na composição óxidos metálicos de forma que a sílica e a alumina estão em maiores proporções. Para Adewunmi e colaboradores (2016) a presença destas substâncias em concentrações elevadas promove mudanças na viscoelasticidade e na eficiência de gelificação de sistemas géis PAA/PEI. Por exemplo, o G' de amostras com 0,5% até 2,0% m.m⁻¹ de CFA na composição foi superior a aproximadamente 100 vezes dos hidrogéis convencionais (sem CFA).

Para investigar a influência da CFA na força dos hidrogéis compósitos, Adewunmi e colaboradores (2014) elaboraram géis de PAM/PEI contendo diferentes concentrações desta carga. Na reologia, por meio do teste reológico de cisalhamento oscilatório em modo frequência, após 1 mês de envelhecimento, foi observado o crescente aumento do módulo elástico (G') dos hidrogéis com maiores teores da carga, onde 2,0% apresentou o melhor resultado.

Como mencionado, uma grande dificuldade encontrada nos géis convencionais é que são, comumente, termicamente instáveis em condições extremas de temperatura. Por este motivo, pesquisadores avaliaram as propriedades térmicas de sistemas gelificantes PAM/PEI contendo ou não CFA, onde foi observado que a amostra com 2,0% da carga na composição não teve a perda mássica superior a 30% da massa inicial. Este fato foi atribuído à capacidade destes materiais de melhorar a interação entre as macromoléculas poliméricas (ADEWUNMI *et al.*, 2016).

Em um estudo posterior, através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (SEM), o mesmo grupo de pesquisadores visualizou o aumento da força em maiores concentrações da carga através da morfologia superficial dos hidrogéis, onde através da análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura visualizou uma crescente densidade de reticulação, observada através da diminuição de poros na superfície (ADEWUNMI *et al.*, 2017).

OUTROS HIDROGÉIS COMPÓSITOS

Dentre outros tipos de compósitos criados na última década estão os géis poliméricos com partículas de asfaltenos (GAP), propostos para desempenhar, exclusivamente, o controle de conformidade em reservatórios de petróleo. Tal destaque se deu pela alta capacidade de vedação, a estabilidade térmica e resistência aos sais promovidas aos hidrogéis. Portanto, podem ser empregados nas diferentes condições encontradas (LIU *et al.*, 2015).

Neste caso, estas partículas são formadas por frações de moléculas aromáticas e alifáticas extraídas do petróleo bruto por técnicas de solubilidades, onde são pouco solúveis em solventes n-alcenos de baixo número de carbono, mas solúveis em hidrocarbonetos aromáticos, tais como tolueno e benzeno (ZUO *et al.*, 2019). Suas propriedades e comportamento ainda não são completamente elucidadas, no entanto apresentam uma alta capacidade de agregação que é justificada pela diversidade de interações que suas estruturas permitem realizar, tais como: ligações hidrogênio, ligações eletrostáticas, ligações Van der Waals, interações π - π entre núcleos aromáticos, dentre outras (QUINTERO *et al.*, 2007).

Hasankhani e colaboradores (2019) mencionaram que a alta capacidade de vedação está associada à coerência das partículas de asfaltenos dentro do gel polimérico com as paredes do reservatório fraturado.

Outras cargas utilizadas para a melhoria de propriedades em matrizes de géis poliméricos são os nano-cristais de celulose (CNCs). O seu destaque está relacionado com a alta superfície de contato ($\sim 700 \text{ m}^2/\text{g}$), baixa densidade, considerável módulo elástico (140 GPa) e capacidade de interagir via ponte de hidrogênio e ligações covalentes com as cadeias poliméricas.

Zhou e colaboradores (2011) prepararam hidrogéis à base de PAM e N,N'-metilenobisacrilamida (NMBA) via polimerização *in-situ*, contendo diferentes composições de CNCs, onde a adição de pequenas quantidades desta carga (1% m.m⁻¹) aumentou significativamente o G' até o platô de equilíbrio. Além disso, foi visto que a adição progressiva de 0 até 6,7% m.m⁻¹ deste nano-material nos hidrogéis, deslocou a temperatura de transição vítrea (T_g) de 111,2 para 129,1 °C, o que foi justificado pelas fortes interações PAM-CNCs que limitaram o movimento das macromoléculas.

Kumar e contribuintes (2018) elaboraram hidrogéis à base de PAM, carboximetilcelulose, CNCs e óxido de grafeno (GO), com o intuito de avaliar o efeito sinérgico destes nano-materiais, pois a base polimérica tem interações favoráveis com GO e, também, forma interações interfaciais com CNC por conta da hidrofilicidade. Portanto, o caráter elástico dos nanocompósitos foi comparado ao hidrogel convencional, observando que para a concentração fixa de 1,5% m.v⁻¹ de GO, conforme se aumentava o teor de CNC, maior foi o G' obtido. Não sendo observado este efeito para as amostras cuja carga atuou de maneira individual, comprovando a sinergia entre as cargas.

CONCLUSÕES

O controle de conformidade em reservatórios de petróleo tem mostrado ser uma ferramenta essencial para a eficiência de varrido e a diminuição da água de produção. Para isso, os hidrogéis poliméricos vêm sendo avaliados de forma a atuarem como agentes selantes de regiões de alta permeabilidade, o que tem demonstrado resultados cada vez mais promissores. Ainda, pode-se notar a evolução na quantidade de estudos sobre géis para tal aplicação, indicando a importância de se realizar pesquisas nesta área, buscando soluções e inovações.

No entanto, por conta das adversidades encontradas pelos hidrogéis convencionais, a sua utilização remete à constante necessidade de adequação às condições hostis encontradas nos reservatórios. Com isso, os hidrogéis nanocompósitos vêm sendo amplamente estudados por apresentarem melhores propriedades em relação aos convencionais.

O uso das cargas de reforço em géis poliméricos, tem sido demonstrado em muitos trabalhos na literatura com o objetivo de melhorar as propriedades dos sistemas obtidos, principalmente no que tange às propriedades térmicas e mecânicas. Dentre elas, a nano-sílica provou ter alta capacidade de interação com os polímeros de caráter hidrofílico, promovendo o reforço na estrutura destes materiais e, assim, alterando as características reológicas, a resistência aos sais, a ocorrência do fenômeno de sinerese e, sobretudo, a capacidade adsorção com o meio rochoso.

As demais cargas mencionadas também tiveram a atuação de maneira semelhante, visto que dependem da compatibilidade entre polímero-carga. No geral, para o sucesso na escolha, deve-se levar em consideração o custo de aquisição e, principalmente, sustentabilidade e impactos positivos e negativos da utilização frente ao meio ambiente. Desta forma, as cargas a serem destacadas seriam a CFA, argilas e, em último caso, as nano-sílicas, pois oferecem baixo impacto ecológico e o preço relativamente menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALAIE, J; VASHEGHANI-FARAHANI, E; RAHMATPOUR, A. Effect of montmorillonite on gelation and swelling behavior of sulfonated polyacrylamide nanocomposite hydrogels in electrolyte solutions. **European Polymer Journal**, **44**(7), 2024-2031, 2008. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.04.031. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305708002000>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- AALAIE, J; VASHEGHANI-FARAHANI, E. Swelling behavior of sulfonated polyacrylamide nanocomposite hydrogels in electrolyte solutions: comparison of theoretical and experimental results. **Iran Polymer journal**, **21**(3), 175-183, 2012. DOI: 10.1007/s13726-012-0016-3. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13726-012-0016-3>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- ABDULBAKI, M; HUH, C; SEPEHRNOORI, K.; DELSHAD, M; VARAVEI, A. A critical review on use of polymer microgels for conformance control purposes. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Austin, **122**(1), 741-753, 2014. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.06.034. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410514002307>>. Acesso em: 20 jan. 2019.
- ADEWUNMI, AA.; ISMAIL, S; SULTAN, AS. Study on Strength and Gelation Time of Polyacrylamide/Polyethyleneimine Composite Gels Reinforced with Coal Fly Ash for Water Shut-Off Treatment. **Journal of Applied Polymer Science**, **132**(5), 1-8, 2014. DOI: 10.1002/app.41392. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.41392>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- ADEWUNMI, AA.; ISMAIL, S; SULTAN, AS. Carbon Nanotubes (CNTs) Nanocomposite Developed for various Applications: A Critical Review. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, **26**(4), 717-737, 2016. DOI: 10.1007/s10904-016-0379-6. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10904-016-0379-6>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- ADEWUNMI, AA.; ISMAIL, S; OWOLABI, TO.; SULTAN, AS.; OLATUNJI, SO.; AHMAD, Z. Modeling the thermal behavior of coal fly ash based polymer gel system for water reduction in oil and gas wells. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, **157**, 430-440, 2017. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.07.019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041051730579X>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- ADEWUNMI, AA.; ISMAIL, S; SULTAN, AS. Crosslinked Polyacrylamide Composite Hydrogels Impregnated with Fly Ash: Synthesis, Characterization and Their Application as Fractures Sealant for High Water Producing Zones in Oil and Gas Wells. **Journal of Polymers and the Environment**, **12**, 1-13, 2018. DOI: 10.1007/s10924-018-1204-9. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-018-1204-9>>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- ALDHAHERI, MN.; WEI, M; BAI, B. Comprehensive Guidelines for the application of In-Situ Polymer Gels for Injection Well Conformance Improvement Based on Field Projects. **SPE Journal**, 1-27, 2016. DOI: 10.2118/179575-MS. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-179575-MS>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- AL-MUNTASHERI, GA.; NASR-EL-DIN, HA.; HUSSEIN, IAA rheological investigation of a high temperature organic gel used for water shut-off treatments. **Journal of Petroleum and Engineering**, **59**(1), 73-83, 2007. DOI: 10.1016/j.petrol.2007.02.010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041050700037X>>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- AL-MUNTASHERI, GA.; NASR-EL-DIN, HA.; AL-NOAIMI, K; ZITHA, PLJ. A Study of polyacrylamide-based gels crosslinked with polyethyleneimine. **SPE Journal** **14**(2), 245-251, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2118/105925-PA>. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-105925-PA>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- ANIRUDHAN, TS.; RAMACHANDRAN. Adsorptive removal of basic dyes from aqueous solutions by surfactant modified bentonite clay (organoclay): Kinetic and competitive adsorption isotherm. **Process Safety and Environmental Protection**, **95**, 215-225, 2015. DOI: 10.1016/j.psep.2015.03.003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582015000518>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- AVALOS, F; ORTIZ, JC; ZITZUMBO, R; LÓPES-MANCHADO, MA.; VERDEJO, R; ARROYO, M. Phosphonium salt intercalated montmorillonites. **Applied Clay Science** **43**(1), 27-32, 2009. DOI: 10.1016/j.clay.2008.07.008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913170800149X>>. Acesso em: 19 jan. 2019.
- BAI, B; ZHOU, J; YIN, M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. **Petroleum Exploration and Development** **42**(4), 525-532, 2015. DOI:10.1016/S1876-3804(15)30045-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380415300458>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

- BRATTEKAS, B; GRAUE, A; SERIGHT, RS. Low-salinity Chase Waterfloods Improve Performance of Cr(III)-Acetate Hydrolyzed Polyacrylamide Gel in Fractured Cores. **SPE Reservoir Evaluation and Engineering** 19(2), 331-339, 2016. DOI: 10.2118/173749-PA. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-173749-PA>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- BELTRÁN, MI.; BENAVENTE, V; MARCHANTE, V; MARCILLA. The influence of surfactant loading level in a montmorillonite on the thermal, mechanical and rheological properties of EVA nanocomposites. **Applied Clay Science** 83, 153-161, 2013. DOI: 10.1016/j.clay.2013.08.028. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131713002718>>. Acesso em 24 jan. 2019.
- CHUNG, T; BAE, W; NGUYEN, NTB.; DANG, CTQ.; LEE, W; JUNG, B. A review of polymer conformance treatment: a successful guideline for water control in mature fields. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects** 34(2), 122-133, 2011. DOI: 10.1080/15567030903567683. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030903567683>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- CHEN, Y; TSOU, P; LO, J, TSAI, H.; WANG, Y. Poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels with interpenetrating multiwalled carbon nanotubes for cell sheet engineering. **Biomaterials** 34(30), 7328-7334, 2013. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2013.06.017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961213007035>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- CHEN, L; WANG, J; YU, L; ZHANG, Q; FU, M.; ZHAO, Z; ZUO, J. Experimental investigation on nano-silica reinforcing PAM/PEI hydrogel for water shutoff treatment. **Energy Fuels** 33(1), 1-16, 2018. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b00840. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.8b00840>>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- DU, J; BAI, J; CHENG, H. The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites. **Express Polymer Letters** 1(5), 253-273, 2007. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2007.39. Disponível em: <www.expresspolymlett.com/letolt.php?file=EPL-0000158&mi=dc>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- EL-KARSANI, KSM.; AL-MUNTASHERI, GA.; HUSSEIN, I. A. Polymer Systems for Water Shutoff and Profile Modification: A Review Over the Last Decade. **SPE Journal** 19(1), 135-149, 2014. DOI: 10.2118/163100-PA. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-163100-PA>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- EVINGUR, GA.; PEKCAN, O. Effect of multiwalled carbon nanotube (MWNT) on behavior of swelling of polyacrylamide-MWNT composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [S.I.] 33(13), 1119-1206, 2014. DOI: 10.1177/0731684414526438. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0731684414526438>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- FAUZI, A.; NURUDDIN, MF; MALKAWI, AB; ABDULLAH, MMAB. Study of Fly ash Characterization as a Cementitious Material. **Procedia Engineering** 148, 487-493, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.535. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816310025>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- FENG, Q; WANG, S; GAO, G; LI, C. A new approach to thief zone identification based on interference test. **Journal of Petroleum Science and Engineering** 75(1), 13-18, 2010. DOI: 10.1016/j.petrol.2010.10.005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410510001944>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- GOUDARZI, A; ZHANG, H; VARAVEI, A; TAKSAUDOM, P.; HU, Y.; DELSHAD, M; BAI, B; SEPEHRNOORI, K. A laboratory and simulation study of preformed particle gels for water conformance control. **Fuel** 140, 502-513, 2015. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.081. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114009508>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- GE, S; LIU, Q; LI, M; LIU, J; LU, H; LI, F; ZHANG, S; SUN, Q; XIONG, L. Enhanced mechanical properties and gelling ability of gelatin hydrogels reinforced with whiskers. **Food Hydrocolloids** 75, 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.09.023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X17304289>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- HASANKHANI, GM; MADANI, M; ESMAEILZADEH, F; MOWLA, D. Experimental investigation of asphaltene-augmented gel polymer performance for water shut-off and enhancing oil recovery in fractured oil reservoirs. **Journal of Molecular Liquids** 275, 654-666, 2019. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732218337188>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

- HE, H; MA, Y; ZHU, J; YUAN, P; QING, Y. Organoclays prepared from montmorillonites with different cation exchange capacity and surfactant configuration. **Applied Clay Science** **48**(1), 67-72, 2010. DOI: 10.1016/j.clay.2009.11.024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131709003202>>. Acesso em: 24 jan. 2019.
- HE, H; WANG, Y; SUN, X. Development and evaluation of organic/inorganic combined gel for conformance control in high temperature and high salinity reservoirs. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology** **5**(2), 211-217, 2015. DOI: 10.1007/s13202-014-0127-9. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-014-0127-9>>. Acesso em 28 jan. 2019.
- HELVACIOGLU, E; AYDIN, V; NUGAY, T; NUGAY N; ULUOCAK, BG; SEN, S. High strength poly(acrylamide)-clay hydrogels. **Journal of Polymer Research** **18**(6), 2341-2350, 2011. DOI: 10.1007/s10965-011-9647-x. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10965-011-9647-x>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- HIBINO, T. New nanocomposite hydrogels containing layered double hydroxide. **Applied Clay Science** **50**(2), 282-287, 2010. DOI: 10.1016/j.clay.2010.08.008. Disponível em: <<https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/new-nanocomposite-hydrogels-containing-layered-double-hydroxide-0tDIRA2SIj>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- HU, Z; HARUNA, M; GAO, H; NOURAFKAN, E; WEN, D. Rheological Properties of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide seeded by Nanoparticles. **Industrial and Engineering Chemistry Research** **56**(12), 3456-3463, 2017. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b05036. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.6b05036>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- HU, X; KE, Y; ZHAO, Y; LU, S; YU, C; PENG, F. Synthesis and characterization of a β -cyclodextrin modified polyacrylamide and its rheological properties by hybrid with silica nanoparticles. **Colloids and Surfaces A** **548**(7), 673-682, 2015. DOI: 10.1002/star.201500022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/star.201500022>>. Acesso em 25 jan. 2019.
- JIA, H; ZHAO, J; JIN, F; PU, W; LI, Y; LI, K; LI, J. New insights into the gelation behavior of polyethyleneimine cross-linking partially hydrolyzed polyacrylamide gels. **Industrial & Engineering Chemistry Research** **51**(38), 12155-12166, 2012. DOI: 10.1021/ie301818f. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie301818f>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- JIA, H; CHEN, H; GUO, S. Fluid loss control mechanism of using polymer gel pill based on multi-crosslinking during overbalanced well workover and completion. **Fuel** **210**, 207-216, 2017. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.032. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236117310177>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- JIA, H; CHEN, H. Using DSC technique to investigate the non-isothermal gelation kinetics of the multi-crosslinked chromium acetate(Cr^{3+})-Polyethyleneimine (PEI)-polymer gel sealant. **Journal of Petroleum Science and Engineering** **165**(1), 105-113, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.082. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518300949>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- JIANG, L; LIU, P. Design of Magnetic Attapulgit/Fly ash/Poly(acrylic acid) Ternary Nanocomposite Hydrogels and Performance Evaluation as Selective Adsorbent for Pb^{2+} Ion. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering** **2**(7), 1785-1794, 2014a. DOI: 10.1021/sc500031z. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/sc500031z>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- JIANG, Q; WANG, X; ZHU, Y; HUI, D; QIU, Y. Mechanical, electrical and thermal properties of aligned carbon nanotube/polyimide composites. **Composites Part B: Engineering** **56**, 408-412, 2014b. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.064. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813004721>>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- KARIMI, S; ESMAEILZADEH, F; MOWLA, D. Identification and selection of a stable gel polymer to control or reduce water production in gas condensate fields. **Journal of Natural Gas Science and Engineering** **21**, 940-950, 2014. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.10.026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510014003254>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- KIM, H; ABDALA, AA.; MACOSKO, CW. Graphene/Polymer Nanocomposites. **Macromolecules** **43**(16), 6515-6530, 2010. DOI: 10.1021/ma100572e. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma100572e>>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- KUMAR, A; RAO, KM; HAN, SS. Mechanically viscoelastic nanoreinforced hybrid hydrogels composed of polyacrylamide, sodium carboxymethylcellulose, graphene oxide, and cellulose nanocrystals. **Carbohydrate Polymers** **193**, 228-238, 2018. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861718303722>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

- LAI, N; ZHOU, N; GUO, X; XU, Q. Shear Resistance Properties of Modified Nano-SiO₂/AA/AM Copolymer Oil Displacement Agent. **Energies** 9(12), 1-13, 2016. DOI: 10.3390/en9121037. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/311548122_Shear_Resistance_Properties_of_Modified_Nano-SiO₂AAAM_Copolymer_Oil_Displacement_Agent](https://www.researchgate.net/publication/311548122_Shear_Resistance_Properties_of_Modified_Nano-SiO2AAAM_Copolymer_Oil_Displacement_Agent)>. Acesso em 25 jan. 2019.
- LAKATOS, I; LAKATOS-SZABÓ, J. Global oil demand and role of chemical EOR methods in the 21st century. **International Journal of Oil, Gas and Coal Technology**, 1(1-2), 46-64, 2008. DOI: 10.1504/IJOGCT.2008.016731. Disponível em: <<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJOGCT.2008.016731>>. Acesso em: 04 fev. 2019.
- LASHARI, ZA; YANG, H; ZHU, Z; TANG, X; CAO, C.; IQBAL, MW; KANG, W. Experimental research of high strength thermally stable organic composite polymer gel. **Journal of Molecular Liquids** 263(1), 118-124, 2018. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.04.146. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732218303702>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LENJI, MCA.; HAGHSHENASFARD, M; SEFTI, M; SALEHI, MB; MOGHADAM, AM. Numerical modeling and experimental investigation of inorganic and organic crosslinkers effects on polymer gel properties. **Journal of Petroleum Science and Engineering** 160, 160-169, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.10.045. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517308240>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LI, Z; TANG, M; DAI, J; WANG, T; BAI, R. Effect of multiwalled carbon nanotube-grafted polymer brushes on the mechanical and swelling properties of polyacrylamide composite hydrogels. **Polymer** 85, 67-76, 2016. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.01.025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386116300258>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LIANG, L; LIU, J; GONG, X. Thermosensitive Poly(N-isopropylacrylamide)-Clay Nanocomposites with Enhanced Temperature Response. **Langmuir**, Washington, 16(25), 9895-9899, 2000. DOI: 10.1021/la000270v. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la000270v>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LIU, Y; BAI, B; WANG, Y. Applied Technologies and Prospects of Conformance Control Treatments in China. **Revista IFP Energies nouvelles** 65(6), 859-878, 2010. DOI: 10.2516/ogst/2009057. Disponível em: <<https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2010/06/ogst09046.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LIU, G; JIANG, H; LI, J; WANG, M; CHEN, F; DING, S. Evaluation of the performance of polymer gels mixed with asphalt particle as a novel composite profile control system. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 26, 309-314, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.11.044. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X14006649>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- LUO, Y; XU, F; FENG, Q; CHEN, Y; MA, C. Preparation and Characterization of PMAA/MWCNTs Nano-hybrid Hydrogels with Improved Mechanical Properties. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials** 92(1), 243-254, 2010. DOI: 10.1002/jbm.b.31511. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19810115>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- MA, L; WANG, S; LONG, Y; ZHU, C; YANG, H; YANG, T; LIU, X; LI, X; BAI, B; KANG, W. Novel environmentally benign hydrogel: nano-silica hybrid hydrolyzed polyacrylamide/polyethyleneimine gel system for conformance improvement in high temperature high salinity reservoir. **Society of Petroleum Engineers**, Abu Dhabi, 2017. DOI: 10.2118/188654-MS. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-188654-MS>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- MAGHZI, A.; MOHEBBI, A; KHARRAT, R; GHAZANFARI, MH. Na Experimental Investigation of Silica Nanoparticles Effect on the Rheological Behavior of Polyacrylamide Solution to Enhanced Heavy Oil Recovery. **Petroleum Science and Technology** 31(5), 500-508, 2013. DOI: 10.1080/10916466.2010.518191. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2010.518191>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- MAURYA, NK; MANDAL, A. Studies on behavior of suspension of silica nanoparticle in aqueous polyacrylamide solution for application in enhanced oil recovery. **Petroleum Science and Technology** 34(5), 429-436, 2016. DOI: 10.1080/10916466.2016.1145693. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10916466.2016.1145693>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- MENSAH, B; KIM, HG; LEE, J-H; AREPALLI, S; NAH, C. Carbon Nanotube-reinforced elastomeric nanocomposites: a review. **International Journal of Smart and Nano Materials** 6(4), 211-238, 2015. DOI: 10.1080/19475411.2015.1121632. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475411.2015.1121632>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

- MOURYCOVA, J; DATTA, KKR; PROCHAZKOVAA; PLOTENA, M; ENEV, V; SMILEK, J; MASILKO, J; PEKAR, M. Facile synthesis and rheological characterization of nanocomposite hyaluronan-organoclay hydrogels. **International Journal of Biological Macromolecules** **111**, 680-684, 2018. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.068. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813017343404>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- MORADI-ARAGHI, A. A review of thermally stable gels for fluid diversion in petroleum production. **Journal of Petroleum Science and Engineering** **26**(1-4), 1-10, 2000. DOI: 10.1016/S0920-4105(00)00015-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410500000152>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- NAYAK, AK; DAS, B. Introduction to polymeric gels. **Polymeric Gels**, 3-27, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-08-102179-8.00001-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021798000016>>. Acesso em: 25 jan. 2018.
- NEERAJ, B; TANVI, B; SWATI, C. Topical Gel:-A review. **World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** **6**(4), 303-313, 2017. DOI: 10.20959/wjpps20174-8858. Disponível em: <<http://www.wjpps.com/download/article/1490950634.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- OKAY, O; OPPERMANN, W. Polyacrylamide-Clay Nanocomposite Hydrogels: Rheological and Light Scattering Characterization. **Macromolecules** **40**(9), 3378-3387, 2007. DOI: 10.1021/ma062929v. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ma062929v>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- QUINTERO, LCN; SEIDL, PR; TASIC, L; LEAL, KZ; MENEZES, SMC; NUNES, ECA. Caracterização de subfrações de asfaltenos de resíduos de vácuo obtidas usando misturas heptano-tolueno (HEPTOL). **4º PDPETRO**, Campinas, 2007. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_4_1_0187-1.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- RAJAEI, S; SALEHI, MB; MOGHADAM, AM; SEFTI, MV; MOHAMMADI, S. Nanocomposite hydrogels adsorption: Experimental investigation and performance on sandstone core. **Journal of Petroleum Science** **159**, 934-941, 2017. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.034. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410516308968>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- RATHOD, H; MEHTA, D. A Review on Pharmaceutical Gel. **International Journal of Pharmaceutical Sciences** **1**(1), 33-47, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/286451492_A_Review_on_Pharmaceutical_Gel>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- REDDY, BR; EOFF, L; DALRYMPLE, ED; BLACK, K; BROWN, D; RIETJENS, M. A Natural Polymer-Based Cross-Linker System for Conformance Gel Systems. **Society of Petroleum Engineers** **8**(2), 99-106, 2003. DOI: 10.2118/84937-PA. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-84937-PA>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- ROGOVINA, LZ; VASILEV, VG; BRAUDO, EE. Definition of the Concept of Polymer Gel. **Polymer Science Series C** **50**(1), 85-92, 2008. DOI: 10.1134/S1811238208010050. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1134/S1811238208010050>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- SATARKAR, NS; JOHNSON, D; MARRS, B; ANDREWS, R; POH, C; GHARAI BEH, B; SAITO, K; ANDERSON, KW; HILT, JZ. Hydrogel-MWCNT Nanocomposites: Synthesis, Characterization, and Heating with Radiofrequency fields. **Journal of Applied Polymer Science** **117**(3), 1813-1819, 2010. DOI: 10.1002/app.32138. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.32138>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- SCIENCE DIRECT. **Polymer Gel Conformance Control**, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/search/advanced?qs=polymer%20gel%3B%20conformance%20control&show=25&sortBy=relevance>>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- SENGUPTA, B; SHARMA, VP; UDAYABHANU, G. In-situ gelation studies of an eco-friendly cross-linked polymer system for water shut-off at high temperatures. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental effects** **36**(13), 1445-1467, 2014. DOI: 10.1080/15567036.2011.553661. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567036.2011.553661>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- SERIGHT, RS; LIANG, J; LINDQUIST, WB; DUNSMUIR, JH. Use of X-ray computed microtomography to understand why gels reduce relative permeability to water more than that to oil. **Journal of Petroleum Science and Engineering** **39**(3-4), 217-230, 2003. DOI: 10.1016/S0920-4105(03)00064-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410503000640>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

- SHARMA, A; TRIPATHI, B; VIJAY, YK. Dramatic Improvement in properties of magnetically aligned CNT/polymer nanocomposites. **Journal of Membrane Science** **361**(1), 89-95, 2010. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.06.005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223485977_Dramatic_Improvement_in_properties_of_magnetically_aligned_CNTpolymer_nanocomposites>. Acesso em 28 jan. 2019.
- SINGH, R; MAHTO, V. Synthesis, characterization and evaluation of polyacrylamide graft starch/clay nanocomposite hydrogel system for enhanced oil recovery. **Petroleum Science** **14**(7), 765-779, 2017. DOI: 10.1007/s12182-017-0185-y. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12182-017-0185-y>>. Acesso em 28 jan. 2019.
- SINGH, R; MAHTO, V; VUTHALURU, H. Development of a novel fly ash-polyacrylamide nanocomposite gel system for improved recovery of oil in heterogeneous reservoir. **Journal of Petroleum Science and Engineering** **165**, 325-331, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.02.038. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410516308579>>. Acesso em 28 jan. 2019.
- SUDHA, BMM; KUMAR, D. Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on the conductivity and Swelling Properties of Porous Polyacrylamide Hydrogels. **Particulate Science and Technology** **32**(6), 624-631, 2014. DOI: 10.1080/02726351.2014.948974. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726351.2014.948974>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- SUN, F; LIN, M; DONG, Z. ZHANG, J; WANG, C; WANG, S; SONG, F. Nanosilica-induced high mechanical strength of nanocomposite hydrogel for killing fluids. **Journal of Colloid and Interface Science** **458**, 45-52, 2015. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.07.006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979715300254>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- SUN, F; LIN, M; DONG, Z; ZHU, D; WANG, SL; YANG, J. Effect of Composition of HPAM/Chromium (III) Acetate Gels on Delayed Gelation Time. **Journal of Dispersion Science and Technology** **37**(6), 753-759, 2016. DOI: 10.1080/01932691.2015.1041034. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01932691.2015.1041034>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- SYDANSK, RD. A new conformance-improvement-treatment chromium(III) gel technology. **Society of Petroleum Engineers**, Oklahoma, 1988. DOI: 10.2118/17329-MS. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-17329-MS>>. Acesso em: 24 fev. 2018.
- TESSAROLLI, FGC; QUEIRÓS, YGC; MANSUR, CRE. Evaluation of pH-Sensitive hydrogels to control the permeability anisotropy of oil reservoirs. **Journal of Applied Polymer Science** **131**(17), 40665-40676, 2014. DOI: 10.1002/app.40665. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.40665>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- TONGWA, P; NYGAARD, R; BAI, B. Evaluation of a nanocomposite hydrogel for water shut-off in enhanced oil recovery applications: design, synthesis, and characterization. **Journal of Applied Polymer Science** **128**(1), 787-794, 2012. DOI: 10.1002/app.38258. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.38258>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- TONGWA, P; BAOJUN, B. A more superior preformed particle gel with potential application for conformance control in mature oilfields. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology** **5**(2), 201-210, 2015. DOI: 10.1007/s13202-014-0136-8. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-014-0136-8>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- VARGAS, VASQUEZ, SM; ROMERO-ZERÓN. A review of the partly hydrolyzed polyacrylamide Cr(III) acetate polymer gels. **Journal Petroleum Science and Technology** **26**(4), 481-498, 2008. DOI: 10.1080/10916460701204594. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916460701204594>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- VURAL, S; DIKOVICS, KB; KALYON, DM. Cross-link density, viscoelasticity and swelling of hydrogels as affected by dispersion of multi-walled carbon nanotubes. **Soft Matter** **16**, 3870-3875, 2010. DOI: 10.1039/c0sm00099j. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/sm/c0sm00099j#divAbstract>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- WANG, S.; WU, H. Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. **Journal of Hazardous Materials B136**, Austrália, **136**(3), 482-501, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.01.067. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406000690?via%3Dihub>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

- YAN, F; ZHANG, X; REN, H; MENG, X; QIU, D. Reinforcement of polyacrylamide hydrogel with patched laponite-polymer composite particles. **Colloids and Surfaces A** **529**, 268-273, 2017. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.06.005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775717305666?via%3Dihub>>. Acesso em 28 jan. 2019.
- YEH, J; LIOU, S; CHANG, Y. Polyacrylamide-Clay Nanocomposite Materials Prepared by Photopolymerization with Acrylamide as an Intercalating Agent. **Journal of Applied Polymer Science** **91**(6), 3489-3496, 2004. DOI: 10.1002/app.13555. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/230240249_Polyacrylamide-clay_nanocomposite_materials_prepared_by_photopolymerization_with_acrylamide_as_an_intercalating_agent>. Acesso em 28 jan. 2019.
- XIN, H; AO, D.; WANG, X; ZHU, Y; ZHANG, J; TY. Synthesis, characterization, and properties of copolymers of acrylamide with sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate with nano silica structure. **Colloid and Polymer Science** **293**(5), 1307-1316, 2015. DOI: 10.1007/s00396-015-3512-0. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-015-3512-0>>. Acesso em: 28 já. 2019.
- ZAREIE, C; BAHRAMIAN, AR; SEFTI, MV; SALEHI, MB. Network-gel strength relationship and performance improvement of polyacrylamide hydrogels using nano-silica; with regards to application in oil wells condition. **Journal of Molecular Liquids** **278**, 512-520, 2019. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.01.089. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732218348323?via%3Dihub>>. Acesso em: 28 já. 2019.
- ZHAO, J; JIA, H; PU, W; LIAO, R. Influences of fracture aperture on the water-shutoff performance of polyethyleneimine cross-linking partially hydrolyzed polyacrylamide gels in hydraulic fractured reservoirs. **Energy Fuels** **25**(6), 2616-2624, 2011. DOI: 10.1021/ef200461m. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef200461m>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- ZHOU, C; WU, Q; YUE, Y; ZHANG, Q. Application of rod-shaped cellulose nanocrystals in polyacrylamide hydrogels. **Journal of Colloid and Interface Science** **353**(1), 116-123, 2011. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.09.035. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20932533>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- ZHU, D; WEI, L; WANG, B; FENG, Y. Aqueous Hybrids of Silica Nanoparticles and Hydrophobically Associating Hydrolyzed Polyacrylamide Used for EOR in High-Temperature and High-Salinity Reservoirs. **Energies** **7**(6), 3858-3871, 2014. DOI: 10.3390/en7063858. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/7/6/3858>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- ZHU, D; BAI, B; HOU, J. Polymer gel systems for water management in high-temperature petroleum reservoirs: a chemical review. **Energy Fuels** **31**(12), 13063-13087, 2017. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02897. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.7b02897>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- ZOLFAGHARI, R; KATBAB, AA; NABAVIZADEH, J; TABASI, RY; NEJAD, MH. Preparation and characterization of nanocomposite hydrogels based on polyacrylamide for enhanced oil recovery applications. **Journal of Applied Polymer Science** **100**(13), 2096-2103, 2006. DOI: 10.1002/app.23193. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.23193>>. Acesso em: 28 jan. 2019.
- ZUO, P; QU, S; SHEN, W. Asphaltenes: Separations, structural analysis and applications. **Journal of Energy Chemistry** **34**, 186-207, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.10.004>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495618308222>>. Acesso em 05 fev. 2019.