

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DE HIDROGÉIS NANOCOMPÓSITOS PARA CONTROLE DA CONFORMAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO A ESCALA DE FORÇA DE GÉIS DE SYDANSK E ENSAIOS REOLÓGICOS

AUTORES:

Fernanda G. C. Tessarolli¹, Sara T. S. Souza², Héli da V. P. Vieira³, Ailton S. Gomes⁴, Claudia R. E. Mansur⁵

INSTITUIÇÃO:

^{1,3,4,5}Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro,

²Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DE HIDROGÉIS NANOCOMPÓSITOS PARA CONTROLE DA CONFORMAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO A ESCALA DE FORÇA DE GÉIS DE SYDANSK E ENSAIOS REOLÓGICOS

Abstract

In stratified or fractured oil reservoirs, the oil recovery efficiency tends to be low as the injected fluid flows preferably through the matrix's most permeable regions, leaving behind part of the displaceable oil in the matrix's unswept zones. For that, cross-linked polymers (hydrogels) can be used to plug the reservoir main paths diverging the injected fluid to the lower permeability zones. This study aims at evaluating the association of two methods, Sydansk gel code and rheological tests, to develop and select gelling systems based on polyacrylamide and sodium bentonite crosslinked with polyethyleneimine (PEI) for conformance control. The experimental results indicated that combining the semi-quantitative (Sydansk code) test with rheological tests has proven to be suitable to determine the viscosity, the gelation time and the strength of the nanocomposite hydrogels, as well as to develop gelling systems for permeability profile control in heterogeneous reservoirs. The selection of a gelling formulation for a specific subsurface condition (temperature and salinity) requires a multiobjective optimization study (variation of polymer, clay and PEI content) so that the resulting system exhibits simultaneously good injectivity, propagation and plugging property in porous media.

Keywords: nanocomposite hydrogel, conformance control, polyacrylamide, heterogeneous oil reservoir.

Introdução

Em reservatórios de petróleo estratificados e/ou fraturados a eficiência de recuperação de petróleo e a eficiência de varrido tendem a ser baixas mesmo após aplicação de métodos de recuperação secundária e de recuperação melhorada de petróleo. Isto ocorre porque os fluidos injetados na matriz rochosa sofrem canalização através das camadas de alta permeabilidade (caminhos preferenciais) deixando de recuperar parte do óleo deslocável contido nos volumes não varridos do meio poroso (MOGHADASI *et al.*, 2004).

A canalização dos fluidos injetados através das camadas mais permeáveis e/ou de redes de fraturas, além de reduzir o volume total de óleo recuperado, é responsável também pela chegada prematura do fluido injetado nos poços produtores (*breakthrough*) e pelo consequente aumento dos custos de produção associados à separação, ao tratamento e ao descarte do excesso de água produzida (CHUNG *et al.*, 2011).

Para remediar estes problemas de canalização e aumentar a vida econômica de reservatórios de estratificados e/ou fraturados, sistemas poliméricos gelificantes podem ser utilizados. Estes sistemas (polímero + agente de reticulação) são injetados na matriz rochosa através do poço injetor e/ou do poço produtor e fluem seletivamente pelas regiões de maior permeabilidade do reservatório, obstruindo-as temporariamente por meio da formação de uma barreira impermeável (hidrogel) no interior dos poros da rocha. O gel formado restringe o fluxo de fluido injetado *a posteriori* na região de alta permeabilidade induzindo a divergência do mesmo para zonas de menor permeabilidade do reservatório (LIU; BAI; WANG, 2010).

Sistemas gelificantes reticulados organicamente (*Organically Crosslinked Polymer – OCP*) à base de poliacrilamida e de seus copolímeros e polietilenoimina (PEI), estão sendo estudados para controlar a anisotropia de permeabilidade de reservatórios com condições severas de temperatura e salinidade por apresentar: i) boa injetividade e propagação em meios porosos, ii) tempo de gelificação programável, bem como iii) estabilidade química e térmica em temperaturas entre 60 °C e 120 °C (ELKARSANI *et al.*, 2015; EOFF *et al.*, 2007; HARDY *et al.*, 1999). Nestes sistemas as estruturas tridimensionais dos hidrogéis são formadas por meio de reações de transaminação — ataque nucleofílico dos nitrogênios amínicos da PEI aos carbonos das carbonilas dos grupamentos amidas da poliacrilamida formando ligações covalentes (HARDY *et al.*, 1999; REDDY *et al.*, 2003).

A adição de argilas lamelares à formulações gelificantes tem sido estudada para aumentar a resistência térmica, a resistência mecânica (módulo elástico) e o grau de inchamento, bem como reduzir a sinerese¹ e a sensibilidade à salinidade dos hidrogéis nanocompósitos formados (AALAIE *et al.*, 2008; MOHAMMADI *et al.*, 2015). Nos hidrogéis nanocompósitos à base de poliacrilamida, com e sem a adição de agente reticulante, as cadeias poliméricas adsorvem na superfície da argila por meio de ligações hidrogênio entre os prótons dos grupamentos amida ($-\text{CONH}_2$) do polímero e os átomos de oxigênio da nanocarga, assim como pela formação de complexos entre os oxigênios dos grupamentos carboxilatos ($-\text{COO}^-$) e/ou sulfonatos ($-\text{SO}_3^-$) presentes na cadeia polimérica e íons metálicos presentes na superfície da argila (HARAGUCHI; TAKEHISA, 2002; OKAY; OPPERMANN, 2007).

Embora de grande relevância acadêmica e industrial a literatura consultada não fornece um procedimento sistematizado para a seleção de formulações gelificantes para serem aplicadas como fluidos divergentes (agentes de bloqueio) em meios porosos. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo avaliar a associação de dois métodos, escala de força de géis de Sydansk (1988) e ensaios reológicos, para desenvolver e selecionar sistemas gelificantes à base de poliacrilamida e bentonita sódica reticulados com PEI com potencial para controlar a distribuição anisotrópica de permeabilidade de reservatórios de petróleo.

Metodologia

Materiais

Na formulação dos sistemas gelificantes foram utilizados: i) copolímero de acrilamida e ácido 2-acrilamida-metilpropano sulfônico (PAM-AMPS), com massa molar viscosimétrica média entre 8 e 15. 10⁶ Da e cerca de 30% de AMPS, da marca SNF Inc.; ii) bentonita sódica NT-25 fornecida pela Bentonit União do Nordeste Ltda e iii) solução aquosa de polietilenoimina ramificada (PEI) 30% em volume, com massa molar ponderal média entre 70.000 e 100.000 g/mol e valor de pH próximo de 11, da marca Polysciences Inc. (Figura 1). As soluções salinas usadas no estudo foram preparadas utilizando NaCl, KCl, CaCl₂ e MgCl₂.6H₂O da marca Vetec Química Fina Ltda. Todas as amostras foram utilizadas como recebidas.

Preparo dos Sistemas Gelificantes

Inicialmente, soluções poliméricas e dispersões de argila foram preparadas dispersando-se lentamente o polímero e a argila em água destilada ou em soluções salinas (Tabela 1), sob agitação magnética moderada durante 72 h. Na sequência as soluções poliméricas e as dispersões de argila foram misturadas e mantidas sob agitação por 1 h. Por fim, o agente de reticulação foi adicionado e o sistema foi mantido sob agitação por 15 min antes de seguir para os ensaios de Sydansk e reológicos. Todos os

¹ Expulsão de água decorrente da aproximação das moléculas durante a formação do gel.

sistemas gelificantes foram preparados a temperatura ambiente (25 °C). A composição das formulações e as temperaturas utilizadas para gelificação dos sistemas encontram-se na Tabela 2.

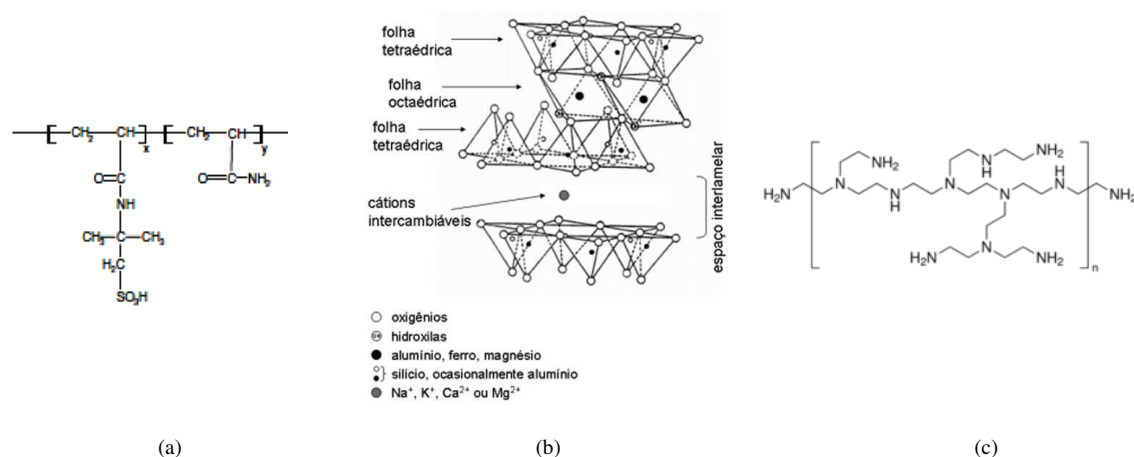


Figura 1: Estrutura química dos componentes do sistema gelificante: (a) copolímero PAM-AMPS, (b) bentonita sódica (TEIXEIRA-NETO; TEIXEIRA-NETO, 2009) e (c) PEI

Tabela 1: Composição das soluções salinas

Íons	Concentração dos íons (mg/L)		
Sódio (Na ⁺)	4.526,24	18.736,32	33.030,25
Potássio (K ⁺)	88,21	943,90	2.379,98
Cálcio (Ca ⁺²)	133,24	1.430,07	3.607,88
Magnésio (Mg ⁺²)	264,43	669,48	654,33
Cloroeto (Cl ⁻)	8.067,14	34.232,74	61.386,68
Total Dissolved Salts, TDS (ppm)	13.079,25	56.012,51	101.059,12

Tabela 2: Composição dos sistemas gelificantes e temperaturas

Denominação da formulação	Teor de polímero (%-m)	Teor de argila (%-m)	Teor de PEI (%-m)	Solução salina (ppm TDS)	Temperatura (°C)
F1	0,6	0,8	0,8	13.079,25	85
F2	0,2	0,8	0,8	56.012,51	85
F3	0,6	0,8	0,0	56.012,51	85
F4	0,6	0,0	0,8	56.012,51	85
F5	0,6	0,8	0,8	56.012,51	65
F6	0,6	0,8	0,8	56.012,51	105
F7	0,6	0,8	0,8	56.012,51	85
F8	0,6	1,6	0,8	56.012,51	85
F9	0,6	0,8	1,6	56.012,51	85
F10	1,0	0,8	0,8	56.012,51	85
F11	0,6	0,8	0,8	101.059,12	85

Avaliação da Cinética de Gelificação e Força dos Hidrogéis Nanocompósitos

A cinética de gelificação e a força dos hidrogéis nanocompósitos formados foram acompanhadas em diferentes temperaturas utilizando a escala de força de géis de Sydansk (1988) e ensaios reológicos:

a) Ensaio de Sydansk

Para realização do ensaio de Sydansk (1988), 20 mL dos sistemas gelificantes foram colocados em frascos de vidro (60 mL) com tampa. Após uma etapa de degaseificação e de purga com nitrogênio para remoção de oxigênio, os recipientes de vidro foram vedados e colocados em estufas de circulação de ar com temperaturas ajustadas em 65 °C; 85 °C ou 105 °C. Durante 24 h, em intervalos variáveis de tempo, os frascos de vidro contendo as formulações gelificantes foram invertidos verticalmente e códigos de força de géis (de A a J) foram atribuídos às amostras de acordo com os comportamentos (fluidez) observados, Tabela 3. O tempo de gelificação de cada formulação foi determinado quando o código de força de géis passou da classificação C para D (força do gel ≥ 4).

b) Ensaios reológicos

Ensaios de cisalhamento contínuo e oscilatório foram realizados em um reômetro Haake™ MARS 60 utilizando acessórios cone-placa (C60), placa-placa (PP35) e cilindros coaxiais (CC25), Tabela 4.

Tabela 3: Escala de força de géis (SYDANSK, 1988)

Código	Descrição do Comportamento do Gel	Escala semi-quantitativa
A	<u>Nenhum gel detectado visualmente</u> : o gel parece ter a mesma viscosidade (fluidez) do sistema gelificante original e nenhum gel é visualmente detectável.	1
B	<u>Gel altamente fluido</u> : o gel parece ser apenas um pouco mais viscoso (menos fluido) do que o sistema gelificante original.	2
C	<u>Gel fluido</u> : a maior parte do gel visualmente detectável flui em direção a tampa do frasco de teste mediante a inversão do recipiente.	3
D	<u>Gel moderadamente fluido</u> : apenas uma pequena porção (cerca de 5 % a 15 %) do gel não flui prontamente em direção a tampa do frasco de teste mediante a inversão do recipiente.	4
E	<u>Gel pouco fluido</u> : o gel mal consegue fluir em direção a tampa do frasco de teste e /ou uma porção significativa (> 15 %) do gel não flui mediante a inversão do recipiente.	5
F	<u>Gel não fluido altamente deformável</u> : o gel não flui em direção a tampa do frasco de teste mediante a inversão do recipiente mas sofre deformação.	6
G	<u>Gel não fluido moderadamente deformável</u> : o gel sofre deformação até a metade do frasco de teste mediante a inversão do recipiente.	7
H	<u>Gel não fluido ligeiramente deformável</u> : a superfície do gel sofre ligeira deformação mediante a inversão do recipiente de teste.	8
I	<u>Gel rígido</u> : a superfície do gel não sofre deformação mediante a inversão do recipiente de teste.	9
J	<u>Gel rígido com diapasão</u> : vibrações mecânicas do tipo diapasão podem ser sentidas aplicando-se leves batidas no recipiente de teste.	10

Tabela 4: Ensaios reológicos aplicados aos sistemas gelificantes

Ensaio	Objetivo	Condições Experimentais
Ensaio de cisalhamento contínuo com variação da taxa de cisalhamento	Avaliar o comportamento reológico dos sistemas gelificantes	Taxa de cisalhamento: 0,1 s ⁻¹ a 1000 s ⁻¹ Temperatura: 25 °C Acessório: C60
Ensaio de cisalhamento contínuo a taxa de cisalhamento constante	Avaliar a injetividade dos sistemas gelificantes	Taxa de cisalhamento: 7,3 s ⁻¹ Tempo: 5 min Temperatura: 25 °C Acessório: C60
Ensaio de cisalhamento oscilatório com variação da deformação	Obter informações sobre a região de viscoelasticidade linear ² (RVL) dos sistemas gelificantes e dos hidrogéis	Deformação: 0,01 a 100 Frequência de oscilação: 0,1 Hz Temperatura: 65 °C, 85 °C ou 105 °C Acessório: CC25 (sistema gelificante) ou P35 (hidrogel)
Ensaio de cisalhamento oscilatório com variação da frequência	Caracterizar a conformação e as interações intermoleculares fornecendo informações sobre o módulo elástico (G') e viscoso (G'') dos sistemas gelificantes e dos hidrogéis, em diferentes frequências, sem quaisquer perturbações mecânicas ou ruptura de estruturas internas	Deformação: 0,1 (selecionada na RVL) Frequência de oscilação: 0,1 Hz a 10 Hz Temperatura: 65 °C, 85 °C ou 105 °C Acessório: CC25 (sistema gelificante) ou P35 (hidrogel)
Ensaio de cisalhamento oscilatório com variação do tempo (taxa de deformação e frequência constantes)	Determinar o tempo de gelificação dos sistemas gelificantes (G'=G''), sem quaisquer perturbações mecânicas ou ruptura de estruturas internas	Deformação: 0,1 (selecionada na RVL) Frequência de oscilação: 0,1 Hz Temperatura: 65 °C, 85 °C ou 105 °C Tempo: até 12 h contínuas Acessório: CC25

Avaliação do Desempenho das Formulações Gelificantes

A avaliação do desempenho das formulações gelificantes foi realizada em três etapas conforme apresentado no algoritmo da Figura 2. Na Etapa 1 foram avaliadas a curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento e a curva de viscosidade a taxa de cisalhamento constante das formulações. Os sistemas gelificantes devem apresentar comportamento moderadamente pseudoplástico e viscosidade entre 10 mPa s e 40 mPa s em taxa de cisalhamento de 7,3 s⁻¹, para garantir a boa injetividade em meios poroso (DIAZ *et al.*, 2011; ELKARSANI *et al.*, 2015). Na Etapa 2 o tempo de

² A região de viscoelasticidade linear delimita a deformação crítica que se pode aplicar sobre o material de modo a garantir que sua estrutura não seja alterada.

³ O módulo de armazenamento ou elástico (G') indica a parcela de energia aplicada que foi temporariamente armazenada durante o ensaio oscilatório, mas que pode ser recuperada posteriormente.

⁴ O módulo de cisalhamento, viscoso ou de perda (G'') indica a parcela da energia utilizada para iniciar o escoamento que foi transferida irreversivelmente na forma de calor.

gelificação das formulações foi determinado por meio da escala de força de géis de Sydansk (1988) e de ensaios de cisalhamento oscilatório com varredura de tempo realizados na região de viscoelasticidade linear de cada amostra. Os sistemas gelificantes devem possuir tempo de gelificação mínimo de 2 h para garantir a segurança da etapa de preparo e injeção das formulações em meios porosos evitando quaisquer sobrecargas no sistema de bombeio da unidade (JAYAKUMAR, 2012). Na Etapa 3 a força dos géis formados após 24 h de gelificação foi avaliada utilizando a escala de força de géis de Sydansk (1988) e ensaios de cisalhamento oscilatório com varredura de frequência realizados na região de viscoelasticidade linear de cada amostra. Os sistemas gelificantes devem formar hidrogéis fortes em condições de subsuperfície, classificação $\geq G$ pela escala de Sydansk (1988), bem como $G' > 10$ Pa e razão $G'/G'' > 10$, sendo G' e G'' independentes da frequência de oscilação, para que atuem como agentes de bloqueio em camadas de alta permeabilidade e/ou redes de fratura de reservatórios (ELKARSANI *et al.*, 2015; TOKITA; NISHINARI, 2009; VEGA *et al.*, 2010).

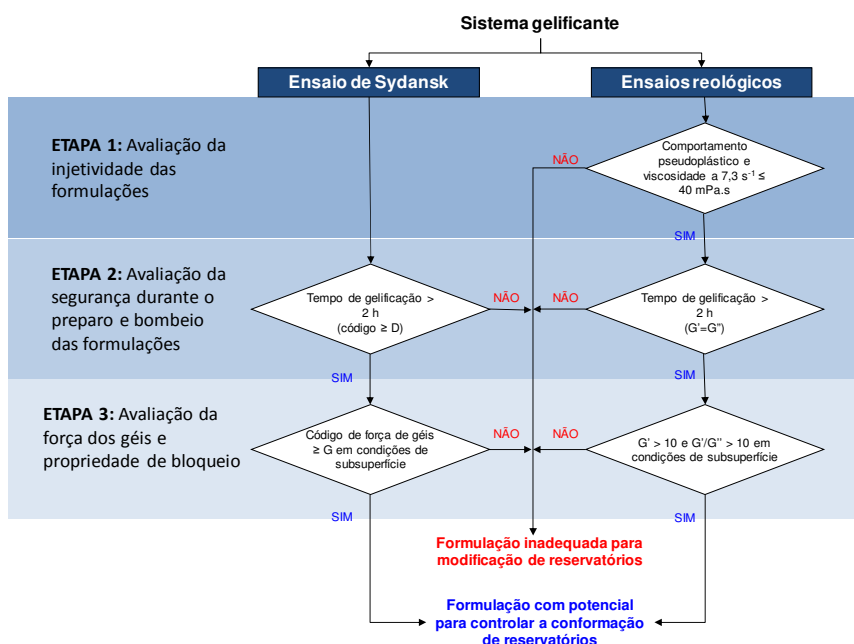


Figura 2: Algoritmo de avaliação e seleção de sistemas gelificantes com potencial para controlar a distribuição anisotrópica de permeabilidade de reservatórios

Resultados e Discussão

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios reológicos de cisalhamento contínuo e dos ensaios de cisalhamento oscilatório e de Sydansk, respectivamente. As Tabelas 5 e 6 consolidam as informações que foram utilizadas para avaliação do desempenho das formulações gelificantes.

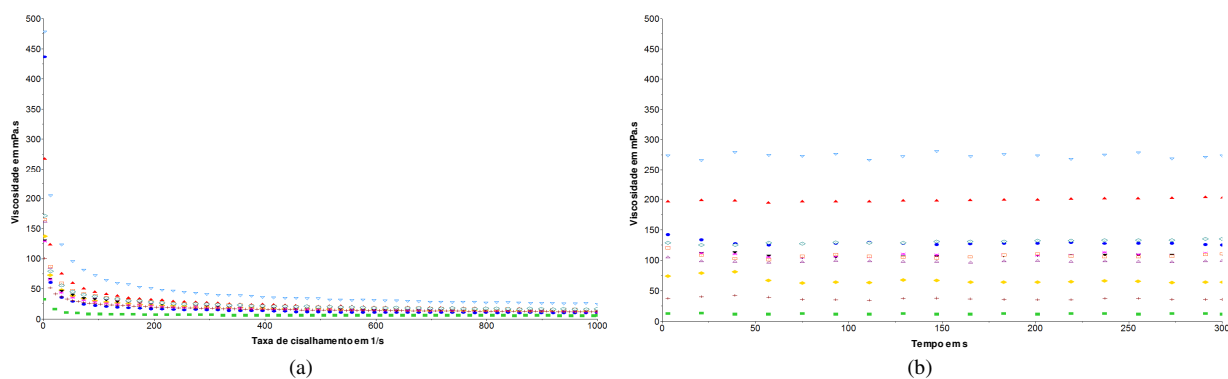


Figura 3: Curvas de viscosidade dos sistemas gelificantes em função (a) da taxa de cisalhamento e (b) do tempo a taxa de cisalhamento de $7,3 \text{ s}^{-1}$, a 25°C : $\blacktriangle$ F1, $\blacksquare$ F2, $\bullet$ F3, $\blacklozenge$ F4, $\blacktriangledown$ F5, $\blackstar$ F6, $\blacktriangleup$ F7, $\square$ F8, $\diamond$ F9, $\blacktriangledown$ F10 e $+$ F11

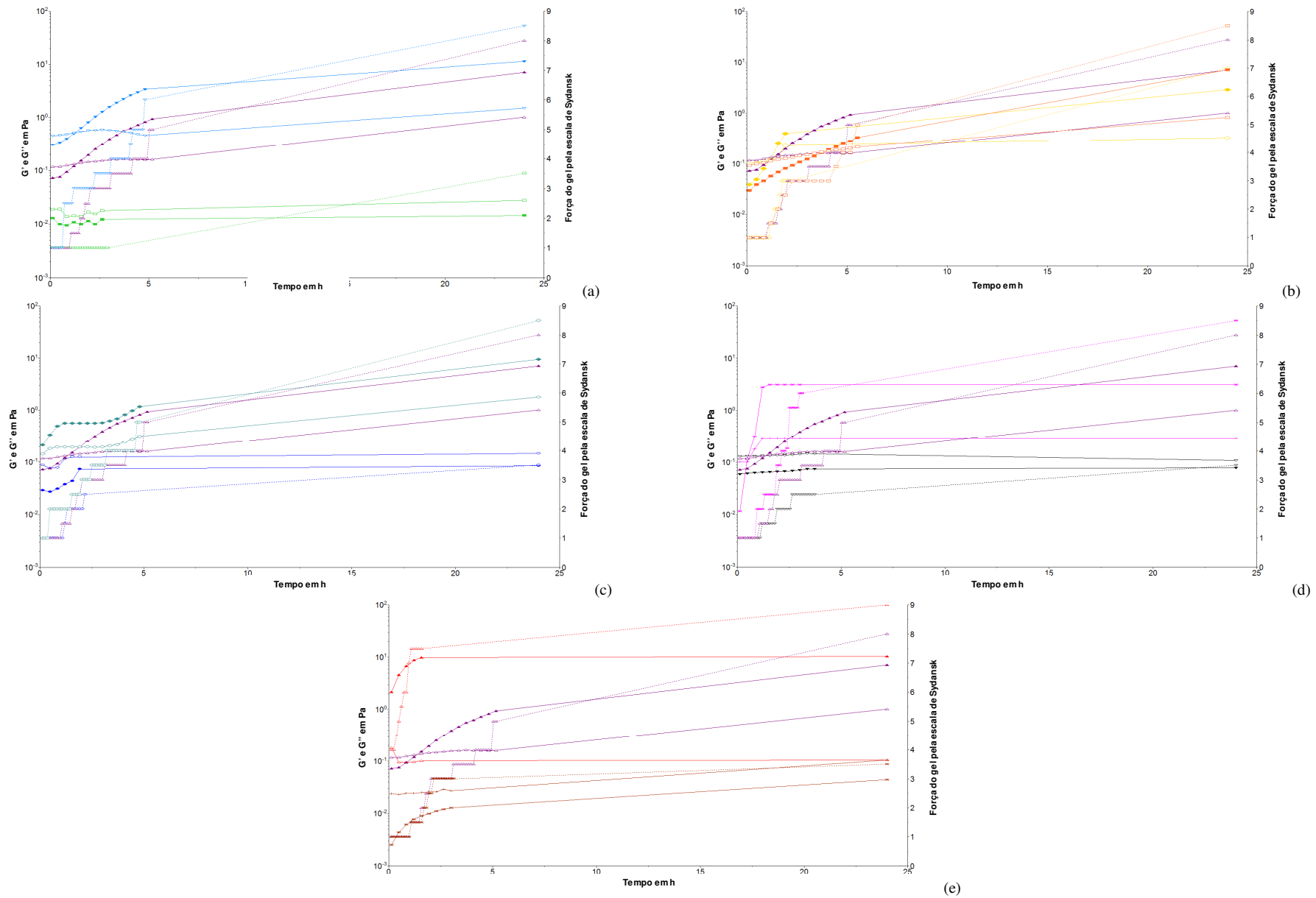


Figura 4: Curvas de variação de G' (símbolo cheio e linha contínua), G'' (símbolo vazio e linha contínua) e força de gel pela escala de Sydansk (símbolo vazio com ponto e linha pontilhada) em função do tempo: $\blacktriangle$ F1, $\blacksquare$ F2, $\bullet$ F3, $\blacklozenge$ F4, $\blacktriangledown$ F5, $\times$ F6, $\triangle$ F7, $\square$ F8, $\diamond$ F9, ∇ F10 e $\times$ F11

Tabela 5: Avaliação do desempenho das formulações gelificantes

Avaliação	ETAPA 1: Injetividade das formulações		ETAPA 2: Segurança durante o preparo e bombeio das formulações		ETAPA 3: Força dos géis após 24 h de gelificação			
Formulações	Comportamento reológico	Viscosidade a taxa de $7,3 \text{ s}^{-1}$ (a 25°C)	Tempo de gelificação pela escala de Sydansk (h)	Tempo de gelificação pelo ensaio reológico (h)	Força do gel pela escala de Sydansk	G' (Pa)	G'' (Pa)	G'/G''
F1	pseudoplástico	199	0	0	I (9)	10,360	0,105	98,67
F2	pseudoplástico	12	não gelificou em 24 h	não gelificou em 24 h	C/D (3,5)	0,003	0,020	0,14
F3	pseudoplástico	128	não gelificou em 24 h	não gelificou em 24 h	C/D (3,5)	0,081	0,107	0,76
F4	pseudoplástico	67	3,75	1,18	G (7)	2,939	0,329	8,94
F5	pseudoplástico	108	não gelificou em 24 h	não gelificou em 24 h	C/D (3,5)	0,079	0,109	0,73
F6	pseudoplástico	109	2,25	0,97	H/I (8,5)	3,141	0,293	10,73
F7	pseudoplástico	100	4,25	1,40	H (8)	7,075	1,024	6,91
F8	pseudoplástico	107	4,75	3,84	H/I (8,5)	7,177	0,841	8,53
F9	pseudoplástico	123	3,5	0	H/I (8,5)	9,527	1,816	5,25
F10	pseudoplástico	273	3,25	1,28	H/I (8,5)	11,490	1,519	7,56
F11	pseudoplástico	37	não gelificou em 24 h	não gelificou em 24 h	C/D (3,5)	0,045	0,105	0,43

Tabela 6: Influências das variáveis na injetividade, tempo de gelificação e força dos hidrogéis

Parâmetros	Injetividade do sistema gelificante	Tempo de gelificação	Força do gel formado
↑ teor de polímero	↓	↓	↑
↑ teor de reticulante	↓	↓	↑
↑ teor de argila	↓	↑	↑
↑ temperatura	-	↓	↑
↑ salinidade	↑	↑	↓

De acordo com os resultados dos ensaios, verificou-se que o aumento do teor de polímero (F2, F7 e F10) ou do teor de reticulante (F3, F7 e F9) na formulação reduziu a injetividade e o tempo de gelificação do sistema, porém elevou a força do hidrogel nanocompósito formado. Em contrapartida, o aumento do teor de argila (F4, F7 e F8) embora também tenha reduzido a injetividade do sistema, elevou tanto o tempo de gelificação quanto a força do gel formado. Já o aumento da temperatura (F5, F7 e F6) reduziu o tempo de gelificação e elevou a força do hidrogel formado. O aumento da salinidade melhorou a injetividade da formulação e prolongou o tempo de formação do gel todavia enfraqueceu a força do gel. Dentre as 11 formulações avaliadas, nenhuma apresentou simultaneamente: i) comportamento pseudoplástico e viscosidade $< 40 \text{ mPa.s}$ a taxa de cisalhamento de $7,3 \text{ s}^{-1}$, recomendados para garantir boa injetividade em meios porosos, ii) tempo de gelificação $> 2 \text{ h}$, mínimo recomendado para garantir a segurança durante o preparo e bombeio no reservatório e iii) comportamento de gel forte em condições de subsuperfície para atuar como agente de bloqueio, código de Sydansk $\geq \text{G}$, $\text{G}' > 10 \text{ Pa}$ e $\text{G}'/\text{G}'' > 10$.

Conclusões

A associação de ensaios semi-quantitativos (escala de Sydansk) e reológicos mostrou-se adequada para determinar a viscosidade, o tempo de gelificação e a força dos hidrogéis nanocompósitos, podendo ser utilizada no desenvolvimento de sistemas gelificantes com potencial para controlar a conformação de reservatórios de petróleo. A seleção de formulações para condições específicas de subsuperfície (temperatura e salinidade) requer a realização de um estudo de otimização multiobjetivo (variação do teor de polímero, argila e PEI) de modo que os sistemas resultantes apresentem simultaneamente boa injetividade e propagação em meios porosos e propriedade de bloqueio.

Agradecimentos

À Petrobras pelo apoio financeiro e à SNF Inc. pela doação da amostra polimérica.

Referências Bibliográficas

- AALAIE, J.; VASHEGHANI-FARAHANI, E.; RAHMATPOUR, A.; SEMSARZADEH, M. A. Effect of montmorillonite on gelation and swelling behavior of sulfonated polyacrylamide nanocomposite hydrogels in electrolyte solutions. *European Polymer Journal*, v. 44, n. 7, p. 2024–2031, 2008.
- CHUNG, T.; BAE, W.; NGUYEN, N. T. B.; DANG, C. T. Q.; 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*, v. 34, n. 2, p. 122–133, 2011.
- DIAZ, I.; NAVA, T.; DEOLARTE, C.; CASTILLO, O.; VASQUEZ, J.; CANCINO, V.; CABALLERO, C.; OTHERS. Successfully Controlling Unwanted Gas Production in a Highly Naturally Fractured Carbonate Reservoir. Society of Petroleum Engineers, 2011.
- ELKARSANI, K. S. M.; AL-MUNTASHERI, G. A.; SULTAN, A. S.; HUSSEIN, I. A. Performance of PAM/PEI gel system for water shut-off in high temperature reservoirs: Laboratory study. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, n. 17, 2015.
- EOFF, L.; DALRYMPLE, E.; EVERETT, D.; VASQUEZ, J. Worldwide field applications of a polymeric gel system for conformance applications. *SPE Production & Operations*, v. 22, n. 2, p. 231–235, 2007.
- HARAGUCHI, K.; TAKEHISA, T. Nanocomposite hydrogels: a unique organic-inorganic network structure with extraordinary mechanical, optical, and swelling/de-swelling properties. *Advanced Materials*, v. 14, n. 16, p. 1120, 2002.
- HARDY, M.; BOTERMANS, W.; HAMOUDA, A.; VALDAL, J.; WARREN, J. The first carbonate field application of a new organically crosslinked water shutoff polymer system, 1999.
- JAYAKUMAR, S. *Hydrolyzed polyacrylamide-polyethylenimine-dextran sulfate polymer gel system as a water shut-off agent in unconventional gas reservoirs*. 2012. Texas A&M University, 2012.
- LIU, Y.; BAI, B.; WANG, Y. Applied technologies and prospects of conformance control treatments in China. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, v.65, n.6, 2010.
- MOGHADASI, J.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; JAMIALAHMADI, M.; SHARIF, A. Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection. *Journal of petroleum science and engineering*, v. 43, n. 3, p. 163–181, 2004.
- MOHAMMADI, S.; VAFAIE SEFTI, M.; BAGHBAN SALEHI, M.; MOUSAVI MOGHADAM, A.; RAJAEI, S.; NADERI, H. Hydrogel swelling properties: comparison between conventional and nanocomposite hydrogels for water shutoff treatment. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015.
- OKAY, O.; OPPERMAN, W. Polyacrylamide-clay nanocomposite hydrogels: rheological and light scattering characterization. *Macromolecules*, v. 40, n. 9, p. 3378–3387, 2007.
- REDDY, B. R.; EOFF, L.; DALRYMPLE, E.; BLACK, K.; BROWN, D.; RIETJENS, M. A natural polymer-based cross-linker system for conformance gel systems. *SPE Journal*, v. 8, n. 2, 2003.
- SYDANSK, R. D. A new conformance-improvement-treatment chromium (III) gel technology. 1988.
- TEIXEIRA-NETO, E.; TEIXEIRA-NETO, A. A. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 809–817, 2009.
- TOKITA, M.; NISHINARI, K. *Gels: Structures, Properties, and Functions: Fundamentals and Applications*: Springer Verlag, v. 136, 2009.
- VEGA, I.; MORRIS, W.; ROBLES, J.; PEACOCK, H.; MARIN, A. Water shut-off polymer systems: design and efficiency evaluation based on experimental studies, 2010.