



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

INSTITUTO DE QUÍMICA

JAMILE FABRINE DA SILVA LEMOS

**OBTENÇÃO DE CARBOXIMETILCELULOSE TERMORRESPONSIVA COMO
ADITIVO PARA SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO *PUMP AND DUMP***

Natal/RN

2026

JAMILE FABRINE DA SILVA LEMOS

OBTENÇÃO DE CARBOXIMETILCELULOSE TERMORRESPONSIVA COMO
ADITIVO PARA SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO *PUMP AND DUMP*

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito obrigatório à obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientadora: Profª. Dra. Rosangela de Carvalho Balaban (Laboratório de Pesquisa em Petróleo – LAPET – UFRN)

Coorientadora: Dra. Bruna Luiza Batista de Lima (Laboratório de Pesquisa em Petróleo – LAPET – UFRN)

Natal/RN

2026

JAMILE FABRINE DA SILVA LEMOS

OBTENÇÃO DE CARBOXIMETILCELULOSE TERMORRESPONSIVA COMO
ADITIVO PARA SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO *PUMP AND DUMP*

Monografia apresentada ao Curso de
Bacharelado em Química da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte, como
requisito obrigatório à obtenção do título de
Bacharel em Química.

Monografia aprovada em: 22/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Rosangela de Carvalho Balaban

Orientadora

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Dra. Bruna Luiza Batista de Lima

Coorientadora

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Dra. Nívia do Nascimento Marques

Membro interno

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

AGRADECIMENTOS

À Deus, porque dele, e por ele, e para ele são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente.

Ao meu pai Fabrício Jaques, por todo apoio e dedicação e por ter sido o primeiro a acreditar no meu potencial, incentivando cada passo desta caminhada.

À minha mãe Joselma Nascimento, por todo amor, apoio e esforço. Sua presença e incentivo foram fundamentais para que eu seguisse em frente, mesmo nos momentos de desafio.

À minha irmã Janine, pela parceria e por sempre está presente em todos os momentos, torcendo genuinamente pelas minhas conquistas. Irmãzinha te ama demais, meu bebê.

Ao meu noivo Jefté Monteiro, por ser meu companheiro de vida e de jornada, e por me apoiar com amor, paciência e compreensão.

À minha família, por ser para mim o maior exemplo de companheirismo, união e lealdade.

À minha orientadora, Dra. Rosangela Balaban, por ter me acolhido de braços abertos no LAPET e pela confiança depositada em mim.

À minha coorientadora Bruna Lima, pela dedicação ímpar, pela paciência e por todos os conhecimentos que me foram transmitidos.

Às minhas amigas de curso, Julia Andrade, Evely Albuquerque e Armênia Maria, pela amizade sincera construída ao longo destes anos juntas e por tornarem a jornada acadêmica mais leve.

À minha parceira de laboratório e grande amiga, Jéssica Araújo, cujo auxílio e prontidão foram essenciais em cada etapa prática deste trabalho.

Às minhas amigas do Arautos do Rei por todos os sorrisos compartilhados e momentos de leveza e alegria.

Porque eu, o SENHOR, teu Deus, te tomo pela tua mão direita e te digo: não temas, que eu te ajudo.

Isaías 41:13

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a síntese e a avaliação do copolímero carboximetilcelulose enxertada com poli(*N*-isopropilacrilamida) (CMC-g-PNIPAM) visando sua aplicação em fluidos de perfuração do tipo *pump and dump*. Para isso, foi realizada a síntese de enxertia da PNIPAM nas cadeias da CMC via reação radicalar. Para verificar as características estruturais dos produtos obtidos, foram feitas as análises de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), espalhamento dinâmico de luz (DLS) e potencial zeta. Foi evidenciada a formação de macromoléculas híbridas a partir da combinação do caráter aniônico da CMC com a natureza termorresponsiva da PNIPAM. O comportamento termorresponsivo foi investigado por meio da determinação da temperatura de turvação, utilizando espectroscopia na região do ultravioleta-visível (UV-Vis). Os resultados demonstraram que a LCST pode ser modulada em função da proporção entre os componentes e da concentração polímero. Além disso, a adição de NaCl promoveu a redução da LCST, antecipando a transição conformacional. Os ensaios reológicos revelaram que os copolímeros apresentaram desempenho superior, destacando-se pela manutenção ou aumento da viscosidade em temperaturas elevadas, em contraste com o comportamento da CMC pura, que apresentou redução de viscosidade com o aumento da temperatura. Esse efeito foi intensificado em meios salinos, como em água do mar sintética, nos quais as interações hidrofóbicas entre as cadeias poliméricas compensaram a blindagem das cargas eletrostáticas. Para as medidas reológicas com as soluções concentradas e diluídas, utilizando a metodologia empregada em fluidos *pump and dump* no campo, foi observado que os copolímeros apresentaram comportamento termoviscosificante e a presença dos sais tornou algumas concentrações diluídas superiores às concentradas em termos de viscosidade. Quando adicionados aos fluidos de perfuração, os copolímeros demonstraram boa estabilidade após envelhecimento e comportamento reológico adequado às condições operacionais, combinando baixa viscosidade em superfície em altas taxas de cisalhamento, favorecendo o bombeamento, e elevada capacidade de transporte de cascalhos em temperaturas mais altas, devido ao aumento da viscosidade.

Palavras-chave: Poli(*N*-isopropilacrilamida). Carboximetilcelulose. Copolímero. Reologia. Temperatura consoluta inferior.

ABSTRACT

The objective of this study was to synthesize and evaluate carboxymethylcellulose grafted with poly(*N*-isopropylacrylamide) (CMC-g-PNIPAM) for use in pump-and-dump drilling fluids. To this end, PNIPAM was grafted onto CMC chains via a radical reaction. To characterize the structural properties of the resulting products, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, dynamic light scattering (DLS), and zeta potential analyses were performed. The formation of hybrid macromolecules resulting from the combination of the anionic nature of CMC with the thermoresponsive nature of PNIPAM was demonstrated. The thermoresponsive behavior was investigated by determining the clouding temperature using ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy. The results demonstrated that the LCST can be modulated as a function of the ratio between the components and the polymer concentration. Furthermore, the addition of NaCl led to a reduction in the LCST, bringing forward the conformational transition. Rheological tests revealed that the copolymers exhibited superior performance, notably by maintaining or increasing viscosity at elevated temperatures, in contrast to the behavior of pure CMC, which exhibited a decrease in viscosity with increasing temperature. This effect was intensified in saline media, such as synthetic seawater, where hydrophobic interactions between the polymer chains compensated for the shielding of electrostatic charges. For rheological measurements of concentrated and diluted solutions, using the methodology employed for “pump-and-dump” fluids in the field, it was observed that the copolymers exhibited thermoviscifying behavior, and the presence of salts caused some diluted concentrations to outperform the concentrated ones in terms of viscosity. When added to drilling fluids, the copolymers demonstrated good stability after aging and rheological behavior suitable for operating conditions, combining low surface viscosity at high shear rates—which facilitates pumping—and high proppant transport capacity at higher temperatures due to increased viscosity.

Keywords: Poly(*N*-isopropylacrylamide). Carboxymethylcellulose. Copolymer. Rheology. Lower critical solution temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura de monômero, mero e polímero	16
Figura 2- Tipos de estruturas de polímeros	17
Figura 3- Tipos de copolímeros	19
Figura 4- Solução com turvação em diferentes pH	20
Figura 5- Diagrama de fases para o sistema polímero-solvente em relação a LCST	21
Figura 6 - Representação estrutural da PNIPAM	22
Figura 7- Reação de carboximetilação da celulose.....	24
Figura 8- Comportamento dependente da temperatura de PNIPAM-g-CNF em água abaixo e acima da LCST	24
Figura 9- Ilustração simplificada do mecanismo de perfuração <i>pump and dump</i>	27
Figura 10- Espectro na região do infravermelho da CMC	35
Figura 11- Espectro na região do infravermelho da PNIPAM	36
Figura 12- Espectro na região do infravermelho dos copolímero CMC1-g-PNIPAM6 e CMC1-g-PNIPAM2	37
Figura 13- Solução límpida e solução turva	40
Figura 14 - Espectros na região do ultravioleta-visível para os sistemas de CMC, CMC1-g-PNIPAM2 , CMC1-g-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, com concentrações poliméricas de 5 g/L (A) e 10 g/L (B).....	41
Figura 15- Espectros na região do ultravioleta-visível para os sistemas de CMC, CMC1-g-PNIPAM2 , CMC1-g-PNIPAM6 e PNIPAM com concentrações poliméricas de 5 g/L, em água destilada (A) e salmoura de NaCl 1,0 mol/L (B).....	42
Figura 16- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC, PNIPAM, CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6 em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperatura de 25 °C.....	44
Figura 17- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC (A) e PNIPAM (B) em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperaturas de 25, 30, 40, 60 °C	45
Figura 18- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC1-g-PNIPAM2 (A) e CMC1-g-PNIPAM6 (B) em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperaturas de 25, 30, 40, 60 °C	46

Figura 19- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC1-g-PNIPAM2 (A) e CMC1-g-PNIPAM6 (B), em água destilada, concentração polimérica de 5 e 10 g/L, temperaturas de 25 e 60 °C.....	46
Figura 20- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC (A), PNIPAM (B), CMC1-g-PNIPAM2 (C) e CMC1-g-PNIPAM6 (D) a 5 g/L em água, 0,5 mol/L de NaCl e 1,0 mol/L de NaCl, a temperatura de 25 °C	48
Figura 21- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as diluições do copolímero CMC1-g-PNIPAM2 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 1, 5, 10, 15 e 30 g/L, a temperaturas de 25 °C (A) e 40 °C (B).....	49
Figura 22- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os copolímero CMC1-g-PNIPAM2 diluído em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 5g/L, a temperaturas de 25 °C a 60 °C	50
Figura 23- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as diluições do copolímero CMC1-g-PNIPAM6 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 1, 5, 10, 15 e 30 g/L, a temperaturas de 25 °C (A) e 40 °C (B)	51
Figura 24– Aspecto do copolímero CMC1-g-PNIPAM6 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica 30 g/L precipitado após as medidas reológicas, em temperatura de 40 °C.....	52
Figura 25- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para fluidos de perfuração com os copolímeros CMC1-g-PNIPAM2 (A) e CMC1-g-PNIPAM6 (B), a temperaturas de 25 °C e 49 °C, antes e após envelhecimento.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Proporções utilizadas nas sínteses	31
Tabela 2- Sais utilizados para composição da água do mar sintética.....	32
Tabela 3- Formulação utilizada para preparo dos fluidos de perfuração aquosos	34
Tabela 4- Valores de potencial zeta (mV) dos sistemas de CMC, CMC1-g-PNIPAM2 , CMC1-g-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, a 25 °C	38
Tabela 5- Valores de diâmetro hidrodinâmico (nm) dos sistemas de CMC, CMC1-g- PNIPAM2 , CMC1-g-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, a 25 °C.....	39
Tabela 6- Valores de LCST de cada polímero em diferentes concentrações e meios aquosos	43

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AMPS	Ácido 2-acrilamida-2-metilpropanossulfônico
AMS	Água do mar sintética
API	American Petroleum Institute
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
ATR	Reflectância Total Atenuada
BaSO ₄	Sulfato de bário
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
CMC	Carboximetilcelulose
CNC	Nanocristais de celulose carboxilada
CNF	Nanofibras de celulose
DLS	Espalhamento dinâmico de luz
DRX	Difração de raios X
FTIR	Infravermelho com transformada de Fourier
KCl	Cloreto de Potássio
KPS	Persulfato de potássio
LCST	Lower critical solution temperature
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgCl ₂	Cloreto de magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NIPAM	<i>N</i> -isopropilacrilamida
PB	Pó de batata

PEA	Poliéter diamina
PNIPAM	Poli(<i>N</i> -isopropilacrilamida)
PNVDE	(Poli(<i>N</i> -vinilcaprolactama- <i>co</i> - <i>N,N</i> -dietil acrilamida))
POP	3-(propoxycarbonotioil)sufanil propanoato
RAFT	Polimerização por transferência reversível de cadeias
RPM	Rotações por Minuto
TEMED	<i>N,N,N',N'</i> -tetrametiletilenodiamina
TGA	Análise termogravimétrica
UV-Vis	Espectroscopia na região do ultravioleta-visível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 POLÍMEROS	16
3.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	24
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1 MATERIAIS	30
4.2 SÍNTESES	30
4.2.1 Síntese dos copolímeros	30
4.2.2 Síntese da PNIPAM	31
4.3 PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES	31
4.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE PROPRIEDADES	32
4.5.1 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	32
4.5.2 Potencial zeta	32
4.5.3 Espalhamento de luz dinâmico (DLS).....	33
4.5.4 Espectroscopia na região do ultravioleta e visível (UV-Vis).....	33
4.5.5 Medidas reológicas.....	33
4.4 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	33
4.4.1 Medidas reológicas.....	34
5 RESULTADO E DISCUSSÃO	35
5.1 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR).....	35
5.2 POTENCIAL ZETA.....	38
5.3 ESPALHAMENTO DE LUZ DINÂMICO (DLS)	39
5.4 ESPECTROSCOPIA DE ULTRAVIOLETA E VISÍVEL (UV-VIS).....	40
5.5 MEDIDAS REOLÓGICAS	43
5.5.1 Sistema em água destilada.....	43

5.5.2 Sistemas em salmoura de NaCl	47
5.5.3 Sistemas concentrados e diluídos em AMS	49
5.6 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO AQUOSOS	52
5.6.1 medidas reológicas	52
6 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás desempenha um papel central no cenário energético global, atendendo a grande parte da demanda por combustíveis e derivados petroquímicos. No entanto, a exploração desses recursos envolve operações complexas e de elevado impacto ambiental, especialmente o processo de perfuração de poços (Teramoto et al., 2014; Tripathi; DuttaBaruah; Subbiah, 2021). Para viabilizar essa atividade são utilizados os fluidos de perfuração, que são formulados para cumprir funções essenciais, como por exemplo a remoção de cascalhos, a estabilização das paredes do poço, o resfriamento da broca e a redução de atrito (Caenn; Darley; Gray, 2014; Jiang et al., 2022). A escolha adequada da composição e das propriedades desses fluidos é, portanto, decisiva para a segurança, eficiência e viabilidade econômica das operações.

Nesse contexto, os polímeros têm se destacado como aditivos importantes na formulação de fluidos de perfuração. Sua diversidade estrutural, que varia de cadeias lineares, ramificadas e até redes reticuladas, confere-lhes características físico-químicas e mecânicas únicas (Canevarolo Jr, 2002; Mano e Mendes, 1999). Eles atuam como agentes viscosificantes, redutores de filtrado e inibidores de reatividade de argilas, otimizando o desempenho do fluido de perfuração.

Um avanço notável é o desenvolvimento de polímeros responsivos a estímulos, ou polímeros inteligentes (Asadi-Zaki et al., 2024). Diferente dos polímeros tradicionais, eles podem modificar suas propriedades de forma reversível em resposta a estímulos externos, como variações de temperatura, pH e força iônica. Essa adaptabilidade os torna ideais para aplicações que exigem um comportamento dinâmico e controlado (Fattah-alhosseini et al., 2024; Purohit et al., 2022; Tan; Davis; Cappelleri, 2021; Xiang et al., 2019).

Entre os polímeros inteligentes, os termorresponsivos são amplamente estudados por sua sensibilidade a mudanças de temperatura. Esse comportamento é descrito pela temperatura consoluta inferior (LCST) (Flemming et al., 2021). Abaixo da LCST, o polímero é solúvel, formando uma solução límpida, pois interações com o solvente são predominantes. Acima da LCST, interações entre as porções hidrofóbicas das cadeias poliméricas se intensificam, causando agregação e até precipitação, tornando a solução turva (Morimoto; Yamamoto, 2021; Nieswandt et al., 2021; Okuno et al., 2022; Pasparakis; Tsitsilianis, 2020). Esse fenômeno pode provocar uma mudança abrupta na viscosidade e nas propriedades reológicas da solução. Um exemplo clássico é a poli(*N*-isopropilacrilamida) (PNIPAM), cuja LCST em solução aquosa é próxima de 32 °C (Jang et al., 2021).

Considerando os desafios ambientais e operacionais, o comportamento termorresponsivo dos polímeros passou a ser aproveitado na formulação de fluidos inovadores, como na estratégia chamada *pump and dump* (bombeia e descarta) (Akers, 2011). Nessa estratégia, o fluido é injetado no poço com baixa viscosidade (abaixo da LCST), facilitando o bombeamento. Ao atingir as altas temperaturas do fundo do poço, superiores à LCST, sua viscosidade aumenta, melhorando a capacidade de transportar os cascalhos e garantindo a estabilidade em profundidade, onde a viscosidade é mais necessária. Como essa operação não utiliza sistema de retorno para a plataforma, o fluido, juntamente com os cascalhos gerados durante a perfuração, é descartado diretamente no leito marinho, o que reforça a necessidade de formulações com baixa toxicidade e elevada compatibilidade ambiental.

Apesar dos avanços, o desenvolvimento de polímeros termorresponsivos economicamente viáveis para a indústria de petróleo ainda enfrenta desafios. O uso da carboximetilcelulose (CMC), um derivado de celulose abundante e de baixo custo que não possui comportamento termorresponsivo, em combinação com polímeros como a PNIPAM, surge como uma alternativa promissora. A copolimerização desses dois polímeros pode permitir o ajuste preciso da LCST e do comportamento de viscosidade, superando as limitações dos polímeros isolados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e caracterizar copolímeros à base de carboximetilcelulose (CMC) e poli(*N*-isopropilacrilamida) (PNIPAM), avaliando o comportamento termorresponsivo em solução aquosa e o potencial de aplicação desses derivados em fluidos de perfuração com sistema *pump and dump*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

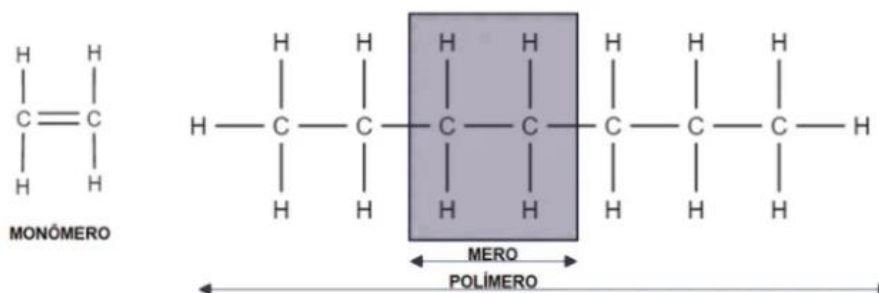
- Sintetizar copolímeros de CMC-g-NIPAM por polimerização radicalar em diferentes proporções entre os reagentes;
- Caracterizar os polímeros obtidos quanto ao comportamento em solução aquosa, em diferentes concentrações poliméricas;
- Investigar as propriedades reológicas dos materiais em diferentes temperaturas, com foco na transição associada à LCST;
- Analisar a viabilidade dos sistemas poliméricos para aplicação em fluidos de perfuração do tipo *pump and dump*.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 POLÍMEROS

Os polímeros são macromoléculas formadas por um grande número de unidades estruturais que se repetem ao longo de toda a cadeia, chamadas de meros, e que estão unidas entre si por ligações covalentes (Canevarolo Jr, 2002; De Paoli, 2008), conforme exemplificado na Figura 1. Essas macromoléculas são formadas por pequenas unidades de baixa massa molar chamadas monômeros, que possuem grupos funcionais capazes de se ligar entre si por meio de uma reação química denominada polimerização (Mano e Mendes, 1999). É importante destacar que nem toda molécula de baixa massa molar é capaz de formar um polímero. Para que o processo de polimerização ocorra, o monômero deve apresentar no mínimo dois grupos reativos, permitindo a propagação da cadeia polimérica (Mano e Mendes, 1999).

Figura 1- Estrutura de monômero, mero e polímero



Fonte: Adaptado de Callister, 2019

Por serem macromoléculas, os polímeros apresentam uma elevada massa molar, característica que exerce grande influência sobre suas propriedades físico-químicas e mecânicas como viscosidade, resistência, temperatura de transição vítrea e solubilidade (Canevarolo Jr, 2002). A massa molar de um polímero não é um valor fixo, como ocorre em compostos de baixa massa molar, mas sim uma distribuição, já que durante o processo de polimerização formam-se cadeias de diferentes comprimentos, fenômeno chamado de polimolecularidade (Mano e Mendes, 1999).

Do ponto de vista da estrutura molecular, os polímeros podem ser classificados como lineares, quando possuem uma única cadeia principal; ramificados, quando há cadeias laterais

conectadas à cadeia principal; com ligações cruzadas, em que cadeias lineares adjacentes são ligadas umas às outras (Mano e Mendes, 1999). A Figura 2 exemplifica as estruturas dos polímeros. Quanto à origem, os polímeros são divididos em naturais, sintéticos ou semissintéticos. Os polímeros naturais como a celulose, são encontrados na natureza. Já os polímeros sintéticos, como o polietileno e o poliestireno, são produzidos por meio de processos industriais. Por fim, os polímeros semissintéticos são obtidos a partir da modificação de polímeros naturais, como é o caso do acetato de celulose, do Rayon, da borracha vulcanizada e da carboximetilcelulose (Mano e Mendes, 1999).

Figura 2- Tipos de estruturas de polímeros



Fonte: Autora, 2026

Gutierrez e colaboradores (2021) mostraram que polímeros semissintéticos têm se destacado como materiais promissores no desenvolvimento de sistemas para liberação controlada de óxido nítrico, especialmente em aplicações dérmicas. Esses materiais são obtidos pela combinação entre polímeros naturais e sintéticos por meio de técnicas como misturas, enxertia e reticulação. Dessa forma, os polímeros semissintéticos apresentam simultaneamente elevada resistência mecânica e térmica, característica dos polímeros sintéticos, e biocompatibilidade e biodegradabilidade, característica dos polímeros naturais (Gutierrez Cisneros; Bloemen; Mignon, 2021).

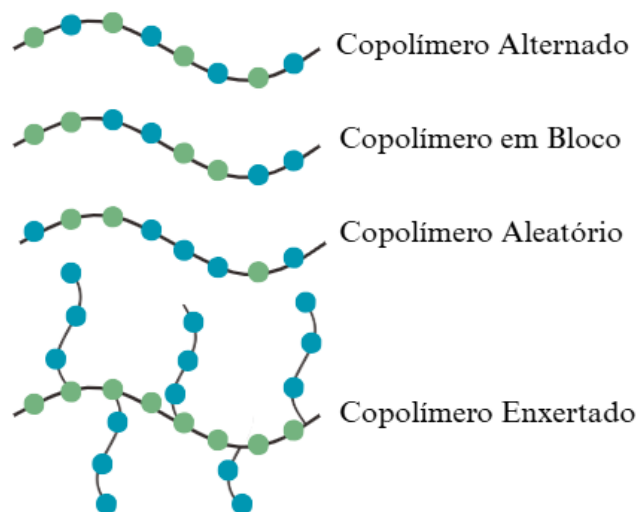
Com relação ao comportamento mecânico, os materiais poliméricos podem se classificar em plásticos, elastômeros e fibras. Os plásticos, divididos em termoplásticos e termofixos, apresentam rigidez sob carga e ampla variedade de aplicações, com propriedades que variam conforme estrutura, aditivos e processamento. Devem ser utilizados abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g) ou de fusão. Os elastômeros se destacam por sua elevada elasticidade, retornando à forma original após deformações intensas, devido à presença de

ligações cruzadas e ramificadas. Já as fibras são polímeros com alta razão comprimento/diâmetro, utilizadas especialmente em compósitos e na indústria têxtil, exigindo propriedades físico-químicas específicas para seu uso (Tavares, 2018).

As reações de polimerização são processo de ligações entre monômeros que dão origem aos polímeros. Elas podem ocorrer de duas formas principais: por meio da polimerização em etapas ou da polimerização em cadeia. Na polimerização em etapas, o crescimento das cadeias ocorre por meio de reações sucessivas entre grupos funcionais dos monômeros, geralmente acompanhadas da formação de subprodutos, como água, sendo típica reação de condensação (Callister; Rethwisch, 2019). Já a polimerização em cadeia ocorre através de três etapas bem definidas: iniciação, propagação e terminação. Esse tipo de polimerização envolve a formação de um centro ativo, geralmente a partir da quebra de uma ligação dupla, que permite o crescimento rápido da cadeia com a adição sucessiva de monômeros, até que ocorra a sua terminação (Callister; Rethwisch, 2019).

A polimerização em etapas é descrita por Xu e colaboradores (2023) como um método amplamente utilizado na síntese de polímeros conjugados por meio de reações de acoplamento, catalisadas por metais de transição, como as reações de Suzuki, Stille e Kumada, que permitem a obtenção de materiais com alta regiorregularidade e propriedades optoeletrônicas. Já a polimerização em cadeia é apresentada como uma abordagem mais precisa para a síntese de polímeros conjugados, devido ao seu maior controle estrutural, possibilitando a obtenção de polímeros com massas molares controladas, baixa polidispersão e formação de copolímeros em bloco (Xu et al., 2023).

A depender do tipo de monômero utilizado durante o processo de polimerização, os polímeros resultantes podem ser classificados em homopolímeros ou copolímeros. Os homopolímeros são formados a partir de um único tipo de mero repetido ao longo de toda cadeia e os copolímeros são formados pela combinação de dois ou mais tipos de meros (Canevarolo Jr, 2002). Entre os principais tipos estão os copolímeros aleatórios ou estatísticos, nos quais os meros se distribuem de maneira aleatória na cadeia; os copolímeros alternados, em que há uma alternância regular entre os meros; os copolímeros em bloco, com longas sequências de um mesmo mero agrupadas ao longo da cadeia; e os copolímeros enxertados (ou graftizados), que apresentam uma cadeia principal composta por um tipo de mero e cadeias laterais formadas por meros diferentes (Mano e Mendes, 1999). A Figura 3 mostra os tipos de copolímeros descritos.

Figura 3- Tipos de copolímeros

Fonte: Autora, 2026

Os polímeros hidrossolúveis são amplamente utilizados por sua capacidade de modificar as propriedades reológicas de soluções aquosas. Quando adicionadas pequenas quantidades desses materiais em meio aquoso, ocorre um aumento expressivo da viscosidade da solução (Lima, 2015). Dependendo do tipo de aplicação desejada, é fundamental que a viscosidade do sistema se mantenha estável, ou apresente um aumento progressivo à medida que a temperatura é elevada. No entanto, o comportamento típico da maioria dos polímeros em solução é o oposto, observa-se uma redução da viscosidade com o aumento da temperatura (Kuba et al., 2022).

Devido as necessidades de aplicações, surgiram os chamados polímeros estímulo-responsivos, também conhecidos como polímeros inteligentes. Esses materiais apresentam a capacidade de alterar de maneira reversível suas propriedades físico-químicas quando submetidos a estímulos externos (Francis et al., 2016). Os principais tipos de estímulos que podem desencadear essas mudanças são físicos, como temperatura, luz, campo magnético e pressão; químicos, como variação de pH e força iônica; ou biológicos, como interações com enzimas ou outras biomoléculas (Xiang et al., 2019).

Ma e colaboradores (2023) sintetizaram um polímero dibloco chamado Poly(CAD-b-EDM), composto por um bloco zwitteriônico do tipo carboxibetaina (CAD) e um bloco contendo grupos de amina terciária (EDM), responsável pela resposta do material às variações de pH. A síntese dos polímeros foi realizada por meio da polimerização por transferência

reversível de cadeias via adição-fragmentação (RAFT), que é uma polimerização radicalar em cadeia, utilizando o 3-(propoxycarbonotioil)sufanil propanoato (POP) como agente de transferência de cadeias. A reação ocorreu a 70 °C em uma mistura de água e 1,4-dioxanoutilizada para favorecer a solubilização dos monômeros. O polímero obtido apresentou comportamento sensível ao pH, avaliado por meio de medidas de turbidez em solução aquosa. Os ensaios foram realizados utilizando ácido clorídrico para acidificação do meio e hidróxido de sódio para obtenção de meio alcalino. Os resultados mostraram que em $\text{pH} < 7,0$ as soluções permanecem transparentes, enquanto em $\text{pH} > 9,0$ ocorre a turbidez, conforme a Figura 4 (Ma et al., 2023).



Fonte: (Ma et al., 2023)

Wang e colaboradores (2024) projetaram um gel polimérico magnético inteligente para otimizar a recuperação de petróleo em reservatórios de alta temperatura, utilizando principalmente poliacrilamida e um ferrofluido de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PEI}$, e avaliaram a sensibilidade do gel à estímulos como campo magnético. A caracterização estrutural do material foi feita por espectroscopia na região do infravermelho, difração de raios X (DRX), espalhamento de luz dinâmico (DLS), análise termogravimétrica (TGA) e microscopia eletrônica de varredura. Também foram estudadas propriedades reológicas e a estabilidade do gel polimérico. Os testes mostraram alta resistência mecânica, após envelhecer por 30 dias a 120 °C, e manipulação e direcionamento magnético. Devido às nanopartículas magnéticas, o polímero apresenta deformação e movimentação controlada, podendo ser guiado rapidamente através de campos magnéticos externos (Wang et al., 2024).

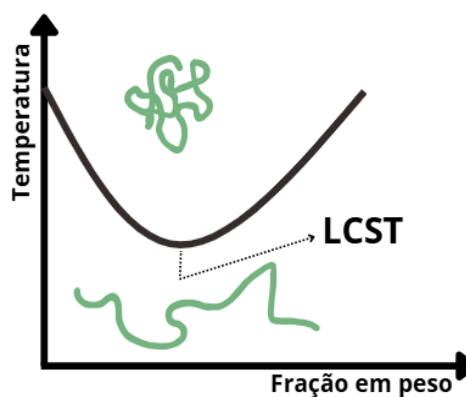
Dentre os polímeros estímulo-responsivos, os mais comumente utilizados são os termorresponsivos, que se destacam por apresentarem comportamento sensível às variações de

temperatura, exibindo uma temperatura crítica na qual ocorre uma mudança significativa em propriedades como solubilidade e viscosidade (Stetsyshyn et al., 2021; Teotia; Sami; Kumar, 2015). Esse comportamento ocorre devido a uma condição: temperatura consoluta inferior (do inglês *lower critical solution temperature* - LCST). Polímeros com LCST são solúveis em temperatura abaixo desse ponto (solução límpida), tornando-se insolúveis quando a temperatura se eleva (solução turva) (Halperin; Kröger; Winnik, 2015; Zhang et al., 2017).

Tingji e colaboradores (2022) sintetizaram um polímero denominado PNVDE (poli(*N*-vinilcaprolactama-*co-N,N*-dietil acrilamida)) para atuar no controle da reologia de fluidos de perfuração à base de água. Os autores observaram que o material atua em uma ampla faixa de temperatura, de 4 a 60 °C, se mostrando menos viscoso em baixas temperaturas e mais viscoso em altas temperaturas. Segundo os autores, nessa faixa, a adição do polímero reduziu em cerca de 20 % a variação das propriedades reológicas do fluido em relação ao fluido base sem o PNVDE (Tingji et al., 2022).

O fenômeno relacionado à LCST está diretamente associado ao balanço entre forças hidrofílicas e hidrofóbicas nas cadeias poliméricas (Liu et al., 2022), como mostrado na Figura 5. Em temperaturas inferiores à LCST, predominam as interações hidrofílicas com o solvente, mantendo o polímero disperso em solução. Entretanto, quando a temperatura ultrapassa esse limite, há um rompimento dessas interações com o meio, e as interações hidrofóbicas entre as cadeias passam a ser dominantes, promovendo a associação das macromoléculas e resultando na formação de estruturas como géis ou agregados insolúveis (Bansal et al., 2019; Zhao; Ma; Zhu, 2019).

Figura 5- Diagrama de fases para o sistema polímero-solvente em relação a LCST

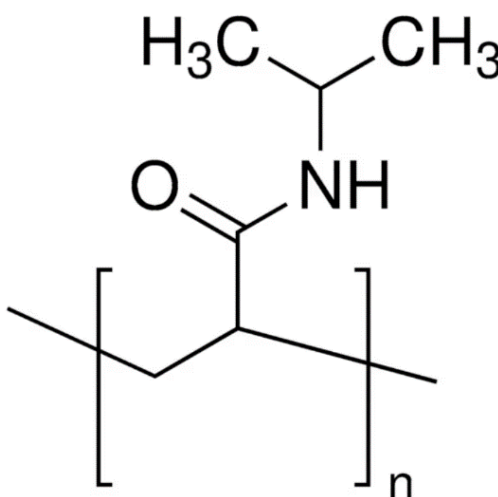


Fonte: Autora, 2026

A *N*-isopropilacrilamina (NIPAM) é um monômero vinílico amplamente empregado na síntese de polímeros estímulo-responsivos, especialmente aqueles sensíveis à variação de temperatura (Flemming et al., 2021). Sua estrutura química apresenta simultaneamente grupos hidrofílicos, associados à função amida, e grupos hidrofóbicos, provenientes do radical isopropila, característica fundamental para o comportamento termossensível do polímero formado (Jang et al., 2021).

A partir da polimerização da NIPAM é possível obter a poli(*N*-isopropilacrilamida) (PNIPAM), Figura 6, um dos polímeros termorresponsivos mais estudados em meio aquoso (Roget; Carter-Fenk; Fayer, 2022). Esse material apresenta uma temperatura consoluta inferior (LCST) em água próxima de 32 °C. Abaixo dessa temperatura, as cadeias poliméricas permanecem hidratadas e bem dispersas no solvente, formando uma solução homogênea (Raghuwanshi et al., 2023a). Acima dessa temperatura, ocorre o enfraquecimento das interações polímero-água, resultando no colapso das cadeias e em mudanças nas propriedades reológicas do sistema (Gialouri et al., 2023). Devido a esse comportamento reversível e sensível à temperatura, a PNIPAM tem sido amplamente explorada em sistemas inteligentes e na modulação reológica de soluções aquosas, especialmente quando combinada com polímeros hidrossolúveis de origem natural (Sun et al., 2020).

Figura 6 - Representação estrutural da PNIPAM



Fonte: Autora, 2026

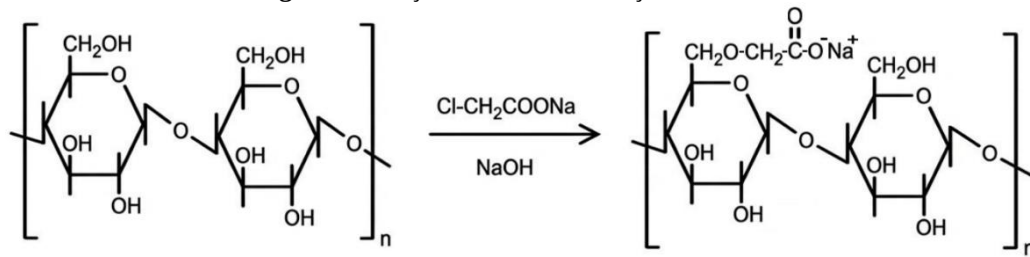
Chen e colaboradores (2024) realizaram uma pesquisa destinada à conservação de água no solo. O estudo aborda o desenvolvimento de hidrogéis termossensíveis com estrutura de rede

semi-interpenetrante via polimerização *in situ* de *N*-isopropilacrilamida (NIPAM) em solução de carboximetilcelulose (CMC) à temperatura ambiente. Foi constatado que a proporção em massa entre CMC e NIPAM é o fator-chave na regulação da rede macromolecular, promovendo o deslocamento da LCST de 34,4 °C para 35,8 °C quando essa proporção aumentou de 0 para 1,2 (Chen et al., 2024b).

Wu e colaboradores (2025) estudaram a síntese de um hidrogel termossensível baseado em uma rede de poliuretano modificado com PNIPAM (PNIPAM-PU) e carboximetilcelulose (CMC), direcionado à liberação controlada de fármacos. O procedimento experimental baseou-se na reticulação da CMC com ácido cítrico, resultando em uma estrutura porosa, com poros de aproximadamente 43 µm, conforme verificado por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise reológica confirmou uma transição sol-gel na temperatura de 37 °C, característica fundamental para a resposta térmica do sistema (Wu et al., 2025).

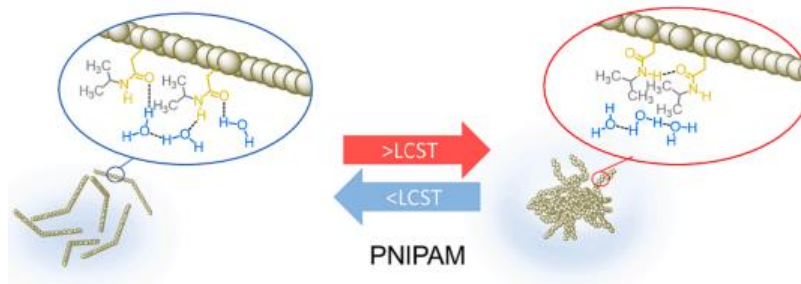
Embora polímeros termorresponsivos apresentem excelente capacidade de resposta às variações de temperatura, seu uso isolado pode ser limitado em aplicações que demandam simultaneamente estabilidade térmica, estabilidade química e modulação reológica. Dessa forma, uma estratégia amplamente explorada na literatura consiste na combinação desses polímeros termorresponsivos com matrizes hidrossolúveis de origem natural ou semissintética, visando integrar diferentes propriedades.

A celulose é amplamente conhecida como o polímero mais abundante na natureza, sendo uma fonte renovável de matéria-prima com grande potencial para aplicações seguras e biocompatíveis (Barros et al., 2021). Sua estrutura apresenta elevada cristalinidade, resistência mecânica e é insolúvel em água, características que a tornam estável, porém pouco reativa em sua forma original. No entanto, por meio de reações químicas e derivatização, é possível modificar essa estrutura rígida e introduzir grupos funcionais específicos ao longo da cadeia polimérica (De Paoli, 2008). A carboximetilcelulose (CMC) é um derivado obtido a partir da modificação química da celulose, por meio de sua reação com ácido monocloacético em meio alcalino e na presença de solventes orgânicos, sob condições heterogêneas (Chalah et al., 2022). Esse processo, conhecido como reação de Williamson, promove a substituição parcial dos grupos hidroxila (-OH) presentes nas unidades da cadeia celulósica por grupos carboximetil (-CH₂COO⁻) nas posições 2,3 e 6 do anel de glicose (Chalah et al., 2022), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Reação de carboximetilação da celulose

Fonte: Autora, 2026

Raghuwanshi e colaboradores (2023b) desenvolveram hidrogéis de nanofibras de celulose (CNF) funcionalizadas com PNIPAM, comparando o enxerto químico (*grafting*) com a mistura física (*blending*). Por meio de espalhamento de neutrons (SANS/USANS), os autores observaram que a enxertia deslocou de 32 °C para 36 °C, ideal para aplicações biomédicas. Acima dessa temperatura, o colapso hidrofóbico das cadeias enxertadas traciona as CNF, convertendo a suspensão em um gel estável com paredes densas de 100 nm e vazios de 290 nm, conforme a Figura 8 (Raghuwanshi et al., 2023b).

Figura 8- Comportamento dependente da temperatura de PNIPAM-*g*-CNF em água abaixo e acima da LCST

Fonte: Adaptado de (Raghuwanshi et al., 2023b)

3.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Durante o processo de perfuração de poços para a extração de petróleo e gás, empregam-se fluidos de perfuração formulados com diferentes compostos químicos, cada um com funções específicas adaptadas às particularidades de cada poço (Wei et al., 2019). Com o crescimento das preocupações ambientais e a necessidade de mitigar os impactos negativos associados às atividades da indústria petrolífera, houve uma crescente demanda por formulações mais

sustentáveis. Nesse contexto, a indústria passou a desenvolver e adotar fluidos de perfuração com menor potencial poluente, capazes de preservar o meio ambiente sem comprometer a eficiência operacional (Leal, 2022).

De acordo com a definição de API (Americam Petroleum Institute, 2019), fluido de perfuração é qualquer fluido em circulação utilizado para viabilizar o processo de perfuração. Eles são frequentemente classificados com base no componente predominante que forma a fase contínua do sistema, esse componente pode ser gás, água ou óleo. A escolha da fase contínua está diretamente relacionada às necessidades específicas de cada operação de perfuração, levando em conta fatores como profundidade do poço, tipo de formação geológica e condições operacionais (Peixoto et al., 2021).

Os fluidos base água são conhecidos por seu menor impacto ambiental e custo mais acessível, mas enfrentam limitações quanto à estabilidade térmica, além de não serem adequados para formações geológicas compostas por argilas reativas à água (Quitian-Ardila et al., 2024). Já os fluidos base óleo oferecem alta estabilidade térmica e bom desempenho em grandes profundidades, no entanto, seu elevado custo e potencial de impacto ambiental representam desvantagens significativas (Mahmoud; Gajbhiye; Elkatatny, 2024; Perera; Wegala, 2024). Por fim, os fluidos à base de gás se caracterizam pela remoção dos cascalhos por meio de fluxos gasosos em alta velocidade, como ar, gás natural ou gases de exaustão (Bemani et al., 2022).

Além da escolha adequada da fase contínua, um fluido de perfuração deve apresentar um conjunto de propriedades físico-químicas que garantam a eficiência e a segurança da operação. Entre as propriedades desejáveis destacam-se a capacidade de transportar os cascalhos até a superfície, manter esses sólidos em suspensão quando a circulação é interrompida, exercer controle adequado da pressão da formação, promover o resfriamento e a lubrificação da broca, além de formar um reboco fino e pouco permeável nas paredes do poço, contribuindo para a sua estabilidade (Paixão et al., 2021). Adicionalmente, o fluido deve apresentar estabilidade térmica e química nas condições encontradas durante a perfuração, bem como ser bombeável e compatível com os equipamentos utilizados (Sterling Mora; Moreno, 2021).

Para que essas propriedades sejam alcançadas, os fluidos de perfuração são formulados com a utilização de diferentes aditivos, cada um com uma função específica dentro do sistema. Dentre os principais aditivos empregados destacam-se os agentes viscosificantes, responsáveis

pelo ajuste das propriedades reológicas, os controladores de filtrado, que reduzem a perda de fluido para a formação (Hasse et al., 2020; Zou et al., 2024), os inibidores, utilizados para minimizar a hidratação e o inchamento de argilas (Jose M. Cortes-Cano et al., 2022), os lubrificantes, que reduzem o atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do poço (Magadova et al., 2021), além de agentes alcalinizantes, bactericidas e dispersantes. Nesse contexto, os polímeros hidrossolúveis desempenham um papel fundamental uma vez que permitem o controle eficiente da viscosidade e da estabilidade do fluido, mesmo quando utilizados em baixas concentrações.

Ali e colaboradores (2024) avaliaram a viabilidade do pó de batata (PB), um material rico em amido, como um aditivo ecológico e biodegradável para fluidos de perfuração à base de água, propondo uma alternativa sustentável aos aditivos sintéticos convencionais. A investigação demonstrou que a eficiência do material depende diretamente da distribuição granulométrica e a concentração aplicada (0,5 a 2 % em peso), partículas ultrafinas se destacaram por promover uma redução de até 43 % na taxa de filtração e uma diminuição de 70 % na espessura do reboco, dando maior estabilidade ao poço. Do ponto de vista reológico, a incorporação de 0,5 % de PB ultrafino elevou a viscosidade plástica de 3 para 6,8 cP, otimizando a capacidade de suspensão e transporte de cascalhos (Ali et al., 2024).

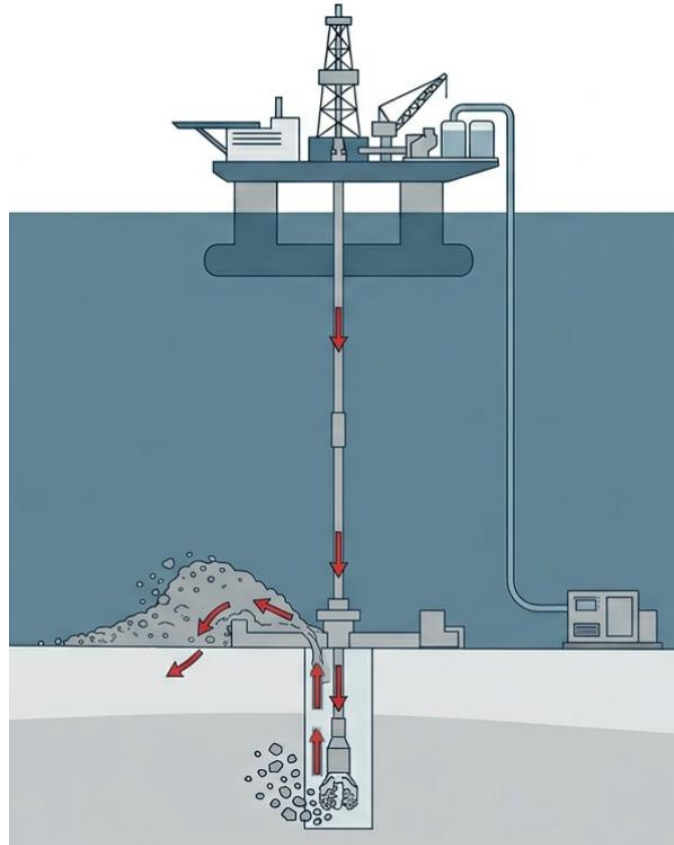
Shen e colaboradores (2021) investigaram o potencial dos nanocristais de celulose carboxilada (C-CNC) como inibidores de xisto sustentáveis para fluidos de perfuração à base de água, em substituição aos inibidores químicos convencionais. A pesquisa demonstrou que o C-CNC supera aditivos convencionais, como o cloreto de potássio (KCl) e polímeros contendo aminas, como aminas policatiônicas, poliéster amina (PA) e poliéter diamina (PEA). O material alcançou uma taxa de recuperação de xisto de 78,8 % (contra 62,4 % do KCl) e uma redução de 76,8 % no inchamento linear das argilas, em relação ao KCl. Este desempenho é atribuído ao mecanismo de formação de uma estrutura *core-shell* via interações eletrostáticas e pontes de hidrogênio que encapsula as partículas de argila, aliada ao bloqueio físico de microporos e fendas da rocha, o que reduz a perda de filtrado em até 74 % (Shen et al., 2021).

Outro aspecto relevante relacionado aos fluidos de perfuração é referente a sua possibilidade de reutilização. Dependendo da composição do fluido, das condições operacionais e do tipo de formação perfurada, alguns sistemas podem ser tratados e reutilizados ao longo da operação, enquanto outros são formulados para uso único (Akers, 2011). A reutilização envolve etapas como a remoção de sólidos indesejados, correção das propriedades reológicas e ajuste da composição (Jiang et al., 2018). No entanto, nem todos os fluidos

apresentam viabilidade técnica ou econômica para esse reaproveitamento, especialmente aqueles desenvolvidos para aplicações específicas ou de curta duração (Kaliyev et al., 2025).

Devido as questões técnicas e econômicas associadas à reutilização de determinados fluidos de perfuração, foi desenvolvida a estratégia conhecida como *pump and dump*, que é amplamente utilizada nas fases iniciais do poço. Nesse tipo de operação, não há uma coluna de retorno conectando o poço à plataforma, o que impede a recirculação do fluido de perfuração (Figura 9). Dessa forma, o fluido bombeado retorna diretamente para o leito marinho juntamente com os cascalhos gerados durante a perfuração (Chen et al., 2024a). Em razão dessa característica operacional, os fluidos que operam em sistemas *pump and dump* precisam apresentar baixa toxicidade e elevada compatibilidade ambiental (Akers, 2011).

Figura 9- Ilustração simplificada do mecanismo de perfuração *pump and dump*



Fonte: Autora, 2026

Akers e colaboradores (2011), analisaram a aplicação de fluidos de perfuração à base de salmoura supersaturada em operações de perfuração *pump and dump* na Bacia de Santos, Brasil,

com o objetivo de mitigar o alargamento excessivo do poço durante a perfuração de formações salinas. Tradicionalmente, a estratégia *pump and dump* em água profundas se baseia na diluição do fluido densificado com água do mar, prática que resulta em fluidos sub-saturados que lixiviam as paredes salinas e comprometem a integridade do poço e a quantidade da cimentação. Em contraste, a operação estudada demonstrou que o uso de salmoura supersaturada permite a manutenção da estabilidade geométrica da seção, minimizando a necessidade de operações corretivas ou de revestimentos adicionais (Akers, 2011).

Embora a estratégia *pump and dump* apresente vantagens operacionais, sua aplicação também traz desafios relacionados ao desempenho dos fluidos de perfuração. Como esses fluidos não são recirculados e ficam expostos a variações significativas de temperatura ao longo do poço, é importante o desenvolvimento de formulações que mantenham propriedades adequadas tanto na superfície quanto em profundidade. Nesse contexto, o fluido deve combinar facilidade de bombeio, capacidade de transporte de cascalhos, estabilidade reológica e baixa toxicidade. Diante disso, o uso de polímeros inteligentes tem se mostrado uma alternativa promissora.

Dentre os polímeros empregados em fluidos de perfuração, os polímeros termorresponsivos têm despertado crescente interesse devido à sua capacidade de alterar suas propriedades físico-químicas em resposta a variação de temperatura (Wang et al., 2023). Esse comportamento é especialmente interessante em fluidos de perfuração, já que ao longo da formação do poço, as condições térmicas variam significativamente, o que faz com que esses polímeros sofram alterações em sua estrutura molecular, influenciando diretamente propriedades como viscosidade e estabilidade do fluido (Wang et al., 2023). Com isso, tornam-se capazes de melhorar o transporte de cascalhos, auxiliar no controle de filtrado e contribuir para a estabilidade das formações perfuradas.

Dong e colaboradores (2019) desenvolveram uma bentonita termorresponsiva via modificação com monômero de *N*-isopropilacrilamida (NIPAM), propondo uma estratégia para o controle reológico e de filtração em fluidos de perfuração à base de água operando sob condições térmicas. A caracterização físico-química evidenciou que a adsorção da NIPAM na matriz argilosa ocorre mediante interações químicas (pontes de hidrogênio e troca catiônica). O sistema exibe um comportamento termorresponsivo crítico entre 70 °C e 110 °C. Ao exceder 70 °C, ocorre a expulsão da água de adsorção, com consequente redução do espaçamento basal e aumento acentuado da hidrofobicidade do material. Este mecanismo promove a formação de

um reboco mais denso e hidrofóbico, o que reduziu a perda de filtrado em até 70 % em comparação a fluidos convencionais (Dong et al., 2019).

Xie e colaboradores (2021) apresentaram o desenvolvimento do polímero termorresponsivo (PGBA), sintetizado a partir de um novo macromonômero termorresponsivo (BA), visando à estabilização reológica de fluidos de perfuração em ambientes de águas profundas. O aditivo se destaca pela robustez térmica, apresentando uma temperatura de decomposição inicial em 313 °C, valor superior aos 289 °C observado no polímero de referência (PAMPS). O mecanismo fundamental de atuação se baseia na LCST, ao ultrapassar a sua LCST os segmentos poliméricos tornam-se hidrofóbicos e promovem associações intramoleculares e intermoleculares, que compensam a redução da viscosidade do meio, contrariando o comportamento convencional de decaimento viscoso (Xie et al., 2021).

Bai e colaboradores (2022) desenvolveram um agente tamponante polimérico termossensível por meio da enxertia de *N*-isopropilacrilamida (NIPAM) e ácido 2-acrilamida-2-metilpropanossulfônico (AMPS) na superfície de nanopartículas de SiO₂ modificadas com o viniltrimetoxissilano. O material sintetizado, com tamanho de partícula de 49,665 µm, exibiu notável estabilidade térmica e uma resposta responsiva ao estímulo térmico. Sob condições de temperatura e pressão de perfuração, o polímero promove a formação de uma membrana hidrofóbica densa que sela fisicamente microporos e microfraturas na rocha, reduzindo drasticamente a perda de filtrado e impedindo a intrusão de água no folhelho (Bai et al., 2022).

Portanto, uma alternativa para a composição de fluidos de perfuração de sistema *pump and dump* pode ser a utilização de copolímeros de termorreponsivos, que em determinadas condições de temperatura e salinidade podem se agregar. A elevação da temperatura e da salinidade podem promover aumento viscosidade desses sistemas, enquanto os materiais são fluidos a baixas temperaturas. Esse comportamento permite a obtenção de soluções concentradas de polímero para armazenamento em campo, tendo em vista a facilidade de solubilização desses polímeros, mesmo em altas concentrações. A salinidade adicionada pela água do mar, com a diluição em campo do polímero termorresponsivo, pode levar a formação de interações intermoleculares que geram o aumento de viscosidade das soluções poliméricas.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAIS

Carboximetilcelulose sódica (CMC) foi obtida da Sigma Aldrich Brasil. Sua massa molar ponderal média de $9,0 \times 10^4$ g/mol e seu grau de substituição (DS) igual a 1,0 foram fornecidos pelo fabricante. *N*-isopropilacrilamida (NIPAM), persulfato de potássio (KPS) e *N,N,N',N'*-tetrametiletenodiamina (TEMED) foram obtidos da Sigma Aldrich Brasil.

Cloreto de sódio (NaCl) foi adquirido da ASC Científica, cloreto de magnésio (MgCl_2) da Synth, sulfato de sódio (Na_2SO_4) foi obtido da Dinâmica, e cloreto de cálcio (CaCl_2) foi obtido da Neon.

Oxido de magnésio (MgO), sulfato de bário (BaSO_4), bentonita sódica, amido, cloreto de sódio (NaCl) e triazina foram gentilmente fornecidos pela Petrobras.

4.2 SÍNTESES

4.2.1 Síntese dos copolímeros

Inicialmente foi dissolvido 2 g de CMC em 60 ml de água destilada em um balão de três bocas, mantido sob agitação magnética contínua de um dia para o outro (overnight), a fim de garantir a completa solubilização do polímero. Decorrido esse tempo, adicionou-se a NIPAM à solução e também 20 ml de água destilada. Em seguida, o sistema foi submetido à borbulhamento com nitrogênio gasoso por 30 minutos, com o objetivo de remover o oxigênio. Logo após, foi adicionado o KPS, previamente dissolvido em 10 ml de água destilada e o TEMED, também diluído em 10 ml de água destilada.

Depois de adicionar os iniciadores, a reação foi conduzida sob agitação constante por mais uma hora e durante esse tempo, o balão foi mantido sob borbulhamento com nitrogênio e para evitar o aumento da temperatura causado pela reação, utilizou-se um banho de gelo, mantendo a temperatura constante abaixo dos 30 °C durante todo o processo.

Ao término da reação, o material obtido foi submetido a um processo de purificação por diálise em água destilada, utilizando membranas com tamanho de corte de 12000 g/mol da

Sigma Aldrich Brasil, até que a condutividade da solução atingisse um valor próximo ao da água destilada. Após a purificação, o produto foi seco por liofilização.

Esse procedimento foi realizado em três diferentes proporções entre CMC e NIPAM, ilustradas na Tabela 1, a fim de se obter dois copolímeros e o homopolímero PNIPAM (ver seção 4.2.2).

Tabela 1- Proporções utilizadas nas sínteses

Polímero	CMC	NIPAM	KPS	TEMED
CMC1-g-PNIPAM2 (1:2)	$1,03 \times 10^{-2}$ mol	$2,2 \times 10^{-2}$ mol	$2,07 \times 10^{-4}$ mol	$6,34 \times 10^{-4}$ mol
CMC1-g-PNIPAM6 (1:6)	$5,16 \times 10^{-3}$ mol	$3,3 \times 10^{-2}$ mol	$2,07 \times 10^{-4}$ mol	$6,34 \times 10^{-4}$ mol
PNIPAM	-	$4,4 \times 10^{-2}$ mol	$2,07 \times 10^{-4}$ mol	$6,34 \times 10^{-4}$ mol

Fonte: Autora, 2026

4.2.2 Síntese da PNIPAM

Também foi realizada uma síntese para a PNIPAM, em que foram solubilizadas 5 g de NIPAM em 80 ml de água destilada, sob agitação magnética contínua. Após a solubilização, foi realizado borbulhamento com nitrogênio por 30 minutos. Logo após, foi adicionado o KPS, previamente dissolvido em 10 ml de água destilada e o TEMED, também diluído em 10 ml de água destilada, o tempo de reação foi 1 hora sob agitação constante e banho de gelo, para manter a temperatura abaixo dos 30 °C. A purificação foi realizada por diálise e a secagem por liofilização. A Tabela 1 evidencia as proporções utilizadas na síntese.

4.3 PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Para a realização das análises, foram preparadas diferentes soluções poliméricas de CMC, PNIPAM e dos copolímeros sintetizados nas proporções estabelecidas (CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6).

Inicialmente, foram preparadas soluções na concentração de 5 g/L de polímero em água destilada, para avaliação do comportamento dos sistemas em meio aquoso.

Também foram preparadas soluções na concentração de 10 g/L de polímero em água destilada, com o objetivo de avaliar a influência do aumento da concentração.

Para o estudo da influência da salinidade, foram preparadas soluções na concentração de 5 g/L de polímero em soluções aquosas de NaCl nas concentrações de sal de 0,5 mol/L e 1,0 mol/L.

Por fim, para o estudo das diluições, foi preparada uma solução estoque na concentração de 30 g/L de polímero, em água destilada, a partir da qual foram obtidas soluções nas concentrações de 15, 10, 5 e 1 g/L, por diluição em água do mar sintética (AMS), cuja composição de sais utilizados é exibida na Tabela 2. A AMS foi produzida de acordo com as normas da ASTM D 1141-98 (2008), utilizando apenas sais com concentração acima de 1 g/L.

Tabela 2- Sais utilizados para composição da água do mar sintética

Sal	Quantidade
NaCl	24,53 g/L
MgCl ₂	5,20 g/L
Na ₂ SO ₄	4,09 g/L
CaCl ₂	1,19 g/L

Fonte: Autora, 2026

4.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE PROPRIEDADES

4.5.1 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

As análises de infravermelho foram realizadas em um espectrofotômetro Perkin Elmer, modelo Spectrum Two, equipado com acessório de refletância total atenuada (ATR). Os espectros foram registrados na faixa espectral compreendida entre 600 e 4000 cm⁻¹, a uma resolução de 4 cm⁻¹ e 32 scans.

4.5.2 Potencial zeta

O potencial zeta foi medido utilizando o equipamento Stabino II, da Colloid Metrix. Para as análises, as amostras foram preparadas na concentração polimérica de 5 g/L em água destilada, e cada medição foi realizada em triplicata, a uma temperatura de 25 °C.

4.5.3 Espalhamento de luz dinâmico (DLS)

O diâmetro hidrodinâmico dos polímeros foi determinado por espalhamento de luz dinâmico, utilizando o equipamento NANO-flex II 180°, da Colloid Metrix, operando a 25 °C. As análises foram realizadas com soluções poliméricas na concentração de 5 g/L preparadas em água destilada. Antes das medidas serem realizadas, as amostras foram filtradas em membranas Millipore com tamanho de poro de 0,45 µm.

4.5.4 Espectroscopia na região do ultravioleta e visível (UV-Vis)

A temperatura de turvação das soluções poliméricas foi avaliada para soluções aquosas de polímeros a uma concentração polimérica de 5 e 10 g/L em água destilada, e a 5 g/L em 1 mol/L de NaCl. Para tanto, foi utilizado um espectrofotômetro Evolution One Plus (Thermo Scientific), acoplado a um sistema de controle térmico Peltier (PCCU1). As medidas foram monitoradas no comprimento de onda de 500 nm.

4.5.5 Medidas reológicas

As análises reológicas foram realizadas em um reômetro Haake Mars 60 (Thermo Scientific), equipado com sensor de cilindros coaxiais (modelo CC41 DG/Ti), acoplado a um módulo de temperatura TM-EL-C e com um trocador de calor do tipo Accel 500 LT. As soluções poliméricas, preparadas em diferentes concentrações e meios aquosos (de acordo com o item 4.3), foram avaliadas em diferentes condições experimentais: variação da taxa de cisalhamento entre 0,1 e 1000 s⁻¹ e temperaturas de 25, 30, 40 e 60 °C.

4.4 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Os fluidos de perfuração foram formulados utilizando água como fase contínua, e foram utilizados os aditivos descritos na Tabela 3. Para o estudo, foram adicionados a esta formulação a carboximetilcelulose (CMC) ou os copolímeros sintetizados (CMC1-*g*-PNIPAM2 e CMC1-*g*-PNIPAM6).

Foram preparados dois fluidos, um fluido contendo o copolímero CMC1-*g*-PNIPAM2 e um fluido contendo o copolímero CMC1-*g*-PNIPAM6. As formulações foram preparadas com o auxílio de um misturador Hamilton Beach, para adequada dispersão e homogeneização dos constituintes. O envelhecimento foi conduzido durante 16 horas em estufa rotativa M1750 Roll Oven da Grace Instrument a temperatura ambiente (25 °C), apenas com o intuito de dar tempo para os polímeros serem solubilizados e a argila hidratar completamente.

Tabela 3- Formulação utilizada para preparo dos fluidos de perfuração aquosos

Formulação	Quantidade	Tempo de agitação
Água	350 mL	-
MgO	0,3 g	5 min
Bentonita	10 g	10 min
Amido	6 g	10 min
Polímero (copolímeros CMC-<i>g</i>-PNIPAM)	0,5 g	10 min
NaCl	60 g	5 min
Triazina	1 g	5 min
BaSO₄	20 g	10 min

Fonte: Autora, 2026

4.4.1 Medidas reológicas

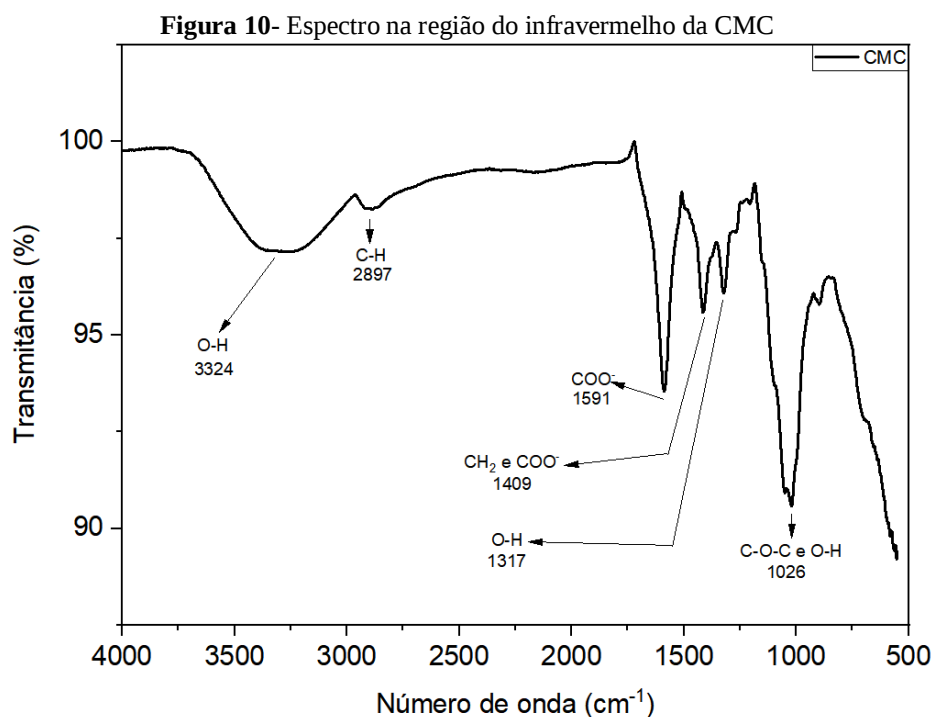
O comportamento reológico dos fluidos de perfuração foi determinado por meio de um viscosímetro rotacional de cilindros coaxiais da marca FANN, modelo 35-A, com mola de torção R1-B1, operando à temperatura de 25 °C e 49 °C, conforme estabelecido pela norma API RP 13B-1 (2019). Durante os ensaios, as amostras foram submetidas às seguintes velocidades de rotação: 600, 300, 200, 100, 6 e 3 RPM, equivalentes a taxas de cisalhamento de 1021,8; 510,9; 340,6; 170,3; 10,2 e 5,1 s⁻¹.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR)

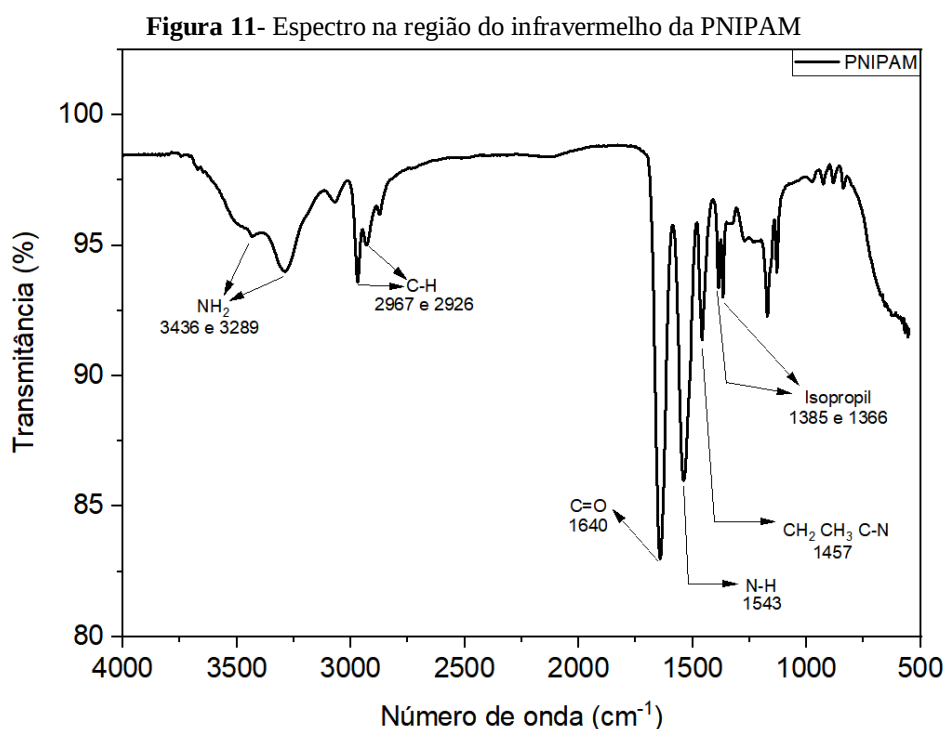
A técnica de FTIR foi utilizada para confirmar a estrutura química dos precursores e o sucesso da síntese dos copolímeros CMC-g-PNIPAM. As análises permitem identificar os grupos funcionais presentes através de suas bandas de absorção características.

O espectro da CMC (Figura 10) exibe bandas fundamentais da estrutura da celulósica modificada. Observa-se uma banda larga em 3324 cm^{-1} , atribuída ao estiramento das ligações O-H de grupos hidroxila envolvidos em pontes de hidrogênio. O pico em 2897 cm^{-1} refere-se ao estiramento C-H de carbono do tipo sp^3 . As evidências da carboximetilação são confirmadas pelas bandas de 1591 cm^{-1} e 1409 cm^{-1} , que correspondem, respectivamente, aos estiramentos assimétricos e simétricos do grupo carboxilato (Anggun Pertiwi et al., 2021). Adicionalmente, a banda intensa em 1026 cm^{-1} é característica do estiramento da ligação C-O-C do esqueleto glicosídico da celulose.



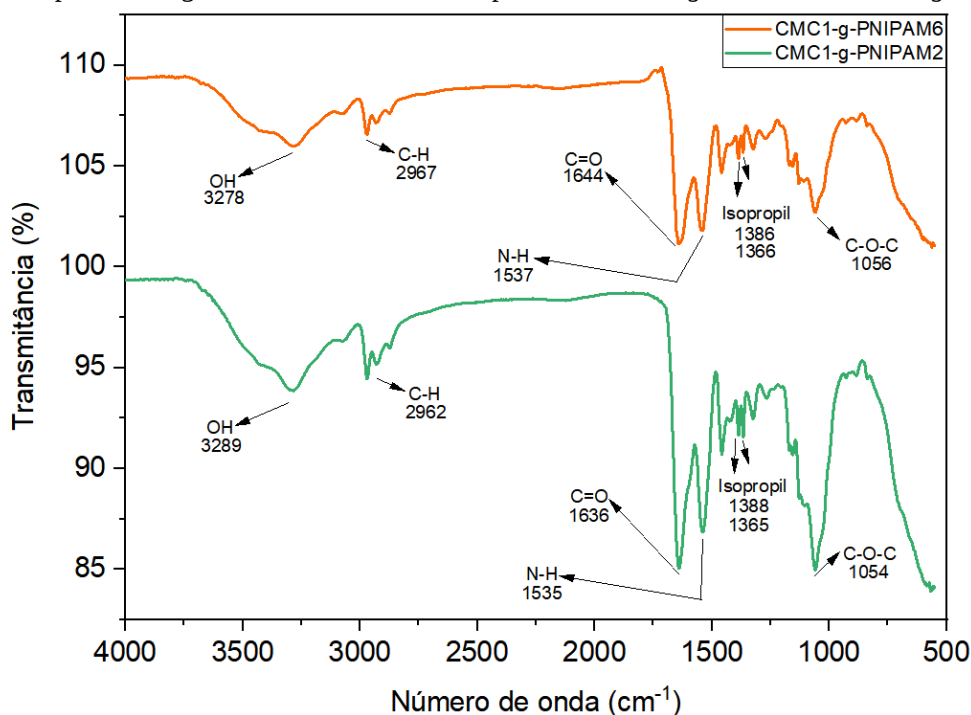
Fonte: Autora, 2026

O espectro da PNIPAM (Figura 11) revela picos característicos desse polímero termorresponsivo. Na região de alta frequência, as bandas em 3436 cm^{-1} e 3289 cm^{-1} correspondem ao estiramento N-H das amidas secundárias (Chernykh et al., 2021). Na região de 2967 e 2926 , observa-se os estiramentos referentes ao grupo metila e metileno. Destacam-se as bandas de Amida I em 1640 cm^{-1} do estiramento C=O e em 1543 cm^{-1} da deformação N-H e estiramento C-N, de Amida II. Ainda, em 1457 cm^{-1} encontram-se absorção de deformação angular dos grupos CH_2 , CH_3 e estiramento axial de C-N de amida (Zakerikhoob et al., 2021). Um ponto determinante para a identificação da PNIPAM são as duas bandas em 1385 cm^{-1} e 1366 cm^{-1} , resultado da deformação angular dimetila geminal do grupo isopropil presente na cadeia.



Fonte: Autora, 2026

A análise dos espectros dos copolímeros CMC-g-PNIPAM (CMC1-g-PNIPAM6 e CMC1-g-PNIPAM2) demonstra a sobreposição das bandas e grupos de ambos os constituintes, revelando a integração bem-sucedida entre a carboximetilcelulose e a poli(*N*-isopropilacrilamida). Os espectros são apresentados na Figura 12.

Figura 12- Espectro na região do infravermelho dos copolímeros CMC1-*g*-PNIPAM6 e CMC1-*g*-PNIPAM2

Fonte: Autora, 2026

O espectro da amostra CMC1-*g*-PNIPAM6 (Figura 12) exibe um perfil espectral predominantemente influenciado pelas vibrações da PNIPAM, devido à sua maior fração mássica no sistema. Observa-se uma banda em 3278 cm^{-1} , resultante da sobreposição dos estiramentos O-H da CMC e N-H da PNIPAM (Aline T. dos Santos et al., 2023). As bandas de amida I (estiramento C=O) em 1644 cm^{-1} e amida II (deformação N-H) em 1537 cm^{-1} apresentam-se intensas e bem definidas, características da alta densidade de grupos amida provenientes da PNIPAM. O duplete em 1386 cm^{-1} e 1366 cm^{-1} é proeminente nesta amostra, confirmando a manutenção da funcionalidade termorresponsiva na estrutura do copolímero. A banda em 1056 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C-O-C da celulose, possui intensidade comparativamente moderada, condizente com o menor teor de CMC.

Na amostra com CMC1-*g*-PNIPAM2 (Figura 12), nota-se um equilíbrio maior entre as bandas características de ambos os precursores. A banda de O-H desloca-se para 3289 cm^{-1} , se apresentando mais larga e intensa em comparação à de CMC1-*g*-PNIPAM6, o que sugere um aumento nas interações por pontes de hidrogênio devido ao maior número de grupos hidroxila da CMC. As bandas de amida I e II sofrem discretos deslocamentos para frequências menores (1636 cm^{-1} e 1535 cm^{-1} , respectivamente). A banda em 1054 cm^{-1} (C-O-C) torna-se

significativamente mais intensa e larga nesta proporção, evidenciando possivelmente a maior incorporação da estrutura celulósica no material sintetizado (Antunes et al., 2024).

Por fim, para todos os polímeros sintetizados houve o desaparecimento da banda de C=C presente no monômero, em torno de 1600 cm^{-1} , evidenciando que houve a reação de polimerização (Young; McDonald, 2021).

5.2 POTENCIAL ZETA

Os valores de potencial zeta obtidos para os sistemas poliméricos estão apresentados na Tabela 4, eles mostram a carga elétrica efetiva na superfície das partículas avaliadas. Observa-se que a CMC apresentou elevado valor negativo, com média de $-110,1\text{ mV}$, indicando alta densidade de carga negativa na superfície das macromoléculas. Valores com magnitude superior a 30 mV em módulo são geralmente associados a sistemas altamente estáveis, devido à forte repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas (Kosmulski, 2022). Nesse caso, o valor negativo observado confirma o caráter aniônico da CMC, decorrente da ionização dos grupos carboxilato (He et al., 2023).

Tabela 4- Valores de potencial zeta (mV) dos sistemas de CMC, CMC1-*g*-PNIPAM2, CMC1-*g*-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L , a 25 °C

Polímero	Potencial zeta (mV)			Média	Desvio Padrão
CMC	-110,5	-110,3	-109,5	-110,1	$\pm 0,43$
CMC1- <i>g</i> -PNIPAM2	-14,9	-16,4	-16,8	-16,0	$\pm 0,82$
CMC1- <i>g</i> -PNIPAM6	-11,5	-10,5	-12,4	-11,4	$\pm 0,78$
PNIPAM	-1,6	-1,5	-1,4	-1,5	$\pm 0,08$

Fonte: Autora, 2026

No caso do sistema CMC1-*g*-PNIPAM2, o potencial zeta médio foi de $-16,0\text{ mV}$, enquanto para o sistema CMC1-*g*-PNIPAM6 o valor médio foi de $-11,4\text{ mV}$. É possível observar uma redução significativa da carga superficial quando comparada a CMC pura. Essa diminuição indica que a incorporação da PNIPAM, que é um polímero neutro, reduz a contribuição dos grupos carboxilato da CMC (Mohan et al., 2024).

A PNIPAM apresentou potencial zeta médio de -1,5 mV, valor muito próximo da neutralidade. Esse resultado confirma sua natureza não iônica, uma vez que sua estrutura não contém grupos fortemente dissociáveis em condições usuais. Sistemas com valores próximos de zero apresentam baixa repulsão eletrostática e, isoladamente, tendem a menor estabilidade coloidal quando comparados a sistemas fortemente carregados (Radu et al., 2024).

5.3 ESPALHAMENTO DE LUZ DINÂMICO (DLS)

Os ensaios de espalhamento dinâmico da luz foram realizados com o objetivo de determinar o diâmetro hidrodinâmico das macromoléculas em solução aquosa na concentração de 5 g/L, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5. A CMC apresentou diâmetro hidrodinâmico médio de 509,26 nm, com desvio padrão de 44,11 nm. Esse valor está relacionado à natureza aniônica do polímero, uma vez que os grupos carboximetil ionizados promoveram repulsão eletrostática ao longo da cadeia, favorecendo uma conformação mais expandida em solução aquosa.

Tabela 5- Valores de diâmetro hidrodinâmico (nm) dos sistemas de CMC, CMC1-*g*-PNIPAM2 , CMC1-*g*-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, a 25 °C

Polímero	Diâmetro hidrodinâmico (nm)			Média	Desvio Padrão
CMC	508,0	465,8	554,0	509,26	± 44,11
CMC1-<i>g</i>-PNIPAM2	375,7	445,7	445,7	422,36	± 40,41
CMC1-<i>g</i>-PNIPAM6	375,7	374,7	374,7	375,03	± 0,57
PNIPAM	486,0	409,7	445,7	447,13	± 38,17

Fonte: Autora, 2026

Já os sistemas contendo CMC-*g*-PNIPAM apresentaram diâmetros hidrodinâmicos menores em comparação a CMC pura e a PNIPAM pura. O sistema CMC1-*g*-PNIPAM2 apresentou tamanho médio de 422,36 nm ($\pm 40,41$ nm), enquanto o sistema CMC1-*g*-PNIPAM6 apresentou diâmetro médio de 375,03 nm ($\pm 0,57$ nm). Esses valores indicam a possível formação de estruturas de menor dimensão em solução, possivelmente associados a graftização da PNIPAM na CMC. No caso do copolímero CMC1-*g*-PNIPAM6, o maior teor de

PNIPAM intensifica esse efeito, resultando no menor diâmetro hidrodinâmico entre os sistemas analisados, e o seu baixo desvio padrão indica maior homogeneidade das cadeias dispersas.

A PNIPAM apresentou diâmetro hidrodinâmico médio de 447,13 nm, com desvio padrão de 38,17 nm. Esse comportamento pode estar relacionado à tendência desse polímero de formar agregados em meio aquoso, mesmo em temperaturas inferiores à sua temperatura crítica inferior de solução (LCST), devido à presença de grupos isopropil com caráter hidrofóbico (Lu et al., 2023). Essas interações hidrofóbicas favorecem a associação entre cadeias, resultando em estruturas com maior volume hidrodinâmico.

5.4 ESPECTROSCOPIA DE ULTRAVIOLETA E VISÍVEL (UV-VIS)

O comportamento termorresponsivo da carboximetilcelulose (CMC), da poli(*N*-isopropilacrilamida) (PNIPAM) e de seus copolímeros foi avaliado através da variação da transmitância em função do aumento da temperatura, apresentados na Figura 14. A transição de uma solução límpida para uma solução turva marca a ocorrência da temperatura de turvação (Figura 13), resultante da transição conformacional das cadeias de um estado hidrofílico (expandido) para um estado hidrofóbico (colapsado) (Liu et al., 2022).

Para identificar a temperatura de turvação, foi monitorada a transmitância das soluções durante o aquecimento. O critério que adotamos foi o de 50% de transmitância, ou seja, o ponto em que a amostra perde metade da sua transparência inicial, passando de uma solução límpida para um aspecto turvo (Bruna Luiza Batista de Lima et al., 2018).

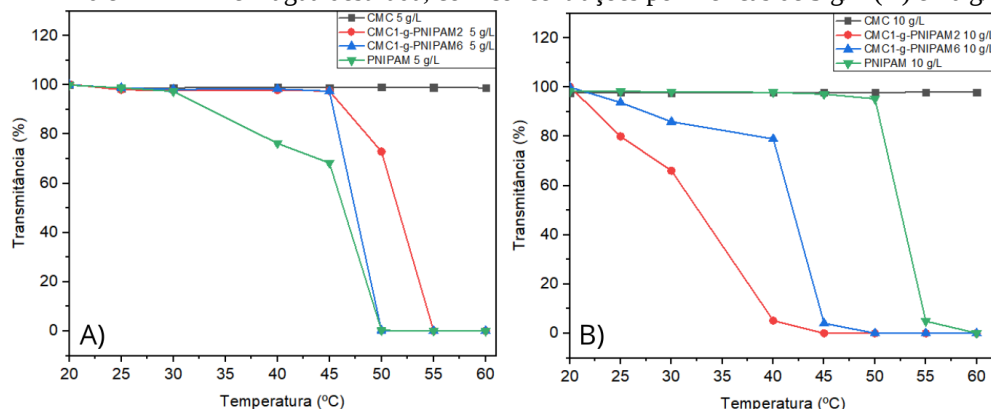
Figura 13- Solução límpida e solução turva



Fonte: Autora, 2026

A análise comparativa entre as concentrações de 5 g/L e 10 g/L (Figura 14) revela que o aumento da concentração polimérica exerce uma influência na LCST. Como esperado, a CMC manteve-se estável com transmitância próxima de 100 % em ambas as concentrações, confirmando sua natureza não termorresponsiva (Pan et al., 2024). Para a PNIPAM, observa-se que em 5 g/L a LCST ocorre à 33 °C e em 10 g/L à 34 °C, conforme mostrado na Tabela 6. Ambos os copolímeros apresentaram uma redução na LCST com o aumento da concentração, isso provavelmente ocorreu pois o aumento da concentração eleva a densidade de cadeias no meio, favorecendo as interações intermoleculares hidrofóbicas, facilitando a formação de agregados e antecipando a turvação da solução (Chen et al., 2024c).

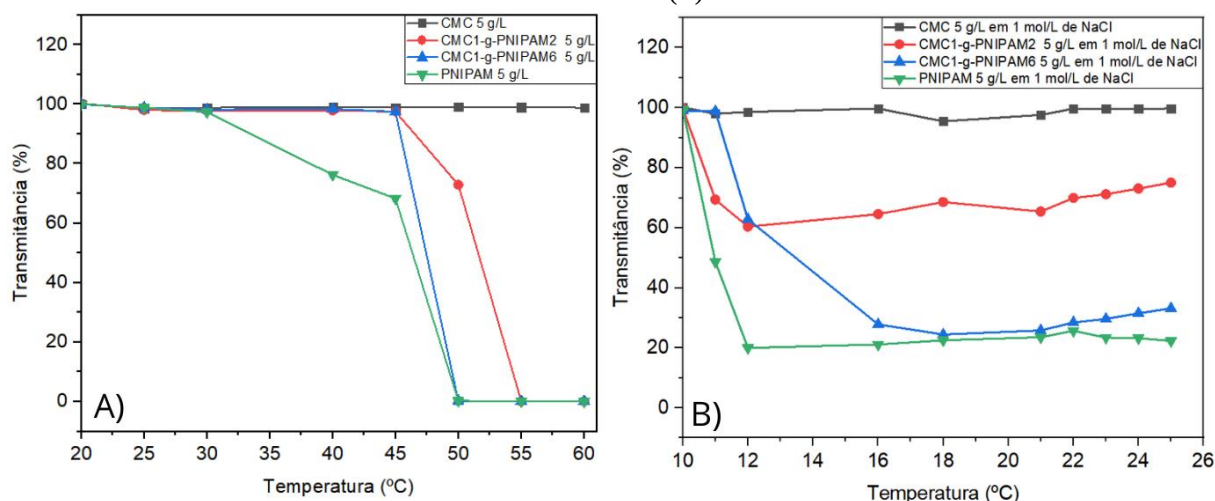
Figura 14 - Espectros na região do ultravioleta-visível para os sistemas de CMC, CMC1-*g*-PNIPAM2 , CMC1-*g*-PNIPAM6 e PNIPAM em água destilada, com concentrações poliméricas de 5 g/L (A) e 10 g/L (B)



Fonte: Autora, 2026

A comparação entre o meio aquoso e o meio salino é vital para prever o comportamento dos polímeros em cenários reais de utilização de fluido de perfuração, onde o contato com sais presentes na formulação, os sais da formação rochosa e com água do mar é frequente. A Figura 15 evidencia os resultados para os polímeros em meio salino.

Figura 15- Espectros na região do ultravioleta-visível para os sistemas de CMC, CMC1-*g*-PNIPAM2 , CMC1-*g*-PNIPAM6 e PNIPAM com concentrações poliméricas de 5 g/L, em água destilada (A) e salmoura de NaCl 1,0 mol/L (B)



Fonte: Autora, 2026

A estabilidade das soluções poliméricas foi testada em presença de 1 mol/L de NaCl para simular condições de alta salinidade. Na Figura 15, é possível observar que mesmo com os ruídos nas curvas dos polímeros com NaCl, a capacidade de resposta ainda é ativada, ou seja, a solução com 1 mol/L de NaCl turva totalmente para a PNIPAM em 21 °C, para o copolímero CMC1-*g*-PNIPAM6 em 21 °C e para o copolímero CMC1-*g*-PNIPAM2 em 22 °C (Tabela 6) (Safakas et al., 2021). A CMC, embora afetada pela presença do sal, não apresenta comportamento termorresponsivo.

A redução da LCST observada na presença de NaCl está associada ao efeito *salting-out*. Em meios altamente salinos, os íons presentes competem com as cadeias poliméricas pelas moléculas de água, reduzindo a interação polímero-solvente (Ferdousi-Rokib et al., 2025). Como consequência, as interações hidrofóbicas entre os grupos isopropil das cadeias aumentam, promovendo a formação de agregados em temperaturas mais baixas (Ji et al., 2024). Esse aumento das associações entre as cadeias provoca a perda da solubilidade do polímero, e consequentemente, a turvação da solução.

Tabela 6- Valores de LCST de cada polímero em diferentes concentrações e meios aquosos

	Polímero 5 g/L	Polímero 10 g/L	Polímero 5 g/L em 1 mol/L de NaCl
LCST da CMC	-	-	-
LCST do CMC1-<i>g</i>-PNIPAM2	34 °C	31 °C	22 °C
LCST do CMC1-<i>g</i>-PNIPAM6	33 °C	32 °C	21 °C
LCST da PNIPAM	33 °C	34 °C	21 °C

Fonte: Autora, 2026

5.5 MEDIDAS REOLÓGICAS

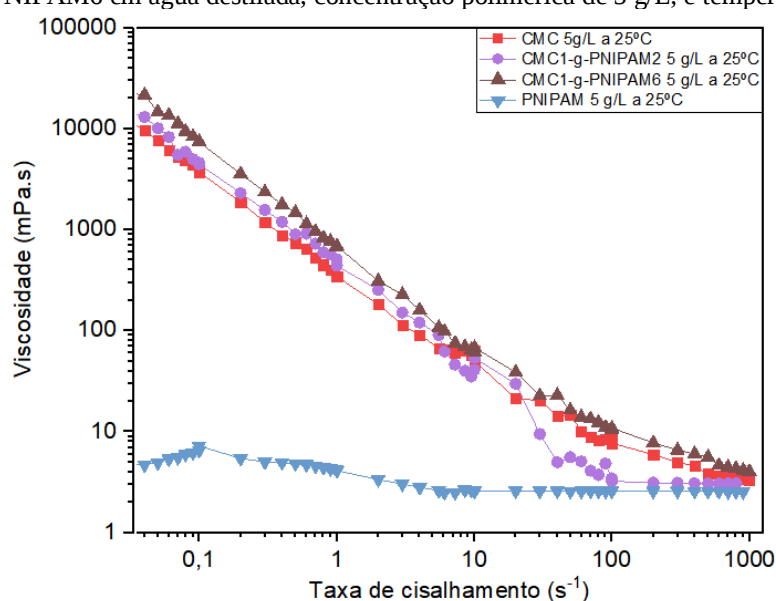
A análise das curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento permite avaliar a estabilidade mecânica e a capacidade de transporte de cascalhos pelos fluidos de perfuração. É desejável que os polímeros apresentem um comportamento pseudoplástico, caracterizado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento (Wu et al., 2022), característica essencial para os fluidos de perfuração. Quando o fluido é injetado no poço sob elevadas taxas de cisalhamento, sua menor viscosidade evita a sobrecarga da bomba durante a operação de injeção. Ao alcançar o espaço anular, onde as taxas de cisalhamento são reduzidas, o fluido passa a apresentar maior viscosidade, característica importante para manter os cascalhos em suspensão e transportá-los até a superfície.

5.5.1 Sistemas em água destilada

A Figura 16 apresenta as curvas de viscosidade para a CMC, PNIPAM, os copolímeros CMC1-*g*-PNIPAM2 e CMC1-*g*-PNIPAM6, a temperatura ambiente. De modo geral, é observado que as amostras apresentam um comportamento pseudoplástico, caracterizado pela diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é amplamente observado em soluções de polímeros de alta massa molar e está associado ao alinhamento das cadeias poliméricas na direção do fluxo, o que reduz a resistência interna ao escoamento (Gbadamosi et al., 2022). A CMC apresenta elevada viscosidade inicial, devido a sua capacidade de hidratação e estrutura da cadeia polimérica, uma vez que os anéis glicosídicos que compõe o polissacarídeo apresentam um grande volume hidrodinâmico. Já a PNIPAM, a

25 °C (abaixo da LCST), contribui pouco para a viscosidade do sistema, além de possuir uma menor pseudoplasticidade comparada aos outros polímeros. Os copolímeros, CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6, exibem viscosidade superior à da CMC em grande parte da faixa de cisalhamento. Esse resultado sugere a formação de uma rede polimérica mais estruturada, decorrente de interações intermoleculares entre os componentes por causa da enxertia das cadeias de PNIPAM, aumentando o volume hidrodinâmico.

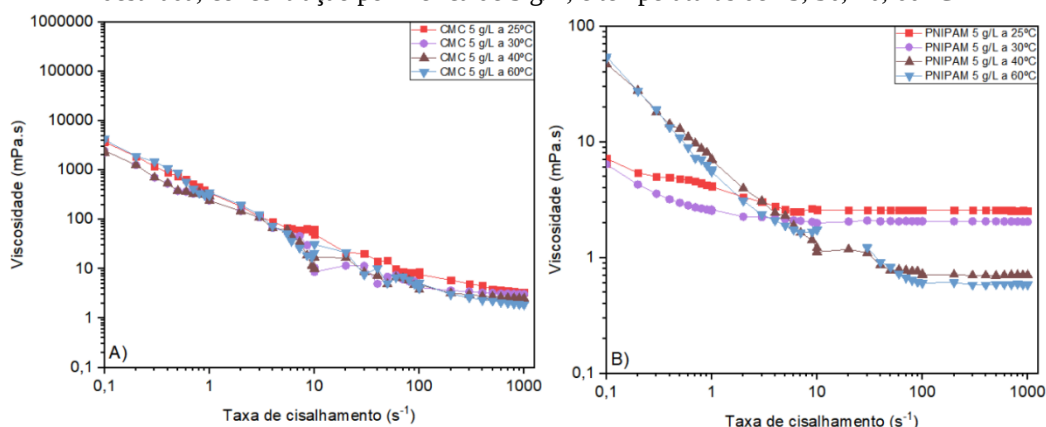
Figura 16- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC, PNIPAM, CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6 em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperatura de 25 °C



Fonte: Autora, 2026

A Figura 17 evidencia o comportamento da viscosidade em função da temperatura para os sistemas compostos pelos polímeros precursores (CMC e PNIPAM). Observa-se na da Figura 17 (A) que a CMC apresenta o comportamento típico, no qual a viscosidade diminui gradualmente com o aumento da temperatura de 25 °C para 60 °C, em toda a faixa de cisalhamento (Salehi; Inanloodoghrouz; Karami, 2023). Esse comportamento está associado ao aumento da mobilidade das cadeias poliméricas e à redução das interações intermoleculares, especialmente ligações de hidrogênio com o solvente. É importante destacar que a CMC não apresenta transição de fase, mantendo a estabilidade estrutural mesmo com a variação térmica, as pequenas variações que podem ser observadas podem ocorrer devido a evaporação da água durante o teste.

Figura 17- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC (A) e PNIPAM (B) em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperaturas de 25, 30, 40, 60 °C



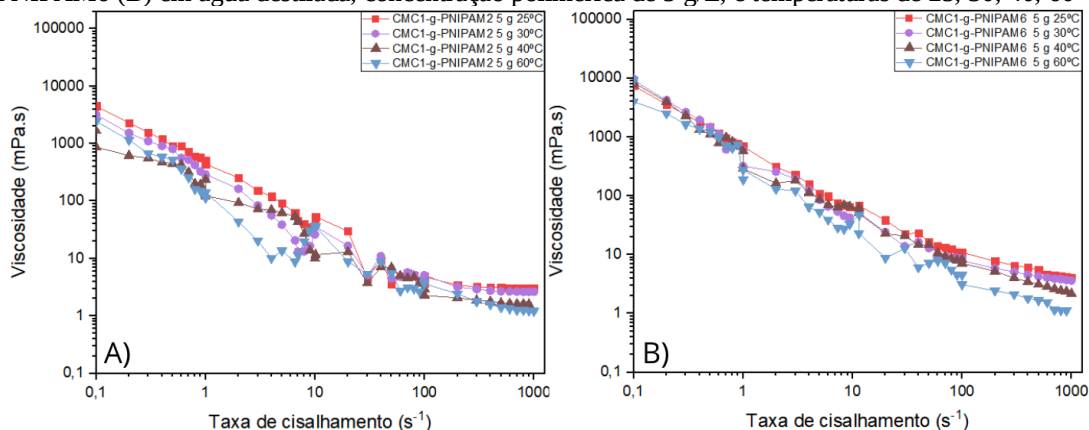
Fonte: Autora, 2026

Em contraste, a PNIPAM (Figura 17 (B)) apresenta comportamento fortemente dependente da temperatura, com uma transição evidente. Abaixo dos limites da sua LCST, 25 °C e 30 °C, o polímero encontra-se em estado hidrofílico e solubilizado, resultando em baixa viscosidade e comportamento próximo ao newtoniano (Zhang; Schwendinger; Calabrese, 2024). Acima da LCST (40 °C e 60 °C), ocorre o colapso das cadeias poliméricas, que passam a apresentar caráter hidrofóbico, formando agregados que aumentam a viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, aumentando também o caráter pseudoplástico, esses agregados interagem entre si, criando uma rede associativa que eleva a viscosidade em baixas taxas de cisalhamento (Misra et al., 2024).

Para os copolímeros CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6, as medidas de viscosidade em diferentes temperaturas são apresentadas na Figura 18. No caso do copolímero CMC1-g-PNIPAM2 (Figura 18 (A)), observa-se que com o aumento da temperatura (40 °C e 60 °C), ocorre uma redução da viscosidade em comparação às condições de temperatura ambiente. Esse comportamento indica que, embora haja contribuição da PNIPAM acima da LCST, a quantidade presente no sistema não é suficiente para gerar efeitos de termoviscosificação, ou seja, um aumento da viscosidade com o incremento de temperatura. Por outro lado, o copolímero CMC1-g-PNIPAM6 (Figura 18 (B)) apresenta comportamento reológico mais estável ao longo da variação de temperatura. As curvas de viscosidade permanecem mais próximas entre si, indicando menor influência do aumento térmico sobre o sistema. Esse comportamento pode ser associado a elevada concentração de PNIPAM que favorece a formação de uma rede de interações físicas que atua como reforço estrutural em

baixas taxas de cisalhamento, onde são observados maiores valores de viscosidade. Entretanto, nas condições estudadas o comportamento termoviscosificante não foi pronunciado para o copolímero CMC1-*g*-PNIPAM6.

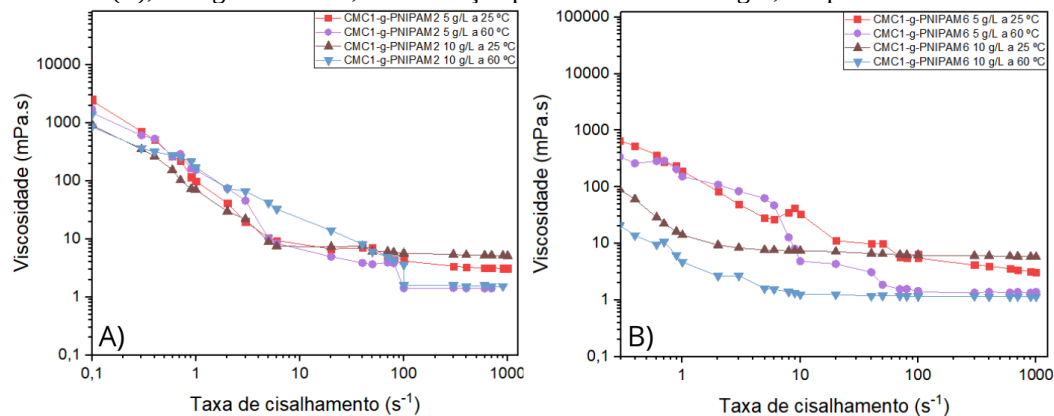
Figura 18- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC1-*g*-PNIPAM2 (A) e CMC1-*g*-PNIPAM6 (B) em água destilada, concentração polimérica de 5 g/L, e temperaturas de 25, 30, 40, 60 °C



Fonte: Autora, 2026

A Figura 19 apresenta a comparação do comportamento reológico dos copolímeros CMC1-*g*-PNIPAM2 (A) e CMC1-*g*-PNIPAM6 (B) em duas concentrações diferentes, 5 g/L e 10 g/L, e sob duas condições térmicas, 25 °C e 60 °C. Os resultados mostram comportamentos diferentes dependendo da proporção entre a CMC e a PNIPAM.

Figura 19- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC1-*g*-PNIPAM2 (A) e CMC1-*g*-PNIPAM6 (B), em água destilada, concentração polimérica de 5 e 10 g/L, temperaturas de 25 e 60 °C



Fonte: Autora, 2026

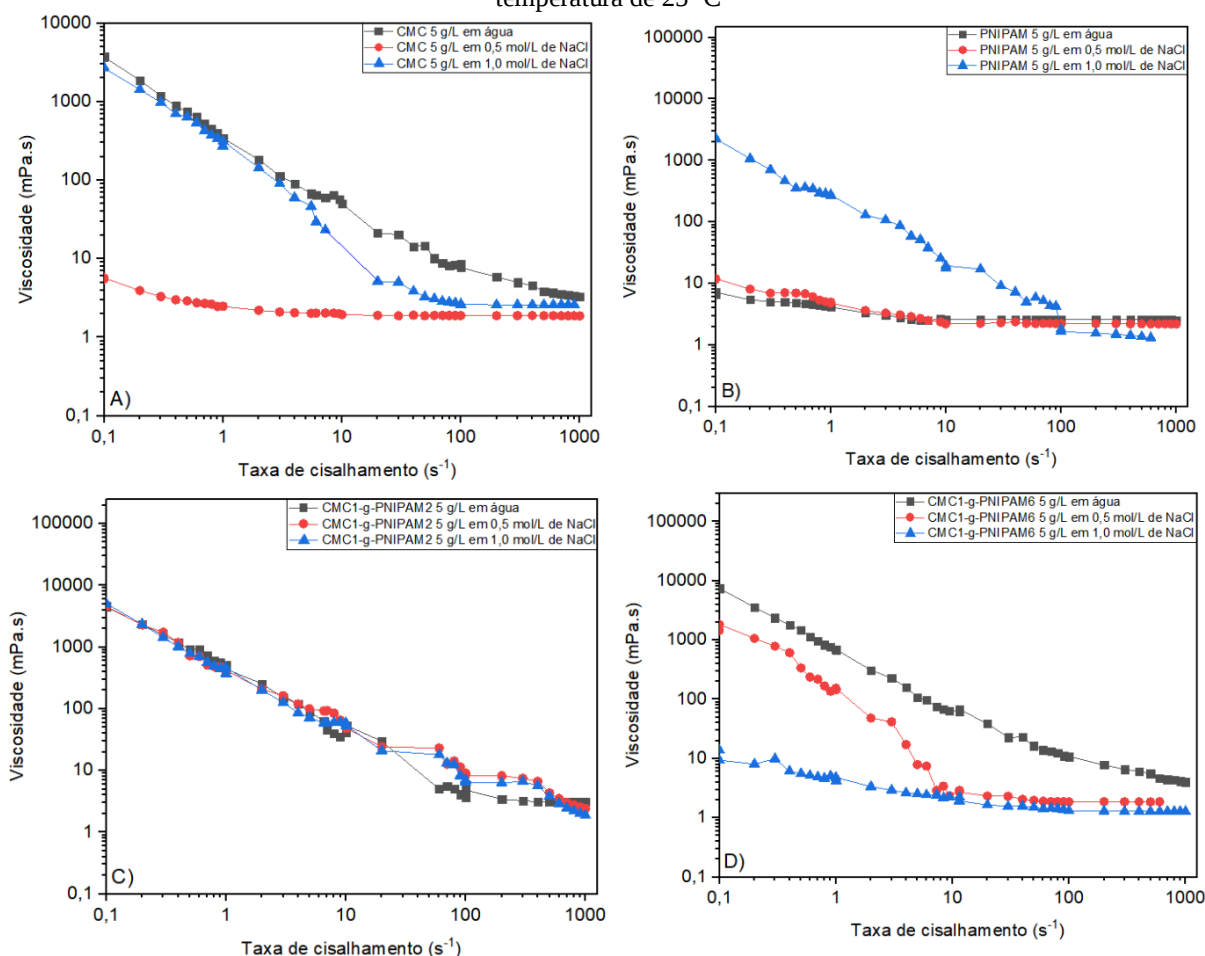
Para o copolímero CMC1-g-PNIPAM2 (Figura 19 (A)), o aumento da concentração de 5 para 10 g/L resulta em elevação da viscosidade a 60 °C, como esperado para sistemas poliméricos. No entanto, esse ganho não se sustenta em temperatura ambiente, sendo observada uma redução da viscosidade a 25 °C em toda a faixa de cisalhamento. Esse comportamento evidencia que, nessa proporção, as interações promovidas pela PNIPAM são insuficientes para compensar o efeito de redução da viscosidade (Nigro et al., 2021).

Em contrapartida, o copolímero CMC1-g-PNIPAM6 (Figura 19 (B)) apresenta desempenho inferior nas duas temperaturas. Na concentração de 10 g/L, a viscosidade é menor do que na concentração de 5 g/L, em toda faixa de cisalhamento. Esse resultado anômalo pode ocorrer devido ao colapso das cadeias de PNIPAM, que favorece a precipitação do polímero em relação à fase contínua, fazendo com a viscosidade diminua (Nigro et al., 2021).

5.5.2 Sistemas em salmoura de NaCl

Com a finalidade de avaliar o comportamento reológico dos sistemas poliméricos na presença de sal, foram feitas medidas de viscosidade em uma salmoura de NaCl com concentrações de 0,5 e 1,0 mol/L, mostradas na Figura 20. Para a CMC (Figura 20 (A)), observa-se uma redução significativa da viscosidade com o aumento da concentração de NaCl para 0,5 mol/L. Esse comportamento é típico de polieletrólitos aniônicos e está associado à blindagem das cargas negativas presentes nos grupos carboxilato pela ação dos íons sódio (Na^+) (Zakaria; El Kurdi; Patra, 2022). Como consequência, ocorre a diminuição da repulsão eletrostática ao longo da cadeia polimérica, levando à adoção de conformações mais compactas e, por consequência, a redução da viscosidade. Entretanto, ao elevar a concentração de NaCl para 1,0 mol/L, observa-se que a viscosidade aumenta, aproximando-se dos valores em meio aquoso. Esse fenômeno pode ser atribuído a formação de agregados poliméricos induzido por uma concentração salina elevada (Lopez; Colby; Cabral, 2018).

Figura 20- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para CMC (A), PNIPAM (B), CMC1-*g*-PNIPAM2 (C) e CMC1-*g*-PNIPAM6 (D) a 5 g/L em água, 0,5 mol/L de NaCl e 1,0 mol/L de NaCl, a temperatura de 25 °C



Fonte: Autora, 2026

No caso da PNIPAM (Figura 20 (B)), embora se trate de um polímero não iônico, verifica-se uma forte influência da salinidade. Em concentrações elevadas de NaCl, observa-se aumento da viscosidade em baixas e médias taxas de cisalhamento. Esse comportamento ocorre, pois, na presença de sal a afinidade do polímero pelo solvente é reduzida, favorecendo a formação de associações hidrofóbicas entre as cadeias, o que resulta no aumento da resistência ao escoamento (Bruce et al., 2021).

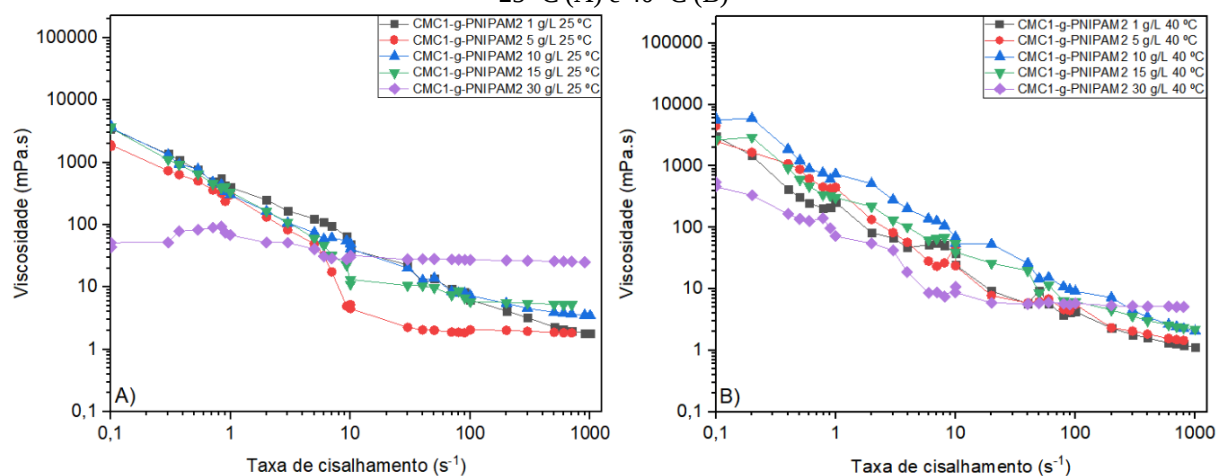
O copolímero CMC1-*g*-PNIPAM2 (Figura 20 (C)) apresenta comportamento mais estável frente à variação da salinidade, com curvas de viscosidade relativamente próximas para diferentes concentrações de NaCl. Esse resultado sugere a ocorrência de um efeito compensatório entre os componentes, enquanto o sal promove a redução da viscosidade da CMC, favorece simultaneamente a associação das cadeias da PNIPAM.

Por outro lado, o copolímero CMC1-g-PNIPAM6 (Figura 20 (D)) apresenta maior sensibilidade à salinidade, com redução acentuada da viscosidade em altas concentrações de NaCl. Esse comportamento pode ser atribuído ao colapso das cadeias de PNIPAM em meio altamente salino, levando a formação de agregados mais compactos. Além disso, a menor proporção de CMC no sistema não é suficiente para gerar a estabilidade estrutural da solução.

5.5.3 Sistemas concentrados e diluídos em AMS

Como a principal solução para a logística com as operações de perfuração do tipo *pump and dump* é concentrar o polímero e posterior diluição com água do mar no momento de injeção, foi feita uma solução concentrada do polímero e diluição com uma água do mar sintética, simulando o que seria feito em campo (Mao et al., 2024). A Figura 21 apresenta as curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o copolímero CMC1-g-PNIPAM2 em diferentes concentrações (1 a 30 g/L), avaliadas em água destilada (30 g/L) e água do mar sintética (1 a 15 g/L) nas temperaturas de 25 °C e 40 °C. Essa análise permite compreender o efeito combinado da força iônica complexa da água do mar sintética (AMS) e da temperatura sobre a estrutura do sistema.

Figura 21- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as diluições do copolímero CMC1-g-PNIPAM2 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 1, 5, 10, 15 e 30 g/L, a temperaturas de 25 °C (A) e 40 °C (B)

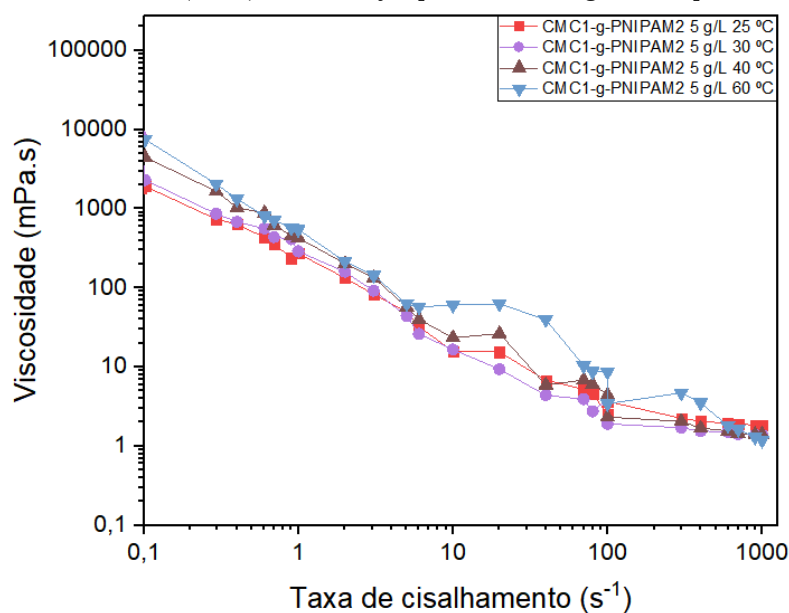


Fonte: Autora, 2026

Para o copolímero CMC1-g-PNIPAM2 a 25 °C (Figura 21 (A)), ou seja, abaixo da LCST da PNIPAM, observa-se que a maioria das amostras apresenta comportamento pseudoplástico, caracterizado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. A presença de íons monovalentes (Na^+) e bivalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}), promovem a blindagem das cargas negativas da CMC, reduzindo a repulsão eletrostática entre as cadeias e favorecendo conformações mais compactas (Tomioka et al., 2023). A solução de 30 g/L apresentou comportamento diferente das demais, com menor variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Como essa amostra foi preparada em água destilada, esse resultado está relacionado a alta concentração, onde as cadeias tendem a ficar mais próximas umas das outras, favorecendo interações intermoleculares e reduzindo a mobilidade do sistema (Elancheliyan; Chauveau; Truzzolillo, 2023). Além disso, a presença do sal ajudou a aumentar a viscosidade em comparação ao sistema sem sal, mesmo apresentando uma concentração polimérica menor.

Quando a temperatura é elevada para 40 °C, acima da LCST da PNIPAM, observa-se uma mudança no comportamento dos copolímeros, esse comportamento pode ser observado na Figura 21 (B) e na Figura 22. De modo geral, há um aumento da viscosidade em comparação à condição de 25 °C, indicando a formação de associações hidrofóbicas entre as cadeias de PNIPAM. Em meio salino, esse efeito é intensificado pois a afinidade do polímero pelo solvente é reduzida e isso favorece a agregação intermolecular.

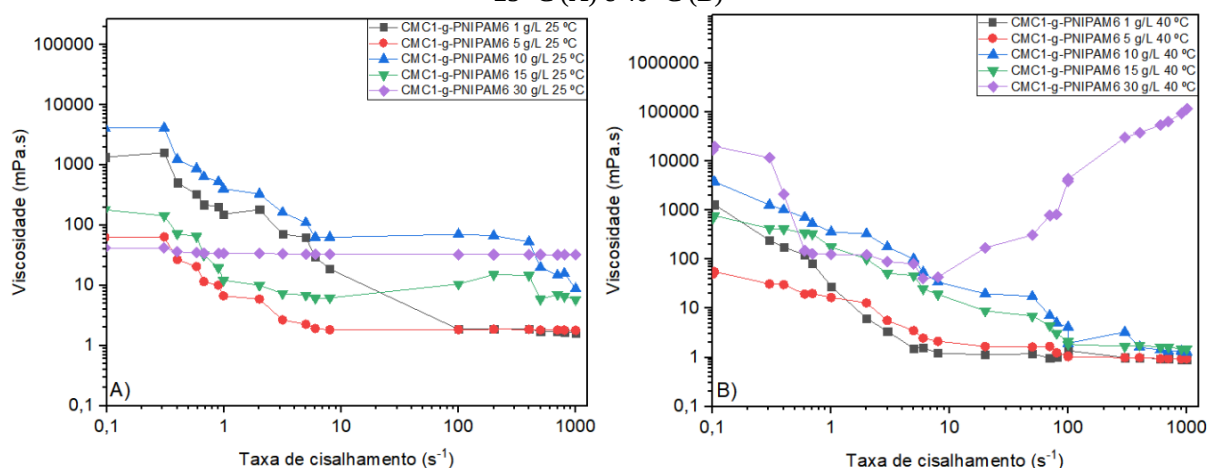
Figura 22- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os copolímero CMC1-g-PNIPAM2 diluído em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 5g/L, a temperaturas de 25 °C a 60 °C



Observa-se que as concentrações intermediárias, entre 10 g/L e 15 g/L (Figura 21), apresentam maior estabilidade e valores de viscosidade mais elevados, indicando uma condição mais favorável para a estruturação do sistema. De forma geral, os resultados demonstram que em água do mar sintética o desempenho reológico do copolímero CMC1-g-PNIPAM2 não apresenta comportamento linear com o aumento da concentração, sendo observada uma faixa de ótima de operação.

A análise do copolímero CMC1-g-PNIPAM6 é feita através da Figura 23. Pode ser observada uma maior sensibilidade reológica frente a variações de temperatura em relação ao sistema CMC1-g-PNIPAM2, devido a maior fração de polímero termorresponsivo. No copolímero CMC1-g-PNIPAM6, a predominância da PNIPAM torna a rede polimérica altamente sensível tanto à força iônica quanto à temperatura. Apesar da diminuição da quantidade de cargas após a polimerização e do impedimento estérico, a presença de sais na água do mar sintética (AMS) exerce um efeito combinado, promovendo a blindagem das cargas da CMC e simultaneamente favorecendo as interações hidrofóbicas da PNIPAM.

Figura 23- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as diluições do copolímero CMC1-g-PNIPAM6 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica de 1, 5, 10, 15 e 30 g/L, a temperaturas de 25 °C (A) e 40 °C (B)



Fonte: Autora, 2026

A 25 °C (Figura 23 (A)), o sistema apresenta comportamento pseudoplástico, porém com viscosidade influenciada pela elevada força iônica do meio. A blindagem das cargas reduz a contribuição da CMC para a viscosidade, enquanto em concentrações mais elevadas observa-

se um comportamento não linear. Destaca-se que a amostra de 30 g/L apresenta viscosidade inferior apesar de ter a maior concentração, esse comportamento sugere que nas demais diluições a presença dos sais da AMS favorece de forma mais eficiente as associações entre as cadeias.

Quando a temperatura é elevada para 40 °C (Figura 23 (B)), acima da LCST, ocorre uma intensificação significativa das interações hidrofóbicas entre as cadeias de PNIPAM, resultando na formação de uma rede associativa mais densa. Esse efeito é potencializado pela presença dos sais, que reduzem a afinidade do polímero pelo solvente. Como consequência, observa-se um aumento da viscosidade e maior resistência ao escoamento. Em particular, a amostra de 30 g/L apresenta um comportamento diferenciado, com um aumento significativo da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, isso se deve a precipitação do polímero na solução, como mostrado na Figura 24.

Figura 24– Aspecto do copolímero CMC1-*g*-PNIPAM6 em água do mar sintética (AMS), concentração polimérica 30 g/L precipitado após as medidas reológicas, em temperatura de 40 °C



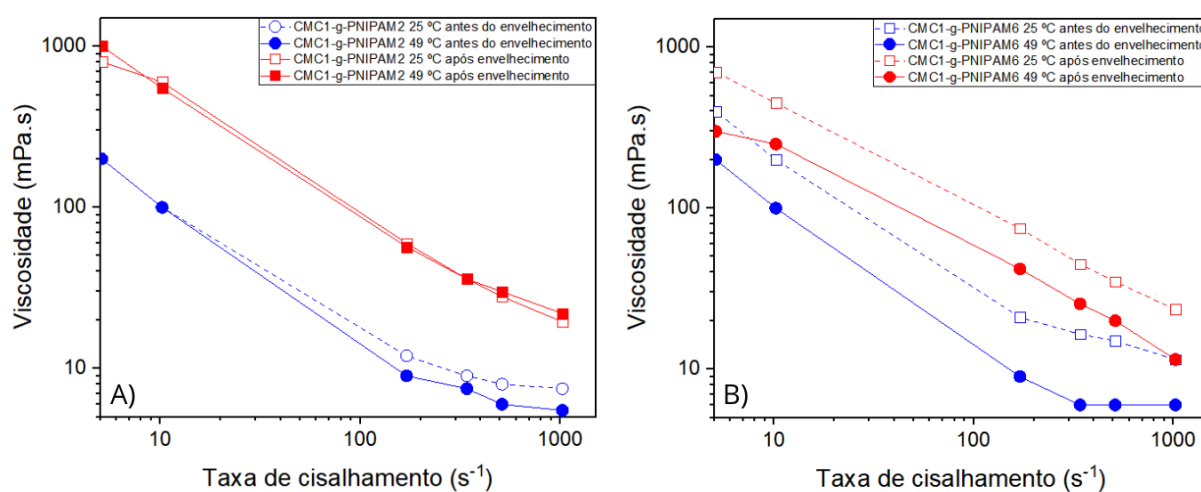
Fonte: Autora, 2026

5.6 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO AQUOSOS

5.6.1 Medidas reológicas

Além de obter um material com o objetivo de utilização em sistemas de fluidos de perfuração do tipo *pump and dump*, foi feito o estudo dos copolímeros como aditivos para fluidos de perfuração aquosos poliméricos. É de grande interesse a obtenção de materiais poliméricos versáteis, que possam atuar em diferentes aplicações, uma vez que seu uso será determinado de acordo com as operações envolvidas (Misbah et al., 2023). Com o objetivo de avaliar a resistência dos sistemas às condições operacionais, foi analisado o comportamento reológico dos fluidos nas temperaturas de 25 e 49 °C, antes e após o envelhecimento a temperatura ambiente. Essa análise permite verificar a manutenção das propriedades reológicas em diferentes temperaturas e o efeito do envelhecimento por cisalhamento (Xu; You; Zhou, 2022). A Figura 25 evidencia os resultados das medidas reológicas para os fluidos de perfuração aquosos contendo os copolímeros CMC1-g-PNIPAM2 e CMC1-g-PNIPAM6.

Figura 25- Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para fluidos de perfuração com os copolímeros CMC1-g-PNIPAM2 (A) e CMC1-g-PNIPAM6 (B), a temperaturas de 25 °C e 49 °C, antes e após envelhecimento.



Fonte: Autora, 2026

Para o copolímero CMC1-g-PNIPAM2 (Figura 25 (A)), observa-se a manutenção do comportamento termorresponsivo mesmo após o envelhecimento à temperatura ambiente. Nas curvas obtidas após o envelhecimento é observado um aumento expressivo da viscosidade em relação as curvas antes do envelhecimento, evidenciando o fenômeno de aumento de viscosidade causado pela completa solubilização foi atingido, indicando que o tempo de

envelhecimento foi suficiente para a completa hidratação das cadeias poliméricas, permitindo que o sistema atingisse um estado de maior equilíbrio estrutural.

O copolímero CMC1-g-PNIPAM6 (Figura 25 (B)) apresenta o comportamento mais sensível e complexo, devido à maior fração de PNIPAM. De maneira semelhante ao observado para o sistema CMC1-g-PNIPAM2, as curvas obtidas após o envelhecimento se mantiveram acima das registradas antes do envelhecimento, indicando a formação de uma rede associativa mais densa. Isso indica que o envelhecimento promoveu a melhor hidratação das cadeias da PNIPAM (em maior proporção nesse sistema) tornando mais homogêneo. Embora as curvas após o envelhecimento tenham permanecido acima das obtidas antes do envelhecimento, as curvas a 25 °C se apresentaram viscosidade mais elevada do que as curvas a 60 °C, possivelmente devido a precipitação do copolímero. Dessa forma, apesar do ganho de viscosidade promovido pela completa hidratação das cadeias poliméricas após o envelhecimento, o copolímero CMC1-g-PNIPAM6 apresentou uma resposta menos pronunciada quando comparado ao sistema CMC1-g-PNIPAM2.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho alcançou com êxito o objetivo de sintetizar e caracterizar copolímeros termorresponsivos de carboximetilcelulose enxertada com poli(*N*-isopropilacrilamida) (CMC-g-PNIPAM) para aplicação em fluidos de perfuração do tipo *pump and dump*. As análises de FTIR confirmaram a integração estrutural entre a CMC e a PNIPAM, enquanto os ensaios de potencial zeta e DLS demonstraram a formação de macromoléculas com características híbridas entre o caráter aniônico da CMC e a natureza associativa da PNIPAM.

A investigação do comportamento termorresponsivo via UV-vis comprovou a manutenção da LCST nos copolímeros, evidenciando que a sensibilidade térmica pode ser modulada tanto pela proporção dos componentes quanto pela concentração e salinidade do meio. Observou-se que a presença de NaCl reduziu significativamente a LCST, favorecendo a transição conformacional em temperaturas mais baixas, o que é realmente relevante para operações em ambientes salinos.

Do ponto de vista reológico, o copolímero CMC1-g-PNIPAM2 destacou-se por apresentar maior estabilidade e capacidade de estruturação acima da LCST, mantendo ou elevando a viscosidade em temperaturas superiores, contrariando o comportamento de declínio térmico observado na CMC pura. Esse efeito foi potencializado em meio salino e em água do mar sintética, onde as interações hidrofóbicas da PNIPAM compensaram a blindagem eletrostática das cargas da CMC.

Nos testes com fluidos de perfuração poliméricos, os copolímeros demonstraram boa estabilidade após o envelhecimento à temperatura ambiente, preservando o comportamento inteligente de aumento de viscosidade com o incremento da temperatura. Dessa forma, os resultados indicam que os sistemas desenvolvidos possuem potencial para aplicação em fluidos de perfuração do tipo *pump and dump*, nos quais são desejáveis baixa viscosidade durante o bombeio e maior capacidade de sustentação de sólidos em regiões de maior temperatura no poço.

Conclui-se, portanto, que a modificação da CMC com PNIPAM resulta em um aditivo funcional com potencial para otimizar a eficiência operacional e reduzir custos em perfurações de circuito aberto, sugerindo para trabalhos futuros, o ajuste das formulações para melhorar as propriedades termorresponsivas alcançadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKERS, T. J. .. J. Salinity-Based Pump-and-Dump Strategy for Drilling Salt With Supersaturated Fluids. **SPE Drilling & Completion**, v. 26, n. 01, p. 151–159, 7 fev. 2011.
- ALI, Jagar A. *et al.* Application of ultra-fine particles of potato as eco-friendly green additives for drilling a borehole: A filtration, rheological and morphological evaluation. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 206, p. 89–107, 1 jun. 2024.
- ALINE T. DOS SANTOS *et al.* **Stable and Thermo-Responsive Dextran Sulfate-Graft-PNIPAm Amphiphilic Nanoparticles for Potential Target Methotrexate Delivery.** Disponível em: <<https://jbcs.sbq.org.br/pdf/2022-0300AR>>. Acesso em: 9 maio. 2026.
- AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE. **Americam Petroleum Institute.** Disponível em: <<https://standards.globalspec.com/std/14521346/spec-13a>>. Acesso em: 24 jan. 2026.
- ANGGUN PERTIWI *et al.* **Variation of Alginate: Carboxymethyl Cellulose on Making Beads CMC from Cellulose of Corn Stalk.** Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez18.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&source=all&id=W3159543999>>. Acesso em: 9 maio. 2026.
- ANTUNES, Bruna da Fonseca *et al.* Celulose, nanofibras de celulose e acetato de celulose de frutos de Butia (*Butia odorata*): propriedades químicas, morfológicas, estruturais e térmicas. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 281, p. 136151, 1 nov. 2024.
- ASADI-ZAKI, Niloofar *et al.* Stimuli-induced adjustment of spatial distribution of fluorescence resonance energy transfer dyads in smart polymers. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 500, p. 215518, 1 fev. 2024.
- BAI, Xiaodong *et al.* Synthesis and application of temperature-sensitive polymer as a novel plugging agent for water-based drilling fluids. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, n. 28, p. e52524, 2022.
- BANSAL, K. K. *et al.* Advances in thermo-responsive polymers exhibiting upper critical solution temperature (UCST). **Express Polymer Letters**, v. 13, n. 11, p. 974–992, 2019.
- BARROS, Silma de Sá *et al.* Sementes de açaí (Euterpe precatoria Mart.) como uma nova fonte alternativa de celulose: Extração e caracterização. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e31110716661–e31110716661, 22 jun. 2021.
- BEMANI, Amin *et al.* Rigorous modeling of frictional pressure loss in inclined annuli using artificial intelligence methods. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 211, p. 110203, 1 abr. 2022.
- BRUCE, Ellen E. *et al.* Contact Ion Pairs in the Bulk Affect Anion Interactions with Poly(N-isopropylacrylamide). **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 125, n. 2, p. 680–688, 21 jan. 2021.
- BRUNA LUIZA BATISTA DE LIMA *et al.* HPAM-g-PEOPPO: Rheological modifiers in aqueous media of high temperature and high ionic strength | Request PDF. **ResearchGate**, 2018.

CAENN, Ryen; DARLEY, H. C. H.; GRAY, George R. **Fluidos de perfuração e completção: composição e propriedade**. 1. ed ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciencia e ingeniería de materiales**. [S.l.]: Reverte, 2019.

CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. [S.l.]: Artliber, 2002.

CHALAH, Kaci *et al.* Rheological study of sodium carboxymethylcellulose: Effect of concentration and molecular weight. **Materials Today: Proceedings**, Polymer & Mediterranean Fiber International. v. 53, p. 185–190, 1 jan. 2022.

CHEN, Gang *et al.* A kick monitoring method for deepwater open-circuit drilling based on convolutional neural network. **Geoenery Science and Engineering**, v. 234, p. 212656, mar. 2024a.

CHEN, Guangxu *et al.* Preparation of CMC-poly(N-isopropylacrylamide) semi-interpenetrating hydrogel with temperature-sensitivity for water retention. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, p. 131735, 1 maio 2024b.

CHEN, Guangxu *et al.* Preparation of CMC-poly(N-isopropylacrylamide) semi-interpenetrating hydrogel with temperature-sensitivity for water retention. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, p. 131735, 1 maio 2024c.

CHERNYKH, Mariia *et al.* A New Water-Soluble Thermosensitive Star-Like Copolymer as a Promising Carrier of the Chemotherapeutic Drug Doxorubicin. **Materials**, v. 14, n. 13, p. 3517, jan. 2021.

DE PAOLI, Marco-Aurélio. **DEGRADAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE POLÍMEROS.pdf**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/degradao-e-estabilizao-de-polmerospdf/252824094>>. Acesso em: 24 jan. 2026.

DONG, Wenxin *et al.* Thermoresponsive Bentonite for Water-Based Drilling Fluids. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2115, jan. 2019.

ELANCHELIYAN, Rajam; CHAUVEAU, Edouard; TRUZZOLILLO, Domenico. Impact of polyelectrolyte adsorption on the rheology of concentrated poly(N-isopropylacrylamide) microgel suspensions. **Soft Matter**, v. 19, n. 25, p. 4794–4807, 28 jun. 2023.

FATTAH-ALHOSSEINI, Arash *et al.* A review of smart polymeric materials: Recent developments and prospects for medicine applications. **Hybrid Advances**, v. 5, p. 100178, 1 abr. 2024.

FERDOUSI-ROKIB, Nahin *et al.* Salting out and nitrogen effects on cloud-nucleating ability of amino acid aerosol mixtures. **Environmental Science: Atmospheres**, v. 5, n. 4, p. 485–501, 10 abr. 2025.

FLEMMING, Patricia *et al.* Constrained thermoresponsive polymers – new insights into fundamentals and applications. **Beilstein Journal of Organic Chemistry**, v. 17, n. 1, p. 2123–2163, 20 ago. 2021.

FRANCIS, Raju *et al.* Properties of Stimuli-Responsive Polymers. *In: Biomedical Applications of Polymeric Materials and Composites*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. p. 187–231.

GBADAMOSI, Afeez *et al.* Application of Polymers for Chemical Enhanced Oil Recovery: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1433, jan. 2022.

GIALOURI, Aikaterini *et al.* Thermoresponsive Alginate-Graft-pNIPAM/Methyl Cellulose 3D-Printed Scaffolds Promote Osteogenesis In Vitro. **Gels**, v. 9, n. 12, p. 984, dez. 2023.

GUTIERREZ CISNEROS, Carolina; BLOEMEN, Veerle; MIGNON, Arn. Synthetic, Natural, and Semisynthetic Polymer Carriers for Controlled Nitric Oxide Release in Dermal Applications: A Review. **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 760, jan. 2021.

HALPERIN, Avraham; KRÖGER, Martin; WINNIK, Françoise M. Poly(N-isopropylacrylamide) Phase Diagrams: Fifty Years of Research. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 54, n. 51, p. 15342–15367, 2015.

HASSE, Jessica Amanda *et al.* Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, p. e13412, 2020.

HE, Shiqi *et al.* Synthesis and anti-bacterial/fungal activities of amphiphilic polysiloxanes primary ammonium salts. **Reactive and Functional Polymers**, v. 183, p. 105495, 1 fev. 2023.

JANG, Ji-Won *et al.* Preparation and characterization of thermoresponsive poly(N-isopropylacrylamide-co-N-isopropylmethacrylamide) hydrogel materials for smart windows. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 6, p. 49788, 2021.

Jl, Donghwan *et al.* Sustainable 3D printing by reversible salting-out effects with aqueous salt solutions. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 3925, 9 maio 2024.

JIANG, Guancheng *et al.* Preparation of amphoteric starch-based flocculants by reactive extrusion for removing useless solids from water-based drilling fluids. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 558, p. 343–350, 5 dez. 2018.

JIANG, Guancheng *et al.* Novel Water-Based Drilling and Completion Fluid Technology to Improve Wellbore Quality During Drilling and Protect Unconventional Reservoirs. **Engineering**, v. 18, p. 129–142, 1 nov. 2022.

JOSE M. CORTES-CANO *et al.* Clay-Sand Wettability Evaluation for Heavy Crude Oil Mobility. **Chemistry & Chemical Technology**, v. 16, n. 3, p. 448–453, 30 set. 2022.

KALIYEV, Bakytzhan *et al.* Innovative technology for the reuse of spent drilling fluids in production well drilling using a hydraulic disperser. **International Journal of Innovative Research and Scientific Studies**, v. 8, n. 6, p. 2601–2610, 23 set. 2025.

KOSMULSKI, Marek. Misconceptions in the measurements of zeta potentials in ethylene glycol-based heat transfer fluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 209, p. 118282, 5 jun. 2022.

KUBA, Daisuke *et al.* 3D printing of composite materials using ultralow-melt-viscosity polymer and continuous carbon fiber. **Composites Part C: Open Access**, v. 8, p. 100250, 1 jul. 2022.

LEAL, Giovanna. Formulação e análises de propriedades de fluidos de perfuração microemulsionados. 2022.

LIMA, Bruna Luiza Batista de. Síntese, caracterização e estudos em solução aquosa de copolímeros termoassociativos de poli(N-isopropilacrilamida) enxertada em carboximetilcelulose (CMC-g-PNIPAM). 15 dez. 2015.

LIU, Ruixia *et al.* Preparation of LCST regulable DES-lignin-g-PNVCL thermo-responsive polymer by ARGET-ATRP. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 194, p. 358–365, jan. 2022.

LOPEZ, Carlos G.; COLBY, Ralph H.; CABRAL, João T. Electrostatic and Hydrophobic Interactions in NaCMC Aqueous Solutions: Effect of Degree of Substitution. **Macromolecules**, v. 51, n. 8, p. 3165–3175, 24 abr. 2018.

LU, Hongwei *et al.* Product from sessile droplet evaporation of PNIPAM/water system above LCST: A block or micro/nano-particles? **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 634, p. 769–781, mar. 2023.

MA, Hao *et al.* Novel Strategy of Polymers in Combination with Silica Particles for Reversible Control of Oil–Water Interface. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 15, n. 1, p. 2216–2227, 11 jan. 2023.

MAGADOVA, L. A. *et al.* Feasibility of Using Vegetable Manufacturing Wastes in a Lubricant Additive for Drilling Fluids. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, v. 56, n. 6, p. 861–867, 1 jan. 2021.

MAHMOUD, Ali; GAJBHIYE, Rahul; ELKATATNY, Salaheldin. Investigating the efficacy of novel organoclay as a rheological additive for enhancing the performance of oil-based drilling fluids. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 5323, 4 mar. 2024.

MANO E MENDES. **Introdução a Polímeros - 2a ed.pdf**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/mano-introduo-a-polmeros-2a-edpdf/251927874>>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MAO, Liangjie *et al.* Dynamic analysis of a drilling string for deepwater riserless drilling with vortex-induced vibration considered. **Ocean Engineering**, v. 301, p. 117325, 1 jun. 2024.

MISBAH, Biltayib *et al.* Enhancing thermal stability and filtration control for water-based drilling fluid using viscosifier polymers and potassium chloride additives. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 230, p. 212235, nov. 2023.

MISRA, Chandeshwar *et al.* Effect of particle stiffness on microgel self-assembly and suspension phase behavior over a broad temperature range. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 10, p. 103120, 18 out. 2024.

MOHAN, Anandhu *et al.* pNIPAm-Based pH and Thermoresponsive Copolymer Hydrogel for Hydrophobic and Hydrophilic Drug Delivery. **Gels**, v. 10, n. 3, p. 184, mar. 2024.

MORIMOTO, Nobuyuki; YAMAMOTO, Masaya. Design of an LCST–UCST-Like Thermoresponsive Zwitterionic Copolymer. **Langmuir**, v. 37, n. 11, p. 3261–3269, 23 mar. 2021.

NIESWANDT, Katharina *et al.* RAFT Emulsion Polymerization of Styrene Using a Poly((N,N-dimethyl acrylamide)-co-(N-isopropyl acrylamide)) mCTA: Synthesis and Thermosensitivity. **Polymers**, v. 14, n. 1, 23 dez. 2021.

NIGRO, Valentina *et al.* Chemical-Physical Behaviour of Microgels Made of Interpenetrating Polymer Networks of PNIPAM and Poly(acrylic Acid). **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1353, jan. 2021.

OKUNO, Koji *et al.* Synthesis of New Thermoresponsive Polymers Possessing the Dense 1,2,3-Triazole Backbone. **Langmuir**, v. 38, n. 17, p. 5156–5165, 3 maio 2022.

PAIXÃO, Marcus Vinicius Gomes *et al.* Thermal energy storage technology to control rheological properties of drilling fluid. **Journal of Molecular Liquids**, v. 341, p. 116931, 1 nov. 2021.

PAN, Pengyu *et al.* Sustainable, super-stable thermochromic material by coupling hydroxypropyl cellulose and sodium carboxymethyl cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, p. 131945, 1 maio 2024.

PASPARAKIS, George; TSITSILIANIS, Constantinos. LCST polymers: Thermoresponsive nanostructured assemblies towards bioapplications. **Polymer**, v. 211, p. 123146, 21 dez. 2020.

PEIXOTO, Renato D. L. *et al.* Synthesis of decyl methyl carbonate and a comparative assessment of its performance as the continuous phase of synthetic-based drilling fluids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 199, p. 108301, 1 abr. 2021.

PERERA, G. I. P.; WEGALA, T. S. Improving the novel white coconut oil-based metalworking fluid using nano particles for minimum surface roughness and tool tip temperature. **Cleaner Materials**, v. 11, p. 100227, 1 mar. 2024.

PUROHIT, Arpana *et al.* Intelligent or Smart Polymers: Advance in Novel Drug Delivery. **Journal of Drug Delivery and Therapeutics**, v. 12, n. 5, p. 208–216, 15 set. 2022.

QUITIAN-ARDILA, Luis H. *et al.* Improving the rheological and thermal stability of water-based drilling fluids by incrementing xanthan gum concentration. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 10, p. 103111, 8 out. 2024.

RADU, Ionut-Cristian *et al.* Tailoring Silk Sericin Grafting: Comparing One-Step and Two-Step Approaches for PNIPAM/PAMPS Block Nanoparticles. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 309, n. 12, p. 2400158, 2024.

RAGHUWANSHI, Vikram Singh *et al.* Effect of temperature on the conformation and functionality of poly(*N*-isopropylacrylamide) (PNIPAM)-grafted nanocellulose hydrogels. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 652, p. 1609–1619, 15 dez. 2023a.

RAGHUWANSHI, Vikram Singh *et al.* Effect of temperature on the conformation and functionality of poly(*N*-isopropylacrylamide) (PNIPAM)-grafted nanocellulose hydrogels. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 652, p. 1609–1619, 15 dez. 2023b.

ROGET, Sean A.; CARTER-FENK, Kimberly A.; FAYER, Michael D. Water Dynamics in Aqueous Poly-N-Isopropylacrylamide Below and Through the Lower Critical Solution Temperature. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 126, n. 36, p. 7066–7075, 15 set. 2022.

SAFAKAS, Konstantinos *et al.* Alginate-g-PNIPAM-Based Thermo/Shear-Responsive Injectable Hydrogels: Tailoring the Rheological Properties by Adjusting the LCST of the Grafting Chains. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 8, p. 3824, jan. 2021.

SALEHI, Fakhreddin; INANLOODOGHOUS, Moein; KARAMI, Mostafa. Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solution: Impact of high intensity ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 101, p. 106655, 1 dez. 2023.

SHEN, Xiulun *et al.* Application of carboxylated cellulose nanocrystals as eco-friendly shale inhibitors in water-based drilling fluids. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 627, p. 127182, 20 out. 2021.

STERLING MORA, G. H.; MORENO, R. B. Z. L. Rheology and statistical optimization of a shear-sensitive fluid as a treatment for circulation loss control. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 205, p. 108830, 1 out. 2021.

STETSYSHYN, Yuriy *et al.* Temperature-responsive and multi-responsive grafted polymer brushes with transitions based on critical solution temperature: synthesis, properties, and applications. **Colloid and Polymer Science**, v. 299, n. 3, p. 363–383, 1 mar. 2021.

SUN, X. *et al.* Highly tunable bioadhesion and optics of 3D printable PNIPAm/cellulose nanofibrils hydrogels. **Carbohydrate Polymers**, v. 234, p. 115898, 15 abr. 2020.

TAN, Liyuan; DAVIS, Aaron C.; CAPPELLERI, David J. Smart Polymers for Microscale Machines. **Advanced Functional Materials**, v. 31, n. 9, p. 2007125, 2021.

TAVARES, Bernardo Rodrigues Correa. Trabalho de Conclusão de Curso. 2018.

TEOTIA, A. K.; SAMI, H.; KUMAR, A. Thermo-responsive polymers: structure and design of smart materials. *In: Switchable and Responsive Surfaces and Materials for Biomedical Applications*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2015. p. 3–43.

TERAMOTO, Elias Hideo *et al.* SIMULAÇÃO NUMÉRICA MULTIFÁSICA DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO E DE TRANSPORTE DE BENZENO EM POÇO DE PETRÓLEO NA BAHIA, BRASIL. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 1, 30 abr. 2014.

TINGJI, Ding *et al.* Synthesis and application of a temperature sensitive poly(N-vinylcaprolactam-co-N,N-diethyl acrylamide) for low-temperature rheology control of water-based drilling fluid. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 644, p. 128855, jul. 2022.

TOMIOKA, Yui *et al.* Agarose native gel electrophoresis analysis of thermal aggregation controlled by Hofmeister series. **Biophysical Chemistry**, v. 296, p. 106977, 1 maio 2023.

TRIPATHI, Achyut Mani; DUTTABARUAH, Rashmi; SUBBIAH, Senthilmurugan. Oil well drilling activities recognition using a hierarchical classifier. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 196, p. 107883, 1 jan. 2021.

WANG, Jintang *et al.* Review of the Perspectives and Study of Thermo-Responsive Polymer Gels and Applications in Oil-Based Drilling Fluids. **Gels**, v. 9, n. 12, p. 969, dez. 2023.

WANG, Kailu *et al.* Magnetic smart polymer gel with directional plugging for conformance control in oil reservoirs. **Journal of Molecular Liquids**, v. 405, p. 125046, 1 jul. 2024.

WEI, Jia *et al.* Decomposition prevention through thermal sensitivity of hydrate formations around wellbore. **Applied Thermal Engineering**, v. 159, p. 113921, 1 ago. 2019.

WU, Shirong *et al.* A novel PNIPAM-Modified polyurethane/carboxymethyl cellulose photo-thermoreponsive hydrogel loaded with gemcitabine to suppress esophageal cancer cells via VEGF-mediated angiogenic pathway inhibition. **Journal of Biological Engineering**, v. 19, n. 1, p. 66, 23 jul. 2025.

WU, Wangqing *et al.* Molecular Insights into the Wall Slip Behavior of Pseudoplastic Polymer Melt in Nanochannels during Micro Injection Molding. **Polymers**, v. 14, n. 15, p. 3218, jan. 2022.

XIANG, Tao *et al.* Ionic-Strength Responsive Zwitterionic Copolymer Hydrogels with Tunable Swelling and Adsorption Behaviors. **Langmuir**, v. 35, n. 5, p. 1146–1155, 5 fev. 2019.

XIE, Binqiang *et al.* A novel thermo-associating polymer as rheological control additive for bentonite drilling fluid in deep offshore drilling. **Materials Letters**, v. 284, p. 128914, 1 fev. 2021.

XU, Chaoran *et al.* Precise control of conjugated polymer synthesis from step-growth polymerization to iterative synthesis. **Giant**, v. 14, p. 100154, 1 jun. 2023.

XU, Jiang; YOU, Fu-Chang; ZHOU, Shu-Sheng. Study of a High-Temperature and High-Density Water-Based Drilling Fluid System Based on Non-sulfonated Plant Polymers. **Polymers**, v. 14, n. 20, p. 4433, jan. 2022.

YOUNG, Eric L.; MCDONALD, Armando G. Preparation and Characterization of Biobased Lignin-Co-Polyester/Amide Thermoplastics. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 2437, jan. 2021.

ZAKARIA, Hanine; EL KURDI, Riham; PATRA, Digambara. A Novel Study on the Self-Assembly Behavior of Poly(lactic-co-glycolic acid) Polymer Probed by Curcumin Fluorescence. **ACS Omega**, v. 7, n. 11, p. 9551–9558, 22 mar. 2022.

ZAKERIKHOOB, Mohammad *et al.* Curcumin-incorporated crosslinked sodium alginate-g-poly (N-isopropyl acrylamide) thermo-responsive hydrogel as an in-situ forming injectable dressing for wound healing: In vitro characterization and in vivo evaluation. **Carbohydrate Polymers**, v. 271, p. 118434, 1 nov. 2021.

ZHANG, Diana Y.; SCHWENDINGER, Alec J.; CALABRESE, Michelle A. Dimethylformamide-Mediated Polymer Microstructure Dictates the Extensional Rheology of Aqueous PNIPAM Solutions. **Macromolecules**, v. 57, n. 19, p. 9109–9120, 8 out. 2024.

ZHANG, Qilu *et al.* Thermoresponsive polymers with lower critical solution temperature: from fundamental aspects and measuring techniques to recommended turbidimetry conditions. **Materials Horizons**, v. 4, n. 2, p. 109–116, 6 mar. 2017.

ZHAO, Chuanzhuang; MA, Zhiyuan; ZHU, X. X. Rational design of thermoresponsive polymers in aqueous solutions: A thermodynamics map. **Progress in Polymer Science**, v. 90, p. 269–291, 1 mar. 2019.

ZOU, Kun *et al.* Poly(ionic liquid)s with amino acids counterions as multifunctional water-based additives contributing to green lubrication. **Tribology International**, v. 192, p. 109295, 1 abr. 2024.