



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUACAO EM ENGENHARIA QUÍMICA



JULIANA DE CARVALHO CAMARGO

**DESENVOLVIMENTO DE FLUIDO AQUOSO POLIMÉRICO DE BAIXA
DENSIDADE COM MICROESFERAS OCAS DE VIDRO PARA PERFURAÇÃO DE
POÇOS DE PETRÓLEO**

Uberlândia – MG

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUACAO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**DESENVOLVIMENTO DE FLUIDO AQUOSO POLIMÉRICO DE BAIXA
DENSIDADE COM MICROESFERAS OCAS DE VIDRO PARA PERFURAÇÃO DE
POÇOS DE PETRÓLEO**

Juliana de Carvalho Camargo

Orientador: Profa. Dra. Marina Seixas Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C172 2026	Camargo, Juliana de Carvalho, 2000- DESENVOLVIMENTO DE FLUIDO AQUOSO POLIMÉRICO DE BAIXA DENSIDADE COM MICROESFERAS OCAS DE VIDRO PARA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO [recurso eletrônico] / Juliana de Carvalho Camargo. - 2026. Orientadora: Marina Seixas Pereira. Coorientador: Claudio Roberto Duarte. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. DOI http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.541 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia química. I. Pereira, Marina Seixas, 1985-, (Orient.). II. Duarte, Claudio Roberto, 1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título. CDU: 66.0
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Defesa de Mestrado, 9/2026, PPGEQ				
Data:	20 de julho de 2026	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	10:16
Matrícula do Discente:	12422EQU005				
Nome do Discente:	Juliana de Carvalho Camargo				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de Fluido Aquoso Polimérico de Baixa Densidade com Microesferas Ocas de Vidro para Perfuração de Poços de Petróleo				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento e análises de fluidos de perfuração de poços de petróleo e gás				
ODS-ONU:	ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Irineu Petri Júnior - PPGQM/UFLA, Marcos Antônio de Souza Barroso - PPGEQ/UFU, Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, coordenador, e Marina Seixas Pereira - PPGEQ/UFU, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, Profa. Dra. Marina Seixas Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, a presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa de Mestrado faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/07/2026, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marina Seixas Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/07/2026, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/07/2026, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Irineu Petri Júnior, Usuário Externo**, em 20/07/2026, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7462261** e o código CRC **4F9F0D2E**.

Referência: Processo nº 23117.044823/2026-82

SEI nº 7462261

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, à minha mãe Lucia, e ao meu pai, Ricardo, meu eterno Doutor e Fuzileiro Naval, por todo o amor e incentivo. Sei que continuarão me apoiando por toda a minha vida.

Ao meu irmão, Gabriel, minha cunhada, Thayná, minha avó, aos meus tios e primos, deixo minha sincera gratidão pelo carinho e pelo apoio constante.

Ao meu companheiro, Victor Hugo, agradeço pelo amor, pela compreensão, pelas noites sem dormir me ajudando, horas em frente ao computador e pelo carinho para me manter calma durante todo esse caminho.

Aos meus amigos agradeço especialmente a Maria Luisa Medeiros e Thuany de Carvalho, por compartilhar risadas, palavras de incentivo e força quando eu mais precisava.

Minha profunda gratidão à minha orientadora, Profa. Dra. Marina Seixas Pereira, pela orientação dedicada, confiança depositada em mim, paciência e por todos os ensinamentos ao longo desta pesquisa. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte, agradeço pelas valiosas contribuições, disponibilidade e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEQ/UFU) e do Laboratório de Fluidos Carlos Henrique Ataíde (LabCAF), pelo convívio, pelo aprendizado, excelentes cafés e pelas contribuições que enriqueceram minha formação acadêmica e este trabalho. Em especial, ao Prof. Dr. Marcos Barrozo pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos e sábias palavras.

A Petrobras, expresso minha gratidão pelo suporte técnico e pela parceria que tornaram possível a realização desta pesquisa. A FAPEMIG e CAPES, agradeço pelo indispensável apoio financeiro, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, um agradecimento especial a Lindinha, Kiara e Formiga espero que se formem na faculdade dos cachorros com honras em Engenharia Química e Direito por estarem sempre ao meu lado, em todos os momentos.

RESUMO

A perfuração de formações com baixa pressão de poros apresenta janela operacional estreita entre as pressões de poros e de fratura, na qual um fluido de densidade inadequada pode provocar alterações na pressão do poço, resultando em perda de circulação e danos ao reservatório. Nessas condições, são necessários fluidos de densidade reduzida que, além de contrabalancear a pressão da formação, atendam simultaneamente a critérios de filtração, reologia e força gel. A incorporação de microesferas ocas de vidro, partículas de baixa densidade, é uma estratégia eficaz para essa redução, mas altera simultaneamente essas propriedades, exigindo o ajuste entre os componentes do fluido. Neste trabalho, desenvolveu-se o estudo sobre fluido aquoso polimérico contendo microesferas ocas de vidro, em duas etapas. Na primeira etapa, realizou-se uma análise de viabilidade operacional em fluido *drill-in*, na qual a redução máxima de densidade tecnicamente sustentável foi de 0,50 ppg, com 18 lb/bbl de microesferas, porém restrições logísticas de campo limitam essa redução a 0,25 ppg para produções entre 5.000 e 7.000 bbl. Na segunda etapa, um fluido aquoso polimérico saturado com NaCl foi otimizado por Planejamento Composto Central (PCC) e Evolução Diferencial. O PCC foi conduzido com quatro fatores independentes: goma xantana, HPA, calcário e microesferas ocas de vidro; totalizando 27 formulações experimentais, a partir das quais foram ajustados modelos empíricos de segunda ordem para onze respostas: densidade, volume de filtrado, L600, L300, L200, L100, L6, L3, força gel de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos. Para a densidade, o modelo ajustado foi linear com calcário e microesferas atuando de forma independente entre si e como únicos fatores significativos. Os modelos das leituras de cisalhamento apresentaram bom ajuste, com a goma xantana como fator dominante, e os modelos de força gel refletiram a maior complexidade e variabilidade intrínseca dessa propriedade. O volume de filtrado manteve-se abaixo de 10 mL em todas as formulações. A partir dos modelos ajustados, identificou-se por otimização uma formulação que atingiu densidade de 9,10 ppg e volume de filtrado de 1,4 mL, com leituras de cisalhamento em alta e média taxa dentro das faixas operacionais e leituras em baixo cisalhamento próximas ao limite inferior. A ausência de calcário na formulação ótima evidencia que microesferas ocas de vidro associadas à matriz polimérica de goma xantana são suficientes para atender aos critérios operacionais de densidade, reologia e filtração no domínio investigado.

Palavras-chave: planejamento composto central; otimização de formulação; força gel; reologia de fluidos aquosos.

ABSTRACT

Drilling formations with low pore pressure presents a narrow operating window between the pore and fracture pressures, in which a fluid of inadequate density may cause alterations in the well pressure, resulting in lost circulation and reservoir damage. Under these conditions, reduced-density fluids are necessary that, besides counterbalancing the formation pressure, simultaneously meet filtration, rheology and gel strength criteria. The incorporation of hollow glass microspheres, low-density particles, is an effective strategy for this reduction, but it simultaneously alters these properties, requiring the adjustment among the fluid components. In this work, a study was developed on an aqueous polymeric fluid containing hollow glass microspheres, in two stages. In the first stage, an operational feasibility analysis was carried out with a drill-in fluid, in which the maximum technically sustainable density reduction was 0.50 ppg, with 18 lb/bbl of microspheres; however, field logistics constraints limit this reduction to 0.25 ppg for production volumes between 5,000 and 7,000 bbl. In the second stage, an aqueous polymeric fluid saturated with NaCl was optimized by Central Composite Design (CCD) and Differential Evolution. The CCD was conducted with four independent factors: xanthan gum, HPA, calcium carbonate and hollow glass microspheres; totaling 27 experimental formulations, from which second-order empirical models were fitted for eleven responses: density, filtrate volume, L600, L300, L200, L100, L6, L3, gel strength at 10 seconds, 10 minutes and 30 minutes. For density, the fitted model was linear, with calcium carbonate and microspheres acting independently of each other and as the only significant factors. The shear-rate reading models showed good fit, with xanthan gum as the dominant factor, and the gel strength models reflected the greater complexity and intrinsic variability of this property. The filtrate volume remained below 10 mL in all formulations. From the fitted models, a formulation was identified by optimization that reached a density of 9.10 ppg and a filtrate volume of 1.4 mL, with high- and medium-shear-rate readings within the operational ranges and low-shear readings close to the lower limit. The absence of calcium carbonate in the optimal formulation shows that hollow glass microspheres associated with the xanthan gum polymeric matrix are sufficient to meet the operational criteria of density, rheology and filtration in the investigated domain.

Keywords: central composite design; formulation optimization; gel strength; rheology of aqueous fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da janela operacional do poço.....	20
Figura 2 - Densidades efetivas das diferentes microesferas de vidro em função da pressão.	25
Figura 3 - Classificação dos fluidos de perfuração à base de água.	27
Figura 4 - Perfis newtoniano e não newtonianos relacionando a taxa e tensão de cisalhamento.....	28
Figura 5 - Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para fluidos newtoniano e não newtonianos.	28
Figura 6 - Perfil da força gel em decorrência do tempo de repouso.....	30
Figura 7 - Fluxograma das etapas experimentais desenvolvidas no trabalho.....	38
Figura 8 - Fluido aquoso polimérico saturado no reator encamisado.....	42
Figura 9 - Mastersizer 2000 (Malvern).....	43
Figura 10 - Picnômetro a gás Micromeritics AccuPyc 1330.	43
Figura 11 - Balança pressurizada Fann Modelo 141.....	50
Figura 12 - Filtro-prensa Fann.	51
Figura 13 - Proveta graduada com filtrado.	51
Figura 14 - Reômetro Brookfield R/S+.....	51
Figura 15 - pHmetro de bancada Kasvi®.....	54
Figura 16 - Distribuição granulométrica do calcário: frequência e frequência acumulada.	56
Figura 17 - Distribuição granulométrica da microesferas ocas de vidro: frequência e frequência acumulada.....	57
Figura 18 - Distribuição granulométrica do HPA: frequência e frequência acumulada.	57
Figura 19 - Densidade vs concentração de calcário e microesferas ocas de vidro...	60
Figura 20 - Volume filtrado dos fluidos (HTHP, 500 psi, 65 °C, 30 min).....	62
Figura 21 - Perfil reológico a 30 °C.....	63
Figura 22 - Perfil reológico a 60 °C.....	64
Figura 23 - Estimativa da menor densidade alcançável em função do volume total produzido.	66
Figura 24 - Densidade das 27 formulações do planejamento experimental.....	69
Figura 25- Superfície de resposta da densidade do planejamento experimental.....	70
Figura 26 – Volume de filtrado das 27 formulações do planejamento experimental.	71

Figura 27 - Superfícies de respostas do volume de filtrado.....	73
Figura 28 - Leitura L600 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.....	75
Figura 29 - Leitura L300 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.....	76
Figura 30 - Leitura L200 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.....	76
Figura 31 - Leitura L100 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.....	76
Figura 32 - Leitura L6 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.	77
Figura 33 - Leitura L3 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.	78
Figura 34 - Superfícies de resposta da leitura L600 em função dos fatores avaliados.	80
Figura 35 - Superfícies de resposta da leitura L3 em função dos fatores avaliados.	81
Figura 36 - Força gel de 10 segundos (G10seg) das 27 formulações com limite superior de referência.....	86
Figura 37 - Superfícies de resposta da força gel de 10 segundos (G10seg).	87
Figura 38 - Força gel de 10 minutos (G10min) das 27 formulações com limite superior de referência.	87
Figura 39 - Superfícies de resposta da força gel de 10 minutos (G10min).	89
Figura 40 - Força gel de 30 minutos (G30min) das 27 formulações com limite superior de referência.	89
Figura 41 - Superfícies de resposta da força gel de 30 minutos (G30min).	90
Figura 42 - Perfis de evolução da força gel em função do tempo de repouso para formulações representativas.....	92
Figura 43 - Superfícies de resposta da leitura L300 em função dos fatores avaliados.	106
Figura 44 - Superfícies de resposta da leitura L200 em função dos fatores avaliados.	106
Figura 45 - Superfícies de resposta da leitura L100 em função dos fatores avaliados.	107

Figura 46 - Superfícies de resposta da leitura L6 em função dos fatores avaliados.
..... 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes de fluidos e suas funções.....	39
Tabela 2 - Composição dos fluidos e concentração dos componentes em um fluido <i>drill-in</i>	40
Tabela 3 - Componentes do fluido utilizado no PCC.....	42
Tabela 4 - Fluidos produzidos na primeira etapa deste trabalho.....	45
Tabela 5 - Valores reais das variáveis independentes em cada nível codificado do planejamento composto central.	47
Tabela 6 - Referencias de respostas para avaliação dos fluidos.	49
Tabela 7 - D10, D50 e D90 das distribuições granulométricas do calcário, microesferas ocas de vidro e HPA.	56
Tabela 8 - Densidade real dos sólidos calcário e microesferas ocas de vidro.	58
Tabela 9 – Nomenclatura, composição dos fluidos avaliados, densidade e volume de filtrado.	59
Tabela 10 - Intervalos de referência reológica para fluidos.....	64
Tabela 11 - Densidade estimada pela equação de densidade para fluidos.	66
Tabela 12 - Experimentos vs concentrações das variáveis decodificadas.....	68
Tabela 13 - Resultados das leituras de cisalhamento: L600, L300, L200, L100, L6 e L3.	74
Tabela 14 - Resultados da viscosidade plástica, viscosidade aparente e limite de escoamento.	82
Tabela 15 - Parâmetros da equação de Herschel-Bulkley.	83
Tabela 16 - Resultados das força gel de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos dos experimentos.	85
Tabela 17 - Composição das formulações preditas pelo algoritmo de otimização....	93
Tabela 18 - Comparação entre valores preditos pelos modelos e valores experimentais para as três formulações ótimas obtidas.	95

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral.....	18
1.2. Objetivos específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Fluidos de perfuração: definição e relevância operacional	19
2.1.1. Funções dos fluidos de perfuração	21
2.1.2. Classificação dos fluidos de perfuração e seus constituintes	22
2.1.2.1. Microesferas ocas de vidro e alternativas de redução de densidade ..	24
2.2. Fluidos à base de água	26
2.3. Reologia de Fluidos de Perfuração	27
2.4. Força gel.....	29
2.5. Filtração, reboco e dano à formação	31
2.6. Influência dos sólidos nas propriedades do fluido	32
2.7. Parâmetros do fluido a serem controlados	33
2.8. Planejamento experimental e evolução diferencial	35
3. METODOLOGIA.....	38
3.1. Formulações padrão de um fluido de perfuração	39
3.1.1. Componentes dos fluido <i>drill-in</i> para análise de viabilidade operacional	40
3.1.2. Componentes do fluido aquoso para o PCC	41
3.2. Medida de tamanho e densidade de alguns aditivos sólidos	42
3.3. Procedimento Experimental	44
3.3.1. Análise da viabilidade operacional do uso de esferas de vidro em campo	44
3.3.2. Planejamento Composto Central	46
3.3.3. Otimização por Evolução Diferencial	47

3.4.	Análises realizadas nos fluidos de perfuração	49
3.4.1.	Densidade dos fluidos.....	50
3.4.2.	Ensaio de filtração estático	50
3.4.3.	Caracterização Reológica.....	51
3.4.4.	Força Gel	53
3.4.5.	pH	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1.	Caracterização dos Aditivos	55
4.1.1.	Distribuição Granulométrica.....	55
4.1.2.	Densidade dos Sólidos	57
4.2.	Análise de Viabilidade Operacional.....	58
4.2.1.	Efeito das Proporções calcário/microesferas ocas de vidro	59
4.2.2.	Reologia do fluido <i>drill-in</i> afetado pela temperatura	62
4.2.3.	Viabilidade em Escala de Campo	65
4.3.	Planejamento Composto Central.....	67
4.4.	Efeito das variáveis sobre a densidade.....	69
4.5.	Efeito das variáveis sobre o volume de filtrado	71
4.6.	Efeito das Variáveis sobre as Propriedades Reológicas.....	73
4.6.1.	Leituras de Cisalhamento (L600 a L3).....	74
4.6.2.	Viscosidade aparente, viscosidade plástica e limite de escoamento	81
4.6.3.	Modelo de Herschel-Bulkley	83
4.7.	Efeito das Variáveis sobre a força gel	84
4.7.1.	Força gel de 10 segundos	85
4.7.2.	Força gel de 10 minutos	87
4.7.3.	Força gel de 30 minutos	89

4.7.4. Discussão comparativa dos tempos de repouso para a determinação da Força Gel.....	91
4.8. Otimização por Evolução Diferencial.....	93
4.8.1. Formulação Ótima e Validação Experimental.....	93
5. CONCLUSÃO.....	98
5.1. Sugestões de trabalhos futuros.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE	106

1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás representa cerca de 10% do PIB nacional brasileiro e desempenha papel central no fornecimento de matérias-primas para diversos setores industriais (IBP, 2024). Com o crescimento de 6,98% nas reservas declaradas em 2023 em relação ao ano anterior (ANP, 2024), intensificam-se os desafios técnicos associados às operações de perfuração, especialmente em formações com baixa pressão de poros e risco de sobrebalanceamento.

Na engenharia de petróleo, uma formação refere-se a uma unidade geológica de rochas com características litológicas específicas, que frequentemente atua como reservatório de hidrocarbonetos. Durante as operações de perfuração, a travessia dessas formações apresenta diversos desafios técnicos, especialmente naquelas caracterizadas por baixa pressão de poros, onde o controle rigoroso da pressão hidrostática exercida pelo fluido torna-se crucial para evitar o sobrebalanceamento e a consequente perda de circulação (THOMAS, 2001).

Para que o fluido de perfuração desempenhe suas funções de forma eficaz e segura ao longo de toda a operação de construção do poço, é imprescindível que ele garanta e mantenha simultaneamente uma série de propriedades físico-químicas e reológicas adequadas. Além de exercer a pressão hidrostática necessária ao controle do poço, o fluido deve assegurar o carreamento de cascalhos, o controle de filtração e a manutenção da estabilidade mecânica das paredes do poço (THOMAS, 2001; BRIDGES; ROBINSON, 2020). O equilíbrio entre essas propriedades depende diretamente da composição do fluido, sendo a densidade um dos parâmetros de controle mais sensíveis. Em formações subpressurizadas, fluidos com densidade excessiva podem induzir fraturamento e perda de circulação, comprometendo a operação e causando danos irreversíveis ao reservatório (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

A utilização de fluidos de baixa densidade torna-se estritamente necessária ao perfurar formações depletadas ou com gradientes de fratura naturalmente baixos. Nessas condições críticas, um fluido convencional com alta densidade exerceria uma pressão hidrostática superior à resistência mecânica da rocha, induzindo fraturas na formação e resultando em perda severa de circulação do fluido. Sem a adequação da densidade, torna-se tecnicamente inviável prosseguir com a operação de perfuração, pois as perdas comprometem o controle do poço, aumentam os custos e podem

inviabilizar sua construção, justificando o desenvolvimento dessas formulações otimizadas (KONBUL; OZBAYOGLU; MATA, 2020; AL-DARWEESH *et al.*, 2023).

Uma estratégia eficaz para a redução de densidade em fluidos aquosos é a incorporação de microesferas ocas de vidro, partículas de baixa densidade e elevada resistência mecânica capazes de reduzir a massa específica global do sistema sem comprometer a fase contínua (KONBUL; OZBAYOGLU; MATA, 2020). Entretanto, a presença dessas partículas altera simultaneamente a reologia, a filtração e o empacotamento da torta filtrante do fluido, tornando sua incorporação um problema de otimização multiparamétrico. Adicionalmente, a baixa densidade *bulk* das microesferas impõe restrições logísticas significativas à sua utilização em escala de campo, aspecto pouco abordado na literatura disponível.

O atendimento simultâneo a múltiplos critérios operacionais exigidos na perfuração, tais como a garantia de uma filtração adequada, a suspensão e remoção eficiente de cascalhos, e a integridade mecânica da formação perfurada, configura um complexo problema de otimização multiparamétrico. Essa complexidade apresenta alta não linearidade, decorrente diretamente das inúmeras interações físico-químicas entre os diversos constituintes da formulação do fluido.

O Planejamento Composto Central (PCC) associado à Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) permite ajustar modelos empíricos de segunda ordem para múltiplas respostas com número reduzido de experimentos, sendo adequado para capturar efeitos quadráticos e interações em sistemas com quatro fatores (MONTGOMERY, 2017; BETIHA *et al.*, 2020). A Evolução Diferencial (ED) complementa essa abordagem como algoritmo meta-heurístico capaz de explorar o espaço de soluções, adequado para problemas com restrições simultâneas ativas nas quais minimizar densidade implica tensionar as respostas reológicas em direções opostas (ALI; AHMAD; GANAT, 2021; STORN; PRICE, 1997).

Estudos anteriores avaliaram o efeito das microesferas ocas de vidro sobre a densidade, o volume de filtrado e as propriedades reológicas básicas dos fluidos de perfuração. Entretanto, o efeito simultâneo das concentrações de goma xantana, HPA, calcário e microesferas sobre a força gel, avaliada em múltiplos tempos de repouso e em sistemas poliméricos saturados, permanece não investigado. A ausência de modelos preditivos para essas respostas limita a capacidade de formular fluidos de baixa densidade com desempenho de suspensão previsível. Adicionalmente, as

restrições logísticas associadas ao volume de microesferas disponível em escala de campo constituem um aspecto operacional relevante e raramente quantificado.

1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver e otimizar um fluido de perfuração aquoso saturado polimérico de baixa densidade contendo microesferas ocas de vidro (HGS), visando obter formulações que atendam simultaneamente aos critérios operacionais de densidade, reologia, força gel e filtração estabelecidos para a perfuração de poços de petróleo.

1.2. Objetivos específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a viabilidade operacional do uso de microesferas ocas de vidro em fluido *drill-in*, avaliando os limites de redução de densidade tecnicamente sustentáveis e as restrições logísticas associadas ao volume de microesferas disponível em escala de campo;
- compreender o efeito individual e combinado das concentrações de goma xantana, HPA, Calcário e microesferas ocas de vidro sobre a densidade, o volume de filtrado, o perfil reológico em múltiplas taxas de cisalhamento e a força gel nos tempos de repouso de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos;
- identificar, por meio de algoritmo de Evolução Diferencial, as condições de formulação que minimizam a densidade do fluido respeitando simultaneamente as restrições operacionais de reologia e força gel;
- avaliar a capacidade preditiva dos modelos empíricos ajustados por meio de validação experimental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fluidos de perfuração: definição e relevância operacional

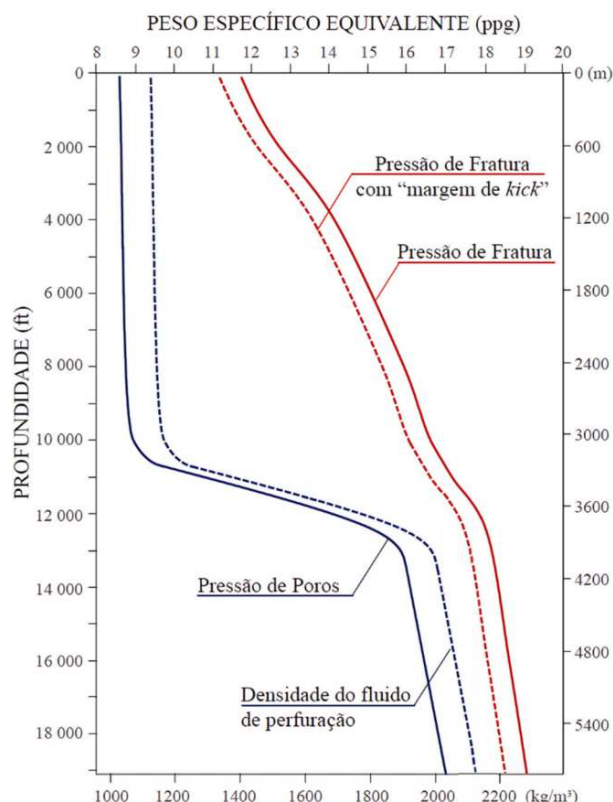
Os fluidos de perfuração são sistemas complexos de sólidos e líquidos projetados para viabilizar a perfuração e construção de poços de petróleo e gás com segurança e estabilidade. Além de funcionarem como um meio de circulação dentro da coluna de perfuração, os fluidos também controlam a pressão interna, facilitam o transporte de cascalho, estabilizam a formação e protegem o reservatório. Para que apresentem tais características, os fluidos requerem formulações adequadas que equilibrem, em sua composição, propriedades como densidade, volume de filtrado, viscosidade e força gel necessárias para a operação (THOMAS, 2001).

O fluido é bombeado durante a perfuração, atravessando os jatos da broca e retornando pelo espaço anular carregando os sólidos gerados pela broca. O fluido não pode ser avaliado por apenas uma propriedade isolada, já que o sistema é submetido a variações de taxa de cisalhamento, temperatura, pressão e concentração de sólidos (AL-DARWEESH *et al.*, 2023). Um fluido de baixa densidade pode ser inadequado para a operação se possuir baixa capacidade de suspensão, volume de filtrado elevado ou instabilidade perante a formação rochosa.

A composição do fluido deve ser definida em função da janela operacional do poço, o intervalo entre a pressão de poros e a pressão de fratura da formação conforme ilustrado na Figura 1. Quando a pressão hidrostática imposta pelo fluido é pequena demais há risco de influxo de fluidos da formação (*kick*), quando a pressão é muito maior que a necessária operacionalmente pode ocorrer fraturamento e danos a formação. Essa condição evidencia a necessidade de densidade adequada, e especialmente quando densidades menores são requeridas para atender poços de baixa pressão (KONBUL; OZBAYOGLU; MATA, 2020).

A pressão hidrostática exercida pelo fluido é função de sua densidade e da profundidade vertical do poço, conforme ilustrado na Figura 1. Em formações de baixa pressão de fratura, fluidos mais densos podem induzir fraturamento da formação, causando perda de circulação, já em formações com pressão de poros elevada fluidos pouco densos podem permitir influxos. Assim a determinação da densidade que o fluido deve possuir é fundamental para reduzir o sobrebalanço aplicado ao reservatório (KUEHN, 2014; KONBUL, OZBAYOGLU, MATA., 2020).

Figura 1 - Representação esquemática da janela operacional do poço



Fonte: Tessari (2019).

Assim como promover o controle de pressão, o fluido precisa formar um reboco fino e de baixa permeabilidade na parede do poço, reduzindo a fração de fase líquida que invade as paredes do poço. A qualidade desse reboco depende da distribuição granulométrica dos sólidos, da interação entre partículas e polímeros, da concentração de materiais obturantes e da estabilidade coloidal do sistema. Portanto, o desempenho de filtrado está diretamente relacionado à microestrutura formada por seus componentes (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Em fluidos aquosos poliméricos a sua composição envolve o uso de aditivos com funções específicas, como viscosificantes, controladores de filtrado, sais, bactericidas e antiespumantes entre outros. Uma opção de viscosificante utilizado é a goma xantana, por conferir comportamento pseudoplástico, conferindo as características de viscosidade necessárias e boa capacidade de suspensão em baixas taxas de cisalhamento (SAIKIA; MAHTO, 2018). Para o controle de filtrado, utiliza-se a poliácridamida (HPA), por sua vez o calcário atua como material sólido na formação do reboco (VILLADA *et al.*, 2022).

No contexto de fluidos de baixa densidade, o uso de partículas menos densas que a água representa uma estratégia de redução da massa específica global do

sistema. Entretanto, a presença dessas partículas pode modificar a formação do reboco, a reologia e a estabilidade de suspensão exigindo avaliação integrada das respostas do fluido (KONBUL; OZBAYOGLU; MATA, 2020; CHEN *et al.*, 2023).

Uma vez que o equilíbrio entre as propriedades do fluido é o que determina sua viabilidade operacional, torna-se necessário detalhar as funções que o fluido deve exercer no sistema de perfuração do poço.

2.1.1. Funções dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração desempenham funções essenciais durante a perfuração, como resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca; limpeza do fundo do poço e transporte dos cascalhos provenientes da ação da broca para a superfície e permitir as interpretações geológicas do material retirado do poço. Além de exercer pressão sobre a formação e revestir as paredes com um reboco assim evitando o desmoronamento do poço e o influxo de fluidos presentes na formação (*kick*) mantendo uma pressão hidrostática suficiente para conter a pressão da formação (THOMAS, 2001).

Bridges e Robinson (2020) explicam que o fluido de perfuração deve, além dessas funções principais, controlar a corrosão das colunas de perfuração, garantir boa cimentação do revestimento, evitar o aprisionamento da tubulação por formação de reboco espesso e controlar o torque em poços desviados. Funções que reforçam a necessidade de equilíbrio entre todas as propriedades do fluido simultaneamente.

Cada uma dessas funções depende de um conjunto de propriedades. A remoção de cascalhos está relacionada à viscosidade em baixas e médias taxas de cisalhamento, ao limite de escoamento e à força gel; o controle de pressão depende diretamente da densidade; e a proteção da formação depende do controle de filtrado e da qualidade do reboco (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

A capacidade de transporte dos cascalhos é especialmente importante em trechos inclinados e horizontais, por possivelmente apresentar leitos com sedimentações, aumentando o torque e arraste, reduzindo a taxa de penetração (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Essa capacidade de transporte está diretamente ligada à viscosidade do fluido em diferentes condições de fluxo. Ao passar pelos jatos da broca, o fluido está sujeito a altas taxas de cisalhamento, para evitar perdas de carga e viabilizar o

bombeamento, deve apresentar baixa viscosidade aparente. Já em baixas taxas de cisalhamento, como o espaço anular, o fluido deve possuir alta viscosidade, aumentando sua capacidade de carregar e manter os cascalhos em suspensão (SHEN *et al.*, 2023). Essas características são possíveis em fluidos pseudoplásticos, comportamento em que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento e aumenta quando essa taxa é reduzida (PEREIRA, 2022). Por outro lado, valores excessivos de viscosidade elevam as perdas de carga durante o bombeamento, aumentando a demanda energética e dificultando a circulação (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Em situações de parada de bombeamento, o fluido deve possuir resistência suficiente para manter os cascalhos suspensos e evitar que se depositem no fundo da coluna, a força gel permite quantificar essa capacidade estrutural do fluido em repouso. Por isso, parâmetros como as leituras em baixas rotações (6 rpm e 3 rpm), o limite de escoamento e a força gel são avaliados em conjunto (SHEN *et al.*, 2023; AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009).

A estabilidade do poço depende de mecanismos físico-químicos e mecânicos. No aspecto físico-químico, por exemplo, sais como cloreto de sódio e cloreto de potássio em fluidos aquosos atuam como inibidores, reduzindo a hidratação de folhelhos por meio do diferencial de concentração osmótica. Enquanto polímeros e partículas contribuem para a formação de uma barreira de baixa permeabilidade. Em fluidos saturados com sais a compatibilidade com polímeros é um desafio já que a salinidade pode reduzir a hidratação da rede polimérica, interferindo na viscosidade e eficiência de controle de filtração de determinados aditivos (DARLEY; GRAY, 1988).

2.1.2. Classificação dos fluidos de perfuração e seus constituintes

O principal critério a se utilizar para a classificação dos fluidos é referente a sua fase contínua, aquosos, não aquosos e pneumáticos. Os fluidos de base aquosa possuem água em sua fase contínua e outros aditivos como viscosificantes e inibidores de formação. Os fluidos de base não aquosa empregam óleo ou fluidos sintéticos como fase contínua, utilizado em formações que necessitam de maior estabilidade térmica ou lubrificação. Os fluidos emulsionados com óleo consistem em emulsões do tipo óleo-em-água, nas quais gotículas de óleo são dispersas na fase aquosa contínua, conferindo maior lubricidade e auxiliando no controle de filtrado

(THOMAS, 2001). Os fluidos pneumáticos incluem ar, gás, névoas e espumas, geralmente empregados em situações nas quais se deseja pressão hidrostática muito baixa, no entanto, apresentam desafios associados à compressibilidade, controle de poço, estabilidade operacional e segurança (AL-DARWEESH *et al.*, 2023). A escolha do fluido mais adequado para a operação é baseada na avaliação de custo, impacto ambiental e desempenho tecnológico (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Os fluidos aquosos e não aquosos podem conter uma série de aditivos com funções específicas, por exemplo viscosificantes, controladores de filtrado, controladores de pH, antiespumantes, bactericidas, obturantes, adensantes, redutores de densidade, inibidores de folhelhos, lubrificantes, emulsificantes, dispersantes, floculantes, agentes sequestrantes e estabilizadores térmicos (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017; THOMAS, 2001). Um componente adicionado ao fluido pode possuir mais de uma função dependendo do fluido e sua funcionalidade. Os principais tipos utilizados em formulações aquosas poliméricas são descritos a seguir:

- **Viscosificantes:** Viscosificantes são responsáveis por aumentar a viscosidade de fluidos e conferir comportamento pseudoplástico, melhorando a capacidade de transporte e suspensão de cascalhos. Alguns exemplos são goma xantana, carboximetilcelulose e bentonita (YOU *et al.*, 2025).
- **Controladores de filtrado:** Controladores de filtrado reduzem a invasão de fase líquida para a formação, formando um reboco de baixa permeabilidade na parede do poço. O mais comum é o hidroxipropilamido (HPA) que atua por adsorção na superfície das partículas sólidas e formação de filme polimérico sobre o reboco (DAVOODI *et al.*, 2024).
- **Inibidores químicos:** Sais como o cloreto de sódio (NaCl) atuam como inibidores osmóticos, reduzindo a hidratação de argilas da formação pelo diferencial de concentração entre o fluido e os poros da rocha (DARLEY; GRAY, 1988).
- **Controlador de pH:** Controladores de pH mantêm o pH em faixa alcalina adequada mantendo a estabilidade de polímeros e evitando corrosão de

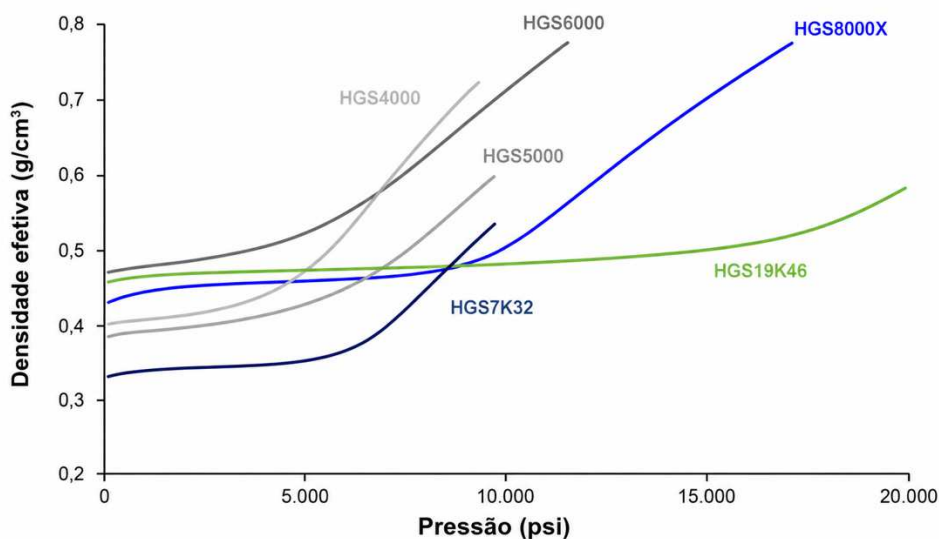
colunas de perfuração (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017). Como exemplos têm-se hidróxido de sódio, carbonato de potássio e óxido de magnésio.

- **Antiespumante:** Os antiespumantes evitam que bolhas de ar incorporadas durante o cisalhamento do fluido alterem a densidade do fluido (BRIDGES; ROBINSON, 2020).
- **Bactericidas:** Os bactericidas previnem a degradação microbiana dos componentes do fluido, especialmente em polímeros que estão sujeitos a exposição de microrganismos (DAVOODI *et al.*, 2024).
- **Obturantes:** Os obturantes bloqueiam a invasão do fluido nos poros da formação, formando uma barreira que reduz a invasão de filtrado protegendo o reservatório. Sua eficiência depende muito do diâmetro da partícula e do tamanho do poro da formação (VILLADA *et al.*, 2022). O carbonato de cálcio é o obturante mais comum em fluidos aquosos por ser solúvel em ácido, facilitando o tratamento de estimulação após a perfuração.
- **Redutores de densidade:** Por serem materiais de baixa massa específica, os redutores de densidade são adicionados ao fluido para reduzir sua densidade e consequentemente reduzindo a pressão hidrostática exercida (KONBUL; OZBAYOGLU; MATA, 2020).

2.1.2.1. Microesferas ocas de vidro e alternativas de redução de densidade

As esferas ocas de vidro, *hollow glass microspheres* (HGS), são partículas esféricas formadas por uma parede fina de vidro. Essa estrutura oca permite ao material apresentar uma baixa densidade e uma elevada resistência mecânica. Alguns fabricantes, como a 3M, produzem densidades nominais de 0,28 a 0,49 g/cm³ e resistências variáveis, conforme a Figura 2. Neste trabalho, utilizou-se o modelo HGS19K46 da linha 3M Glass Bubbles, com densidade de 0,46 g/cm³, diâmetro médio de partícula de 18,7 µm e pressão de sobrevivência de 19.000 psi (3M, 2026).

Figura 2 - Densidades efetivas das diferentes microesferas de vidro em função da pressão.



Fonte: Adaptado de 3M (2023).

Em formações subpressurizadas, com risco de sobrebalanceamento, as microesferas ocas de vidro possibilitam a redução do peso do fluido devido à sua baixa densidade e elevada resistência à compressão, mantendo eficiência operacional adequada. Estudos realizados por Konbul, Ozbayoglu e Mata (2020) no modelo HGS19K46 da linha 3M Glass Bubbles, verificaram que as microesferas ocas de vidro mantêm sua integridade estrutural durante o uso, com ruptura mecânica insuficiente para comprometer de forma significativa as propriedades reológicas do fluido.

Thyagaraju *et al.* (2009) relataram o uso de microesferas ocas de vidro em dois poços *offshore* indianos para perfuração subhidrostática, reduzindo perdas de circulação de 100 bbl/h para 6 bbl/h com esferas de 0,42 g/cm³ e 8.000 psi de resistência. Chen *et al.* (2023) formularam fluidos combinando microesferas ocas de vidro e um agente espumante resultando em uma densidade de fluido inferior a 0,90 g/cm³, mantendo filtrado abaixo de 10 mL e propriedades reológicas dentro de faixas operacionais aceitáveis.

Por possuírem baixa densidade, seu volume para atingir concentrações em escala de campo é muito grande. Aspectos logísticos devem ser levados em consideração, pois a capacidade de estocagem é limitada e a viabilidade técnica deve considerar o volume necessário em grandes bateladas. Por isso estimativas de quantidade possíveis em campo e possíveis densidades alcançadas por fluido perante o material disponíveis devem ser levadas em consideração.

Entre as alternativas para a redução de densidade em fluidos de perfuração estão os fluidos espumados, com agentes espumantes amplamente empregados em operações de perfuração subbalanceada devido à sua baixa densidade e capacidade de transporte (CHEN *et al.*, 2023; AL-DARWEESH *et al.*, 2023).

Recentemente materiais de origem residual e biomassas, como banana, casca de ovo, tâmara e aloe vera, tem sido investigados como aditivos sustentáveis em fluidos de perfuração, com foco na substituição de aditivos químicos convencionais (KHAN; AHMAD SHAHID; ZAHOOR, 2024), embora seu emprego específico como redutores de densidade ainda careça de investigação.

2.2. Fluidos à base de água

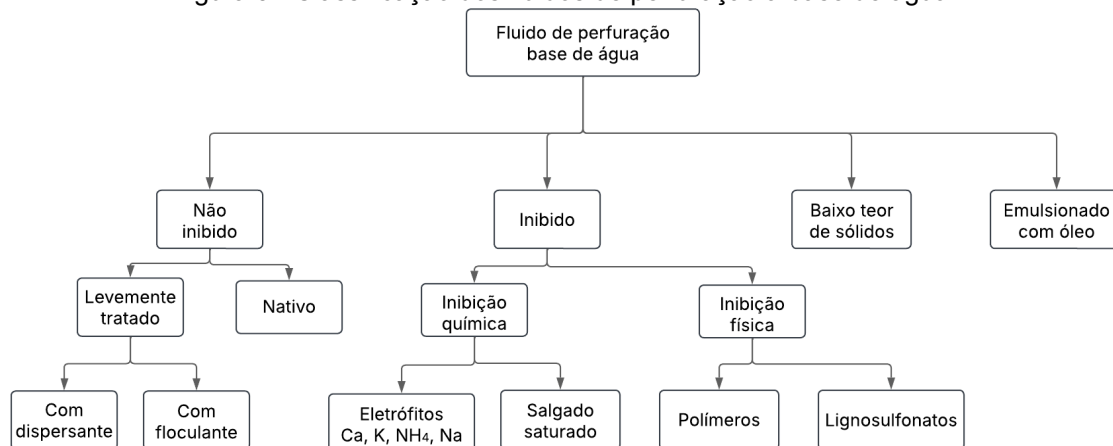
Os fluidos aquosos têm como fase dispersante a água, que pode ser doce, dura ou salgada. A salinidade inferior a 1000 ppm de NaCl equivalente representa uma água doce, já a água dura possui íons dissolvidos como cálcio e magnésio. A água salgada possui concentração superior a 1000 ppm de NaCl equivalente, podendo ser salgada com adição de sais como NaCl ou KCl (THOMAS, 2001). Os fluidos aquosos possuem alta sensibilidade a sua composição, em que cada aditivo fará mudanças significativas nas propriedades físicas e químicas do fluido.

Conforme a Figura 3, Thomas (2001) classifica os fluidos aquosos em 4 tipos: fluidos não inibidos, fluidos inibidos, fluidos emulsionados com óleo e fluidos com baixo teor de sólidos. Os fluidos não inibidos, são utilizados principalmente em formações de rochas superficiais sendo quase inertes a fluidos aquosos, demandando pouco tratamento químico. Por outro lado, fluidos inibidos perfuram rochas que podem interagir quimicamente com a água, exigindo a presença de inibidores químicos e inibidores físicos que trabalham para evitar efeitos indesejados. Os inibidores químicos, como cloretos de sódio, potássio e cálcio, reduzem a atividade química da água; os inibidores físicos, como alguns polímeros, são adsorvidos sobre a superfície da rocha, impedindo seu contato direto com a água.

Os fluidos de baixo teor de sólidos são aplicados para aumentar a taxa de perfuração da broca. Os fluidos emulsionados com óleo consistem em fluidos aquosos nos quais o óleo é disperso como fase descontínua na fase aquosa contínua, formando uma emulsão do tipo óleo em água, sendo utilizados principalmente para

melhorar a lubrificação e a estabilidade do poço em relação aos fluidos inibidos convencionais, sem que a fase contínua deixe de ser a água.

Figura 3 - Classificação dos fluidos de perfuração à base de água.



Fonte: Adaptado de Thomas (2001).

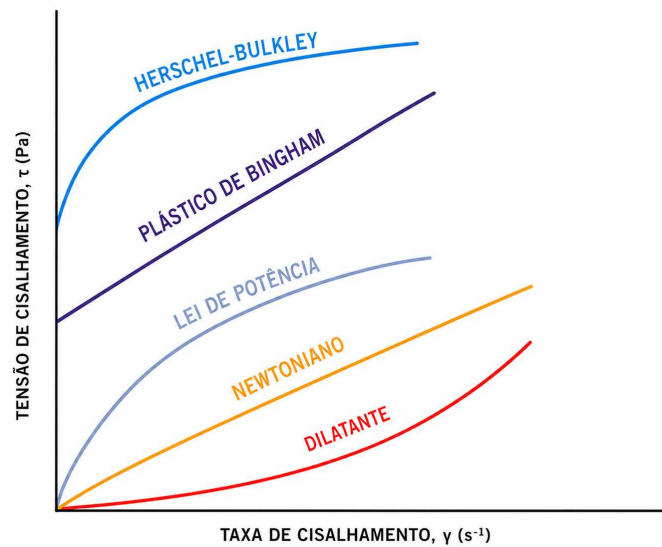
2.3. Reologia de Fluidos de Perfuração

A eficiência dos fluidos está diretamente condicionada ao seu comportamento reológico, regendo sua capacidade de transporte de cascalho e de perda de carga durante o bombeamento, portanto a sua compreensão é indispensável para a avaliação do desempenho do fluido.

A reologia descreve a relação entre tensão aplicada, taxa de deformação e resposta ao escoamento de um material líquido. Em fluidos de comportamento newtoniano essa relação é linear, portanto, a viscosidade é constante independentemente da taxa de cisalhamento que é aplicada, por exemplo água e óleos leves.

Em contrapartida, os fluidos não-newtonianos apresentam viscosidade que varia com a taxa de cisalhamento, podendo apresentar comportamento pseudoplástico ou dilatante. O comportamento pseudoplástico caracteriza-se pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, enquanto o dilatante apresenta o comportamento oposto. Essa relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento pode ser descrita por modelos matemáticos, como os de Ostwald-de Waele (Lei de Potência), de Bingham ou de Herschel–Bulkley (HB) (MACHADO, 2002; CAENN; DARLEY; GRAY, 2017), cujas curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento são ilustradas na Figura 4.

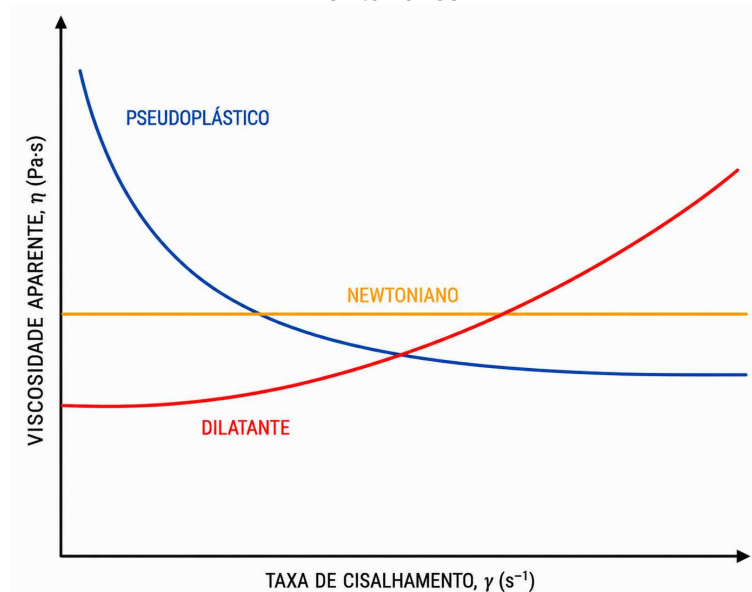
Figura 4 - Perfis newtoniano e não newtonianos relacionando a taxa e tensão de cisalhamento.



Fonte: Elaborada pela autora, 2026

A Figura 5 evidencia o comportamento do fluido newtoniano no qual a viscosidade aparente permanece constante, independentemente da taxa de cisalhamento. Por outro lado, no fluido pseudoplástico a viscosidade decresce à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, ao passo que no dilatante ocorre o comportamento oposto, com aumento da viscosidade. O comportamento pseudoplástico é o desejável em fluidos de perfuração, pois permite baixa viscosidade durante o bombeamento, no qual atua em altas taxas de cisalhamento, e alta viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, favorecendo a suspensão de sólidos (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Figura 5 - Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para fluidos newtoniano e não newtonianos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2026

Em sua maioria os fluidos de perfuração são não-newtonianos por apresentar alta viscosidade em repouso e baixa viscosidade durante bombeamento em altas taxas de cisalhamento, favorecendo a suspensão de sólidos e reduzindo perdas de carga respectivamente. (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

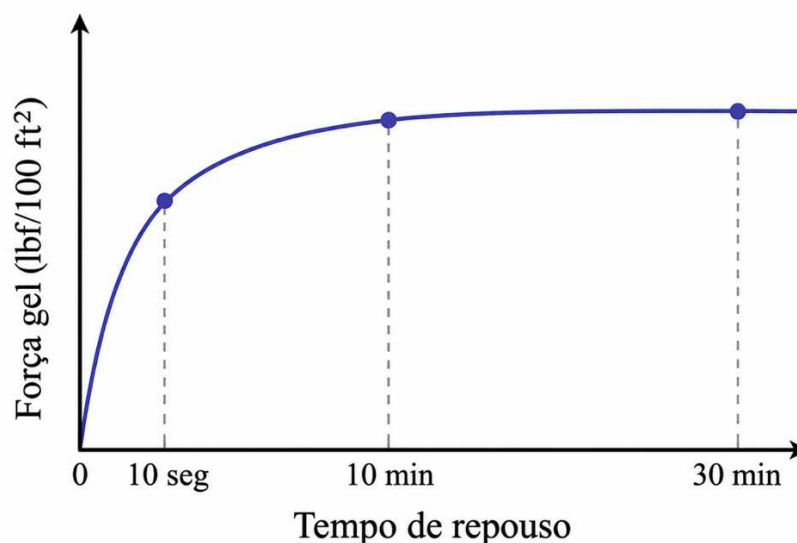
Em fluidos aquosos poliméricos, o comportamento pseudoplástico desejado é conferido por viscosificantes, com destaque para a goma xantana, cuja estrutura macromolecular forma uma rede tridimensional que se rompe sob cisalhamento e se reorganiza em repouso (RAFIEEFAR *et al.*, 2021). Por essa razão, a maioria dos fluidos de perfuração é formulada para apresentar comportamento não newtoniano pseudoplástico, conciliando baixa viscosidade durante o bombeamento com elevada capacidade de suspensão em repouso.

Além disso, alguns fluidos não-newtonianos apresentam propriedades reológicas dependentes do tempo de aplicação do cisalhamento, sendo classificados como tixotrópicos ou reopéticos. No comportamento tixotrópico, a viscosidade diminui ao longo do tempo sob cisalhamento, com recuperação de viscosidade em repouso, enquanto no comportamento reopético ocorre o inverso (MACHADO, 2002; CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

2.4. Força gel

A força gel representa a capacidade do fluido de desenvolver uma estrutura interna quando submetido a um período de repouso, sem cisalhamento. Expressa em lbf/100 ft², a força gel quantifica a tensão necessária para reiniciar o movimento do fluido após o repouso, sendo fundamental para manter os sólidos em suspensão durante paradas operacionais. Sua evolução ao longo do tempo de repouso, representada na Figura 6, é avaliada comparando-se a força gel desenvolvida após intervalos curtos e prolongados, o que permite verificar se a estrutura formada se mantém estável, aumenta ou se enfraquece (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009).

Figura 6 - Perfil da força gel em decorrência do tempo de repouso.



Fonte: Elaborada pela autora, 2026.

O sistema de bombeamento deve ser suficiente para superar os valores informados de gel para recirculação do fluido após paradas, por isso, valores muito elevados representam uma dificuldade operacional. Por outro lado, a força gel é necessária para manter os cascalhos suspensos durante as paradas de conexão de coluna, emergenciais ou manutenção, evitando que o material sedimente, bloqueie a broca e dificulte a retomada da circulação. Dessa forma, o equilíbrio entre os valores de gel inicial e final constitui uma condição essencial de formulação.

Esse comportamento da força gel ao longo do tempo depende da cinética de reconstrução da estrutura interna do fluido após a interrupção do cisalhamento. Quitian-Ardila *et al.* (2025) investigaram o comportamento de *overshoot* de tensão em ensaios de início de fluxo para diferentes fluidos, demonstrando que a cinética de reconstrução estrutural é determinante para o perfil de gel ao longo do tempo. Gordon, Kloxin e Wagner (2017) analisaram a microestrutura de géis coloidais termorreversíveis em processo de envelhecimento, mostrando que a evolução temporal da força gel está diretamente relacionada à reorganização das interações intermoleculares.

Em solução aquosa a viscosidade pode ser constituída pela goma xantana, que forma uma rede física por interações hélice-hélice entre cadeias adjacentes constituindo uma rede de caráter frágil. Essa rede em repouso permite ao fluido a resistência e a capacidade de suspensão necessárias (CHEN *et al.*, 2023). Sob cisalhamento as interações de ligações de hidrogênio entre os ramos poliméricos são parcialmente rompidas e as cadeias se alinham na direção do fluxo reduzindo a

viscosidade. A cinética de reestruturação após o cisalhamento determina a força gel do fluido (RAFIEEFAR *et al.*, 2021).

Em fluidos saturados com sais como cloreto de sódio, os íons em solução podem reduzir as repulsões eletrostáticas da cadeia polimérica e promover maior compactação da estrutura helicoidal; interferindo na hidratação e no volume do polímero. You *et al.* (2025), observaram que a salinidade modifica de forma não linear o comportamento reológico da goma xantana, com principais efeitos em concentrações acima da força iônica crítica do polímero.

A investigação realizada por Akpan *et al.* (2020) mostrou que a presença de sal modifica significativamente a viscosidade aparente, viscosidade plástica e limite de escoamento após envelhecimento térmico, no qual o fluido é exposto a temperaturas elevadas.

2.5. Filtração, reboco e dano à formação

Durante o contato do fluido com a formação permeável, parte da fase líquida invade os poros enquanto os sólidos são retidos na superfície, originando o reboco. A espessura e a permeabilidade desse reboco determinam a taxa de invasão de filtrado na formação. Para manter a estabilidade no poço e evitar a perda de líquido para a formação e a consequente alteração da densidade do fluido, o desejado é que o reboco seja fino, uniforme e de baixa permeabilidade, de modo que funcione como uma barreira que restringe a passagem da fase líquida e reduz a invasão de filtrado (BRIDGES; ROBINSON, 2020).

O controle de filtrado em fluidos aquosos poliméricos depende principalmente da ação dos polímeros redutores de filtrado, sendo o hidroxipropilamido (HPA) um dos aditivos para essa função. O HPA é um amido modificado que forma um filme polimérico ao se hidratar, atua por adsorção sobre as partículas sólidas, como carbonato de cálcio, que forma o esqueleto sólido do reboco. Preenchendo os espaços entre os grãos e reduzindo a permeabilidade do reboco, limitando a invasão de fase líquida para a formação (DAVOODI *et al.*, 2024).

O controle do filtrado é ainda mais crítico nos fluidos *drill-in*, aqueles que entram em contato direto com o reservatório produtor, nos quais a invasão de filtrado pode causar inchamento de argilas, alteração da molhabilidade, precipitação de sais e bloqueio por polímeros. Nesse caso, é necessário reduzir a invasão de fase líquida na

formação sem comprometer a posterior produção do reservatório, ou seja, a vedação deve ser reversível. O calcário atende a essas exigências, atuando como agente obturante, obstruindo os poros da rocha, e por ser solúvel em ácido, pode ser removido posteriormente por tratamento, restaurando o acesso à zona produtora.

O critério relatado por Abrams (1977) argumenta que o diâmetro médio das partículas do agente obturante deve ser igual ou superior a um terço do diâmetro médio da garganta dos poros. Tang *et al.* (2022) estudaram nanopartículas de calcário com o objetivo de controlar o filtrado e constataram que a combinação de polímero sintético e suas partículas resultam em rebocos de menor espessura e permeabilidade, sugerindo que a combinação entre partículas de diferentes escalas potencializa o controle de filtrado. Logo, todo material que obstrua e ajude a impedir a invasão de líquido na formação deve apresentar distribuição granulométrica compatível com a garganta dos poros da formação a ser perfurada.

2.6. Influência dos sólidos nas propriedades do fluido

A adição de sólidos a um fluido de perfuração altera simultaneamente a densidade, a reologia e a filtração do sistema. Sólidos menos densos que a fase contínua reduz a densidade global do fluido, enquanto partículas mais densas a elevam. O efeito sobre a reologia depende da fração volumétrica de sólidos, da morfologia e do tamanho das partículas, além da interação delas com os polímeros presentes no sistema.

O aumento do teor total de sólidos eleva as colisões e o atrito interno entre partículas contribuindo para o incremento da viscosidade plástica. (JASSIM; YUNUS; RASHID, 2020). Com a presença de mais material sólido o espaço entre as partículas diminui e a mobilidade da fase contínua também, elevando a dissipação de energia durante o escoamento, fenômeno denominado de volume excluído. A adsorção de cadeias poliméricas na superfície pode também ocorrer, imobilizando parte do polímero (DARLEY; GRAY, 1988).

A incorporação de esferas ocas pode preencher o espaço no reboco e reduzir a permeabilidade, em excesso, podem gerar caminhos preferenciais e rebocos menos compactos. Em altas concentrações, as microesferas ocas de vidro podem modificar o empacotamento e tender à flutuação no fluido em razão da diferença de densidade, alterando a distribuição de tensões do sistema. A rede polimérica deve ser capaz de

manter a homogeneidade durante o tempo de espera em operação, fato esse pouco explorado em fluidos poliméricos sem argilas. Essas dualidades justificam a necessidade de otimização das concentrações dos componentes.

2.7. Parâmetros do fluido a serem controlados

A avaliação do desempenho de um fluido de perfuração baseia-se em um conjunto de parâmetros que refletem sua capacidade de cumprir as funções operacionais no poço. Os procedimentos de referência para os ensaios em fluidos aquosos são estabelecidos pela norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009), que define as condições e os métodos de medição das propriedades do fluido. Entre alguns parâmetros geralmente controlados são a densidade, volume de filtrado, as leituras correspondentes a diferentes taxas de cisalhamento, viscosidade plástica, viscosidade aparente, limite de escoamento e força gel.

A densidade do fluido de perfuração controla diretamente a pressão hidrostática exercida sobre as paredes do poço, sendo determinante para manter o equilíbrio dentro da janela operacional entre as pressões de poros e de fratura. Uma estratégia para reduzir a densidade é o uso de partículas menos densas que a fase contínua, sendo a redução proporcional à fração volumétrica dessas partículas no sistema. Konbul, Ozbayoglu e Mata (2020) verificaram que o efeito de redução é proporcional à fração volumétrica das partículas, mas pode ser revertido em caso de ruptura mecânica.

O volume de filtrado expressa a quantidade de fase líquida que invade a formação durante a filtração, estando diretamente relacionado à qualidade do reboco formado durante o ensaio que pode ser realizado em condições HPHT (alta pressão e alta temperatura) ou LPLT (baixa pressão e baixa temperatura), dependendo da aplicação do fluido, conforme procedimentos padronizados pela norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009). Em fluidos *drill-in*, seu controle é crítico. Fang *et al.* (2022) investigaram mecanismos de dano à formação em reservatório carbonático e demonstraram que a invasão de filtrado pode causar inchamento de argilas, alteração da molhabilidade e tamponamento por polímeros sendo o ajuste granulométrico do agente obturante determinante para reduzir o dano permanente.

A viscosidade plástica (VP) está associada a resistência ao escoamento decorrente do atrito entre as partículas sólidas e também entre as partículas sólidas e a fase líquida, refletindo a fricção interna do sistema sob altas taxas de cisalhamento. Por isso, o aumento da concentração de sólidos no fluido tende a elevar a VP. Por outro lado, a viscosidade aparente (VA) representa a resistência global ao escoamento em altas taxas de cisalhamento. Já o limite de escoamento (LE) corresponde à tensão mínima necessária para que o fluido inicie o escoamento a partir do repouso, sendo um parâmetro fundamental para a capacidade de transporte de sólidos e para a estabilidade do sistema em condições estáticas (SAASEN; YTREHUS, 2020; CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

Os fluidos de perfuração podem ser caracterizados por leituras em múltiplas taxas de cisalhamento. Por estarem submetidos a regimes de cisalhamento muito distintos ao longo da circulação como altas taxas na broca e no interior da coluna e baixas taxas no espaço anular e em repouso. Essa caracterização em diferentes rotações permite avaliar tanto a capacidade de bombeamento em alto cisalhamento quanto a capacidade de suspensão de sólidos em baixo cisalhamento (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017).

A força gel representa a capacidade do fluido de desenvolver uma estrutura interna em repouso, sem cisalhamento. Essa estrutura, formada pela reorganização das interações entre as cadeias poliméricas e as partículas dispersas, confere ao fluido resistência ao escoamento, sendo essencial para manter os sólidos em suspensão durante paradas operacionais. Deve-se atentar que valores muito baixos de força gel podem causar sedimentação, por outro lado, valores muito altos dificultam o reinício do bombeamento. Em sistemas contendo partículas de densidades muito diferentes, como calcário e esferas ocas de vidro, a força gel deve ser suficiente para sustentar ambas as populações durante o repouso esperado em operação (QUITIAN-ARDILA *et al.*, 2025; SHEN *et al.*, 2023).

A obtenção de um fluido que atenda simultaneamente a densidade, a filtração, o perfil reológico e a força gel é um desafio de formulação, pois um mesmo componente afeta múltiplas propriedades ao mesmo tempo. Por isso, o desenvolvimento de fluidos exige ferramentas que permitam avaliar o efeito conjunto das variáveis da composição, papel desempenhado pelo planejamento experimental e pelas técnicas de otimização.

2.8. Planejamento experimental e evolução diferencial

O planejamento experimental de formulações que envolvem múltiplas variáveis de composição e diversas respostas de interesse simultâneas é indispensável por possibilitar a redução do número de ensaios, identificar efeitos principais e avaliar interações e construir modelos empíricos preditivos. Entre os modelos de planejamento mais utilizados destacam-se os fatoriais completos, fatoriais fracionados e Planejamento Composto Central (PCC). Para sistemas com múltiplos fatores o PCC é o mais indicado em ajustes de segunda ordem. (MONTGOMERY, 2017)

Introduzido por Box e Wilson em 1951 o PCC é uma das classes mais populares de planejamento de segunda ordem. A estratégia é combinar pontos fatoriais de dois níveis com pontos centrais e pontos axiais, permitindo estimar os termos lineares, de interação e quadráticos dos modelos utilizados na Metodologia de Superfície de Resposta (RSM - Response Surface Methodology). O RSM, por sua vez, é um conjunto de técnicas estatísticas voltadas ao planejamento experimental, ajudando a determinar condições ótimas considerando impactos individuais e interações dos fatores.

Alguns estudos de fluidos de perfuração empregam o RSM com PCC para otimizar propriedades reológicas e de filtração. Betiha *et al.* (2020) utilizou essa metodologia para otimizar, viscosidade plástica, viscosidade aparente, limite de escoamento e força gel de fluido aquoso à base de nanocompósito de celulose-sílica, apresentando consistência entre dados experimentais e teóricos. O efeito de nanopartículas de MWCNTs/TiO₂ e celulose polianônica nas propriedades de filtração foram avaliados utilizando PCC por Khan *et al.* (2024), no qual seu modelo preditivo desenvolvido mostrou boa concordância com os ensaios. De modo similar, Saikia e Mahto (2018) empregaram RSM com PCC para otimizar fluidos de perfuração destinados a formações portadoras de hidratos de gás, utilizando a viscosidade aparente como resposta e obtendo formulações otimizadas por meio de modelos quadráticos validados por ANOVA.

A validação experimental dos modelos obtidos pelo RSM é etapa indispensável, pois os modelos empíricos gerados são válidos apenas no domínio experimental investigado e dependem da precisão dos equipamentos de medição. Vale ressaltar que a interpretação dos modelos obtidos deve sempre considerar a incerteza

experimental e precisão dos equipamentos de medição, sendo indispensável a validação experimental.

A evolução diferencial (ED) é um algoritmo meta-heurístico de otimização global proposto por Storn e Price (1997). Por sua simplicidade e robustez, possui ampla aplicabilidade em problemas de otimização contínua com múltiplas variáveis. O algoritmo opera sobre uma população de NP vetores candidatos no espaço contínuo de variáveis de decisão, aplicando iterativamente três operações: mutação, cruzamento e seleção (ALI; AHMAD; GANAT, 2021).

Na etapa de mutação o vetor doador é gerado pela combinação linear de três vetores distintos da população (x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}) aplicado um fator de escala (F) conforme Equação 1. No cruzamento o vetor é combinado com o vetor alvo com uma taxa de cruzamento (CR) gerando um vetor trial. Na seleção o vetor trial substitui o vetor original apenas se atender todas as restrições sugeridas. O conjunto dessas três operações aplicado a todos os vetores da população constitui uma geração e o ciclo se repete até que um critério de parada seja satisfeito.

$$x_i = x_{r1} + F \cdot (x_{r2} - x_{r3}) \quad (1)$$

Os parâmetros de controle influenciam diretamente o desempenho do algoritmo. Com base em levantamento extensivo da literatura, Ali, Ahmad e Ganat (2021) identificaram que os valores mais frequentemente adotados são NP = 100, F = 0,5 e CR = 0,5, com tamanho de população recomendado entre cinco e dez vezes o número de variáveis de decisão. Em problemas de alta dimensionalidade, o algoritmo pode apresentar estagnação prematura e redução de diversidade populacional, o que motivou o desenvolvimento de variantes com estratégias de mutação adaptativas (ALI; AHMAD; GANAT, 2021).

Li Chen (2022) demonstrou a viabilidade de modelos preditivos empíricos aplicados à inversão de formulações de fluido de perfuração, utilizando as propriedades-alvo como entrada para identificar concentrações de aditivos por meio de máquina de suporte vetorial. Elkatatny (2019) aplicou variante auto-adaptativa de ED para otimizar modelos de predição de propriedades reológicas de fluido aquoso de perfuração, demonstrando a aplicabilidade do algoritmo nesse contexto.

A combinação entre RSM e ED representa uma abordagem complementar para a otimização de sistemas de engenharia com múltiplas respostas simultâneas. Os

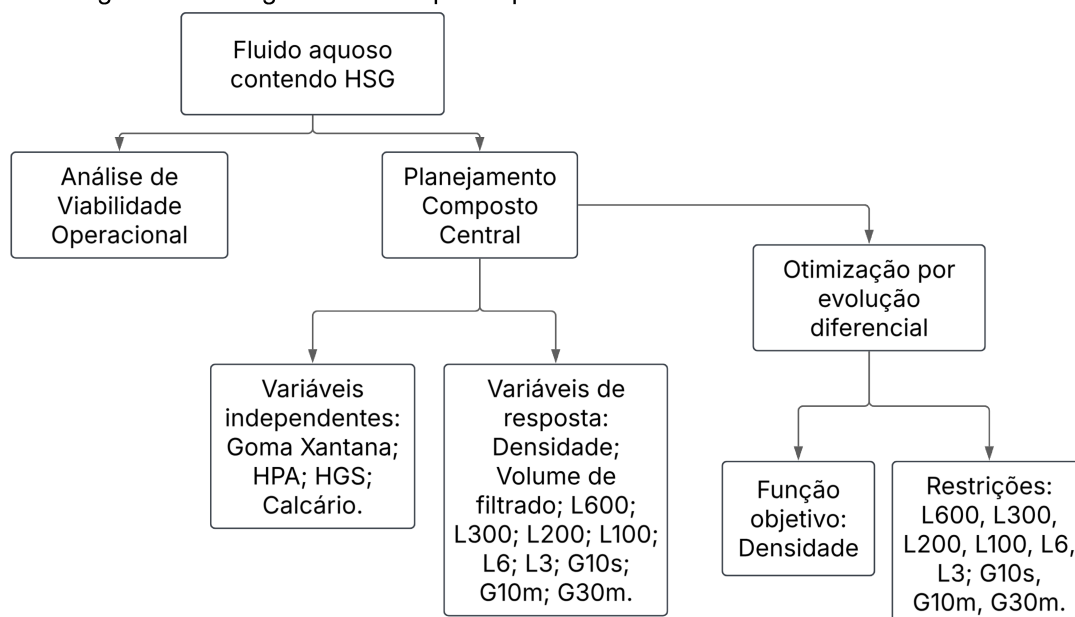
modelos empíricos de segunda ordem gerados pelo RSM são utilizados como funções objetivo na ED, permitindo explorar globalmente o espaço de soluções sem execução experimental exaustiva. Essa integração é particularmente pertinente em sistemas de fluidos de perfuração, nos quais as interações entre componentes são complexas e os requisitos operacionais impõem restrições simultâneas sobre múltiplas propriedades.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho está estruturado em duas etapas principais, conforme apresentado na Figura 7. A primeira consiste na análise de viabilidade operacional, realizada com um fluido aquoso *drill-in* contendo microesferas ocas de vidro, na qual foram avaliadas diferentes proporções entre calcário e microesferas ocas de vidro e estimado o volume de esferas necessário para atingir densidades operacionalmente relevantes em campo, estabelecendo os limites práticos para o planejamento experimental. A segunda etapa compreende o Planejamento Composto Central (PCC) de um fluido aquoso saturado polimérico com NaCl, a partir do qual foram ajustados modelos empíricos de segunda ordem para as respostas do fluido. Esses modelos foram utilizados na otimização por Evolução Diferencial (ED), tendo a densidade como função objetivo a ser minimizada e as leituras reológicas e forças gel como restrições operacionais, buscando identificar formulações que atendam simultaneamente aos critérios estabelecidos.

São apresentados neste capítulo os materiais utilizados e o procedimento de preparação dos fluidos e os ensaios de caracterização: densidade, filtração estática, reologia, força gel em múltiplos tempos de repouso e pH. Além do detalhamento da análise de viabilidade operacional, PCC e da otimização por evolução diferencial.

Figura 7 - Fluxograma das etapas experimentais desenvolvidas no trabalho.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

3.1. Formulações padrão de um fluido de perfuração

Na Tabela 1 estão listados todos os materiais utilizados em todas as composições de fluidos expostos nesse trabalho e suas respectivas funções. Os aditivos bicarbonato de sódio, cloreto de potássio e inibidor de folhelhos foram empregados exclusivamente nos testes com fluido *drill-in*, não compondo a formulação final otimizada.

Tabela 1 - Componentes de fluidos e suas funções.

Aditivo	Principal função
Água destilada	Fase contínua
Bicarbonato de sódio	Controlador de pH/ sequestrante de cálcio
Cloreto de sódio	Inibidor químico
Cloreto de potássio	Inibidor químico
Antiespumante	Romper tensão superficial de espumas
Glutaraldeído	Bactericida
Inibidor de folhelhos	Estabilizador de argilas
Óxido de magnésio	Controlador de pH
Goma xantana	Viscosificante
Hidroxipropilamido (HPA)	Redutor de filtrado
Calcário	Obturante
Microesferas ocas de vidro	Redutor de densidade

Fonte: elaborada pela autora (2026).

Cada aditivo utilizado no trabalho desempenha uma função específica e complementar no sistema. A água destilada constitui a fase contínua. O cloreto de sódio e o cloreto de potássio atuam como inibidores químicos, reduzindo a hidratação de argilas da formação e saturando o fluido, função reforçada pelo inibidor de folhelhos, que contribui para a estabilização das argilas. O bicarbonato de sódio atua como controlador de pH e sequestrante de cálcio, enquanto o óxido de magnésio também auxilia no controle do pH, mantendo o meio em faixa alcalina adequada à estabilidade dos polímeros. O antiespumante controla a formação de espuma durante o preparo e a agitação do fluido, evitando a incorporação de bolhas de ar que reduziriam a densidade e comprometeriam a homogeneidade e as medições de propriedades do fluido. O glutaraldeído atua como bactericida, prevenindo a degradação microbiana dos polímeros. A goma xantana é o viscosificante e principal formador da rede polimérica, enquanto o hidroxipropilamido (HPA) atua como redutor

de filtrado. O calcário desempenha a função de agente obturante. A redução de densidade foi avaliada pelo uso das microesferas ocas de vidro do modelo HGS 19K46.

Os aditivos Cloreto de sódio (NaCl) e óxido de magnésio são fabricados pela Êxodo Científica em padrão analítico; já as microesferas ocas de vidro (HGS) do modelo 19K46 foram fornecidas pela 3M™. Os demais aditivos foram fornecidos pela Petrobras S.A.

3.1.1. Componentes dos fluido *drill-in* para análise de viabilidade operacional

Foram produzidos fluidos aquosos com a formulação comumente chamada de *drill-in*, empregados na perfuração da zona produtora, para análise de viabilidade operacional, com a composição base mostrada na Tabela 2. A composição base do fluido *drill-in* foi fornecida pela Petrobras e adaptada para a avaliação o efeito da concentração de calcário e de esferas de vidro em parâmetros importantes como densidade, volume de filtrado e reologia.

Tabela 2 - Composição dos fluidos e concentração dos componentes em um fluido *drill-in*.

Componentes	Concentração/ faixa estudada
Água destilada	250 mL
Bicarbonato de Sódio	0,50 lb/bbl
Goma xantana	2,00 lb/bbl
HPA	6,00 lb/bbl
Cloreto de potássio (KCl)	15,70 lb/bbl
Inibidor de folhelhos	3,50 lb/bbl
Glutaraldeído	0,20 lb/bbl
Antiespumante	0,20 lb/bbl
Óxido de magnésio	1,00 lb/bbl
Calcário	0 – 25,00 lb/bbl
Microesferas ocas de vidro	0 – 28,12 lb/bbl

Fonte: elaborada pela autora (2026).

As microesferas ocas de vidro foram adicionadas com o intuito de diminuir a densidade final do fluido. Já o calcário foi incluído como fator de variação por ser uma partícula sólida que influencia diretamente os parâmetros avaliados, além de desempenhar a função de agente obturante no controle de filtrado. Como a literatura

indica que sua concentração afeta as propriedades do fluido, sua variação permitiu avaliar tanto o efeito isolado do calcário quanto o comportamento do sistema sob maior carga total de sólidos.

3.1.2. Componentes do fluido aquoso para o PCC

Com base nos resultados da primeira etapa deste trabalho, a formulação descrita na Tabela 3 foi proposta para a realização de um Planejamento Composto Central, visando avaliar os efeitos de goma xantana, HPA, calcário e microesferas ocas de vidro nas propriedades do fluido de perfuração. Os componentes do fluido aquoso saturado polimérico e suas respectivas concentrações estão apresentados na Tabela 3 e um exemplo de um dos fluidos após serem produzidos está ilustrado na Figura 8. O fluido deve ser fabricado em reator encamisado para manter a temperatura e evitar assim a evaporação da água.

O uso de antiespumante não é usual em fluidos aquosos poliméricos saturados, nesta formulação, porém foi adotado para facilitar a incorporação das microesferas ocas de vidro e reduzir a retenção de ar durante a agitação.

As faixas de concentração dos componentes estudados foram definidas a partir de levantamento na literatura e de testes experimentais preliminares, de modo que o ponto central correspondesse a uma formulação próxima daquela capaz de atender aos critérios operacionais estabelecidos. A faixa da goma xantana foi determinada para que mesmo na menor concentração o comportamento pseudoplástico fosse mantido e na maior concentração do componente o bombeamento não seja comprometido devido a viscosidade muito elevada.

A faixa do HPA foi estabelecida para contrabalancear o efeito dos sólidos sobre a filtração, uma vez que em excesso eles podem favorecer um reboco com canais preferenciais que facilitam a passagem de filtrado para a formação. A faixa de calcário foi definida com base em concentrações típicas de agentes obturantes em fluidos de perfuração, contemplando desde a ausência do aditivo até teores elevados. Já a faixa das microesferas de vidro foi definida de modo que a variação de densidade entre os experimentos fosse superior ao erro de medida da balança de lama, permitindo distinguir o efeito real das microesferas sobre a densidade.

Tabela 3 - Componentes do fluido utilizado no PCC.

Componente	Concentração/ faixa estudada
Água destilada	250 mL
Cloreto de sódio (NaCl)	110,00 lb/bbl
Antiespumante	0,20 lb/bbl
Glutaraldeído	0,20 lb/bbl
Óxido de magnésio	1,50 lb/bbl
Goma xantana	1,30 – 2,70 lb/bbl
HPA	4,00 – 8,00 lb/bbl
Calcário	0 – 28,00 lb/bbl
Microesferas ocas de vidro	0 – 22,63 lb/bbl

Fonte: elaborada pela autora (2026).

Figura 8 - Fluido aquoso polimérico saturado no reator encamisado.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

3.2. Medida de tamanho e densidade de alguns aditivos sólidos

A fim de se compreender melhor o papel do HPA, calcário e microesferas ocas de vidro na formulação de fluidos de perfuração, foram medidas as densidades do calcário e das microesferas ocas de vidro, bem como a granulometria do calcário, das microesferas ocas de vidro e do HPA.

A distribuição granulométrica desses materiais foi medida empregando o equipamento Mastersizer 2000 (Malvern), disponível na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, mostrado na Figura 9. O método de difração a laser foi realizado por via úmida, empregando água destilada como meio de dispersão, por se assemelhar mais com a fase contínua do fluido. Para desaglomeração e obtenção de suspensão homogênea as amostras foram

submetidas a agitação contínua e ultrassom. Os resultados foram expressos em termos de diâmetro de esfera de volume equivalente.

Figura 9 - Mastersizer 2000 (Malvern).



Fonte: elaborada pela autora (2026).

A densidade real do calcário e das microesferas ocas de vidro foi determinada por picnometria a hélio, utilizando um picnômetro a gás Micromeritics AccuPyc 1330, ilustrado na Figura 10. Essa metodologia baseia-se na expansão do hélio em um volume de célula calibrado contendo a amostra sólida, permitindo determinar o volume real das partículas com precisão. Cada amostra foi submetida a três medições consecutivas, adotando-se a média aritmética como valor representativo da densidade do material.

Figura 10 - Picnômetro a gás Micromeritics AccuPyc 1330.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

3.3. Procedimento Experimental

O procedimento experimental é composto pela avaliação da viabilidade operacional do uso de microesferas ocas de vidro em fluido *drill-in*, por meio da caracterização de fluidos com diferentes proporções de calcário e microesferas e a execução do Planejamento Composto Central do fluido aquoso polimérico saturado com NaCl, com a caracterização de todas as formulações. Em ambas as etapas, as propriedades dos fluidos foram avaliadas segundo os procedimentos estabelecidos pela norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009), de modo a verificar o atendimento aos critérios reológicos e físico-químicos exigidos para aplicação em perfuração. A seguir, descrevem-se os equipamentos e os métodos empregados em cada ensaio.

3.3.1. Análise da viabilidade operacional do uso de esferas de vidro em campo

Os fluidos foram produzidos em reator encamisado a 25 °C, utilizando misturador Silverson L5M-A ®. Adicionou-se primeiramente a água destilada e o bicarbonato de sódio a uma agitação de 3000 rpm, seguidos da goma xantana e do HPA, mantendo-se a mistura sob agitação de 5000 rpm por 30 minutos para hidratação dos polímeros. O cloreto de potássio, o inibidor de folhelhos, o glutaraldeído, o antiespumante e o óxido de magnésio foram adicionados sequencialmente, com intervalo de 5 minutos entre cada adição, mantendo-se a agitação constante.

As concentrações de todos os componentes, com exceção do calcário e das microesferas ocas de vidro, foram mantidas constantes conforme a Tabela 2. O calcário e as microesferas ocas de vidro foram sempre os últimos componentes adicionados, em concentrações conforme proposto na Tabela 4. Após essa adição, o fluido foi mantido sob agitação a 10.000 rpm por 15 minutos para garantir a completa homogeneização.

Tabela 4 - Fluidos produzidos na primeira etapa deste trabalho.

Experimento	Nomenclatura	Calcário (lb/bbl)	Esfera de Vidro (lb/bbl)
1	C0EV0	0	0
2	C10EV0	10	0
3	C20EV0	20	0
4	C25EV0	25	0
5	C25EV9	25	9,37
6	C25EV18	25	18,75
7	C25EV23	25	23,44
8	C25EV28	25	28,12
9	C20EV11	20	11,00
10	C10EV10	10	10,00

Fonte: elaborada pela autora (2026).

A produção de fluidos de perfuração envolve desafios logísticos significativos, especialmente no que diz respeito ao volume de microesferas ocas de vidro a ser transportado para as proximidades do poço. Com esse intuito, desenvolveu-se uma análise que estima a concentração máxima de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável em função do volume de fluido a ser produzido, considerando a capacidade de armazenamento disponível. A partir dessa concentração máxima de microesferas ocas de vidro para cada volume a ser produzido, calculou-se a menor densidade possível do fluido para diferentes concentrações de calcário e elaborou-se um gráfico, permitindo avaliar o impacto logístico sobre a densidade final alcançável em campo.

Estimou-se a concentração máxima de microesferas ocas de vidro disponível para a produção de 5.000 a 7.000 bbl de fluido de perfuração. Esse cálculo considerou uma capacidade de armazenamento (CP) de 95 m³ de microesferas na sonda e a densidade *bulk* média das esferas de vidro (db) de 243,98 g/L, determinada pela média das densidades *bulk* aerada e compactada das microesferas ocas de vidro de acordo com Altino et al. (2021).

A Equação 2 é a relação empregada no cálculo da concentração máxima de microesferas no fluido de perfuração operacionalmente viável em lb/bbl (C_{EV}).

$$C_{EV} = \frac{CP \cdot db \cdot 2,2}{V} = \frac{51025,26}{V} \quad (2)$$

No qual, V representa o volume de fluido produzido na sonda em bbl e 2.2 é um fator de conversão que deixa C_{EV} em lb/bbl.

A concentração máxima obtida pela Equação 2 foi então utilizada para o cálculo da menor densidade de fluido possível em cada cenário. A equação da densidade final do fluido, considerando a concentração de microesferas ocas de vidro e a concentração de calcário, foi desenvolvida a partir de dados experimentais e é discutida na seção de Resultados e Discussões.

3.3.2. Planejamento Composto Central

O procedimento de preparação do fluido foi conduzido em béquer encamisado termostatizado, empregando misturador de alto cisalhamento (Silverson® L5M-A). Água destilada (250 mL) e cloreto de sódio (NaCl) foram adicionados ao béquer sob agitação de 2000 rpm, mantendo-se a mistura por 15 minutos a 35°C até completa dissolução do sal. Em seguida, o antiespumante foi adicionado ao sistema, com o objetivo de reduzir a tensão superficial do meio e facilitar a posterior incorporação das microesferas ocas de vidro. Ao término dessa etapa, a temperatura do sistema foi reduzida para 25°C. Na etapa seguinte, a goma xantana foi incorporada e a mistura permaneceu sob agitação por 5 minutos, após o qual a velocidade foi elevada para 5000 rpm. O hidroxipropilamido (HPA) foi então adicionado, e o sistema foi mantido sob agitação por 30 minutos a 5000 rpm.

Posteriormente, o glutaraldeído e o óxido de magnésio (MgO) foram introduzidos ao fluido, permanecendo sob agitação por 5 minutos adicionais. Na etapa seguinte, o calcário foi incorporado ao sistema com a velocidade de agitação elevada para 10000 rpm, mantendo-se essa condição por 20 minutos. Por fim, as microesferas de vidro foram adicionadas ao fluido, e a agitação foi mantida por 15 minutos para garantir a completa homogeneização do sistema.

Os quatro fatores independentes adotados foram: goma xantana (GX), amido de hidroxipropila (HPA), partículas de calcário e microesferas ocas de vidro, utilizando α de ortogonalidade igual a 1,5467 e triplicata no ponto central, conforme Tabela 5. O Planejamento Composto Central foi selecionado por permitir a estimativa de efeitos quadráticos e de interação entre fatores com menor número de experimentos em comparação a um planejamento fatorial completo.

Tabela 5 - Valores reais das variáveis independentes em cada nível codificado do planejamento composto central.

Variável (unidade)	- α	-1	0	+1	+ α
Goma xantana (lb/bbl)	1,30	1,55	2,00	2,45	2,70
HPA (lb/bbl)	4,00	4,71	6,00	7,29	8,00
Calcário (lb/bbl)	0,00	4,95	14,00	23,05	28,00
Microesferas de vidro (lb/bbl)	0,00	4,00	11,32	18,63	22,63

Fonte: elaborada pela autora (2026).

O planejamento resultou em 27 formulações experimentais. Todos os fluidos foram caracterizados quanto à densidade, ensaio de filtração, perfil reológico e força gel, fornecendo base estatística para o ajuste de um modelo quadrático completo, possibilitando a avaliação de efeitos principais, interações entre fatores e efeitos de curvatura associados às variáveis estudadas.

Os fatores foram avaliados nos níveis codificados $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ e $+\alpha$, conforme Tabela 5. A conversão entre níveis codificados e valores reais foi realizada por transformação linear entre os níveis $-1,54671$, -1 , 0 , $+1$, $+1,54671$ segundo as Equações 3,4,5 e 6, nos quais X_1, X_2, X_3 e X_4 são as concentrações codificadas da goma xantana, HPA, calcário e microesferas ocas de vidro respectivamente e C_{GX} é a concentração de goma xantana em lb/bbl, C_{HPA} é a concentração de HPA em lb/bbl, C_C é a concentração de calcário em lb/bbl e C_{EV} é a concentração de microesferas ocas de vidro em lb/bbl.

$$X_1 = \frac{C_{GX} - 2}{0,45} \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{C_{HPA} - 6}{1,29} \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{C_C - 14}{9,05} \quad (5)$$

$$X_4 = \frac{C_{EV} - 11,32}{7,31} \quad (6)$$

3.3.3. Otimização por Evolução Diferencial

Os dados experimentais foram ajustados a modelos polinomiais de segunda ordem, visando descrever a influência das variáveis independentes sobre as

respostas: densidade, L600, L300, L200, L100, L6, L3, força gel de 10 segundos, força gel de 10 minutos e força gel de 30 minutos. Os coeficientes estimados permitiram identificar os efeitos principais e as interações significativas entre os fatores. A adequação dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da significância estatística dos termos, $p < 0,05$ para a densidade e $p < 0,15$ para os demais parâmetros. Esses modelos foram utilizados como funções de predição no algoritmo de evolução diferencial.

Visando identificar formulações que atendessem simultaneamente aos critérios operacionais estabelecidos fornecidos pela empresa parceira (Tabela 6), foi aplicada uma estratégia de otimização utilizando o algoritmo de evolução diferencial variando-se a concentração de goma xantana, HPA, calcário e microesferas ocas de vidro nos limites codificados do PCC. Esse algoritmo consiste em um método numérico baseado em população, capaz de buscar soluções ótimas por meio de um processo iterativo que envolve operações de mutação, recombinação e seleção, simulando mecanismos evolutivos naturais (STORN; PRICE, 1997). Ao longo das iterações, o algoritmo ajusta os valores das variáveis de decisão com o objetivo de minimizar uma função objetivo, a densidade previamente definida, respeitando as restrições impostas ao problema, definidas como intervalos de valores pré-estabelecidos para cada resposta. Os valores das leituras de taxa de cisalhamento e forças gel foram comparados aos limites operacionais estabelecidos pelas orientações da Petrobras.

A função objetivo foi a minimização da densidade, sujeita a restrições simultâneas sobre as respostas reológicas com limites inferior e superior conforme Tabela 6. A força gel de 30 minutos não possui limite absoluto, sendo controlada exclusivamente pela restrição relacional $G_{30min} \geq 0,85 \times G_{10min}$, de forma a garantir gel progressivo ou estável ao longo do tempo de repouso.

O algoritmo foi configurado com população de 100 indivíduos, 1000 gerações, fator de mutação $F=0,6$ e taxa de cruzamento de 0,8. A estratégia de mutação adotada foi DE/rand/1, com cruzamento uniforme (binomial). O tratamento de restrições foi realizado por função de penalidade exterior quadrática, com peso de 10^6 aplicado às violações. O critério de parada adotado foi o número máximo de iterações

Tabela 6 - Referencias de respostas para avaliação dos fluidos.

Respostas	Limite inferior (lbf/100 ft²)	Limite superior (lbf/100 ft²)
L600	56,00	79,00
L300	40,00	61,00
L200	32,00	52,00
L100	23,00	42,00
L6	9,00	14,00
L3	8,00	12,00
G10seg	-	12,00
G10min	-	15,00
G30min	-	-

Fonte: elaborada pela autora (2026).

A capacidade preditiva do modelo foi avaliada por meio da preparação e caracterização experimental de três fluidos distintos. O primeiro fluido sem a presença de calcário, mas com existência de microesferas ocas de vidro e o segundo com uma alta proporção de calcário em relação às microesferas ocas de vidro. O terceiro fluido foi preparado com composição fora do espaço experimental, sem calcário e com alta concentração de microesferas ocas de vidro, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva do modelo em condições extremas de baixa densidade. O modelo foi então validado comparando-se os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente para cada uma das dez respostas avaliadas.

3.4. Análises realizadas nos fluidos de perfuração

Após a produção de cada fluido de perfuração com diferentes composições de acordo com as Tabelas 2 a 5, eles foram submetidos a uma série de caracterização de suas propriedades, tais como densidade, pH, filtração estática, caracterização reológica e ensaio da força gel em 3 tempos de repouso. Nos ensaios do Panejamento Composto Central todas as medidas de propriedades descritas foram realizadas após 24 horas do preparo, com o objetivo de garantir a hidratação completa dos polímeros, que pode ser retardada pela presença de sais e partículas sólidas em solução.

3.4.1. Densidade dos fluidos

A densidade de todos os fluidos formulados foi determinada em libras por galão (ppg) por meio de balança pressurizada Fann® modelo 141, mostrada na Figura 11, conforme a norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009).

O procedimento consiste em completar a câmara do equipamento com a amostra do fluido, em seguida é vedado com a tampa e um pistão manual é utilizado para pressurizar o equipamento. A leitura da densidade é obtida pelo equilíbrio do braço da balança, identificando o ponto de nivelamento na escala graduada do equipamento.

Figura 11 - Balança pressurizada Fann Modelo 141.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

3.4.2. Ensaio de filtração estático

Segundo a API RP 13B-1 (API, 2009), a análise de filtração estática pode ser realizada em alta temperatura e alta pressão (High Pressure High Temperature/ HPHT) ou baixa temperatura e baixa pressão (Low Pressure Low Temperature /LPLT), executado em um filtro-prensa HPHT Fann®, ilustrado na Figura 12.

O procedimento HPHT, foi aplicado exclusivamente nos testes de viabilidade operacional para avaliação do comportamento do fluido em condições mais severas, realizado a uma pressão de $500 \text{ psi} \pm 5 \text{ psi}$ e temperatura de 65°C com 25ml de amostra e 30 min de execução de ensaio. O procedimento a LPLT, foi adotado em todo o restante deste trabalho, tal método consiste em submeter uma amostra de 25 mL a uma pressão de $100 \pm 5 \text{ psi}$, e temperatura ambiente, durante 30 minutos.

Optou-se pela utilização do procedimento LTLP, em razão das recomendações para seu uso em fluido aquoso por especialistas e aos resultados obtidos na viabilidade operacional, os quais demonstraram que somente as formulações com maiores concentrações de microesferas ocas de vidro excederam o limite de 10 mL

de filtrado, estabelecido pela Petrobras. O volume de filtrado foi medido para todos os experimentos e coletado em uma proveta graduada, conforme Figura 13.

Figura 12 - Filtro-prensa Fann.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

Figura 13 - Proveta graduada com filtrado.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

3.4.3. Caracterização Reológica

A resposta reológica em escoamento foi avaliada em reômetro Brookfield R/S+, equipado com spindle CC-40, a 30 °C, mostrado na Figura 14. Foi aplicada rampa controlada de taxa de cisalhamento de 1021 a 0 s⁻¹.

Figura 14 - Reômetro Brookfield R/S+.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

As leituras obtidas pelo reômetro Brookfield R/S+ foram convertidas para os parâmetros reológicos padronizados pela norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009), utilizando os fatores de conversão estabelecidos pela norma: a tensão de cisalhamento em unidade lb/100ft² foi obtida pela relação da Equação 7, e a taxa de deformação em s⁻¹ pela relação expressa na Equação 8.

Dessa forma, as leituras a 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm correspondem às taxas de deformação de 1021, 511, 340, 170, 10 e 5 s⁻¹, respectivamente. A correspondência entre as leituras do reômetro Brookfield R/S+ e os parâmetros reológicos padronizados pela norma API RP 13B-1 foi verificada experimentalmente por meio de medições paralelas realizadas no viscosímetro de cilindros concêntricos Fann 35, equipamento de referência utilizado em campo.

$$\tau (\text{lb}/100\text{ft}^2) = \tau (\text{Pa})/0,511 \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} (\text{rpm}) = \dot{\gamma} (\text{s}^{-1}) /1,7023 \quad (8)$$

As leituras em altas rotações são importantes para simular as elevadas taxas de cisalhamento às quais o fluido é submetido durante sua circulação no interior da coluna de perfuração e na passagem pela broca, permitindo avaliar sua resistência ao escoamento e capacidade de transporte de cascalhos. Por sua vez, as leituras em baixas rotações são relevantes para avaliar a capacidade de suspensão de sólidos em condições de baixa circulação ou repouso, estando relacionadas à estabilidade da suspensão e ao carregamento de partículas.

A partir dos valores de tensão de cisalhamento medidos em diferentes taxas de deformação é possível estimar três parâmetros reológicos importantes segundo a norma API: viscosidade plástica (VP), viscosidade aparente (VA) e limite de escoamento (LE) conforme as Equações 9, 10 e 11.

$$VP = L_{600} - L_{300} \quad (9)$$

$$VA = \frac{L_{600}}{2} \quad (10)$$

$$LE = L_{300} - VP \quad (11)$$

A viscosidade plástica (VP) é calculada como a diferença entre a tensão de cisalhamento a 600 rpm (L_{600}) e a 300 rpm (L_{300}). Por outro lado, a viscosidade aparente (VA) pode ser calculada pela metade da tensão a 600 rpm. O limite de escoamento (LE) é calculado como a diferença entre a tensão a 300 rpm e a viscosidade plástica (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009).

O modelo de Herschel–Bulkley (HB), Equação 12, combina tensão crítica de escoamento e dependência não linear com a taxa de cisalhamento. Em que τ_0 é a

tensão crítica de escoamento (Pa), k é o índice de consistência ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}) e n é o índice de comportamento de fluxo (adimensional), no qual $n < 1$ evidencia o comportamento pseudoplástico.

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

3.4.4. Força Gel

A evolução da estrutura em repouso foi avaliada por meio da determinação da força gel no mesmo reômetro Brookfield R/S+, a 30 °C. Esse procedimento foi executado apenas na etapa dois, no Planejamento Composto Central.

Inicialmente, aplicou-se um pré-cisalhamento de 1 minuto a 600 rpm; em seguida, o sistema foi submetido a períodos de repouso de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos. Após cada intervalo, a tensão necessária para reiniciar o escoamento foi medida a baixa taxa de deformação (3 rpm), sendo associada à resistência da estrutura formada durante o repouso.

A força gel de cada intervalo de repouso foi determinada pelo valor de pico de tensão registrado no início do escoamento a 3 rpm, convertido para $\text{lb}/100\text{ft}^2$ segundo a Equação 7 conforme a norma API RP 13B-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009).

Esse procedimento permite avaliar a cinética de reconstrução estrutural e o grau de interconectividade da rede formada por polímeros e partículas, propriedade central investigada neste trabalho. A força gel inicial representa o quanto o fluido desenvolve estrutura após uma breve interrupção do cisalhamento, manter as partículas sólidas em suspensão. A força gel final, por sua vez, indica a resistência da estrutura consolidada ao longo do tempo de repouso, refletindo a capacidade do fluido de retomar o escoamento sem causar picos de pressão excessivos.

3.4.5. pH

A determinação do pH tem o intuito de verificar se os fluidos estão com caráter alcalino, porém com valores inferiores a 10. Essa faixa foi adotada para preservar a estabilidade dos polímeros, uma vez que pH elevados associados a presença de NaCl e íons em solução podem causar alterações conformacionais nas cadeias poliméricas,

reduzindo sua eficiência viscosificante e comprometendo propriedades reológicas e de controle de filtrado do fluido.

As medições foram realizadas utilizando um pHmetro de bancada Kasvi®, ilustrado na Figura 15, no qual 25 mL das amostras foram submetidos à leitura direta do eletrodo aguardando-se a estabilização do valor indicado no visor do equipamento.

Figura 15 - pHmetro de bancada Kasvi®.



Fonte: elaborada pela autora (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e a discussão referentes tanto a análise de viabilidade operacional quanto ao planejamento composto central. Inicialmente são apresentados e discutidos os resultados da granulometria e densidade dos sólidos constituintes do fluido de perfuração. Seguido pela análise de viabilidade operacional e por fim discute-se a análise estatística do Planejamento Composto Central (PCC) e os efeitos das variáveis sobre densidade, filtração, propriedades reológicas e força gel. Por fim, apresenta-se a otimização multiobjetivo por Evolução Diferencial e a validação experimental da formulação ótima obtida.

4.1. Caracterização dos Aditivos

Os aditivos sólidos empregados nas formulações foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica e à densidade real, propriedades que influenciam o comportamento reológico, o controle de filtração e o empacotamento da torta filtrante.

4.1.1. Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica das microesferas ocas de vidro, do calcário e do HPA foi determinada por difração a laser em meio aquoso, e os resultados estão sintetizados na Tabela 7 e ilustrados nas Figuras 16, 17 e 18 com suas respectivas curvas de frequência e frequência acumulada. Segundo os resultados obtidos o CaCO_3 apresentou diâmetro mediano (D50) de 15,51 μm , com 10% das partículas abaixo de 1,95 μm (D10) e 90% abaixo de 39,34 μm (D90). As microesferas ocas de vidro exibiram distribuição com D50 de 18,72 μm , D10 de 11,10 μm e D90 de 31,01 μm . O HPA com D50 de 178,23 μm e faixa entre 38,36 μm (D10) e 420,34 μm (D90), apresentou diâmetros maiores do que os demais analisados.

A proximidade entre os diâmetros medianos do calcário (15,51 μm) e das microesferas ocas de vidro (18,72 μm) é um aspecto relevante para a interpretação do comportamento subsequente do fluido. Partículas com diâmetros semelhantes tendem a competir pelo mesmo espaço no empacotamento da torta filtrante, em vez de se complementarem geometricamente, o que pode resultar em maior porosidade da torta e em canais preferenciais para o filtrado (AL JABERI *et al.*, 2024).

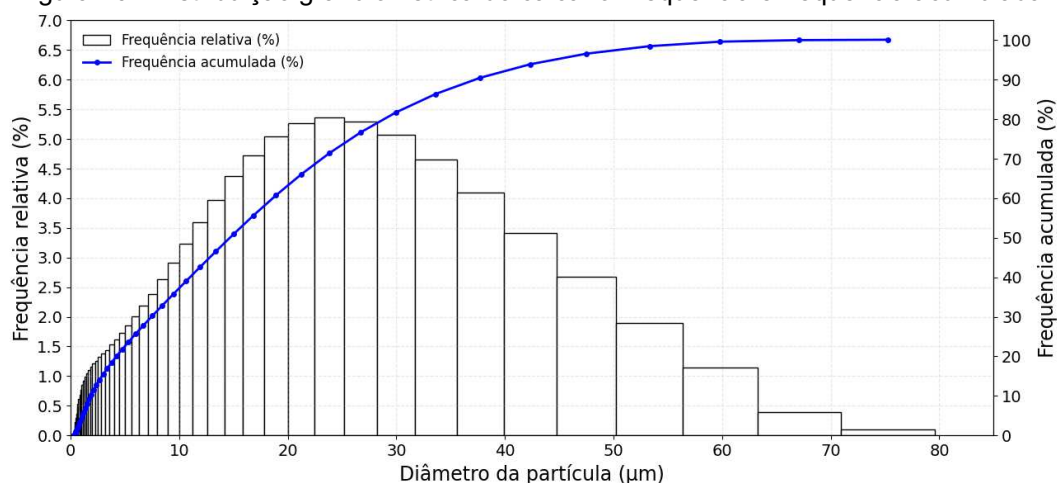
O HPA apresenta distribuição granulométrica com partículas predominantemente acima de 100 μm , significativamente maiores do que as dos demais sólidos. Por se tratar de um amido modificado solúvel em meio aquoso, sua granulometria inicial é progressivamente alterada durante a homogeneização do fluido, com hidratação e solubilização parcial das partículas. Sua função no sistema está associada à formação de um filme polimérico que reduz a permeabilidade da torta filtrante e não de natureza granular, como a dos demais sólidos apresentados. As características granulométricas apresentadas nesta seção sustentarão a interpretação dos efeitos observados sobre a densidade (Seção 4.4) e sobre o volume filtrado e a morfologia da torta filtrante (Seção 4.5).

Tabela 7 - D10, D50 e D90 das distribuições granulométricas do calcário, microesferas ocas de vidro e HPA.

Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
microesferas ocas de vidro	11,10	18,72	31,01
Calcário	1,95	15,51	39,34
HPA	38,36	178,23	420,34

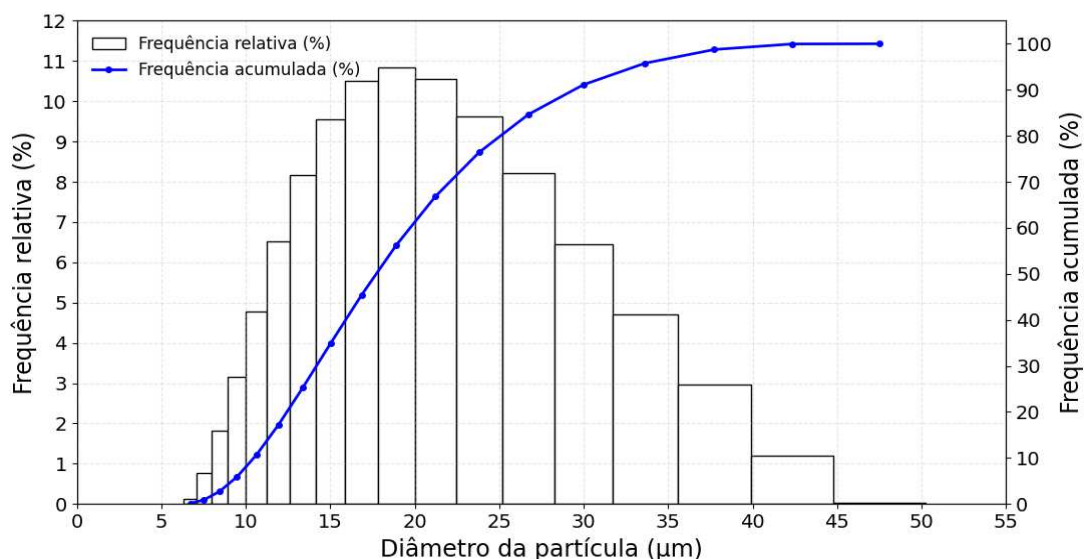
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 16 - Distribuição granulométrica do calcário: frequência e frequência acumulada.



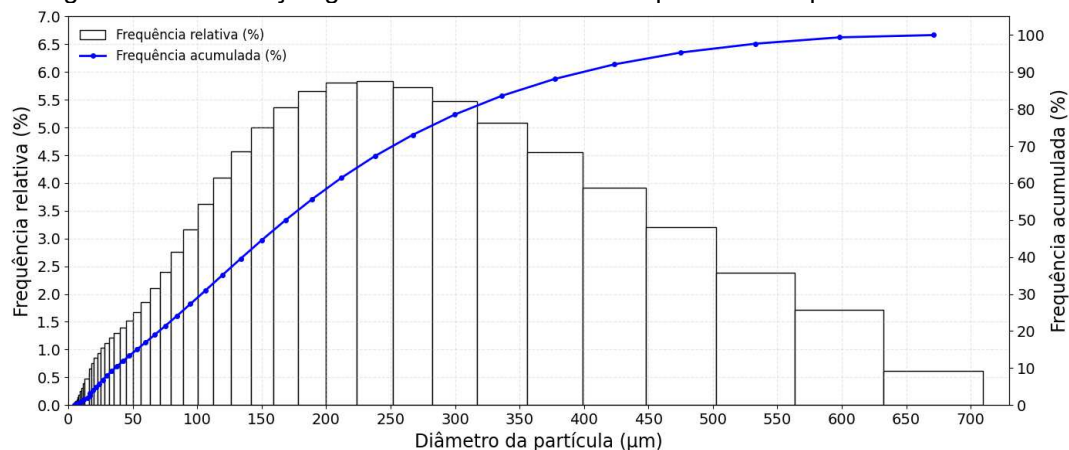
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 17 - Distribuição granulométrica da microesferas ocas de vidro: frequência e frequência acumulada.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 18 - Distribuição granulométrica do HPA: frequência e frequência acumulada.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4.1.2. Densidade dos Sólidos

Os resultados da densidade real dos sólidos utilizados foram determinada por picnometria a gás hélio e estão presentes na Tabela 8. O CaCO_3 apresentou densidade de $2,761 \pm 0,0012 \text{ g/cm}^3$ já as microesferas de vidro ocas (HGS) apresentaram densidade de $0,477 \pm 0,0010 \text{ g/cm}^3$, compatível com o informado pela fabricante. Por possuir uma das densidades mais baixas atua como redutor de densidade, ocupando volume na fase dispersa sem contribuir proporcionalmente para a massa total do sistema, reduzem a densidade global da formulação.

O contraste de aproximadamente uma ordem de grandeza entre as densidades dos dois sólidos é um dos aspectos centrais do sistema biparticulado investigado

neste trabalho. As duas partículas apresentam tendências opostas: o CaCO_3 tende a sedimentar por ação gravitacional, enquanto a microesferas ocas de vidro tende a flutuar por empuxo. Combinada à proximidade entre os diâmetros medianos discutida essa diferença de densidades configura um dos desafios centrais da formulação proposta que é manter ambos os sólidos estavelmente dispersos em uma matriz aquosa.

A manutenção das partículas em suspensão depende da capacidade da matriz polimérica formada pela goma xantana de estruturar o fluido em condições de repouso e de baixo cisalhamento, oferecendo resistência simultânea à sedimentação do calcário e à flotação do microesferas ocas de vidro. Por isso torna-se importante a avaliação da força gel em três tempos distintos de repouso (10 segundos, 10 minutos e 30 minutos), especialmente o tempo prolongado de 30 minutos, cujo objetivo é avaliar a estabilidade estrutural do gel em períodos compatíveis com operações de manobra em poço.

Tabela 8 - Densidade real dos sólidos calcário e microesferas ocas de vidro.

Material	Densidade real
Microesferas ocas de vidro	$0,477 \pm 0,0010 \text{ g/cm}^3$
Calcário	$2,761 \pm 0,0012 \text{ g/cm}^3$

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4.2. Análise de Viabilidade Operacional

A análise de viabilidade do uso de microesferas ocas de vidro como redutor de densidade em um fluido de composição utilizada na zona produtora de petróleo foi estudada no com objetivo de identificar limites de concentração de microesferas ocas de vidro compatíveis com requisitos industriais. Foram avaliadas a densidade, o volume filtrado e o comportamento reológico em duas temperaturas (30 °C e 60 °C), para melhor compreensão do comportamento do fluido.

As concentrações de microesferas ocas de vidro avaliadas foram definidas com base em estudos exploratórios prévios realizados no laboratório, as formulações foram distribuídas de forma a permitir a identificação do comportamento do sistema em diferentes proporções calcário/microesferas ocas de vidro, incluindo o ponto de

falha operacional. Os resultados aqui discutidos foram parcialmente publicados em Camargo *et al.* (2025).

4.2.1. Efeito das Proporções calcário/microesferas ocas de vidro

Com o intuito de avaliar o efeito da concentração dos dois sólidos sobre as propriedades operacionais do fluido *drill-in* foram preparadas dez formulações com variação nas concentrações de carbonato de cálcio e microesferas ocas de vidro. A Tabela 9 apresenta a nomenclatura adotada, as concentrações de calcário e microesferas ocas de vidro utilizadas e suas respectivas respostas de densidade e volume de filtrado. Os fluidos foram identificados pela nomenclatura CxEV_y, em que x corresponde à concentração de calcário e y à concentração de microesferas ocas de vidro em lb/bbl.

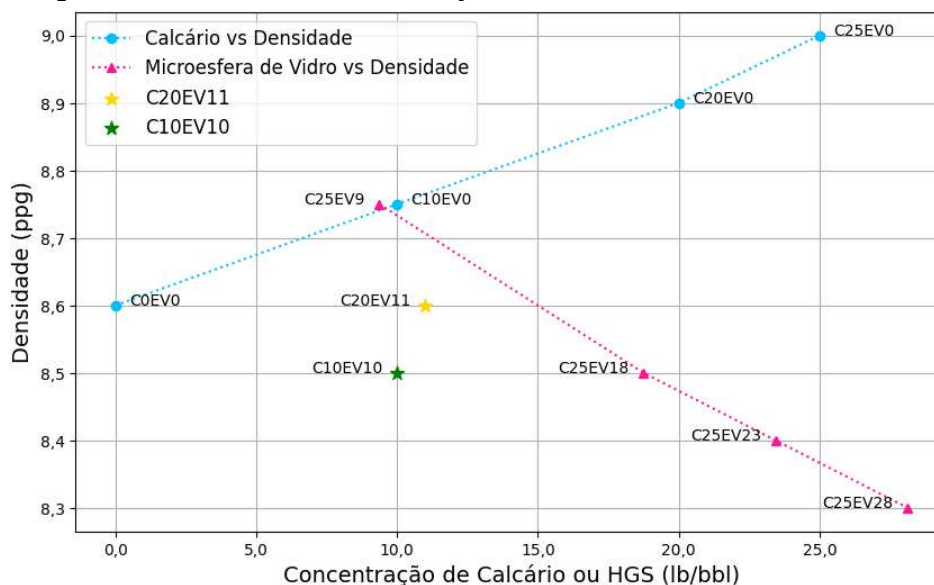
Tabela 9 – Nomenclatura, composição dos fluidos avaliados, densidade e volume de filtrado.

Fluido	Nomenclatura	Calcário (lb/bbl)	Esfera de Vidro (lb/bbl)	Densidade (ppg)	Volume de filtrado (mL)
1	C0EV0	0	0	8,60	8,6
2	C10EV0	10	0	8,75	6,8
3	C20EV0	20	0	8,90	6,0
4	C25EV0	25	0	9,0	6,2
5	C25EV9	25	9,37	8,75	5,4
6	C25EV18	25	18,75	8,50	7,2
7	C25EV23	25	23,44	8,40	12,2
8	C25EV28	25	28,12	8,30	14 (32s)*
9	C20EV11	20	11	8,60	6,4
10	C10EV10	10	10	8,50	5,0

*Valor obtido em 32 segundos de ensaio Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Observou-se na Figura 19, que o incremento de 10 lb/bbl na concentração de CaCO₃ resultou em aumento de 0,15 ppg na densidade do fluido (C0EV0, C10EV0, C20EV0), comportamento esperado em função da densidade característica do carbonato, 2,761 g/cm³, conforme Seção 4.1.2. Em contrapartida, o aumento progressivo da concentração de microesferas ocas de vidro na presença de 25 lb/bbl de CaCO₃ promoveu redução de até 0,70 ppg na densidade (C25EV0 a C25EV28), efeito decorrente da baixa densidade das microesferas, 0,477 g/cm³.

Figura 19 - Densidade vs concentração de calcário e microesferas ocas de vidro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A partir dos fluidos 1 a 8, foi ajustado um modelo de regressão linear que relaciona a densidade do fluido (ppg) às concentrações de calcário (C_C) e microesferas ocas de vidro (C_{EV}), conforme Equação 13, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,997$.

$$\rho = + 8,596 - 0,0251 \cdot C_{EV} + 0,0158 \cdot C_C \quad (13)$$

É importante mencionar que o termo constante, de valor 8,596, representa a contribuição combinada dos demais aditivos da formulação com exceção das microesferas ocas de vidro e do calcário, o que limita a aplicabilidade direta da equação a sistemas com composições equivalente.

O coeficiente associado a microesferas ocas de vidro na Equação 13, em módulo é cerca de 59% superior ao coeficiente do calcário, comportamento explicado pelo maior contraste entre a densidade das microesferas ao meio aquoso, comparado à diferença entre o meio e o calcário. Em outras palavras, cada libra de microesferas ocas de vidro adicionada desloca uma fração volumétrica maior de água do que cada libra de calcário adicionado, resultando em um maior impacto sobre a densidade global do fluido.

A ausência de termos de interação significativos entre calcário e microesferas ocas de vidro indica que os dois sólidos atuam de forma independente sobre a

densidade do fluido, sem que a presença de um altere o efeito do outro. Justificado principalmente por se tratar de materiais inertes e a propriedade analisada.

Após o ajuste da equação, sua capacidade preditiva foi avaliada por meio dos fluidos C10EV10 e C20EV11, fluidos 9 e 10. Os valores de densidade estimados pelo modelo, de 8,503 ppg e 8,636 ppg, mostraram-se compatíveis com os valores experimentais obtidos, de 8,50 ppg e 8,60 ppg. Desvios inferiores a 0,5% são aceitáveis considerando a precisão de $\pm 1\%$ da balança de lama pressurizada. Dessa forma, a equação desenvolvida para estimar a densidade do fluido se mostrou eficaz na previsão dos valores experimentais obtidos, reforçando a confiabilidade do modelo proposto.

A Tabela 9 e a Figura 20 apresenta os resultados de volume filtrado obtidos em ensaio HTHP (500 psi, 65 °C, 30 minutos) conforme norma API 13B-1. A maioria das formulações, com exceção do C25EV23 e C25EV28, apresentou volume filtrado inferior a 10 mL, valor limite aceitável para operações de perfuração. Observou-se que o volume filtrado diminui ao comprar os pares C10EV0/C10EV10, C20EV0/C20EV11 e C25EV0/C25EV9, logo mantida fixa a concentração de calcário, o volume filtrado diminuiu com o aumento da concentração de microesferas ocas de vidro até aproximadamente 10 lb/bbl. Este comportamento é estudado por Villada (2022) um estudo realizado com bentonita, polímeros e calcário, explicando que a redução no volume de filtrado ocorre pelo preenchimento de pequenos poros na torta de lama por partículas sólidas, o que diminui a permeabilidade da torta.

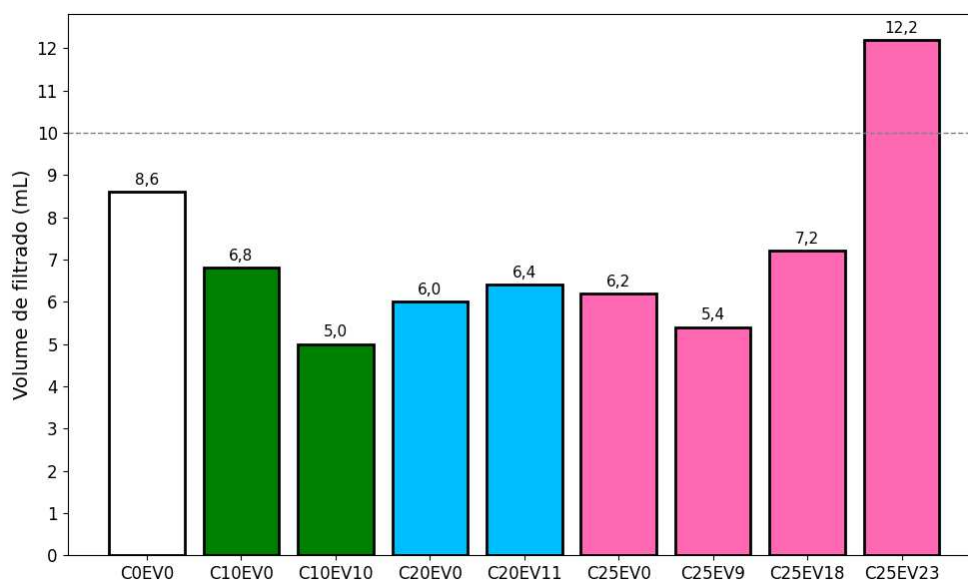
O fluido C25EV23 apresentou volume filtrado de 12,2 mL ao final dos 30 minutos, valor ligeiramente acima do limite aceitável de 10 mL e indicando de que a concentração de microesferas ocas de vidro encontra-se próxima ao limite de viabilidade. O fluido C25EV28, de concentração de microesferas ocas de vidro maior, não atendeu os limites aceitáveis pois o filtrado atingiu 14 mL em apenas 32 segundos, indicando ausência de formação adequada de torta filtrante.

O mecanismo de falha observado é consistente com o conceito de empacotamento geométrico em sistemas particulados, ou empacotamento ideal, nesse caso o controle de filtrado é interferido pela concentração de sólidos e sua morfologia. Para um empacotamento ideal o agente obturante, partícula sólida, deve servir como ponteameto formando a torta, apresentando uma porosidade ideal por não apresentar uma porosidade interconectada que favorecem a passagem do fluido. Partículas esféricas regulares tendem a atingir empacotamento máximo inferior ao de

partículas irregulares, uma vez que a uniformidade geométrica das esferas limita o preenchimento dos interstícios entre elas (CAENN; DARLEY; GRAY, 2017). Esse princípio é violado na formulação investigada, na qual a torta passa a ser composta majoritariamente por partículas esféricas de tamanho similar, resultando em uma estrutura com porosidade maior que favorece a passagem do filtrado (AL JABERI *et al.*, 2024).

Portanto, quando a proporção de microesferas ocas de vidro na fase sólida ultrapassa o limite de 23 lb/bbl, a torta perde a heterogeneidade geométrica necessária para selagem efetiva. Uma alternativa para solucionar esse problema é o uso de uma distribuição granulométrica diversificada, onde partículas menores preenchem o esqueleto formado pelas maiores, para assim garantir a selagem efetiva dos poros, problema esse explorado em fluido de base olefínica no trabalho de Gonzaga (2026).

Figura 20 - Volume filtrado dos fluidos (HTHP, 500 psi, 65 °C, 30 min).



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

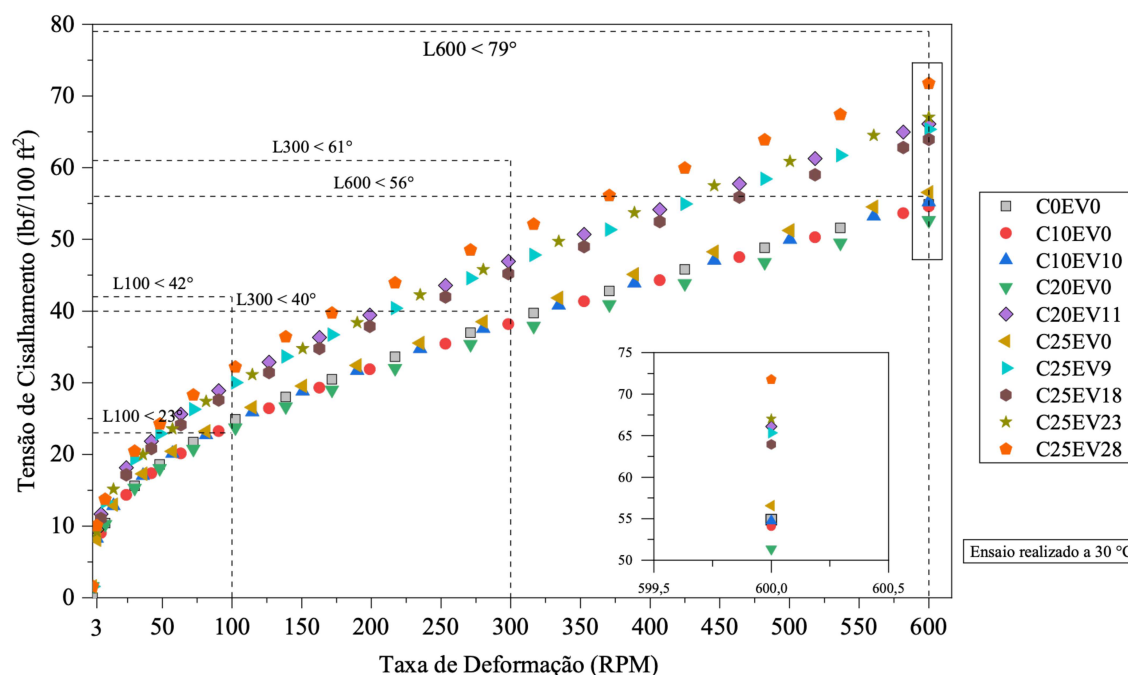
4.2.2. Reologia do fluido *drill-in* afetado pela temperatura

Os resultados da análise de reologia a 30 °C e a 60 °C estão apresentados nas Figuras 21 e 22, com os intervalos de referência a 30 °C, fornecidos pela empresa parceira, para fluidos de perfuração de poços de petróleo sumarizados na Tabela 10.

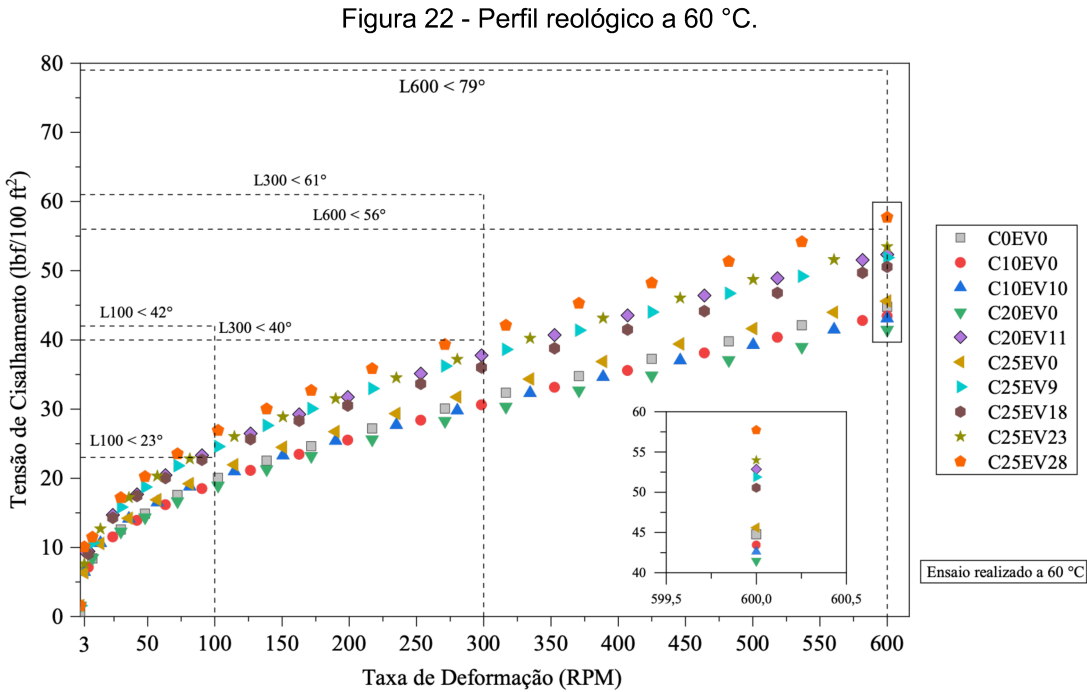
Ao analisar os resultados a 30 °C, apenas as formulações com maior carga de sólidos apresentaram valores dentro da faixa de referência: C20EV11 e todas as contendo 25 lb/bbl de calcário (C25EV0, C25EV9, C25EV18, C25EV23 e C25EV28), conforme a Tabela 6. As demais formulações ficaram fora da faixa de referência adotada. No entanto, a 60 °C apenas o fluido C25EV28 manteve-se integralmente dentro do intervalo desejado, sugerindo que a elevação térmica promove a degradação da rede tridimensional de interações intermoleculares do fluido, por outro lado as concentrações mais altas de sólidos atuam aumentando a viscosidade e compensando essa perda. Este fenômeno de afinamento térmico é explicado na pesquisa de You *et al.* (2025), no qual utilizou-se também a goma xantana como viscosificante. O aumento da temperatura enfraquece as ligações de hidrogênio, podendo levar a uma transição conformacional da hélice ordenada para um enovelado aleatório desordenado, o que resulta em perda drástica de viscosidade e do comportamento pseudoplástico.

Comparando os fluidos C10EV0 e C10EV10, observa-se que a adição de microesferas ocas de vidro aproxima o comportamento reológico dos padrões de referência, efeito atribuído ao aumento da fração volumétrica da fase dispersa.

Figura 21 - Perfil reológico a 30 °C.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Tabela 10 - Intervalos de referência reológica para fluidos.

Taxa de deformação	Tensão de cisalhamento
L3	8 - 12
L6	9 - 14
L100	23 - 42
L200	32 - 52
L300	40 - 61
L600	56 - 79

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A análise dos resultados de densidade, volume filtrado e reologia permite delimitar a faixa operacional viável do sistema calcário/microesferas ocas de vidro em fluido *drill-in* aquoso. A redução máxima de densidade tecnicamente sustentável, sem comprometimento das demais propriedades, foi obtida no fluido C25EV18. Concentrações superiores de microesferas ocas de vidro, mesmo que diminuam a densidade, comprometem a formação da torta filtrante por excesso de partículas esféricas competindo com o agente obturante pelo mesmo espaço de empacotamento. Esses limites técnicos devem ser estudados juntamente com restrições logísticas relativas ao armazenamento e transporte das microesferas em escala de campo, análise apresentada na Seção 4.2.3.

4.2.3. Viabilidade em Escala de Campo

Os limites de restrições logísticas associadas à operação em escala de campo devem ser levados em consideração para a execução dos fluidos analisados em escala de bancada. Decorrentes da baixa densidade *bulk* das microesferas ocas de vidro o emprego delas em fluidos torna-se um desafio, já que o espaço físico disponível perto da sonda é limitado, impondo assim um limite superior à concentração de microesferas ocas de vidro efetivamente aplicável em função do volume total de fluido a ser produzido.

De forma simples, o volume de armazenamento disponível define a massa total de microesferas que pode ser estocada na sonda. Essa massa, distribuída pelo volume total de fluido a ser produzido, determina a concentração máxima de microesferas ocas de vidro. Portanto, quanto maior o volume de fluido a ser preparado, menor a concentração de microesferas que pode ser alcançada nesse volume e, consequentemente, maior a densidade final.

Para a análise de viabilidade em escala de campo, a densidade *bulk* das microesferas foi determinada como a média entre os valores aerado e compactado, conforme metodologia de Altino *et al.* (2021), obtendo-se 243,98 g/L. A concentração máxima de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável foi estimada pela Equação 2 presente na seção de metodologia, considerando espaço físico disponível na sonda de 95 m³.

É importante destacar que essa limitação de 95 m³ aplica-se especificamente ao preparo do fluido na própria sonda (*in loco*). Quando a demanda do poço exigir densidades mais baixas, e, portanto, maiores concentrações de microesferas, o fluido pode ser preparado integralmente em bases de superfície em terra, onde não há restrição de espaço, e posteriormente transportado já formulado até a plataforma por meio de embarcações de apoio. Essa alternativa logística, comum na indústria, permite contornar o gargalo de armazenamento local e viabilizar concentrações de microesferas ocas de vidro superiores às estimadas para o preparo *in loco*.

A nomenclatura adotada identifica cada fluido pela concentração de calcário (C) e de microesferas ocas de vidro (EV), ambas em lb/bbl. A Tabela 11 apresenta a densidade estimada pela Equação 8 para fluidos sem adição de microesferas, em diferentes concentrações de calcário. Esses valores representam a densidade de

partida de cada sistema, sobre a qual a adição de microesferas atua reduzindo a densidade final.

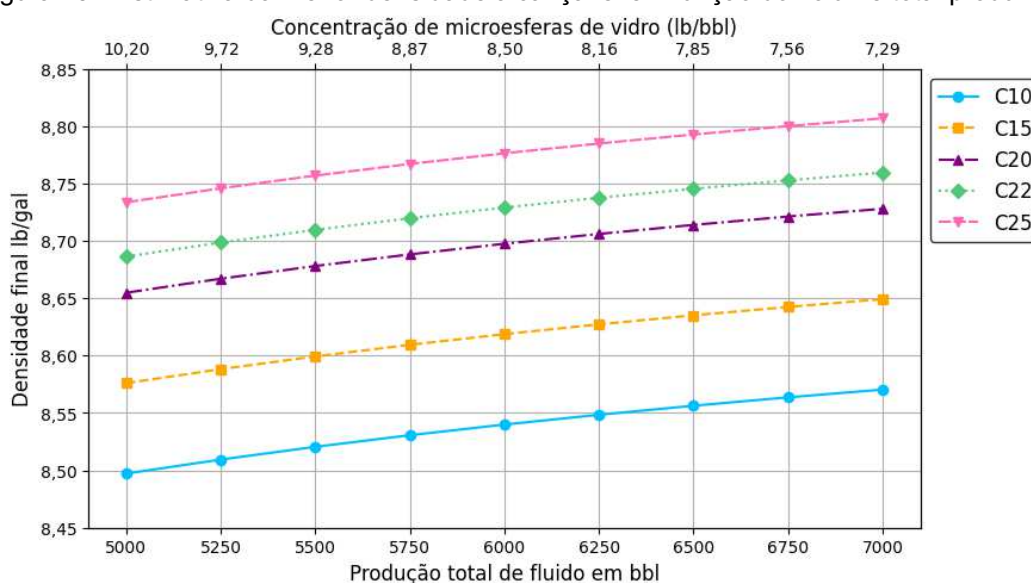
A Figura 23 apresenta, para cada concentração de calcário, a densidade final alcançável em função do volume total de fluido produzido, entre 5.000 e 7.000 bbl, com a concentração máxima de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável indicada no eixo x. Observa-se que, para todas as concentrações de calcário, a densidade final aumenta à medida que o volume total produzido cresce. Isso ocorre porque uma quantidade fixa de microesferas que é limitada pelo espaço de armazenamento disponível, precisa ser distribuída em um volume maior de fluido, reduzindo a concentração efetiva das microesferas ocas de vidro, consequentemente, diminuindo o efeito de redução de densidade. As curvas também evidenciam que sistemas com maior concentração de calcário (C25) partem de densidades mais altas, refletindo a densidade de base apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Densidade estimada pela equação de densidade para fluidos.

Nomeclatura	Densidade (ppg)
C10EV0	8,75
C15EV0	8,83
C20EV0	8,91
C22EV0	8,94
C25EV0	8,99

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 23 - Estimativa da menor densidade alcançável em função do volume total produzido.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Observa-se que ao manter-se fixa a concentração de calcário, o aumento no volume de fluido produzido resulta em uma redução da concentração de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável e, conseqüentemente, em aumento da densidade final alcançável. A maior concentração de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável foi de 10,20 lb/bbl, ao se produzir 5.000 bbl de fluido. Portanto a maior redução de densidade alcançável dentro das restrições logísticas foi de 0,25 ppg.

Comparando os resultados de bancada com a análise de campo, observa-se diferença significativa entre as reduções máximas alcançadas, redução de 0,50 ppg com o fluido C25EV18, e a diminuição logisticamente viável, 0,25 ppg. Essa diferença evidencia que, no contexto operacional atual, a limitação ao uso de microesferas ocas de vidro não é primariamente de natureza técnica, mas também logística. Deve, portanto, aprimorar o armazenamento, transporte e manuseio do material em escala de sonda, ampliando o ganho de densidade efetivamente alcançável em operações de perfuração

4.3. Planejamento Composto Central

Para os 27 experimentos do planejamento composto central com variações de concentração de microesferas de vidro, calcário, HPA e goma xantana, expostos na Tabela 12, foram analisadas as seguintes respostas: a densidade, volume de filtrado, leituras reológicas de 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm, viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento e força gel nos tempos de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos. Cada resposta foi ajustada a modelos polinomiais quadráticos por regressão múltipla. As equações dos modelos ajustados, acompanhadas dos respectivos coeficientes de determinação, são apresentadas nas seções específicas de cada propriedade juntamente com suas discussões.

Como variável de controle foi analisado o pH de todos os fluidos produzidos, apresentando valores entre 8,93 e 9,73, com média de $9,25 \pm 0,22$. Valores estes dentro da faixa estabelecida, uma vez que se adotou como critério de aceitação a manutenção em caráter alcalino com valores inferiores a 10. Essa análise é fundamental para compreender se o fluido manteve o caráter alcalino necessário para a estabilidade conformacional da goma xantana, cuja estrutura helicoidal é responsável pela formação da rede tridimensional do fluido. (CAENN; DARLEY;

GRAY, 2017). Não foram identificadas correlações sistemáticas entre o pH e as concentrações dos fatores avaliados, sustentando o tratamento do pH como variável de controle e não como resposta otimizável.

Tabela 12 - Experimentos vs concentrações das variáveis decodificadas.

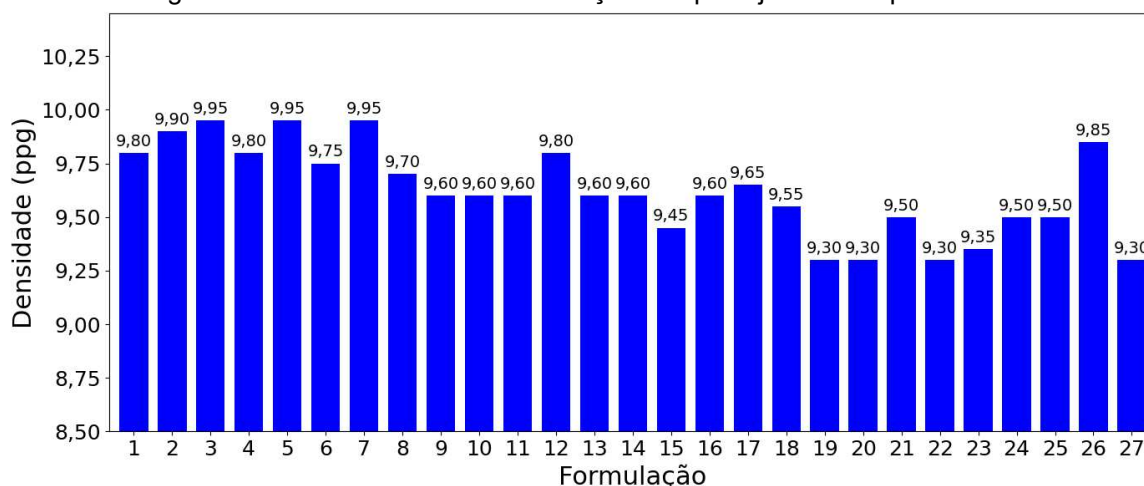
Exp.	GX (lb/bbl)	HPA (lb/bbl)	C (lb/bbl)	HGS (lb/bbl)	Densidade (ppg)	Volume de Filtrado (mL)
1	1,55	7,29	4,95	4,00	9,80	1,60
2	1,55	7,29	23,05	4,00	9,90	1,60
3	1,55	4,71	23,05	4,00	9,95	1,80
4	1,55	4,71	4,95	4,00	9,80	2,00
5	2,45	4,71	23,05	4,00	9,95	1,60
6	2,45	7,29	4,95	4,00	9,75	1,60
7	2,45	7,29	23,05	4,00	9,95	1,60
8	2,45	4,71	4,95	4,00	9,70	2,00
9	2,00	6,00	14,00	11,32	9,60	1,20
10	2,00	6,00	14,00	11,32	9,60	1,40
11	2,00	6,00	14,00	11,32	9,60	1,40
12	2,00	6,00	28,00	11,32	9,80	1,40
13	2,00	8,00	14,00	11,32	9,60	1,40
14	2,00	4,00	14,00	11,32	9,60	1,60
15	2,00	6,00	0,00	11,32	9,45	1,60
16	1,30	6,00	14,00	11,32	9,60	1,20
17	2,70	6,00	14,00	11,32	9,65	1,40
18	1,55	4,71	23,05	18,63	9,55	1,60
19	1,55	7,29	4,95	18,63	9,30	1,60
20	1,55	4,71	4,95	18,63	9,30	2,80
21	1,55	7,29	23,05	18,63	9,50	3,80
22	2,45	7,29	4,95	18,63	9,30	1,40
23	2,45	4,71	4,95	18,63	9,35	2,40
24	2,45	7,29	23,05	18,63	9,50	2,40
25	2,45	4,71	23,05	18,63	9,50	2,60
26	2,00	6,00	14,00	0,00	9,85	1,80
27	2,00	6,00	14,00	22,63	9,30	4,60

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4.4. Efeito das variáveis sobre a densidade

A faixa de densidade obtida no planejamento composto central situou-se entre 9,30 e 9,95 ppg, conforme pode ser observado na Tabela 12 e Figura 24. As menores densidades obtidas foram nas formulações 18, 19, 22, 23 e 27, sistemas compostos por alta concentração de esferas de vidro, que apresenta a tendência de diminuir a densidade. A amplitude de 0,65 ppg evidencia a capacidade do sistema formulado de impactar a densidade do fluido aquoso saturado polimérico ao longo de uma faixa ampla.

Figura 24 - Densidade das 27 formulações do planejamento experimental.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

O modelo ajustado para a densidade do fluido em variáveis reais, é apresentado na Equação 14, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,979$.

$$D = 9,793 + 0,011 \cdot C_C - 0,029 \cdot C_{EV}; \quad R^2 = 0,979 \quad (14)$$

A densidade do fluido (D) em ppg, esta relacionada a concentração de calcário (C_C) em lb/bbl e a concentração de microesfera de vidro (C_{EV}) em lb/bbl. O termo 9,793 corresponde ao intercepto do modelo, isto é, à densidade prevista do fluido na ausência de calcário e de microesferas de vidro, refletindo a contribuição da matriz polimérica base do fluido. Dentre os quatro fatores avaliados no PCC, apenas as concentrações de calcário e microesferas ocas de vidro apresentaram efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a densidade. Por outro lado, as concentrações de HPA e goma xantana, os termos quadráticos e de interação foram

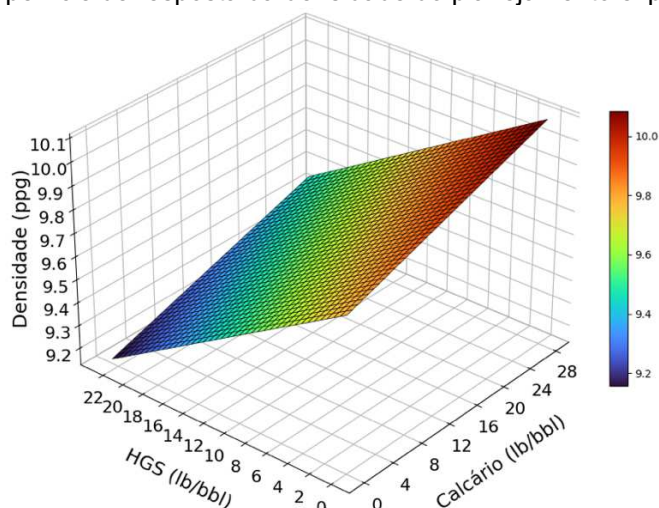
eliminados do modelo final por não atenderem ao critério de significância adotado. Sendo coerente com as contribuições típicas de GX e HPA, que altera a estrutura reológica e o controle de filtração e não impacta a densidade que esta relacionada com as frações solidas no fluido.

Assim como o estudo anterior sobre microesferas ocas de vidro em um fluido *drill-in*, o efeito em modulo do microesferas ocas de vidro foi muito superior ao efeito do calcário. Explicado pelo contraste entre a densidade das microesferas, $0,477 \text{ g/cm}^3$ e o meio aquoso foi superior ao contrate do calcário, $2,761 \text{ g/cm}^3$, ao meio aquoso.

A densidade do fluido respondeu de forma estritamente linear às variações nas concentrações de calcário e microesferas ocas de vidro no domínio investigado, configurando uma superfície de resposta sem curvatura, demonstrado na Figura 25. Essa ausência de interação entre calcário e microesferas de vidro demonstram que a contribuição de cada componente é independente da concentração do outro dentro da faixa avaliada.

A superfície gerada apresenta-se como um plano inclinado, em concordância com a natureza linear do modelo ajustado, com gradiente positivo na direção do calcário e gradiente negativo, de maior magnitude, na direção do microesferas ocas de vidro. A densidade máxima predita pelo modelo é a alcançada na região alta concentração de Calcário e baixa concentração de microesferas ocas de vidro, enquanto a densidade mínima ocorre na região oposta. A região central da superfície permite um ajuste da densidade conferindo flexibilidade operacional para formulações projetadas para diferentes janelas operacionais de pressão de poros.

Figura 25- Superfície de resposta da densidade do planejamento experimental.



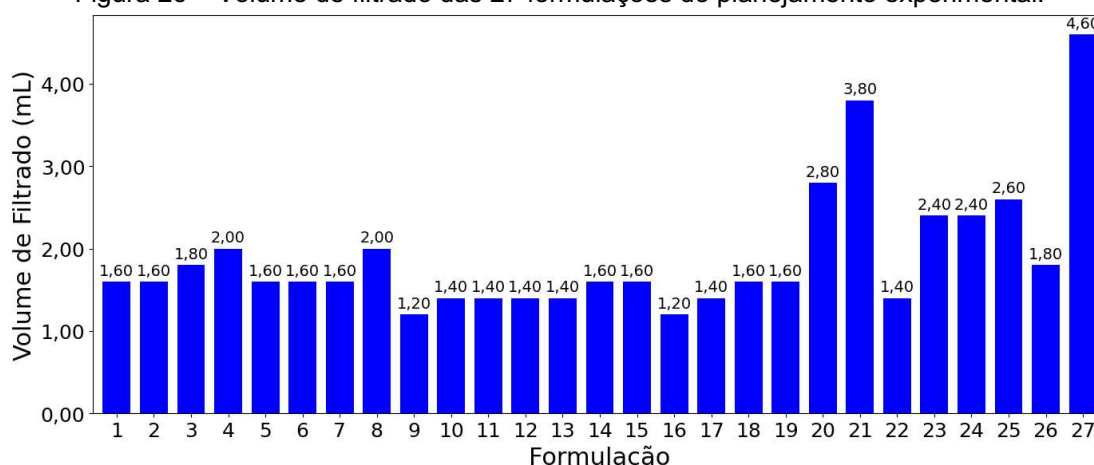
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A faixa de densidade obtida neste estudo é coerente com a literatura sobre *hollow glass spheres*, que descreve seu uso como agente de redução de densidade em fluidos de perfuração aquosos. (KONBUL, A.; OZBAYOGLU, E. M.; MATA, C., 2020). A Equação 14 foi adotada como a função objetivo da otimização multiobjetivo por Evolução Diferencial, na qual a densidade será minimizada sujeita às restrições impostas pelo comportamento reológico e pela força gel do fluido.

4.5. Efeito das variáveis sobre o volume de filtrado

Os resultados de volume de filtrado dos 27 experimentos realizada em LPLT corresponderam a um intervalo de 1,2 e 4,6 mL, Tabela 13 e Figura 26. Todos os fluidos avaliados apresentaram volume ao serem filtrados inferiores a 10 mL, parâmetro estabelecido para controle adequado do filtrado no domínio estudado.

Figura 26 – Volume de filtrado das 27 formulações do planejamento experimental.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Os resultados foram ajustados por um modelo com coeficiente de determinação $R^2 = 0,732$, apresentado na Equação 15.

$$VF = 4,960 - 0,360 \cdot C_{HPA} - 0,278 \cdot C_{EV} + 0,013 \cdot C_{EV}^2 - 0,184 \cdot C_c + 0,026 \cdot C_c \cdot C_{HPA} + 0,003 \cdot C_c \cdot C_{EV}; \quad R^2 = 0,732 \quad (15)$$

O volume de filtrado, VF (mL) é expresso em termos de concentração de HPA (C_{HPA}), concentração de microesferas ocas de vidro (C_{EV}) e concentração de calcário (C_c) todos medidos em lb/bbl. O coeficiente de determinação igual a 0,732 reflete a

grande complexidade da filtração LPLT, não apresentando uma modelagem tão robusta quanto a densidade. A filtração depende não apenas das concentrações dos componentes, mas também da distribuição geométrica das partículas e dos polímeros formadores da torta filtrante. O valor obtido é compatível com a natureza do ensaio e útil para interpretação descritiva no planejamento experimental.

A análise dos efeitos do modelo revela que as três variáveis significativas, calcário, HPA e microesferas ocas de vidro, apresentam coeficientes lineares negativos e atuam de forma sinérgica para a redução do volume de filtrado. O HPA, como esperado, apresentou o menor efeito linear (-0,360). Isso se deve por formar um filme polimérico sobre a torta filtrante que reduz sua permeabilidade, atuando como o principal redutor de filtrado na formulação (DAVOODI, 2024).

As microesferas ocas de vidro e o calcário apresentaram efeitos lineares também negativos, -0,278 e -0,184 respectivamente, atuando como preenchedores do espaço da torta e agentes ponteamto, conforme princípios de empacotamento.

O termo quadrático positivo associado em HGS (0,013) é um resultado relevante pois indica que o efeito das microesferas ocas de vidro reduz até certo ponto o filtrado, onde certas concentrações das partículas podem provocar um aumento no volume de filtrado. Em concentrações elevadas de microesferas, a esfericidade e a baixa densidade do material favorecem a formação de canais preferenciais para o filtrado, mecanismo de empacotamento da torta entre as microesferas ocas de vidro e o calcário, já discutido no fluido *drill-in* com microesferas ocas de vidro, seção 4.2.1.

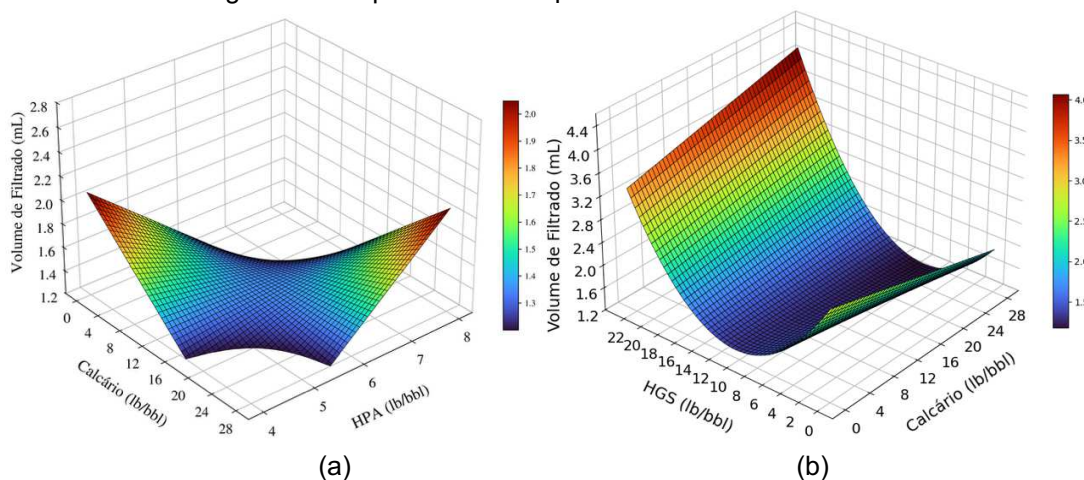
A presença de termos positivos com interações entre calcário x HPA e calcário x microesferas ocas de vidro revelam que o efeito das variáveis depende da concentração simultânea dos componentes que podem provocar um aumento no volume de filtrado. A interação calcária x HPA indica que o aumento conjunto destes dois aditivos é menos eficiente na redução do filtrado do que a soma de seus efeitos isolados. O HPA atua via adsorção superficial, formando um filme que pode isolar as partículas sólidas (DAVOODI *et al.*, 2024), e essa interação microscópica altera a contribuição na formação da estrutura esquelética da torta de filtração, conforme observado em análises estruturais de sistemas similares de carbonato e polímeros (VILLADA *et al.*, 2022).

As superfícies de respostas apresentadas na Figura 27 ilustram os efeitos discutidos. A superfície HPA x calcário, mantendo microesferas ocas de vidro no ponto central, evidencia o efeito da interação entre os dois aditivos, o valor mínimo de filtrado

é alcançado em região de concentrações intermediárias e regiões extremas apresentam aumento no filtrado.

A superfície HGS × calcário, mantendo HPA no ponto central, evidencia uma zona próxima a 10 lb/bbl onde a concentração dos dois aditivos colabora para a diminuição do filtrado, fenômeno também observado na seção 4.2.1. A mesma superfície demonstra que altas concentrações de microesferas ocas de vidro provocam um aumento no filtrado principalmente combinado a alta concentração de calcário.

Figura 27 - Superfícies de respostas do volume de filtrado.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Ainda que o volume de filtrado constitua uma propriedade operacional crítica para fluidos de perfuração, optou-se por não o incluir como restrição explícita na otimização multiobjetivo apresentada na Seção 4.8. Isso se deve, pois, as 27 formulações avaliadas no PCC apresentaram valores de filtrado significativamente menores do que o limite de 10 mL estabelecido, evidenciando que o domínio experimental está dentro da região viável tecnicamente. Os ensaios de filtração foram executados nas formulações ótimas apresentadas na Seção 4.8 para as devidas comparações de resultado.

4.6. Efeito das Variáveis sobre as Propriedades Reológicas

Das análises sobre as propriedades reológicas das 27 formulações avaliadas obtem-se as leituras das seis principais taxas de cisalhamento (L600, L300, L200, L100, L6 e L3) acompanhadas dos parâmetros de viscosidade aparente (VA), viscosidade plástica (VP) e limite de escoamento (LE), calculados conforme as

orientações da norma API 13B-1 (API, 2009), O comportamento reológico foi adicionalmente caracterizado pelo ajuste ao modelo de Herschel-Bulkley.

4.6.1. Leituras de Cisalhamento (L600 a L3)

As leituras de cisalhamento, apresentadas na Tabela 13 e nas Figuras 28 a 33, situaram-se em faixas amplas: L600 variou entre 40,94 e 128,36 enquanto L3 variou entre 3,03 e 15,53.

Tabela 13 - Resultados das leituras de cisalhamento: L600, L300, L200, L100, L6 e L3.

	L600 (lbf/100 ft ²)	L300 (lbf/100 ft ²)	L200 (lbf/100 ft ²)	L100 (lbf/100 ft ²)	L6 (lbf/100 ft ²)	L3 (lbf/100 ft ²)
1	46,99 ± 0,44	29,31 ± 0,18	23,50 ± 0,20	16,36 ± 0,17	4,31 ± 0,00	3,23 ± 0,11
2	60,06 ± 0,22	38,52 ± 0,01	31,70 ± 0,02	23,08 ± 0,06	7,57 ± 0,03	5,97 ± 0,01
3	42,38 ± 0,09	26,87 ± 0,15	22,17 ± 0,05	15,95 ± 0,07	5,53 ± 0,24	4,27 ± 0,14
4	40,94 ± 0,32	26,23 ± 0,12	21,58 ± 0,20	15,92 ± 0,01	5,11 ± 0,17	3,90 ± 0,17
5	64,00 ± 0,15	43,00 ± 0,04	36,23 ± 0,06	27,73 ± 0,02	11,35 ± 0,10	9,14 ± 0,01
6	69,48 ± 0,55	45,67 ± 0,40	37,83 ± 0,23	27,80 ± 0,18	9,36 ± 0,02	7,57 ± 0,37
7	71,37 ± 0,09	46,56 ± 0,16	38,66 ± 0,14	28,59 ± 0,05	10,16 ± 0,01	8,20 ± 0,18
8	66,16 ± 1,43	44,10 ± 0,89	37,28 ± 0,81	28,28 ± 0,52	11,76 ± 0,48	9,51 ± 0,13
9	65,76 ± 0,44	41,76 ± 0,45	34,08 ± 0,42	24,67 ± 0,29	8,49 ± 0,09	7,00 ± 0,00
10	64,13 ± 1,22	40,87 ± 0,41	33,93 ± 0,09	24,92 ± 0,14	8,87 ± 0,47	6,85 ± 0,52
11	68,36 ± 1,48	42,60 ± 0,59	34,81 ± 0,43	25,28 ± 0,28	8,67 ± 0,07	6,62 ± 0,05
12	69,39 ± 0,98	43,37 ± 0,65	35,49 ± 0,49	25,77 ± 0,22	8,64 ± 0,10	6,78 ± 0,07
13	82,53 ± 1,96	49,71 ± 0,83	39,96 ± 0,58	27,97 ± 0,35	8,74 ± 0,20	6,79 ± 0,03
14	58,73 ± 0,93	37,89 ± 0,25	31,43 ± 0,11	23,38 ± 0,16	9,00 ± 0,05	7,10 ± 0,10
15	62,93 ± 1,79	40,09 ± 1,08	32,80 ± 0,87	23,68 ± 0,46	7,90 ± 0,08	6,06 ± 0,30
16	46,62 ± 0,13	27,81 ± 0,00	22,17 ± 0,01	15,41 ± 0,01	4,12 ± 0,04	3,03 ± 0,14
17	86,03 ± 0,68	56,22 ± 0,62	47,14 ± 0,47	35,45 ± 0,37	14,28 ± 0,04	11,82 ± 0,44
18	53,42 ± 0,08	33,16 ± 0,00	26,82 ± 0,10	19,43 ± 0,05	6,66 ± 0,24	5,17 ± 0,04
19	61,97 ± 0,28	37,35 ± 0,18	29,78 ± 0,24	20,77 ± 0,24	5,30 ± 0,43	3,85 ± 0,30
20	48,40 ± 0,18	30,15 ± 0,06	24,59 ± 0,08	17,81 ± 0,02	6,10 ± 0,02	4,81 ± 0,01
21	67,22 ± 1,70	39,16 ± 0,54	31,03 ± 0,35	21,41 ± 0,14	6,36 ± 0,45	4,71 ± 0,26
22	93,07 ± 0,82	58,46 ± 0,23	47,79 ± 0,10	34,71 ± 0,12	12,47 ± 0,26	9,74 ± 0,20
23	82,45 ± 1,10	53,73 ± 1,05	44,51 ± 0,84	33,36 ± 0,73	13,48 ± 0,22	10,84 ± 0,15
24	128,36 ± 2,82	78,76 ± 1,35	63,89 ± 1,05	45,48 ± 0,65	18,72 ± 0,14	15,53 ± 0,15
25	88,45 ± 0,25	56,50 ± 0,41	47,16 ± 0,54	35,47 ± 0,41	13,95 ± 0,00	11,23 ± 0,06
26	49,78 ± 0,39	32,52 ± 0,19	26,98 ± 0,14	20,02 ± 0,01	7,63 ± 0,15	6,05 ± 0,08
27	97,77 ± 3,85	58,53 ± 2,11	46,94 ± 1,63	33,16 ± 1,04	11,90 ± 0,22	9,58 ± 0,18

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

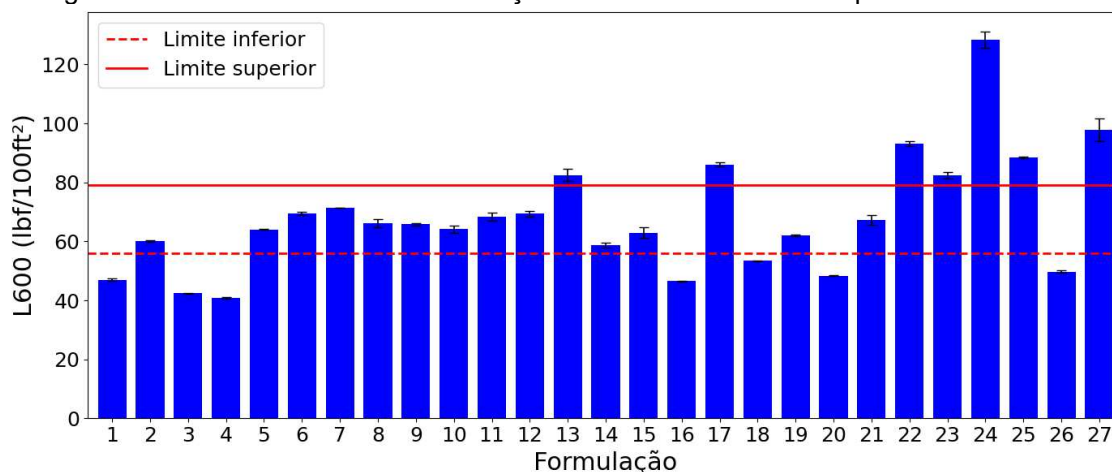
O sistema responde de forma diferenciada ao cisalhamento conforme a faixa de aplicação, comportamento esperado em fluidos pseudoplásticos estruturados por polímeros viscosificantes. E cruciais para avaliar propriedades importantes como capacidade de transporte de sólidos, estabilidade do sistema e comportamento viscoso.

Os resultados reológicos obtidos pelas leituras de cisalhamento das 27 formulações são apresentados nas Figuras 28 a 33, correspondendo às rotações de 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm, respectivamente, com os limites inferior e superior de referência indicados em cada gráfico.

Os resultados reológicos obtidos pelas leituras de L600, L300, L200 e L100, Figuras 28, 29, 30 e 31, demonstraram que a maior parte das formulações permaneceu dentro da faixa operacional estabelecida, indicando comportamento compatível com a aplicação proposta. A formulação 24 com maior concentração de sólidos, ultrapassaram o limite superior em todas as rotações analisadas. Conforme descrito por Caenn, Darley e Gray (2011), aumentos simultâneos das leituras em diferentes rotações normalmente estão relacionados ao aumento da concentração volumétrica de sólidos e ao maior atrito mecânico entre partículas suspensas.

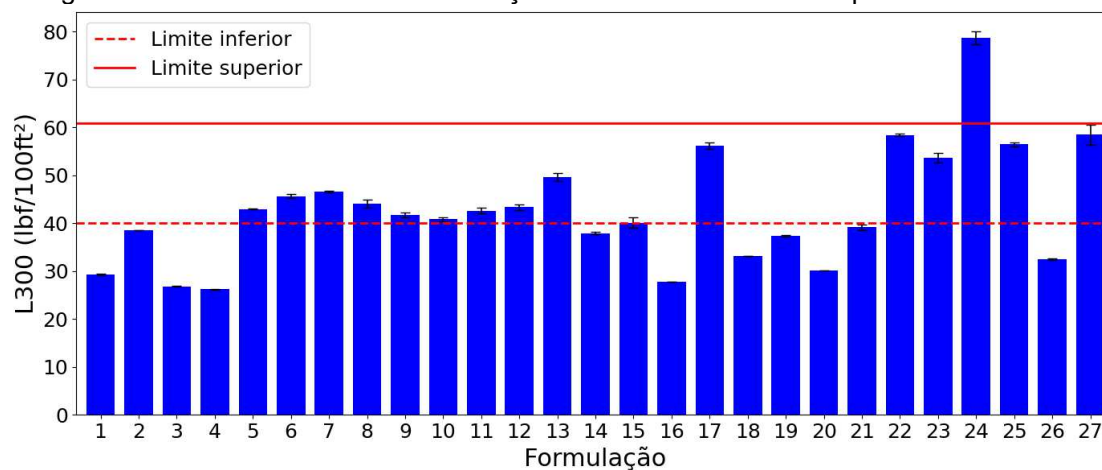
Em contrapartida, as formulações 1, 2, 3 e 4 com baixa concentração de goma xantana apresentaram leituras mais próximas do limite inferior, indicando menor viscosidade e menor estruturação interna. Embora valores reduzidos possam favorecer a bombeabilidade e reduzir perdas de carga, fluidos excessivamente pouco viscosos podem apresentar deficiência no transporte de cascalhos e maior tendência à sedimentação de sólidos, comprometendo a eficiência da limpeza do poço.

Figura 28 - Leitura L600 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



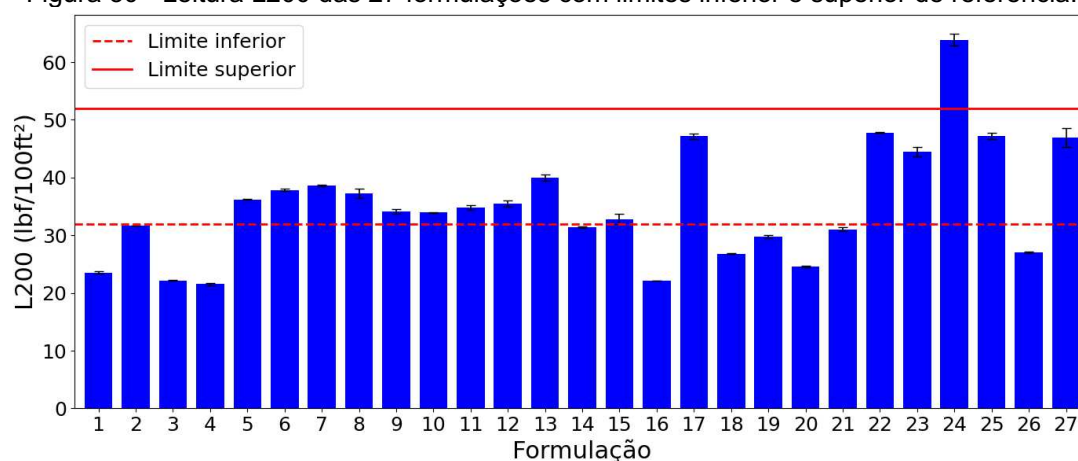
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 29 - Leitura L300 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



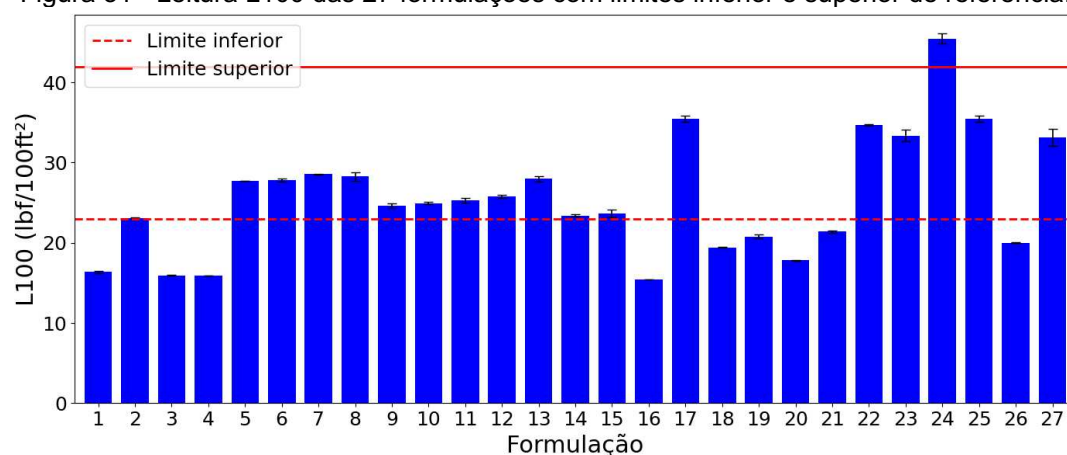
Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 30 - Leitura L200 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 31 - Leitura L100 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

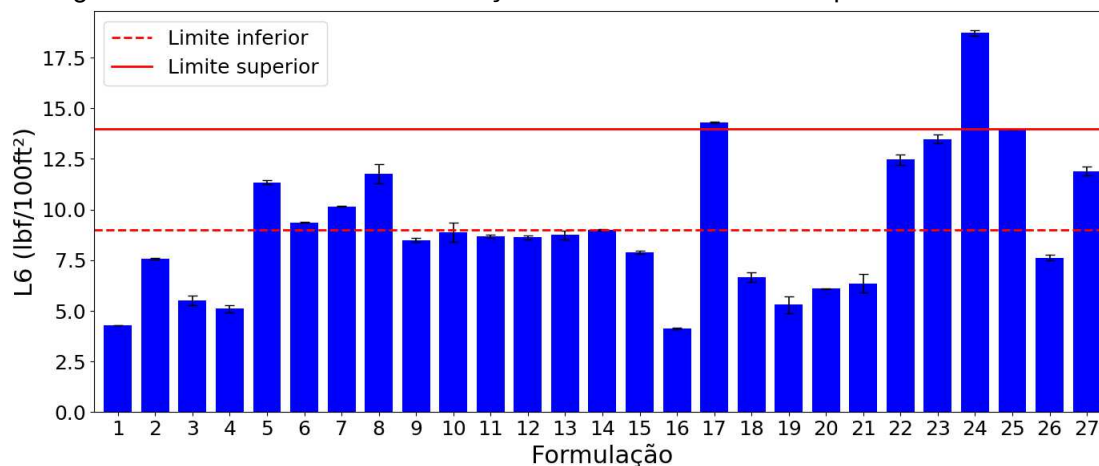
As leituras em baixas taxas de cisalhamento, L6 e L3 (Figuras 32 e 33), apresentaram a maior parte das formulações abaixo do limite inferior de referência. Dentre 27 formulações, apenas 14 formulações ficaram abaixo de 9 lbf/100 ft² em L6,

e 17 formulações ficaram abaixo de 8 lbf/100 ft² em L3. As formulações com valores abaixo do limite caracterizam-se predominantemente por baixa concentração de goma xantana, confirmando o papel dominante do viscosificante na estruturação do fluido em baixíssimas taxas de cisalhamento. Em contrapartida, apenas a formulação 24, com alta concentração simultânea de goma xantana, calcário e microesferas ocas de vidro, ultrapassou o limite superior em ambas as leituras.

Em baixas taxas de cisalhamento, valores reduzidos favorecem a bombeabilidade e a redução de perdas de carga na retomada da circulação; por outro lado, comprometem a capacidade de suspensão de sólidos no espaço anular durante períodos de repouso.

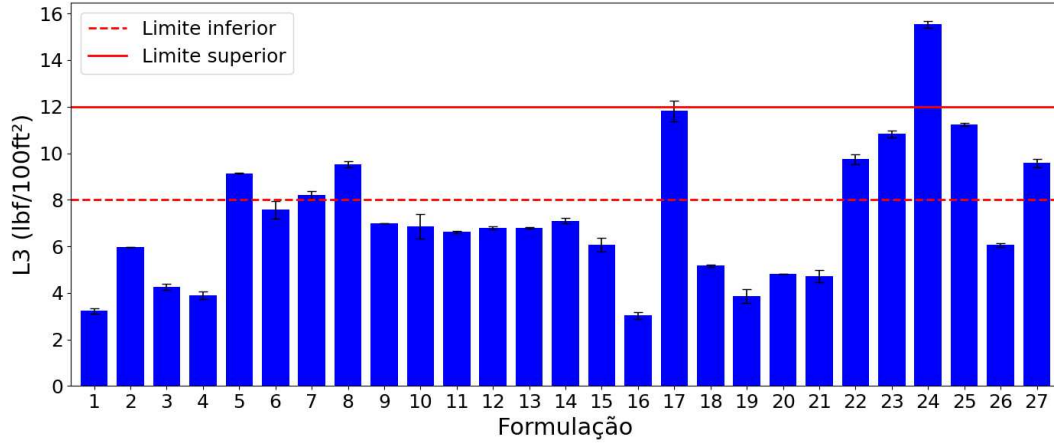
De modo geral, as figuras evidenciam uma faixa intermediária de formulações com comportamento reológico mais adequado para a estabilidade operacional e o transporte eficiente de sólidos durante a perfuração, equilibrando viscosidade suficiente para a suspensão de cascalhos sem ultrapassar os limites superiores que comprometeriam o bombeamento.

Figura 32 - Leitura L6 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 33 - Leitura L3 das 27 formulações com limites inferior e superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

As Equações 16 a 21 apresentam os modelos polinomiais ajustados para as seis leituras de cisalhamento, todos com coeficientes de determinação superiores a 0,92, indicando bom desempenho descritivo dos modelos no domínio investigado. Nos quais temos a presença da concentração de goma xantana (C_{GX}), concentração de HPA (C_{HPA}), concentração de microesferas ocas de vidro (C_{EV}) e concentração de calcário (C_C) todos medidos em lb/bbl.

$$\begin{aligned}
 L600 = & 26,835 + 15,037 \cdot (C_{GX}) - 1,089 \cdot (C_{HPA}) - 3,734 \cdot (C_{EV}) + 0,288 \cdot (C_{HPA}) \\
 & \cdot (C_{EV}) + 1,533 \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) - 1,448 \cdot (C_C) + 0,242 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C) \\
 & + 0,035 \cdot (C_C) \cdot (C_{EV}); \\
 R^2 = & 0,937
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 L300 = & 1,122 + 11,860 \cdot (C_{GX}) + 0,905 \cdot (C_{HPA}) - 0,638 \cdot (C_C) - 1,034 \cdot (C_{HGS}) \\
 & + 0,935 \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,144 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,931
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 L200 = & 1,015 + 10,711 \cdot (C_{GX}) + 0,482 \cdot (C_{HPA}) - 0,520 \cdot (C_C) - 0,881 \cdot (C_{EV}) \\
 & + 0,761 \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,117 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,938
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 L100 = & 0,910 + 9,014 \cdot (C_{GX}) - 0,008 \cdot (C_{HPA}) - 0,370 \cdot (C_C) - 0,656 \cdot (C_{EV}) + 0,542 \\
 & \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,084 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,949
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 L6 = & 2,767 + 4,452 \cdot (C_{GX}) - 0,773 \cdot (C_{HPA}) - 0,259 \cdot (C_C) - 0,567 \cdot (C_{EV}) + 0,008 \\
 & \cdot (C_{EV})^2 + 0,268 \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,055 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,937
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 L3 = & 2,071 + 3,834 \cdot (C_{GX}) - 0,697 \cdot (C_{HPA}) - 0,235 \cdot (C_C) - 0,490 \cdot (C_{EV}) + 0,008 \\
 & \cdot (C_{EV})^2 + 0,223 \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,050 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,928
 \end{aligned} \tag{21}$$

Ao analisar as equações percebe-se que a goma xantana destaca-se como o fator de maior magnitude positiva em todos os modelos, com coeficientes lineares variando entre +15,037 no L600 e +3,834 (L3), confirmando seu papel como viscosificante do sistema. Esse comportamento é coerente com a estrutura macromolecular helicoidal da xantana, cuja conformação em solução forma rede tridimensional contínua que resiste ao escoamento, propriedade amplamente reportada na literatura.

As concentrações de calcário e microesferas ocas de vidro apresentam efeitos lineares negativos sobre as leituras de cisalhamento, coeficientes variando de -0,235 a -1,448 para o carbonato e de -0,490 a -3,734 para as microesferas ocas de vidro. Comportamento não esperado já que tipicamente o aumento de fração de sólidos aumenta a tensão de cisalhamento em fluidos newtonianos. No entanto ao observar a presença da interação positiva GX × HGS no modelo, com coeficiente entre +0,223 e +1,533, revela que o efeito dos sólidos sobre o cisalhamento depende fortemente da concentração de goma xantana presente. Em alta concentração de goma xantana, os sólidos contribuem para a estruturação reológica, já em baixa concentração de goma xantana, predomina o efeito de diluição da matriz polimérica pelas partículas, reduzindo a estruturação do fluido. Comportamento similar é reportado por Bridges e Robinson (2020) em fluidos aquosos contendo microesferas ocas de vidro, nos quais a coexistência de partículas e matriz polimérica gera efeitos que não acrescentam a reologia.

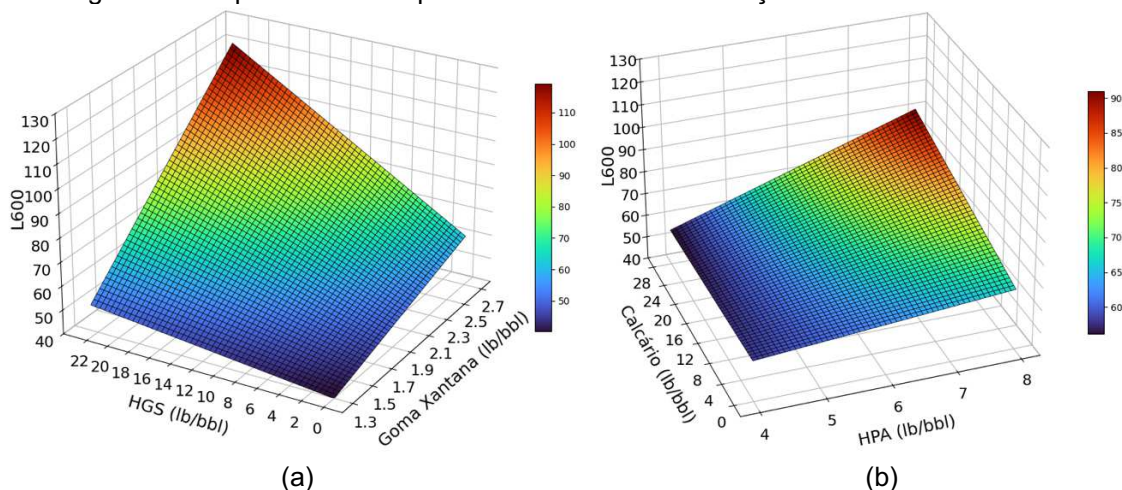
Os modelos ajustados às leituras de baixo cisalhamento, no caso L6 e L3, que representa o estado de repouso ou movimentação lenta do fluido em poço, apresentam termo quadrático positivo associado as microesferas ocas de vidro que não aparecem nas demais leituras, +0,008 para L6 e +0,008 para L3. Esse

comportamento indica que em condições de baixa taxa de cisalhamento o aumento progressivo da concentração de microesferas favorece a estruturação até um determinado limite. Esse fenômeno tem implicação direta sobre a força gel do fluido, propriedade discutida na Seção 4.7.

As superfícies de resposta das leituras de cisalhamento foram organizadas em pares no qual o efeito conjunto de microesferas ocas de vidro (HGS) e goma xantana foram analisados com HPA e calcário fixos no ponto central nas figuras a, e o efeito conjunto de calcário e HPA, com goma xantana e microesferas ocas de vidro fixos no ponto central em b.

A Figura 34 apresenta a superfície de resposta da leitura L600, representativa das leituras em alta e média taxa de cisalhamento, já que L300, L200 e L100 apresentam comportamento análogo suas superfícies são apresentadas no Apêndice. As superfícies HGS $\times$ goma xantana evidenciam o aumento sistemático das leituras com o incremento da concentração de goma xantana, especialmente nas regiões de média a alta concentração de microesferas ocas de vidro, em coerência com o termo de interação positivo discutido anteriormente. As superfícies calcário $\times$ HPA apresentam comportamento mais suave, dominado pela interação positiva entre os dois fatores presente nos modelos.

Figura 34 - Superfícies de resposta da leitura L600 em função dos fatores avaliados.

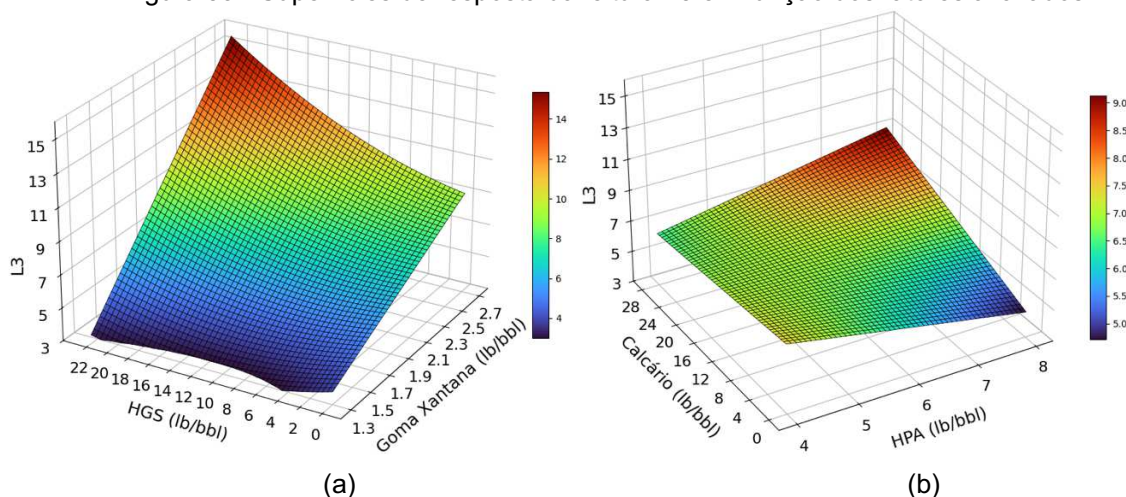


Fonte: Elaborado pela autora, 2026

A Figura 35 apresenta a superfície de resposta da leitura L3, representativa das leituras em baixa taxa de cisalhamento, sendo L6 de comportamento análogo e apresentada no Apêndice. Diferentemente das leituras de alta taxa, a superfície HGS $\times$ goma xantana da L3 evidencia uma curvatura mais acentuada, com valores mínimos

em concentrações intermediárias e elevação nas extremidades, refletindo o termo quadrático de microesferas ocas de vidro presente no modelo dessas leituras.

Figura 35 - Superfícies de resposta da leitura L3 em função dos fatores avaliados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

4.6.2. Viscosidade aparente, viscosidade plástica e limite de escoamento

A viscosidade aparente (VA), apresentou resultado entre 14,71 cP e 49,60 cP, enquanto a viscosidade plástica (VP), variou entre 9,01 cP e 29,17 cP. Resultados presentes na Tabela 14. A VA representa a viscosidade efetiva do fluido em condições de alto cisalhamento, relevante para o escoamento no anular durante a perfuração, enquanto a VP reflete a resistência ao escoamento associada exclusivamente à fricção entre partículas sólidas e moléculas poliméricas em solução, sendo independente do efeito de estruturação.

A análise conjunta das duas viscosidades revela que a formulação 24 (GX = 2,45 lb/bbl; HPA = 7,29 lb/bbl; CaCO_3 = 23,05 lb/bbl; HGS = 18,63 lb/bbl) apresenta os valores máximos de VA e VP, refletindo a contribuição combinada da máxima concentração de viscosificante (GX) com elevada fração de sólidos. Em contrapartida, a formulação 16 (GX = 1,30 lb/bbl, HPA = 6,00 lb/bbl; CaCO_3 = 14,00 lb/bbl; HGS = 11,32 lb/bbl) apresenta o menor valor de VP, evidenciando que mesmo com presença significativa de sólidos, a redução da concentração de goma xantana compromete drasticamente a capacidade do fluido de resistir ao cisalhamento contínuo, já que essa é a formulação com menor concentração de goma xantana.

Tabela 14 - Resultados da viscosidade plástica, viscosidade aparente e limite de escoamento.

	VA (cP)	VP (cP)	LE (lbf/100 ft²)
1	17,68 ± 0,22	11,64 ± 0,26	23,50 ± 0,08
2	21,54 ± 0,11	16,98 ± 0,21	30,03 ± 0,21
3	15,51 ± 0,04	11,37 ± 0,07	21,19 ± 0,22
4	14,71 ± 0,16	11,53 ± 0,20	20,47 ± 0,07
5	21,00 ± 0,08	22,00 ± 0,12	32,00 ± 0,08
6	23,81 ± 0,27	21,86 ± 0,15	34,74 ± 0,26
7	24,81 ± 0,04	21,75 ± 0,07	35,69 ± 0,24
8	22,06 ± 0,71	22,05 ± 0,54	33,08 ± 0,35
9	24,00 ± 0,22	17,76 ± 0,01	32,88 ± 0,46
10	23,26 ± 0,61	17,61 ± 0,81	32,06 ± 0,39
11	25,76 ± 0,74	16,84 ± 0,89	34,18 ± 0,31
12	26,02 ± 0,49	17,35 ± 0,33	34,69 ± 0,32
13	32,82 ± 0,98	16,89 ± 1,13	41,27 ± 0,29
14	20,84 ± 0,46	17,05 ± 0,68	29,37 ± 0,43
15	22,84 ± 0,90	17,26 ± 0,31	31,46 ± 1,17
16	18,80 ± 0,07	9,01 ± 0,13	23,31 ± 0,13
17	29,81 ± 0,34	26,41 ± 0,06	43,02 ± 0,56
18	20,26 ± 0,04	12,90 ± 0,08	26,71 ± 0,08
19	24,62 ± 0,14	12,73 ± 0,09	30,98 ± 0,09
20	18,25 ± 0,09	11,89 ± 0,24	24,20 ± 0,29
21	28,06 ± 0,85	11,10 ± 1,17	33,61 ± 0,63
22	34,61 ± 0,41	23,85 ± 1,05	46,53 ± 1,28
23	28,72 ± 0,55	25,01 ± 0,05	41,23 ± 1,00
24	49,60 ± 1,41	29,17 ± 1,48	64,18 ± 0,13
25	31,95 ± 0,12	24,55 ± 0,17	44,22 ± 0,58
26	17,26 ± 0,20	15,25 ± 0,20	24,89 ± 0,01
27	39,24 ± 1,92	19,29 ± 1,74	48,88 ± 0,38

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

O limite de escoamento (LE) demonstrou resultados entre 20,47 lbf/100 ft² e 64,18 lbf/100 ft². O LE representa a tensão mínima a ser aplicada ao fluido para iniciar seu escoamento a partir do estado de repouso, sendo parâmetro crítico para a capacidade de carregamento de cascalhos em regime de cisalhamento baixo durante operações de perfuração.

A goma xantana é o principal contribuinte para o LE do fluido, comportamento esperado dada a natureza estrutural da rede tridimensional que a macromolécula forma em solução. O HPA atua secundariamente, contribuindo via aumento da fração

polimérica total do sistema. Os sólidos (calcário e microesferas ocas de vidro) contribuem para o LE de forma indireta, ocupando sítios na rede polimérica que aumentam a resistência ao início do escoamento.

4.6.3. Modelo de Herschel-Bulkley

Os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustados às 27 formulações encontram-se apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros da equação de Herschel-Bulkley.

	τ_0 (Pa)	k (Pa·s ⁿ)	n	R^2
1	1,129	0,221	0,669	0,999
2	2,332	0,330	0,641	0,998
3	1,797	0,198	0,663	0,998
4	1,503	0,239	0,633	0,998
5	3,810	0,446	0,600	0,998
6	2,795	0,469	0,612	0,999
7	3,264	0,427	0,627	0,998
8	4,069	0,417	0,614	0,998
9	2,928	0,286	0,674	0,999
10	2,906	0,321	0,653	0,998
11	2,923	0,272	0,687	0,998
12	2,907	0,288	0,681	0,998
13	3,033	0,242	0,733	0,998
14	3,118	0,287	0,654	0,998
15	2,469	0,312	0,656	0,998
16	1,271	0,146	0,726	0,998
17	5,148	0,446	0,643	0,998
18	2,309	0,193	0,701	0,998
19	1,509	0,224	0,706	0,998
20	2,111	0,185	0,692	0,998
21	2,238	0,149	0,774	0,998
22	4,338	0,365	0,688	0,998
23	4,824	0,398	0,654	0,998
24	7,538	0,295	0,761	0,999
25	5,069	0,392	0,666	0,997
26	2,561	0,274	0,637	0,998
27	4,606	0,220	0,768	0,998

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Os coeficientes de determinação obtidos foram superiores a 0,997 para todas as corridas, evidenciando excelente capacidade descritiva do modelo no intervalo de cisalhamento avaliado. Os valores de tensão limite de escoamento variaram entre 1,13 Pa e 7,54 Pa, formulações 1 e 24, apresentando correlação positiva com a concentração combinada de goma xantana e sólido. O índice de consistência (K) variou entre 0,146 Pa·sⁿ (formulação 16) e 0,469 Pa·sⁿ (formulação 6), apresentando comportamento equivalente ao do limite de escoamento onde formulações com maior carga de viscosificante e sólidos apresentam maior consistência.

O índice de comportamento (n) situou-se na faixa de 0,600 a 0,774, com valor médio de aproximadamente 0,67, indicando comportamento pseudoplástico ($n < 1$) em todas as 27 formulações avaliadas. Característica desejável em fluidos de perfuração apresentando baixa viscosidade em altas taxas de cisalhamento, portanto reduzindo as perdas de carga em alto cisalhamento e preservando a capacidade de suspensão em baixo cisalhamento.

4.7. Efeito das Variáveis sobre a força gel

Realizou-se a análise da força gel das 27 formulações dos experimentos do PCC nos três tempos avaliados: 10 segundos (G10s), 10 minutos (G10min) e 30 minutos (G30min), Tabela 16.

A força gel constitui propriedade reológica fundamental em fluidos de perfuração, expressando a capacidade do fluido de manter sólidos em suspensão durante períodos de repouso ou cisalhamento mínimo, situação típica em paradas operacionais para manobras ou em intervalos entre conexões da coluna de perfuração.

Em sistemas biparticulados com sólidos de densidades opostas a força gel assume papel fundamental, atuando simultaneamente contra a sedimentação do componente mais denso, o Calcário, e contra a flotação do componente leve, as microesferas ocas de vidro. A inclusão da medida em três tempos de repouso, em particular o tempo prolongado de 30 minutos, constitui um dos elementos diferenciais deste trabalho permitindo avaliar não apenas a estruturação inicial do fluido, mas também sua evolução temporal e estabilidade prolongada.

Tabela 16 - Resultados das força gel de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos dos experimentos.

Exp.	Força Gel 10 seg (lbf/100 ft ²)	Força Gel 10 min (lbf/100 ft ²)	Força Gel 30 min (lbf/100 ft ²)
1	3,93 ± 0,04	6,24 ± 0,23	7,08 ± 0,08
2	7,91 ± 0,16	14,52 ± 0,14	16,10 ± 0,10
3	5,17 ± 0,04	10,03 ± 0,13	11,62 ± 0,04
4	4,79 ± 0,13	8,52 ± 0,20	10,68 ± 0,06
5	11,20 ± 0,45	21,65 ± 0,20	25,70 ± 0,40
6	9,43 ± 0,09	17,50 ± 0,32	20,11 ± 0,17
7	10,60 ± 0,48	17,49 ± 0,14	20,97 ± 0,47
8	11,83 ± 0,39	22,43 ± 1,78	26,87 ± 1,02
9	8,11 ± 0,33	14,78 ± 0,76	15,33 ± 0,17
10	8,43 ± 0,44	16,76 ± 0,21	15,94 ± 0,26
11	8,51 ± 0,44	14,23 ± 0,69	10,26 ± 0,42
12	8,22 ± 0,49	18,32 ± 0,04	15,51 ± 0,08
13	12,69 ± 0,89	12,07 ± 0,05	11,91 ± 0,64
14	8,42 ± 0,23	14,83 ± 0,41	19,98 ± 0,64
15	8,35 ± 0,41	15,00 ± 0,60	16,74 ± 0,32
16	3,89 ± 0,01	7,26 ± 0,18	4,67 ± 0,17
17	14,98 ± 0,30	27,97 ± 0,66	30,08 ± 0,21
18	5,62 ± 0,13	13,33 ± 0,45	12,09 ± 0,93
19	4,97 ± 0,44	9,20 ± 0,03	6,98 ± 0,30
20	5,41 ± 0,37	11,44 ± 0,04	15,28 ± 0,33
21	6,59 ± 0,41	8,07 ± 0,23	6,33 ± 0,04
22	12,49 ± 0,40	14,98 ± 0,23	11,87 ± 0,31
23	14,25 ± 0,20	26,25 ± 1,63	24,04 ± 0,85
24	25,11 ± 0,33	27,33 ± 0,80	25,91 ± 0,33
25	13,45 ± 0,16	24,69 ± 0,57	26,50 ± 0,50
26	6,77 ± 0,05	11,04 ± 0,32	13,06 ± 0,10
27	14,07 ± 0,83	14,06 ± 0,41	12,99 ± 0,32

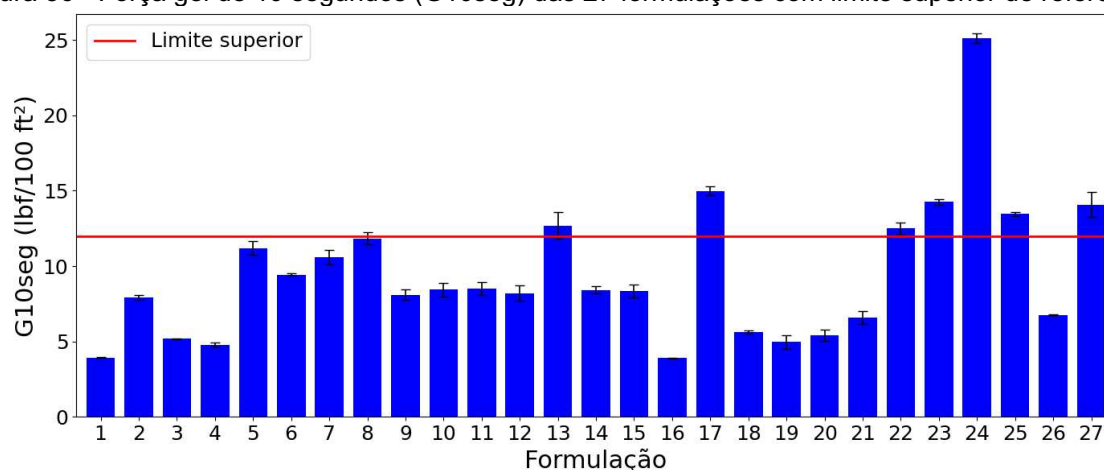
Fonte: Elaborado pela autora, 2026

4.7.1. Força gel de 10 segundos

A G10s esta associada a resposta imediata da rede polimérica e a organização espacial dos sólidos dispersos em ausência de cisalhamento. Os valores de força gel a 10 segundos variaram entre 3,89 lbf/100 ft² com a formulação 16 e 25,11 lbf/100 ft² com a formulação 24, apresentando ampla variação ao longo do domínio experimental investigado conforme ilustrado na Figura 37.

Adotou-se como limite superior operacional o valor de referência usualmente aceito para fluidos aquosos, conforme estabelecido no Capítulo 3. A maioria dos fluidos estudados apresentaram comportamento inferior ao limite superior, com exceção aos fluidos 13, 17, 22, 23, 24, 25 e 27.

Figura 36 - Força gel de 10 segundos (G10seg) das 27 formulações com limite superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

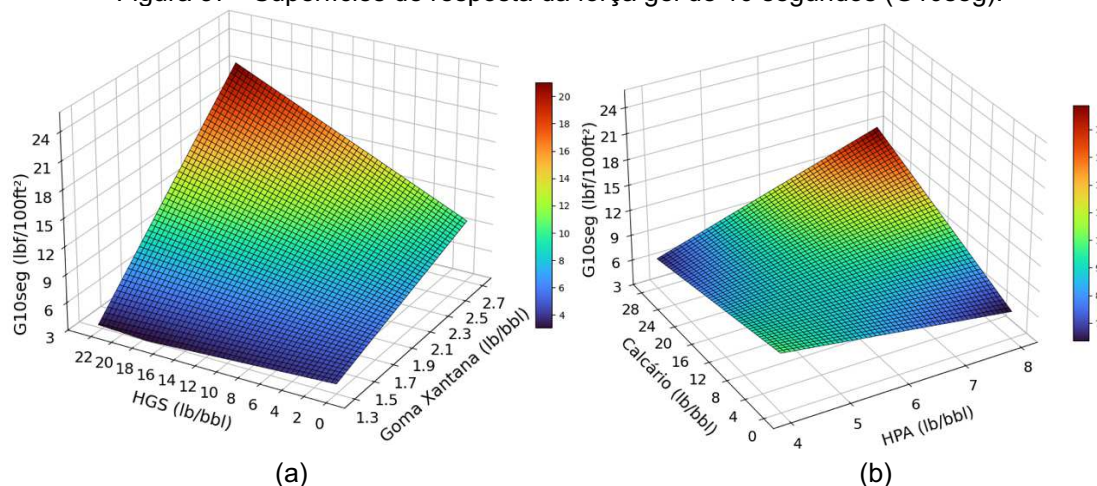
O modelo ajustado para a força gel a 10 segundos é apresentado na Equação 22. A análise dos coeficientes revela que a goma xantana (CG) é o fator de maior magnitude positiva sobre a G10s, +4,062, em coerência com seu papel estrutural na formação rápida da rede tridimensional do fluido, similar ao relatado nas outras respostas de leitura de cisalhamento. O HPA (CH), o Calcário (CC) e o microesferas ocas de vidro (CE) apresentam efeitos lineares negativos, o que não significa que reduzem a força gel, já que os aditivos aparecem em interações positivas.

$$\begin{aligned}
 G10s = & 2,935 + 4,062 \cdot (C_{GX}) - 0,921 \cdot (C_{HPA}) - 0,552 \cdot (C_C) - 0,589 \cdot (C_{EV}) + 0,407 \\
 & \cdot (C_{GX}) \cdot (C_{EV}) + 0,108 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,839
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

A presença do termo de interação positivo GX × HGS no modelo, +0,407, significa que as microesferas ocas de vidro, em presença de concentrações elevadas de goma xantana, contribui positivamente para a estruturação inicial do fluido. Esse comportamento pode estar relacionado à interação geométrica entre as microesferas e a rede polimérica formada pela goma xantana, embora a confirmação desse mecanismo exija estudos complementares de caracterização microestrutural não realizados neste trabalho. A interação positiva Calcário × HPA, +0,108, tem natureza

análoga, embora de menor magnitude. A Figura 38 ilustra graficamente esses efeitos já que as superfícies de resposta evidenciam o aumento sistemático da G10s nas regiões de alta concentração de goma xantana e microesferas ocas de vidro, o mesmo acontece nas regiões de alta concentração de HPA e Calcário.

Figura 37 - Superfícies de resposta da força gel de 10 segundos (G10seg).

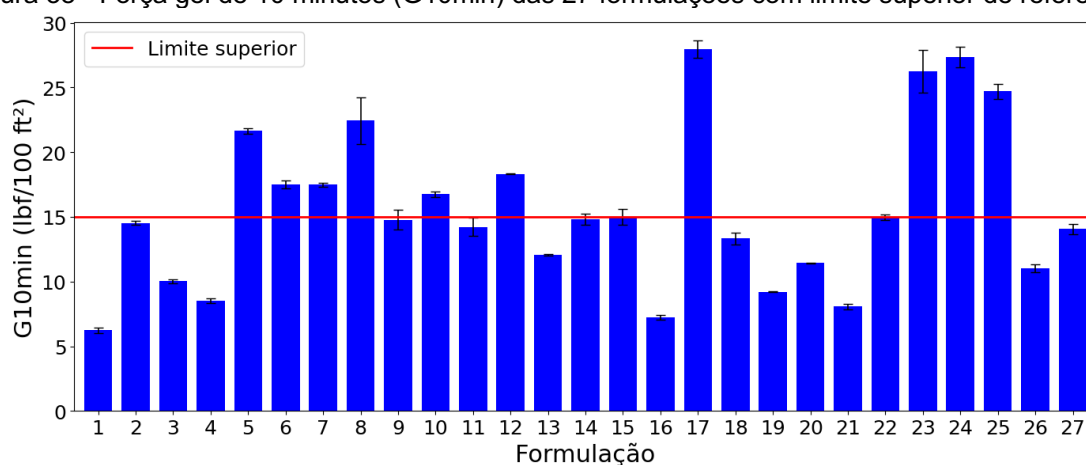


Fonte: Elaborado pela autora, 2026

4.7.2. Força gel de 10 minutos

Os valores de força gel a 10 minutos mantiveram-se entre 6,24 lbf/100 ft² e 27,97 lbf/100 ft², sendo que com 10 das 27 formulações ultrapassando o limite superior de referência adotado (Figura 39).

Figura 38 - Força gel de 10 minutos (G10min) das 27 formulações com limite superior de referência.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

O modelo ajustado é apresentado na Equação 23, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,871$.

$$G_{10m} = 24,420 - 12,120 \cdot (C_{GX}) + 6,317 \cdot (C_{GX})^2 - 2,400 \cdot (C_{HPA}) - 0,456 \cdot (C_C) + 0,142 \cdot (C_{EV}) + 0,099 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C);$$

$$R^2 = 0,871 \quad (23)$$

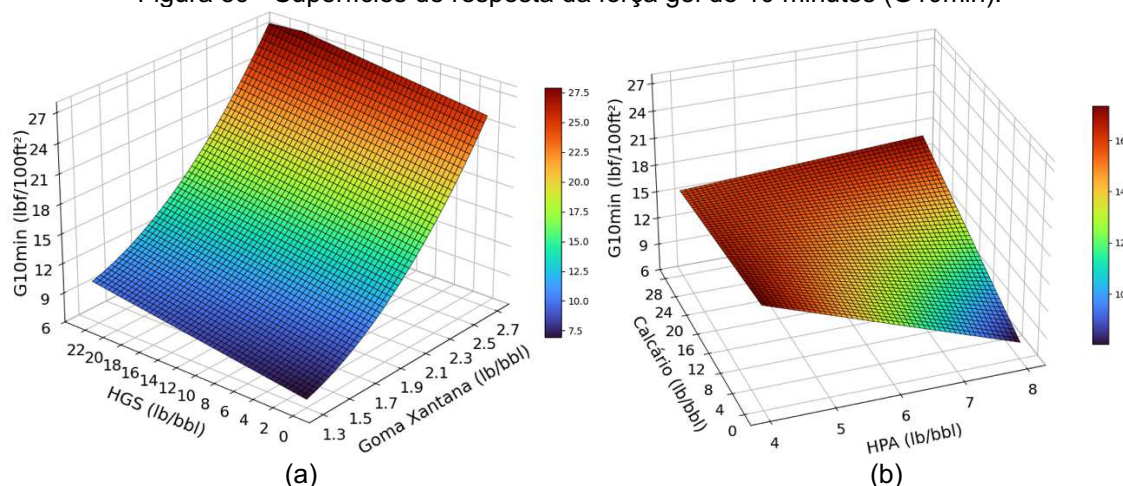
O modelo ajustado para a G10min apresenta características distinta em relação ao modelo da G10s. A goma xantana aparece com o coeficiente linear negativo, $-12,120$, acompanhado de coeficiente quadrático positivo, $+6,317$, configurando comportamento parabólico com mínimo em concentração intermediária de viscosificante. O ajuste polinomial reconstrói o efeito da goma xantana sobre o gel intermediário, aumentando o comportamento gel quando se aumenta a concentração goma xantana, comportamento associado a organização da rede polimérica no meio salino, onde a estrutura depende também da densidade de cadeias do polímero e da disponibilidade de íons.

As microesferas ocas de vidro apresentam efeito linear positivo, $+0,142$ sobre a G10min, contrastando com o efeito negativo observado para a G10s, indicando que as microesferas contribuem progressivamente para a estruturação do gel à medida que o fluido permanece em repouso.

O calcário apresenta coeficiente linear isolado negativo, $-0,456$, acompanhado de termo de interação positivo com o HPA, $+0,099$. Esse comportamento evidencia interação sinérgica entre o agente obturante e o redutor de filtrado onde a contribuição do CaCO_3 para a estruturação intermediária do gel depende da presença simultânea do HPA no sistema, como é possível observar Figura 38.

As superfícies de resposta da Figura 40 evidencia que a região do domínio experimental com maior G10min coincide com a combinação de alta concentração de goma xantana e alta concentração de microesferas ocas de vidro, comportamento que confirma o efeito sinérgico entre matriz polimérica e microesferas na estruturação progressiva da rede tridimensional.

Figura 39 - Superfícies de resposta da força gel de 10 minutos (G10min).



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

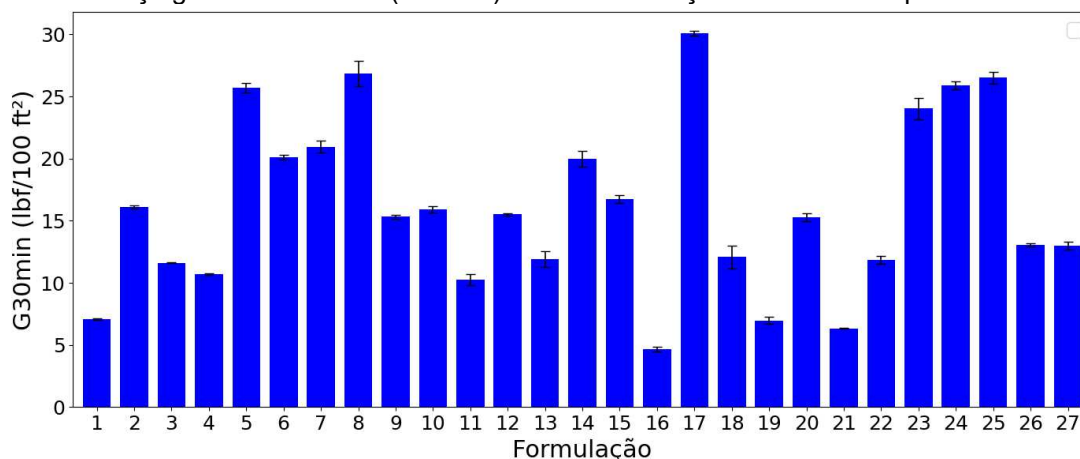
4.7.3. Força gel de 30 minutos

Por fim, os valores de força gel a 30 minutos estavam entre 4,67 lbf/100 ft² e 30,08 lbf/100 ft², com diversas formulações apresentando valores superiores aos observados na G10min, indicando estruturação progressiva do gel ao longo do tempo de repouso, ilustrado na Figura 41.

O modelo ajustado é apresentado na Equação 24, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,832$.

$$\begin{aligned}
 G_{30m} = & 36,991 - 14,392 \cdot (C_{GX}) - 3,679 \cdot (C_{HPA}) + 7,210 \cdot (C_{GX})^2 - 0,779 \cdot (C_C) \\
 & + 0,130 \cdot (C_{HPA}) \cdot (C_C); \\
 R^2 = & 0,832
 \end{aligned} \tag{24}$$

Figura 40 - Força gel de 30 minutos (G30min) das 27 formulações com limite superior de referência.

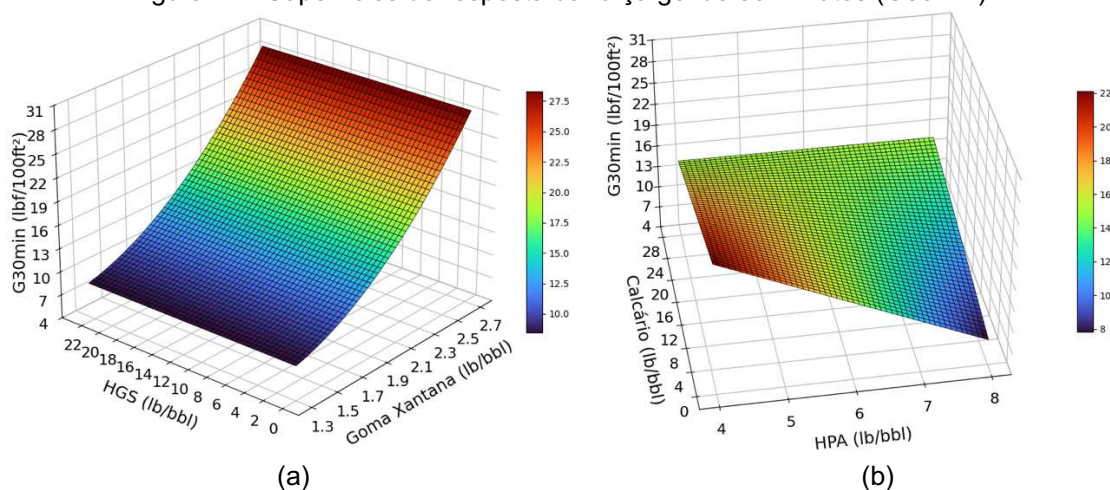


Fonte: Elaborado pela autora, 2026

O modelo da G30min preserva a estrutura geral observada no modelo da G10min, incluindo o comportamento parabólico associado à goma xantana no qual o termo linear negativo de $-14,392$ e termo quadrático positivo de $+7,210$. A ausência do termo linear de microesferas ocas de vidro no modelo final da G30min é contrastante com sua presença nos modelos da G10s e G10min, indica que em repouso prolongado, o efeito direto das microesferas sobre a magnitude do gel passa a ser estatisticamente menos significativo, predominando os efeitos da matriz polimérica e dos demais aditivos sobre a estabilidade final da rede. A Figura 41 ilustra esse comportamento no qual a G30min atinge valores próximos a $28 \text{ lbf}/100 \text{ ft}^2$ na região de alta GX, com gradiente acentuado em direção ao centro do domínio.

O HPA e o Calcário apresentam coeficiente linear isolado negativo $-3,679$ e $-0,779$, acompanhado de interação positiva entre eles $+0,130$. Como é possível observar pela Figura 42, em altas concentrações de HPA e baixa concentração de calcário a força gel tende a diminuir. Por tanto, em repouso prolongados a presença do HPA pode interferir negativamente na consolidação da rede formada pela xantana, particularmente em condições de baixa concentração de sólidos. Isso pode ser devido a competição por água para a hidratação do polímero que compete com a goma xantana interferindo na formação da rede estrutural, mais estudos devem ser realizados sobre esse mecanismo.

Figura 41 - Superfícies de resposta da força gel de 30 minutos (G30min).



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4.7.4. Discussão comparativa dos tempos de repouso para a determinação da Força Gel

A análise conjunta dos três tempos de repouso permite caracterizar a magnitude da força gel desenvolvida pelo fluido. A maioria das formulações avaliadas apresentou comportamento de gel progressivo crescente, com força gel de 30 minutos levemente superior à força gel de 10 minutos e ambas superiores à força gel de 10 segundos, perfil característico de fluidos com rede polimérica viscosificante que continua se organizando após o cisalhamento inicial.

O desvio observado na formulação 11 é atribuído à variabilidade experimental intrínseca da medida de força gel, e não a comportamento característico da formulação central.

Com base nas formulações observados, as formulações podem ser analisadas perante quatro perfis de comportamento, ilustradas na Figura 43, gel fraco, gel progressivo, gel parcialmente reversível e gel estável. O gel fraco com baixos valores em todos os tempos de repouso, resultando em pouca estruturação como a formulação 1.

O gel progressivo é identificado pelo aumento sistemático da força gel ao longo do tempo, como a formulação 14, cuja força gel passa de 14,83 lbf/100 ft² (10 min) para 19,98 lbf/100 ft² (30 min), evidenciando a contínua reorganização da rede polimérica em repouso. Formulações classificadas como gel progressivo crescente com valores muito elevados, devem ser evitadas em aplicações que envolvam paradas prolongadas, pois a tensão necessária para reiniciar a circulação do fluido seria excessiva. Esse caso reforça a importância de avaliar a força gel também aos 30 minutos, e não apenas aos 10, para identificar formulações com estruturação excessiva em repouso prolongado.

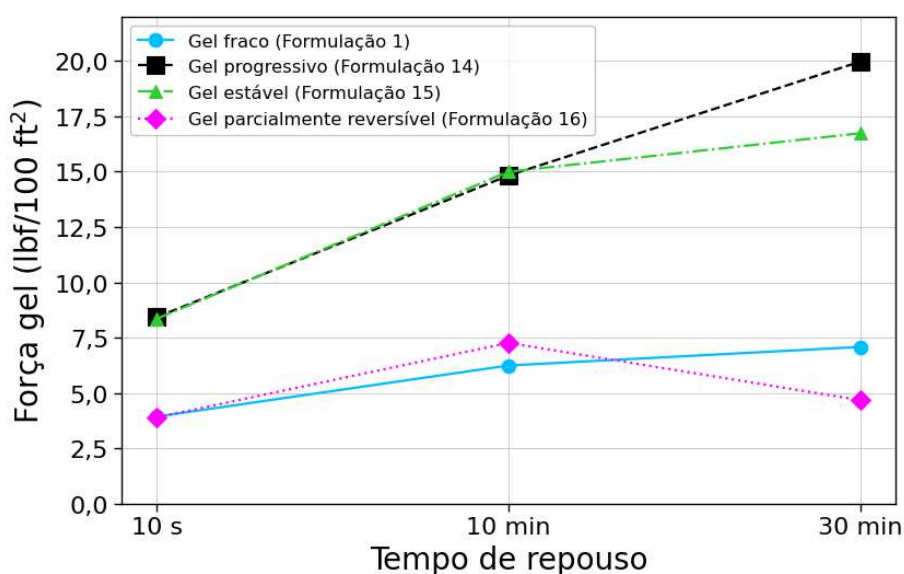
A formulação 16 com baixa concentração de goma xantana (1,30 lb/bbl) apresentou força gel de 30 minutos (4,67) inferior à força gel de 10 minutos (7,26), indicando comportamento de gel parcialmente reversível. Esse perfil é coerente com a baixa concentração do principal agente estruturante, resultando em uma rede polimérica frágil, incapaz de sustentar a estrutura em repouso prolongado.

Comportamentos de gel parcialmente reversível podem estar associados a fenômenos de relaxação estrutural da rede polimérica em repouso, conforme discutido na literatura sobre tixotropia de sistemas estruturados (BARNES, 1997); ou pela

flotação das microesferas de vidro. No presente trabalho, contudo, não foi conduzida caracterização específica que permitisse confirmar mecanismos de degradação estrutural.

O gel estável apresenta valores moderados e relativamente constantes entre 10 e 30 minutos, como a formulação 15 com força gel de 10 minutos igual a 15,00 lbf/100 ft² e força gel de 30 minutos 16,74 lbf/100 ft², indicando uma estrutura bem desenvolvida e mantida em repouso.

Figura 42 - Perfis de evolução da força gel em função do tempo de repouso para formulações representativas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Para sistemas biparticulados com sólidos de densidades opostas, como o sistema calcário/microesferas ocas de vidro investigado neste trabalho, a estabilidade temporal da força gel tem implicação operacional direta sobre a manutenção da suspensão. A força gel de 10 segundos garante a capacidade do fluido de resistir à sedimentação e à flotação no momento imediato após cisalhamento; a força gel de 10 minutos garante essa capacidade durante manobras curtas; a força gel de 30 minutos exemplifica a estabilidade da suspensão durante períodos prolongados de repouso, condição na qual a separação gravitacional dos sólidos pode ocorrer caso a estrutura gel fosse insuficiente.

4.8. Otimização por Evolução Diferencial

Esta seção apresenta os resultados da otimização multiobjetivo da formulação do fluido aquoso saturado polimérico, conduzida por meio do algoritmo de Evolução Diferencial implementado conforme descrito na Metodologia. A função objetivo adotada foi a minimização da densidade do fluido, Equação 14, sujeita a restrições operacionais impostas pelos modelos ajustados às demais respostas reológicas: leituras de cisalhamento L600, L300, L200, L100, L6 e L3, Equações 16 a 21, e força gel nos três tempos avaliados, Equações 22 a 24. As restrições foram tratadas pelo método de penalização quadrática, aplicada à função objetivo penalizada conforme procedimento clássico em otimização com restrições.

4.8.1. Formulação Ótima e Validação Experimental

A aplicação do algoritmo de Evolução Diferencial ao problema de otimização resultou em três formulações ótimas, apresentadas na Tabela 17 em variáveis reais. As formulações foram obtidas em execuções independentes do algoritmo, conduzidas com diferentes pontos iniciais a fim de mapear soluções na região de viabilidade do domínio experimental.

Tabela 17 - Composição das formulações previstas pelo algoritmo de otimização.

Experimento	GX (lb/bbl)	HPA (lb/bbl)	C (lb/bbl)	HGS (lb/bbl)
F1	2,00	6,27	0,00	22,63
F2	2,00	7,06	20,00	10,20
F3	1,82	5,82	0,00	33,25

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

É importante destacar que o algoritmo de Evolução Diferencial, por sua natureza estocástica, pode convergir para diferentes combinações de concentração a cada execução independente. Como as restrições reológicas são definidas em faixas de valores aceitáveis com limites inferior e superior e não em valores-alvo únicos, existe um conjunto amplo de combinações de concentração que satisfazem simultaneamente todas as restrições. Associado ao fato da densidade, função objetivo do problema, depender exclusivamente das concentrações de calcário e microesferas ocas de vidro, conforme o modelo ajustado na Equação 14, configura-se uma região

de soluções na qual diferentes combinações de goma xantana e HPA permanecem viáveis sem alterar o valor da função objetivo.

As três formulações ótimas apresentaram a concentração de goma xantana próxima ao ponto central ou ligeiramente abaixo do ponto central, 2,00 lb/bbl. Com o objetivo de redução da densidade todas as formulações apresentaram a concentração de microesferas ocas de vidro elevada. A Formulação 3 foi propositalmente definida fora do domínio experimental, com o objetivo de avaliar a robustez preditiva do modelo. As formulações 1 e 3 obtiveram concentração nula para o calcário evidenciando que, sob critério de minimização da densidade, o algoritmo dispensa o uso do componente, por aumentar a densidade como é demonstrado na Equação 14.

A Formulação 2 apresenta concentração significativa de calcário, presença de com menor concentração de microesferas ocas de vidro e maior concentração de HPA. Esse fluido foi escolhido com o objetivo de formular um fluido com presença de calcário que usualmente é utilizado em poços de perfuração e que apresentasse concentração de microesferas ocas de vidro dentro do domínio.

As três formulações foram preparadas experimentalmente seguindo o mesmo procedimento adotado para o Planejamento Composto Central e todas as propriedades foram medidas para comparação com os valores preditos pelos modelos. A Tabela 18 apresenta a comparação consolidada entre valores preditos e experimentais, acompanhada dos erros relativos correspondentes.

As leituras de cisalhamento em alta e média taxa, L600, L300, L200 e L100, apresentaram erros relativos entre -4,52% e +15,46%, compatíveis com os coeficientes de determinação dos respectivos modelos, entre 0,93 e 0,95. As leituras de baixo cisalhamento, L6 e L3, apresentaram erros relativos significativamente superiores, principalmente para a Formulação 3. Esses desvios elevados são consistentes com a maior dificuldade de modelagem do comportamento do fluido em baixas taxas de cisalhamento, regime no qual a estruturação do fluido em repouso domina a resposta reológica e a variabilidade experimental tende a ser maior.

Tabela 18 - Comparação entre valores preditos pelos modelos e valores experimentais para as três formulações ótimas obtidas.

Propriedade	Formulação 1			Formulação 2			Formulação 3		
	Pred.	Exp.	Erro (%)	Pred.	Exp.	Erro (%)	Pred.	Exp.	Erro (%)
Densidade (ppg)	9,14	9,10	0,49	9,72	9,70	0,18	8,85	8,95	-1,12
L600	75,85	68,63 ± 0,72	10,52	75,56	69,10 ± 0,96	9,36	72,00	75,41 ± 0,84	-4,52
L300	49,47	42,84 ± 0,19	15,46	47,36	43,20 ± 0,73	9,62	50,05	47,00 ± 0,70	6,49
L200	39,98	34,93 ± 0,25	14,46	38,59	35,23 ± 0,55	9,55	39,95	37,96 ± 0,49	5,26
L100	28,58	25,47 ± 0,20	12,21	27,73	25,40 ± 0,44	9,17	28,15	26,87 ± 0,25	4,78
L6	10,47	8,91 ± 0,43	17,54	9,39	7,82 ± 0,09	20,03	13,07	8,76 ± 0,05	49,19
L3	8,28	7,41 ± 0,06	11,77	7,48	5,89 ± 0,19	26,96	10,59	6,63 ± 0,15	59,79
Força gel 10 seg	10,39	7,82 ± 0,62	32,87	11,10	7,50 ± 0,43	47,93	9,96	8,12 ± 0,13	22,70
Força gel 10 min	13,62	14,95 ± 0,16	-8,93	14,78	11,04 ± 0,38	33,84	14,00	18,65 ± 0,02	-24,93
Força gel 30 min	13,98	13,88 ± 0,03	0,70	13,82	10,08 ± 0,27	37,08	13,21	15,31 ± 0,30	-13,68

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

As três medidas de força gel apresentaram os erros relativos mais elevados entre as propriedades avaliadas, com magnitudes que variaram entre -24,93% e +32,87%. Sendo coerentes com os coeficientes de determinação intermediários dos modelos de força gel e com a natureza intrinsecamente variável dessa propriedade que depende não apenas das concentrações dos componentes, mas também de fatores de difícil controle experimental, como a uniformidade do estado estrutural do fluido no momento da medida e a sensibilidade dimensional do procedimento padronizado API.

A comparação entre valores experimentais e os limites estabelecidos como restrição revela atendimento parcial das condições de viabilidade. As leituras de cisalhamento em alta e média taxa (L600, L300, L200 e L100) mantiveram-se dentro das faixas operacionais estabelecidas para as três formulações.

Por outro lado, leituras de baixo cisalhamento (L6 e L3) apresentaram valores experimentais ligeiramente inferiores ao limite mínimo estabelecido. Para a Formulação 1, o L6 experimental foi de 8,91 lbf/100 ft², muito próximo ao limite inferior de 9 lbf/100 ft², enquanto o L3 foi de 7,41 lbf/100 ft², perante o limite de 8 lbf/100 ft². Esses pequenos desvios são coerentes com os menores coeficientes de determinação dos modelos de L6 e L3 e com a maior sensibilidade dessas leituras a

pequenas variações de concentração. A reduzida magnitude do desvio indica que a capacidade de suspensão pode ser ajustada por um leve incremento na concentração de viscosificante, sem comprometer a densidade alcançada.

Adicionalmente, a Formulação 3 apresentou força gel de 10 minutos de 18,65 lbf/100 ft², superior ao limite máximo estabelecido de 15 lbf/100 ft². Esse desvio é coerente com a natureza dessa formulação, preparada deliberadamente fora do espaço experimental, com alta concentração de microesferas ocas de vidro e ausência de calcário, condição em que a capacidade preditiva dos modelos é reduzida.

O volume de filtrado foi uma propriedade não incluída como restrição explícita na otimização, mas vale ressaltar que as três formulações apresentaram volume de filtrado abaixo de 10 mL, sendo eles 1,4 mL, 1,0 mL e 5,2 mL, respectivamente para cada fluido. Esse resultado confirma a hipótese que fundamentou a exclusão do volume filtrado das restrições da otimização já que o domínio operacional investigado se encontra integralmente dentro da faixa de viabilidade desse parâmetro.

Um aspecto relevante é que a formulação 1 atingiu densidade, 9,10 ppg, valor inferior a todas as 27 formulações do planejamento. Esse resultado é coerente com o objetivo da otimização, que buscou o mínimo de densidade na região de máxima concentração de microesferas e ausência de calcário, combinação não contemplada diretamente pelos experimentos, mas prevista pelos modelos ajustados.

Considerando o conjunto de propriedades avaliadas, a formulação 1, GX = 2,00 lb/bbl; HPA = 6,27 lb/bbl; Calcário = 0 lb/bbl; HGS = 22,63 lb/bbl, configura-se como a solução de melhor compromisso entre minimização da densidade e atendimento às restrições operacionais. A ausência de Calcário na formulação ótima evidencia que, em sistema aquoso saturado polimérico, o emprego exclusivo de microesferas ocas de vidro como aditivo sólido é tecnicamente viável quando o objetivo é a redução de densidade, contanto que a estabilidade reológica e a estruturação do gel sejam asseguradas pela matriz polimérica de goma xantana e HPA.

A abordagem de otimização multiobjetivo aqui apresentada incorpora elementos não usualmente combinados em trabalhos comparáveis da literatura. O tratamento simultâneo de seis leituras de cisalhamento e três medidas de força gel como restrições, além da minimização da densidade como função objetivo. Ressaltando que a confiabilidade da otimização por modelos empíricos é limitada pela qualidade de ajuste dos modelos que compõem as restrições. Propriedades de baixo

coeficiente de determinação (L6, L3, força gel) geram restrições menos confiáveis, resultando em violações na validação experimental.

5. CONCLUSÃO

A análise de viabilidade operacional realizada com fluido *drill-in* demonstrou que a redução máxima de densidade tecnicamente sustentável, sem comprometimento das propriedades reológicas e de filtração, foi obtida com concentração de HGS de 18 lb/bbl (fluido C25EV18), resultando em redução de 0,50 ppg em relação à formulação base. Acima de 23 lb/bbl, o sistema apresentou falha no controle de filtrado, associada à perda de heterogeneidade geométrica do empacotamento da torta. A análise em escala de campo revelou que as restrições logísticas de armazenamento limitam a concentração de microesferas ocas de vidro operacionalmente viável a aproximadamente 10,20 lb/bbl para produções entre 5.000 e 7.000 bbl, resultando em redução máxima alcançável de 0,25ppg evidenciando que, no contexto operacional atual, a limitação ao uso de microesferas ocas de vidro é predominantemente logística.

O Planejamento Composto Central com 27 formulações permitiu ajustar modelos empíricos de segunda ordem para onze respostas do fluido. O modelo da densidade apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,979$, respondendo estritamente às concentrações de CaCO_3 e microesferas ocas de vidro de forma linear e independente.

Os modelos das leituras de cisalhamento (L600 a L3) apresentaram R^2 superiores a 0,92, com a goma xantana como fator de maior magnitude em todos os modelos. Os modelos de força gel apresentaram R^2 entre 0,83 e 0,87, refletindo a maior complexidade e variabilidade intrínseca dessa propriedade. O volume de filtrado manteve-se abaixo de 10 mL em todas as 27 formulações avaliadas, não sendo necessária sua inclusão como restrição explícita na otimização.

A otimização por Evolução Diferencial, minimizando a densidade sujeita a restrições simultâneas sobre nove respostas reológicas, identificou três formulações candidatas. A formulação de melhor compromisso (GX = 2,00 lb/bbl; HPA = 6,27 lb/bbl; CaCO_3 = 0 lb/bbl; HGS = 22,63 lb/bbl) atingiu densidade de 9,10 ppg, com todas as leituras de cisalhamento em alta e média taxa dentro das faixas operacionais estabelecidas. As leituras de baixo cisalhamento (L6 e L3) e as forças gel apresentaram maiores erros preditivos, coerentes com os coeficientes de determinação intermediários dos respectivos modelos e com a natureza intrinsecamente variável dessas propriedades. As três formulações apresentaram

volume de filtrado abaixo de 10 mL, confirmando a hipótese de que os níveis de HPA adotados são suficientes para o controle de filtrado no domínio investigado.

Os resultados demonstram a viabilidade da abordagem integrada PCC + ED para o desenvolvimento de fluidos aquosos de baixa densidade com múltiplos critérios operacionais simultâneos, contribuindo para o avanço metodológico na formulação de fluidos de perfuração para formações que necessitam de fluidos leves.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Avaliar o comportamento das formulações otimizadas em condições de alta pressão e alta temperatura (HPHT), uma vez que os ensaios deste trabalho foram conduzidos a temperatura ambiente e a estabilidade térmica da rede polimérica e da resistência das microesferas em profundidade não foi caracterizada;
- investigar a estabilidade temporal das suspensões quanto à sedimentação do calcário e à flotação das microesferas ocas de vidro durante períodos prolongados de repouso, por meio de ensaios de estabilidade estática, complementando a análise de força gel realizada;
- caracterizar a microestrutura da torta filtrante por microscopia eletrônica de varredura (MEV), de forma a confirmar experimentalmente os mecanismos de empacotamento geométrico e formação de canais preferenciais propostos para explicar o comportamento de filtração em altas concentrações de microesferas ocas de vidro;
- empregar uma distribuição granulométrica diversificada de agentes obturantes para superar o limite de 23 lb/bbl de microesferas ocas de vidro identificado como ponto de falha no controle de filtrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3M COMPANY. *3M™ Glass Bubbles for drilling and cementing*. Saint Paul, 2026. Disponível em: https://www.3m.com/3M/en_US/p/c/advanced-materials/glass-bubbles. Acesso em: 4 maio 2026.

ABRAMS, A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. *Journal of Petroleum Technology*, v. 29, n. 05, p. 586-592, 1977. DOI: 10.2118/5713-PA.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Reservas provadas de petróleo no Brasil crescem 7% em 2023*. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/reservas-provadas-de-petroleo-no-brasil-crescem-7-em-2023. Acesso em: 14 fev. 2025.

AKPAN, E. U. et al. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, v. 10, p. 1933–1948, 2020. DOI: 10.1007/s13202-020-00837-0.

AL-DARWEESH, J. et al. Review of underbalanced drilling techniques highlighting the advancement of foamed drilling fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, v. 13, p. 929–958, 2023. DOI: 10.1007/s13202-022-01596-w.

AL JABERI, J. et al. Fine-tuning filter cake sealing performance: the role of particle size in hematite weighted water-based drilling fluid. *ACS Omega*, v. 9, p. 25084–25093, 2024. DOI: 10.1021/acsomega.4c02352.

ALI, I.; AHMAD, M.; GANAT, T. Experimental study of bentonite-free water based mud reinforced with carboxymethylated tapioca starch: rheological modeling and optimization using response surface methodology (RSM). *Polymers*, v. 13, n. 19, p. 3320, 2021. DOI: 10.3390/polym13193320.

ALTINO, H. O. N.; LOURENÇO, G. A.; ATAÍDE, C. H. System development for bulk density data acquisition of granular materials: effect of operational conditions and optimization. *Powder Technology*, v. 391, p. 184-197, 2021. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.06.013.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API RP 13B-1: recommended practice for field testing water-based drilling fluids*. 4. ed. Washington, DC: API, 2009.

BETIHA, M. A. et al. Fabrication of ionic liquid-cellulose-silica hydrogels with appropriate thermal stability and good salt tolerance as potential drilling fluid. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 13, n. 7, p. 6201-6220, 2020. DOI: 10.1016/j.arabjc.2020.05.027.

BRIDGES, S.; ROBINSON, L. H. *A practical handbook for drilling fluids processing*. [S. l.]: Gulf Professional Publishing, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-821341-4.00011-7.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. *Composition and properties of drilling and completion fluids*. 7. ed. Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2017.

CAMARGO, J. C.; ALTINO, H. O. N.; SANTANA JÚNIOR, J. A.; PEREIRA, M. S.; DUARTE, C. R.; GONZAGA, K. A. Aplicação de microesferas ocas de vidro na redução da densidade de fluidos de perfuração drill-in. In: *ENCONTRO NACIONAL DE CONSTRUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO*, 10., 2025, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: UFCG, 2025. p. 440-449. ISBN 978-65-5222-057-8.

CHEN, H. et al. Ultra-low-density drilling fluids for low-pressure coefficient formations: synergistic effects of surfactants and hollow glass microspheres. *Processes*, v. 11, n. 7, p. 2129, 2023. DOI: 10.3390/pr11072129.

CHEN, L. Optimization design of drilling fluid chemical formula based on artificial intelligence. *Computational Intelligence and Neuroscience*, v. 2022, Article ID 5465816, 11 p., 2022. DOI: 10.1155/2022/5465816.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. *Composition and properties of drilling fluids*. 5. ed. Houston: Gulf Publishing, 1988.

DAVOODI, S. et al. Modified-starch applications as fluid-loss reducers in water-based drilling fluids: a review of recent advances. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, 140430, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140430.

ELKATATNY, S. Real-time prediction of the rheological properties of water-based drill-in fluid using artificial neural networks. *Sustainability*, v. 11, n. 18, p. 5008, 2019. DOI: 10.3390/su11185008.

FANG, Q. et al. Formation-damage mechanism and gel-breaker-free drill-in fluid for carbonate reservoir. *Gels*, v. 8, n. 9, p. 565, 2022. DOI: 10.3390/gels8090565.

GONZAGA, E. R. *Formulação de fluidos de perfuração sintéticos leves empregando esferas ocas de vidro*. 2026. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2026. DOI: 10.14393/ufu.di.2026.138.

GORDON, M. B.; KLOXIN, C. J.; WAGNER, N. J. The rheology and microstructure of an aging thermoreversible colloidal gel. *Journal of Rheology*, v. 61, n. 6, p. 1269–1281, 2017. DOI: 10.1122/1.4966039.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). *Panorama geral do setor de O&G*. 2024. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2024/05/panorama-geral-do-setor-de-og-portugues.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

JASSIM, L.; YUNUS, R.; RASHID, U. Utilization of nano and micro particles to enhance drilling mud rheology. *Materials Science Forum*, v. 1002, p. 435–447, 2020. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1002.435.

KHAN, M. A. et al. Application of hydrothermal synthesized titanium dioxide-doped multiwalled carbon nanotubes on filtration properties: response surface methodology

study. *ACS Omega*, v. 9, n. 32, p. 34765-34776, 2024. DOI: 10.1021/acsomega.4c04177.

KONBUL, A.; OZBAYOGLU, E. M.; MATA, C. Survival of hollow glass microspheres in drilling fluids applications: effect of drill bit/formation contact. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 189, p. 106966, 2020. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.106966.

KUEHN, A. L. T. O. *Técnicas de perfuração com gerenciamento de pressão aplicáveis aos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MACHADO, J. C. V. *Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência/Petrobras, 2002.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

PEREIRA, L. B. et al. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: a critical review. *Fuel*, v. 310, p. 122301, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122301.

PETROBRAS. *Viscosificante para fluidos usados na exploração e produção de poços de petróleo e gás*. Código EP-1EP-00011-A. Rio de Janeiro, 2011.

QUITIAN-ARDILA, L. H. et al. Stress overshoot analysis in flow start-up tests: aging time fitting of the different gel-based drilling fluids. *Gels*, v. 11, n. 2, p. 127, 2025. DOI: 10.3390/gels11020127.

RAFIEEFAR, A. et al. Rheological behavior and filtration of water-based drilling fluids containing graphene oxide: experimental measurement, mechanistic understanding, and modeling. *ACS Omega*, v. 6, n. 44, p. 29905–29920, 2021. DOI: 10.1021/acsomega.1c04398.

SAASEN, A.; YTREHUS, J. D. Viscosity models for drilling fluids: Herschel–Bulkley parameters and their use. *Energies*, v. 13, n. 20, 5271, 2020. DOI: 10.3390/en13205271.

SAIKIA, T.; MAHTO, V. Experimental investigations and optimizations of rheological behavior of drilling fluids using RSM and CCD for gas hydrate-bearing formation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 43, p. 6541-6554, 2018. DOI: 10.1007/s13369-018-3292-1.

SHEN, H. et al. Effect of low gravity solids on weak gel structure and the performance of oil-based drilling fluids. *Gels*, v. 9, n. 9, p. 729, 2023. DOI: 10.3390/gels9090729.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. DOI: 10.1023/A:1008202821328.

TANG, Z. et al. Novel acrylamide/2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid/styrene/maleic anhydride polymer-based CaCO₃ nanoparticles to improve the filtration of water-based drilling fluids at high temperature. *Gels*, v. 8, n. 5, p. 322, 2022. DOI: 10.3390/gels8050322.

TESSARI, R. K. *Projeto ótimo de poços de petróleo baseado em confiabilidade*. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: 10.11606/T.18.2019.tde-08022022-110952.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

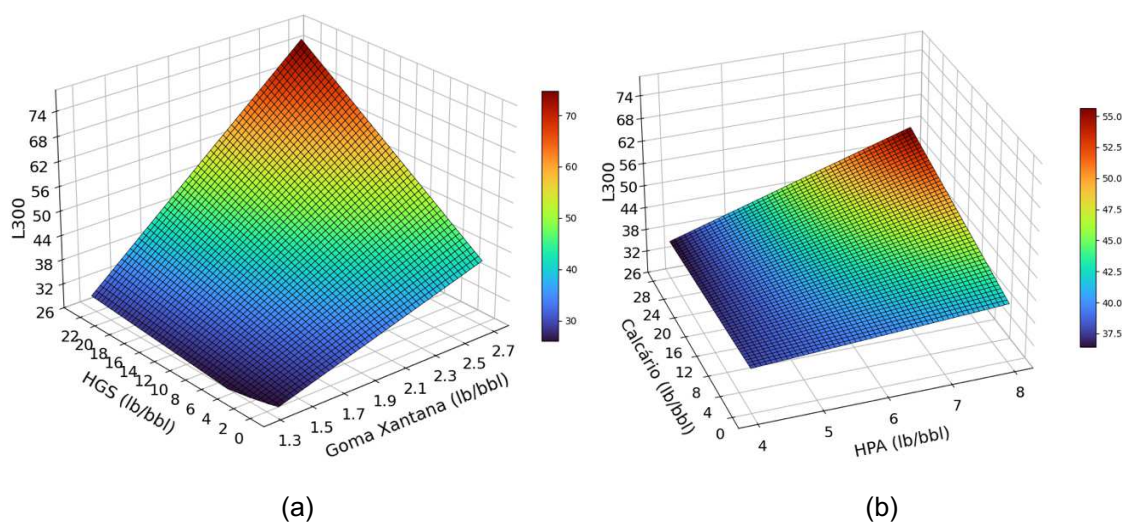
THYAGARAJU, B. A. et al. Case study using hollow glass microspheres to reduce the density of drilling fluids in the Mumbai High, India and subsequent field trial at GTI Catoosa Test Facility. In: MIDDLE EAST DRILLING TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 2009, Manama. Anais [...]. Manama: SPE, 2009. Paper SPE-125702-MS. DOI: 10.2118/125702-MS.

VILLADA, Y. et al. Use of synthetic calcium carbonate particles as an additive in water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 652, p. 129801, 2022. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129801.

YOU, F. et al. Rheological aspects of xanthan gum: governing factors and applications in water-based drilling fluids and enhanced oil recovery. *Carbohydrate Polymers*, v. 359, p. 123579, 2025. DOI: 10.1016/j.carbpol.2025.123579.

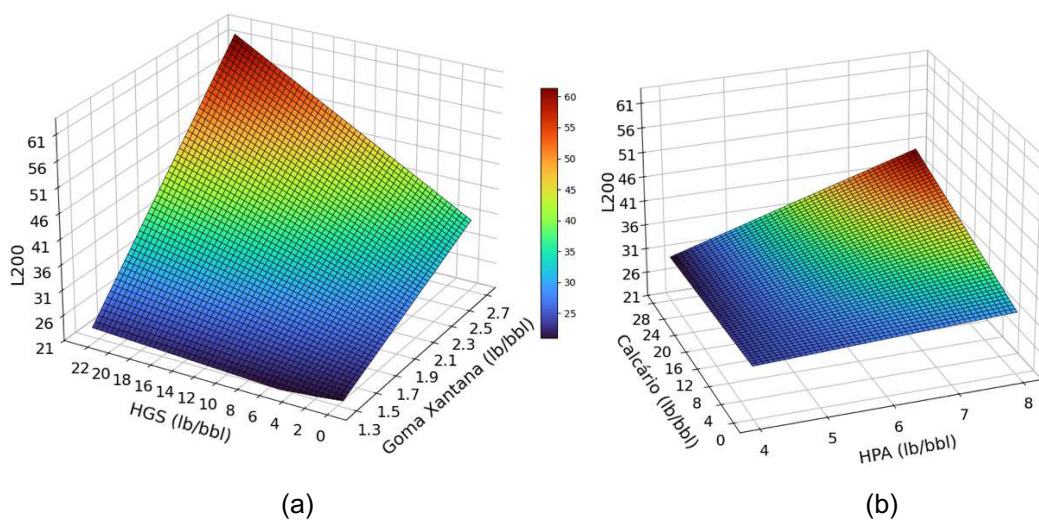
APÊNDICE

Figura 43 - Superfícies de resposta da leitura L300 em função dos fatores avaliados.



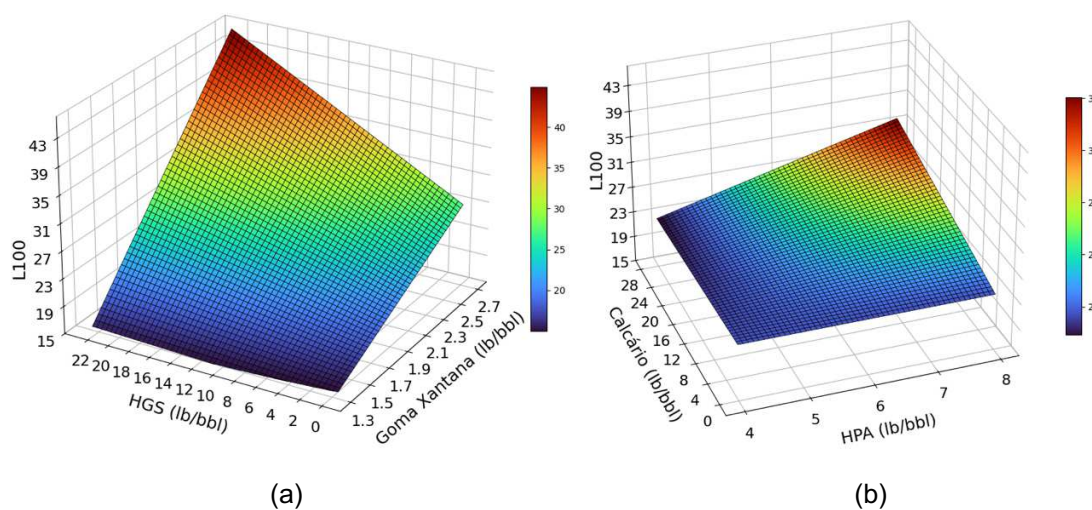
Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Figura 44 - Superfícies de resposta da leitura L200 em função dos fatores avaliados.



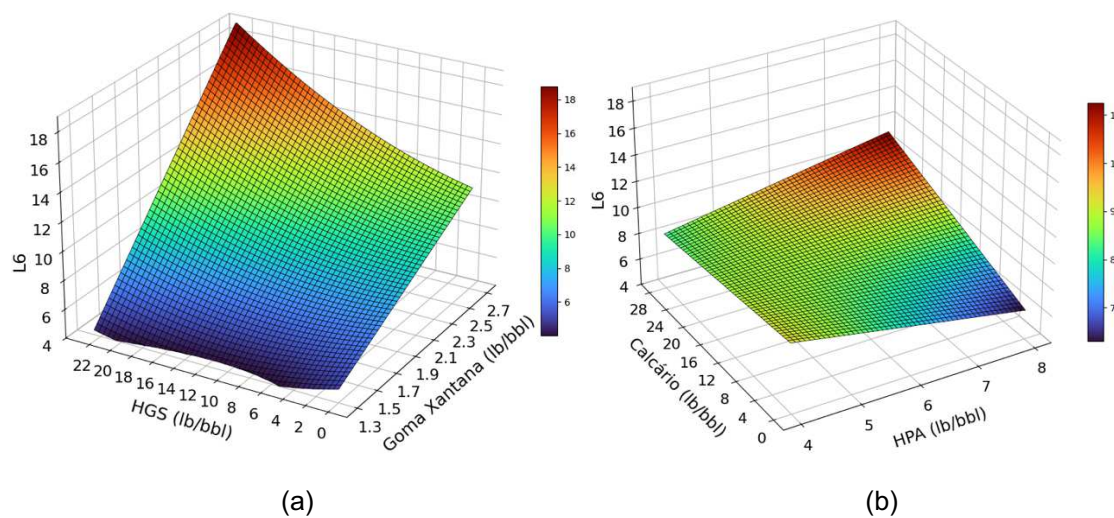
Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Figura 45 - Superfícies de resposta da leitura L100 em função dos fatores avaliados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Figura 46 - Superfícies de resposta da leitura L6 em função dos fatores avaliados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026