

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DISSERTAÇÃO**

**EFEITO DA TEMPERATURA E DA TAXA DE CISALHAMENTO NA  
REOLOGIA DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO EM PROBLEMAS DE  
SEDIMENTAÇÃO DE ADENSANTES**

**VINÍCIUS DA COSTA SILVA**

**2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**EFEITO DA TEMPERATURA E DA TAXA DE CISALHAMENTO NA  
REOLOGIA DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO EM PROBLEMAS DE  
SEDIMENTAÇÃO DE ADENSANTES**

**VINÍCIUS DA COSTA SILVA**

*Sob a orientação de*  
**Luís Américo Calçada**

*E Coorientação de*  
**Cláudia Miriam Scheid**

Dissertação submetida como requisito  
parcial para obtenção do grau de **Mestre**  
em **Engenharia Química**, área de  
concentração em Tecnologia Química.

**Seropédica, RJ**

**Agosto de 2023**

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Biblioteca  
Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586e Silva, Vinícius da Costa, 30/08/1996-  
Efeito da Temperatura e da Taxa de Cisalhamento na  
Reologia de Fluidos de Perfuração em Problemas de  
Sedimentação de Adensantes / Vinícius da Costa Silva. -  
Nova Iguaçu, 2023.  
375 f.: il.

Orientador: Luís Américo Calçada.  
Coorientadora: Cláudia Miriam Scheid.  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química, 2023.

1. Reologia. 2. Sedimentação não isotérmica em  
região anular confinada. 3. Modelagem matemática. 4.  
Simulação Numérica. 5. Estimação de Parâmetros. I.  
Calçada, Luís Américo, 1966-, orient. II. Scheid,  
Cláudia Miriam, 1968-, coorient. III Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**VINÍCIUS DA COSTA SILVA**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia** Química, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Tecnologia Química.

Dissertação aprovada em: 10/08/2023

---

Luís Américo Caçada, D.Sc., DEQ/UFRuralRJ  
(orientador)

---

Luiz Augusto da Cruz Meleiro, D.Sc., DEQ/UFRuralRJ

---

Fábio Bentes Freire, D. Sc., DEQ/UFSCar



Emitido em 2023

TERMO Nº 1175/2023 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

*(Assinado digitalmente em 25/10/2023 08:59 )*

LUIS AMERICO CALCADA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEQ (12.28.01.00.00.00.45)  
Matricula: ###816#9

*(Assinado digitalmente em 25/10/2023 11:31 )*

LUIZ AUGUSTO DA CRUZ MELEIRO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEQ (12.28.01.00.00.00.45)  
Matricula: ###126#9

*(Assinado digitalmente em 25/10/2023 08:15 )*

FÁBIO BENTES FREIRE  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.878-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/documentos/> informando seu número: **1175**, ano: **2023**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **25/10/2023** e o código de verificação: **b5a012efef**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, à Deus pela minha vida, pelas graças alcançadas, pelo dom do conhecimento e pelas pessoas que estiveram comigo nessa jornada.

À minha mãe Tânia Cristina da Costa, ao meu pai José Roberto da Silva Machado, à minha avó Adarlice Tavares da Costa e à memória de meu avô Daniel Vieira da Costa. Eles foram fundamentais para que eu me tornasse a pessoa e o profissional que sou. Sempre foram presentes, me deram apoio e conselhos em todos os momentos da minha vida. A minha família é a minha base.

À minha namorada, Ingrid Lins Gomes, um ponto de luz que entrou em minha vida nesses últimos meses, trazendo amor, alegria, carinho e paz.

À Isabela Cristina Porto Assumpção, minha amiga que foi fundamental na reta final da graduação e nas disciplinas do mestrado. Ao Rodrigo Fernando de Oliveira Borges, meu amigo que sempre teve enorme preocupação comigo, tanto no âmbito profissional, como pessoal. Aos meus amigos do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani: Allan Barbosa Geoffroy Motta, Carolina Dias Grossi, Eduardo da Cunha Hora Paraíso, Elias Pacheco Valim, Juliana Mariano de Souza, Moacyr Nogueira Borges Filho e Robson Raposa Rocha, que estiveram comigo durante os últimos três anos no LEF. O conhecimento técnico e o bom humor dessa equipe são extraordinários e tornam o ambiente muito melhor e mais produtivo.

Ao meu amigo e orientador professor Luís Américo Calçada, pela paciência, compreensão, conselhos pessoais e profissionais, puxões de orelha quando necessário, pelos conhecimentos compartilhados e por acreditar na minha capacidade em desenvolver o tema. Também agradeço à professora Cláudia Miriam Scheid e Paulo de Oliveira Jansen pelas correções, ponderações e sugestões feitas durante minha caminhada, as quais me lapidaram até aqui.

Ao Departamento de Tecnologia de Alimentos (UFRuralRJ/IT/DTA), no qual ocupo o cargo de assistente de laboratório, pelo apoio e incentivo concedido para a realização da minha pós-graduação e pela oportunidade única de amadurecimento pessoal e profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## RESUMO

SILVA, Vinícius da Costa. **Efeito da Temperatura e da Taxa de Cisalhamento na Reologia de Fluidos de Perfuração em Problemas de Sedimentação de Adensantes**. 2023. 371 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Este trabalho teve como foco a sedimentação de adensante em fluidos de perfuração confinados em poços de óleo e gás. O objetivo foi comparar o comportamento reológico desses fluidos, com e sem adensantes, em diferentes temperaturas (5°C, 25°C, 45°C, 65°C e 85°C) e faixas de taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $0,01 \text{ s}^{-1}$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$  e de  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  a  $100 \text{ s}^{-1}$ ). Foram avaliados modelos para o ajuste da reologia em função da temperatura e foram feitos estudos de sensibilidade de um simulador da sedimentação desenvolvido no LEF e utilizado pela Petrobras. A metodologia teve três etapas: obtenção de dados experimentais, ajuste de parâmetros de modelos reológicos e avaliação da sensibilidade do simulador. Foram realizados testes estatísticos para avaliar a qualidade da predição. Os resultados mostraram que houve diferenças estatisticamente significativas entre as curvas de escoamento e os parâmetros estimados para fluidos com e sem adensantes para baixas taxas de cisalhamento (inferiores a  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ). É importante ressaltar que é nesta faixa que a sedimentação de material adensante ocorre em fluidos de perfuração. No entanto, a depender da faixa da taxa de cisalhamento avaliada, essa diferença pode ou não ser significativa nos resultados do simulador. Os resultados de reologia não apresentam diferenças significativas comparando fluidos com e sem adensante na faixa  $0,01 \text{ s}^{-1}$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Os modelos abordados apresentaram dificuldade em regiões inferiores a  $1 \text{ s}^{-1}$  e não passaram nos testes estatísticos. A atualização do simulador foi implementada com sucesso e apresentou boa sensibilidade em função dos parâmetros reológicos. Os resultados simulados demonstraram que a faixa de taxa de cisalhamento usada para estimação de parâmetros influencia diretamente na predição das alturas da região de clarificado e na região de formação de sedimentos.

**Palavras-chave:** Sedimentação, Reologia, Estimação de Parâmetros.

## ABSTRACT

SILVA, Vinícius da Costa. **Effect of Temperature and Shear Rate on the Rheology of Drilling Fluids in Problems of Sedimentation of Weighting Materials**. 2023. 371 p. Thesis (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Department of Chemical Engineering, Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

This study focused on the sedimentation of weighting materials in confined drilling fluids in oil and gas wells. The objective was to compare the rheological behavior of these fluids, with and without weighting materials, at different temperatures (5°C, 25°C, 45°C, 65°C and 85°C) and shear rate ranges ( $1 \text{ s}^{-1}$  to  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $0,01 \text{ s}^{-1}$  to  $1000 \text{ s}^{-1}$  and from  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  to  $100 \text{ s}^{-1}$ ). Models were evaluated for the adjustment of rheology as a function of temperature and sensitivity studies of a sag simulator, developed at LEF and used by Petrobras, were made. The methodology had three stages: obtaining experimental data, adjusting parameters in rheological models and evaluating the sensitivity of the simulator. Statistical tests were performed to assess the quality of the prediction. The results showed that there was a statistically significant difference between the flow curves and the estimated parameters for fluids with and without weighting materials for low shear rates (less than  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ). It is important to emphasize that it is in this range that the sedimentation of weighting materials occurs in drilling fluids. However, depending on the range of the shear evaluation rate, this difference may not be significant in the simulator results. The rheology results showed no significant difference comparing fluids with and without weighting materials in the range  $0,01 \text{ s}^{-1}$  to  $1000 \text{ s}^{-1}$ . The models experienced difficulty in regions smaller than  $1 \text{ s}^{-1}$  and did not pass the statistical tests. The simulator update was successfully implemented and showed good sensitivity in function of rheological parameters. The simulated results demonstrated that the shear rate range used for parameter estimation directly influences the predicted position of clarified liquid zone and sediment zone.

**Keywords:** Sedimentation, Rheology, Parameter Estimation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plano Estratégico da Petrobras para 2023 a 2027.....	26
Figura 2. Fluido de perfuração confinado na região anular e sapata aberta. ....	27
Figura 3. Ação do fluido de perfuração durante perfuração. ....	31
Figura 4. Ilustração do poço de petróleo com diferentes regiões anulares e sapata aberta. ....	33
Figura 5. Ilustração do poço em produção (1), do alívio da pressão (2) e da sedimentação impedindo o alívio (3). ....	33
Figura 6. (a) distribuição de velocidade e tensão em fluxo laminar; (b) em fluxo tampão; (c) Perfil de velocidade média e variação da velocidade pontual em fluxo turbulento. ....	39
Figura 7. Deformação de um elemento de fluido unidimensional.....	41
Figura 8. Comparação da viscosidade entre fluidos newtonianos por meio da inclinação da reta. ....	42
Figura 9. Relação qualitativa entre tensão e taxa de cisalhamento para fluido dependente do tempo. ....	45
Figura 10. Curva de fluxo (A) e de viscosidade (B) para um fluido de Bingham. ....	49
Figura 11. Curva de fluxo para um fluido do tipo Lei de Potência. ....	50
Figura 12. Esquema representativo da formação de sedimentos em batelada. ....	61
Figura 13. Curva de sedimentação. Altura da interface em função de tempo, apresentando linhas de propagação da concentração de sólidos quando concentração inicial é uniforme. ....	64
Figura 14. Comparativo da proposta de Coe e Clevenger (1916) e Kynch (1952). ....	64
Figura 15. Interfaces da sedimentação proposto por Tiller (1981). ....	69
Figura 16. A esquerda, modelo segundo KYNCH (1952); a direita, após modificação proposta por CONCHA & BUSTOS (1987) para condição de contorno. ....	70
Figura 17. Representação esquemática das zonas de sedimentação. ....	73
Figura 18. Fotos da sedimentação de (a) fluido newtoniano; (b e c) fluido não newtoniano. ....	78
Figura 19: Sedimentação de esferas de nylon em fluidos newtonianos (a) e Não newtonianos (b). ....	81
Figura 20. Mapa de temperatura para a sedimentação de partículas quentes em fluido newtoniano. A evolução temporal do processo de sedimentação ocorre da esquerda para direita. ....	92
Figura 21. Esquema da metodologia aplicada. ....	100
Figura 22. Agitador mecânico Silverson L5M-A. ....	103
Figura 23. Balança de Lama Fann 140. ....	103
Figura 24. Fluidos de perfuração preparados.....	103

Figura 25: Reômetro Anton Paar MCR302 instalado no LEF/UFRuralRJ. ....	105
Figura 26. Geometria de cilindros concêntricos. ....	105
Figura 27. Geometria de placas paralelas ranhuradas.....	106
Figura 28. Viscosímetro FANN 35 A de 12 marchas.....	117
Figura 29. Tensão de cisalhamento em função do tempo para taxa de cisalhamento constante de $0,0001\text{s}^{-1}$ para fluido base óleo adensado. ....	121
Figura 30. Tensão de cisalhamento em função do tempo para taxa de cisalhamento constante de $0,01\text{s}^{-1}$ para fluido base óleo adensado. ....	121
Figura 31. Curvas de escoamento para fluido base água adensado ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	123
Figura 32. Curvas de escoamento para fluido base água sem adensante ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	124
Figura 33. Curvas de escoamento para fluido base óleo adensado ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	124
Figura 34. Curvas de escoamento para fluido base óleo sem adensante ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	125
Figura 35. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água adensados ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.....	125
Figura 36. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água sem adensante ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.....	126
Figura 37. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo adensado ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log. ....	126
Figura 38. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo sem adensante ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.....	127
Figura 39. Fluidos base água adensado e sem adensante a $5^{\circ}\text{C}$ e a $45^{\circ}\text{C}$ ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	127
Figura 40. Fluidos base óleo adensado e sem adensante a $5^{\circ}\text{C}$ e a $65^{\circ}\text{C}$ ( $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ). ....	128
Figura 41. Exemplo ilustrativo de platôs de viscosidade. ....	129
Figura 42. Área de histerese para o fluido base óleo adensado a $45^{\circ}\text{C}$ . ....	130
Figura 43. Aspecto do fluido base água adensado durante e após análise a $55^{\circ}\text{C}$ na geometria de cilindros concêntricos. ....	132
Figura 44. Aspecto do fluido base óleo adensado imediatamente após análise a $85^{\circ}\text{C}$ na geometria de cilindros concêntricos. ....	132
Figura 45. Curvas de escoamento para fluidos base água adensado ( $10^{-4}\text{ s}^{-1}$ até $100\text{ s}^{-1}$ ). ....	134
Figura 46. Curvas de escoamento para fluidos base água sem adensante ( $10^{-4}\text{ s}^{-1}$ até $100\text{ s}^{-1}$ ). ....	134

Figura 47. Curvas de escoamento para fluidos base óleo adensados ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). .....	135
Figura 48. Curvas de escoamento para fluidos base óleo sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). .....	135
Figura 49. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água adensados ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log. ....	136
Figura 50. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log. ....	136
Figura 51. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo adensado ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log. ....	137
Figura 52. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log. ....	137
Figura 53. Fluidos base água com e sem adensante a $5^{\circ}\text{C}$ e a $45^{\circ}\text{C}$ ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). .....	138
Figura 54. Fluidos base óleo com e sem adensante a $5^{\circ}\text{C}$ e a $85^{\circ}\text{C}$ ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ ). .....	138
Figura 55. Problema de evaporação de solvente em fluidos base água para experimentos a $55^{\circ}\text{C}$ . ....	139
Figura 56. Efeito da temperatura nos parâmetros do Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	150
Figura 57. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	151
Figura 58. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . ....	152
Figura 59. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	153
Figura 60. Efeito da temperatura nos parâmetros estimados no modelo Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	157
Figura 61. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	159
Figura 62. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ ... ..	160
Figura 63. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	161
Figura 64. Efeito da temperatura nos parâmetros estimados no modelo Lei de Potência para o intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	165
Figura 65. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	166
Figura 66. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	167

Figura 67. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	168
Figura 68. Efeito da temperatura nos parâmetros do modelo Herschel-Bulkley.	173
Figura 69. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	175
Figura 70. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	176
Figura 71. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	177
Figura 72. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	181
Figura 73. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ .	182
Figura 74. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	183
Figura 75. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	185
Figura 76. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ .	186
Figura 77. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	187
Figura 78. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	190
Figura 79. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	191
Figura 80. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	192
Figura 81. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	194
Figura 82. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	195
Figura 83. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	196
Figura 84. Resultado para simulação da sedimentação de um fluido aquoso em 5 anos sob condições isotérmicas antes e depois da atualização (dados da tabela 8).	200
Figura 85. Resultado para simulação de fluido base água em 5 anos (caso base descrito na tabela 8).	200
Figura 86. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do índice de consistência (" $M$ ").	202

Figura 87. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do índice de comportamento (" $n$ "). .....	203
Figura 88. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função da energia de escoamento (" $\Delta H$ "). .....	204
Figura 89. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do .....	205
Figura 90. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento $1 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	209
Figura 91. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	209
Figura 92. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento $0,0001 \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ .....	210
Figura 93. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento $1 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	210
Figura 94. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	211
Figura 95. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento $0,0001 \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$ .....	211
Figura 96. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido base água adensado. ....	212
Figura 97. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido aquoso sem adensante. ....	212
Figura 98. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido olefínico adensado.....	213
Figura 99. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido olefínico sem adensante.....	213
Figura 100. Etapas da simulação numérica. ....	275
Figura 101. Representação de uma malha discretizada pelo método de volumes finitos.....	293
Figura 102. Esquema de discretização e adequação da malha pelo método de volumes finitos.....	295
Figura 103. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	303
Figura 104. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência. (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ ....	304
Figura 105. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	305
Figura 106. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	306

Figura 107. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência. (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . ....	307
Figura 108. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	308
Figura 109. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	309
Figura 110. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ .....	310
Figura 111. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	311
Figura 112. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	312
Figura 113. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ ...	313
Figura 114. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	314
Figura 115. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	315
Figura 116. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ ...	316
Figura 117. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	317
Figura 118. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	318
Figura 119. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ ...	319
Figura 120. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). ....	320
Figura 121. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	321
Figura 122. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	322
Figura 123. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	323
Figura 124. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	324
Figura 125. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	325
Figura 126. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	326

Figura 127. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	327
Figura 128. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	328
Figura 129. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	329
Figura 130. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	330
Figura 131. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	331
Figura 132. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	332
Figura 133. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	333
Figura 134. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	334
Figura 135. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	335
Figura 136. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	336
Figura 137. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	337
Figura 138. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	338
Figura 139. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	339
Figura 140. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . .....	340
Figura 141. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	341
Figura 142. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	342
Figura 143. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência .....	343
Figura 144. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	344
Figura 145. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	345

Figura 146. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . .....	346
Figura 147. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	347
Figura 148. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	348
Figura 149. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . .....	349
Figura 150. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	350
Figura 151. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	351
Figura 152. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . .....	352
Figura 153. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	353
Figura 154. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	354
Figura 155. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ e $10 \text{ s}^{-1}$ . .....	355
Figura 156. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ). .....	356
Figura 157. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	357
Figura 158. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	358
Figura 159. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	359
Figura 160. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	360
Figura 161. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	361
Figura 162. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	362
Figura 163. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	363



Figura 164. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	364
Figura 165. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	365
Figura 166. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	366
Figura 167. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	367
Figura 168. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	368
Figura 169. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	369
Figura 170. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	370
Figura 171. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	371
Figura 172. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre $100 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	372
Figura 173. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	373
Figura 174. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . ....	374

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Aditivos e suas características. ....	35
Tabela 2. Exemplos de testes reológicos. ....	46
Tabela 3. Modelos reológicos e seus parâmetros. ....	52
Tabela 4. Formulação do fluido base água. ....	102
Tabela 5. Formulação do fluido base óleo. ....	102
Tabela 6. Faixas experimentais de temperatura e de taxa de cisalhamento estudadas. ....	106
Tabela 7. Modelos reológicos abordados e propostas para correção em função da temperatura. ....	109
Tabela 8. Caso base para fluidos aquosos - dados de entrada do simulador. ....	114
Tabela 9. Caso base para fluidos olefínicos - dados de entrada do simulador. ....	115
Tabela 10. Valores dos dados de entrada do simulador analisadas. ....	116
Tabela 11. Dados brutos do experimento usando FANN 35 A. ....	118
Tabela 12. Pontos experimentais excluídos da estimação de parâmetros. ....	120
Tabela 13. Área de histerese dos fluidos aquosos. ....	131
Tabela 14. Área de histerese dos fluidos olefínicos. ....	131
Tabela 15. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	141
Tabela 16. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	141
Tabela 17. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	142
Tabela 18. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	142
Tabela 19. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	143
Tabela 20. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	143
Tabela 21. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	144
Tabela 22. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley na faixa de $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	145
Tabela 23. Correlação paramétrica de Herschel-Bulkley entre $1\text{s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ ....	145
Tabela 24. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência dentro do intervalo $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	148
Tabela 25. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência dentro do intervalo $0,01\text{ s}^{-1}$ até $1000\text{ s}^{-1}$ . ....	148

Tabela 26. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	149
Tabela 27. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	149
Tabela 28. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	154
Tabela 29. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	154
Tabela 30. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	155
Tabela 31. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley dentro do intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .	156
Tabela 32. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley.	156
Tabela 33. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	163
Tabela 34. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	163
Tabela 35. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	164
Tabela 36. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	164
Tabela 37. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley Potência no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	169
Tabela 38. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	170
Tabela 39. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	171
Tabela 40. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	171
Tabela 41. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .	172
Tabela 42. Parâmetros estimados Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	180
Tabela 43. Correlação paramétrica do Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	180
Tabela 44. Parâmetros estimados Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	184
Tabela 45. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley com Arrhenius.	184
Tabela 46. Parâmetros estimados para Lei de Potência com WLF ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ ).	188

Tabela 47. Parâmetros estimados para modelo Lei de Potência com Arrhenius no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	189
Tabela 48. Correlação paramétrica para modelo Lei de Potência com Arrhenius no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	189
Tabela 49. Parâmetros estimados para modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	193
Tabela 50. Correlação paramétrica para modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	193
Tabela 51. Parâmetros estimados para modelo Lei de Potência com WLF no intervalo de $100 \text{ s}^{-1}$ até $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . .....	197
Tabela 52. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de consistência.....	202
Tabela 53. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento. ....	203
Tabela 54. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento. ....	205
Tabela 55. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento. ....	206
Tabela 56. Parâmetros estimados para diferentes fluidos com e sem adensantes e em diferentes faixas de taxa de cisalhamento.....	207
Tabela 57. Regiões de clarificado e transição para parâmetros estimados pelo modelo Lei de Potência com Arrhenius.....	208
Tabela 58. Resumo dos parâmetros estimados para Lei de Potência com Arrhenius reparametrizado e da simulação. ....	218

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro da equação da pressão dos sólidos
$a_T$	Fator de correção da temperatura
C, C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	Fatores Geométricos [adimensional]
c <sub>1</sub> , c <sub>2</sub>	Parâmetro do modelo WLF [c <sub>1</sub> $\equiv$ adimensional; c <sub>2</sub> $\equiv$ K]
C <sub>D</sub>	Coeficiente de arraste [adimensional]
De	Número de Deborah [adimensional]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula [ $\mu\text{m}$ ]
F <sub>obj</sub>	Função objetivo
G	Constante elástica da mola
g	Aceleração da gravidade local [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
L	Interface ascendente [m]
L <sub>0</sub>	Altura inicial da suspensão [m]
K	Permeabilidade [ $\text{m}^2$ ]
M <sub>z</sub>	Força resistiva [ $\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-2}$ ]
M	Índice de consistência [ $\text{Pa.s}^n$ ]
N	Índice de comportamento [adimensional]
NE	Número de experimentos
NP	Número de parâmetros
NY	Número de variáveis independentes
P <sub>ac</sub>	Probabilidade acumulada
P <sub>s</sub>	Pressão dos sólidos [ $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-2}$ ]
q	Velocidade superficial da mistura [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
R	Constante universal dos gases ideais [ $\text{J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação
Re (Re <sub>gen</sub> )	Número de Reynolds (Reynolds generalizado) [adimensional]
S	Grupo paramétrico [adimensional]
T	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] ou [K]
T <sub>ref</sub>	Temperatura de referência [ $^{\circ}\text{C}$ ] ou [K]
t	Tempo [s]
t <sub>f</sub>	Tempo final [s]
u <sub>s</sub>	Velocidade de sedimentação adimensional [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
v <sub>s</sub>	Velocidade de sedimentação das partículas [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
v <sub>stk</sub>	Velocidade terminal de Stokes [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$z$	Posição [m]
$z^*$	Variável posição adimensional

Caracteres gregos:

$\beta$	Parâmetro da equação da pressão nos sólidos
$\rho(s)$	Massa específica do sólido [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$\rho(f)$	Massa específica do fluido [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$\rho_{\text{susp}}$	Massa específica da suspensão [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$\epsilon_{s0}$	Concentração volumétrica inicial de sólidos [adimensional]
$\epsilon_s$	Concentração volumétrica de sólidos [adimensional]
$\epsilon_u$	Concentração volumétrica final de sólidos [adimensional]
$\epsilon_{s\text{max}}$	Concentração volumétrica de sólidos máxima [adimensional]
$\xi$	Variável tempo adimensional
$\theta_s$	Concentração adimensional da fase sólida
$\Theta(\emptyset), \Omega(\emptyset)$	Funções dependentes da esfericidade [adimensional]
$\gamma$	Taxa de cisalhamento [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\Delta H$	Energia de escoamento [ $\text{J.mol}^{-1}$ ]
$\mu$	Viscosidade absoluta [ $\text{Pa.s}$ ]
$\mu_p$	Viscosidade plástica [ $\text{Pa.s}$ ]
$\mu_e$	Viscosidade efetiva [ $\text{Pa.s}$ ]
$\eta$	Viscosidade aparente [ $\text{Pa.s}$ ]
$\eta_{\text{ref}}$	Viscosidade aparente de referência [ $\text{Pa.s}$ ]
$\eta_0$	Viscosidade aparente a baixas taxas [ $\text{Pa.s}$ ]
$\eta^\infty$	Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento [ $\text{Pa.s}$ ]
$\tau$	Tensão de cisalhamento [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$\tau_0$	Tensão limite de escoamento [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$\sigma_1, \sigma_2$	Parâmetros do número de Deborah [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$\emptyset$	Esfericidade [adimensional]
$T_s$	Tensor tensão [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\dot{\gamma}_c$	Taxa de cisalhamento característica [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\sigma_y$	variância experimental
$\sigma_\epsilon$	variância paramétrica
$\nu$	graus de liberdade do conjunto amostral

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>29</b>
2.1.	CONTEXTO GEOPOLÍTICO INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO .....	29
2.2.	PERFURAÇÃO E O PROBLEMA DO APB.....	31
2.3.	FLUIDOS DE PERFURAÇÃO .....	34
2.4.	REOLOGIA .....	37
2.4.1.	Tensão, Viscosidade e Escoamento.....	40
2.4.2.	Fluidos Newtonianos .....	42
2.4.3.	Fluidos Não Newtonianos.....	43
2.4.4.	Tensão Limite de Escoamento .....	43
2.4.5.	Tixotropia e Reopetia.....	44
2.4.6.	Viscoelasticidade .....	45
2.4.7.	Testes Reológicos .....	46
2.4.8.	Modelos Reológicos Para Fluidos Independentes do Tempo.....	48
2.4.9.	Modelos para ajuste da reologia com efeito da temperatura .....	53
2.4.10.	Efeitos da Temperatura na Reologia em Diferentes Fluidos .....	56
2.5.	FUNDAMENTOS DA SEDIMENTAÇÃO .....	59
2.5.1.	Sedimentação em Fluidos Newtonianos.....	60
2.5.2.	Sedimentação Em Fluidos não-Newtonianos .....	76
2.5.3.	Sedimentação de Partículas em Condições Não Isotérmicas .....	90
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA.....	98
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>100</b>
3.1.	PREPARO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	101
3.2.	REOMETRIA.....	104
3.2.1.	Cilindros Concêntricos.....	106
3.2.2.	Placas Paralelas Ranhuradas .....	108
3.3.	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS .....	108

3.3.1.	Definição da métrica – função objetivo .....	110
3.3.2.	Minimização da função objetivo.....	111
3.3.3.	Interpretação estatística dos parâmetros obtidos .....	111
3.4.	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SIMULADOR .....	113
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>117</b>
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	117
4.2.	ENSAIOS REOLÓGICOS COM CILINDROS CONCÊNTRICOS .....	120
4.2.1.	Taxa de Cisalhamento Constante.....	120
4.2.2.	Curvas de Escoamento .....	123
4.3.	ENSAIOS REOLÓGICOS COM PLACAS PARALELAS RANHURADAS ..	133
4.3.1.	Curvas de Escoamento .....	133
4.4.	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS .....	140
4.4.1.	Estimações de Parâmetros para o intervalo entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	140
4.4.2.	Estimação de parâmetros para o intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$ .....	146
4.4.3.	Estimações de parâmetros para o intervalo entre $0,0001 \text{ s}^{-1}$ e $100 \text{ s}^{-1}$	162
4.4.4.	Estimação de parâmetros para modelos reológicos em função da temperatura.....	178
4.5.	TESTE DO EFEITO DA REOLOGIA EM CASOS NÃO ISOTÉRMICOS NA SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAL ADENSANTE .....	198
4.5.1.	Escolha do Modelo Reológico .....	198
4.5.3.	Teste de Sensibilidade aos Parâmetros $M$ , $n$ , $\Delta H$ e $dp$ .....	201
4.5.4.	Efeito da reologia em fluidos com e sem adensantes na simulação....	206
4.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	214
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>216</b>
5.1.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	218
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>221</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>234</b>
	A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS CURVAS DE ESCOAMENTO COM GEOMETRIA DE CILINDROS CONCÊNTRICOS: .....	234



B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS CURVAS DE ESCOAMENTO COM GEOMETRIA DE PLACAS PARALELAS RANHURADAS:.....	270
C – MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO .....	274
D – AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....	303

# 1 INTRODUÇÃO

**Resumo:** Este tópico apresenta uma contextualização do tema abordado, as motivações para sua realização e os objetivos propostos.

O petróleo na sua forma bruta não possui muitas aplicações no cotidiano, exceto pelo fornecimento de energia via combustão direta. Por outro lado, os seus produtos derivados possuem grande valor agregado e ampla aplicação na sociedade. Seu uso não se restringe apenas como fonte de combustíveis e energia, mas também em produtos como plásticos, óleos lubrificantes, solventes, borrachas, cimento, medicamentos, embalagens e fertilizantes (BRASIL *et al.*, 2012).

Com o advento da tecnologia dos motores à gasolina e diesel, da crescente demanda energética e de seus derivados, o petróleo assumiu papel fundamental no cotidiano, na estratégia e na economia das nações, sendo até hoje alvo de grandes discussões socioeconômicas e geopolíticas. A depender da demanda do mercado, a etapa de refino pode ser direcionada para um determinado produto. Contudo, a etapa de produção geralmente é a mais difícil de ser ajustada.

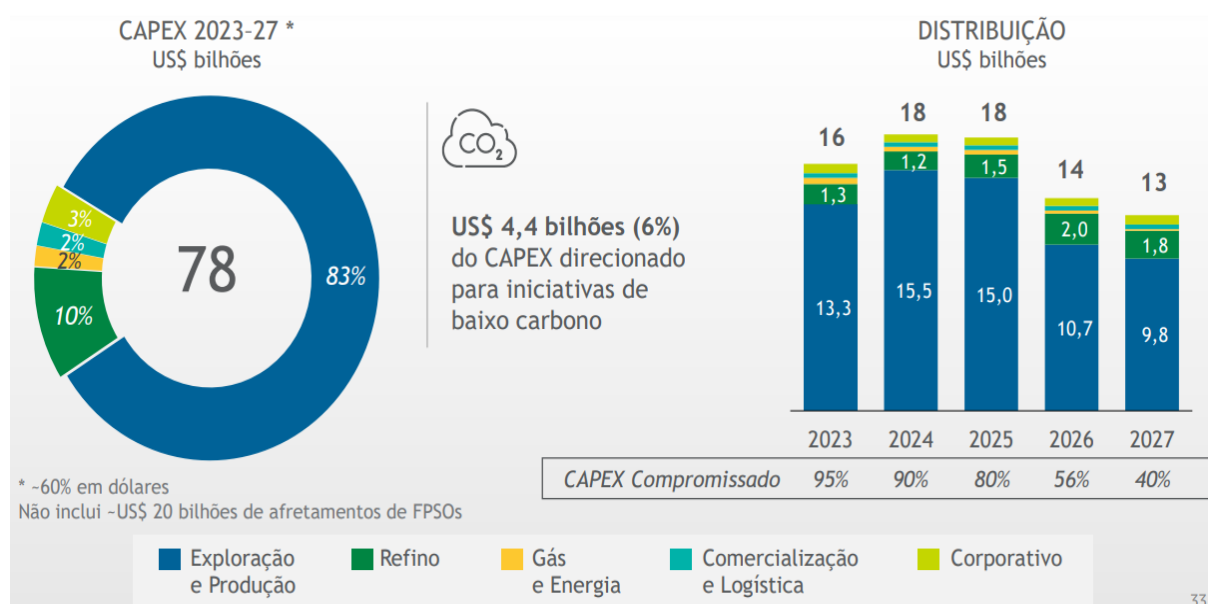
Desde a descoberta de um potencial reservatório de petróleo por meio de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares até o início da produção, há um longo estudo de viabilidade técnica, econômica e de segurança. Dentro das etapas de exploração e produção, a perfuração do poço é uma das que mais exige investimentos (THOMAS *et al.*, 2004).

Para dar dimensão das cifras envolvidas, o plano estratégico 2023-2027 da Petrobras, apresentado na Figura 1, prevê um CAPEX (*Capital Expenditure*, que são despesas ou investimentos em bens de capital) da ordem de US\$78 bilhões (aproximadamente R\$398 bilhões), sendo US\$64,7 bilhões (ou R\$329 bilhões) destinados à exploração e produção.

A perfuração de um poço é realizada por meio de uma sonda, composta por diversos equipamentos, como sistemas de sustentação e movimentação de cargas, rotação, circulação, segurança e monitoração, colunas de perfuração e brocas. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e uma coluna de revestimento, de diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O anular entre os

tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado, permitindo o avanço da perfuração com segurança (THOMAS *et al.*, 2004).

Figura 1. Plano Estratégico da Petrobras para 2023 a 2027.



Fonte: Petrobras, 2023.

Para que a perfuração possa ser realizada de forma eficiente e segura, faz-se necessário o uso de um fluido de perfuração, que é uma mistura complexa, possui uma série de propriedades específicas e é preparado de acordo com a formação rochosa a ser perfurada.

Após a operação de cimentação, parte do fluido de perfuração fica aprisionado entre a rocha e o revestimento. Geralmente, a produção só é iniciada após 2 a 3 anos dessa etapa. Por conta da ação do campo gravitacional, materiais particulados podem sedimentar, deslocando-se para o fundo do poço, formando um leito de sedimentos. O termo técnico para descrever esse fenômeno é “*barite sag*” (CALÇADA *et al.*, 2016; BERN *et al.*, 2000).

Quando a etapa de produção é iniciada, o fluido de perfuração confinado fica exposto à altas temperaturas e pressões, resultantes do fluxo de óleo e gás da rocha reservatório para o poço. O aumento da temperatura a volume constante causa o aumento da pressão na região anular. Esse fenômeno é chamado de APB (do inglês “*Annular Pressure Build-Up*”). Caso não seja controlado ou não seja feita qualquer intervenção, pode-se causar danos ao revestimento e comprometer a integridade e

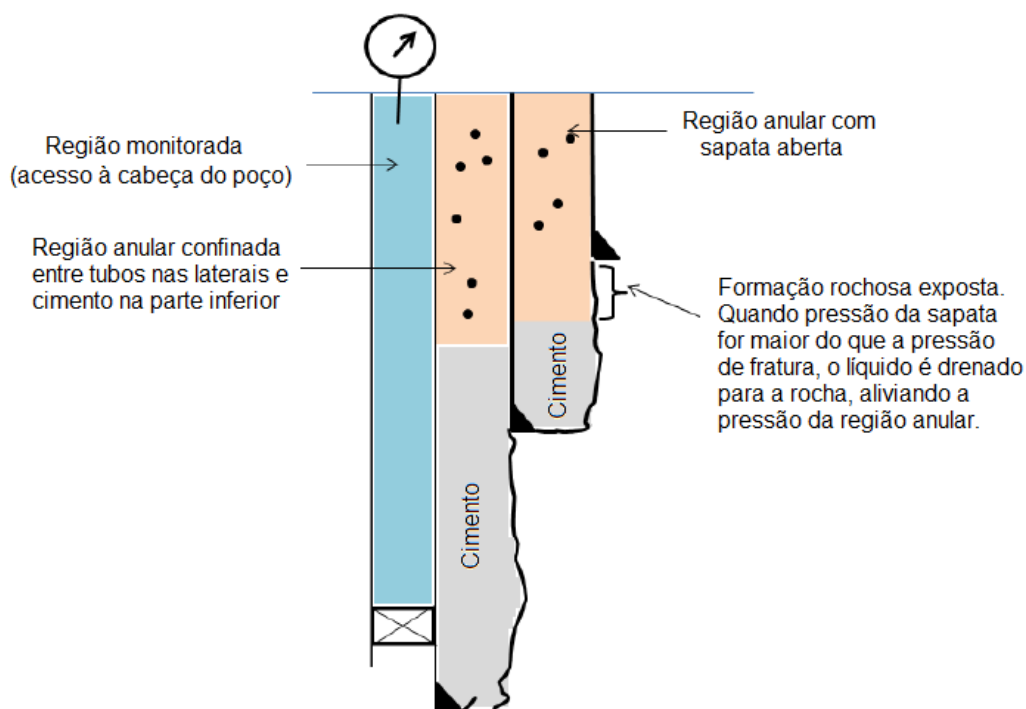
segurança da operação (MOE e ERPELING, 2000; MOYER *et al.*, 2000; VARGO *et al.*, 2003; CALÇADA *et al.*, 2016).

Uma das formas de mitigar esse problema é projetar o poço com sapata aberta. Nesse contexto, a região anular fica em contato direto a formação rochosa. Assim, quando a pressão da região anular superar a pressão de fratura da formação rochosa, o fluido será drenado para a rocha e a pressão será aliviada (CALÇADA, *et al.*, 2016; PELIANO, 2015).

Contudo, caso ocorra a sedimentação de material particulado, pode-se ocasionar a obstrução parcial ou total da região exposta à formação rochosa e, dependendo da permeabilidade do leito de sedimentos, pode-se não permitir a drenagem do fluido. Isso impediria o alívio da pressão da região anular (ROCHA, 2018; FAGUNDES, 2019; BORGES, 2019). Nesse caso, a estratégia de mitigação do APB usando sapata aberta poderia falhar. A Figura 2 ilustra a sapata aberta.

Posto que o poço de petróleo é um sistema não isotérmico e que a temperatura influencia na viscosidade, é de grande interesse compreender qual é a influência na reologia e na dinâmica da sedimentação na região anular confinada.

Figura 2. Fluido de perfuração confinado na região anular e sapata aberta.



Fonte: RPSEA, 2016 (adaptado).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar o efeito da reologia de fluidos de perfuração com e sem adensantes e em diferentes temperaturas e diferentes faixas de taxa de cisalhamento na sedimentação de adensantes. Foram avaliados modelos matemáticos para ajuste dos dados de reologia em função da temperatura para três faixas de taxa de cisalhamento. Os resultados foram implementados em no simulador da Petrobras desenvolvido pelo LEF/UFRuralRJ para avaliação da sensibilidade do modelo em função dos parâmetros alimentados.

A organização textual desta dissertação foi feita da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Revisão de Literatura: apresenta-se o arcabouço teórico, abordando os principais estudos e trabalhos sobre sedimentação em batelada e o efeito da temperatura na reologia. Trata-se dos conceitos teóricos e práticos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.
- Capítulo 3 – Metodologia: apresentam-se os materiais, equipamentos, metodologia experimental aplicada, modelos reológicos avaliados, como foi feita a estimação de parâmetros em diferentes temperaturas e a avaliação da sensibilidade do simulador SimSag após sua atualização.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussões: apresentam-se os resultados obtidos e discute-se os efeitos da temperatura na reologia de fluidos de perfuração, bem como seus efeitos na simulação da sedimentação de materiais adensantes.
- Capítulo 5 – Conclusão: apresentam-se o fechamento do trabalho, os avanços obtidos nesse tema e as sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 6 – Referências Bibliográficas: apresentam-se todos os trabalhos citados nesta dissertação.
- Apêndice A e B: apresentam-se os dados experimentais brutos.
- Apêndice C: apresentam-se as hipóteses assumidas, a construção do modelo da sedimentação, o método numérico para solução do sistema de equações diferenciais parciais e o modelo para ajuste da reologia em função da temperatura proposto para atualização do SimSag.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

**Resumo:** Este capítulo apresenta conceitos relevantes para compreensão das propriedades dos fluidos de perfuração, dos efeitos da temperatura na reologia e os modelos reológicos mais utilizados. Além disso, expõe fundamentos, evolução histórica e estado da arte referente à sedimentação de materiais particulados em diferentes fluidos.

### 2.1. CONTEXTO GEOPOLÍTICO INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

O petróleo é um recurso natural estratégico e valioso, com implicações significativas na política e na economia global. Seu acesso e controle são motivos de tensões, conflitos, embargos e guerras até hoje.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) e a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), os maiores produtores de petróleo em 2021 foram, nessa ordem, Estados Unidos, Arábia Saudita, Rússia, Canadá, China, Iraque, Emirados Árabes Unidos, Irã, Kuwait e Brasil. De acordo com os dados do Oil & Gas Journal, as maiores reservas provadas estão localizadas, respectivamente, na Venezuela, Arábia Saudita, Canadá, Irã e Iraque. A maioria desses países têm a capacidade de influenciar os preços globais do petróleo por meio de suas decisões de produção e exportação.

O Oriente Médio continua a ser uma região de grande importância geopolítica para o petróleo. No entanto, outros países, como os Estados Unidos e a Rússia, também emergiram como grandes produtores nas últimas décadas, mudando a dinâmica do mercado global de petróleo.

Um ponto de atenção é a crescente demanda global por fontes de energia mais limpas e renováveis, o que tem pressionado os países produtores de petróleo a diversificar suas economias e reduzir sua subordinação a esse produto. Ainda assim, por conta de toda a dependência histórica e social construída sobre seus derivados, ainda haverá demanda por petróleo pelas próximas décadas.

A 26ª Conferência Global do Clima – COP26 – realizada em novembro de 2021 em Glasgow, na Escócia, debateu os compromissos assumidos pelos países no

enfrentamento da crise climática e retomou pontos da reunião anterior realizada em Paris em 2015. O relatório final deixou clara a dependência das fontes de energias fósseis, em um texto que não prevê a eliminação dessa matriz energética, mas sim a eliminação progressiva do uso sem restrições e redução dos subsídios ineficientes. Em outras palavras, tal fonte de energia ainda cumprirá um papel fundamental na sociedade e poderá ser usada nas próximas décadas desde que haja medidas de compensação e alinhamento com políticas ESG (*“Environmental, Social and Governance”* ou ambiental, social e corporativa), como replantio de áreas desmatadas e compra de créditos de carbono.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o choque de demanda causado pela COVID-19 e a necessidade de matrizes energéticas com baixa emissão de carbono provocaram uma queda nas expectativas de consumo do petróleo nos próximos anos. Não se espera que retorne aos patamares pré-pandêmicos antes de 2023. Contudo, na ausência de intervenções políticas e mudanças comportamentais mais rápidas, estima-se que, em 2026, o consumo global de petróleo deve superar os níveis de 2019, sendo esse crescimento vindo de economias emergentes e em desenvolvimento, como o Brasil, Índia e China, sustentadas por populações ou rendas crescentes.

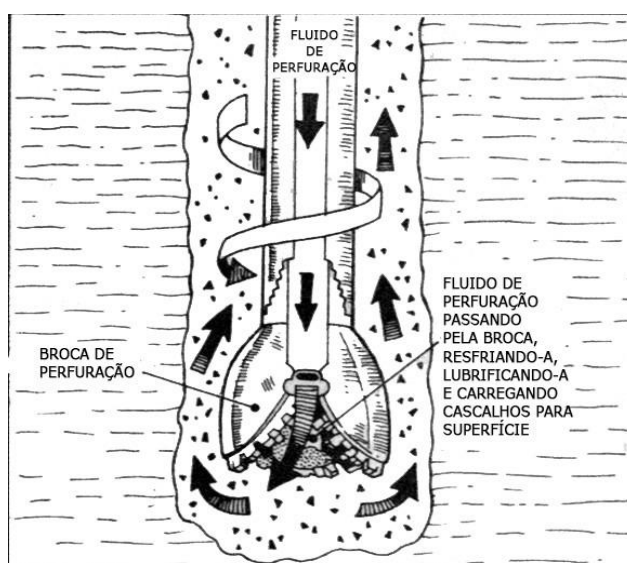
Já a OPEP prevê crescimento da demanda mundial de petróleo até 2035. Em seu relatório anual de 2022, está prevista uma redução da demanda por parte dos países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico). Por outro lado, a demanda dos países não membros da OCDE deve aumentar graças ao crescimento populacional e econômico, mencionando a Índia, China, o continente africano e outros países asiáticos. Ainda segundo esse relatório, após 2035, a demanda deve permanecer estabilizada por conta de políticas energéticas e avanços tecnológicos, os quais favorecem as diferentes fontes de energia.

Nesse contexto, o petróleo ainda cumprirá um papel relevante a fim de garantir a estabilidade geopolítica, econômica e da cadeia energética global. Portanto, é relevante que a exploração e produção sejam capazes de aumentar sua eficiência. Isso passa pelo desenvolvimento da ciência e da tecnologia.

## 2.2. PERFURAÇÃO E O PROBLEMA DO APB

A perfuração do poço de petróleo é realizada por uma sonda rotativa e uma broca localizada na extremidade da coluna de perfuração. Os fragmentos de rocha são removidos pelo fluido de perfuração, que é injetado por bombas para o interior da coluna e retorna para superfície pela região anular formada entre as paredes do poço e a coluna. A Figura 3 ilustra essa etapa.

Figura 3. Ação do fluido de perfuração durante perfuração.



Fonte: Chipalavela, 2013 (adaptado).

Ao atingir determinada profundidade, a coluna é retirada do poço para executar a etapa de revestimento. Nesse momento, o fluido de perfuração assume o papel de dar sustentação a estrutura até que uma coluna de revestimento seja instalada. O espaço anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar e dar sustentação à formação perfurada, permitindo a sequência da operação de forma segura (THOMAS *et al.*, 2004).

Após a operação de cimentação, uma nova broca, de diâmetro inferior ao do revestimento, é descida no poço para prosseguir a perfuração. Esse processo é repetido até atingir a rocha reservatório. Ao alcança-la, deve-se equipar o poço, etapa denominada de completação, para depois disso iniciar a etapa de produção. Geralmente, a produção só é iniciada de 2 a 3 anos após a etapa de completação (THOMAS *et al.*, 2004; CHIPALAVELA, 2013; CALÇADA *et al.*, 2016).



Após as etapas de perfuração e cimentação, avaliação da formação e completação, parte do fluido de perfuração permanece confinado na região anular, ficando exposto à altas temperaturas e à altas pressões.

Dentre os possíveis problemas operacionais encontrados desde a etapa de perfuração até a produção, destacam-se: dificuldades no controle do poço, falhas na obtenção de dados, fraturas na cimentação da parede do poço, aumento do torque da broca necessário para retomar o processo, aprisionamento da broca, entupimento das tubulações e APB (*“Annular Pressure Build-Up”* ou aumento da pressão na região anular), os quais podem comprometer a estabilidade e integridade do poço. (RIBEIRO *et al.*, 2016; CAENN *et al.*, 2017; ROCHA, 2018).

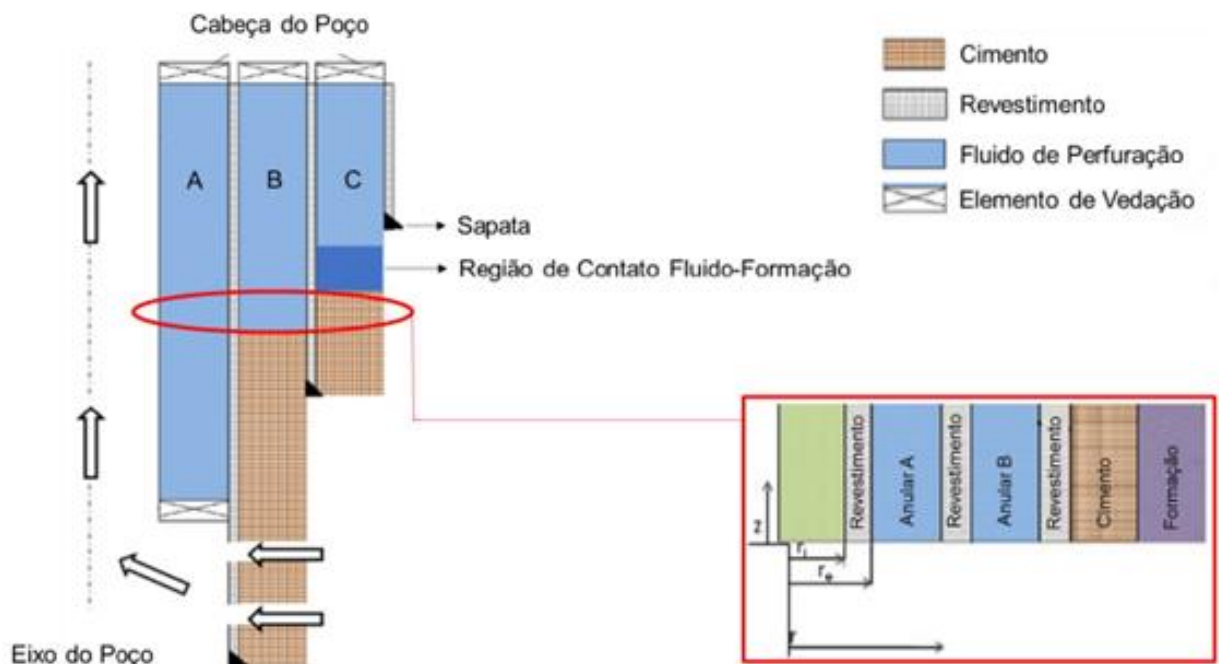
Durante a produção, calor é transferido radialmente em direção às paredes do poço como consequência do fluxo de óleo e gás da rocha reservatório para o poço. O fluido de perfuração confinado na região anular é, então, submetido a um gradiente de temperatura. Nesse caso, ou o fluido expande ou aumenta a pressão local. Por estar confinado, gera-se aumento da pressão na região anular.

Isso pode comprometer a estabilidade do poço e, em casos mais extremos, ocasionar acidentes. Esse fenômeno de aumento da pressão na região anular é chamado de APB - *“Annular Pressure Build-Up”*. Embora não possa ser prevenido, há algumas técnicas disponíveis para sua mitigação (MOE, ERPELDING, 2000; VARGO JR *et al.*, 2003; MOYER *et al.*, 2012).

Uma dessas formas é a construção do poço com sapata aberta. Para isso, o processo de cimentação de um nível inferior não deve atingir a sapata do revestimento superior, deixando uma região de contato entre o fluido e a formação rochosa. Assim, quando a pressão do sistema superar a pressão da formação rochosa, o fluido será drenado para o interior da rocha e aliviará a pressão da região anular (PELIANO, 2015; CALÇADA *et al.*, 2016). A Figura 4 ilustra o poço de petróleo com sapata aberta.

Contudo, por conta da ação do campo gravitacional, materiais particulados podem sedimentar, deslocando-se para o fundo do poço, formando um leito de sedimentos. Caso isso ocorra, pode-se obstruir parcial ou totalmente a região exposta à formação rochosa. A depender da permeabilidade do leito de sedimentos, pode-se não permitir a drenagem do fluido. Isso impediria o alívio da pressão da região anular e a estratégia de mitigação falharia (ROCHA, 2018; FAGUNDES, 2019; BORGES, 2019). A Figura 5 ilustra esse processo.

Figura 4. Ilustração do poço de petróleo com diferentes regiões anulares e sapata aberta.



Fonte: Rocha, 2022 (Adaptado).

Figura 5. Ilustração do poço em produção (1), do alívio da pressão (2) e da sedimentação impedindo o alívio (3).



Fonte: Autor.

O fenômeno da sedimentação pode ser influenciado principalmente pela natureza do fluido (aquoso ou olefínico), do material adensante (densidade, esfericidade e diâmetro da partícula, por exemplo), temperatura e pressão.

Embora o fluido seja projetado para não sedimentar, diversos autores já relataram problemas com a sedimentação (tradicionalmente chamada de “*barite sag*”, em função da barita ser o adensante tradicionalmente empregado no adensamento de fluidos de perfuração) e tem-se observado a alteração do perfil de concentração de sólidos em função do tempo (BERN *et al.*, 2000; HASHEMIAN *et al.*, 2014; NGUYEN *et al.*, 2011). Isso pode levar anos para acontecer, de tal forma que é importante monitorar o poço mesmo após sua desativação. Devido aos longos períodos de operação e às condições operacionais severas, esse fluido pode em algum grau sofrer degradação ou perda de suas propriedades.

### 2.3. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir o aspecto de uma suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Segundo sua reologia, ele comporta-se como um fluido não newtoniano (THOMAS *et al.*, 2004; MACHADO *et al.*, 2002).

Os fluidos de perfuração devem atender uma série de especificações a fim de garantir uma perfuração rápida, economicamente viável e tecnicamente segura. Algumas dessas características são (THOMAS *et al.*, 2004; ROCHA *et al.*, 2008):

- Resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca;
- Remover os cascalhos gerados durante a perfuração, facilitar a separação na superfície e permitir interpretações geológicas do material retirado do poço;
- Manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- Estabilizar as paredes do poço mecanicamente e quimicamente;
- Estabilidade química;
- Apresentar baixo grau de corrosão e abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- Apresentar um custo compatível com a operação.

As propriedades de controle dos fluidos de perfuração são de natureza física – como densidade, parâmetros reológicos e de filtração, teor de sólidos, resistência e estabilidade elétricas e índice de lubricidade – ou química – como pH, teores de cloreto, magnésio e cálcio, alcalinidade e concentração de ácido sulfídrico.

O acompanhamento de tais propriedades é importante para prever e monitorar o comportamento do fluido durante o processo de perfuração e produção do poço, permitindo eventuais intervenções quando necessário.

O principal critério para classificação de um fluido de perfuração baseia-se no constituinte principal da fase contínua ou dispersante. Em essência, sua formulação consiste em um meio contínuo (é o meio de dispersão dos materiais; geralmente água, óleo ou gás), aditivos (responsáveis por conferir propriedades específicas ao fluido e dependem da formação rochosa a ser perfurada) e adensantes (para ajustar a densidade e prover pressão hidrostática suficiente para a operação, geralmente é usado baritina, calcita e hematita).

É justamente o adensante que tem maior tendência a sedimentar em condições dinâmicas (como durante a perfuração) ou estáticas (como durante a produção), causando variação na densidade e nas características do fluido e gerando problemas como o aumento da pressão na região anular (APB).

Um fluido de perfuração bem formulado contém, normalmente, o mínimo necessário de aditivos, além de permitir uma fácil manutenção e controle de suas propriedades. São exemplos de aditivos: emulsificantes, redutores de filtrado, viscosificantes, alcalinizantes, inibidores de corrosão, obturantes, salmoura, antiespumantes, lubrificantes e bactericidas. A tabela 1 apresenta alguns exemplos de aditivos e suas características (BAKER HUGHES INTEQ, 1995).

Tabela 1. Aditivos e suas características.

Tipo de aditivo	Função
Agentes de controle de pH	Controlar e manter o pH dentro do intervalo recomendado. São exemplos: cal, soda cáustica, bicarbonato de sódio e óxido de magnésio.
Bactericidas	Prevenir o crescimento bacteriano. São exemplos: soda cáustica, paraformaldeído, cal e conservantes de amido.

Agentes Oxidantes	Remoção de compostos orgânicos indesejáveis que podem entrar em contato durante a operação. São exemplos: peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio.
Emulsificantes	Estabilizar gotas e formar uma mistura homogênea. São exemplos: lignosulfonatos, ácidos graxos e derivados de aminas.
Controladores de inibição de folhelhos	Controlar a hidratação, erosão e desintegração das formações de argila/folhelho. São exemplos: gesso, silicato de sódio e lignosulfonatos de cálcio
Redutores de filtrado	Diminuir a perda de fluido de perfuração para a formação rochosa. São exemplos: argila bentonita, CMC (carboximetilcelulose) e amido pré-gelatinizado
Lubrificantes	Reduzir o atrito entre as partes mecânicas e o torque da broca. São exemplos: Tensoativos e óleos.
Inibidores de argila	Evitar a hidratação e inchamento de argilas do solo. São exemplos: citrato de sódio, cloreto de cálcio e polímeros.
Antiespumantes	Evitar a formação de espuma. São exemplos: óleo mineral, dimetilsilicona e ácido esteárico.
Inibidores de corrosão	Controlar os efeitos da corrosão por oxigênio e sulfeto de hidrogênio. São exemplos: Cal hidratado e sais de amina.
Viscosificantes	Controlar a viscosidade do fluido e melhorar a capacidade de transporte dos sólidos. São exemplos: bentonita, goma xantana, CMC (carboximetilcelulose).

Um fluido olefínico tem como meio contínuo hidrocarbonetos líquidos, por exemplo, o 1-hexadeceno. Suas principais características são grau de inibição e lubricidade elevados, baixa taxa de corrosão e de solubilidade de sais inorgânicos e fácil controle de propriedades em altas temperaturas. Por conta disso, é recomendado para poços HPHT (*“high pressure and high temperature”* ou alta pressão e alta temperatura), formações de folhelhos argilosos e plásticos, formações salinas e arenitos, poços direcionais ou de longo afastamento e formações com baixa pressão de poros ou de fratura. No entanto, algumas desvantagens são dificuldade na detecção de gás no poço devido a sua solubilidade na fase contínua (podendo ocasionar *“kicks”*, que é o influxo indesejado de fluidos para dentro do poço), menores

taxas de penetração, dificuldade no combate à perda de circulação, maior custo inicial e é o mais poluente quando comparado à outras formulações

Um fluido aquoso tem como meio contínuo água. Alguns fatores devem ser considerados no momento da seleção para preparo do fluido, como disponibilidade, custo de transporte, custo de tratamento, tipos de formações geológicas a serem perfuradas, tipos de aditivos e produtos químicos que irão compor o fluido e equipamentos e técnicas a serem usados na avaliação das formações. Um exemplo de sua aplicação e formulação é na perfuração de uma rocha salina com elevado grau de solubilidade em água doce; para essa operação emprega-se um fluido saturado com cloreto de sódio (NaCl) como meio dispersante, o que reduz a solubilidade dos sais da rocha no fluido de perfuração.

Historicamente, fluidos olefinicos eram predominantes na perfuração de poços por conta de suas propriedades mais estáveis a altas temperaturas, maior lubricidade e menores efeitos de corrosão. Contudo, por conta principalmente das adequações às questões ambientais e novos desafios associados à perfuração em águas profundas, a indústria vem desenvolvendo e aprimorando a tecnologia dos fluidos base água, dando preferência a essa categoria.

## 2.4. REOLOGIA

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria submetida a tensões sob determinadas condições termodinâmicas ao longo de um período de tempo. Tal estudo contempla propriedades tais quais viscosidade, elasticidade e plasticidade, permitindo melhor compreender e prever propriedades em diferentes condições operacionais (MACOSKO, 1993; MACHADO, 2002).

A deformação de um corpo pode ser idealmente separada de duas formas: espontânea e reversível (elasticidade) – o trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando retorna ao seu estado original não deformado – e irreversível (fluxo ou escoamento) – o trabalho usado para manter o escoamento é dissipado como calor e não é mecanicamente recuperado (MACHADO, 2002). No entanto, sólidos e fluidos reais não se deformam de maneira totalmente reversível (elástica) ou totalmente irreversível (escoamento); na realidade, há uma

combinação dos fenômenos. Para o presente trabalho, o caso de fluxo ou escoamento é o tipo de deformação de interesse.

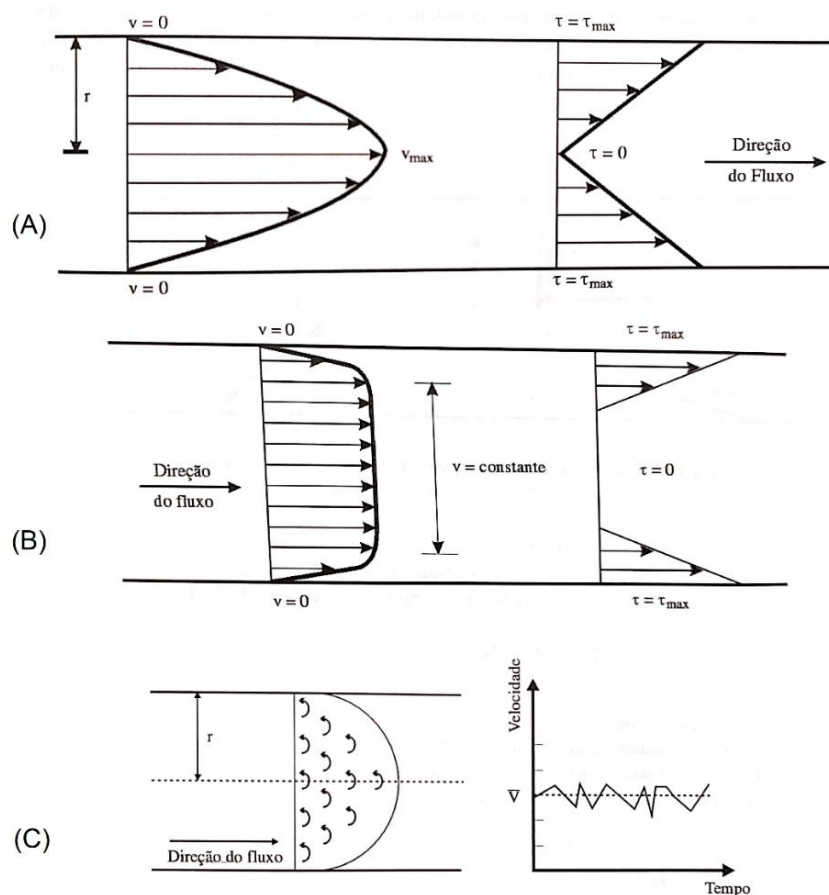
Pode-se definir um fluido como uma matéria que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Nesse contexto, líquidos ou gases, caracteriza-se por leis que descrevem a variação contínua de taxa de deformação em função das forças externas aplicadas. Eles podem ser classificados segundo o comportamento reológico em fluidos newtonianos e fluidos não newtonianos (MACHADO, 2002; FOX *et al.*, 2014; BIRD, 2004).

Essa deformação ainda pode se dar em diferentes regimes de escoamentos: laminar, tampão e turbulento. O laminar é caracterizado pelo movimento organizado das partículas; as camadas de fluido se deslocam através das linhas de corrente, paralelas à direção do escoamento sem que ocorra mistura macroscópica. Já no tampão, existe deslocamento relativo próximo às paredes do recipiente, mas a região centra do fluido se move como um corpo sólido; esse perfil é característico de fluidos não-ideias que possuam tensão limite de escoamento finita e diferente de zero. Por fim, o escoamento turbulento se caracteriza pelo movimento desordenado das partículas, com turbilhonamento misturando as camadas ainda que o escoamento se encontre plenamente desenvolvido (MACHADO, 2002). A Figura 6 ilustra o perfil dos tipos de escoamentos descritos.

Uma definição clássica, considerando um fluido Newtoniano, é que o escoamento pode ser laminar (se  $Re < 2100$ ), transição (se  $2100 < Re < 3000$ ) ou turbulento (se  $Re > 3000$ ). Contudo, quando se trata do escoamento de fluidos não newtonianos, há casos do número de Reynolds ultrapassar valores de 8000 para que o escoamento seja considerado turbulento (MACHADO, 2002).

Na indústria de petróleo e gás, a reologia é uma ferramenta importante para compreender o comportamento dos fluidos utilizados nos processos de exploração, produção, transporte e refino do petróleo e gás natural. Algumas das suas principais aplicações nessa indústria são caracterização, controle de qualidade, monitoramento de processos, desenvolvimento de novos fluidos e simulação computacional.

Figura 6. (a) distribuição de velocidade e tensão em fluxo laminar; (b) em fluxo tampão; (c) Perfil de velocidade média e variação da velocidade pontual em fluxo turbulento.



Fonte: Machado, 2002 (Adaptado).

A caracterização reológica dos fluidos é importante para compreender suas propriedades físicas e químicas (como viscosidade, densidade, tensão superficial, tensão limite de escoamento e outras) a fim de desenvolver e selecionar os mais adequados para cada processo. Além disso, por meio dessas análises é possível garantir a qualidade, eficiência e segurança dos fluidos utilizados durante todo o processo, permitindo identificar problemas como entupimento de tubulações, vazamentos e formação de incrustações e tomar as medidas corretivas necessárias.

Uma outra aplicação da reologia é a simulação computacional. Através dessa ferramenta, é possível prever o comportamento dos fluidos em condições de campo. Essas simulações são importantes para otimizar os processos de produção e verificar a necessidade de intervenções no poço.



### 2.4.1. Tensão, Viscosidade e Escoamento

No contexto da mecânica dos fluidos, tensão é a força por unidade de área que atua em um fluido e pode ser dividida em tensão normal, que é perpendicular ao escoamento, e tensão cisalhante, que está na direção do escoamento. Para um fluido em repouso, a tensão é igual em todas as direções. Já para um fluido em escoamento viscoso, as tensões de cisalhamento são diferentes de zero. Tensões normais são relevantes em alguns casos específicos, como explicar o efeito de subida em bastão durante agitação para líquidos poliméricos, também chamado de *efeito de Weissenberg* (FOX *et al.*, 2014; BIRD, 2004).

Segundo Fox *et al.* (2014), é possível definir um fluido como uma substância que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão e taxa de cisalhamento aplicadas, ou seja, em função do comportamento da sua viscosidade.

A viscosidade é uma medida da resistência de um fluido à deformação. Um fluido viscoso tem uma alta resistência à deformação; por outro lado, um fluido com baixa viscosidade deforma-se mais facilmente. Um exemplo disso é a comparação entre água e glicerina, sendo a segunda mais viscosa do que a primeira substância. Geralmente definida como a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento em um fluido. Além disso, há uma dependência com a temperatura, pressão e composição (FOX *et al.*, 2014).

Considere um elemento de fluido contido entre duas placas infinitas paralelas. A força exercida sobre a superfície do líquido em contato com a placa implica na existência de um tensor, cujas componentes são as tensões normais ( $\tau_{aa}$ , índices iguais) e as tensões cisalhantes ( $\tau_{ab}$ , índices diferentes). Considerando um sistema de coordenadas retangulares, o tensor tensão é dado por:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A notação para a componente tensorial,  $\tau_{ab}$ , indica a direção da força ( $b$ ) e a direção da normal ( $a$ ) ao plano de atuação da força. A fim de ilustrar o caso, a Figura 7 (A) apresenta um elemento de fluido em repouso entre duas placas paralelas

infinitas; em (B), uma força constante ( $\delta F$ ) é aplicada à placa superior, que se move a uma velocidade constante ( $\delta u$ ).

A ação de cisalhamento da placa infinita produz uma tensão de cisalhamento ( $\tau_{yx}$ ), deformando o elemento de fluido da posição inicial MNOP no tempo  $t$  para M'NOP' no tempo  $t+\delta t$ , gerando um ângulo de inclinação  $\delta\alpha$ . Assim, pode-se definir a tensão de forma unidimensional da seguinte forma:

$$\tau_{yx} = \lim_{\Delta A_y \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y} \quad (2)$$

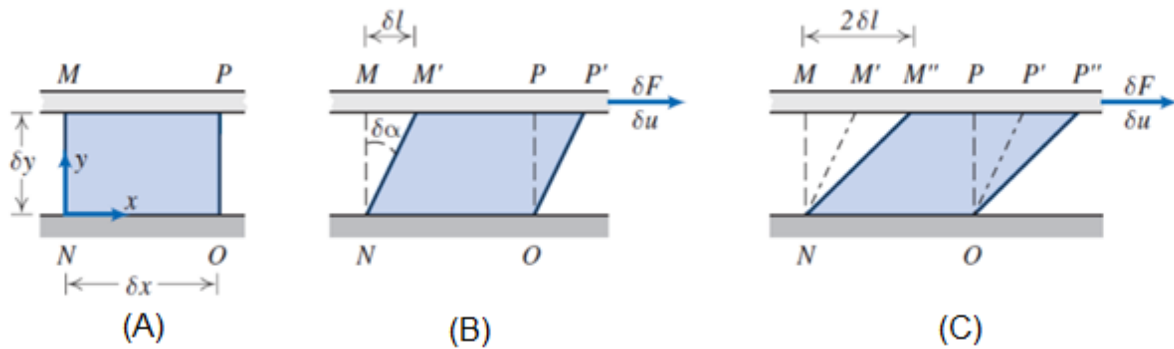
A partir disso, é possível definir a taxa de cisalhamento (também chamada de taxa de deformação) como:

$$\dot{\gamma} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

Como a distância  $\delta l$  entre os pontos M e M' é dada por  $\delta l = \delta u \cdot \delta t$ , ou ainda como  $\delta l = \delta y \cdot \delta\alpha$  para pequenos ângulos, pode-se igualar as duas expressões e obter:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{dy}{dy} \quad (4)$$

Figura 7. Deformação de um elemento de fluido unidimensional.



Fonte: FOX *et al.*, 2014 (Adaptado).

Dessa forma, o elemento da Figura 7, quando submetido à tensão de cisalhamento, experimenta uma taxa de cisalhamento. Os fluidos nos quais a taxa de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, são chamados de fluidos newtonianos. Nos quais não se observa essa relação, são chamados de fluidos não newtonianos.

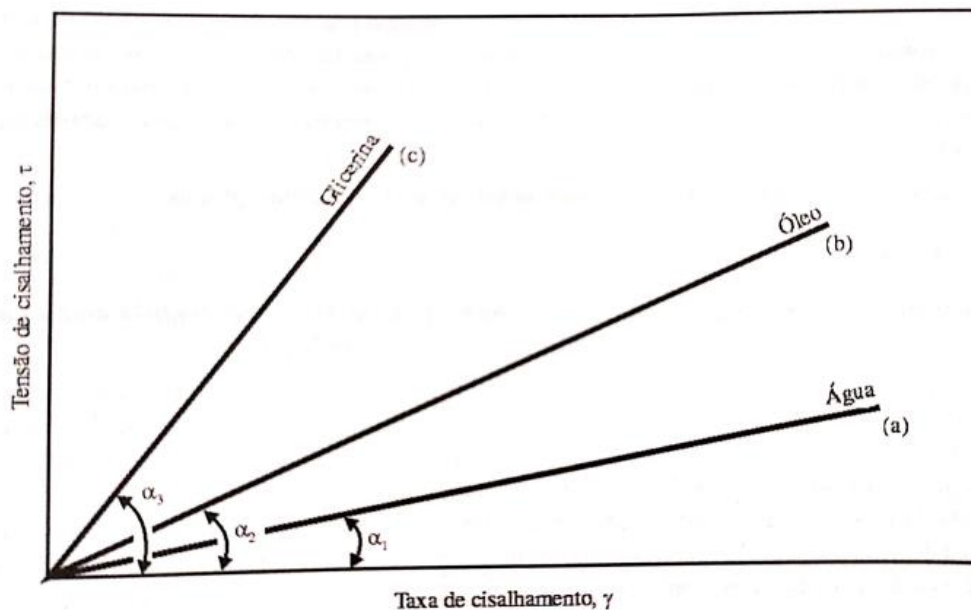
### 2.4.2. Fluidos Newtonianos

Os fluidos newtonianos são aqueles que possuem uma relação linear e que passa pela origem entre tensão cisalhante e taxa de deformação em regime laminar, existindo uma constante de proporcionalidade, denominada viscosidade absoluta. Assim, a viscosidade é função apenas de temperatura e pressão. São exemplos desse tipo de fluido: água, ar, glicerina e gasolina (MACHADO, 2002; FOX *et al.*, 2014; BIRD, 2004). O perfil de velocidade desenvolvido no estado estacionário é linear. A Equação 5 apresenta a relação entre tensão e taxa de cisalhamento para fluidos newtonianos em coordenadas retangulares considerando um escoamento unidimensional na direção  $y$ , sendo  $\mu$  a viscosidade absoluta,  $\tau_{yx}$  a tensão e  $du/dy$  a taxa de cisalhamento.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (5)$$

A Figura 8 apresenta um gráfico de tensão de cisalhamento contra taxa de cisalhamento, no qual é possível observar qualitativamente a diferença entre a viscosidade da água, óleo e glicerina. Nesse exemplo, a viscosidade da água é menor do que a do óleo, que por sua vez é menor do que a da glicerina.

Figura 8. Comparação da viscosidade entre fluidos newtonianos por meio da inclinação da reta.



Fonte: Machado, 2002.

### 2.4.3. Fluidos Não Newtonianos

Fluidos não newtonianos são aqueles que não possuem relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação e/ou requerem uma tensão mínima para deformar (tensão limite de escoamento). Em outras palavras, a viscosidade desses fluidos não é constante e varia de acordo com a força cisalhante aplicada (MACHADO, 2002; FOX *et al.*, 2014; BIRD *et al.*, 2004). Esses fluidos podem ser definidos pela relação:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

Sendo  $\tau$ : tensão de cisalhamento;  $\dot{\gamma}$ : taxa de cisalhamento; e  $\eta$ : viscosidade aparente. Vale reforçar que a viscosidade não é mais absoluta, como era no caso de fluidos newtonianos; nesse caso, a viscosidade é aparente e é função da taxa de cisalhamento. A viscosidade aparente, além de depender da temperatura e pressão, também depende das condições de escoamento e/ou do histórico de cisalhamento. Esses fluidos ainda podem ser subdivididos segundo o comportamento reológico em independentes do tempo, em dependentes do tempo e viscoelásticos (MACHADO, 2002; FOX *et al.*, 2014; BIRD *et al.*, 2004).

### 2.4.4. Tensão Limite de Escoamento

A tensão limite de escoamento é a tensão máxima que um material pode suportar antes de se deformar permanentemente, ou seja, antes de perder a sua forma original e sofrer deformação irreversível. Quando um material é submetido a uma tensão abaixo do limite de escoamento, a deformação é temporária; ao remover a tensão, retorna à sua forma original. No entanto, quando a tensão atinge ou excede o limite de escoamento, a deformação se torna permanente e o material escoar (CALISTER *et al.*, 2012).

Alguns fluidos podem apresentar tensão limite de escoamento e se comportar como fluidos newtonianos após escoar, como pastas de dentes e geleias. Também há casos de fluido apresentar tensão limite de escoamento e se comportar como não newtonianos, por exemplo algumas soluções poliméricas.

A tensão limite de escoamento é importante para o projeto e dimensionamento de estruturas e componentes mecânicos, como bombas. É uma propriedade que varia para cada tipo de material.

No contexto de fluidos de perfuração, sua determinação é feita por meio de ensaios em viscosímetros e reômetros. Contudo, há diferentes formas descritas na literatura para obtenção desse valor, como através da extrapolação da curva de escoamento, deformação controlada, rampa de tensão, teste de varredura de tensão, teste oscilatório de amplitude e teste de fluência (“*creep*”) (NASCIMENTO, 2007; PINTO, 2020).

#### 2.4.5. Tixotropia e Reopetia

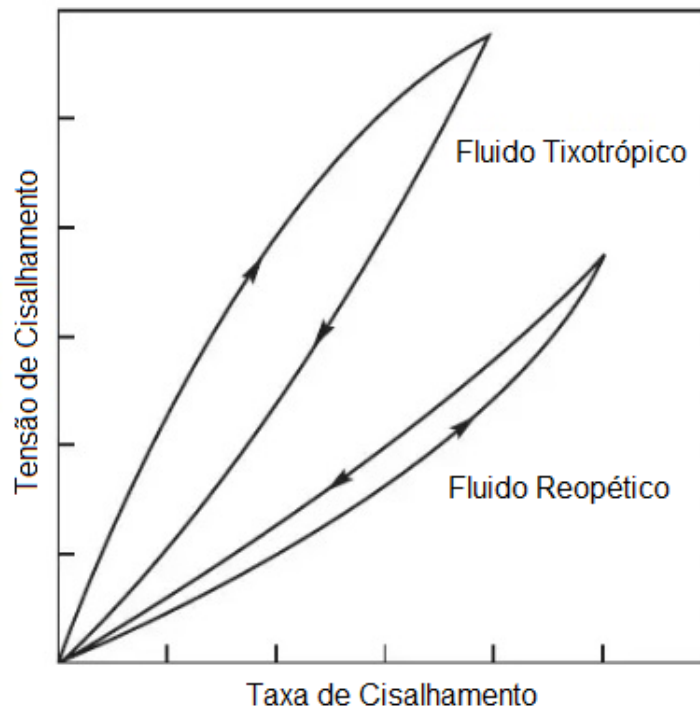
Ainda sobre os fluidos não newtonianos, uma outra abordagem importante é a dependência do tempo. Fluidos dependentes do tempo são aqueles que apresentam mudanças na sua viscosidade e comportamento quando submetidos a diferentes taxas de cisalhamento, tempo de aplicação da tensão e tempo de repouso.

Os fluidos dependentes do tempo são subdivididos em tixotrópicos, quando a viscosidade aparente decresce sob uma tensão cisalhante constante em função do tempo – como o petróleo cru e tintas –, ou reopéticos, quando a viscosidade aparente aumenta sob uma tensão cisalhante constante em função do tempo – como a argila bentonita. A Figura 9 apresenta uma curva de escoamento qualitativa. Deve-se atentar que as curvas ascendentes e descendentes não se sobrepõem, ou seja, o comportamento depende das forças aplicadas anteriormente (histórico de cisalhamento). Esse fenômeno denomina-se histerese e a área entre as curvas define sua magnitude, que está relacionada à energia necessária para romper a estrutura gel do fluido (BIRD *et al.*, 2004; FOX *et al.*, 2014).

O conhecimento das propriedades dependentes do tempo, geralmente associados a suspensões ou dispersões, é fundamental para compreensão de determinados fenômenos, que podem ser influenciados pelo trabalho mecânico ou pelo envelhecimento durante armazenamento prolongado (COULSON *et al.*, 1979).

Geralmente as abordagens matemáticas e modelos reológicos não levam em consideração o efeito do tempo, a fim de evitar uma abordagem complexa da teoria molecular ou da interação entre partículas (MACHADO, 2002).

Figura 9. Relação qualitativa entre tensão e taxa de cisalhamento para fluido dependente do tempo.



Fonte: CHHABRA & RICHARDSON, 2008 (adaptado).

#### 2.4.6. Viscoelasticidade

Os fluidos viscoelásticos são aqueles que apresentam propriedades viscosas e elásticas simultaneamente em resposta a uma tensão aplicada. Isso significa que esses materiais apresentam uma combinação de propriedades viscosas, como a deformação e o escoamento gradual sob tensão, e propriedades elásticas, como a capacidade de retornar à sua forma original após a remoção da tensão (BIRD, *et al.*, 2004; FOX, *et al.*, 2014).

Nessa classe de fluidos, ao remover a tensão de cisalhamento, o fluido não retorna completamente ao seu estado inicial e nem permanece totalmente em seu estado de deformação. Um exemplo disso são algumas soluções poliméricas, que apresentam uma reconstituição parcial de sua estrutura inicial como uma função exponencial decrescente do tempo de repouso por conta da memória elástica (SCHWALBERT, 2013; COULSON *et al.*, 1979).

Uma das formas de modelar o comportamento de fluidos viscoelásticos parte de uma abordagem de mola e pistão. A mola representa o comportamento de um

fluido puramente viscoso (Lei de Newton da viscosidade); o pistão representa o comportamento de um sólido puramente elástico (Lei de Hooke) (MACOSKO, 1993). O modelo viscoelástico mais simples é aquele que contempla um único arranjo mola-pistão em série, conhecido como modelo de Maxwell (MAXWELL, 1987).

$$\tau_{yx} + \frac{\eta_0}{G} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial t} = \eta_0 \dot{\gamma}_{yx} \quad (7)$$

Sendo  $\tau_{yx}$ : tensão de cisalhamento;  $\eta_0$ : viscosidade em baixas taxas de cisalhamento; G: constante elástica da mola;  $\dot{\gamma}_{yx}$ : taxa de cisalhamento; t: tempo.

Outros modelos foram deduzidos a partir dessa abordagem. Os mais usuais surgem como uma combinação de arranjos do sistema mola-pistão.

Há na literatura diversos outros modelos para descrever fluidos viscoelásticos, os quais conferem maior precisão no ajuste experimental e na predição. Embora sua modelagem seja mais apropriada, acabam apresentando um maior custo computacional nas simulações, comprometendo a relação custo-benefício ao assumir certas hipóteses. A estrutura dos fluidos viscoelásticos é complexa e depende de diferentes fatores, incluindo a estrutura molecular, o peso molecular, a concentração, o grau de ramificação, o grau de entrelaçamento, a taxa de deformação, a amplitude da tensão aplicada e o tempo (SCHWALBERT, 2013).

#### 2.4.7. Testes Reológicos

Há descrito na literatura alguns tipos de testes para obter os dados reológicos adequados para a correta caracterização do fluido estudado. A tabela 2 apresenta um resumo com os principais testes e suas finalidades.

Tabela 2. Exemplos de testes reológicos.

Teste	Objetivo	Descrição
Varredura de Amplitude	Verificar os limites da região de viscoelasticidade linear.	Impõe-se uma frequência e varia-se a amplitude de oscilação, avaliando-se as respostas dos módulos elástico e viscoso frente a tensão.

Varredura de Frequência	Avaliar a resposta das componentes elástica e viscosa para uma faixa predefinida de frequências de oscilação.	Impõe-se a tensão máxima estabelecida na varredura de amplitude e faz-se uma varredura de frequência para avaliar o comportamento mecânico do material.
Varredura de Tempo	Avaliar estabilidade do material (envelhecimento, sedimentação, evaporação, separação de fases, efeitos de cura e degradação) e tempo no qual a amostra pode ser submetida a uma condição operacional.	Impõe-se a tensão máxima e a frequência estabelecidas na varredura de amplitude e de frequência e executa-se o teste por um período programado de tempo, com taxa e temperatura constantes.
Taxa de Cisalhamento Constante	Determinar tempo de estabilização da medida.	Impõe-se uma taxa de cisalhamento constante por um período de tempo programado e observa-se o comportamento da tensão.
“Step Change” de taxa de cisalhamento	Verificar a dependência do material com o tempo (avaliar tixotropia).	Impõe-se uma taxa de cisalhamento alta e constante até a estabilização da tensão. Depois, impõe-se uma taxa de cisalhamento mais baixa, promovendo o relaxamento da tensão. Por fim, impõe-se a taxa alta novamente e avalia-se a reestruturação do material.
Teste de Fluência (“Creep”)	Verificar a existência e qual o valor da tensão limite de escoamento.	Impõe-se uma tensão de cisalhamento constante por um período de tempo programado e avalia-se o comportamento da deformação.
Curva de Escoamento	Avaliar o comportamento do material ao ser submetido a uma faixa de tensão ou taxa de cisalhamento. Usado para identificar parâmetros reológicos.	Impõe-se uma taxa ou tensão de cisalhamento que varia com o tempo e observa-se o comportamento da tensão ou taxa e da viscosidade.
Rampa de Temperatura	Verificar se e quando a amostra sofre alteração na sua microestrutura com a variação de temperatura.	Impõe-se uma taxa de cisalhamento constante e varia-se a temperatura com o tempo, observando o comportamento da tensão e da viscosidade.



#### 2.4.8. Modelos Reológicos Para Fluidos Independentes do Tempo

Diversos modelos reológicos para descrever fluidos não newtonianos independentes do tempo já foram descritos na literatura. Em essência, representam a relação entre tensão e taxa de cisalhamento, usando relações lineares, exponenciais ou polinomiais e podem conter um ou mais parâmetros.

Cada modelo tem suas próprias limitações e é importante escolher o modelo certo para cada aplicação. É comum usar combinações de modelos reológicos para descrever o comportamento de materiais mais complexos.

##### 2.4.8.1. Modelo de Bingham

O modelo de Bingham ou plástico ideal prevê a aplicação de uma tensão mínima para que haja alguma deformação (tensão limite de escoamento). Esses fluidos comportam-se como um sólido até atingir a tensão mínima; após tal valor, apresenta uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento. Em outras palavras, o modelo de Bingham descreve um fluido newtoniano com tensão limite de escoamento.

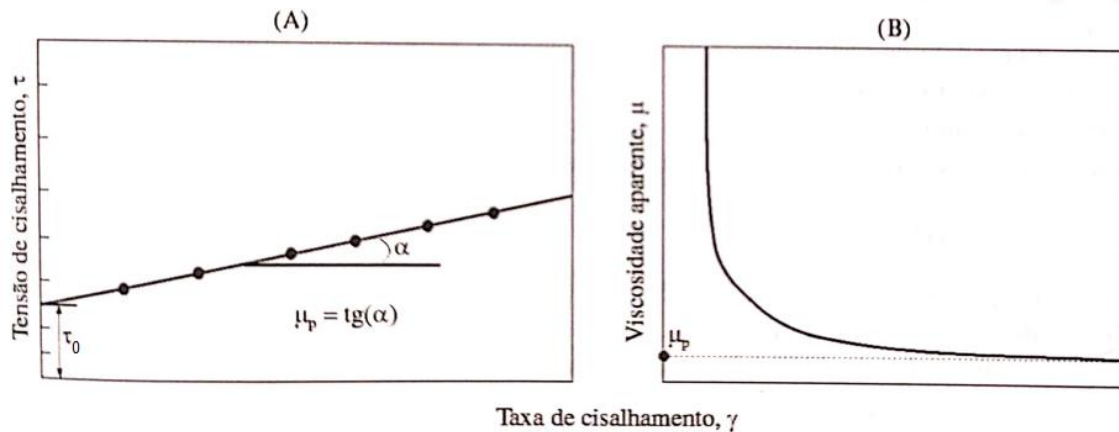
$$\begin{aligned}\tau_{yx} &= \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}; \text{ se } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0, \text{ se } \tau \leq \tau_0\end{aligned}\tag{8}$$

Sendo  $\tau_0$ : tensão limite de escoamento;  $\mu_p$ : viscosidade plástica. Vale reforçar que a viscosidade descrita na Equação 8 é plástica; não é absoluta, como para os fluidos newtonianos, e não é aparente, como para os fluidos não newtonianos. A expressão para viscosidade aparente é obtida combinando-se as equações 6 e 8.

$$\eta = \mu_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\tag{9}$$

Quando a taxa de cisalhamento tende ao infinito, a razão  $\tau_0/\dot{\gamma}$  tende a zero. Nesse caso, o valor da viscosidade aparente tende a um valor constante e igual à sua viscosidade plástica. Por essa razão, quando fluidos de Bingham escoam a altas vazões, o valor da viscosidade plástica pode ser considerado aproximadamente igual ao da viscosidade aparente. A Figura 10 ilustra qualitativamente esse modelo.

Figura 10. Curva de fluxo (A) e de viscosidade (B) para um fluido de Bingham.



Fonte: Machado, 2002 (Adaptado).

#### 2.4.8.2. Modelo Lei de Potência

O modelo de Lei de Potência (ou *Power Law*), embora não se aplique para todos os fluidos não newtonianos e nem a todo intervalo de taxa de cisalhamento, existe um grande número de fluidos que podem ser modelados por essa equação. A Figura 11 ilustra qualitativamente esse modelo.

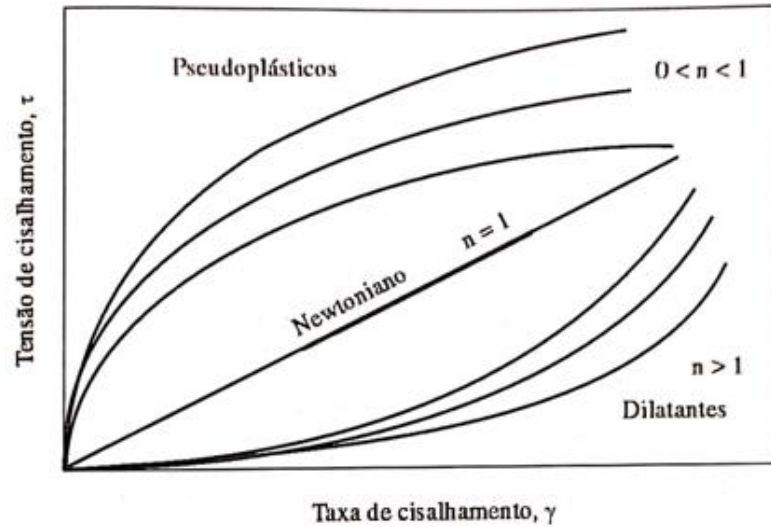
$$\tau_{yx} = M\dot{\gamma}^n \quad (10)$$

Os parâmetros são índice de consistência ( $M$ ), que indica o grau de resistência ao escoamento, e o índice de comportamento ( $n$ ), que fisicamente indica o afastamento do modelo newtoniano.

Os fluidos pseudoplásticos ( $n < 1$ ) caracterizam-se por uma viscosidade aparente decrescente conforme a taxa de deformação cresce – como soluções de polímeros e o melaço de cana. Os fluidos dilatantes ( $n > 1$ ) caracterizam-se por uma viscosidade aparente crescente conforme a taxa de deformação cresce – como solução concentrada de sacarose. Quando  $n=1$  e  $K=\mu$ , o fluido é newtoniano e retorna-se à equação 5 (MACHADO, 2002; FOX *et al.*, 2014; BIRD *et al.*, 2004).

É um dos modelos não newtonianos mais simples e depende apenas de dois parâmetros. Do ponto de vista computacional e numérico tem-se observado boa relação custo-benefício ao implementar e solucionar problemas mais complexos, embora não seja o mais preciso.

Figura 11. Curva de fluxo para um fluido do tipo Lei de Potência.



Fonte: Machado, 2002 (Adaptado).

#### 2.4.8.3. Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo de Herschel-Bulkley trata o fluido como um sólido até que a tensão limite seja excedida e, em seguida, comporta-se como um fluido do tipo “Lei de Potência”. Esse modelo possui três parâmetros: tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), índice de consistência ( $M$ ) e o índice de comportamento ( $n$ ). Geralmente, consegue ajustes e previsões melhores do que os modelos do tipo Lei de Potência. Contudo, a inserção de um terceiro parâmetro pode trazer dificuldades e maiores custos computacionais em implementações e em soluções numéricas. Além disso, esse modelo pode, em casos particulares, descrever o comportamento newtoniano ( $\tau_0=0$  e  $n=1$ ), Lei de Potência ( $\tau_0=0$ ) e Bingham ( $n=1$ ).

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_0 + M\dot{\gamma}^n; \text{ se } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0, \text{ se } \tau \leq \tau_0 \end{aligned} \quad (11)$$

#### 2.4.8.4. Modelo de Casson

O modelo de Casson pode ser aplicado para avaliar a viscosidade de um fluido escoando a uma taxa de cisalhamento tendendo ao infinito. Isso tem aplicação na

avaliação de fluidos escoando através de orifícios ou jatos de brocas empregadas na perfuração de poços (MACHADO, 2002).

$$\begin{aligned}\tau^{1/2} &= \tau_0^{1/2} + (\eta_\infty \dot{\gamma})^{1/2}; \text{ se } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0, \text{ se } \tau \leq \tau_0\end{aligned}\quad (12)$$

Sendo  $\eta_\infty$ : viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento. Portanto, considerando a definição de viscosidade aparente e a equação 12, tem-se que:

$$\eta^{1/2} = (\eta_\infty \dot{\gamma})^{1/2} + \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\right)^{1/2} \quad (13)$$

A diferença entre o modelo de Casson e Bingham está no expoente dos termos da expressão, de tal forma que o primeiro utiliza “1/2” em todos os termos da equação. A adição desse expoente faz, a baixas taxas de cisalhamento, o modelo de Casson apresentar maiores valores de viscosidade aparente, que decrescem com o aumento da taxa de cisalhamento; ao passo que o modelo de Bingham apresenta viscosidade constante. Isso faz uma transição mais gradual, que pode ajudar a ajustar os dados experimentais.

#### 2.4.8.5. Modelo de Robertson-Stiff

Trata-se de um modelo semelhante ao modelo Lei de Potência, com a diferenciação da adição de um termo corretivo para as taxas de cisalhamento. Esse modelo possui 3 parâmetros e apresenta a vantagem de produzir equações diferenciais de soluções possíveis e fáceis para uso nos cálculos de escoamento de fluidos. No entanto, apresenta dificuldade na interpretação do significado físico de seus parâmetros (MACHADO, 2002).

$$\begin{aligned}\tau &= a(\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_0)^b; \text{ se } \tau > a(\dot{\gamma}_0)^b \\ \dot{\gamma} &= 0, \text{ se } \tau \leq a(\dot{\gamma}_0)^b\end{aligned}\quad (14)$$

Sendo  $\dot{\gamma}_0$ : correção da taxa de cisalhamento para o fluido em relação à taxa de cisalhamento para o fluido de Herschel-Bulkley; “a” e “b” são parâmetros do modelo.

Ao todo, esse modelo possui 3 parâmetros a determinar. Portanto, considerando a definição de viscosidade aparente e a equação 15, tem-se que:

$$\eta = \frac{a(\gamma + \gamma_0)^b}{\gamma} \quad (15)$$

#### 2.4.8.6. Modelo de Carreau

Trata-se de um modelo similar à Lei de Potência, com o diferencial de apresentar patamares de viscosidade a baixas e altas taxas de cisalhamento. Além disso, possui 4 parâmetros para determinar ( $\eta_\infty$ ,  $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $n$ ).

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1 + (\lambda\gamma)^2)^{(n-1)/2}} \quad (16)$$

#### 2.4.8.7. Modelo de Cross

Trata-se de um modelo similar ao Carreau, com o diferencial de apresentar apenas o patamar superior de viscosidade. Possui 4 parâmetros para determinar ( $\eta_\infty$ ,  $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $n$ ). A equação 17 apresenta seu equacionamento.

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\lambda\gamma)^n} \quad (17)$$

#### 2.4.8.8. Resumo

A tabela 3 apresenta um resumo dos modelos reológicos apresentados:

Tabela 3. Modelos reológicos e seus parâmetros.

Modelo	Equação	Parâmetros
Newtoniano	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	Viscosidade dinâmica absoluta ( $\mu$ )
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p$	Tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) Viscosidade plástica ( $\mu_p$ )
Lei de Potência	$\tau = M\dot{\gamma}^n$	Índice de consistência (M) Índice de Comportamento (n)

Herschel-Bulkley	$\tau_{yx} = \tau_0 + M\dot{\gamma}^n$	Tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) Índice de consistência (M) Índice de Comportamento (n)
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta_\infty \dot{\gamma})^{1/2}$	Tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento ( $\mu_\infty$ )
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_0)^b$	Correção da taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}_0$ ) Parâmetros numéricos (a; b)
Carreau	$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2}}$	Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento ( $\mu_\infty$ ) Viscosidade limite para baixas taxas de cisalhamento ( $\mu_0$ ) Parâmetros numéricos ( $\lambda$ ; n)
Cross	$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^n}$	Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento ( $\mu_\infty$ ) Viscosidade limite para baixas taxas de cisalhamento ( $\mu_0$ ) Parâmetros numéricos ( $\lambda$ ; n)

Todos os modelos reológicos apresentados anteriormente podem sofrer modificações para atender demandas e estudos específicos. Há uma vasta literatura sobre tais modelos. Alguns exemplos encontrados foram modelo Bingham modificado, Herschel-Bulkley modificado por Nelson e por Cayeux, Herschel-Bulkley modificado por Saasen e Ytrehus, modelo de Sisko, modelo de Cross modificado e modelo de Carreau-Yasuda (Navarro, 2002; Moreno, 2018; Cayeux, 2020; Mohamed *et al.*, 2021).

#### 2.4.9. Modelos para ajuste da reologia com efeito da temperatura

A viscosidade de um líquido, soluções e suspensões, que pode ser relacionado à resistência ao seu escoamento, é influenciada pela temperatura de maneira inversamente proporcional. No contexto da sedimentação, trata-se da resistência ao cisalhamento da partícula que está sedimentando. Quanto maior for a temperatura, menor tende a ser a viscosidade e mais rápido as partículas tenderão a sedimentar. Por essa razão, é de interesse incorporar os efeitos térmicos ao equacionamento da sedimentação.

Os modelos para ajuste da reologia com efeito da temperatura são usados para descrever o comportamento de fluidos considerando o efeito de temperatura durante o processo de deformação. Além da taxa de deformação e outros parâmetros de acordo com o modelo reológico adotado, assume-se também a temperatura (ou parâmetros relacionados a ela) como uma variável independente.

Há descrito na literatura diversos modelos para ajuste da reologia com efeito da temperatura, os quais podem ser usados para descrever fluidos viscosos em condições de variação de temperatura. Geralmente essas equações são incorporadas ao modelo reológico em substituição a algum parâmetro ou em adição como termo de correção de alguma propriedade.

#### 2.4.9.1. Modelo de Arrhenius

Este modelo é baseado na lei de Arrhenius da cinética química e descreve a dependência da viscosidade com a temperatura usando uma equação exponencial. No entanto, é importante comentar que este modelo requer dados experimentais precisos para que a energia de ativação e a viscosidade de referência sejam estimados corretamente. A equação geral do modelo de Arrhenius é dada por:

$$\eta = \eta_{ref} \exp\left(\frac{\Delta H}{R T}\right) \quad (18)$$

Sendo  $\eta$ : viscosidade do fluido em uma temperatura;  $\eta_{ref}$ : viscosidade do fluido a uma temperatura de referência;  $\Delta H$ : energia de escoamento para o fluxo molecular do fluido;  $R$ : constante universal dos gases; e  $T$ : temperatura absoluta. Pela sua estrutura, nota-se que a viscosidade do fluido diminui exponencialmente com o aumento da temperatura, que é o comportamento esperado.

Para que isso ocorra, a energia de ativação (ao ser estimada) deve ter um valor negativo. É comum encontrar trabalhos nos quais o sinal de negativo já esteja incorporado ao equacionamento; nesses casos, a energia de ativação será positiva para que o termo dentro da exponencial seja negativo. Uma outra forma recorrente de encontrar essa equação é na forma reparametrizada.

$$\eta = \eta_{ref} \exp \left[ \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (19)$$

Sendo  $T_{ref}$ : a temperatura de referência; e  $\eta_{ref}$ : a viscosidade de referência obtida na temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). A incorporação do modelo de Arrhenius ao modelo reológico prevê a adição de mais um parâmetro a ser estimado ( $E_a$ ).

#### 2.4.9.2. Modelo WLF

O modelo WLF (Williams-Landel-Ferry), é uma equação empírica utilizada para descrever a dependência da viscosidade de um polímero com a temperatura. De acordo com este modelo, a viscosidade de um polímero é descrita por:

$$\eta = \eta_{ref} \exp \left[ \frac{-c_1(T - T_{ref})}{c_2 + (T - T_{ref})} \right] \quad (20)$$

Sendo  $c_1$  e  $c_2$ : constantes empíricas que dependem do tipo de polímero, são parâmetros a serem estimados. Nesse caso, a incorporação do modelo WLF ao modelo reológico prevê a adição de mais dois parâmetros. É possível também encontrar na literatura modificações e variações desses modelos, como o de Cross-WLF, que leva em consideração efeitos de temperatura e pressão na viscosidade.

No entanto, é importante destacar que o modelo WLF é uma equação empírica e não leva em consideração as propriedades moleculares específicas do polímero em questão. Portanto, a aplicação desse modelo deve ser feita com cuidado e é recomendável que seja validado experimentalmente para cada polímero.

Segundo Bird *et al.* (2002), esse modelo é mais adequado para suspensões poliméricas com elevada massa molar e temperaturas entre a de transição vítrea do polímero e 100K acima desta; enquanto que o modelo de Arrhenius é mais apropriada para soluções poliméricas com baixas massas molares em temperaturas acima de 100K a partir da temperatura de transição vítrea do polímero, bem como emulsões e suspensões, como os fluidos de perfuração.



#### 2.4.10. Efeitos da Temperatura na Reologia em Diferentes Fluidos

Esse tópico destina-se a apresentar como trabalhos de outras áreas abordaram e modelaram os efeitos da temperatura na reologia de diferentes fluidos.

Álvarez, Cancela e Maceiras (2006) estudaram o comportamento reológico de compotas nas faixas de 20°C até 40°C. Para isso, fizeram uso de um viscosímetro rotacional Haake VT550. Segundo os autores, alimentos nessas condições estão sujeitos a variações de temperaturas, as quais podem alterar aspectos sensoriais e microbiológicos. O ajuste foi feito usando modelo Lei de Potência, Carreau, Herschel-Bulkley e Cross. Os resultados demonstraram que as amostras possuíam um comportamento pseudoplástico e que os sólidos em suspensão influenciaram no índice de consistência. Além disso, os 5 modelos ajustaram bem os dados experimentais e foi possível observar que os parâmetros estimados possuíam relação linear com a temperatura. Não foi feita discriminação de modelos.

Karaman e Kayacier (2011) estudaram o efeito da temperatura nas características reológicas de damasco e melaço de tâmaras. Os experimentos foram realizados em um reômetro Thermo-Haake, usando geometria de cone-placa, nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40°C e com faixa de tensão de cisalhamento de 0,1 s<sup>-1</sup> até 100 s<sup>-1</sup>. O modelo reológico usado foi Lei de Potência e o modelo de Arrhenius foi usado para descrever o efeito da temperatura na viscosidade. A energia de ativação foi obtida através do coeficiente linear do gráfico de logaritmo natural da viscosidade aparente (ln( $\eta$ )) contra o inverso da temperatura (1/T). Os resultados obtidos demonstraram que o modelo Lei de Potência ajustou bem os dados experimentais e que o erro percentual médio absoluto para o modelo de Arrhenius foi da ordem de 10% para damasco e inferior a 1% para tâmara.

Rafe e Masood (2014) modelaram o comportamento reológico de um novo hidrocoloide nas faixas de temperatura entre 30°C e 50°C. Para modelar os dados experimentais, os autores avaliaram os modelos de Lei de Potência, Herschel-Bulkley e Casson. Para avaliar os efeitos térmicos, os autores adotaram o modelo de Arrhenius. Os resultados demonstraram um comportamento newtoniano para uma solução mais diluída; contudo, ao atingir um certo valor de concentração, o fluido comporta-se como pseudoplástico. Além disso, a viscosidade aparente foi fortemente afetada pelo aumento da temperatura, variando de 234,9 para 7,46 Pa.s,

apresentando comportamento pseudoplástico durante quase todo o experimento, exceto um comportamento tendendo ao newtoniano a 50°C. O modelo de Herschel-Bulkley foi o que melhor ajustou os dados experimentais e as curvas de fluxo ascendente e descendente demonstraram um leve comportamento tixotrópico. Quanto ao modelo de Arrhenius, foi possível observar que a energia de ativação diminuiu conforme a taxa de cisalhamento diminuiu, implicando numa dependência desse parâmetro com a condição operacional.

Santos *et al.* (2016) estudaram a influência da temperatura, concentração e taxa de deformação no comportamento reológico do suco de jumbo-vermelho. Os experimentos foram realizados em um reômetro Brookfield R/S Plus, operando em geometria de cilindros concêntricos. As temperaturas avaliadas foram 10°C, 30°C, 50°C e 70°C e as faixas de taxa de cisalhamento foram até 300 s<sup>-1</sup>. Os modelos reológicos da Lei da Potência, Herschel-Bulkley, Mizrahi-Berk e Sisko foram utilizados para modelagem dos dados experimentais. O efeito da temperatura na viscosidade aparente das amostras foi analisado pela equação de Arrhenius. O suco de jumbo-vermelho (polpa e casca) apresentou comportamento pseudoplástico para todas as temperaturas e concentrações. A energia de ativação aumentou com a diminuição na concentração dos sólidos solúveis, atestando que, quanto menor a concentração, maior a influência da temperatura na viscosidade aparente. O fator exponencial aumentou sob aumento da temperatura, demonstrando que quanto maior for a temperatura, maior será o efeito dos sólidos solúveis na viscosidade aparente das amostras. Por fim, um modelo matemático triparmétrico Mizrahi-Berk foi o que melhor ajustou os dados experimentais. Esse modelo relaciona temperatura, concentração de sólidos solúveis e taxa de deformação, visando avaliar a influência destes parâmetros na viscosidade aparente das amostras.

Vryzas *et al.* (2016) estudaram o comportamento reológico de uma suspensão de bentonita em água na faixa de temperatura de 25°C a 70°C e pressão ambiente. Os experimentos foram realizados em um viscosímetro Grace M3600 com geometria “Couette”. As taxas de cisalhamento avaliadas foram 600, 300, 200, 100, 60, 30, 6 e 3 RPM. Também foi feita a caracterização físico-química das amostras usando difração (XRD) e fluorescência (XRF) de raios-X. Para ajuste dos dados experimentais, optou-se pelo modelo Herschel-Bulkley e as métricas de erros adotadas foram coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>) e soma dos resíduos quadrados. As

imagens obtidas na caracterização físico-química revelaram uma associação das partículas em diferentes configurações, o que desempenha um papel relevante no aspecto reológico. Segundo os autores, os resultados experimentais demonstraram que o fluido possui uma tensão limite de escoamento, que aumenta em função da temperatura por conta da floculação da bentonita, seguido de um afinamento, o qual tende a um comportamento newtoniano a altas temperaturas. Outro resultado obtido foi que para altas taxas de cisalhamento, o fluido era menos sensível a mudanças de temperatura, por conta quebra das estruturas géis; ao passo que para baixas taxas, a temperatura era relevante, por conta das redes de microestruturas formadas.

Anawe e Folayan (2018) avaliaram o comportamento reológico de um fluido de perfuração base água em diferentes temperaturas. A composição do fluido era água como meio contínuo, barita como agente adensante e bentonita, carboximetilcelulose, cloreto de potássio e hidróxido de sódio como aditivos. Os ensaios foram realizados em um viscosímetro, sob pressão de 1 atmosfera e nas temperaturas de 80°F, 120°F, 160°F e 200°F (aproximadamente 26°C, 49°C, 71°C e 93°C, respectivamente). Os modelos reológicos estudados foram o Newtoniano, Bingham, Lei de Potência Herschel-Bulkley e Casson; os dois últimos apresentaram os melhores ajustes, mas também não foi feita discriminação de modelos.

Montalvo *et al.* (2018) avaliaram a modelagem reológica de um suplemento alimentar (“whey”) em função da taxa de cisalhamento (faixas até 1000 s<sup>-1</sup>), temperatura (de 20°C até 90°C) e concentração total de sólidos (20%, 50%, 75% e 100%). Os efeitos térmicos na viscosidade foram ajustados pelo modelo de Arrhenius e de Košmerl *et al.* (2000). Os experimentos foram realizados em um reômetro Anton Paar MCR301 usando geometria de aletas. Os resultados obtidos demonstraram um comportamento de um fluido não newtoniano com propriedades dilatantes, com viscosidade aumentando em função da concentração de sólidos e com viscosidade diminuindo com o aumento da temperatura. Esse comportamento foi atribuído ao material de alto peso molecular que fica suspenso na fase aquosa formando uma solução complexa. Segundo os autores, o modelo de Herschel-Bulkley foi o que melhor ajustou os dados experimentais e o modelo de Košmerl *et al.* (2000) foi o que melhor ajustou os dados em função da temperatura.

Cheng *et al.* (2020) estudaram a influência do tempo e da temperatura (dentro do intervalo de 5°C até 50°C) na reologia e no escoamento de pasta de cimento. Os

autores observaram que com o aumento do tempo de cisalhamento, a taxa limite de escoamento diminui como uma função exponencial negativa e a viscosidade plástica diminui linearmente. Os autores também observaram que a tensão de escoamento muda exponencialmente com a temperatura e a viscosidade diminui linearmente com a temperatura. À medida que a temperatura aumenta, desenvolve-se uma estrutura de rede líquida, de tal forma que o movimento das partículas tende a ser ordenados sob a força de fluxo. Por isso, a tensão e limite de escoamento e a viscosidade diminuem. Além disso, concluíram que o material sofre efeito em função do tempo, pois é necessário aguardar cerca de 280 segundos para que a leitura de tensão fique constante, e sofre efeito da temperatura, que impacta diretamente na tixotropia e na tensão limite de escoamento devido à quebra de estruturas.

Tendo em vista os trabalhos citados anteriormente, verifica-se que em diferentes áreas do conhecimento não há um modelo reológico recomendado para todos os casos e que há estudos com diferentes materiais e condições experimentais. Esses trabalhos podem dar suporte para os resultados e discussões. Além disso, foi possível notar a ausência de rigor estatístico na estimação dos parâmetros, como não definir o intervalo de confiança, não apresentar a função objetivo a ser minimizada ou como foi feita a estimação e não discutir a significância dos parâmetros estimados.

## 2.5. FUNDAMENTOS DA SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é uma operação unitária de separação de sólidos e líquidos por gravidade, valendo-se do princípio da diferença de densidade entre os materiais envolvidos (PEÇANHA, 2014). Fatores como natureza do fluido, concentração de sólidos, diâmetro e formato da partícula, temperatura, pressão e inclinação do sistema podem influenciar tal fenômeno.

Os primeiros estudos foram realizados em fluidos newtonianos e ajudaram a construir o arcabouço teórico para a compreensão e modelagem do fenômeno. Estudos mais recentes objetivaram expandir tal abordagem para os fluidos não newtonianos, que é o caso dos fluidos de perfuração.

### 2.5.1. Sedimentação em Fluidos Newtonianos

A queda de partículas foi inicialmente estudada por Stokes (1851), tendo como hipóteses de sua formulação esferas lisas, rígidas e isoladas, fluido newtoniano e incompressível, escoamento lento a velocidades constantes e sem deslizamento. A partir da equação 21 é possível calcular a velocidade terminal nessas condições.

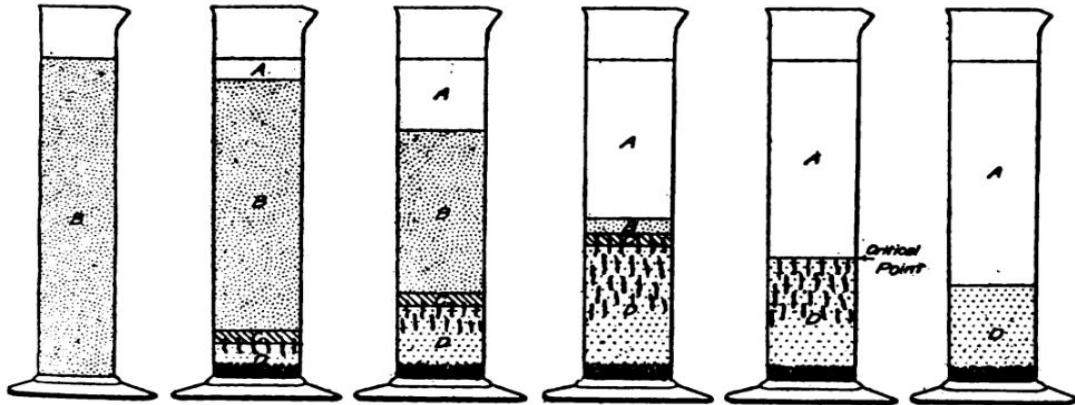
$$v_{t,stk} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_l)g}{18\mu} \quad (21)$$

Um dos primeiros estudos na área da sedimentação gravitacional data do início do século XX. Hazem (1904) *apud* Arouca (2007) estudou a sedimentação voltada para projeto de equipamentos e demonstrou que a quantidade de material particulado removido depende da área da seção transversal do tanque, das propriedades desse material e é inversamente proporcional ao fluxo através do tanque. Demonstrou-se também que o tempo de residência não era fator determinante para o seu projeto.

Coe e Clevenger (1916) estudaram a sedimentação de suspensões floculadas contendo diferentes tamanhos de partículas. Além disso, apresentaram um mecanismo e algumas justificativas para o processo, bem como um equacionamento para o projeto de um sedimentador contínuo baseado em testes em batelada.

Para o caso estudado de suspensões homogêneas, os autores notaram que, inicialmente, logo após cessar a mistura, a concentração de sólidos permaneceu constante em todo o recipiente de teste. Após um determinado tempo, as partículas assumiram a forma de flocos, os quais sedimentaram a uma velocidade constante, depositando-se no fundo do recipiente. Em seguida, com boa parte das partículas sedimentadas, ocorreu a expulsão de líquido mediante pressão exercida pelos próprios sólidos, provocando um fluxo ascendente de líquido através dos canais formados entre os sólidos até a zona de líquido isento de partículas. A Figura 12 apresenta um esquema do fenômeno de sedimentação e a equação 22 a formulação proposta para cálculo da velocidade superficial de sólidos.

Figura 12. Esquema representativo da formação de sedimentos em batelada.



Fonte: Coe e Clevenger, 1916.

$$q_s = \frac{v_{s0}}{\frac{1}{\varepsilon_{s0}} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (22)$$

Dessa forma, teve-se a formação de quatro regiões distintas: uma zona de líquido clarificado (A), uma zona de concentração de sólidos idêntica à concentração de sólidos inicial (B), uma zona de transição com concentração variável (C) e uma zona de compactação ou compressão (D). Ressalta-se que não houve uniformidade de tamanhos de partículas, abrindo-se a possibilidade de aparecimento de caminhos preferenciais. A partir desses resultados, conclui-se que a única exigência para o espessamento das suspensões estudadas seria fornecer tempo suficiente para que todo o líquido fosse expulso da região de sedimento até a zona de clarificado.

Comings (1940), dando continuidade ao trabalho de Coe e Clevenger (1916), concluiu que a metodologia proposta pelos autores somente era válida quando se tratava da formação de um sedimento incompressível. Usando suspensões de carbonato de cálcio, o autor defendeu que o processo de sedimentação é função do tempo de queda das partículas e da altura. Quando se tem um sedimento incompressível, forma-se uma estrutura sólida e rígida no fundo, a qual é capaz de suportar a pressão local sem deformar, mantendo a sua altura de sedimento constante. Contudo, quando o sedimento não é incompressível, essa estrutura sofre deformações por conta da pressão exercida pelos sólidos, de modo que a zona de compactação apresenta variações em sua altura.

Embora tal contestação tenha sido feita, não foi apresentado nenhum modelo matemático mais eficiente do que aquele desenvolvido anteriormente, de modo que a proposta de Coe e Clevenger (1916) perdurou até meados do século XX.

Somente em 1952, G. J. Kynch apresentou um trabalho sobre a teoria da sedimentação, o qual serviu de ponto de partida para diversas pesquisas e é referência até hoje no assunto. Em seu trabalho, a teoria proposta assume que a velocidade de queda das partículas em uma dispersão é uma função apenas da concentração volumétrica local. O autor propôs um equacionamento baseado na equação da continuidade para descrever a sedimentação em bateada. O estudo baseou-se no monitoramento da interface superior (ou descendente) em função do tempo e no conhecimento da concentração inicial da suspensão para execução do teste de proveta. As seguintes hipóteses foram admitidas:

- A sedimentação é unidimensional, ou seja, a sedimentação de sólidos ocorre apenas na direção do campo gravitacional e a concentração de sólidos é constante para um mesmo plano horizontal;
- Ocorre o aumento da concentração em direção ao fundo com o tempo;
- A velocidade de sedimentação das partículas tende a zero quando a concentração tende ao seu valor máximo;
- A velocidade de sedimentação é função apenas da concentração volumétrica local;
- Os efeitos de parede são desprezíveis;
- A suspensão é incompressível, formada por partículas pequenas, de mesmo tamanho, forma e densidade.

Tais considerações e observações experimentais levaram o autor a constatar que o aumento da concentração da suspensão causa uma diminuição da velocidade de sedimentação das partículas. Dessa forma, aborda-se a sedimentação como um fenômeno no qual a concentração de sólidos é função do tempo; de forma análoga a velocidade de sedimentação das partículas é função da posição ao longo da coluna.

O processo de sedimentação foi descrito por meio da equação de conservação da massa, sem levar em conta o balanço de forças que atuam sobre as partículas, conforme descrito nas Equações 23, 24 e 25 abaixo.

$$q_s = \varepsilon_s v_s \quad (23)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + v^*(\varepsilon_s) \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

$$v^*(\varepsilon_s) = \frac{dq_s}{d\varepsilon_s} = \frac{dx}{dt} \quad (25)$$

Embora as condições iniciais e de contorno necessárias para a resolução das equações apresentadas acima não tenham sido explicitamente indicadas no trabalho original, pode-se deduzir, conforme apresentado nas equações 26 e 27 que:

$$\varepsilon_s(t = 0, x) = \varepsilon_{s0} \quad (26)$$

$$\varepsilon_s(t > 0, x = 0) = \varepsilon_{sm} \quad (27)$$

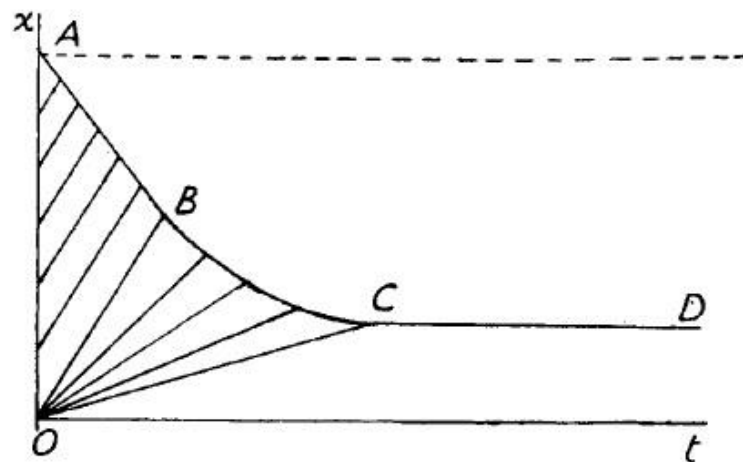
Tendo a base do recipiente como referencial, o equacionamento proposto pelo autor prediz o comportamento de ondas de equi-concentração no sentido ascendente (interface superior). O sentido descendente (interface inferior) pode ser previsto somente através de análise empírica.

A teoria ainda apresenta quatro regiões distintas para a sedimentação em batelada (Figura 13). São elas: **Região de líquido clarificado** (região acima da curva ABCD), onde a concentração de sólidos é nula; **região de sedimentação livre** (delimitada pelos pontos AOB), onde a concentração de sólidos é igual a concentração inicial e a velocidade de sedimentação é constante; **região de transição** (delimitada pelos pontos BOC), onde ocorre o aumento da concentração e a velocidade decresce até atingir a concentração máxima de sólidos; e **região de formação do sedimento** (delimitada pelos pontos COD), onde a concentração de sólidos é máxima e a velocidade de sedimentação é nula. Na Figura 14 é possível fazer um comparativo entre a proposta de Coe e Clevenger (1916) e Kynch (1952).

Apesar de “*A Theory of Sedimentation*” (KYNCH, 1952) ter representado um marco nos estudos da sedimentação em batelada, tal teoria não é capaz de representar adequadamente o fenômeno para os casos de formação de sedimentos compressíveis. A limitação dessa teoria ocorre, pois o modelo matemático de Kynch (1952) é uma abordagem puramente cinemática, que desconsidera os efeitos inerciais, as forças de interação sólido-líquido, sólido-sólido e os efeitos gravitacionais inerentes ao processo de sedimentação (AROUCA, 2007).

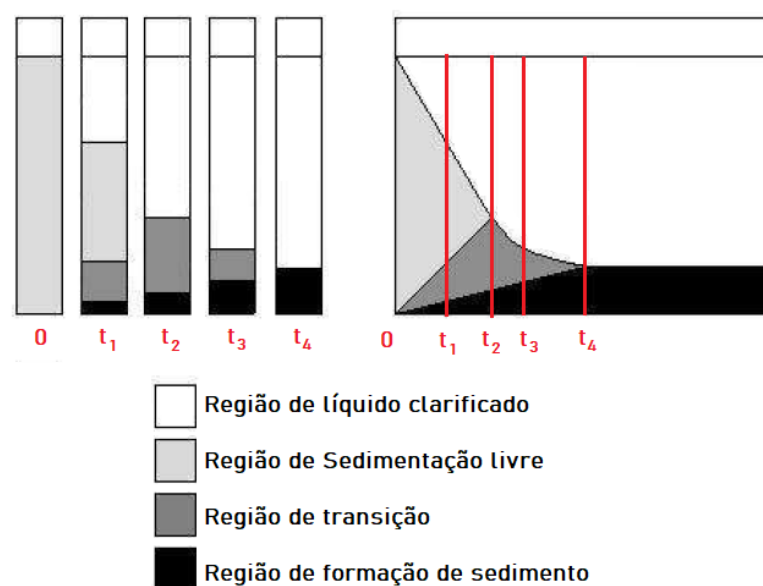


Figura 13. Curva de sedimentação. Altura da interface em função de tempo, apresentando linhas de propagação da concentração de sólidos quando concentração inicial é uniforme.



Fonte: Kynch, 1952.

Figura 14. Comparativo da proposta de Coe e Clevenger (1916) e Kynch (1952).



Fonte: Arouca, 2007 (editado).

Richardson e Zaki (1954) analisaram experimentalmente o efeito da concentração de sólidos na taxa de sedimentação das partículas em processos do tipo batelada e fluidização líquido-líquido. Os autores sugeriram que sob condições viscosas ( $Re_p < 0,2$ ), a velocidade de sedimentação ( $v_s$ ) relativa à velocidade terminal de uma partícula isolada ( $v_\infty$ ) depende apenas da concentração volumétrica de sólidos ( $\varepsilon_s$ ), segundo a equação 28. Deve-se ainda mencionar que o referencial da

posição na coluna de sedimentação foi arbitrariamente escolhido como a base sendo o referencial; assim, a velocidade dos sólidos nessa equação é negativa.

$$\frac{v_s}{v_\infty} = -(1 - \varepsilon_s)^{4,7} \quad (28)$$

Talmage e Fitch (1955) trouxeram como diferencial uma proposta gráfica para dimensionamento de sedimentadores contínuos, valendo-se dos dados obtidos em ensaios em batelada e abordagem empírica. Tal metodologia é válida quando houver uma região linear no início do processo seguida de outra exponencial. Após modificações e adições propostas por Foust *et al.* (1960) e Biscaia Jr (1984) *apud* Peçanha (2014), chegou-se a um método gráfico, no qual os dados de sedimentação são plotados em um papel milimetrado com altura da interface de clarificado em função do tempo. Além disso, Talmage e Fitch (1955) compararam os métodos de Coe e Clevenger (1916) e Kynch (1952). Os resultados obtidos demonstraram a equivalência entre as duas metodologias apenas para baixas concentrações e indicaram maior adequabilidade do método de Kynch (1952). A teoria de Kynch (1952) também foi posteriormente validada em experimentos com esferas de vidro rígidas realizadas por Shannon *et al.* (1964), Tory e Shannon (1965), Shannon e Tory (1965).

Chakravarti e Dell (1969) avaliaram o comportamento de argilas flocculadas. Em seus experimentos em batelada, foi demonstrado que a taxa de formação de sedimentos em uma dada concentração decai exponencialmente com um tempo, ao contrário do que até então havia sido apresentado na literatura. Até aquele momento, as teorias descreviam que a taxa de sedimentação no início do processo deveria ser constante, descrevendo uma região linear no gráfico posição da interface superior contra tempo. A justificativa apresentada pelos autores para uma taxa exponencial (e, portanto, não linear) foi associar aos mecanismos de compressão do sedimento e expulsão de líquido na zona de compressão, sendo ambos função da massa total de sólidos na coluna.

Harris *et al.* (1975) estudaram a sedimentação em batelada de materiais compressíveis e obtiveram conclusões semelhantes às descritas por Chakravarti e Dell (1969). Ao analisar as curvas de sedimentação desses materiais, os autores identificaram várias regiões de sedimentação, cada qual governada por um

mecanismo específico e sem que nenhuma delas apresentasse velocidade de sedimentação constante.

Além disso, os autores propuseram equações fenomenológicas para caracterizar cada região baseados na taxa de líquido que se desloca para cima e na resistência a esse escoamento. As hipóteses por trás dessa abordagem eram: (1) que durante qualquer estágio no processo de sedimentação, a taxa na qual a água é expulsa da suspensão e cruza a interface superior depende da quantidade de água contida logo abaixo desta interface; e (2) a resistência a esse escoamento ascensional da fase contínua depende da quantidade de água que anteriormente cruzou a interface e que se encontra acima dessa zona. Dessa forma, foi possível apresentar o modelo em função da fração de líquido abaixo da interface descendente e reescrever em termos das alturas correspondentes aos limites das regiões de sedimentação. Com esse modelo, os autores conseguiram bons ajustes aos dados experimentais do decaimento da interface superior.

Dixon (1977) realizou um estudo teórico considerando o balanço de forças atuantes na sedimentação em batelada de suspensões inicialmente homogêneas. Em seu trabalho, as fases líquida e sólida foram tratadas como contínuas e interagindo entre si. Tal interação foi descrita pela força de arraste sobre os sólidos, que por sua vez foi considerada como função da concentração e da velocidade relativa. A principal conclusão apresentada pelo autor foi a impossibilidade de se formar um gradiente de concentração na zona de sedimentação livre, pois as velocidades não podem variar sem a atuação de forças. Partindo-se do princípio de que a resultante das forças que agem sobre o sistema é nula na zona de sedimentação livre, a velocidade dos sólidos é constante, assim como a concentração local. Dessa forma, quando um gradiente de concentração é formado, precisa ser necessariamente na zona de compressão, pois apenas nessa região é que se encontram presentes as forças necessárias (interações partícula-partícula e, conseqüentemente, a transmissão de pressão entre elas) para produzir um aumento na concentração de sólidos. Deve-se destacar ainda que para Dixon (1977), a região de compressão envolve as zonas C e D observadas por Coe e Clevenger (1916).

D'Ávila (1978) apresentou um rigoroso modelo matemático para descrever a sedimentação em batelada baseado na Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo, levando em conta o balanço de forças que atuam sobre as partículas. Em seu trabalho,

o autor avaliou sistematicamente as condições de saltos para conservação de massa e da quantidade de movimento linear. Além disso, avaliou os efeitos de restrições internas puramente mecânicas em um sistema sólido-fluido. Também foi estudado o caso particular da restrição da incompressibilidade de ambos os constituintes, obtendo-se uma restrição nas tensões dos constituintes sólido e líquido. Para simplificar a análise do problema, o autor considerou que: (1) a sedimentação é um fenômeno unidimensional; (2) as fases são incompressíveis; (3) os efeitos de paredes são negligenciáveis; e (4) os tensores tensões nos constituintes sólido e líquido são funções apenas da porosidade do meio, conforme descrito na equação 29.

$$T_s = T_s(\varepsilon_s) = -P_s(\varepsilon_s) \quad (29)$$

Partindo-se da hipótese de que as velocidades de sedimentação do sólido e do fluido no fundo do recipiente eram nulas, o problema de sedimentação em batelada necessitava de outras condições de contorno. Então, utilizou-se a resolução das equações da continuidade e do movimento para o sólido. Adotando equações constitutivas relativas à tensão nos sólidos e à força resistiva, percebeu-se que o sistema de equações apresentava carácter hiperbólico, prevendo o deslocamento de duas interfaces, uma ascendente e outra descendente.

Cada região delimitada pelas interfaces pode ser modelada valendo-se das equações da continuidade e do movimento, além de equações constitutivas específicas. Assim sendo, o autor demonstrou matematicamente a formação de duas descontinuidades no processo de sedimentação, as quais delimitam três regiões distintas: (1) a região de líquido clarificado; (2) a região de sedimentação propriamente dita; e (3) a região constituída de um depósito de sólidos com algum líquido retido (zona de compressão).

Em virtude das descontinuidades se deslocarem no espaço delimitando as três regiões mencionadas acima, a abordagem proposta por D'Ávila apresenta subdomínios variáveis que qualificam a sedimentação como um problema de fronteira móvel. Contudo, o método utilizado não possibilita a obtenção de informações da zona de compressão, pois o problema se encerra no ponto de encontro das duas descontinuidades. Isso acontece por conta de saltos nos valores de propriedades, como concentração e pressão nos sólidos, que caracterizam cada uma das regiões.

Hamacher (1978, apud AROUCA, 2007) realizou testes de sedimentação em batelada com o uso da Técnica de Atenuação de Raios Gama e determinou equações empíricas para descrever o perfil de concentração de sólidos como função da posição e do tempo. Por meio das equações da continuidade e do movimento, concluiu-se que a velocidade de sedimentação e a pressão nos sólidos não podem ser expressas exclusivamente como funções da fração volumétrica local dos sólidos e que os termos inerciais (acelerações local e convectiva da equação do movimento) são desprezíveis em comparação com os demais termos.

Tiller e Leu (1980) propuseram uma série de equações constitutivas para a permeabilidade e tensão nos sólidos. Os autores propuseram que ambas as propriedades eram função unicamente da concentração local de sólidos. Os parâmetros associados ao equacionamento foram obtidos através de experimentos de filtração. A permeabilidade do meio foi representada pela equação 30, constituída de três parâmetros ( $K_{sc}$ ,  $\epsilon_c$  e  $\eta$ ).

$$K = K_{sc} \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \right)^{-\Psi} \quad (30)$$

Já para caracterizar a pressão nos sólidos, foram estabelecidas as relações constitutivas dadas pelas equações 31, 32 e 33, em que  $P_s$  e  $\epsilon_s^*$  representam, respectivamente, a pressão e a concentração da fase sólida em condições de pressão nula nas partículas.  $P_{sa}$  e  $\beta$  são parâmetros a serem determinados.

$$P_s = P_{sa} \left[ \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s^*} \right)^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right] \quad (31)$$

$$P_s = P_{sa} \exp \left( -\frac{1}{\epsilon_s} \right) \quad (32)$$

$$P_s = P_{sa} \exp(\beta \epsilon_s) \quad (33)$$

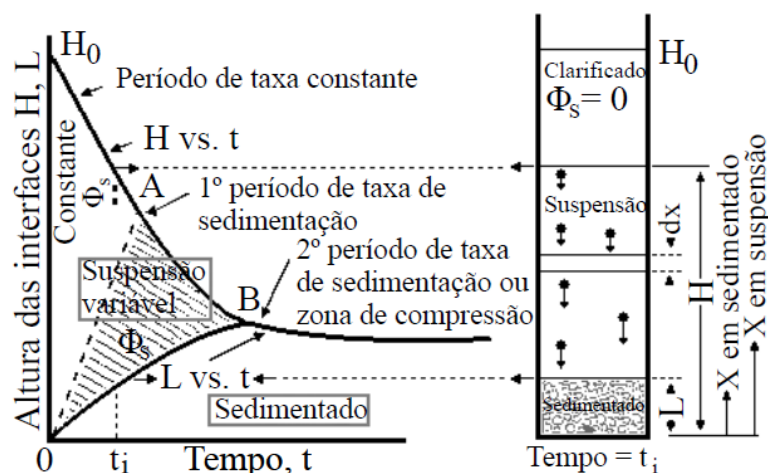
Embora originalmente propostas para a filtração, as equações constitutivas para a pressão nos sólidos podem ser utilizadas em estudos de sedimentação em batelada, especialmente ao longo da zona de compressão ou formação de sedimento. Nesse contexto, a condição de pressão nula nos sólidos é admita ocorrer no início

dessa região. Os resultados ajustaram bem os dados experimentais e suas relações são usadas até os dias atuais.

Tiller (1981) propôs uma nova abordagem da teoria da sedimentação de Kynch (1952), a fim de estender o modelo para suspensões compressíveis. O autor estudou o problema da sedimentação em batelada levando em consideração duas interfaces: uma superior descendente, entre a zona de clarificado e a zona de concentração constante, e uma inferior ascendente, entre a zona de concentrações variáveis e a de compactação. Na Figura 15, é possível observar as duas interfaces, onde  $H$  representa a ascendente e  $L$  represente a descendente.

Os resultados obtidos foram positivos apenas para sistemas com baixa compressibilidade, falhando consideravelmente para sistemas com compressibilidade acentuada. Além disso, a proposta do autor possui as limitações de requerer o monitoramento das duas interfaces, o que é difícil do ponto de vista prático e nem sempre é possível, como no caso de suspensões opacas.

Figura 15. Interfaces da sedimentação proposto por Tiller (1981).



Fonte: Tiller (1981) adaptado por Rocha (2018).

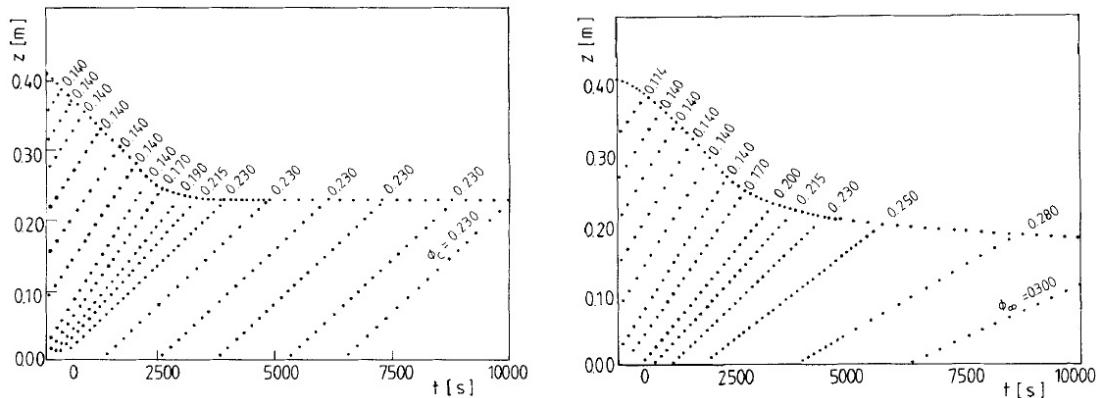
Wakeman e Holdich (1984) estudaram os efeitos da pressão nos sólidos e nos líquidos para o processo de sedimentação em batelada. Através de dados experimentais de concentração de sólidos em função da posição e do tempo, os autores avaliaram a importância dos termos inerciais da equação do movimento. Na zona de compactação, esses termos possuem pouca influência na dinâmica de sedimentação das partículas quando comparadas com as forças gravitacional e de

arrasto. Porém, em regiões acima da zona de compactado, esses termos não podem ser negligenciados devido a mudança abrupta na concentração de sólidos.

Concha e Bustos (1987) também propuseram uma modificação ao método apresentado por Kynch (1952), mais especificamente na zona de compactação dos sólidos, a fim de atender a hipótese de compressibilidade. Para isso, foi proposta a modificação de uma condição de contorno. Assumindo que a pressão nos sólidos depende somente da concentração, a condição de contorno modificada propunha a aplicação da equação do movimento na fronteira da zona de compactação. Utilizando soluções numéricas, os autores comprovaram que tal abordagem produz resultados mais precisos do que aqueles apresentados por Kynch (1952).

Os autores demonstraram ainda que para suspensões muito compressíveis, a zona de compactação não é representada por uma linha reta horizontal, mas sim por uma assíntota, podendo ainda haver maiores compressões, conforme apresentado na Figura 16. A equação 34 apresenta a proposta dos autores ao modelo de Kynch.

Figura 16. A esquerda, modelo segundo KYNCH (1952); a direita, após modificação proposta por CONCHA & BUSTOS (1987) para condição de contorno.



Fonte: Concha e Bustos, 1987.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} = - \frac{(\rho_s - \rho_f) g \varepsilon_s}{\frac{dP_s}{d\varepsilon_s}}; \forall t \text{ quando } z = 0 \quad (34)$$

Damasceno (1992) realizou um estudo teórico do espessamento contínuo, com auxílio da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG), desenvolvendo um modelo matemático baseado na Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo. Para isso, o

autor propôs uma metodologia baseada em equações constitutivas para a tensão nos sólidos e permeabilidade do sedimento, admitindo-se que as variáveis dependeriam apenas da porosidade local. Ao realizar simulações em espessadores contínuos em regime permanente e transiente, o autor observou que tais equipamentos apresentam um grande tempo de resposta a alterações em suas condições operacionais. Além disso, a altura do sedimento possui elevada relevância nessa operação. Conclui-se que a queda das partículas sólidas em um fluido pela ação da gravidade pode ser descrita pela sedimentação propriamente dita – com pouca interação intermolecular – e pela compressão – ocorrendo o rearranjo das partículas sólidas numa matriz porosa com baixa porosidade, onde a interação intermolecular é de grande importância. Portanto, pode-se estudar a decantação desprezando-se os efeitos da interação sólido-sólido, conforme proposto por Kynch (1952). Contudo, tal premissa não pode ser utilizada no estudo da compressão, onde tais efeitos são significativos.

Stamatakis e Tien (1992) avaliaram a sedimentação de suspensões polidispersas e os efeitos da compressibilidade do sedimento formado durante o processo em batelada. Os autores propuseram um equacionamento baseado na solução da equação da continuidade para as fases sólida e líquida, acoplando correlações existentes para estimar a velocidade de sedimentação das partículas de diferentes tamanhos. Para isso, foi usada a Lei de Darcy para o movimento relativo fluido-partícula e equações constitutivas empíricas relacionando a permeabilidade do sedimento e porosidade com a tensão nos sólidos. Contudo, para que o modelo fosse aplicado, fez-se necessário o uso de fronteiras móveis para descrever as regiões de sedimentação, o que aumenta drasticamente a sua dificuldade de implementação.

Holdich e Butt (1995) investigaram o efeito da formação de canais (*“channeling”*) no processo de sedimentação de suspensões de calcita, talco e aragonita. Os autores constataram que esse fenômeno conduz a um aumento significativo na taxa de queda da interface superior e, portanto, no fluxo de sedimentação de sólidos. Isso ocorre porque o “canal” constitui um meio pelo qual o líquido escoar para a região de clarificado, não necessitando de passar pelo meio poroso formado pelas partículas da suspensão que estão sedimentando. Os autores observaram ainda que promover leve agitação durante o processo de sedimentação pode ocasionar a ruptura dos canais, aumentando substancialmente a concentração de sedimento. Esses resultados corroboram os resultados de Scott



(1968), que já havia mencionado esse termo e descrito que esse fenômeno poderia impactar no processo de sedimentação.

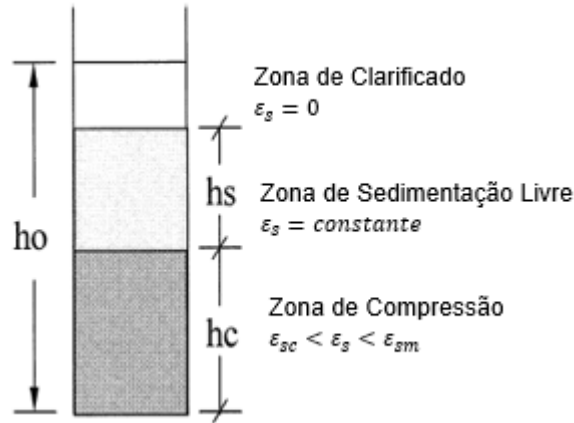
Bürger e Concha (1998) desenvolveram um modelo fenomenológico baseado nos princípios básicos da mecânica do contínuo levando em consideração os efeitos da compressão, da pressão dos sólidos e da permeabilidade do sedimento. O modelo proposto apresenta uma equação diferencial hiperbólica de primeira ordem para a sedimentação e uma equação diferencial parcial de segunda ordem parabólica para consolidação do sedimento, sendo a interface de mudança de uma equação para a outra desconhecida previamente. A fim de resolvê-las, o autor usou o método numérico de diferenças finitas. O grande avanço foi a abordagem matemática que permite a resolução em todo o domínio do espaço e do tempo, sem a necessidade de divisões em subdomínios de fronteiras móveis. Contudo, a localização da interface entre essas duas regiões é, em geral, previamente desconhecida, sendo essa a principal dificuldade na formulação matemática do modelo. Ainda assim, os resultados numéricos obtidos apresentaram boa concordância quando comparados aos dados obtidos experimentalmente para os ensaios em batelada.

Zheng e Bagley (1999) simularam numericamente o processo de sedimentação em batelada usando um modelo dinâmico descrevendo as zonas de sedimentação livre e de compactação. Os resultados das simulações fornecem a variação da altura da interface descendente com o tempo, bem como o perfil de concentração dos sólidos. Os dados simulados foram capazes de prever satisfatoriamente os resultados experimentais descritos na literatura. Segundo os autores, as vantagens do método apresentado envolvem a sua fácil implementação e a possibilidade de se determinar os quatro parâmetros da compressão do sedimento diretamente a partir dos dados de decaimento da interface superior.

França, Massarani e Biscaia Jr. (1999) estudaram a simulação da sedimentação em batelada e propuseram uma metodologia para estimar os parâmetros das equações constitutivas de permeabilidade e pressão nos sólidos. Tal metodologia considera a coexistência das zonas de sedimentação livre e de compressão, conforme demonstrado na Figura 17. O modelo segue uma abordagem fenomenológica, utilizando as equações da conservação de quantidade de movimento e massa para as fases sólida e líquida em cada região. Na zona de sedimentação livre, a concentração volumétrica de sólidos é constante e as partículas sedimentam

livremente sem interação entre elas. Seguindo as hipóteses propostas, os autores estabeleceram equações descrevendo a velocidade de deslocamento da interface superior e para a variação de sua altura em função do tempo, conforme descrito, respectivamente, pelas equações 35 e 36.

Figura 17. Representação esquemática das zonas de sedimentação.



Fonte: FRANÇA, MASSARANI e BISCAIA Jr.,1999 (Adaptado).

$$v_{sup} = k_2 \left( \frac{1 - e^{-k_1 t}}{k_1} \right) \quad (35)$$

$$h = h_0 - \lambda \left( t - \frac{1 - e^{-k_1 t}}{k_1} \right) \quad (36)$$

Nas equações 35 e 36,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $\lambda$  são representados por:

$$k_1 = \frac{\mu}{K(\varepsilon_{s0})\rho_s \varepsilon_{s0}} \quad (37)$$

$$k_2 = \frac{(\rho_s - \rho_l)g}{\rho_s} \quad (38)$$

$$\lambda = \frac{k_1}{k_2} \quad (39)$$

Sendo:  $\mu$  viscosidade do líquido;  $\varepsilon_{s0}$  concentração inicial de sólidos na suspensão;  $g$  aceleração da gravidade;  $\rho_s$  densidade dos sólidos; e  $\rho_l$  densidade do líquido.  $K(\varepsilon_{s0})$  refere-se à permeabilidade do meio. Sua dependência com a porosidade foi estabelecida por uma expressão do tipo Kozeny-Carman e envolve a determinação de dois parâmetros ( $\alpha$  e  $\gamma$ ), de tal forma que:

$$K(\varepsilon_s) = (\alpha + \gamma \varepsilon_s) \frac{(1 - \varepsilon_s)^3}{\varepsilon_s^2} \quad (40)$$

No entanto, os efeitos de interação sólido-sólido tornam-se significativos na zona de compressão e a concentração das partículas varia com o tempo e com o espaço. As equações descrevendo a dinâmica de sedimentação nessa zona são descritas pelas equações 41 e 42.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} - \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0 \quad (41)$$

$$\rho_s \left[ \frac{\partial q_s}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{q_s^2}{\varepsilon_s} \right) \right] = \frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{\mu q_s}{K(\varepsilon_s)} + (\rho_s - \rho_l) g \varepsilon_s \quad (42)$$

As quais estão sujeitas às seguintes condições de contorno:

$$z = 0; \quad q_s = 0 \quad (43)$$

$$z = h_c(t); \quad \varepsilon_s = \varepsilon_{sc}; \quad P_s = 0 \quad (44)$$

O fato da altura da zona de compressão,  $h_c$ , ser função do tempo, caracteriza a abordagem dos autores como um problema de fronteira móvel. Uma vez que o uso de condições de salto resulta em dificuldades numéricas na solução do problema, foram propostas equações de balanço global, permitindo o acoplamento das zonas de sedimentação livre e de compressão. Para isso, uma equação de restrição das alturas e uma equação de balanço de massa global foram necessárias, conforme apresentado abaixo nas Equações 45, 46 e 47.

$$h_s(t) + h_c(t) = h(t) \quad (45)$$

$$\varepsilon_{s0} h_s(t) + \bar{\varepsilon}_s h_c = \varepsilon_{s0} h_0 \quad (46)$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{h_c(t)} \int_0^{h_c} \varepsilon_s(z, t) dz \quad (47)$$

Os parâmetros relativos à permeabilidade do meio e pressão de sólidos foram determinados a partir de simulações realizadas com o objetivo de ajustar os dados experimentais disponíveis de monitoramento da interface superior. Os resultados

obtidos para alturas da zona de compactação no sedimentador contínuo aproximaram-se dos valores experimentais.

Kinnear (2002) estudou a sedimentação unidimensional de lodo ativado e desenvolveu um modelo para descrever as características e a velocidade de sedimentação desse material. Para isso, o autor utilizou propriedades fundamentais, como a densidade dos sólidos secos, a densidade dos flocos, a permeabilidade e a resistência à compressão. O modelo foi obtido a partir da equação da continuidade e do movimento para as fases líquida e sólida. A força resistiva foi descrita pela lei de Darcy. A permeabilidade foi descrita pela equação empírica de Kozeny-Carman. Por fim, a pressão nos sólidos foi descrita pela equação empírica de Buscall e White (1987). A técnica numérica empregada foi de volumes finitos. Inicialmente, a expressão para a velocidade foi capaz de prever precisamente a altura da interface superior ao longo da zona de sedimentação livre. Contudo, o modelo não apresenta o mesmo desempenho ao descrever as regiões de transição e compactação. No entanto, o autor demonstrou que as respostas do modelo podem ser consideravelmente aperfeiçoadas caso a concentração crítica apresentasse dependência com o tempo.

Arouca (2007) estudou o processo de sedimentação em batelada para três materiais sólidos: caulim, carbonato de cálcio e microesferas de vidro, usando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG). Os três materiais apresentaram significativas diferenças a respeito da densidade das fases, formas das partículas e nas distribuições de tamanho, o que pode em última análise afetar o processo de sedimentação. Foi proposto um modelo matemático unidimensional parabólico-hiperbólico a partir das ideias de d'Ávila (1978) e de Bürger e Concha (1998), com a introdução de um modelo de potências biparamétrico para a tensão nos sólidos. Os resultados das simulações numéricas demonstraram que o modelo proposto descrevia adequadamente o processo em todo seu domínio, sem uso das condições de saltos nas fronteiras móveis. Além disso, notou-se que melhores resultados eram obtidos para sistemas pouco permeáveis e que a qualidade das soluções se restringe à qualidade das equações constitutivas para o material sólido.

Nocon (2010) monitorou o processo de sedimentação a partir da pressão hidrostática do sistema, apresentando uma opção de monitoramento e controle mais barata. O autor utilizou um modelo fenomenológico para descrever o processo de

sedimentação em batelada e propôs que a influência do processo sobre a pressão hidrostática resulta apenas da distribuição de sólidos ao longo da posição e do tempo. Os resultados experimentais demonstraram que é possível distinguir entre perturbações superficiais temporárias e falhas no processo de sedimentação. No entanto, os resultados da simulação no início da sedimentação forneceram valores menores que os experimentais, sendo necessário uma abordagem mais refinada para usar o modelo.

Os experimentos de sedimentação em batelada usando fluidos newtonianos foram fundamentais para o desenvolvimento do conhecimento e são relevantes até os dias atuais. No entanto, a fim de melhor entender o comportamento de outros tipos de fluidos, como os de perfuração, foi necessário estudar o comportamento da sedimentação de partículas em fluidos não newtonianos.

#### 2.5.2. Sedimentação Em Fluidos não-Newtonianos

Modelar a sedimentação de material particulado em um meio contínuo de qualquer natureza exige a definição do termo de interação sólido-fluido, também conhecido como força resistiva. Nesse contexto, Massarani e Telles (1978) trouxeram valiosa contribuição. Os autores avaliaram o escoamento de fluidos não newtonianos em sistemas particulados. Os autores listaram as diferenças de comportamento encontradas ao trabalhar com fluidos não newtonianos em relação aos fluidos newtonianos. A modelagem proposta, descrita na Equação 48, baseou-se na equação do movimento para o fluido, na análise dimensional e em equações constitutivas para o termo de interação fluido-matriz porosa, desenvolvendo uma expressão para o termo de interação dinâmica fluido-partícula ( $l$ ). Para os 110 pontos experimentais obtidos por meio de uma série de experiências com partículas esféricas e em forma de discos com diferentes esfericidades, observou-se sempre um desvio inferior a 10%. Os resultados se restringiram ao movimento lento (sedimentação) de partículas isoladas em meio fluido não newtoniano.

$$l = \frac{18\tau(\lambda^*)}{d_p \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|} \frac{\phi(\alpha)}{\theta(\alpha)} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (48)$$

Sendo a taxa de cisalhamento característica dada pela equação 49:

$$\lambda^* = \frac{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|}{d_p} \theta(\phi) \quad (49)$$

Nas equações acima, as variáveis em negrito indicam vetores:  $\mathbf{l}$ , o termo de interação; e  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{v}$  as velocidades do fluido e da partícula, respectivamente.  $\tau$  refere-se à tensão de cisalhamento;  $d_p$ , ao diâmetro da partícula e  $\phi(\alpha)$ ; e  $\theta(\alpha)$  são funções dependentes da esfericidade.

Medidas de velocidade terminal das partículas ( $v_t$ ) em queda livre permitiram a determinação das funções  $\phi(\alpha)$  e  $\theta(\alpha)$ . A primeira foi obtida através da equação do movimento para a partícula, na qual o termo de interação sólido-fluido é dado pela equação 50, ambas aplicadas quando o meio fluido é newtoniano:

$$\phi(\alpha) = \frac{(\rho_s - \rho_f) g d_p^2}{18 v_t \mu} \quad (50)$$

Sendo  $\rho_s$  e  $\rho_f$ , respectivamente, as densidades do sólido e do fluido; e  $\mu$  a viscosidade da fase líquida. Determinado o valor de  $\phi(\alpha)$ , experiências com fluidos não newtonianos de reologia conhecida ( $\tau(\lambda)$ ) conduziram a  $\theta(\alpha)$  através da seguinte equação:

$$(\rho_s - \rho_f) g = \frac{18 \phi(\alpha) \tau(\lambda)}{d_p \theta(\alpha)}, \quad \lambda = \frac{v_t}{d_p} \theta(\phi) \quad (51)$$

Telles e Massarani (1979) também deram relevante contribuição para o estudo da força resistiva, investigando o escoamento de fluidos não newtonianos através de meios porosos fixos e fluidizados. Baseados na Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo e na análise dimensional, os autores propuseram uma equação constitutiva para o termo de interação fluido-matriz porosa.

$$\mathbf{m} = \frac{1}{k} \frac{\tau(\lambda^*)}{\lambda^*} \left[ 1 + c \frac{\rho_f \sqrt{k} \|\varepsilon \mathbf{U}\|}{\frac{\tau(\lambda^*)}{\lambda^*}} + c_1 \frac{\sigma_1(\lambda^*)}{\tau(\lambda^*)} + c_2 \frac{\sigma_2(\lambda^*)}{\tau(\lambda^*)} \right] \varepsilon \mathbf{U} \quad (52)$$

Sendo  $(\varepsilon \mathbf{U})$  a velocidade superficial do fluido, com a velocidade relativa ( $\mathbf{U}$ ) dada como a diferença entre as velocidades do fluido e do sólido ( $\mathbf{U} = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s$ );  $K$  é a

permeabilidade; e  $\varepsilon$  é a porosidade do meio;  $\rho_f$  é a densidade do fluido e  $c$ ,  $c_1$  e  $c_2$  são fatores geométricos a serem determinados.  $\tau(\lambda^*)$ ,  $\sigma_1(\lambda^*)$  e  $\sigma_2(\lambda^*)$  são três funções materiais dependentes da taxa de cisalhamento característica ( $\lambda^*$ ), conforme segue:

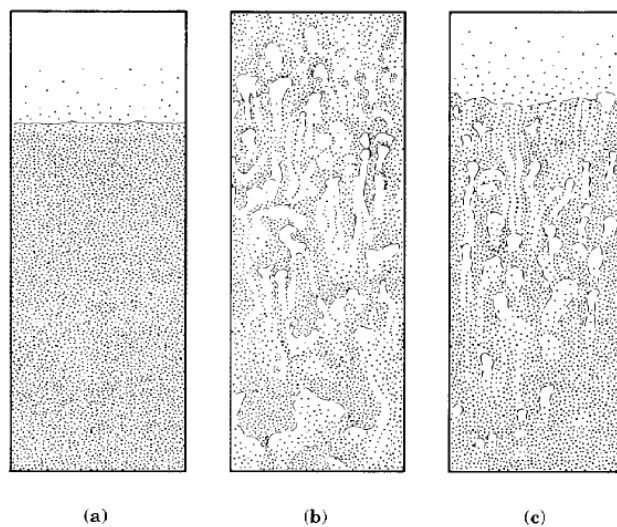
$$\lambda^* = \frac{\|\varepsilon \mathbf{U}\|}{\zeta \sqrt{k}} \quad (53)$$

Sendo, por sua vez, depende de um outro fator geométrico ( $\zeta$ ) da matriz porosa. Outro ponto relevante é que a formulação dos autores também leva em conta os possíveis efeitos de viscoelasticidade do fluido. Uma restrição à aplicação dessa equação é que a força resistiva proposta pelos autores é limitada a sistemas em que a matriz porosa é indeformável e não interage com o meio contínuo.

Buscall *et al.* (1982) investigaram experimentalmente a taxa de sedimentação de dispersões de poliestireno em soluções salinas em um meio polimérico pseudoplástico. Em seu estudo, o autor concluiu que a sedimentação das partículas era função da viscosidade aparente, que, por sua vez, era equivalente à taxa de deformação inicial da suspensão.

Allen e Uhler (1989) observaram uma sedimentação não homogênea em fluidos viscoelásticos com escoamento lento. Essa condição era caracterizada pelo aparecimento de “bolsas de líquido ascendentes” dentro do leito de compactação. O tamanho dessas cavidades foi relacionado ao grau de viscoelasticidade do fluido. A Figura 18 apresenta a diferença para um fluido newtoniano e um viscoelástico observada pelos autores.

Figura 18. Fotos da sedimentação de (a) fluido newtoniano; (b e c) fluido não newtoniano.



Fonte: Allen e Uhler, 1989.

Lali *et al.* (1989) estudaram o comportamento de partículas sólidas em soluções não newtonianas, avaliando a velocidade de sedimentação, efeitos de parede e expansão do leito fluidizado. As soluções estudadas foram de CMC, cuja concentração variou de 0,2% a 2% em peso. As velocidades de sedimentação foram medidas em nove colunas com diferentes diâmetros na faixa de 9 a 200 mm. Para avaliar o efeito de parede, usou-se a razão entre o diâmetro da partícula ( $d_p$ ) e o diâmetro da coluna ( $D$ ) na faixa de 0,05 a 0,78. O número de Reynolds da partícula foi estudado na faixa de 0,002 até 150. Nesse contexto, foi obtida uma correlação o efeito de parede como uma função da razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro da coluna e do número de Reynolds de partícula. Os resultados demonstraram que para número de Reynolds entre 0,005 e 0,5, o valor máximo da razão  $d_p/D$ , para o qual o efeito de parede foi ausente, variou de 0,05 a 0,02. Portanto, o efeito de parede e de expansão do leito fluidizado podem ser negligenciados nos processos de sedimentação em batelada, posto que o diâmetro dos sólidos é, em geral, expressivamente menor do que o diâmetro da coluna de sedimentação.

Laruccia (1990) avaliou a velocidade de sedimentação em fluidos não-newtonianos. O autor propôs um cálculo de coeficiente de arraste de partículas não esféricas, sedimentando em fluidos não newtonianos independentes do tempo, em regimes de escoamento laminar, transição e turbulento e não dependendo de um modelo reológico particular do fluido. Além disso, o autor analisou a influência da concentração de partículas sólidas para a velocidade de queda de partículas não esféricas nesses fluidos. A partir do coeficiente de arraste e da reologia da fase contínua, foi possível determinar a velocidade de sedimentação da partícula isolada. As equações em função da esfericidade para fluidos newtonianos e não newtonianos são apresentadas abaixo.

$$\Omega(\phi) = 1,65 - 0,65 * \phi \quad (54)$$

$$\theta(\phi) = -3,45 * \phi^2 + 5,25 * \phi - 1,41 \quad (55)$$

Chien (1994) estudou a velocidade de sedimentação de partículas de formas irregulares em fluidos newtonianos e não newtonianos. O autor desenvolveu uma correlação para prever a velocidade de sedimentação dessas partículas usando o coeficiente de arraste e o número de Reynolds, conforme apresentado nas equações abaixo.



$$C_D = \frac{30}{Re} + \frac{67,289}{e^{5,030\alpha}}, \quad (0,2 \leq \alpha \leq 1,0) \quad (56)$$

Sendo Reynolds definido por:

$$Re = \frac{d_p v_t \rho_f}{\mu_e} \quad (57)$$

Sendo  $\mu_e$  a viscosidade efetiva do fluido. A equação 55 é válida para partículas irregulares em fluidos newtonianos e não newtonianos e  $Re$  entre 0,001 e 10.000. Por sua vez, a correlação proposta pelo autor para a velocidade de sedimentação das partículas é obtida ao se introduzir as definições do coeficiente de arraste e de Reynolds (equações 55 e 56) na correlação estabelecida experimentalmente para  $C_D$ :

$$v_t^2 + 4,458e^{5,030\alpha} \left( \frac{\mu_e}{d_p \rho_f} \right) v_t - 19,449e^{5,030\alpha} d_p \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) = 0 \quad (58)$$

Assim, a velocidade de sedimentação das partículas é o valor positivo obtido através da resolução da equação 57. Nota-se que até o momento nenhuma menção foi feita a respeito da viscosidade efetiva ( $\mu_e$ ) do meio contínuo. Para fluidos newtonianos, ela é a mesma que a viscosidade dinâmica (constante). Por outro lado, no caso de fluidos não newtonianos, a viscosidade efetiva depende da taxa de cisalhamento. Em seu trabalho, o autor definiu a taxa de cisalhamento ( $\lambda$ ) como a razão entre a velocidade terminal e o diâmetro das partículas:

$$\lambda = \frac{v_t}{d_p} \quad (59)$$

Finalmente, a equação 58 foi inserida em modelos reológicos, como os modelos de Lei de Potência (equação 59) e Herschel-Bulkley (equação 60), a fim de se determinar a viscosidade efetiva do fluido.

$$\mu_e = M(\lambda)^{n-1} = M \left( \frac{v_t}{d_p} \right)^{n-1} \quad (60)$$

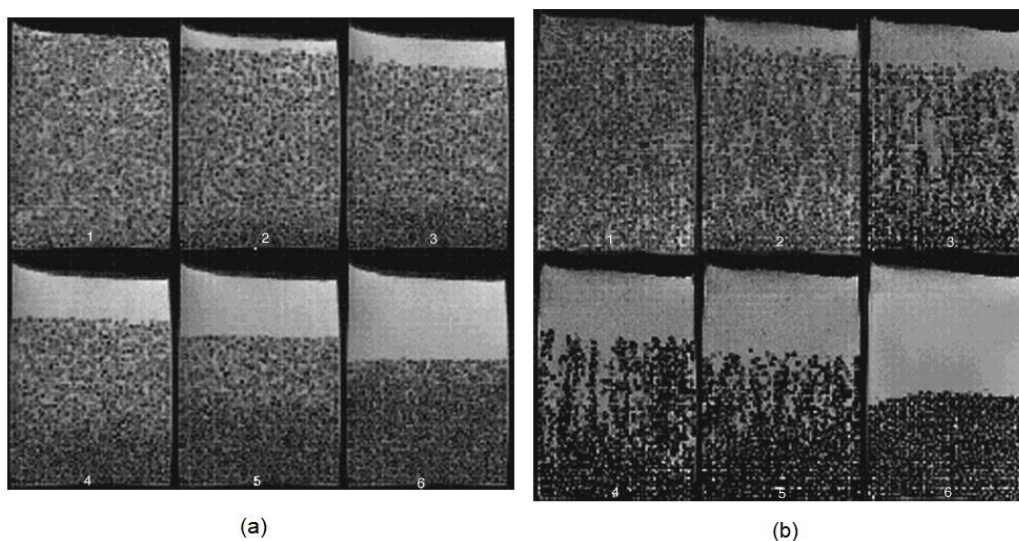
$$\mu_e = \frac{\tau_0}{\lambda} + M(\lambda)^{n-1} = \tau_0 \frac{d_p}{v_t} + M \left( \frac{v_t}{d_p} \right)^{n-1} \quad (61)$$

Saasen *et al.* (1995) estudaram 17 diferentes formulações típicas de fluidos base óleo para avaliar suas características reológicas e prever a possibilidade de sedimentação. Para isso, foram utilizados um viscosímetro e uma célula com dois tubos concêntricos, que poderia ser inclinada, e 15 aberturas laterais para coleta de

amostras. Os resultados demonstraram uma relação entre a força gel e sedimentação. Os autores também reportaram que os fluidos possuíam características viscoelásticas, as quais estavam associadas à formação do estado gel, que é importante para prevenir a sedimentação.

Bobroff e Phillips (1998) monitoraram a taxa de sedimentação de esferas de nylon em fluidos newtonianos e viscoelásticos através de imagens obtidas por Ressonância Magnética Nuclear (RMN). Observou-se durante os experimentos que ambos os fluidos com suas respectivas características reológicas podem resultar em uma taxa de sedimentação dependente do tempo. Ainda segundo os autores, as diferenças qualitativas na sedimentação entre os fluidos são ocasionadas pelas interações hidrodinâmicas e às mudanças microestruturais. Isso é evidenciado pela agregação de partículas na forma de colunas alinhadas na direção do escoamento, característica essa não observada para fluidos newtonianos. A Figura 19 evidencia a diferença de comportamento em função da reologia do fluido.

Figura 19: Sedimentação de esferas de nylon em fluidos newtonianos (a) e Não newtonianos (b).



Fonte: Bobroff e Phillips, 1998.

Daugan *et al.* (2002) discutiram a agregação de partículas durante o processo de sedimentação em um fluido não newtoniano com fracas características elásticas, porém fortemente pseudoplásticos. Os autores mediram a velocidade instantânea das partículas em três diferentes fluidos poliméricos com diferentes propriedades reológicas. Ao analisar o comportamento de duas partículas, demonstrou-se a

existência de uma distância crítica, a partir da qual elas podem se aglomerar. Tal resultado é consequência da formação de um corredor de baixa viscosidade criado pela primeira partícula, que abre caminho para uma segunda partícula sedimentar com maior velocidade até se chocar com a primeira, formando uma aglomeração.

Gueslin *et al.* (2006) estudaram o comportamento de duas esferas sedimentando ao longo de sua linha de centro em fluidos não newtonianos. Os resultados foram semelhantes aos descritos por Daugan *et al.* (2002). Os autores observaram que caso a primeira partícula seja liberada abaixo da altura crítica, uma segunda partícula lançada logo a seguir sedimentaria mais rápido, indo ao encontro da primeira, devido às alterações no estado do fluido e no efeito de memória.

Shah *et al.* (2007) correlacionaram dados disponíveis na literatura de velocidade de sedimentação da partícula isolada escoando em fluidos não newtonianos com duas quantidades adimensionais: o coeficiente de arraste ( $C_D$ ) e o número de Reynolds da partícula ( $Re$ ). Entretanto, a abordagem dos autores consistiu relacionar tais variáveis na forma de  $C_D^{2-n}$  versus  $Re$  em detrimento da metodologia convencional de plotar  $C_D$  versus  $Re$ , sendo ( $n$ ) o índice de comportamento do fluido, parâmetro que indica o quanto este fluido difere reologicamente do comportamento newtoniano ( $n = 1$ ).

Ao adotar a referida abordagem, os autores observaram o aparecimento de um conjunto de curvas dependentes de  $n$ , característica que não evidenciada na metodologia  $C_D$  versus  $Re$ . Além disso, os autores propuseram um novo modelo para determinar a velocidade terminal da partícula isolada em fluidos Lei de Potência.

$$\sqrt{C_D^{2-n} Re^2} = A(n) Re^{B(n)} \quad (62)$$

Sendo os parâmetros  $A(n)$  e  $B(n)$  dados pelas equações abaixo, os quais são função do índice de comportamento do fluido.

$$A = 6,9148(n^2) - 24,838(n) + 22,642 \quad (63)$$

$$B = -0,5067(n^2) + 1,3234(n) - 0,1744 \quad (64)$$

É importante destacar que as equações 62 e 63 foram obtidas por regressão linear dos dados experimentais utilizados pelos autores para os diferentes fluidos lei de potência investigados, o que justifica a dependência de  $A$  e  $B$  com  $n$ .

Por sua vez, o número de Reynolds presente no modelo proposto é determinado por meio da Equação 56, na qual a viscosidade efetiva do fluido foi definida como:

$$\eta = M(\lambda)^{n-1} = M\left(2 \frac{v_t}{d_p}\right)^{n-1} \quad (65)$$

Phillips (2010) estudou a instabilidade estrutural durante a sedimentação de suspensões de partículas através de fluidos viscoelásticos. A teoria baseia-se na aglomeração de partículas e formação de canais como resultado de uma competição entre interações e a dispersões hidrodinâmicas, onde a primeira atua agregando partículas e a segunda atua para manter a microestrutura homogênea. O modelo proposto pelo autor foi baseado na conservação da massa do material particulado através de propriedades como raio das partículas e o número de Deborah. Os resultados obtidos apresentaram um ajuste satisfatório a dados experimentais relativos ao número de colunas formadas e ao tempo de formação dessas colunas na sedimentação de suspensões diluídas e com fraco caráter elástico.

Eller (2012) estudou a sedimentação da barita em fluidos de perfuração. Para isso, realizou um estudo experimental por meio do teste API de viscosímetro e sapata (VSST) com fluidos reais e testes de sedimentação em proveta para estimar parâmetros usados na modelagem. Além disso, simulou computacionalmente esse fenômeno utilizando pacotes comerciais de CFD e uma abordagem de modelos baseados nas equações de conservação. Os resultados indicaram que o fluido à base de óleo tem maior tendência de sofrer sedimentação e que o fluido à base de água apresenta maior capacidade de ressuspensão de leito. As simulações em CFD apresentaram uma resposta que não condiz com o fenômeno observado na literatura. Já o modelo baseado nas equações de conservação foi capaz de simular o escoamento de fluido em duas dimensões, transporte hidráulico de partículas e o processo de decantação em batelada. O modelo apresentou resultados de acordo com as soluções analíticas clássicas e com dados experimentais. O modelo também

foi capaz de prever o efeito de parâmetros físicos como a viscosidade, o diâmetro de partícula e a concentração volumétrica na sedimentação de partículas.

Moreira (2014) estudou o processo de sedimentação em fluidos não newtonianos pseudoplásticos, usando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) para monitoramento da variação da concentração de sólidos para diferentes posições do recipiente de teste ao longo do tempo. O autor propôs equações constitutivas para pressão nos sólidos e permeabilidade do meio poroso. Os resultados obtidos demonstraram que os efeitos de memória influenciam de forma significativa as taxas de sedimentação, diferenciando-se consideravelmente do comportamento em fluidos newtonianos. Além disso, observou-se que inicialmente a sedimentação no fluido não newtoniano procedeu-se de forma mais rápida. Isso ocorreu porque, ao sedimentar, a partícula impõe uma taxa de deformação ao fluido, diminuindo a viscosidade. Nessa região de menor viscosidade, as partículas se aglomeram e sedimentam mais rápido, corroborando os resultados de Daugan *et al.* (2002). No entanto, a compactação final do sedimento demandou um tempo maior devido ao reestabelecimento da estrutura gel do fluido.

Calçada *et al.* (2016) estudaram a mitigação do APB usando a estratégia da comunicação da região anular com a formação rochosa usando técnica de sapata aberta. Apresentou-se um método para prever a sedimentação de sólidos ao longo do tempo, cálculo da pressão interna da região anular e avaliar a capacidade de drenagem de fluidos de perfuração quando essa estratégia é adotada.

Tal modelo segue uma abordagem fenomenológica, utilizando as equações da continuidade e do movimento para descrever, respectivamente, o balanço de massa e o balanço de forças atuantes no sistema. Considerando deslocamento unidirecional dos sólidos, foram propostas duas equações: uma para a concentração de sólidos em função do tempo e da posição e outra para cálculo da velocidade dos sólidos em função do tempo. O primeiro termo entre colchetes na equação 69 refere-se à força de interação sólido-líquido para  $Re_p < 0,2$ , conforme estabelecido por Richardson e Zaki (1954); e o segundo, à força de interação sólido-sólido proposta pelos autores. Sendo,  $\varepsilon_s$ ,  $v_s$ ,  $\rho_s$  e  $d_s$  indicam, nessa ordem, a concentração, a velocidade, a densidade e o diâmetro dos sólidos.  $v_l$  é a velocidade da fase líquida,  $g$ , a aceleração gravitacional, e  $a$  e  $b$  são parâmetros do modelo. A viscosidade aparente,  $\mu_{ap}$ , foi calculada em função da tensão ( $\tau$ ) e da taxa de cisalhamento ao redor da partícula ou

característica ( $\lambda^*$ ) de acordo com a equação 71, na qual a permeabilidade do meio (" $K$ ") foi representada pela equação de Kozeny-Carman.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = -\varepsilon_s \frac{\partial v_s}{\partial z} - v_s \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \quad (66)$$

$$C.I.: \varepsilon_s(t = 0, z) = \varepsilon_{s0} \quad (67)$$

$$C.C.: \varepsilon_s(z = 0, t) = 0 \quad (68)$$

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} = g - \frac{1}{\rho_s} \left[ \frac{18\mu_{ap}(v_l - v_s)}{d_s^2(1 - \varepsilon_s)^{2,7}} - a\varepsilon_s^b \right] \quad (69)$$

$$C.I.: v_s(t = 0, z) = 0 \quad (70)$$

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\lambda^*} = \frac{\tau\sqrt{K}}{v_s} \quad (71)$$

Silva (2017) estudou as propriedades da torta de filtração em processos de filtração e de filtração com sedimentação prévia, utilizando fluidos Newtonianos e fluidos não-Newtonianos. Para isso, foram feitos testes em uma célula de filtração HTHP (*High Temperature/High Pressure*) durante de 30 minutos. A partir dos ensaios de filtração foram obtidos parâmetros como volume de filtração versus tempo de filtração, espessura da torta de filtração, permeabilidade e porosidade. Para fluidos Newtonianos, os resultados indicaram que o volume de filtrado é menor para a filtração com sedimentação prévia. Esse resultado contrasta com o que foi observado para fluidos não-Newtonianos, nos quais o volume de filtrado foi maior para os fluidos previamente sedimentados.

Ribeiro *et al.* (2017) estudaram um modelo simplificado para descrever a sedimentação de material particulado (barita) em fluidos de perfuração. A metodologia experimental utilizada foi a do teste da proveta. A modelagem baseou-se nas equações de conservação e o sistema de equações diferenciais parciais foi resolvido usando o método das linhas, sendo a variável espacial discretizada pelo método de diferenças finitas e a variável temporal integrada numericamente usando "*Livermore Solver for Ordinary Differential Equations*" (LSODE). Os autores avaliaram três cenários. O primeiro foi o fluxo bidimensional de líquido na ausência de partículas. Observou-se a formação de um perfil de concentração parabólico, conforme o esperado. O segundo foi o fluxo axial de fluido e partículas para investigar a existência

de velocidade de deslizamento. Os autores concluíram que a hipótese de velocidade média na direção axial pode ser usada, poupando recursos computacionais. Por fim, avaliou-se a sedimentação unidimensional de partículas, mostrando a influência do tamanho da partícula, viscosidade e concentração de sólidos. Apesar da simplicidade, esse modelo poderia ser usado para uma primeira abordagem da modelagem da sedimentação em fluidos de perfuração.

Andrade (2018) avaliou as incertezas acerca dos valores dos parâmetros na modelagem da sedimentação de sólidos adensantes em fluidos de perfuração, com ênfase na influência da distribuição de tamanho de partícula. A incerteza sobre os parâmetros foi incorporada utilizando-se a inferência Bayesiana. O método de Monte Carlo foi utilizado para analisar de forma direta a incerteza dos parâmetros na saída do modelo fenomenológico, gerando análises de sensibilidade dos parâmetros do modelo e cálculo de probabilidades de sedimentação. Os resultados mostram que a influência das incertezas não deve ser negligenciada, pois influenciam a estimação paramétrica do problema, podendo gerar previsões errôneas das características do fenômeno em questão.

Santos *et al.* (2018) investigaram a dinâmica de sedimentação de partículas sólidas em dois fluidos de perfuração sintéticos à base de olefinas, diferenciados pela presença de carbonato de cálcio como agente espessante. Apesar das características pseudoplásticas de ambos os fluidos, a formação de corredores de baixa viscosidade e o fenômeno de aglomeração das partículas não foram observados conforme constatado por Moreira (2014). Os autores justificaram tal comportamento pelas baixas taxas de deposição dos sólidos durante os ensaios experimentais. Dessa forma, o processo de sedimentação do material particulado atendeu a características típicas de fluidos newtonianos: quanto maior a fração volumétrica de sólidos, menor a taxa de sedimentação.

Rocha (2018) investigou o processo de sedimentação em batelada da barita em água para diferentes concentrações. Para isso, o autor fez uso da condutividade elétrica como técnica de monitoramento da concentração de sólidos em função da posição e do tempo. O modelo proposto baseou-se na mecânica do contínuo, nas leis da conservação da massa e da quantidade de movimento linear para a fase sólida. Além disso, fez uso de equações constitutivas, como forças resistivas, pressão nos sólidos, permeabilidade do meio, taxa de cisalhamento característica e esfericidade.

O modelo reológico empregado foi Lei de Potência. Algumas outras hipóteses assumidas foram que o escoamento é unidirecional, a fase sólida apresenta comportamento incompressível e que os termos de aceleração local e transporte convectivo de quantidade de movimento podem ser negligenciados. Na ausência de solução analítica, utilizou-se a técnica de volumes finitos e um rigoroso processo de estimação de parâmetros. Para facilitar a resolução e interpretação dos resultados, as equações foram adimensionalizadas.

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \xi} + S \frac{\partial (\theta_s u_s)}{\partial \eta} = 0 \quad (72)$$

$$u_s = \frac{1}{v_{s0}} \left\{ \frac{K}{M(1 - \theta_s \varepsilon_{s0})^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\emptyset)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \theta_s \varepsilon_{s0} (\rho_s - \rho_f) g - \frac{\varepsilon_{s0}}{L_0} \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (73)$$

$$CI: \theta_s(\eta, \xi = 0) = 1 \quad (74)$$

$$CC1: F_s = \theta_s u_s(\eta = 0, \xi) = 0 \quad (75)$$

$$CC2: F_s = \theta_s u_s(\eta = 1, \xi) = 0 \quad (76)$$

Os resultados obtidos demonstraram que o modelo matemático descreve de maneira consistente o fenômeno físico, tanto para a região de clarificado como para a região de espessamento. Pequenos desvios foram observados nas regiões de baixas taxas de cisalhamento. Isso foi justificado por conta do modelo reológico adotado (Lei de Potência), o qual geralmente não ajusta bem essas regiões.

Fagundes (2019) avaliou o processo de sedimentação em fluidos de diferentes graus de pseudoplasticidade e tixotropia com diferentes concentrações de CMC. A metodologia experimental utilizada foi a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG). Foi proposto um modelo matemático para cálculo da permeabilidade em sedimentos de carbonato de cálcio. Para isso, fez-se uso das equações da continuidade e do movimento e de equações constitutivas para tensão nos sólidos, força resistiva, esfericidade e modelo reológico. O modelo final para cálculo da permeabilidade é apresentado na equação 77.



Os fluidos foram caracterizados reologicamente como pseudoplásticos. A compressibilidade do sedimento e a pressão nos sólidos foram influenciados pela acomodação final das partículas, que por sua vez é influenciado pelo comportamento não newtoniano da suspensão. Além disso, confirmou-se a hipótese de que a pressão nos sólidos depende somente da concentração de partícula. Já no cálculo da permeabilidade, percebeu-se que a concentração de CMC pouco influenciou, sendo a finalização da separação sólido-líquido o fator que mais contribuiu para os resultados encontrados.

$$K = \frac{-\frac{D^2 g(\rho_s - \rho_f)}{18 \Omega(\phi)} \frac{(1 - \varepsilon_s)^{(4,693 Re_{gen}^{-0,111})}}{\varepsilon_s}}{\frac{dP_s}{dz} - \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g} \quad (77)$$

Ofei *et al.* (2020) avaliaram a sedimentação de partículas sólidas em fluido de perfuração base óleo em condições operacionais estáticas e dinâmicas. Os autores utilizaram 4 técnicas para caracterização; a reometria foi uma delas, com o objetivo de relacionar propriedades reológicas com a sedimentação. Duas amostras de mesma composição foram comparadas: a primeira foi condicionada em temperatura e pressão ambiente; a segunda foi transferida para uma célula de envelhecimento à 120°C e pressurizada à 100 psi por 60 horas. Em seguida, testes reológicos oscilatórios e rotacionais à 25°C foram feitos em um Anton Paar MCR302 com geometria de cilindros concêntricos lisos. A faixa de taxa de cisalhamento avaliada foi de 1022 s<sup>-1</sup> até 0,001 s<sup>-1</sup>.

Os resultados da curva de escoamento demonstraram diferença insignificativa entre as curvas descendentes e ascendentes, ou seja, os fluidos foram considerados não tixotrópicos. Além disso, os testes oscilatórios forneceram dados relevantes sobre a formação e quebra de microestruturas do gel, que podem predizer a ocorrência da sedimentação. Outro ponto relevante desse trabalho é os autores apontarem que o provável aumento da viscosidade no fluido aquecido ocorre por conta dos viscosificantes serem ativados pelo processo de aquecimento.

Rocha *et al.* (2020) estudaram a dinâmica da sedimentação em batelada de agentes adensantes em fluidos de perfuração sintético de base parafínica usando a

Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG). O modelo matemático usado, apresentado na forma adimensional, a condição inicial e as condições de contorno, foram baseadas na dissertação de Rocha (2018). Os perfis dinâmicos e axiais de concentração resultantes foram utilizados na validação da modelagem matemática proposta pelos autores.

Os resultados dos experimentos e das simulações numéricas mostraram boa concordância entre si. Ao analisá-los, os autores perceberam que, para regiões intermediárias do recipiente de testes, a zona de sedimentação livre deu lugar a um aumento na concentração de sólidos, que por sua vez, foi sucedido pela passagem da interface superior, formando uma região de líquido clarificado. Os autores atribuíram esse comportamento não homogêneo (aumento da concentração de sólidos anterior à passagem da interface descendente) aos fenômenos de formação de canais e aglomeração das partículas.

Tais fenômenos são típicos de fluidos pseudoplásticos com efeitos de memória, nos quais se formam os corredores de viscosidade reduzida que dão origem à aglomeração dos sólidos. Mesmo não levando em conta a tixotropia do fluido, o modelo foi capaz de prever a referida não homogeneidade. Isso sugere a robustez do equacionamento proposto e do procedimento de estimação dos parâmetros das equações constitutivas de permeabilidade e pressão nos sólidos.

Nesse aspecto, cabe ressaltar que as baixas taxas de sedimentação foram responsáveis pelos baixos valores de pressão efetiva nos sólidos na região de espessamento. Segundo os autores, nessa região, a equação do modelo é do tipo parabólica (equação convectiva-difusiva) e deve se degenerar para o tipo hiperbólico (equação puramente convectiva) nas regiões de sedimentação livre e clarificado. De fato, as simulações mostraram que incluir o gradiente de pressão nos sólidos nessas últimas regiões induziu uma difusão virtual que não foi verificada nos perfis de concentração de sólidos experimentais.

Os autores pontuaram que o modelo proposto não leva em consideração a natureza polidispersa da suspensão, sendo esperados pequenos desvios. Ainda assim, os resultados preditos pelo modelo estavam de acordo com os dados experimentais. A partir desse modelo, foi possível obter o perfil de concentração de sólidos, o perfil de permeabilidade e a altura máxima de sedimentos, dados que são de grande importância para a avaliação do APB.

### 2.5.3. Sedimentação de Partículas em Condições Não Isotérmicas

A cinética de sedimentação de partículas sólidas ao longo de um fluido é influenciada pela condição térmica à qual o processo está submetido. Nessa seção, serão apresentados alguns trabalhos da literatura referentes ao tema. De um modo geral, o efeito da temperatura na separação sólido-líquido advém de alterações das propriedades da fase líquida e/ou da estrutura das partículas aglomeradas.

Sarmiento e Uhlherr (1979) avaliaram os efeitos da temperatura, dentro do intervalo de 20°C a 75°C, na sedimentação de uma lama de rejeitos oriunda da fabricação de alumina de uma indústria. A lama estava levemente floculada por conta da alta força iônica da suspensão e à tendência de os materiais flocularem. Para isso, fizeram uso de uma correlação do tipo Richardson e Zaki (1954) para modelar a velocidade de sedimentação. A referida correlação foi modificada por meio da introdução de um parâmetro (“ $\kappa$ ”), definido como o volume de flocos por unidade de massa de sólidos. Isso fornece a equação 78, sendo  $v_{\infty}$  a velocidade terminal de uma partícula isolada definida por Stokes (1850).

$$v_s(\varepsilon_s) = v_{\infty}(1 - \kappa\varepsilon_s)^{4,65} \quad (78)$$

Os autores constataram que os flocos estavam claramente mais compactados em altas temperaturas. Além disso, para suspensões diluídas, a influência da temperatura ocorreu principalmente como reflexo das mudanças na viscosidade do fluido. Para maiores valores de concentração, observou-se maior sensibilidade da velocidade de sedimentação em função de densidade efetiva do floco (“ $\kappa$ ”), de tal forma que a taxa de sedimentação observadas superaram as taxas preditas quando se usa apenas uma correção de viscosidade. Concluiu-se que a velocidade de sedimentação em função da temperatura pode ser predita com uma correção da viscosidade, com a limitação de pequenos intervalos de temperaturas. Para maiores intervalos, faz-se necessário reavaliar as características dos flocos. Por conta disso, a inclusão dos efeitos da temperatura na mudança estrutural do floco mostrou-se ineficiente, com erros da ordem de 25%, subestimando os valores reais de taxa de sedimentação.

Herzhaft *et al.* (2002) estudaram a influência da temperatura e da microestrutura de argilas e emulsões no comportamento reológico do fluido de perfuração base óleo em baixas taxas de cisalhamento. As temperaturas avaliadas estavam na faixa entre 0°C e 80°C. Antes dos ensaios reológicos, as amostras passaram pelo processo de envelhecimento (80°C e 145 psi por 16 horas), seguida de pré-cisalhamento a 1000 s<sup>-1</sup> por 10 minutos. A taxa de cisalhamento imposta foi de 1000 s<sup>-1</sup> até 0 s<sup>-1</sup>, ou seja, curva descendente, com 40 pontos distribuídos de forma logarítmica e aguardando dois minutos para cada leitura. Assumindo que o trata-se de um fluido de natureza tixotrópica, os autores descreveram a necessidade de adotar o mesmo procedimento para todas as análises, a fim de limitar a discrepância entre os dados experimentais e poder compará-los.

Os autores observaram e descreveram dois diferentes momentos das curvas de escoamento. Em baixas taxas, um comportamento newtoniano, semelhante a um platô; em taxas mais altas, um comportamento que poderia ser modelado por Herschel-Bulkley; o momento de transição seria função da temperatura. A presença de argila e gotas de água na formulação implicaria numa competição entre as forças do efeito browniano, que depende da temperatura, e das forças hidrodinâmicas, que dependem da taxa aplicada. Dessa forma, a viscosidade do fluido dependeria da viscosidade da fase contínua, fração volumétrica da fase dispersa, distribuição e tamanho das partículas e das gotas de água, taxa de cisalhamento e temperatura.

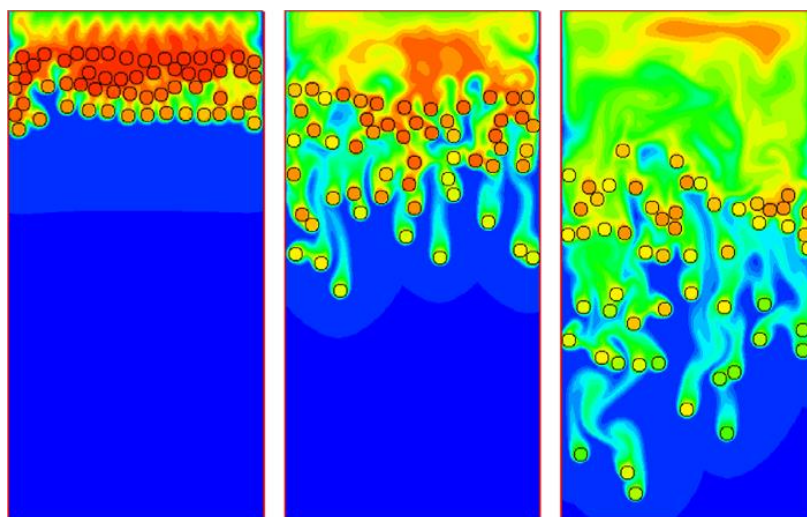
Outro ponto relevante desse trabalho é que os autores compararam os dados reológicos obtidos no reômetro Haake RS 150 com o viscosímetro Fann 35 A. A conclusão foi que os dados obtidos a partir do viscosímetro Fann 35 A induz a um erro maior para baixas taxas de cisalhamento.

Gan *et al.* (2003) simularam numericamente a sedimentação de partículas sólidas em fluido newtoniano levando em conta o processo de transferência de calor por convecção. A abordagem matemática adotada no trabalho envolveu o uso das equações de Navier-Stokes bidimensional e de conservação da energia térmica para valores moderados de número de Reynolds. O modelo resultante foi resolvido pelo método de elementos finitos. As simulações mostraram que a convecção térmica pode alterar fundamentalmente a maneira como as partículas se movem e interagem. No caso de uma partícula isolada, diferentes resultados foram obtidos, como sedimentar diretamente para a base, em direção à parede ou oscilando lateralmente. Já para duas

partículas, observou-se que a tendência de separação caso sejam mais frias que o fluido e de agregação caso sejam mais quentes que o fluido. Esses efeitos são analisados em termos da competição entre a convecção térmica e o fluxo externo relativo à partícula.

Feng e Michaelides (2009) desenvolveram um método numérico de simulação (DNS - "*Direct Numerical Simulation*") para resolver as equações de transferência de calor para o cálculo da convecção térmica escoamentos bidimensionais com materiais particulados. Nesse estudo, 56 partículas, mais quentes do que o fluido, foram posicionadas juntas no topo do recipiente (e não de forma homogênea, como geralmente esses ensaios são realizados). A sedimentação das partículas causou um forte movimento do fluido, resfriando-as durante o processo e aumentando a temperatura do fluido por onde passavam. Nesse processo, as partículas dianteiras experimentaram um grau de resfriamento mais pronunciado do que as partículas que sedimentaram através da esteira térmica criada pela passagem das primeiras. A Figura 20 traz os mapas de contorno de temperatura para o fenômeno da sedimentação com troca térmica simulado por Feng e Michaelides (2009).

Figura 20. Mapa de temperatura para a sedimentação de partículas quentes em fluido newtoniano. A evolução temporal do processo de sedimentação ocorre da esquerda para direita.



Fonte: Feng e Michaelides (2009).

Hashemi, Abouali e Kamali (2014) apresentaram um estudo numérico da transferência de calor tridimensional em esferas sedimentando por ação da gravidade em fluido newtoniano contido em um recipiente retangular. Foram avaliados três

cenários: (1) o modelo numérico desenvolvido é validado em comparação com modelos experimentais e numéricos dados para uma esfera caindo em uma caixa cheia de líquido; (2) os autores fazem uso de uma série de números adimensionais como Reynolds, Prandtl e Grashof, para investigar o comportamento de uma partícula sedimentando em temperatura fixa e quando há gradiente de temperatura; (3) investigou-se a sedimentação de 30 partículas esféricas quentes em um invólucro e suas interações com o fluido. Os resultados mostram que a velocidade máxima de sedimentação da partícula em superfície com temperatura variada é maior em números de Reynolds mais baixos. À medida que o número de Reynolds aumenta, a velocidade de sedimentação da partícula para ambos os casos de temperatura constante e variada é a mesma. Além disso, observou-se que na região de Reynolds baixo, a partícula com temperatura mais elevada sedimentou mais lentamente do que as partículas fria e isotérmica. Os autores concluíram que a presença de fenômenos de transferência de calor pode alterar significativamente o comportamento das partículas sedimentadas.

Yang *et al.* (2016) investigaram os efeitos da convecção térmica na sedimentação de material particulado ao investigarem o comportamento de duas partículas frias sedimentando livremente sob efeito da gravidade. Também se avaliou a influência de condições iniciais como distância e ângulo de separação entre as partículas. Nos experimentos numéricos, duas partículas frias foram liberadas a partir do repouso, e a depender da combinação dos parâmetros de lançamento, três regimes de sedimentação foram observados: repulsão, atração e transição. Os resultados revelam que a convecção térmica influencia significativamente as interações entre as duas partículas durante a sedimentação. Além disso, o processo repulsivo é intensificado devido à convecção térmica, especialmente quando as duas partículas frias se aproximam muito. Também observou-se que a convecção térmica aumenta as oscilações de trajetórias das partículas.

Walayat *et al.* (2018) apresentaram uma técnica de simulação numérica para avaliar a influência da convecção térmica sobre o comportamento de sedimentação de partículas sólidas elípticas quentes. Os autores demonstraram que a maneira com essa partícula elíptica quente sedimenta através de um fluido newtoniano mais frio depende do coeficiente de expansão térmica e da difusividade térmica do meio. Constatou-se que, para grandes valores do coeficiente de expansão térmica, o fluido

ao redor da elipse foi rapidamente aquecido e teve sua densidade diminuída mais efetivamente; uma vez mais leve, o fluido escoou para cima com maior velocidade de ascensão, gerando correntes convectivas, que retardaram a queda da partícula.

Karimnejad *et al.* (2019) avaliaram o comportamento do transporte de partículas elípticas juntamente com os efeitos da transferência de calor. Para a simulação, os autores fizeram uma combinação do método de limite imerso (*Immersed Boundary Method – IBM*) e do método de rede de Boltzmann (*Lattice Boltzmann Method – LBM*). Além disso, os autores fizeram uso de números adimensionais para investigar problemas de partículas quente, fria e isotérmica. A partir dos resultados, observou-se que as propriedades térmicas podem influenciar fortemente o comportamento de sedimentação das partículas. Os valores mais altos dos números de Grashof e Prandtl para partículas quentes têm uma influência negativa na velocidade de sedimentação. Também é mostrado que as partículas quentes têm uma tendência de atrair umas às outras.

Cayeux (2020) estudou a dependência das propriedades reológicas dos fluidos de perfuração em função tempo, pressão e temperatura. O autor modelou os dados reológicos com Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff. Além disso, reforçou a importância do modelo reológico ajustar bem dados à baixas taxas de cisalhamento, pois raramente obtém-se taxas superiores a  $600 \text{ s}^{-1}$  na região anular.

Segundo o autor, o modelo Robertson-Stiff fornece um bom ajuste geral de dados. No entanto o modelo Herschel-Bulkley fornece um melhor ajuste em baixas taxas de cisalhamento. Além disso, o autor aponta que um bom ajuste dos parâmetros reológicos depende do número de medições e sua distribuição.

O autor concluiu que esses fluidos são, em geral, tixotrópicos e possuem uma característica peculiar: necessitam de um tempo de recuperação considerável tanto indo de altas para baixas taxas, como indo de baixas para altas taxas. Além disso, o impacto do histórico de cisalhamento do fluido é importante para obter estimativas precisas a respeito das suas características reológicas. Em termos práticos, as propriedades reológicas dos fluidos são alteradas após cada cisalhamento e cada intervalo de repouso (gelificação).

Outro ponto relevante desse trabalho é que o efeito da temperatura é mais significativo do que o efeito da pressão. Na prática, cada fluido possui uma

dependência diferente com a temperatura. Quando esse fluido não foi previamente estudado, recomendam-se experimentos em 4 ou 5 diferentes temperaturas.

O autor também menciona problemas com ensaios de tempos muito longos, pois há a possibilidade da amostra sedimentar e o valor da leitura não corresponder ao valor do fluido original.

Pinto (2020) estudou o efeito da temperatura na sedimentação de sólidos adensantes e, dando sequência aos estudos de Rocha (2018) e Rocha *et al.* (2020), propôs uma modelagem matemática para condições não isotérmicas. A faixa de taxa de cisalhamento avaliada foi de  $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$  para um fluido de perfuração olefínico. Para isso, assumiu-se que os efeitos da temperatura no modelo da sedimentação restringiam-se às propriedades reológicas do fluido.

Isso foi introduzido ao modelo reológico por meio de um fator de correção exponencial. A autora abordou a equação de Arrhenius e WLF para compor tal correção. Para o modelo tipo Arrhenius:

$$\eta(T) = \eta_{ref} a_T = \eta_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (79)$$

Para o modelo Lei de Potência com Arrhenius:

$$\begin{aligned} \eta(\dot{\gamma}) &= \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} = M \dot{\gamma}^{n-1} \\ \eta(\dot{\gamma}, T) &= \frac{\tau(\dot{\gamma}, T)}{\dot{\gamma}} = M \dot{\gamma}^{n-1} \eta_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \\ \tau(\dot{\gamma}, T) &= M_{ref} \dot{\gamma}^n \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \end{aligned} \quad (80)$$

Para o modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius:

$$\begin{aligned} \eta_a(\dot{\gamma}) &= \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} = \tau_0 + M \dot{\gamma}^{n-1} \\ \eta_a(\dot{\gamma}, T) &= \frac{\tau(\dot{\gamma}, T)}{\dot{\gamma}} = \tau_0 + M \dot{\gamma}^{n-1} \eta_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \\ \tau(\dot{\gamma}, T) &= \tau'_0 + M_{ref} \dot{\gamma}^n \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \end{aligned} \quad (81)$$



Para o modelo Lei de Potência com WLF:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} = M\dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\tau(\dot{\gamma}, T)}{\dot{\gamma}} = M\dot{\gamma}^{n-1}\eta_{ref} \exp \left[ \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \right]$$

$$\tau(\dot{\gamma}, T) = M_{ref}\dot{\gamma}^n \exp \left[ \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \right] \quad (82)$$

Sendo o produto entre o índice de consistência do fluido ( $M$ ) e a viscosidade de referência ( $\eta_{ref}$ ) um novo parâmetro ( $M_{ref} = M.\eta_{ref}$ ) a ser estimado. Um dos principais pontos discutidos nesse trabalho foi a implementação da tensão limite de escoamento ao modelo da sedimentação.

Os resultados demonstraram que a introdução da tensão limite de escoamento através do parâmetro de tempo de relaxação permitiu melhores ajustes da dinâmica inicial de sedimentação, pois descreve a transição do fluido do estado predominantemente elástico para o estado predominantemente viscoso, quando ocorre o início a sedimentação. Além disso, dentre os modelos matemáticos para condições não isotérmicas avaliados para descrever o efeito da temperatura na reologia, o modelo tipo Arrhenius se mostrou mais adequado para o fluido analisado.

Segundo a autora, é fundamental considerar os efeitos da temperatura na sedimentação de sólidos adensantes, pois a introdução do perfil de temperatura causa um perfil de viscosidade, sendo essas grandezas inversamente proporcionais. No fundo do poço, onde a temperatura é maior, a viscosidade é menor, favorecendo a sedimentação; no topo do poço, onde a temperatura é menor, a viscosidade é maior, reduzindo os efeitos da sedimentação. A negligência deste efeito pode resultar na predição da altura de sedimento menor do que o real.

Ofei *et al.* (2023) fizeram uma avaliação reológica e da sedimentação em um fluido de perfuração base óleo com e sem barita sob condições de altas temperaturas e pressões. Para isso, fizeram uso de um aparato experimental com reômetro nas temperaturas de 20°C e 90°C, operando com taxas de cisalhamento entre 0,01 s<sup>-1</sup> e 1000 s<sup>-1</sup> e pressão de 1 bar e com taxas de cisalhamento entre 10 s<sup>-1</sup> e 1000 s<sup>-1</sup> e pressão de 100 bar. Os autores reportaram que para a condição de 100 bar, não foi

possível obter leituras de taxas de cisalhamento inferiores a  $10 \text{ s}^{-1}$ , porque as medições eram instáveis.

Os autores ajustaram os dados experimentais usando o modelo Herschel-Bulkley. Calculou-se a tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) através da extrapolação de dados para baixas taxas de cisalhamento (3 e 6 rpm obtidos no viscosímetro Fann), conforme apresentando na equação 86. Também compararam o valor de  $\tau_0$  com o ensaio oscilatório do reômetro (varredura de amplitude, a qual já foi citada por alguns autores como uma forma de obter esse valor). Conhecendo  $\tau_0$ , estimou-se o índice de consistência ( $K$ ) e índice de comportamento ( $n$ ) através da técnica de mínimos quadrados. O fator temperatura na sedimentação foi avaliado através do “*sag factor*”, descrito na equação 87, no qual para valores acima de 0,53 é considerado que as propriedades do fluido são inadequadas para a operação.

$$\tau_0 = \tau_1 - \dot{\gamma}_1 \left( \frac{\tau_2 - \tau_1}{\dot{\gamma}_2 - \dot{\gamma}_1} \right) \quad (83)$$

$$Sag \ factor \ (SF) = \frac{\rho_{inicial}}{\rho_{inicial} + \rho_{final}} \quad (84)$$

As curvas de escoamento demonstraram que os fluidos possuem característica pseudoplásticas, a área de histerese era insignificativa e foi detectada diferença considerável entre as curvas de escoamento dos fluidos com e sem barita.

O fluido sem barita apresentou maior sensibilidade ao fator cisalhamento. Para taxas superiores a  $20 \text{ s}^{-1}$ , a tensão desse fluido era maior do que a do fluido com barita. No entanto, para taxas inferiores a  $20 \text{ s}^{-1}$ , as curvas se cruzaram e a tensão do fluido com barita foi maior do que o fluido sem barita.

O aumento da pressão aumentou a viscosidade do fluido, sendo esse aumento mais pronunciado nos fluidos com barita. Isso foi justificado por conta da baixa compressibilidade das partículas sólidas. Outro ponto relevante é que efeito da temperatura é mais pronunciado a taxas de cisalhamento inferiores a  $10 \text{ s}^{-1}$ . Ainda assim, para sedimentação, o fator temperatura é mais significativo que a pressão.

No contexto do modelo reológico, a temperatura aumentou a tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), aumentou o índice de consistência ( $M$ ) e diminuiu o índice de comportamento ( $n$ ). Já a ausência de barita diminuiu a tensão limite de escoamento

( $\tau_0$ ), diminuiu o índice de consistência ( $M$ ) e aumentou levemente o índice de comportamento ( $n$ ) nas duas temperaturas avaliadas (20°C e 90°C).

O comparativo com teste oscilatório demonstrou que a tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) diminuiu com o aumento da temperatura, comportamento diferente do observado com o viscosímetro. Não foi discutida justificativa para esse caso.

Além disso, os testes oscilatórios demonstraram que o aumento da temperatura causou um aumento na viscosidade. Isso foi justificado pelos autores como consequência do aumento da força gel. Por outro lado, o aumento da temperatura também pode ter impacto negativo favorecendo a sedimentação por conta da queda da viscosidade. Por fim, o “*sag factor*” ficou abaixo do limite até 150°C, mas excedeu o limite de 0,53 para 200°C.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

No contexto da reologia de fluidos e da sedimentação, os efeitos da temperatura são relevantes e precisam ser considerados na abordagem matemática do problema, pois impactam diretamente nas propriedades reológicas e na dinâmica de sedimentação de material particulado. Ao considerar operações em águas profundas, onde tem-se altos gradientes de pressão e temperatura, essa atualização do modelo torna-se ainda mais relevante. Conhecer o comportamento reológico nessas condições pode auxiliar na melhor simulação, projeto e controle do poço.

Diferentes modelos reológicos já foram propostos na literatura para descrever o comportamento de fluidos viscosos. Fato é que não há um modelo indicado para todas as condições. Pelo contrário: cada caso requer uma avaliação distinta.

Além disso, é necessário investigar o comportamento desses fluidos de perfuração em diferentes faixas de taxas de cisalhamento, pois esse fluido é submetido a bombeamento e a condições estáticas, que são distintas.

Contudo, é importante atentar para a quantidade e qualidade dos parâmetros estimados. Quanto mais parâmetros um modelo tiver, mais complexa será a sua abordagem computacional e numérica. Quantidade de parâmetros não é sinônimo de qualidade de ajuste ou de predição. Nota-se, na maioria dos trabalhos, uma carência nos procedimentos de estimação de parâmetros e análise estatística.

Outro ponto relevante é avaliar se a propriedade estudada e posta como variável independente no modelo realmente possui impacto relevante na variável calculada. Em outras palavras, não adianta adicionar uma variável ao modelo, o que geralmente aumenta sua complexidade, sem que haja melhorias na predição dos dados ou se a variável calculada é pouco influenciada. No contexto da sedimentação, vê-se que a temperatura é um fator relevante para as propriedades reológicas dos fluidos de perfuração; ao passo que a pressão é geralmente negligenciada.

Além disso, foram encontrados poucos trabalhos para uma abordagem não isotérmica da sedimentação em batelada por ação do campo gravitacional partindo-se de uma condição inicial homogênea. Entende-se que realmente seja difícil por se tratar de um assunto muito específico; mas os problemas relatados em poços de petróleo reforçam a necessidade de explorar esse assunto.

A hipótese da sedimentação de partículas em um meio não newtoniano com gradiente de temperatura adiciona uma dificuldade na modelagem do problema, o qual requer a combinação de diferentes áreas do conhecimento.

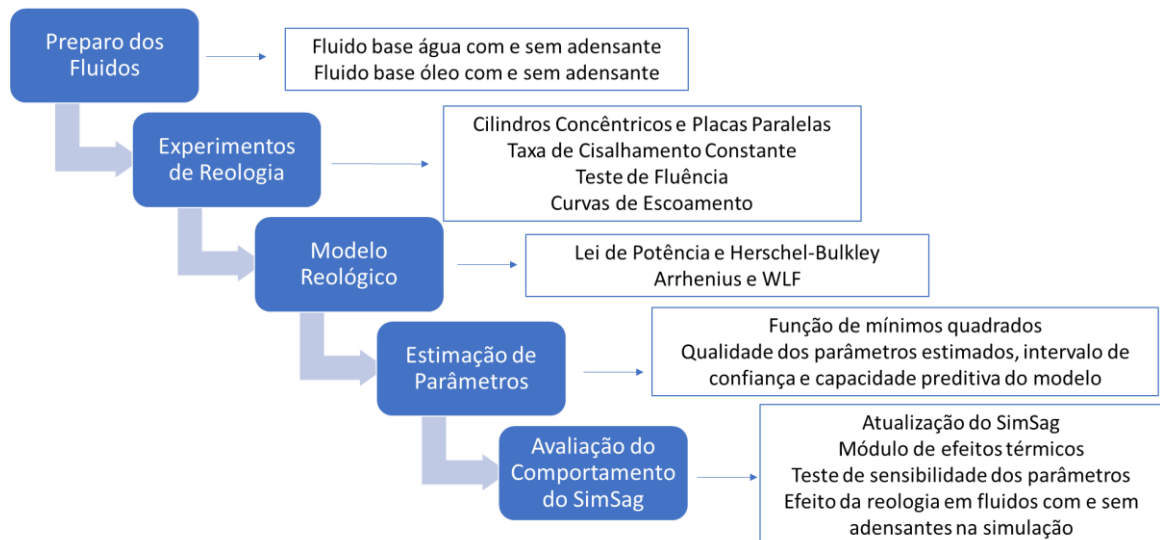
### 3 METODOLOGIA

**Resumo:** Este capítulo apresenta a descrição dos equipamentos e materiais utilizados, o preparo dos fluidos, a metodologia experimental, os modelos estudados, como foi feita a estimação de parâmetros e a avaliação do comportamento do simulador após sua atualização.

Conforme apresentado na introdução, o presente trabalho teve como objetivo estudar o efeito da reologia de fluidos de perfuração com e sem adensantes e em diferentes temperaturas e diferentes faixas de taxa de cisalhamento. Além disso, avaliar modelos matemáticos para ajuste da reologia em função da temperatura para descrever o fenômeno da sedimentação. Os resultados foram alimentados em um simulador desenvolvido pelo LEF/UFRuralRJ para avaliação da sensibilidade do modelo em função dos dados e parâmetros alimentados.

Para isso, seguiu-se o fluxograma abaixo, que descreve um resumo da metodologia adotada nesse trabalho.

Figura 21. Esquema da metodologia aplicada.



Fonte: Autor.

### 3.1. PREPARO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Um dos objetivos desse trabalho foi comparar o comportamento reológico dos fluidos com adensante e sem adensante para diferentes faixas de taxas de cisalhamento e em diferentes temperaturas. Tal comparação tem por finalidade avaliar se é possível descrever corretamente o comportamento reológico apenas com dados do fluido sem adensante e determinar o impacto na resposta do simulador SimSag.

Para isso, quatro fluidos foram preparados: base água com adensante, base água sem adensante, base óleo com adensante e base óleo sem adensante. A formulação está apresentada nas tabelas 4 e 5. A única diferença entre os fluidos de mesmo meio contínuo é a presença ou ausência de adensante. Os fluidos de perfuração foram preparados no CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras na UFRJ). Trata-se da formulação de um típico fluido de perfuração.

O preparo dos fluidos aquosos seguiu a seguinte ordem de mistura: cloreto de sódio, antiespumante, goma xantana, amido, óxido de magnésio, lubrificante bactericida e calcário (esse último somente para o fluido adensado).

O preparo dos fluidos olefínicos seguiu a seguinte ordem de mistura: emulsificante primário e secundário, cal, redutor de filtrado, viscosificante, salmoura de cloreto de sódio, obturante, modificador reológico e baritina (esse último somente para o fluido adensado).

Somente antiespumante, bactericida e salmoura de cloreto de sódio eram líquidos. Recomenda-se adição dos demais componentes, que são sólidos, lentamente para evitar a formação de grumos, o que descaracterizaria o fluido.

Para misturar, foi utilizado o agitador mecânico Silverson L5M-A (Figura 22). Para determinar a quantidade de adensante a ser adicionado, foi utilizada a balança de lama Fann 140 (Figura 23). A Figura 24 apresenta os fluidos após o preparo.

Tabela 4. Formulação do fluido base água.

Fluido Aquoso				
Componentes	Concentração			
Água industrial	QSP*	-	QSP*	-
NaCl	110	lb/bbl	313,5	g/L
Antiespumante	0,05	gal/bbl	0,11905	%v/v
Goma xantana	2	lb/bbl	5,7	g/L
Amido HP	8	lb/bbl	22,8	g/L
Óxido de Magnésio	1,5	lb/bbl	4,275	g/L
Lubrificante	2	%v/v	2	%v/v
Bactericida	0,5	lb/bbl	1,425	g/L
Calcário	QSP* p/ 9,5	ppg	QSP* p/ 0,95	g/cm <sup>3</sup>

Tabela 5. Formulação do fluido base óleo.

Fluido Olefínico				
Componentes	Concentração			
Olefina	0,58	bbl/bbl	58	%v/v
Emulsificante Primário	7	lb/bbl	19,95	g/L
Emulsificante Secundário	3	lb/bbl	8,55	g/L
Cal	5	lb/bbl	14,25	g/L
Redutor de Filtrado	2	lb/bbl	5,7	g/L
Viscosificante	5	lb/bbl	14,25	g/L
Salmoura de NaCl	0,39	bbl/bbl	39	%v/v
Obturante	10	lb/bbl	28,5	g/L
Modificador Reológico	2,75	lb/bbl	7,8375	g/L
Baritina	QSP* p/ 9,5	ppg	QSP* p/ 0,95	g/cm <sup>3</sup>

\* QSP = "Quantidade Suficiente Para" alcançar determinado valor.

\*\* Em azul: sólido adensante adicionado somente no fluido completo.

\*\*\* Modificador reológico: também chamado de espessante ou modificador de viscosidade, aumenta a viscosidade para prevenir a sedimentação, mas permite escoamento quando precisa ser bombeado.

Figura 22. Agitador mecânico Silverson L5M-A.



Fonte: autor.

Figura 23. Balança de Lama Fann 140.



Fonte: autor.

Figura 24. Fluidos de perfuração preparados.



Fonte: Autor.



### 3.2. REOMETRIA

Todos os experimentos foram realizados no reômetro compacto modular Anton Paar MCR 302 (Figura 25). A execução foi feita em duas etapas. A primeira utilizou a geometria do tipo cilindros concêntricos (“*couette*”) lisos (Figura 26) e a segunda utilizou a geometria do tipo placas paralelas (placa-placa) com ranhuras (Figura 27). A tabela 6 resume as condições operacionais adotadas nesse trabalho.

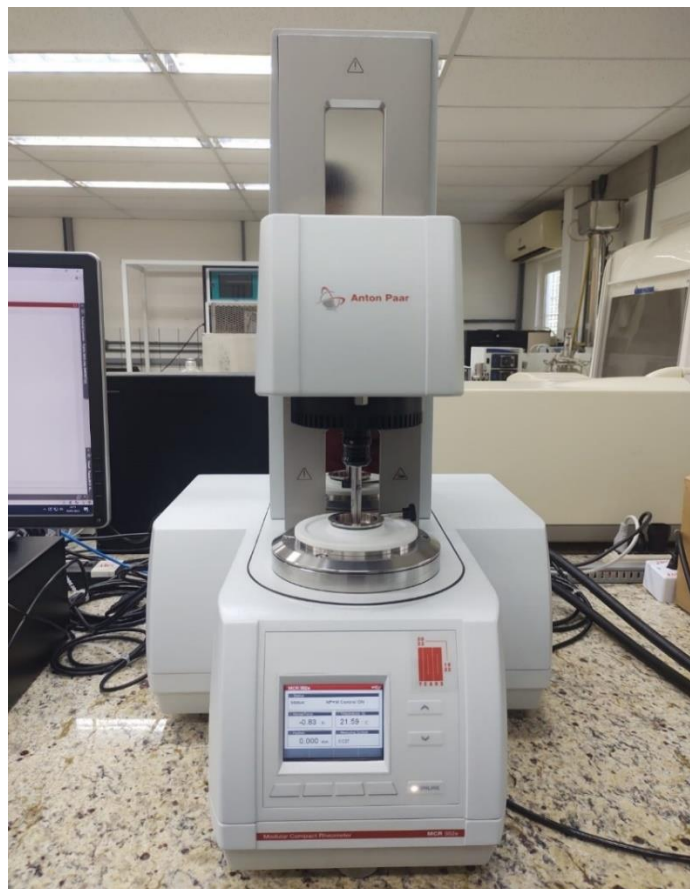
O sistema de cilindros concêntricos é comum para testes em líquidos de baixa viscosidade. Também é adequada para líquidos viscoelásticos. Esses sistemas são fáceis de encher e possuem uma marca de nível na parte interna do recipiente (ANTON PAAR, 2023).

Além disso, essa é uma geometria recomendada para análises com faixas de taxas de cisalhamento mais altas, pois não ejeta a amostra, e para minimizar efeitos de evaporação, ao usar um volume de amostra maior. Contudo, há uma limitação na medição de baixas taxas de cisalhamento por conta do fenômeno de deslizamento. Por isso, é importante verificar qual é o torque mínimo no qual a leitura do equipamento estabilizará. Caso não seja possível estabilizar a medida, esse ponto deve ser descartado. Segundo o manual do reômetro Anton Paar MCR302, o torque mínimo do é de 0,5 nN.m e o torque máximo é de 230 mN.m.

O sistema de placas paralelas ranhuradas é recomendado para testar pastas, géis, sólidos macios ou polímeros fundidos altamente viscosos. O processo de limpeza é rápido e fácil; no entanto, o processo de ajuste da amostra entre as placas pode ser trabalhoso. É necessária uma quantidade relativamente pequena de amostra (ANTON PAAR, 2023).

As ranhuras na superfície auxiliam na acomodação da amostra na geometria e evitam fenômenos de deslizamento. Por isso, a depender da natureza do fluido e do torque mínimo do equipamento, é possível avaliar baixas taxas de cisalhamento da ordem de  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . No entanto, para taxas de cisalhamento próximas de  $100 \text{ s}^{-1}$ , essa geometria pode ejetar a amostra por conta da força centrífuga. Um outro possível problema é evaporação do solvente em casos de temperaturas próximas ao seu ponto de ebulição, o que é indesejável e atrapalharia a análise.

Figura 25: Reômetro Anton Paar MCR302 instalado no LEF/UFRuralRJ.



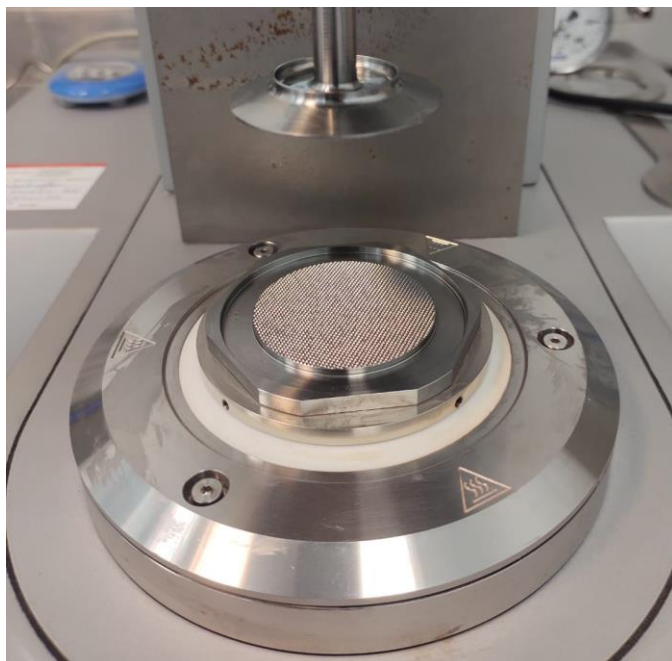
Fonte: autor.

Figura 26. Geometria de cilindros concêntricos.



Fonte: autor.

Figura 27. Geometria de placas paralelas ranhuradas.



Fonte: autor.

Tabela 6. Faixas experimentais de temperatura e de taxa de cisalhamento estudadas.

Tipos de Fluidos	Base Água		Base Óleo	
	Com Adensante	Sem Adensante	Com Adensante	Sem Adensante
Temperaturas [°C]	5, 15, 25, 35 e 45		5, 25, 45, 65 e 85	
Faixas de Taxa de Cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	0,0001 até 100	0,01 até 1000	1 até 1000	
			→ Placas paralelas	
			→ Cilindros Concêntricos	
			→ Cilindros Concêntricos	

### 3.2.1. Cilindros Concêntricos

#### 3.2.1.1. Taxa de Cisalhamento Constante

O ensaio de taxa de cisalhamento constante é importante para determinar o tempo necessário para que a leitura em uma determinada taxa de cisalhamento estabilize e apresente baixa incerteza de medição. Ao programar o teste de curva de escoamento, deve-se informar o tempo máximo para coleta do ponto; caso seja

inferior ao tempo de estabilização, pode-se obter um dado incoerente com a realidade. Geralmente, o ponto que demanda o maior tempo é o de menor taxa de cisalhamento.

Caso o ponto não estabilize, significa que o equipamento não conseguirá obter a leitura correta para essa determinada condição. Isso acontece, por exemplo, por conta de fenômenos de deslizamento. Nesse caso, esse ponto deve ser descartado e deve-se buscar um ponto de taxa de cisalhamento maior para essa geometria ou ainda trocar a geometria, quando possível.

Esse teste foi programado da seguinte forma: tempo de supervisão da temperatura selecionada por 2 minutos, com tolerância de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ; em seguida, a amostra foi pré-cisalhada a 5000 RPM por 5 minutos; depois, aplicou-se uma taxa de cisalhamento constante por até 20 minutos. Caso a leitura não estabilizasse, repetir-se-ia o procedimento com uma taxa de cisalhamento maior e verificaria se a leitura estabilizaria. Esse teste foi realizado apenas na temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

#### 3.2.1.2. Curva de Escoamento

Adicionou-se a amostra dentro do “*couette*” e desceu-se a geometria. Programou-se a curva de escoamento da seguinte forma: tempo de supervisão da temperatura selecionada de 2 minutos com tolerância de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ; em seguida, a amostra foi pré-cisalhada a 5000 RPM por 5 minutos; depois, iniciou-se as curvas de escoamento em duas rampas logarítmicas, a primeira ascendente de  $0,01\text{ s}^{-1}$  até  $1000\text{ s}^{-1}$  e a segunda descendente de  $1000\text{ s}^{-1}$  até  $0,01\text{ s}^{-1}$ , registrando 51 pontos em cada (10 pontos por década).

As temperaturas avaliadas foram de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  e  $45^{\circ}\text{C}$  para os fluidos aquosos e de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$  para os fluidos olefínicos. Todos os experimentos foram realizados à pressão atmosférica. O planejamento experimental foi fatorial  $5^1$  (5 níveis e 1 fator) com triplicata em todos os pontos. Para a caracterização do erro experimental, admitiu-se que os dados obtidos na triplicata seguem a distribuição normal, de tal modo que o desvio-padrão obtido foi considerado como o erro experimental, adotando-se 5% de nível de significância.

### 3.2.2. Placas Paralelas Ranhuradas

Os experimentos usando a geometria de placas paralelas ranhuradas foram realizados a fim de estudar especificamente faixas de baixas taxas de cisalhamento. Para esse caso, foi executada apenas a curva de escoamento descendente.

Uma amostra do fluido foi pré-cisalhada a 5000 RPM por 5 minutos. Depois, acomodou-se a amostra na geometria, sempre verificando se toda a geometria estava preenchida com a amostra e fazendo a limpeza dos excessos na borda quando necessário. Programou-se a curva de escoamento com “*gap*” (espaço entre as placas) de 1 cm e tempo de supervisão da temperatura selecionada antes de iniciar o teste de 2 minutos com tolerância de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .

Após o tempo de supervisão da temperatura, executou-se um pré-cisalhamento com dois pontos constantes a  $100\text{ s}^{-1}$  e uma rampa logarítmica decrescente de taxa de cisalhamento, avaliando o intervalo de  $100\text{ s}^{-1}$  até  $0,0001\text{ s}^{-1}$  registrando 36 pontos (6 pontos por década). Essa descrição é o procedimento padrão realizado pelos técnicos do CENPES/PETROBRAS.

As temperaturas avaliadas foram de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  e  $45^{\circ}\text{C}$  para os fluidos aquosos e de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$  para os fluidos olefínicos. Todos os experimentos foram realizados à pressão atmosférica.

O planejamento experimental adotado foi o fatorial  $5^1$  (5 níveis e 1 fator) com triplicata no ponto central. Dessa forma, para os fluidos aquosos, foi realizada uma triplicata na temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ ; já para os fluidos olefínicos, a triplicata foi a  $45^{\circ}\text{C}$ . Para a caracterização do erro experimental, admitiu-se que os dados obtidos na triplicata seguem a distribuição normal, de tal modo que o desvio-padrão obtido foi considerado como o erro experimental, adotando-se 5% de nível de significância.

### 3.3. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Os modelos reológicos utilizados para descrever os dados experimentais e estimar parâmetros foram lei de Potência e Herschel-Bulkley. Para abordar condições não isotérmicas, fez-se abordagens do tipo Lei de Potência com Arrhenius, Lei de Potência com WLF e Herschel-Bulkley com Arrhenius, conforme descrito na tabela 7.

Tabela 7. Modelos reológicos abordados e propostas para correção em função da temperatura.

<b>Modelo Reológico</b>	<b>Equação</b>	
Lei de Potência	$\tau(\dot{\gamma}) = M(\dot{\gamma})^n$	(10)
Herschel-Bulkley	$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + M(\dot{\gamma})^n$	(11)
<b>Modelo Reológico em Função da Temperatura</b>	<b>Equação</b>	
Lei de Potência com Arrhenius	$\tau(\dot{\gamma}, T) = M_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] (\dot{\gamma})^n$	(85)
Lei de Potência com WLF	$\tau(\dot{\gamma}_c, T) = M_{ref} \exp \left[ \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \right] (\dot{\gamma}_c)^n$	(86)
Herschel-Bulkley com Arrhenius	$\tau(\dot{\gamma}, T) = \tau'_0 + M_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] (\dot{\gamma})^n$	(87)

Conforme definido por Schwaab e Pinto (2007), estimar parâmetros é usar um modelo matemático como referencial e testar diferentes valores para os parâmetros até que as suas predições estejam o mais próximo possível dos dados experimentais, respeitando as incertezas típicas das medições. As observações experimentais fornecem os dados necessários para compreender os vínculos que existem - e se de fato existem - entre as diversas variáveis que descrevem um problema.

Através da estimação de parâmetros é possível discutir se uma variável é realmente significativa para o estudo ou se pode ser descartada. Isso impacta diretamente nas hipóteses adotadas e na complexidade do problema. Por vezes, ao adicionar uma variável ao problema, tem-se um resultado mais preciso do que antes; contudo, caso não haja ganho nos resultados, essa variável pode ser desprezada.

Além disso, por meio de ferramentas e testes estatísticos, também é possível avaliar a qualidade do modelo proposto. Ao estimar parâmetros, parte-se do princípio de que o modelo matemático foi bem construído, suas equações descrevem em algum grau a realidade e que suas hipóteses são coerentes. Caso contrário, a estimação pode produzir parâmetros sem significado físico ou dados preditos fora da realidade.

Ainda segundo Schwaab e Pinto (2007), estimar parâmetros consiste essencialmente em três etapas: (1) definir uma métrica (função objetivo) adequada ao problema; (2) encontrar o ponto ótimo (máximo ou mínimo) da métrica adotada; e (3) formular uma interpretação estatística precisa dos parâmetros obtidos.

### 3.3.1. Definição da métrica – função objetivo

Trata-se da métrica utilizada para mensurar a proximidade entre os dados experimentais e os dados preditos pelo modelo.

Do ponto de vista estritamente matemático, a função objetivo precisa satisfazer as seguintes condições: (1)  $d(x,y)$  é um número real positivo; (2)  $d(x,y)$  é igual a zero se e somente se  $x=y$ ; (3)  $d(x,y)$  é uma transformação comutativa; (4)  $d(x,y)$  satisfaz a desigualdade do triângulo; (5)  $d(x,y)$  deve conter significação estatística. Caso a função proposta atenda tais condições, poderá ser usada como função objetivo.

Além disso, algumas hipóteses fundamentais são assumidas. Uma delas é a hipótese do modelo perfeito, sendo qualquer desvio observado entre o dado experimental e o dado predito consequência apenas das incertezas experimentais. Outra hipótese é a do experimento bem-feito, sendo razoável admitir que os valores experimentais obtidos representam adequadamente a realidade experimental e que os erros experimentais são aleatórios e simétricos. Nesse trabalho, adotou-se a métrica de mínimos quadrados.

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{NE} (y_i^{exp} - y_i^{pred}(x_i, \theta))^2 \quad (88)$$

Sendo  $y$ : variável dependente;  $x$ : variável independente;  $y^{exp}$ : variável experimental;  $y^{pred}$ : variável predita;  $\theta$ : parâmetro a ser estimado;  $NE$ : número de experimentos. Essa métrica não requer a necessidade de conhecer a distribuição dos erros experimentais, ou seja, não demanda conhecer a variância ou desvio-padrão.

O uso da técnica de mínimos quadrados, embora seja muito útil em diversos casos, possui algumas limitações. Uma delas é admitir que todas as variáveis analisadas pertencem a um mesmo conjunto amostral, ou seja, são medidas de uma mesma variável e foram obtidas com a mesma precisão em qualquer condição experimental. Os dois casos citados podem não ser verdadeiros. Por exemplo, os erros de medição de uma variável medida podem mudar de ponto para ponto em virtude de desempenho do instrumento de medida e das técnicas experimentais. Para essa função objetivo, os parâmetros ótimos serão obtidos quando a função objetivo estiver no seu valor mínimo. Como trata-se de um problema não-linear, será necessário usar técnicas numéricas a fim de obter o valor de mínimo dessas funções.

### 3.3.2. Minimização da função objetivo

A minimização da função objetivo de mínimos quadrados (equação 88), a obtenção dos parâmetros e de seus intervalos de confiança foi realizada por meio do *software* Statistica®. Trata-se de um programa que possui um conjunto de ferramentas estatísticas para diferentes análises de dados; dentre elas, estimação de parâmetros para funções não lineares.

Para seu uso, deve-se alimentar os dados na planilha do *software*, de tal forma que as variáveis dependente e independente estejam em colunas diferentes. Buscar o menu “*Statistics*”, “*Advanced Linear/Nonlinear Models*”, “*Nonlinear Estimation*”, “*User-specified regression, least squares*”, “*Function to be estimated*” e digitar o modelo matemático do qual deseja-se conhecer os parâmetros. No lugar das variáveis, digitar o nome da coluna onde se encontra. Em seguida, “*OK*”, selecionar o método de “*Gauss-Newton*”, “*OK*”, e aparecerá uma janela de resultados. Explorar as funções “*Summary: Parameter estimates*”, “*Predicted values, residuals, etc*” e “*Fitted 2D function & observed vals*”.

### 3.3.3. Interpretação estatística dos parâmetros obtidos

Geralmente, assume-se que o procedimento de estimação de parâmetros termina após a minimização da função objetivo, usando-se o modelo e seus parâmetros de forma indiscriminada. No entanto, esse pressuposto está errado, pois é fundamental analisar a qualidade do ajuste, dos parâmetros e da previsão do modelo com as ferramentas estatísticas apropriadas (Schwaab e Pinto, 2007).

#### 3.3.3.1. Qualidade do ajuste obtido

Foi utilizado teste F de Fischer para avaliar a qualidade do ajuste obtido através da técnica de mínimos quadrados. Para isso, comparou-se as variâncias experimentais e de predições. Caso os valores estejam dentro do mesmo intervalo, o modelo poderá ser considerado bom e as incertezas de predição comparáveis às incertezas experimentais, conforme



$$F(\nu_1, \nu_2; P_{ac}) < \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_y^2} < F(\nu_1, \nu_2; P_{ac}), \quad (89)$$

Sendo  $\nu$ : graus de liberdade do conjunto amostral.

O número de graus de liberdade perdidos durante o processo de estimação de parâmetros é igual ao número de parâmetros estimados, ou seja,  $\nu_1 = NE - NP$ . Assumindo-se que a variância experimental da medida é o valor verdadeiro, tem-se infinitos graus de liberdade para  $\nu_2$ . Assumindo um intervalo de confiança de 95% (ou nível de significância igual a 5%), o valor de  $P_{ac}$  (probabilidade acumulada) será de 0,025 para a primeira banda e de 0,975 para a segunda banda,

$$F((NE - NP), \infty; 0,025) < \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_y^2} < F((NE - NP), \infty; 0,975), \text{ e} \quad (90)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{F_{obj}}{NE - NP}, \quad (91)$$

Sendo NE: número de experimentos; NP: número de parâmetros;  $\sigma_\varepsilon$ : variância paramétrica;  $\sigma_y$ : variância experimental.

No entanto, caso o valor da função objetivo esteja fora dos limites impostos pelo teste F de Fischer, duas situações são possíveis:

1.  $\sigma_\varepsilon^2 > \sigma_y^2$  o modelo não é capaz de prever ou explicar corretamente os dados experimentais, pois os erros podem estar subestimados;
2.  $\sigma_\varepsilon^2 < \sigma_y^2$  o modelo reproduz os dados experimentais muito melhor do que o esperado, pois pode estar superparametrizado ou os erros podem estar superestimados.

### 3.3.3.2. Qualidade do parâmetro obtido

Deve-se também verificar a qualidade dos parâmetros obtidos, avaliando o intervalo de confiança dos parâmetros e a correlação paramétrica.

No caso do intervalo de confiança, se for incluído o zero, então o parâmetro não possui significância estatística; nesse contexto, pelo ponto de vista estatístico, o parâmetro e sua respectiva contribuição podem ser removidos do modelo analisado.

Já para a correlação paramétrica, deseja-se estar o mais próximo de zero possível. Quanto mais próximo de 1, mais forte será a correlação entre os parâmetros, ou seja, maior será a sensibilidade de um parâmetro frente a uma leve variação em outro parâmetro associado ao primeiro. Quando há elevada correlação entre dois parâmetros, a equação pode ser rearranjada de forma a minimizar a correlação existente. A reparametrização é um exemplo disso.

#### 3.3.3.3. Qualidade da previsão do modelo

Por fim, deve-se avaliar a qualidade da previsão do modelo. Essa análise é feita observando como os erros dos parâmetros propagam-se através do modelo e resultam em erros de predição. Para isso, calcula-se a resposta do modelo a partir dos limites dos intervalos de confiança dos parâmetros, gerando o intervalo de confiança do modelo. Esses resultados são usados para definir a região de validade do modelo ou avaliar a presença de outliers.

### 3.4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SIMULADOR

Um outro objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento do simulador após a implementação do módulo de efeitos térmicos e como os parâmetros reológicos dos fluidos com e sem adensante influenciam sua resposta. A construção do modelo e as hipóteses adotadas estão descritas no Apêndice C.

Após a atualização, o simulador recebeu um novo módulo e algumas alterações nos campos de dados de entrada (*“input data”* e *“busca automática de fluidos”*). Onde antes era “temperatura média do anular”, agora tem-se “temperatura no topo do anular”, “temperatura na base do anular” e é necessário informar a “temperatura de referência” na qual os parâmetros reológicos foram obtidos. Além disso, há um outro campo para informar a energia de escoamento, parâmetro que não existia na abordagem isotérmica. No mais, foram necessárias algumas adaptações no código para receber as novas variáveis e executar os cálculos pertinentes.

Para validar a atualização, o primeiro passo foi verificar se o novo módulo causou algum impacto negativo no resultado simulado quando comparado à versão anterior. Nesse caso, simulou-se um caso isotérmico na versão anterior e na versão

com a atualização, comparando-se as respostas. Para simular um caso isotérmico na versão atualizada, basta que a temperatura do topo e do fundo do poço sejam iguais. Dessa forma, todos os volumes de controle terão a mesma temperatura.

Em seguida, buscou-se compreender o impacto de algumas variáveis na rigidez numérica e no tempo de simulação. Para isso, assumiu-se dois casos baseados em uma simulação real de um poço. A tabela 8 descreve o caso base para um fluido base água e a tabela 9 para um fluido base óleo. Esses casos são baseados em dados reais obtidos em campo.

Avaliou-se o impacto na mudança das variáveis índice de consistência ( $M$ ), índice de comportamento ( $n$ ), energia de escoamento ( $\Delta H$ ) e diâmetro da partícula ( $dp$ ). A tabela 10 apresenta os valores testados. Por meio desse estudo, deseja-se verificar o comportamento do simulador em casos limites, mapear limitações e possíveis pontos de otimização do código.

Por fim, comparou-se os parâmetros reológicos estimados e os resultados simulados dos fluidos com e sem adensante, a fim de verificar se é possível descrever adequadamente o caso estudado com a reologia do fluido sem adensantes.

Caso seja possível, o problema não seria função da concentração de sólidos, o que simplificaria e não demandaria um banco de fluidos complexo. Para isso, a altura da camada de sedimentos simulada para os casos deve estar dentro de uma margem de erro de até 10%.

Além disso, avaliou-se o impacto da taxa de cisalhamento nos parâmetros e, conseqüentemente, nos resultados simulados. Caso a taxa de cisalhamento influenciar os parâmetros estimados, deve-se considerar qual faixa de taxa de cisalhamento melhor representaria os resultados reais e como isso impactaria a metodologia experimental para alimentar o simulador.

Tabela 8. Caso base para fluidos aquosos - dados de entrada do simulador.

PROPRIEDADES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO	
Tipo de Fluido Confinado	BA (Base Água)
Massa específica [lb/gal]	9,5
Fração volumétrica de sólidos [v/v]	0,038
Índice de consistência	0,5312
Índice de comportamento [Pa.sn]	0,3722
Temperatura [°C]	25
DADOS DO POÇO	

Temperatura no topo do anular [°C]	10
Temperatura na base do anular [°C]	84
Pressão manométrica no topo do anular [psi]	1372,67
Airgap [m]	0
Profundidade do topo do anular [m]	942
Profundidade da base do anular [m]	2622,71
Diâmetro externo do anular [m]	0,2224
Diâmetro interno do anular [m]	0,1397
Diâmetro do trecho aberto [m]	0
Extensão de trecho aberto [m]	0
<b>PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS ADENSANTES</b>	
Tipo de sólido adensante	Outros
Massa específica dos sólidos [lb/gal]	22,54
Diâmetro Médio dos Sólidos [micrômetros]	44
<b>DADOS DE ENTRADA</b>	
Tempo de sedimentação [dias]	1800
NÚMERO DE VOLUMES P/ DISCRETIZAÇÃO DA MALHA ESPACIAL PELO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	30000
<b>PARÂMETROS NUMÉRICOS</b>	
Usar valores default do passo de tempo (DT)? (0: False; 1: True)	1
Passo de tempo DT	0,001

Tabela 9. Caso base para fluidos olefínicos - dados de entrada do simulador.

<b>PROPRIEDADES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO</b>	
Tipo de Fluido Confinado	BO (Base Óleo)
Massa específica [lb/gal]	9,3
Fração volumétrica de sólidos [v/v]	0,078
Índice de consistência	0,53
Índice de comportamento [Pa.sn]	0,64
Temperatura [°C]	25
<b>DADOS DO POÇO</b>	
Temperatura no topo do anular [°C]	10
Temperatura na base do anular [°C]	84
Pressão manométrica no topo do anular [psi]	1492,7
Airgap [m]	25
Profundidade do topo do anular [m]	1052
Profundidade da base do anular [m]	2650
Diâmetro externo do anular [m]	0,4572
Diâmetro interno do anular [m]	0,3462
Diâmetro do trecho aberto [m]	0,4445
Extensão de trecho aberto [m]	700
<b>PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS ADENSANTES</b>	

Tipo de sólido adensante	B (Barita)
Massa específica dos sólidos [lb/gal]	-
Diâmetro Médio dos Sólidos [micrômetros]	-
DADOS DE ENTRADA	
Tempo de sedimentação [dias]	1800
NÚMERO DE VOLUMES P/ DISCRETIZAÇÃO DA MALHA ESPACIAL PELO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	30000
PARÂMETROS NUMÉRICOS	
Usar valores default do passo de tempo (DT)? (0: False; 1: True)	1
Passo de tempo DT	0,001

Tabela 10. Valores dos dados de entrada do simulador analisadas.

M [Pa.s <sup>n</sup> ]	n	$\Delta H$ [J/mol]	dp [ $\mu\text{m}$ ]
0,3	0,2	2000	35
0,5	0,3	4000	55
0,9	0,4	6000	65
1,5	0,5	10000	75
2,0	0,6	15000	85
5,0	-	20000	-

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Resumo:** Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios experimentais, ao ajuste dos dados de reologia à estimação de parâmetros e o estudo da sensibilidade do SimSag aos parâmetros ajustados.

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este estudo iniciou usando o viscosímetro FANN 35 A, de 12 marchas, conforme ilustrado na Figura 28. Esse é um equipamento muito usado em campo para avaliar propriedades reológicas de fluidos de perfuração e é capaz de medir entre as faixas de  $1,5 \text{ s}^{-1}$  até  $1021 \text{ s}^{-1}$ . Para isso, mede-se um ângulo de deflexão e converte-se para tensão. Avaliou-se o comportamento reológico de um fluido base água com adensante nas temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$ . Os resultados foram apresentados na tabela 11. Os parâmetros estimados para o modelo reológico Lei de Potência demonstraram que a temperatura não era uma variável estatisticamente significativa.

Figura 28. Viscosímetro FANN 35 A de 12 marchas.



Fonte: Autor.

Tabela 11. Dados brutos do experimento usando FANN 35 A.

RPM	Fluido Base Água Adensado						
	Ângulo (graus)						
	25°C	35°C	45°C	45°C	45°C	55°C	65°C
0,9	9,5	9,5	9,5	9	10	9,5	9
1,8	12	11,5	11,5	11,5	11,5	11	11
3	13,5	14	14	13	13,5	12,5	13
6	16	16	16	16	16	15,5	16
30	26	26	26	26	26,5	26	26
60	33	32	32	32	32,5	31,5	31
90	37	33	36,5	37	36,5	32	31
100	38	35	37,5	38	38	34	31,5
180	42	40	39	37,5	40	36	36,5
200	43	41	40	39,5	40,5	36,5	37
300	49	47	44	44	42,5	41	39
600	67	60	55	53	52	51	52

Embora esse seja um equipamento muito usado em campo, possui baixa sensibilidade. Por isso, buscou-se outro mais robusto, com maior precisão e que permitisse avaliar taxas de cisalhamento inferiores a  $1 \text{ s}^{-1}$ . Nesse sentido, o reômetro Anton Paar MCR 302 (Figura 25) foi a solução adotada.

Os resultados experimentais obtidos no reômetro e suas discussões foram separados em cinco blocos. No segundo tópico desse capítulo foram apresentados os dados experimentais obtidos com geometria de cilindros concêntricos, que trabalha com uma faixa de taxa de cisalhamento mais próxima do viscosímetro FANN 35 A, mas sem abrir mão de medições em baixas taxas (entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). No terceiro, foram apresentados os dados experimentais obtidos com geometria de placas paralelas ranhuradas para abordar baixas taxas de cisalhamento (entre  $100$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ ), discutindo eventuais semelhanças e divergências ao trocar geometria. No quarto, foram apresentadas as estimações de parâmetros em função da temperatura e da faixa de cisalhamento. Para cada conjunto de dados, foram apresentadas as estimações de parâmetros e as discussões quanto à qualidade do ajuste, qualidade do parâmetro e da qualidade da previsão do modelo. No quinto, foram apresentadas simulações com diferentes dados de entrada (índice de consistência, índice de comportamento, energia de escoamento e diâmetro da partícula). Além disso, avaliou-se o comportamento do simulador em função dos parâmetros reológicos dos fluidos

com e sem adensantes. No sexto tópico, foram feitas as considerações finais a respeito da metodologia, dos dados experimentais e dos resultados obtidos.

Os modelos reológicos utilizados para descrever os dados experimentais e estimar parâmetros foram descritos na tabela 10 (item 3.3). Optou-se por não abordar o modelo Herschel-Bulkley com WLF para evitar a construção um modelo com 5 parâmetros, pois seriam muitas variáveis para descrever apenas os dados reológicos.

Foi observado o torque do equipamento em todas as medições. Segundo o manual do reômetro Anton Paar MCR 302, o torque mínimo é de 0,5 nN.m e o torque máximo é de 230mN. Leituras fora desse intervalo não podem ser consideradas corretas. Todas as leituras desse trabalho ficaram dentro desse intervalo.

No que se refere ao conjunto de dados experimentais, é importante mencionar algumas considerações. A primeira é que alguns pontos experimentais, os quais claramente não acompanharam a tendência do seu conjunto experimental, dados discrepantes e/ou com indícios de erros experimentais, foram descartados. Para isso, buscou-se respeitar as incertezas experimentais e retirar a menor quantidade de pontos. Isso se fez necessário para ajustar melhor os dados experimentais. Os pontos excluídos foram apresentados na tabela 12.

As primeiras estimações, que foram feitas com todos os dados, demonstraram grande dificuldade em ajustar os dados, produzindo erros de predições elevados (superiores a 20%) em todas as faixas de taxas de cisalhamento. No apêndice A e B encontram-se todos os dados experimentais das curvas de escoamento, inclusive os que foram retirados durante a estimação.

Outra consideração importante é a interpretação estatística dos dados. Para o modelo ser considerado bom, é preciso que seus parâmetros sejam estatisticamente significativos e que a razão entre a variância dos dados preditos e dados experimentais esteja compreendida dentro do intervalo de confiança do teste F de Fisher. Além disso, é desejável que a correlação paramétrica seja baixa, ou seja, próxima de zero (distante de 1 e -1).

É possível que, em alguns casos, os parâmetros estimados sejam estatisticamente significativos, mas não tenham significado ou interpretação física. Valores de tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) negativos, índice de consistência ( $M$ ) negativos ou índice de comportamento ( $n$ ) nulos ou negativos não possuem significado físico, por exemplo.



Por conta da baixa variância experimental no decorrer dos experimentos, em muitos gráficos, não será possível notar a presença de barras de erros, embora existam e estejam representadas.

Tabela 12. Pontos experimentais excluídos da estimação de parâmetros.

		LEF/UFRuralRJ	CENPES/PETROBRAS
Base Água Adensado	5°C	13, 15 e 28	20, 21, 23 e 25
	15°C	Nenhum	24 e 25
	25°C	Nenhum	19
	35°C	Nenhum	Nenhum
	45°C	Nenhum	Nenhum
Base Água Sem Adensante	5°C	Nenhum	Nenhum
	15°C	Nenhum	20 e 21
	25°C	Nenhum	19
	35°C	Nenhum	19
	45°C	Nenhum	Nenhum
Base Óleo Adensado	5°C	1, 10, 19, 25, 26 e 27	Nenhum
	25°C	2, 3, 4 e 5	Nenhum
	45°C	Nenhum	Nenhum
	65°C	5, 10, 11, 12 e 13	Nenhum
	85°C	-	Nenhum
Base Óleo Sem Adensante	5°C	1, 8, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26	24 e 25
	25°C	8	Nenhum
	45°C	1, 2, 3, 4 e 25	Nenhum
	65°C	1, 2, 3 e 4	Nenhum
	85°C	-	Nenhum

## 4.2. ENSAIOS REOLÓGICOS COM CILINDROS CONCÊNTRICOS

### 4.2.1. Taxa de Cisalhamento Constante

Esse teste busca determinar o tempo necessário para que a leitura de tensão estabilize para uma dada taxa de cisalhamento. Isso é importante para programar a curva de escoamento corretamente. O programa do reômetro, por definição, toma pontos após poucos segundos. No entanto, fluidos de perfuração são misturas complexas e necessitam de um determinado tempo para que a leitura estabilize. As figuras 29 e 30 exemplificam o caso do fluido base óleo adensado.

Na Figura 29, com taxa de cisalhamento constante de  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ , foi possível observar que a leitura apresentava elevado desvio experimental, oscilando em torno de um ponto médio. Na Figura 30, com taxa de cisalhamento constante de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , é

possível observar que a leitura apresentou menos ruído e estabilizou após um período de tempo. Uma das justificativas para isso está associada a fenômenos de deslizamento na geometria utilizada.

Figura 29. Tensão de cisalhamento em função do tempo para taxa de cisalhamento constante de  $0,0001\text{s}^{-1}$  para fluido base óleo adensado.

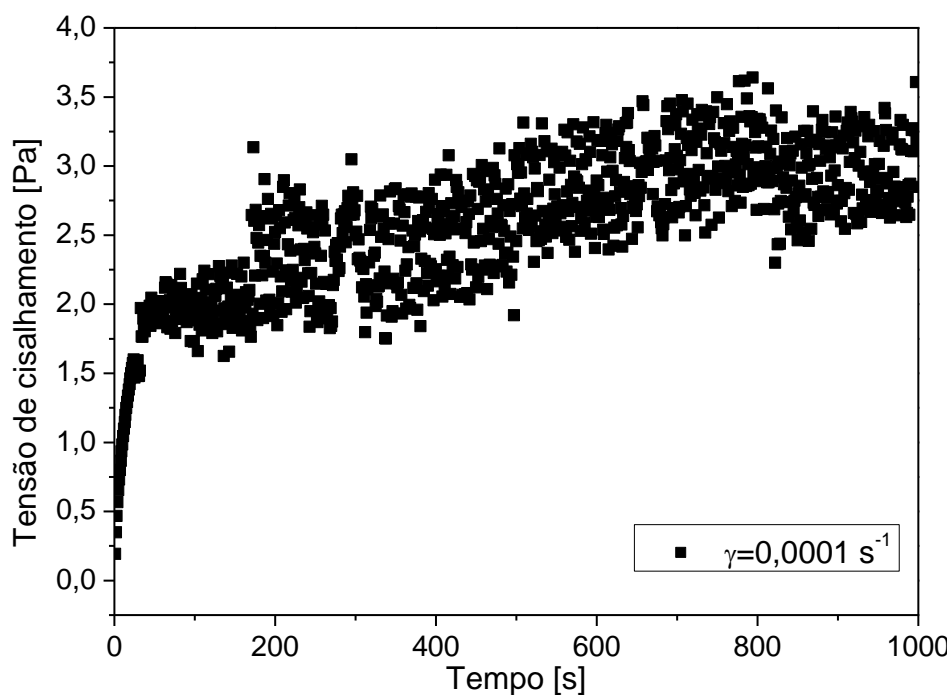
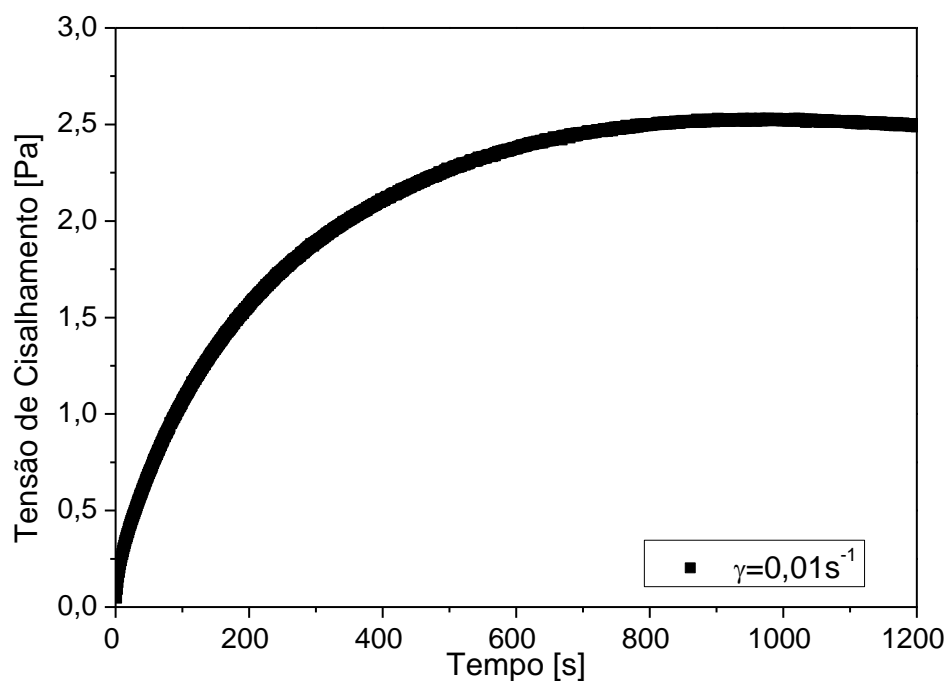


Figura 30. Tensão de cisalhamento em função do tempo para taxa de cisalhamento constante de  $0,01\text{s}^{-1}$  para fluido base óleo adensado.



Avaliou-se apenas o ponto de menor taxa de cisalhamento. Geralmente esse é o ponto que demanda maior tempo para estabilizar por conta do rompimento e reorganização da microestrutura. No primeiro ponto, há uma estrutura, que será rompida e reorganizada na direção do fluxo. Do segundo ponto em diante, a estrutura já estará organizada na direção do fluxo, de tal forma que o tempo necessário para estabilizar a leitura será menor.

De fato, ao final de cada curva de escoamento – programada para fazer leituras apenas após estabilizar a leitura – pôde-se observar isso. O programa do reômetro informa o tempo necessária para cada leitura. O ponto de menor taxa de cisalhamento demandou o maior tempo para leitura estabilizar.

Esse teste foi realizado para todas as 4 formulações para taxas de cisalhamento de  $0,0001\text{ s}^{-1}$ ,  $0,001\text{ s}^{-1}$  e  $0,01\text{ s}^{-1}$ . Concluiu-se que a leitura só estabilizava a partir de  $0,01\text{ s}^{-1}$  e, por isso, executou-se as curvas de escoamento nessa geometria a partir desse valor.

Considerando taxa de cisalhamento constante de  $0,01\text{ s}^{-1}$ , a leitura para os fluidos base água com e sem adensante estabilizou após 300 segundos; já para os fluidos base óleo com e sem adensante, após 900 segundos. Essa diferença de tempo entre fluidos de bases diferentes deve-se às suas características e composições.

A fim de garantir uma “margem de segurança”, as curvas de escoamento foram programadas com tempo limite para tomada do ponto com 500 segundos para os fluidos base água e 1200 segundos para os fluidos base óleo. Em nem um dos experimentos realizados, a leitura chegou nesse tempo limite.

É possível encontrar alguns trabalhos cuja leitura se deu após poucos segundos, que é uma opção padrão do equipamento, conforme descrito por *et al.* (2021). Nesse trabalho, os autores usaram a geometria de cilindros concêntricos e fizeram leituras após 15 s. Os resultados reportados foram de curvas de escoamento “atípicas”, principalmente para regiões entre  $0,01\text{ s}^{-1}$  e  $1\text{ s}^{-1}$ .

Resultados dessa natureza também foram obtidos no decorrer dessa dissertação, enquanto realizavam-se testes e ajustes na metodologia. Isso aconteceu porque justamente não se deu tempo suficiente para estabilizar a leitura em uma determinada taxa de cisalhamento. Esses resultados foram descartados e não foram apresentados nessa dissertação, mas deixa-se tal observação para trabalhos futuros.

#### 4.2.2. Curvas de Escoamento

Nessa geometria, avaliou-se a faixa de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ . As figuras 33 até 36 apresentaram as curvas de escoamento ascendentes e as figuras 37 até 40 apresentam as curvas de viscosidade aparente obtidas em diferentes temperaturas para as quatro formulações estudadas. As figuras 41 e 42 comparam fluidos de mesma base para explicitar o efeito da temperatura e do adensante na viscosidade aparente. Os dados brutos encontram-se no apêndice A.

Esses experimentos utilizaram a geometria de cilindros concêntricos lisos (“*couette*”), à pressão atmosférica e com pré-cisalhamento da amostra. Executou-se duas curvas de escoamento: a primeira ascendente de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$  e a segunda descendente de  $1000 \text{ s}^{-1}$  até  $0,01 \text{ s}^{-1}$ . Só foi possível avaliar as temperaturas de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  e  $45^{\circ}\text{C}$  para os fluidos aquosos e de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$  e  $65^{\circ}\text{C}$  para os fluidos olefínicos.

Figura 31. Curvas de escoamento para fluido base água adensado ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

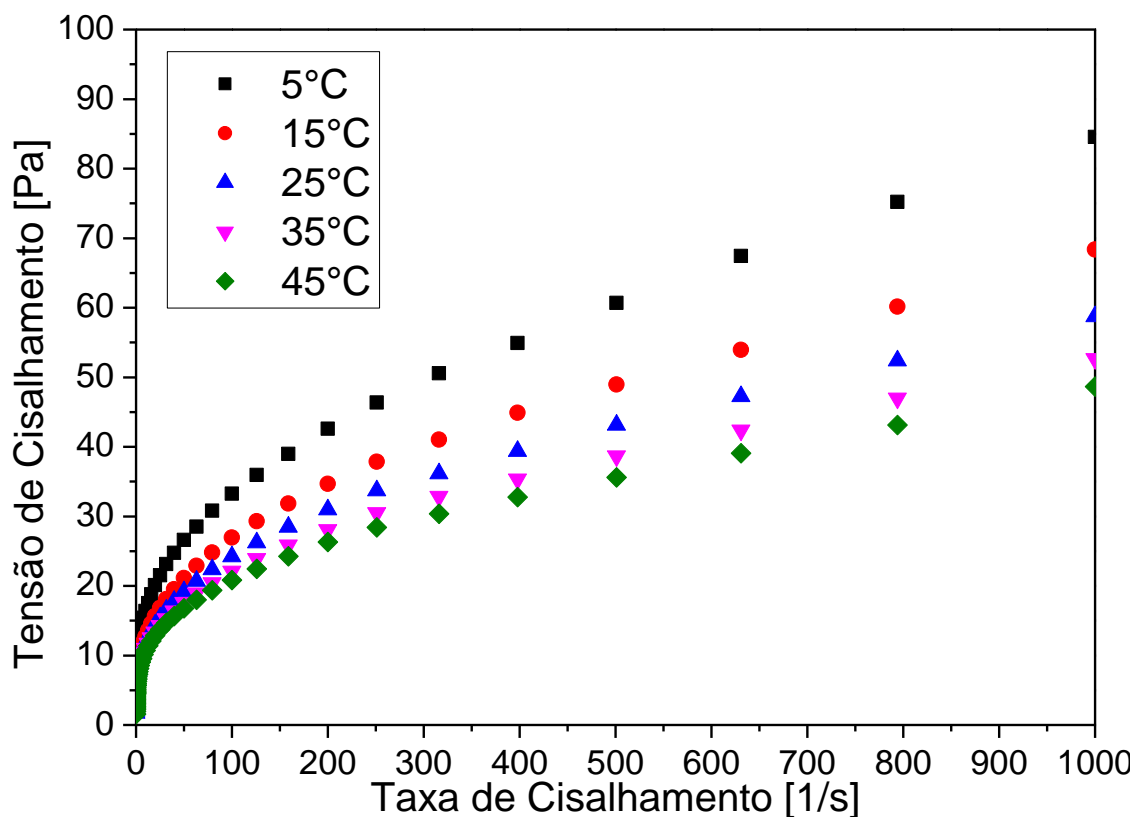


Figura 32. Curvas de escoamento para fluido base água sem adensante ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

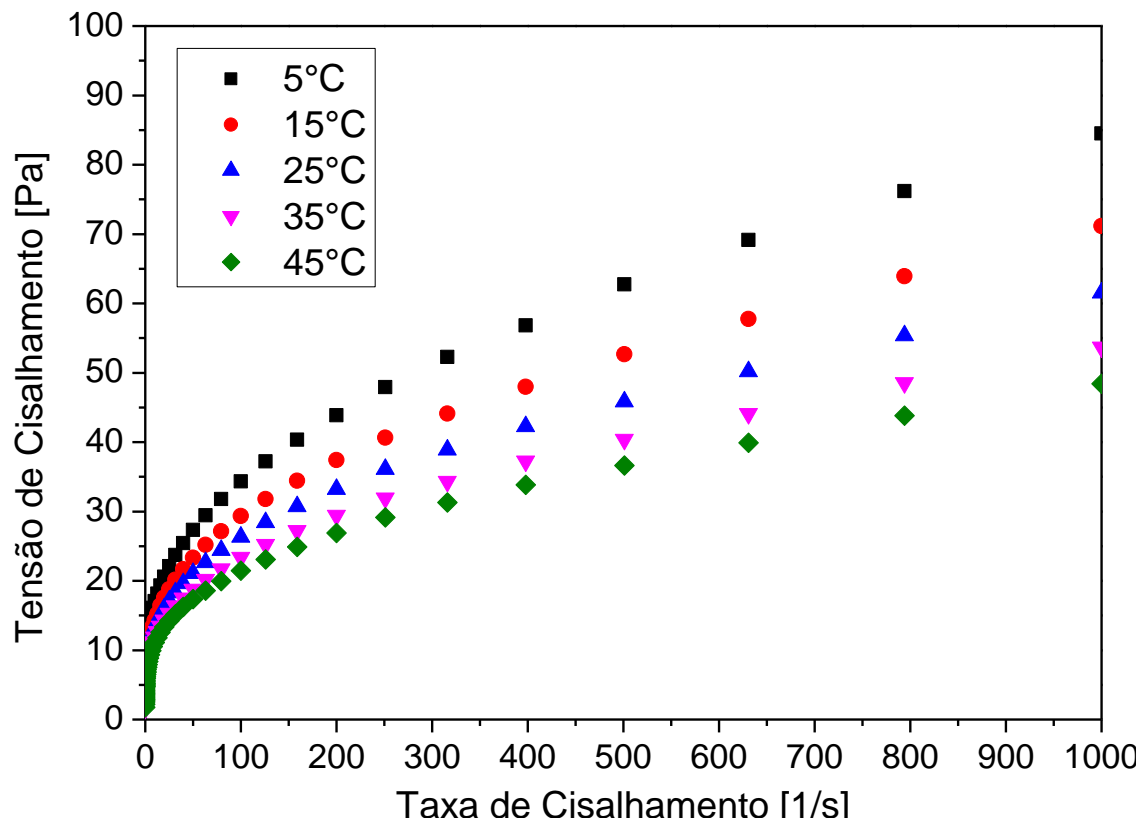


Figura 33. Curvas de escoamento para fluido base óleo adensado ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

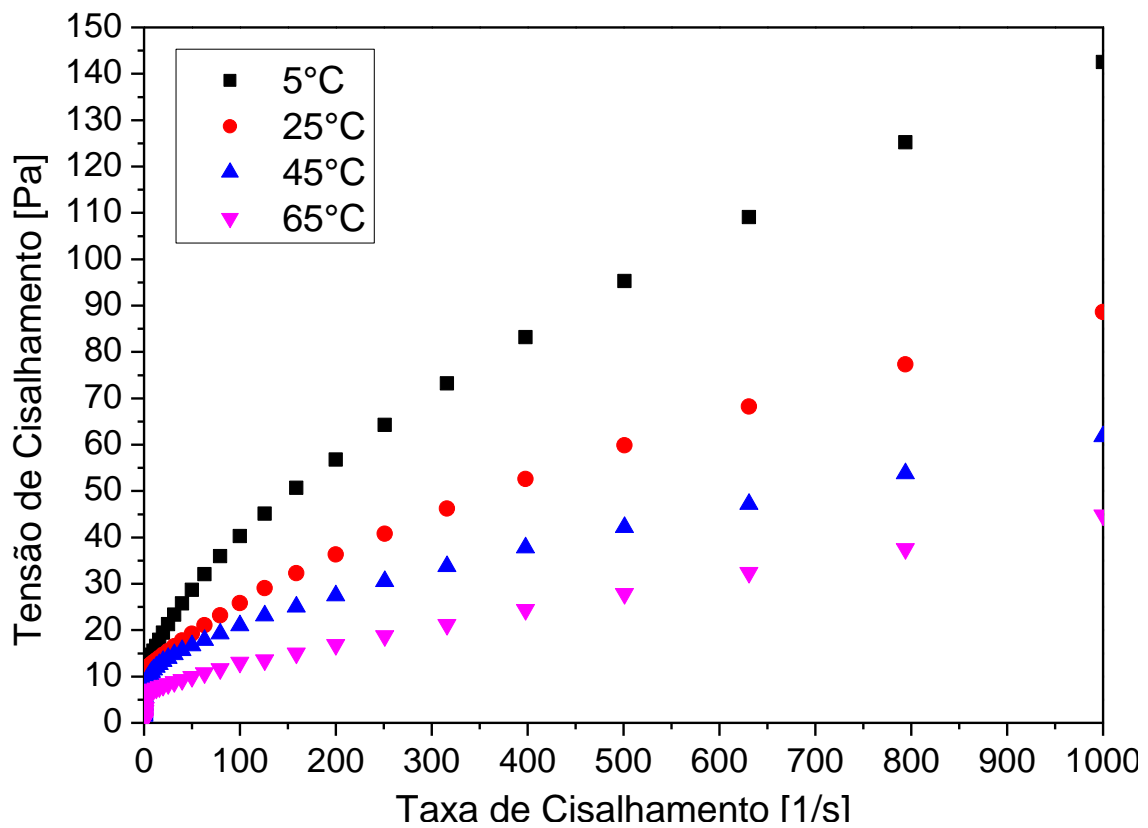


Figura 34. Curvas de escoamento para fluido base óleo sem adensante ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

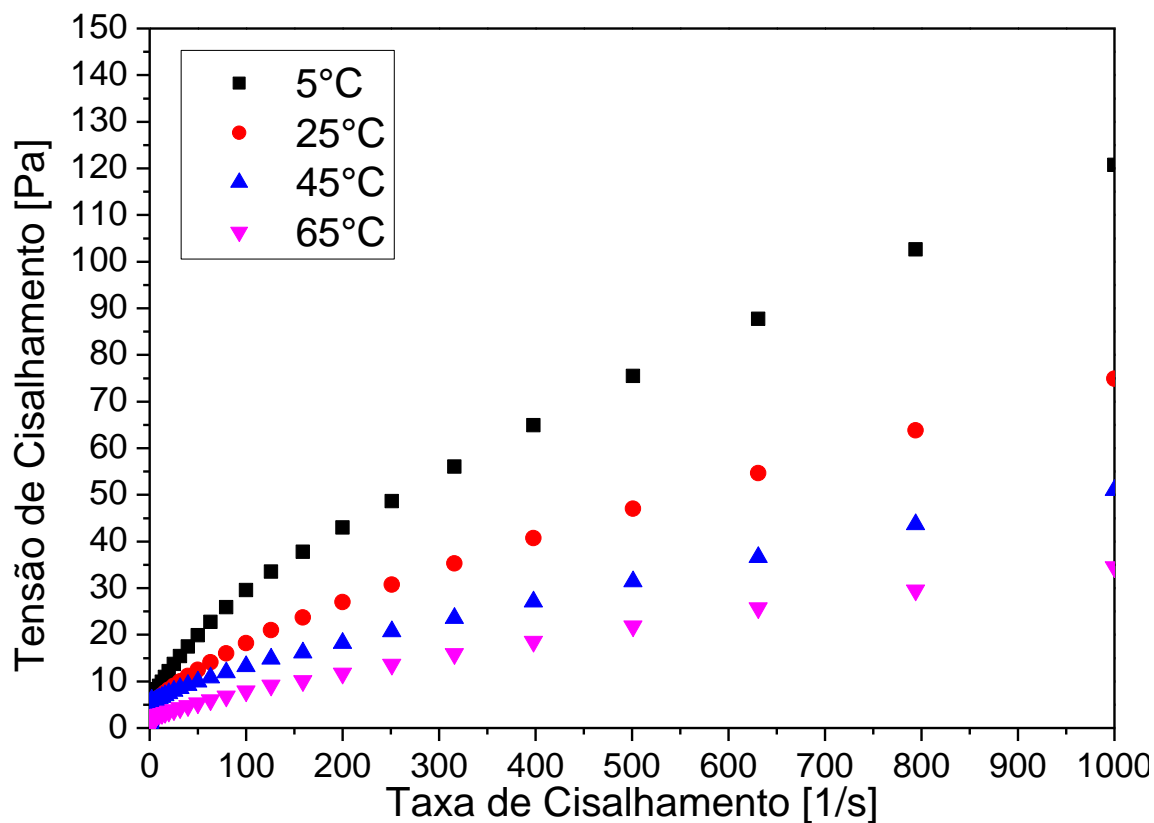


Figura 35. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água adensados ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

Gráfico em escala log-log.

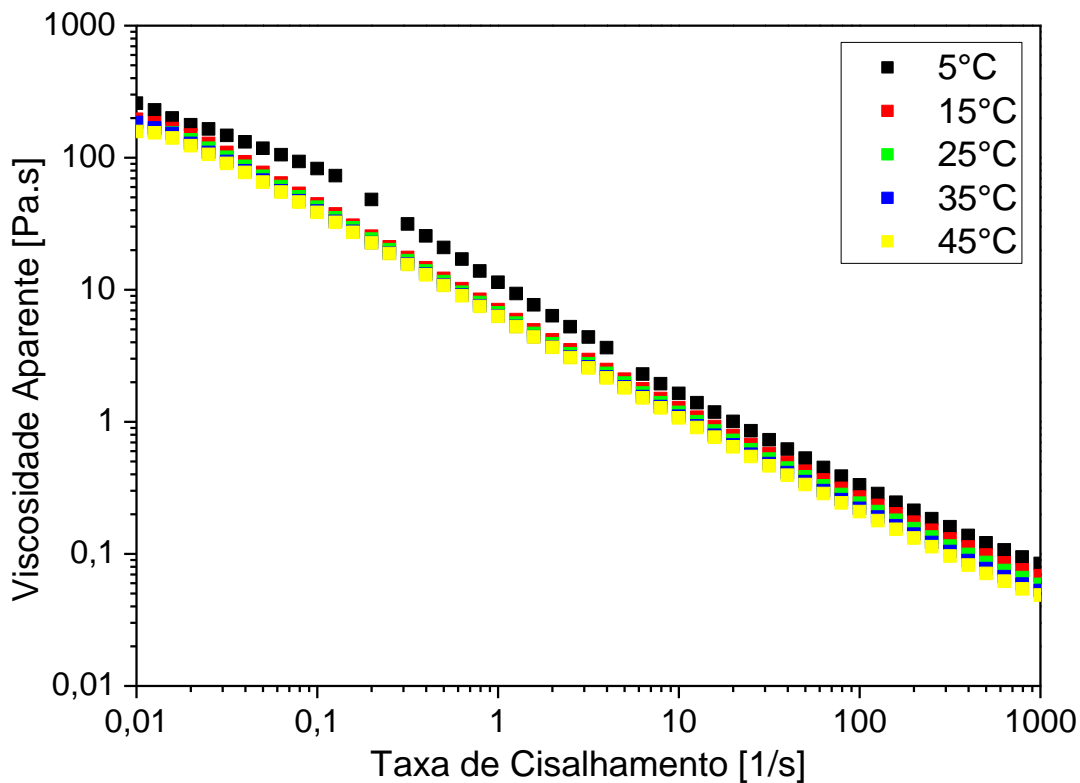


Figura 36. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água sem adensante ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.

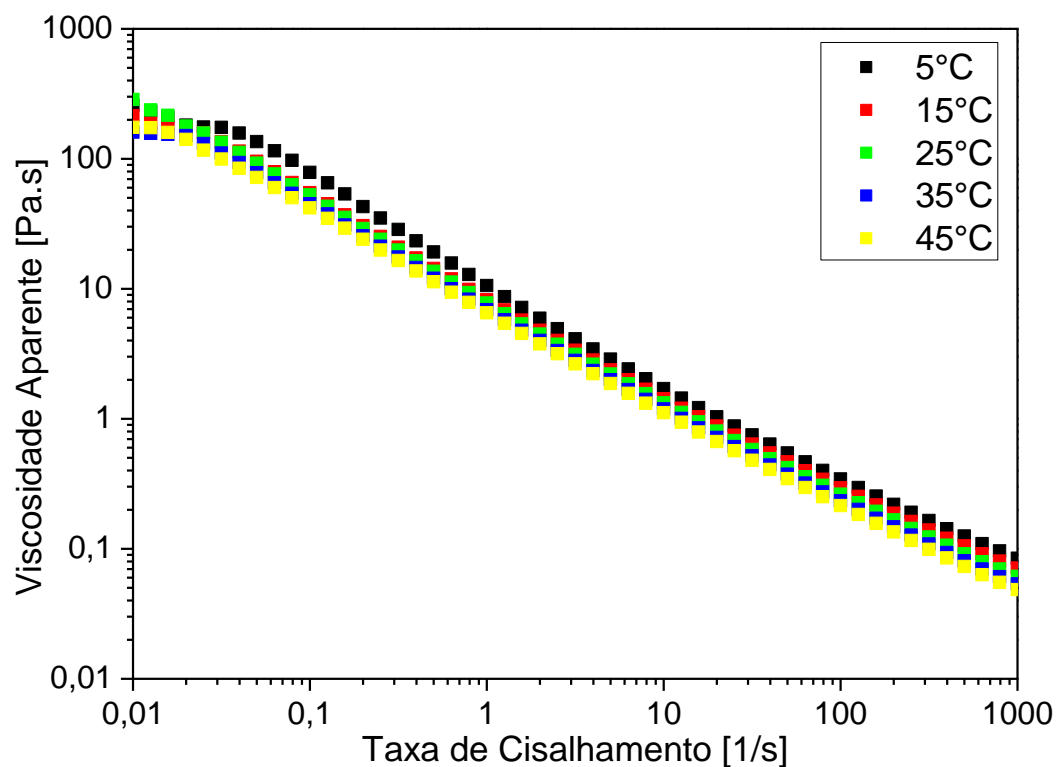


Figura 37. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo adensado ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.

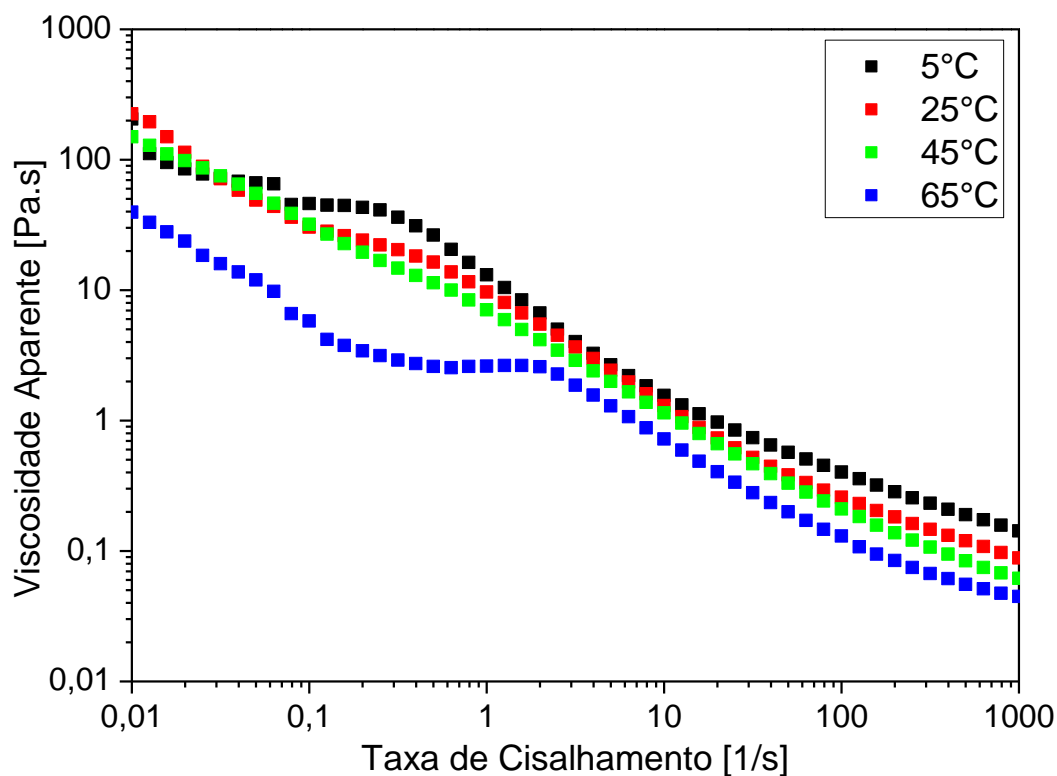


Figura 38. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo sem adensante ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.

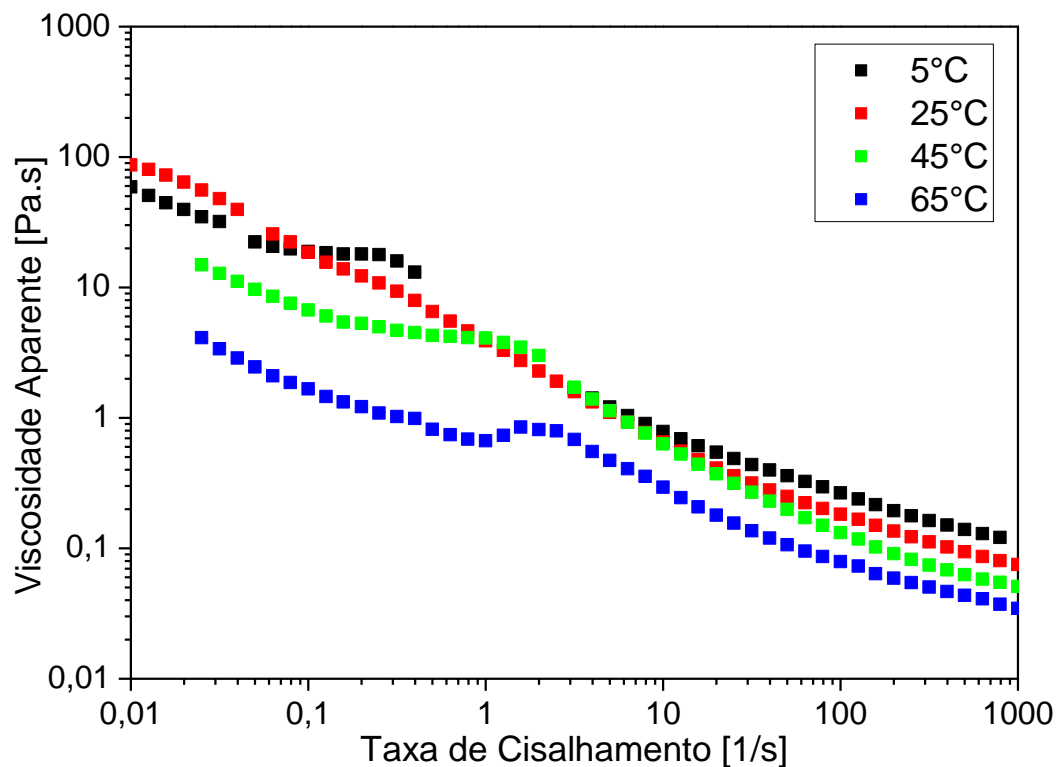


Figura 39. Fluidos base água adensado e sem adensante a  $5^{\circ}\text{C}$  e a  $45^{\circ}\text{C}$  ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

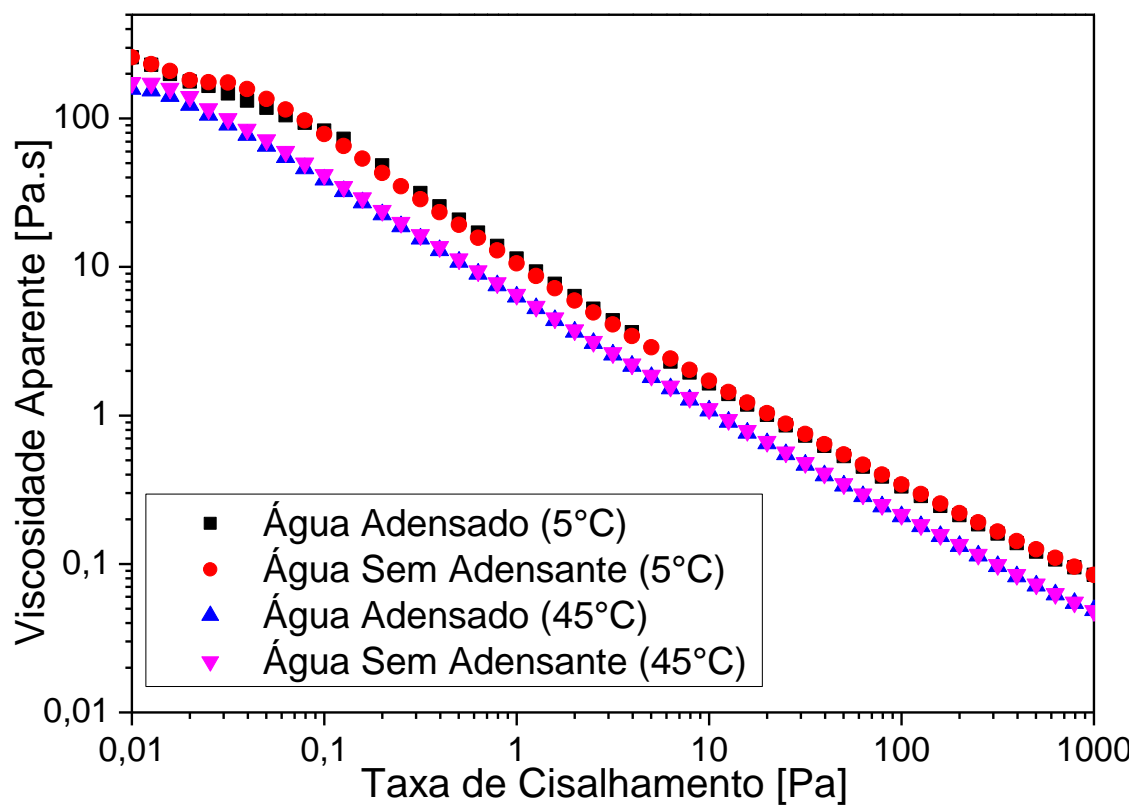
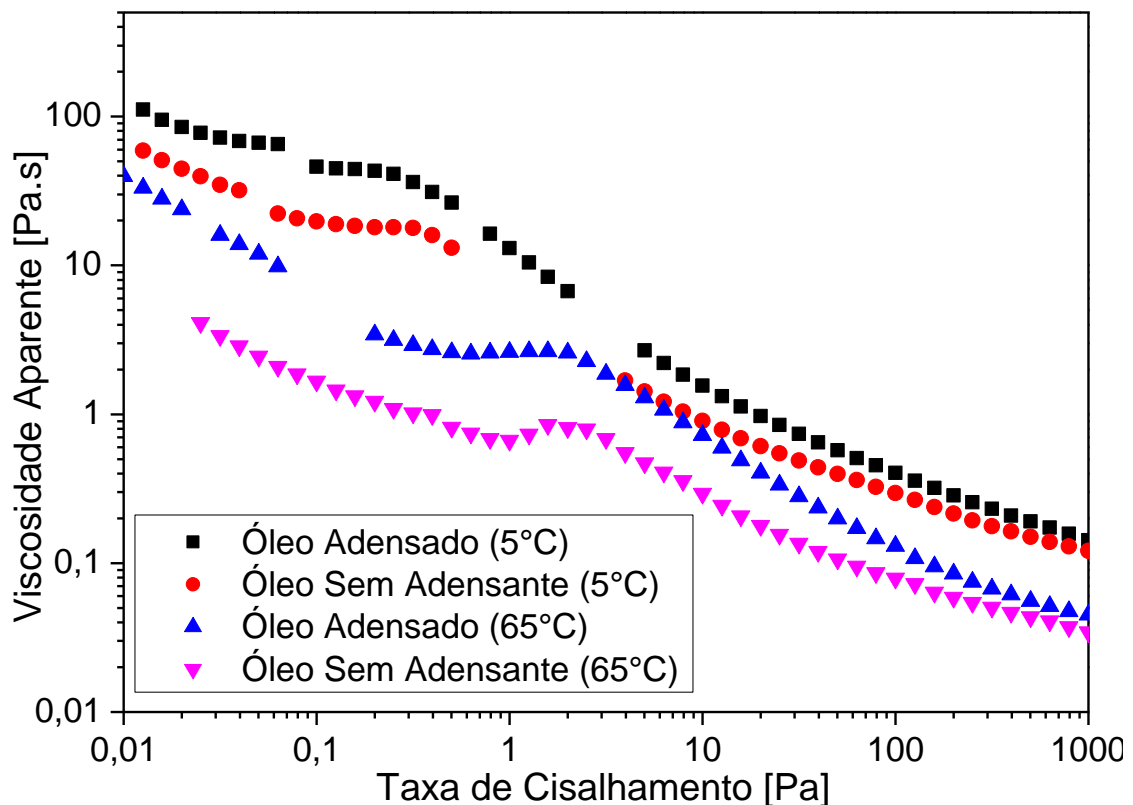




Figura 40. Fluidos base óleo adensado e sem adensante a 5°C e a 65°C (0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).



O comportamento dos fluidos base água com e sem adensante são relativamente semelhantes. As diferenças entre os valores de viscosidade aparente nas temperaturas avaliadas são inferiores a 15%. Para as temperaturas de 5°C e 45°C, a diferença é da ordem de 5%. As maiores diferenças são observadas justamente em dados a baixas taxas de cisalhamento (inferiores a 1 s<sup>-1</sup>).

Ao avaliar a faixa de taxa de cisalhamento entre 1 s<sup>-1</sup> e 1000 s<sup>-1</sup>, que é a faixa na qual o viscosímetro de campo FANN 35 A opera, a diferença entre os valores de viscosidade aparente é da ordem de 7%. Isso indica que para fluidos base água, não há diferença significativa entre um fluido com e sem adensante.

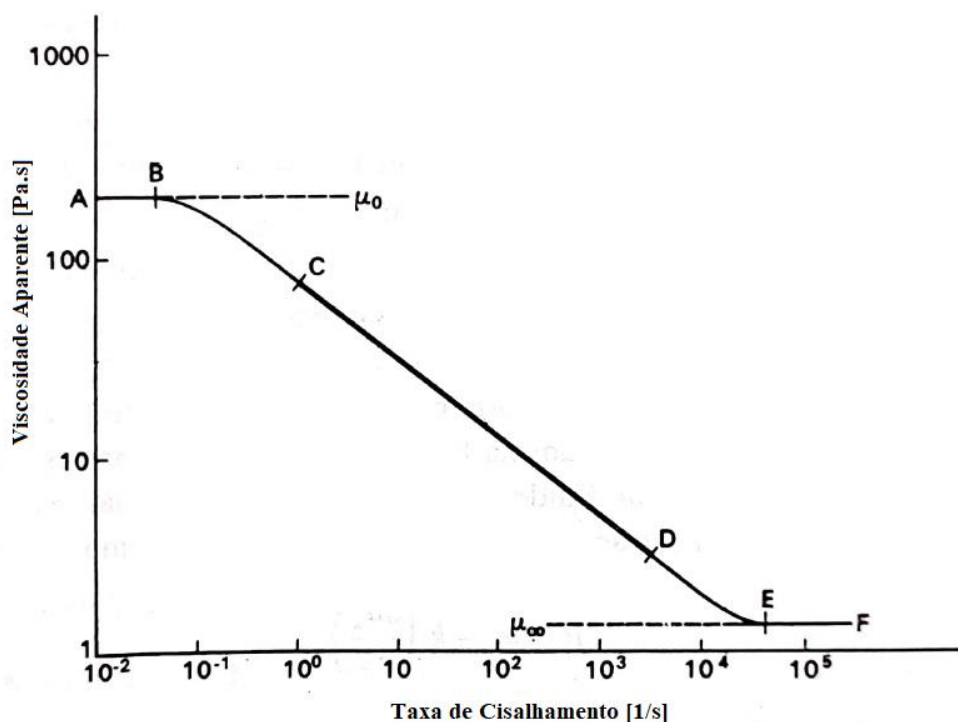
Em outras palavras, para a faixa entre 1 s<sup>-1</sup> e 1000 s<sup>-1</sup>, não há diferença significativa entre um fluido base água com e sem adensante. Mas ao adicionar dados para baixas taxas, próximos de 0,01 s<sup>-1</sup>, já é possível notar diferença significativa no comportamento reológico, superiores a 25% para fluidos base água e 50% para fluidos base óleo. Nesse sentido, para baixas taxas de cisalhamento, a presença do adensante pode ser um fator relevante para a análise.

Para os fluidos base óleo, é possível notar maior diferença do comportamento dos fluidos com e sem adensantes em função da temperatura e da taxa de cisalhamento. A diferença no valor da viscosidade aparente é da ordem de 50% e essa diferença se faz presente em todas as temperaturas analisadas. Até mesmo para a faixa de taxa de cisalhamento entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  observa-se esse comportamento (diferença da ordem de 40%).

O comportamento oscilatório das leituras abaixo de  $5 \text{ s}^{-1}$  para fluidos base óleo pode ser justificados pelo fenômeno de deslizamento, que é comum em geometrias lisas, principalmente para baixas taxas de cisalhamento, e já foi relatado na literatura. Ainda assim, comparando o intervalo entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ , nota-se uma diferença entre as viscosidades aparentes dos fluidos base óleo com e sem adensante.

Um outro objetivo dessa investigação era verificar a existência de platôs de viscosidade aparente a baixas taxas de cisalhamento, como o ilustrado na Figura 41. Esse platô poderia ser indicativo de comportamento newtoniano, o que dispensaria uma abordagem matemática para a reologia, pois a viscosidade aparente nessa faixa seria uma constante. No entanto, não foram observados esses platôs, nem a baixas e nem a altas taxas de cisalhamento.

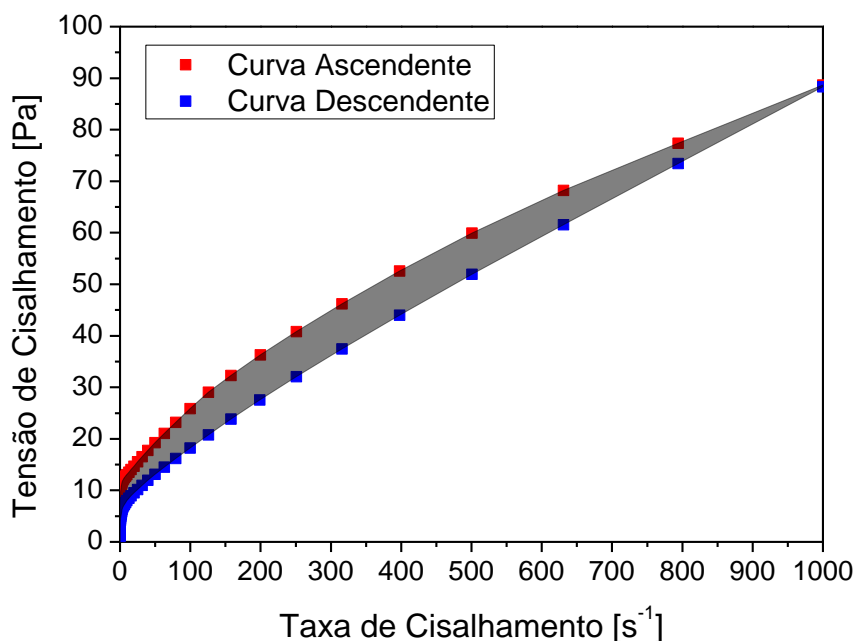
Figura 41. Exemplo ilustrativo de platôs de viscosidade.



Fonte: Coulson e Richardson, 1979 (Adaptado).

Através das curvas ascendentes e descendentes de cada fluido e em cada temperatura, foi possível verificar que há uma área de histerese (diferença entre as curvas ascendentes e descendentes), o que ratifica o comportamento tixotrópico desses fluidos. A Figura 42 ilustra essa área e as tabelas 10 e 11 apresentam os valores. Esses dados foram fornecidos pelo próprio equipamento ao final da análise.

Figura 42. Área de histerese para o fluido base óleo adensado a 45°C.



Fonte: Autor.

Os resultados demonstram que há dois valores de tensão, ou ainda dois valores de viscosidade aparente, para a mesma taxa de cisalhamento. Isso se dá por conta do rompimento e formação de microestruturas e da orientação das partículas que compõem os fluidos. A curva ascendente, que partiu do repouso, teve tempo de análise maior do que a curva descendente. Partindo-se do repouso, é necessário empregar a mesma taxa por mais tempo até estabilizar a leitura. Por outro lado, partindo-se de uma alta taxa de cisalhamento, com microestruturas já rompidas e orientadas em um dado sentido, as leituras tornam-se mais rápidas.

A diferença entre esses valores está relacionada com o grau de tixotropia do fluido e pelo seu histórico de cisalhamento, evidenciado pela área entre as curvas (área de histerese). Excluindo-se o ponto de 45°C do fluido base água adensado, é possível notar que a área de histerese formada possui correlação inversamente proporcional com a temperatura.

Tabela 13. Área de histerese dos fluidos aquosos.

Temperatura	Base Água Adensado [Pa.s <sup>-1</sup> ]	Base Água Sem Adensante [Pa.s <sup>-1</sup> ]
5°C	779	2559
15°C	158	1499
25°C	195	1335
35°C	138	1146
45°C	219	1082

Tabela 14. Área de histerese dos fluidos olefinicos.

Temperatura	Base Óleo Adensado [Pa.s <sup>-1</sup> ]	Base Óleo Sem Adensante [Pa.s <sup>-1</sup> ]
5°C	11050	6206
25°C	6264	3642
45°C	4208	2123
65°C	1593	1534

Para verificar se esses valores de histerese foram significativos, comparou-se os parâmetros estimados para cada curva em cada temperatura. Caso os intervalos de confiança dos parâmetros se interceptassem, esse efeito poderia ser considerado desprezível. Ao fazer essa análise, observou-se que a histerese foi significativa a partir de 1200 Pa.s<sup>-1</sup>.

O planejamento experimental inicial contemplava 5 temperaturas para as quatro formulações: 5°C, 25°C, 45°C, 65°C e 85°C. Evitou-se usar temperaturas negativas ou muito próximas da evaporação da água (100°C). No entanto, foram identificadas algumas limitações.

A primeira foi a evaporação do solvente para os fluidos base água com e sem adensante em temperaturas maiores que 45°C. A Figura 42 ilustra o problema.

Outro ponto foi a separação de fase observada nos fluidos base óleo com e sem adensante usando a geometria de cilindros concêntricos a 85°C, conforme apresentado na Figura 43. A análise nessa análise durou por volta de 45 minutos, tempo que não é suficiente para que as fases se separem por ação gravitacional, mas que pode de alguma forma degradar o fluido.

Figura 43. Aspecto do fluido base água adensado durante e após análise a 55°C na geometria de cilindros concêntricos.



Fonte: Autor

Figura 44. Aspecto do fluido base óleo adensado imediatamente após análise a 85°C na geometria de cilindros concêntricos.



Fonte: Autor

### 4.3. ENSAIOS REOLÓGICOS COM PLACAS PARALELAS RANHURADAS

O uso da geometria de placas paralelas ranhuradas objetiva investigar o comportamento reológico desses fluidos para baixas taxas de cisalhamento. Pelas suas características e modo de operação, é possível obter dados até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . Mas essa geometria tem como limitação a taxa máxima, pois a geometria expulsa a amostra para valores superiores a  $100 \text{ s}^{-1}$ , descaracterizando o experimento.

#### 4.3.1. Curvas de Escoamento

As figuras 45 até 48 apresentaram as curvas de escoamento descendentes e as figuras 49 até 52 apresentam as curvas de viscosidade aparente obtidas em diferentes temperaturas para as quatro formulações estudadas. As figuras 53 e 54 comparam fluidos de mesma base para explicitar o efeito da temperatura e do adensante na viscosidade aparente. Os dados brutos encontram-se no apêndice B.

Esses experimentos utilizaram a geometria de placas paralelas ranhuradas, à pressão atmosférica e com pré-cisalhamento da amostra. Executou-se uma curva de escoamento de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . Foram avaliadas as temperaturas de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  e  $45^{\circ}\text{C}$  para os fluidos base água e de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$  para os fluidos base óleo.

Esse conjunto de dados experimentais ratificaram algumas discussões trazidas no tópico anterior, como ausência de platô de viscosidade.

Não foi possível sobrepor as curvas de escoamento realizadas com geometrias diferentes. Em um cenário ideal, isso seria possível, pois a reologia não deveria ser função da geometria utilizada. Há algumas possibilidades para justificar isso. Uma delas é que, embora a formulação seja a mesma, trata-se de amostras de fluidos diferentes, preparados em dias e condições diferentes. Outra é a ação do tempo entre o preparo e a execução do teste e histórico de cisalhamento. Os ensaios com cilindros concêntricos indicaram que os fluidos são tixotrópicos, ou seja, qualquer cisalhamento prévio pode influenciar no resultado da análise.

Além disso, as curvas de escoamento tanto do fluido base água como do fluido base óleo tenderam a estar mais distantes conforme a taxa de cisalhamento diminuía.

Figura 45. Curvas de escoamento para fluidos base água adensado ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

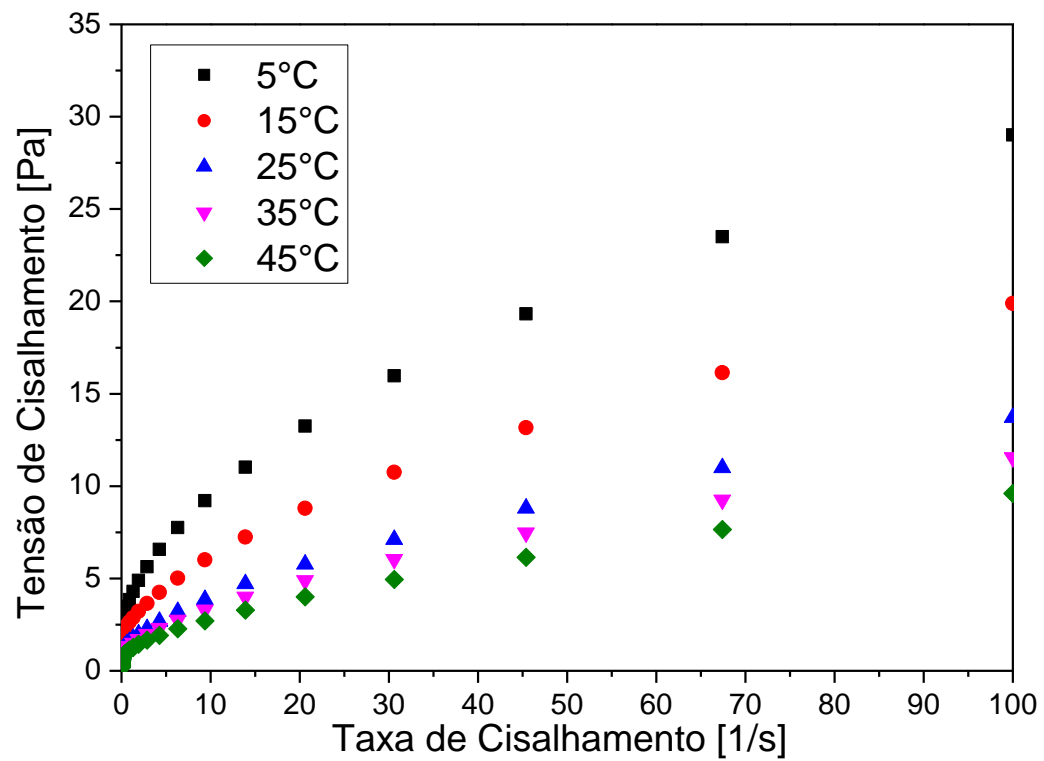


Figura 46. Curvas de escoamento para fluidos base água sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

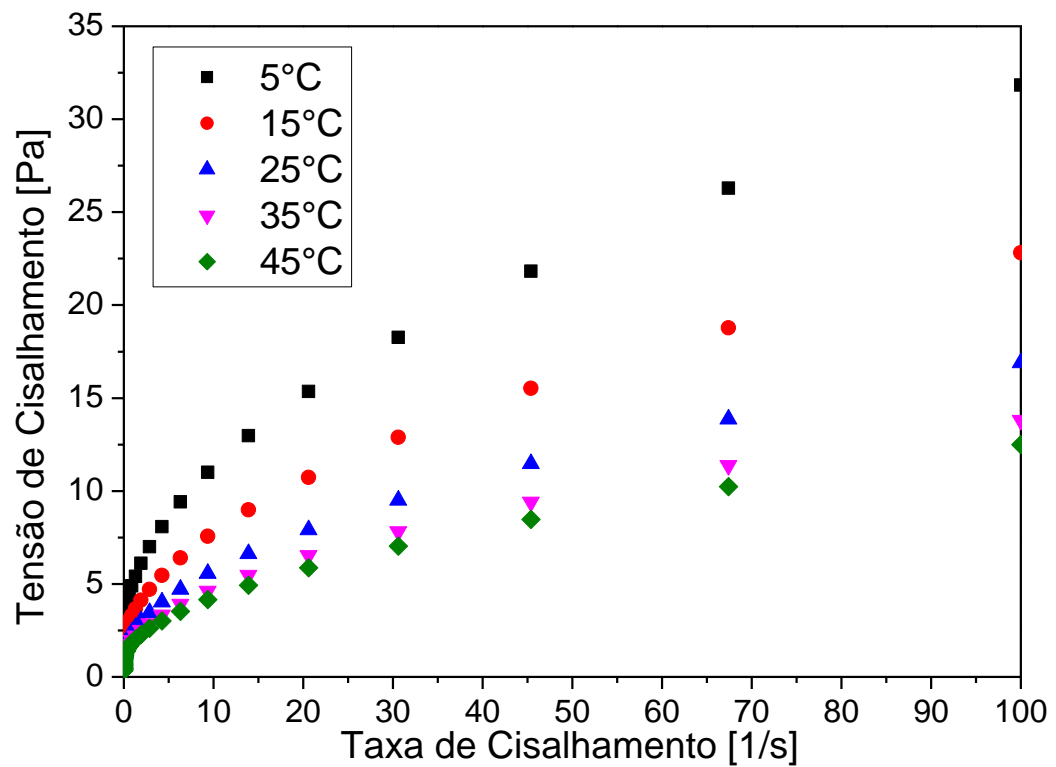


Figura 47. Curvas de escoamento para fluidos base óleo adensados ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

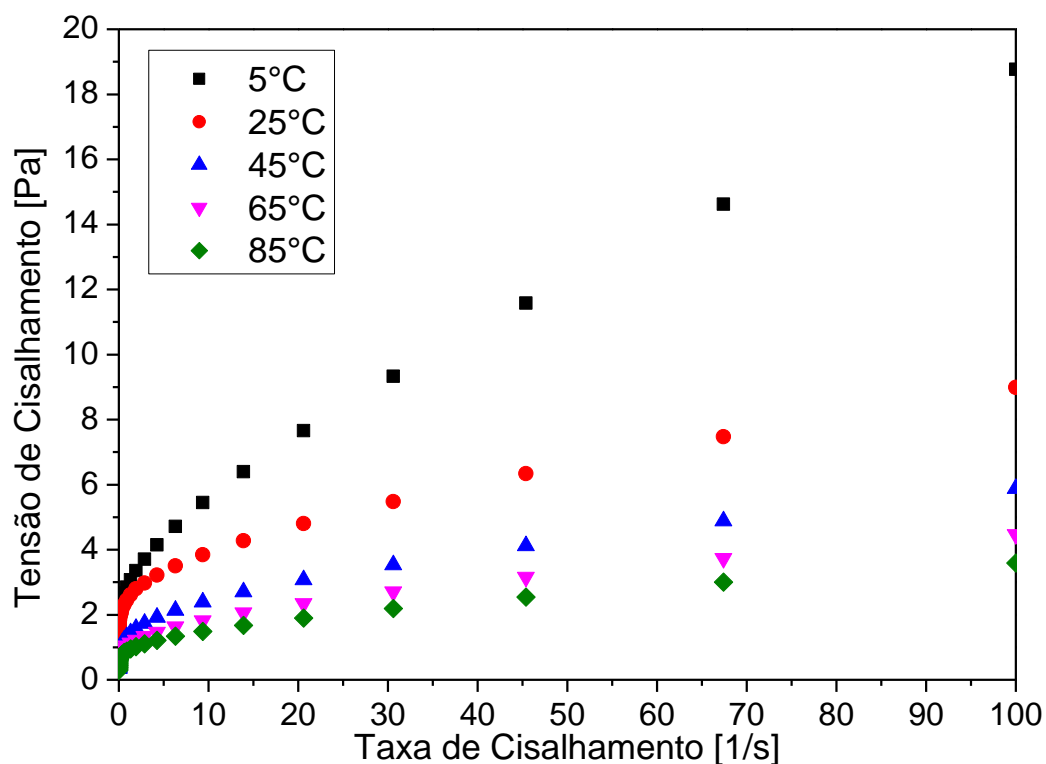


Figura 48. Curvas de escoamento para fluidos base óleo sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

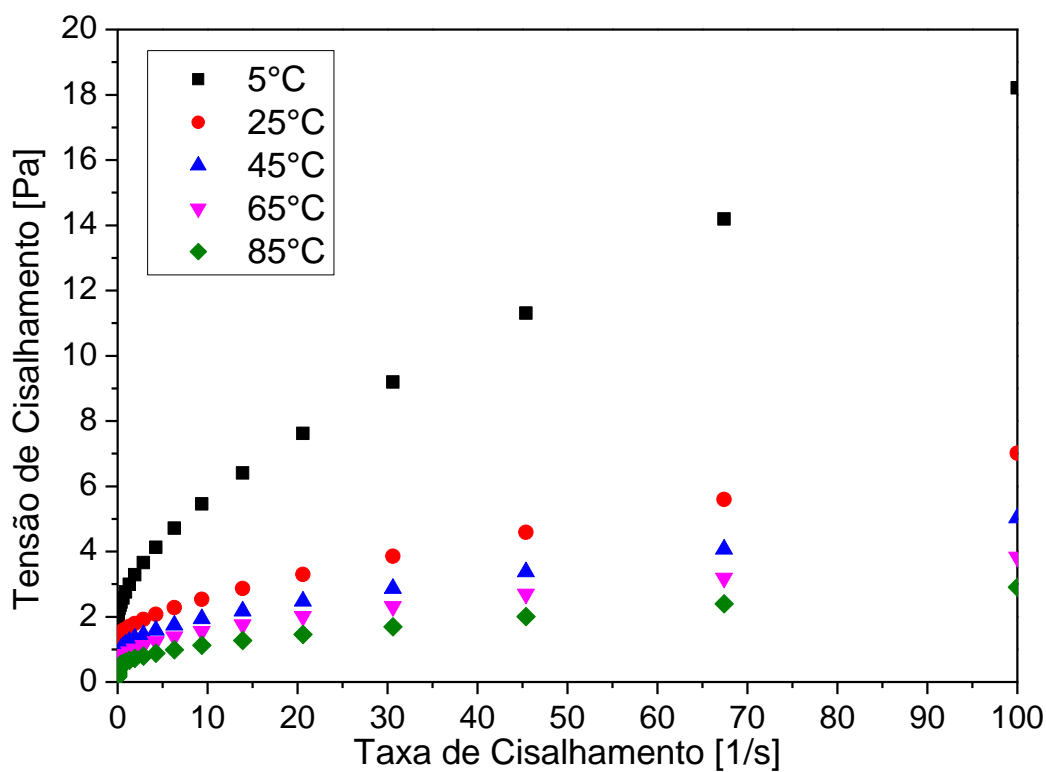




Figura 49. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água adensados ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

Gráfico em escala log-log.

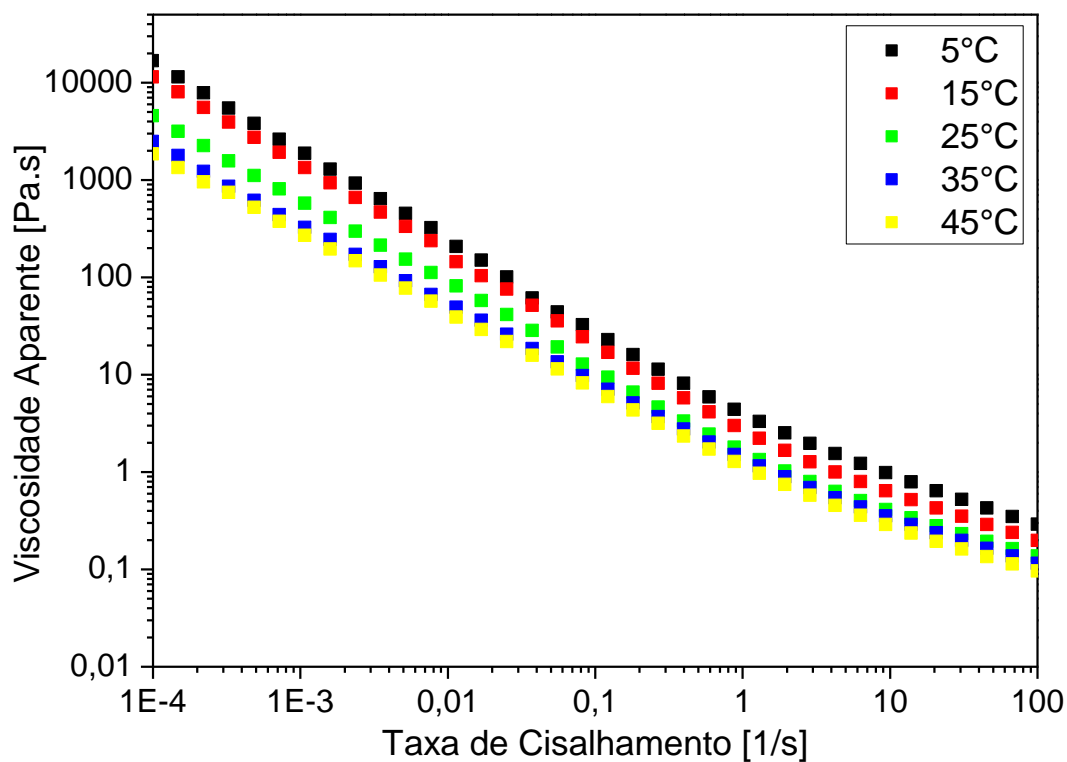


Figura 50. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base água sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ). Gráfico em escala log-log.

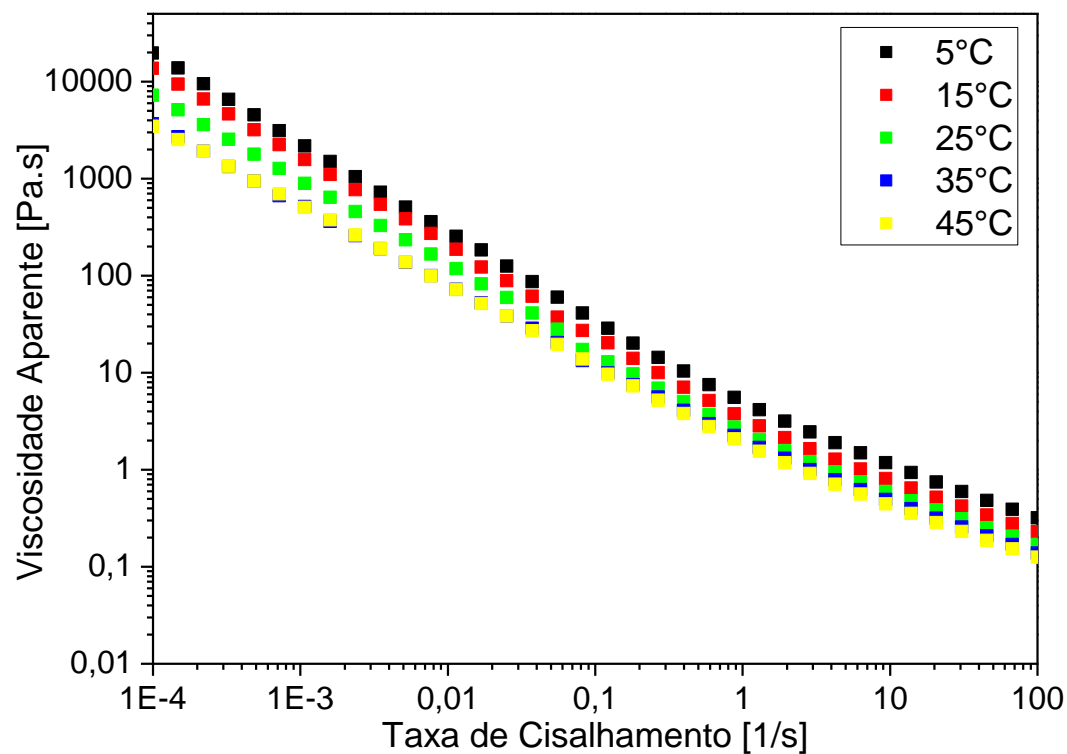


Figura 51. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo adensado ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

Gráfico em escala log-log.

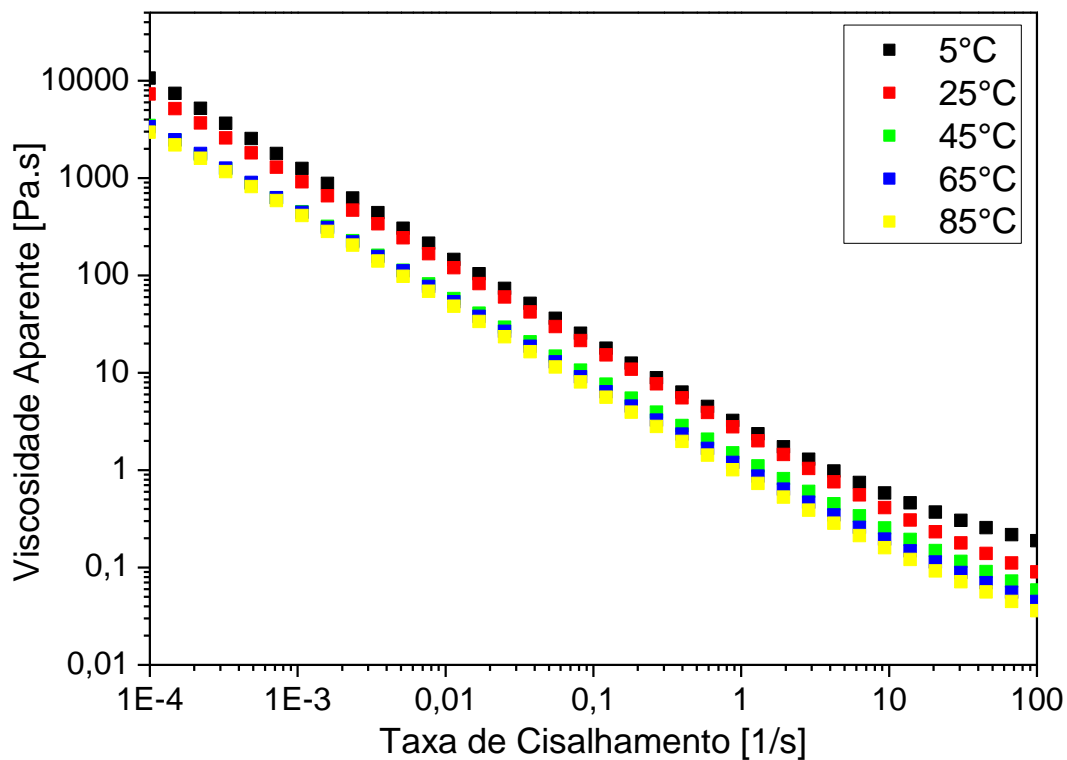


Figura 52. Viscosidade aparente contra taxa para fluidos base óleo sem adensante ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).  
1). Gráfico em escala log-log.

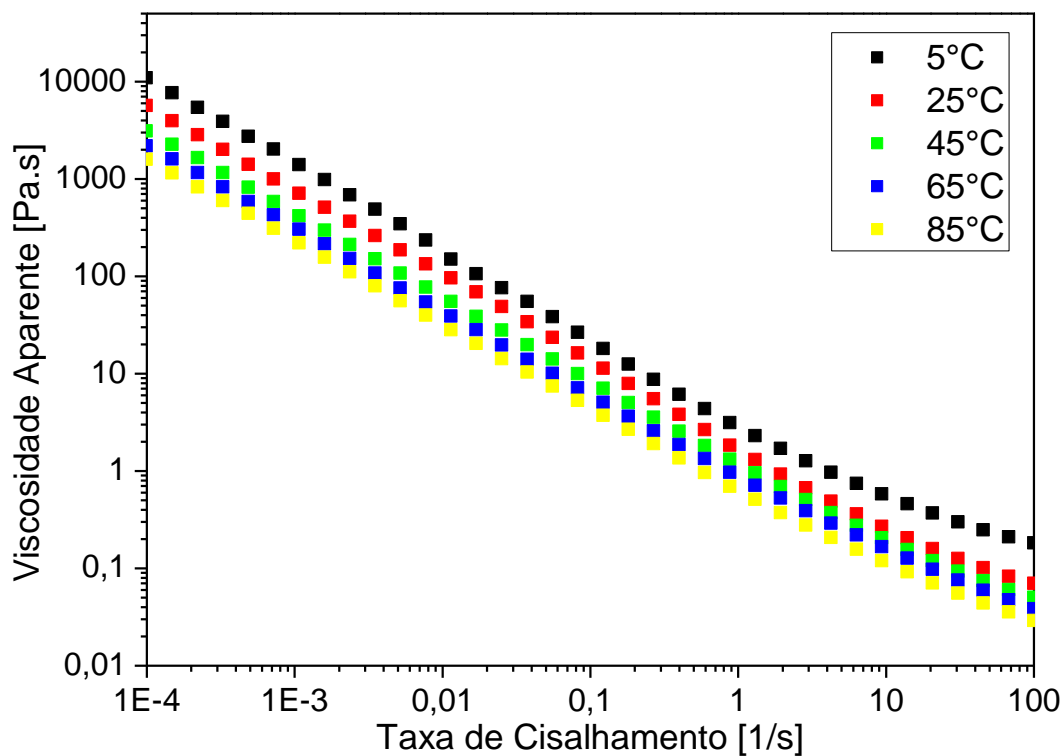


Figura 53. Fluidos base água com e sem adensante a 5°C e a 45°C ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

Gráfico em escala log-log.

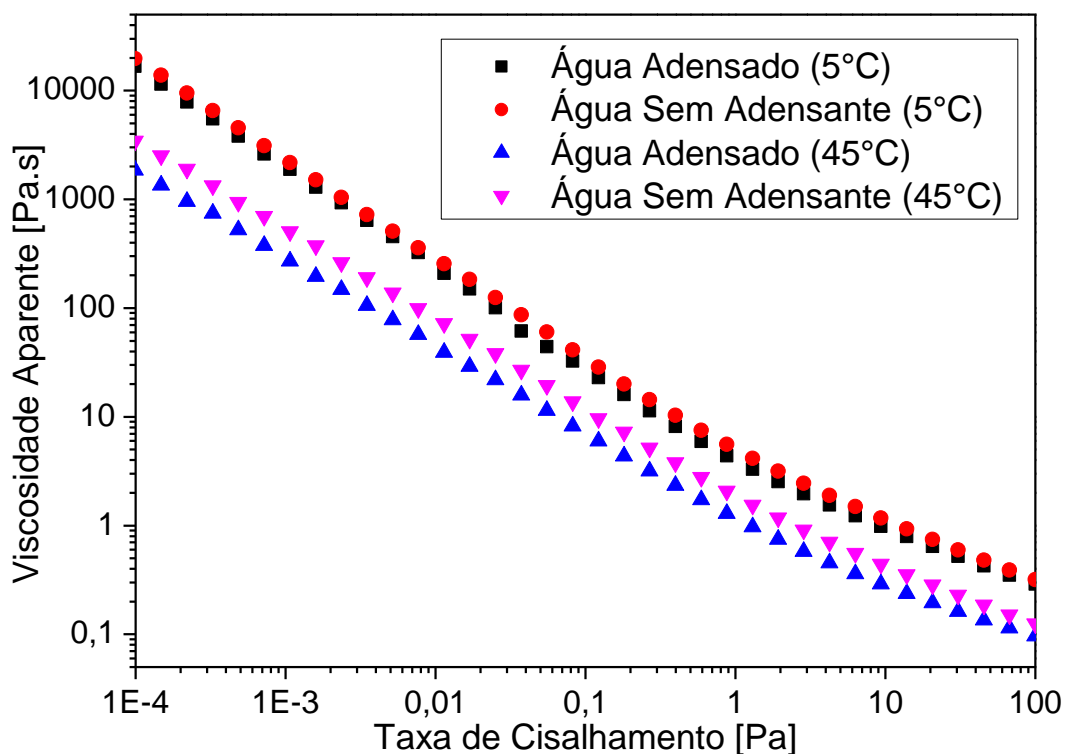
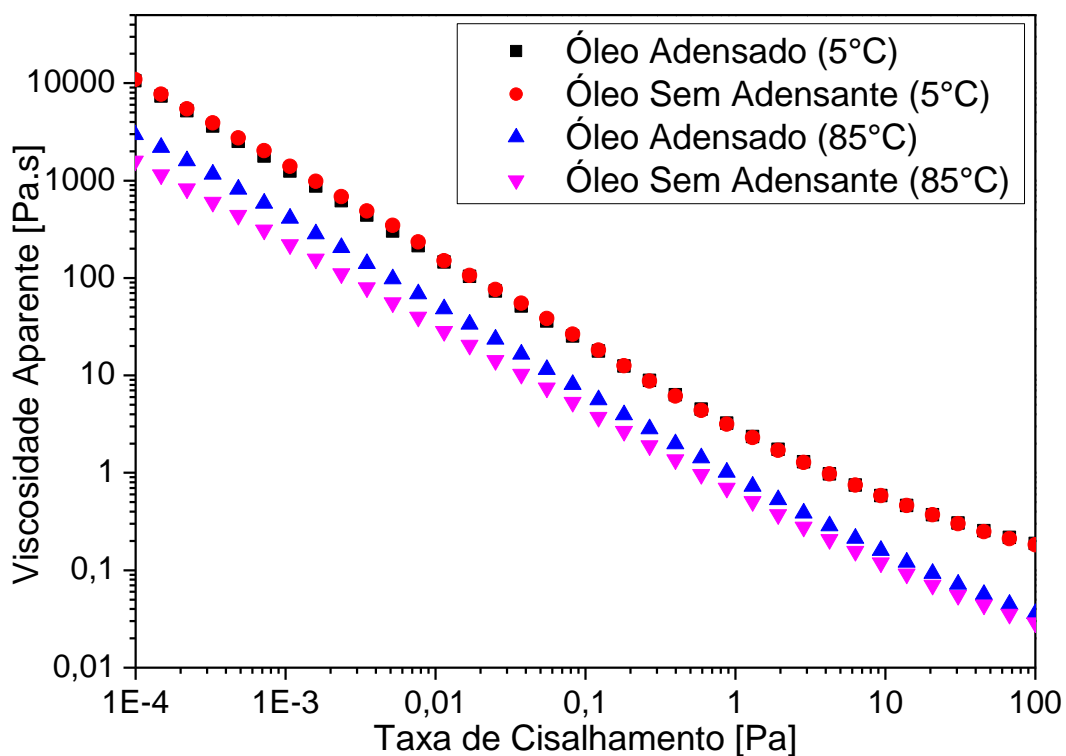


Figura 54. Fluidos base óleo com e sem adensante a 5°C e a 85°C ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ).

Gráfico em escala log-log.



Através desses ensaios não foi possível identificar a formação de platô de viscosidade aparente para nenhuma das quatro formulações.

Para os fluidos base água, foi possível notar que as curvas com variação de temperatura de apenas 10°C estão praticamente sobrepostas, mas que ao comparar uma variação de 20°C, já é possível notar alguma distinção, como ao comparar as curvas a 5°C, 25°C e 45°C. Para os fluidos base óleo, essa distinção é mais evidente porque a variação entre cada ponto de temperatura é de 20°C.

Foi observada diferença significativa entre os dados experimentais da geometria placas paralelas ranhuradas com cilindros concêntricos. Por conta de sua estrutura e forma de operação, a geometria de placas paralelas ranhuradas evitou o fenômeno de deslizamento e produziu curvas de escoamento mais “estáveis”, mesmo a baixas taxas de cisalhamento.

Para essa geometria também se observou o problema de evaporação de solvente para os fluidos base água em temperaturas acima de 45°C. A Figura 55 ilustra o caso. O fluido aquoso ficou com as bordas ressecadas e o “*solvente trap*” com gotas de água em suas paredes internas após experimentos à 55°C.

Figura 55. Problema de evaporação de solvente em fluidos base água para experimentos a 55°C.



Fonte: Autor.

#### 4.4. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Inicialmente, investigou-se isoladamente os efeitos da temperatura nos parâmetros reológicos dos modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley para três faixas de taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ). Em seguida, fez-se a estimação de parâmetros usando os modelos matemáticos para ajuste da reologia em função da temperatura: Lei de Potência com Arrhenius, Lei de Potência com WLF e Herschel-Bulkley com Arrhenius.

Para cada conjunto de dados, foram apresentados 3 gráficos: o ajuste do modelo reológico aos dados experimentais; um recorte ampliado (“zoom”) para evidenciar baixas taxas; e um gráfico com os resíduos de predição e erros percentuais. Por uma questão de organização, apenas os gráficos para base água adensado serão apresentados no corpo desse capítulo. Os gráficos para os demais fluidos estão disponíveis no apêndice D.

##### 4.4.1. Estimações de Parâmetros para o intervalo entre $1 \text{ s}^{-1}$ e $1000 \text{ s}^{-1}$

No início deste trabalho, a investigação de dados reológicos era realizada por meio do viscosímetro FANN 35A, que é um instrumento muito usado em campo. Dados experimentais obtidos nesse equipamento apontaram que os parâmetros reológicos dos modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley não eram estatisticamente dependentes da temperatura. Em outras palavras, ao alterar a temperatura (dentro do intervalo de  $25^{\circ}\text{C}$  até  $65^{\circ}\text{C}$ , que foi o estudado na ocasião), os intervalos de confiança dos parâmetros se interceptavam. Em um primeiro momento, acreditou-se que isso aconteceu por conta de uma limitação na sensibilidade do equipamento. Por esse motivo, investigou-se se isso acontecia por conta da baixa resolução do equipamento, da faixa de taxa de cisalhamento avaliada ou da própria natureza do fluido.

Para isso, fez-se um recorte nos dados obtidos pela geometria de cilindros concêntricos e reestimou-se os parâmetros dentro do intervalo de  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Os resultados estão descritos nas tabelas 15 até 18 para o modelo Lei de Potência e 19 a 23 para o modelo Herschel-Bulkley.

Os resultados demonstraram que os parâmetros estão dentro do mesmo intervalo de confiança. Por isso, para essa faixa de taxa de cisalhamento, a

temperatura não foi uma variável estatisticamente significativa. Além disso, a razão entre variância experimental e predita está acima do limite superior do teste F, ficando em alguns casos próximo ao limite superior. Do ponto de vista da predição, pôde-se observar desvios de predição inferiores a 10% para fluidos base água; ajustar os fluidos base óleo foi tarefa mais delicada e desvios da ordem de 20% foram observados. Esses resultados ratificam os obtidos com o viscosímetro FANN 35 A.

Tabela 15. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência na faixa de  $1\text{s}^{-1}$  até  $1000\text{s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	7,12	6,29	7,94	181,52	49,99	0,55	1,59	-0,98
	n [-]	0,35	0,33	0,37					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,26	4,86	5,66	50,50	55,85	0,55	1,58	-0,98
	n [-]	0,36	0,35	0,38					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,11	4,76	5,45	33,95	43,31	0,55	1,58	-0,97
	n [-]	0,35	0,33	0,36					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,89	4,56	5,22	29,67	115,57	0,55	1,58	-0,97
	n [-]	0,34	0,32	0,35					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,92	4,57	5,27	29,69	27,75	0,55	1,58	-0,97
	n [-]	0,32	0,31	0,33					

Tabela 16. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência na faixa de  $1\text{s}^{-1}$  até  $1000\text{s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	7,34	6,74	7,95	106,33	47,87	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,35	0,33	0,36					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6,20	5,78	6,63	51,42	13,49	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,35	0,33	0,36					

25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,14	4,77	5,50	38,46	29,04	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,34	0,33	0,36					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,46	5,14	5,79	26,26	31,17	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,32	0,31	0,33					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,22	4,92	5,52	21,48	67,80	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,32	0,31	0,33					

Tabela 17. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência na faixa de 1s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,95	3,22	4,68	437,58	299,36	0,53	1,61	-0,98
	n [-]	0,51	0,48	0,54					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,70	2,83	4,56	440,27	138,12	0,55	1,58	-0,98
	n [-]	0,45	0,41	0,49					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,08	3,38	4,79	176,84	385,30	0,55	1,58	-0,98
	n [-]	0,38	0,35	0,41					
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,88	1,38	2,39	139,01	59,13	0,55	1,58	-0,98
	n [-]	0,44	0,40	0,49					

Tabela 18. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência na faixa de 1s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,82	1,61	2,03	67,96	199,60	0,51	1,66	-0,99
	n [-]	0,60	0,58	0,62					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,33	1,10	1,56	86,01	1302,77	0,55	1,58	-0,99
	n [-]	0,58	0,55	0,60					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,39	0,98	1,79	146,00	275,00	0,58	1,59	-0,98
	n [-]	0,51	0,46	0,56					

65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,48	0,40	0,57	15,00	6,03	0,55	1,58	-0,99
	n [-]	0,62	0,59	0,64					

Tabela 19. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley na faixa de 1s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	9,29	8,68	9,90				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,41	2,17	2,64	8,19	2,34	0,54	1,60
	n [-]	0,50	0,48	0,51				
15°C	$\tau_0$ [Pa]	4,77	4,12	5,42				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,77	2,46	3,07	7,66	8,78	0,55	1,59
	n [-]	0,45	0,43	0,46				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	4,29	3,78	4,79				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,73	2,49	2,98	3,98	5,26	0,55	1,59
	n [-]	0,43	0,42	0,44				
35°C	$\tau_0$ [Pa]	4,12	3,61	4,64				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,54	2,28	2,80	3,97	16,01	0,55	1,59
	n [-]	0,42	0,41	0,44				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	4,26	3,68	4,84				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,41	2,11	2,71	4,83	4,67	0,55	1,59
	n [-]	0,42	0,40	0,43				

Tabela 20. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley na faixa de 1s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	7,57	7,20	7,95				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,28	3,11	3,45	2,65	0,84	0,55	1,59
	n [-]	0,46	0,45	0,46				



15°C	$\tau_0$ [Pa]	5,35	4,84	5,86	4,11	1,89	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,26	3,01	3,50				
	n [-]	0,43	0,42	0,44				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	4,92	4,45	5,38	3,06	8,26	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,12	2,89	3,36				
	n [-]	0,42	0,41	0,43				
35°C	$\tau_0$ [Pa]	4,25	3,87	4,64	1,98	4,11	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,94	2,73	3,15				
	n [-]	0,41	0,40	0,42				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	3,99	3,62	4,37	1,71	9,45	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,79	2,59	2,99				
	n [-]	0,40	0,39	0,41				

Tabela 21. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley na faixa de 1s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	9,89	9,14	10,64	18,17	13,90	0,52	1,63
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,48	1,33	1,63				
	n [-]	0,65	0,64	0,67				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	9,49	9,17	9,81	5,27	1,71	0,55	0,48
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,72	0,66	0,78				
	n [-]	0,68	0,67	0,69				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	7,46	6,98	7,95	8,93	20,14	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,87	0,74	1,00				
	n [-]	0,60	0,57	0,62				
65°C	$\tau_0$ [Pa]	5,07	4,44	5,70	22,12	9,75	0,55	1,59
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,27	0,17	0,37				
	n [-]	0,72	0,66	0,77				

Tabela 22. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley na faixa de  $1\text{ s}^{-1}$  até  $1000\text{ s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	4,28	3,52	5,03				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,06	0,94	1,19	10,81	33,191	0,50	1,67
	n [-]	0,68	0,66	0,69				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	3,61	3,45	3,78				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,59	0,56	0,62	1,44	22,555	0,55	1,59
	n [-]	0,69	0,69	0,70				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	4,99	4,73	5,26				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,23	0,20	0,27	3,89	7,326	0,55	1,59
	n [-]	0,76	0,74	0,78				
65°C	$\tau_0$ [Pa]	1,33	1,11	1,55				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,25	0,22	0,29	2,55	1,063	0,55	1,59
	n [-]	0,71	0,68	0,73				

Tabela 23. Correlação paramétrica de Herschel-Bulkley entre  $1\text{ s}^{-1}$  até  $1000\text{ s}^{-1}$

Fluido	Temperatura	$\tau_0$ -M	$\tau_0$ -n	M-n
Água Adensado	5°C	-0,89	0,87	-0,99
	15°C	-0,92	0,89	-0,99
	25°C	-0,93	0,90	-0,99
	35°C	-0,93	0,90	-0,99
	45°C	-0,94	0,91	-0,99
Água Sem Adensante	5°C	-0,92	0,89	-0,99
	15°C	-0,93	0,90	-0,99
	25°C	-0,94	0,91	-0,99
	35°C	-0,94	0,91	-0,99
	45°C	-0,94	0,91	-0,99

Óleo Adensado	5°C	-0,83	0,80	-0,99
	25°C	-0,80	0,76	-0,99
	45°C	-0,85	0,81	-0,99
	65°C	-0,78	0,75	-0,99
Óleo Sem Adensante	5°C	-0,87	0,84	-0,99
	25°C	-0,79	0,76	-0,99
	45°C	-0,76	0,73	-0,99
	65°C	-0,79	0,75	-0,99

Oteve-se alta correlação paramétrica. Uma forma de solucionar esse problema seria a reparametrização das equações, introduzindo a temperatura de referência. Esse procedimento foi realizado apenas para os modelos não isotérmicos.

#### 4.4.2. Estimação de parâmetros para o intervalo $0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$

A partir das estimações da faixa entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  e do conhecimento de que a temperatura não é uma variável estatisticamente significativa nessa faixa de taxa de cisalhamento, buscou-se investigar qual seria o comportamento para outras faixas de taxa de cisalhamento.

Os parâmetros estimados para essa faixa de taxa de cisalhamento, seus intervalos de confiança, os resultados do teste F e a correlação paramétrica foram descritos nas tabelas 24 até 27 para o modelo Lei de Potência e de 28 até 32 para o modelo Herschel-Bulkley.

A inclusão de dados inferiores a  $1 \text{ s}^{-1}$  permitiu que a temperatura fosse uma variável estatisticamente significativa e influenciasse os parâmetros reológicos. Ainda assim, isso só foi observado em fluidos base água com e sem adensante abaixo de  $15^\circ\text{C}$  e fluidos base óleo com e sem adensante acima de  $65^\circ\text{C}$ .

Os resultados para os modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley foram qualitativamente semelhantes: grandes intervalos de confiança para variável predita em altas taxas de cisalhamento (mais próximo de  $100 \text{ s}^{-1}$ ) e altos resíduos e erros percentuais para baixas taxas de cisalhamento (mais próximo de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ).

De outro modo, a dificuldade do modelo está em ajustar justamente as baixas taxas de cisalhamento. Uma hipótese para isso é a própria construção e limitação do modelo. Outra é a natureza dos dados experimentais à baixas taxas de cisalhamento.

A vantagem do modelo Herschel-Bulkley foi a capacidade preditiva e dentro do intervalo de confiança para as regiões de baixas taxas de cisalhamento para os fluidos base água. Erros inferiores a 10% foram observados em diversos momentos para taxas de cisalhamento até  $0,1 \text{ s}^{-1}$ . Contudo, para valores mais próximos de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , os desvios já superavam a 20%. Ajustar os dados dos fluidos olefínicos mostrou-se tarefa difícil para toda a faixa de taxa de cisalhamento avaliada.

O parâmetro tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ ") foi o que mais apresentou sensibilidade à temperatura. O índice de consistência (" $M$ ") também oscilou com a temperatura, mas - por diversas vezes - seus intervalos de confiança se interceptaram. O mesmo comportamento foi observado para o índice de comportamento (" $n$ "), mas com a ressalva de que suas oscilações estavam na segunda casa decimal. Isso pode ser verificado nas figuras 56 (para Lei de Potência) e 57 (para Herschel-Bulkley).

Esse conhecimento indica que em uma abordagem não isotérmica usando Herschel-Bulkley, poderia ser interessante abordar alguma correção para o parâmetro tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ ") em função da temperatura. No entanto, isso aumentaria a complexidade do modelo e adicionaria mais parâmetros para descrever apenas os dados reológicos do problema da sedimentação.

Além disso, a qualidade dos ajustes de ambos os modelos, avaliada pelo teste F, mostrou que a razão entre a variância experimental e predita estava acima do limite superior. Isso é indicativo de que o modelo não é capaz de prever corretamente os dados experimentais e que os erros de predição podem estar superestimados. Logo, as incertezas experimentais e preditas não podem ser consideradas semelhantes e o modelo não pode ser considerado bom. Contudo, ainda assim é possível notar um ajuste razoável entre a variável experimental e a predita, assim como foi para o intervalo entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

Reforça-se que os gráficos apresentados no corpo desse tópico são apenas para o fluido base água adensado. Optou-se por fazer isso por organização e porque o comportamento qualitativo observado foi semelhante para os 4 fluidos. De qualquer forma, todos os demais gráficos estão apresentados no apêndice D.

Tabela 24. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	8,28	7,35	9,20	411,32	101,73	0,63	1,45	-0,96
	n [-]	0,32	0,30	0,34					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,77	5,34	6,20	114,22	114,14	0,64	1,43	-0,97
	n [-]	0,35	0,33	0,36					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,60	5,22	5,97	79,72	93,37	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,33	0,32	0,34					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,36	5,01	5,71	65,83	118,19	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,32	0,31	0,33					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,37	5,04	5,71	57,77	45,93	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,31	0,30	0,32					

Tabela 25. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	8,46	7,69	9,24	326,27	154,89	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,32	0,31	0,34					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6,87	6,38	7,36	136,51	52,33	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,33	0,32	0,34					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6,67	6,21	7,14	113,17	177,31	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,31	0,30	0,32					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6,01	5,64	6,37	69,46	119,45	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,31	0,30	0,32					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,72	5,40	6,05	53,80	93,31	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,30	0,29	0,31					

Tabela 26. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,54	3,65	5,42	1167,84	421,74	0,62	1,46	-0,96
	n [-]	0,49	0,46	0,52					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,18	3,34	5,02	614,52	197,56	0,63	1,45	-0,96
	n [-]	0,43	0,39	0,46					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,54	3,97	5,13	227,70	446,13	0,64	1,43	-0,96
	n [-]	0,36	0,34	0,38					
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,88	1,49	2,28	139,45	59,71	0,63	1,46	-0,96
	n [-]	0,44	0,41	0,48					

Tabela 27. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,88	1,62	2,15	186,27	124,00	0,61	1,49	-0,99
	n [-]	0,60	0,57	0,62					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,58	1,32	1,84	121,08	647,27	0,64	1,44	-0,99
	n [-]	0,55	0,52	0,57					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,45	1,12	1,78	155,89	213,81	0,63	1,46	-0,98
	n [-]	0,50	0,46	0,54					
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,49	0,43	0,56	14,99	6,42	0,63	1,45	-0,98
	n [-]	0,61	0,59	0,63					

Figura 56. Efeito da temperatura nos parâmetros do Lei de Potência (intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

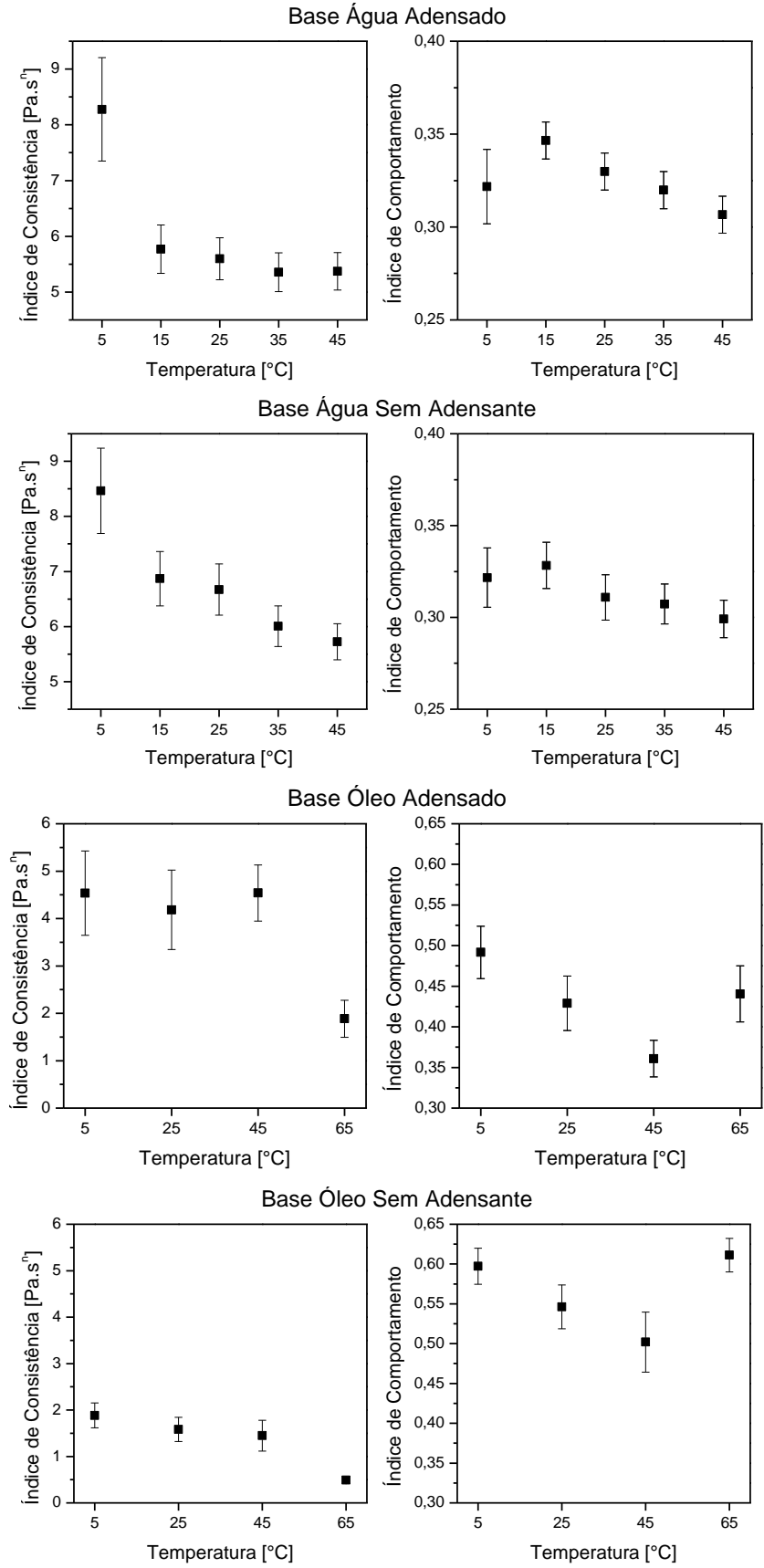


Figura 57. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

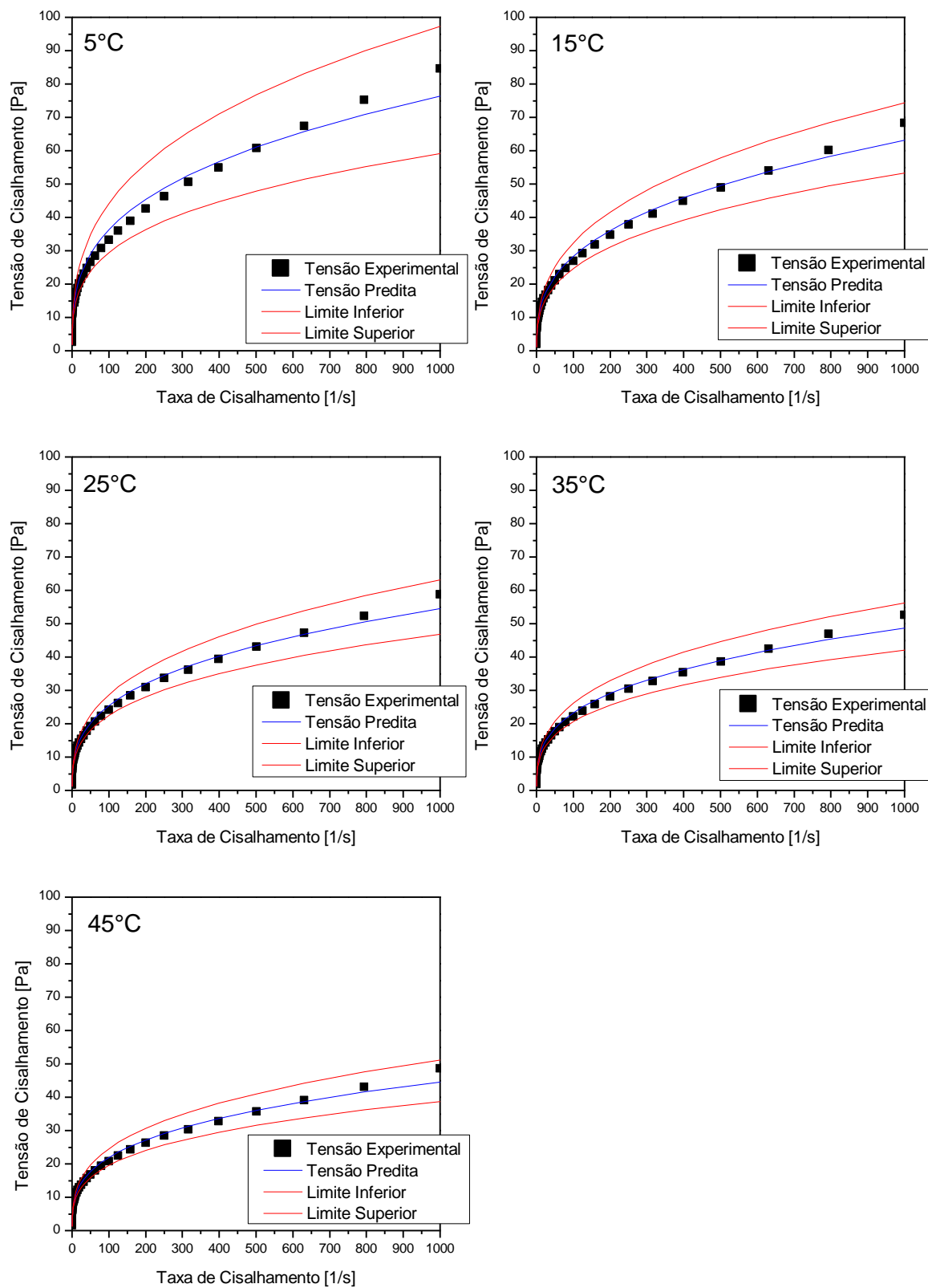




Figura 58. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

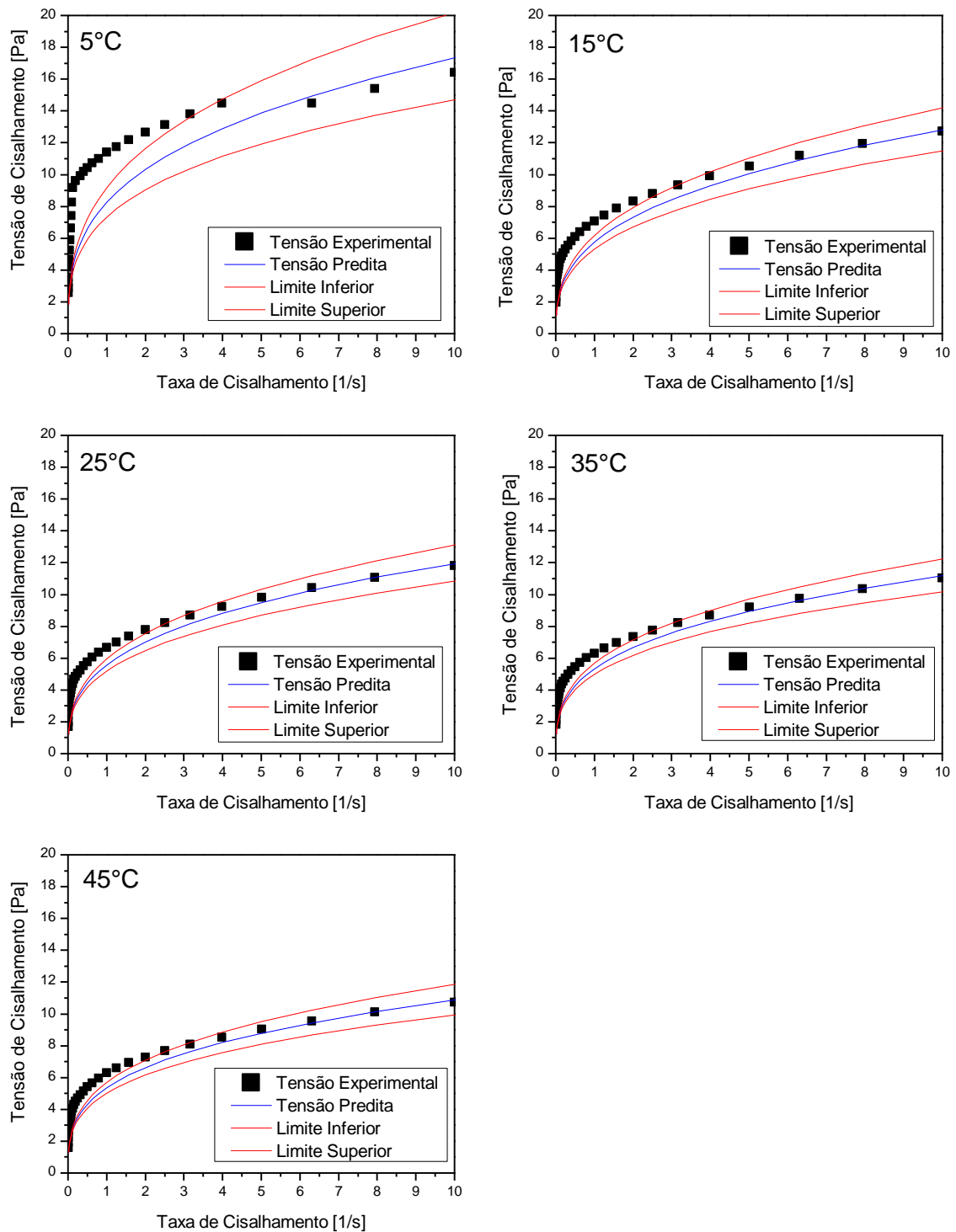


Figura 59. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água adensado para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

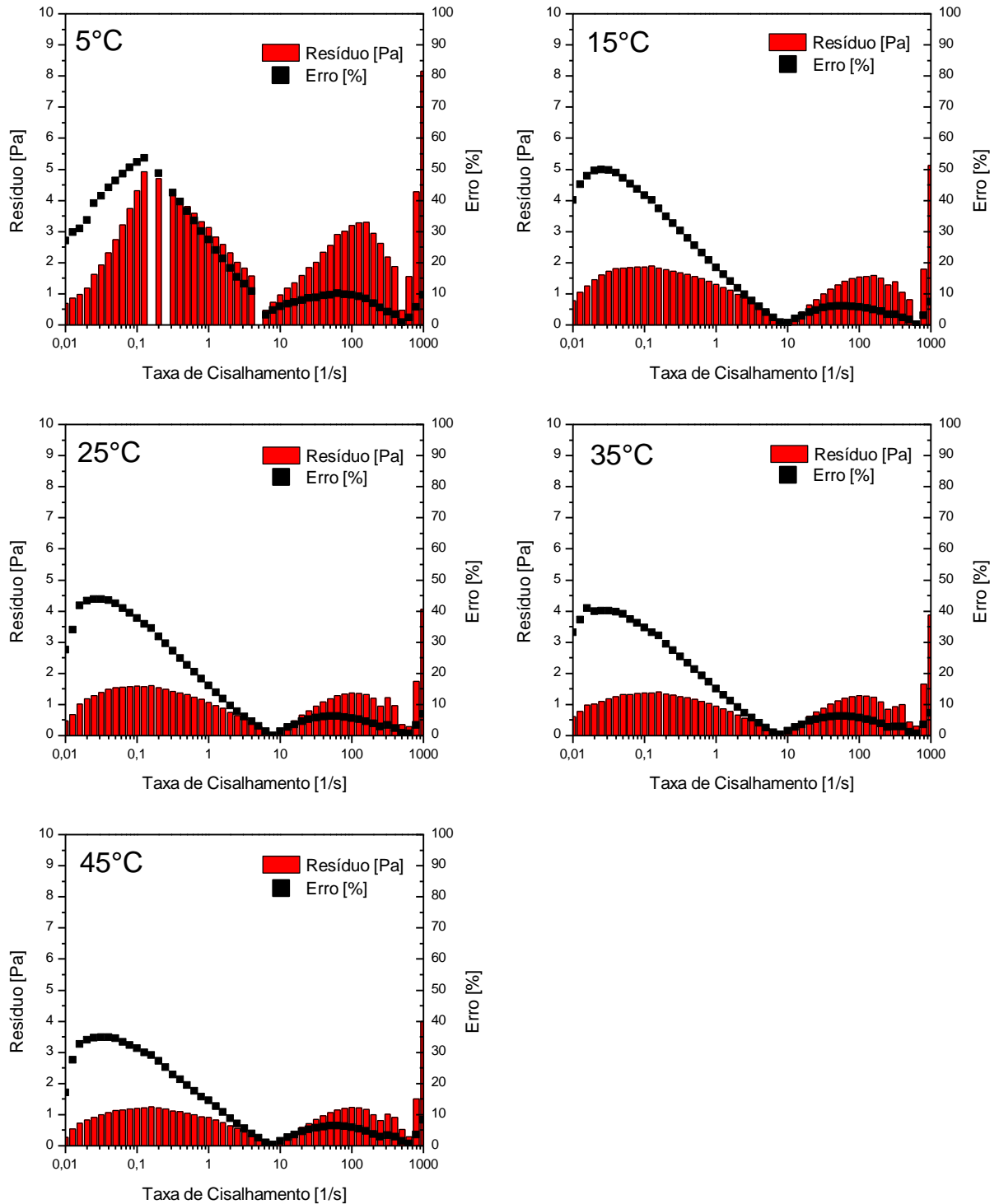


Tabela 28. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	5,76	4,81	6,71				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,93	3,28	4,57	124,48	31,47	0,63	1,45
	n [-]	0,43	0,40	0,45				
15°C	$\tau_0$ [Pa]	3,03	2,65	3,42				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,58	3,30	3,86	22,22	22,67	0,64	1,43
	n [-]	0,41	0,40	0,43				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	2,67	2,32	3,01				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,55	3,29	3,82	16,30	19,49	0,64	1,43
	n [-]	0,39	0,38	0,41				
35°C	$\tau_0$ [Pa]	2,49	2,16	2,82				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,39	3,12	3,65	14,09	25,83	0,64	1,43
	n [-]	0,38	0,37	0,40				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	2,34	1,95	2,72				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,44	3,13	3,76	17,10	13,88	0,64	1,43
	n [-]	0,37	0,36	0,38				

Tabela 29. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	5,34	4,68	6,00				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,35	3,88	4,83	65,97	31,97	0,64	1,44
	n [-]	0,42	0,40	0,43				
15°C	$\tau_0$ [Pa]	3,53	3,11	3,95				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,17	3,85	4,48	24,16	9,46	0,64	1,44
	n [-]	0,40	0,39	0,41				

	$\tau_0$ [Pa]	3,50	3,19	3,81				
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,86	3,62	4,10	12,54	20,06	0,64	1,44
	n [-]	0,39	0,38	0,40				
	$\tau_0$ [Pa]	2,69	2,34	3,04				
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,80	3,52	4,08	14,35	25,19	0,64	1,44
	n [-]	0,37	0,36	0,38				
	$\tau_0$ [Pa]	2,46	2,15	2,77				
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,66	3,40	3,92	10,76	19,05	0,64	1,44
	n [-]	0,36	0,35	0,37				

Tabela 30. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
	$\tau_0$ [Pa]	6,51	5,22	7,79				
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,18	1,72	2,64	346,67	128,17	0,62	1,47
	n [-]	0,60	0,56	0,63				
	$\tau_0$ [Pa]	5,45	4,38	6,53				
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,64	1,16	2,12	197,71	65,01	0,63	1,46
	n [-]	0,56	0,52	0,61				
	$\tau_0$ [Pa]	3,34	2,57	4,10				
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,24	1,77	2,72	106,93	213,87	0,64	1,44
	n [-]	0,46	0,43	0,49				
	$\tau_0$ [Pa]	1,63	0,80	2,46				
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,07	0,67	1,46	110,10	48,24	0,62	1,46
	n [-]	0,52	0,47	0,58				

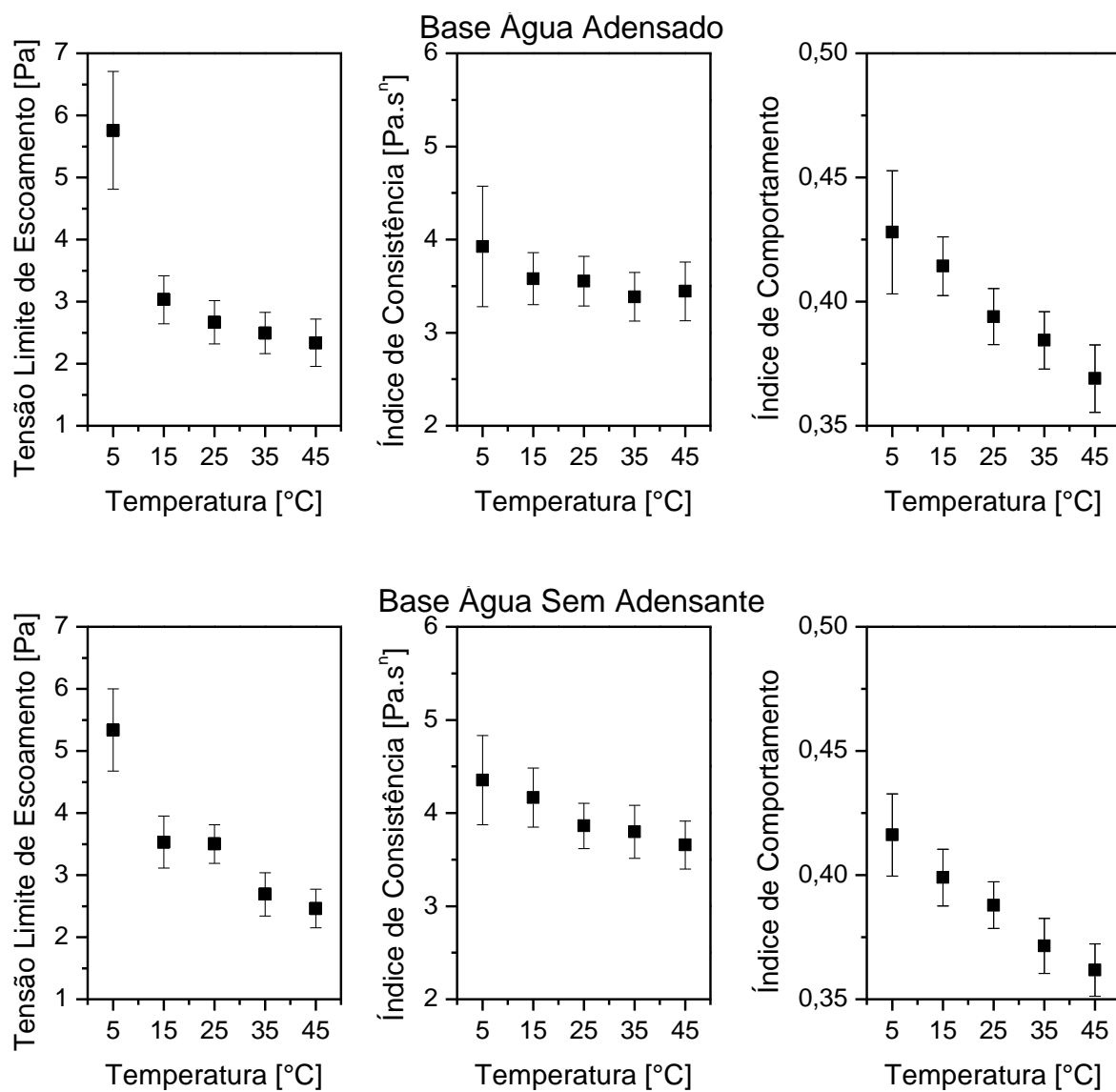
Tabela 31. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley dentro do intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	2,64	1,98	3,30				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,33	1,15	1,50	70,476	48,152	0,60	1,50
	n [-]	0,65	0,63	0,67				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	2,34	2,03	2,65				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,80	0,71	0,89	26,218	143,137	0,64	1,44
	n [-]	0,65	0,63	0,67				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	2,10	1,42	2,78				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,69	0,46	0,91	91,28	128,11	0,62	1,46
	n [-]	0,61	0,56	0,66				
65°C	$\tau_0$ [Pa]	0,51	0,29	0,72				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,38	0,32	0,44	10,11	4,43	0,63	1,46
	n [-]	0,65	0,62	0,67				

Tabela 32. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley.

Fluido	Temperatura	$\tau_0$ -M	$\tau_0$ -n	M-n
Água Adensado	5°C	-0,80	0,75	-0,99
	15°C	-0,81	0,77	-0,98
	25°C	-0,84	0,78	-0,99
	35°C	-0,85	0,79	-0,99
	45°C	-0,86	0,80	-0,99
Água Sem Adensante	5°C	-0,82	0,76	-0,99
	15°C	-0,83	0,78	-0,99
	25°C	-0,84	0,77	-0,98
	35°C	-0,86	0,80	-0,99
	45°C	-0,87	0,81	-0,99
Óleo Adensado	5°C	-0,68	0,64	-0,99
	25°C	-0,73	0,69	-0,99
	45°C	-0,77	0,72	-0,99
	65°C	-0,75	0,70	-0,99
Óleo Sem Adensante	5°C	-0,65	0,61	-0,99
	25°C	-0,64	0,60	-0,99
	45°C	-0,68	0,64	-0,99
	65°C	-0,66	0,62	-0,99

Figura 60. Efeito da temperatura nos parâmetros estimados no modelo Herschel-Bulkley (intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).



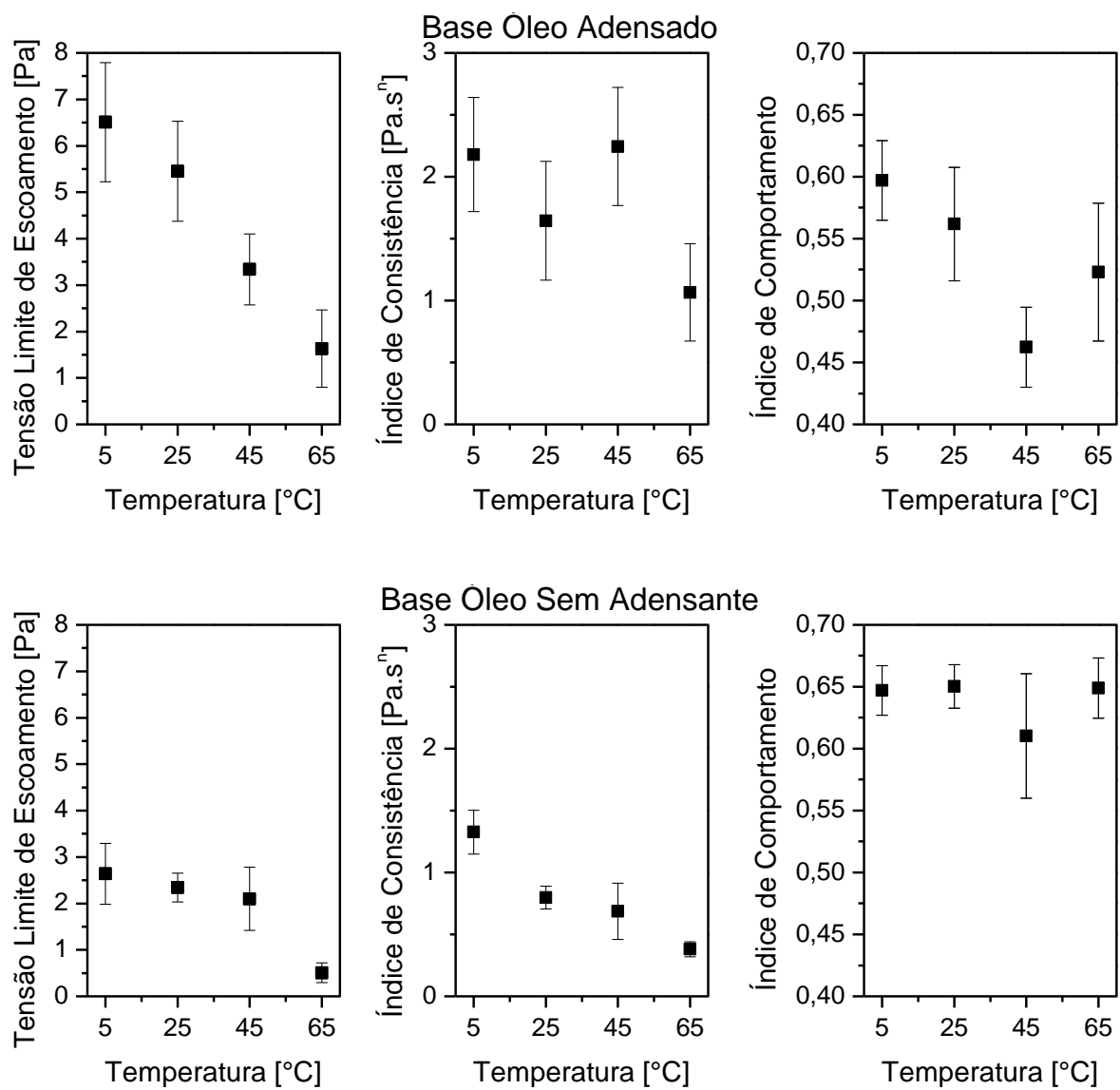


Figura 61. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

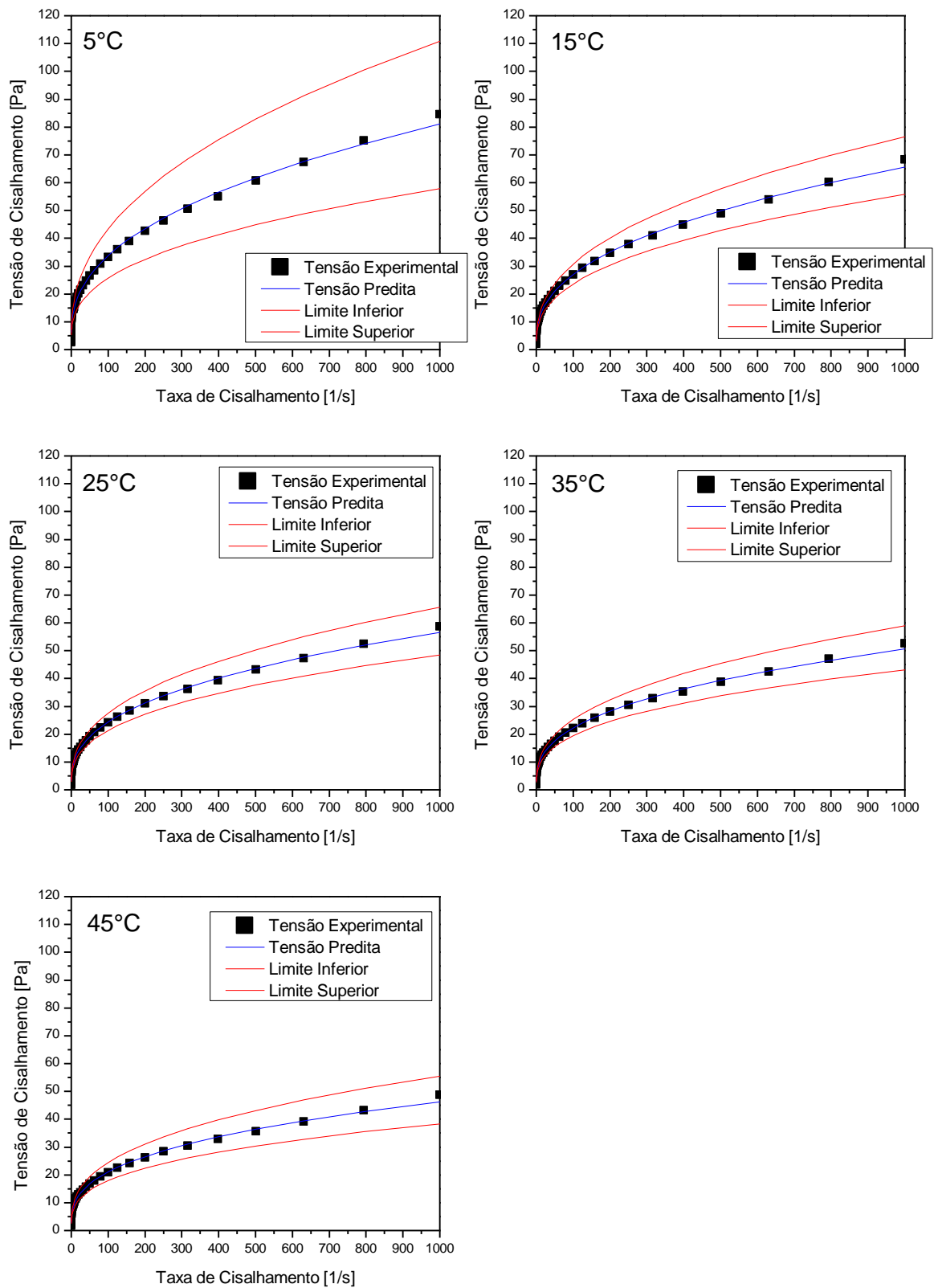




Figura 62. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

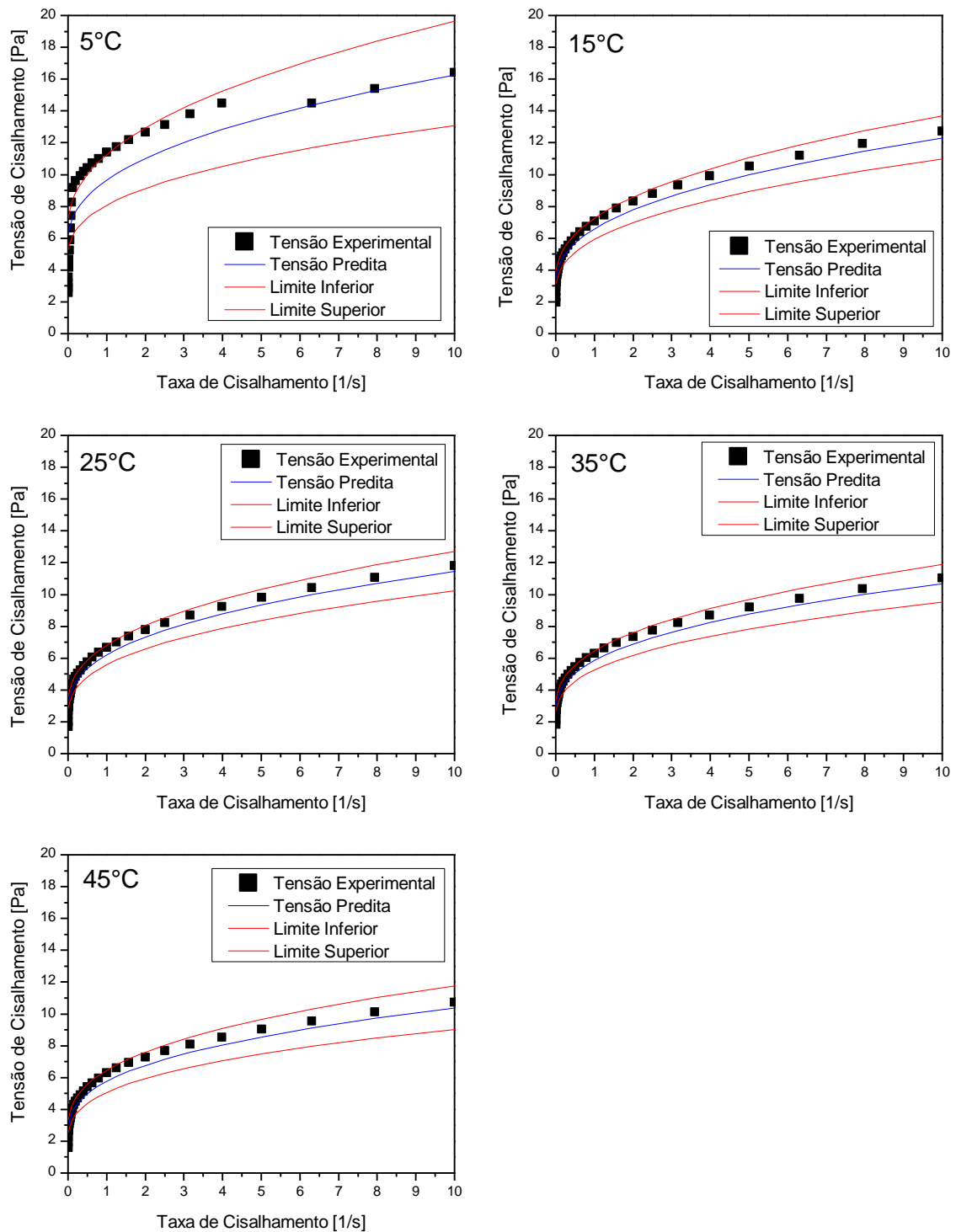
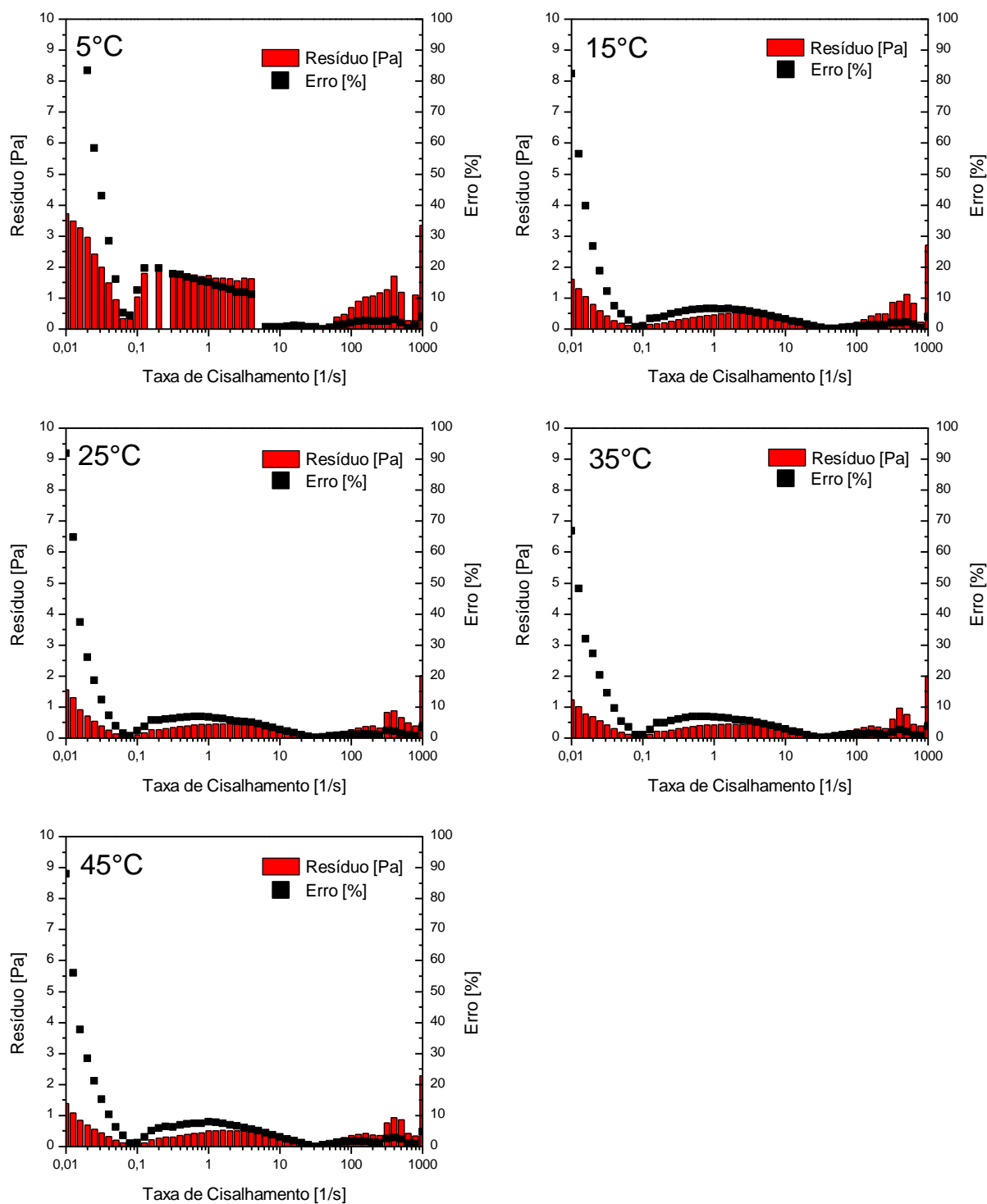


Figura 63. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).



#### 4.4.3. Estimações de parâmetros para o intervalo entre $0,0001 \text{ s}^{-1}$ e $100 \text{ s}^{-1}$

Como a temperatura tornou-se uma variável estatisticamente significativa ao incluir dados reológicos até  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , investigou-se qual seria o comportamento desses modelos para uma faixa até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . Além disso, essa seria uma faixa mais representativa do fenômeno da sedimentação.

Os parâmetros estimados, seus intervalos de confiança, os resultados do teste F e a correlação paramétrica foram descritos nas tabelas 33 até 36 para o modelo Lei de Potência e nas tabelas 37 até 40 para o modelo Herschel-Bulkley.

Esses resultados ratificam o comportamento observado no tópico anterior e demonstraram que de fato a temperatura torna-se uma variável mais relevante em baixas taxas de cisalhamento. Ao avaliar essas faixas é possível observar diferença estatística entre as curvas em função da temperatura; o que não foi possível na faixa entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

Para essa faixa estudada, os parâmetros tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ ") e índice de consistência (" $M$ ") foram estatisticamente sensíveis para variações de temperatura da ordem de  $20^\circ\text{C}$  ( $10^\circ\text{C}$  poderia não ser suficiente, como observado no caso dos fluidos base água). O índice de comportamento (" $n$ ") oscilou dentro do mesmo intervalo de confiança. Isso pode ser verificado nas figuras 64 (para Lei de Potência) e 68 (para Herschel-Bulkley).

Os resultados para os modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley mantiveram a tendência observada anteriormente de grandes intervalos de confiança para variável predita em altas taxas de cisalhamento (mais próximo de  $100 \text{ s}^{-1}$ ) e altos resíduos e erros percentuais para baixas taxas de cisalhamento (mais próximo de  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ ). Mas dessa vez, diferente das demais, os resíduos e erros percentuais foram maiores, indicando a dificuldade em ajustar dados a baixas taxas de cisalhamento. Para valores inferiores a  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ , foi possível observar erros sempre superiores a 20%, podendo chegar até 70%. Ainda assim, o modelo Herschel-Bulkley foi o que apresentou a melhor capacidade preditiva, principalmente para valores acima de  $1 \text{ s}^{-1}$ .

Novamente, a qualidade dos ajustes de ambos os modelos, avaliada pelo teste F, mostrou que a razão entre a variância experimental e predita estava acima do limite superior, indicando que os modelos não podem ser considerados adequados.

Reforça-se que os gráficos apresentados no corpo desse tópico são apenas para o fluido base água adensado. Optou-se por fazer isso por organização e porque o comportamento qualitativo observado foi semelhante para os 4 fluidos. De qualquer forma, todos os demais gráficos estão apresentados no apêndice D.

Tabela 33. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,94	3,27	4,61	51,39	44,77	0,56	1,57	-0,95
	n [-]	0,42	0,38	0,47					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,68	2,17	3,19	32,90	26,87	0,57	1,55	-0,95
	n [-]	0,42	0,37	0,47					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,49	1,24	1,74	9,02	7,14	0,58	1,54	-0,96
	n [-]	0,47	0,43	0,51					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,26	1,10	1,41	3,52	2,70	0,58	1,53	-0,96
	n [-]	0,47	0,44	0,50					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,04	0,90	1,17	2,64	2,03	0,58	1,53	-0,96
	n [-]	0,47	0,44	0,51					

Tabela 34. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,47	4,70	6,23	75,82	54,77	0,58	1,53	-0,92
	n [-]	0,37	0,33	0,40					
15°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,55	2,97	4,13	39,75	30,52	0,57	1,55	-0,94
	n [-]	0,39	0,35	0,43					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,52	2,17	2,87	15,08	11,22	0,58	1,54	-0,94
	n [-]	0,40	0,36	0,44					
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,01	1,81	2,21	5,02	3,74	0,58	1,54	-0,95

	n [-]	0,41	0,38	0,43					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,87	1,67	2,07	5,44	3,93	0,58	1,53	-0,94
	n [-]	0,40	0,37	0,43					

Tabela 35. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

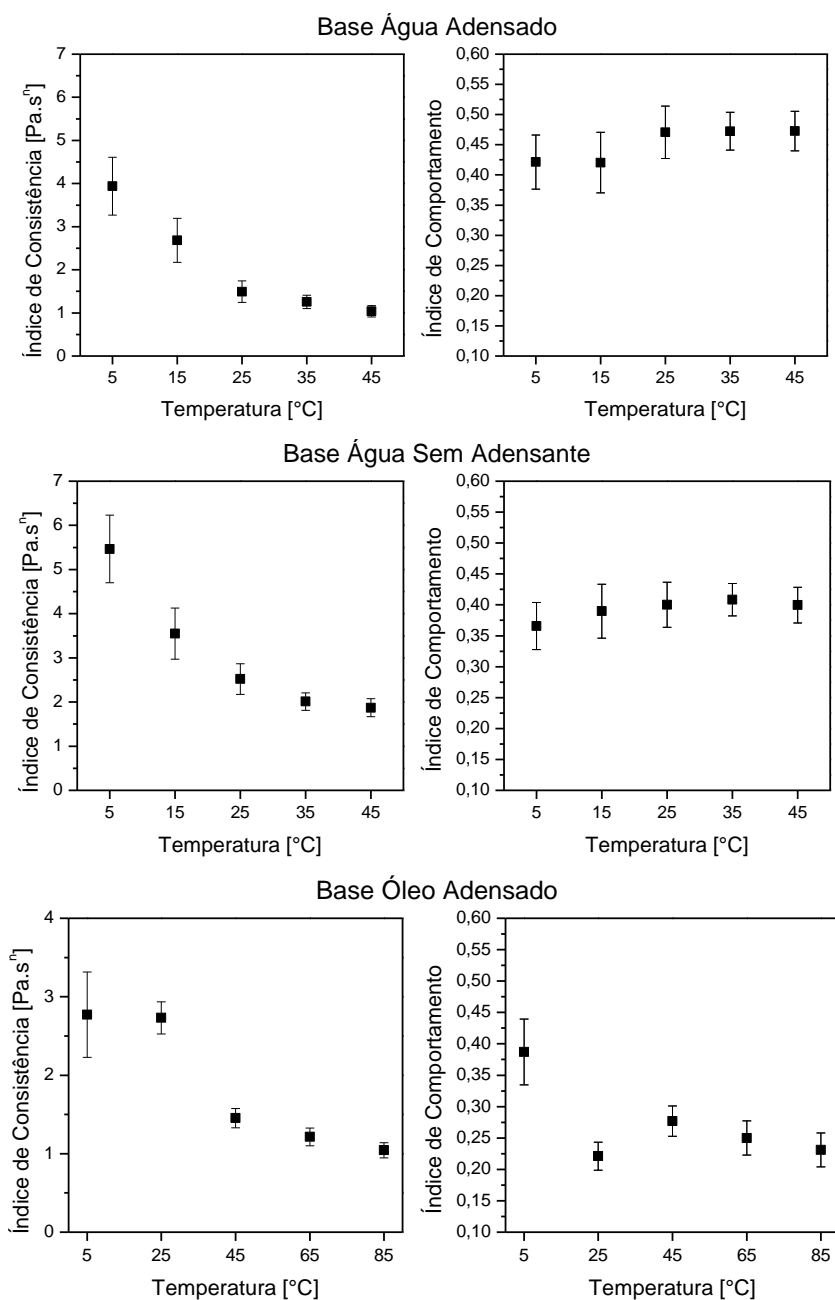
Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,77	2,23	3,31	38,71	3612,74	0,58	1,53	-0,93
	n [-]	0,39	0,33	0,44					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,73	2,53	2,94	6,86	640,61	0,58	1,53	-0,76
	n [-]	0,22	0,20	0,24					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,45	1,33	1,58	2,10	195,61	0,58	1,53	-0,86
	n [-]	0,28	0,25	0,30					
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,21	1,10	1,33	1,92	178,86	0,58	1,53	-0,82
	n [-]	0,25	0,22	0,28					
85°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,04	0,95	1,14	1,46	135,83	0,58	1,53	-0,78
	n [-]	0,23	0,20	0,26					

Tabela 36. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher				Correlação Paramétrica
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior	
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,78	2,22	3,34	37,93	254,72	0,57	1,55	-0,94
	n [-]	0,38	0,33	0,43					
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,91	1,69	2,13	7,72	48,82	0,58	1,53	-0,78
	n [-]	0,23	0,20	0,26					
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,28	1,15	1,40	2,28	14,42	0,58	1,53	-0,84
	n [-]	0,26	0,23	0,30					
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,96	0,87	1,04	0,96	6,07	0,58	1,53	-0,96

	n [-]	0,28	0,25	0,30					
85°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,68	0,61	0,75					
	n [-]	0,29	0,26	0,32	0,64	4,06	0,58	1,53	-0,87

Figura 64. Efeito da temperatura nos parâmetros estimados no modelo Lei de Potência para o intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .



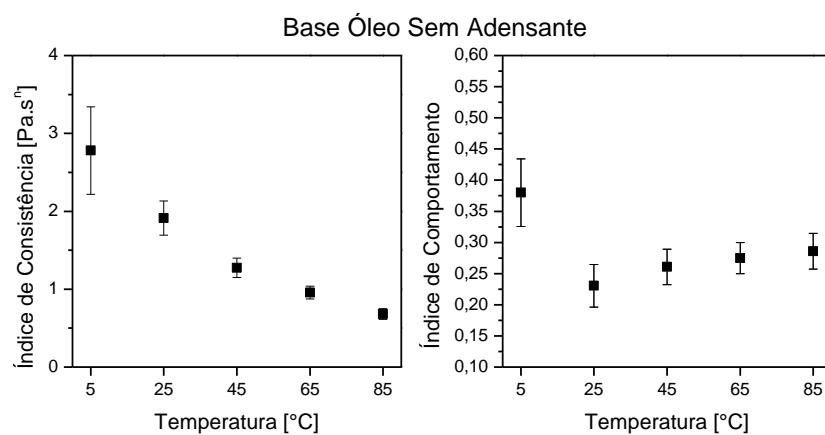


Figura 65. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

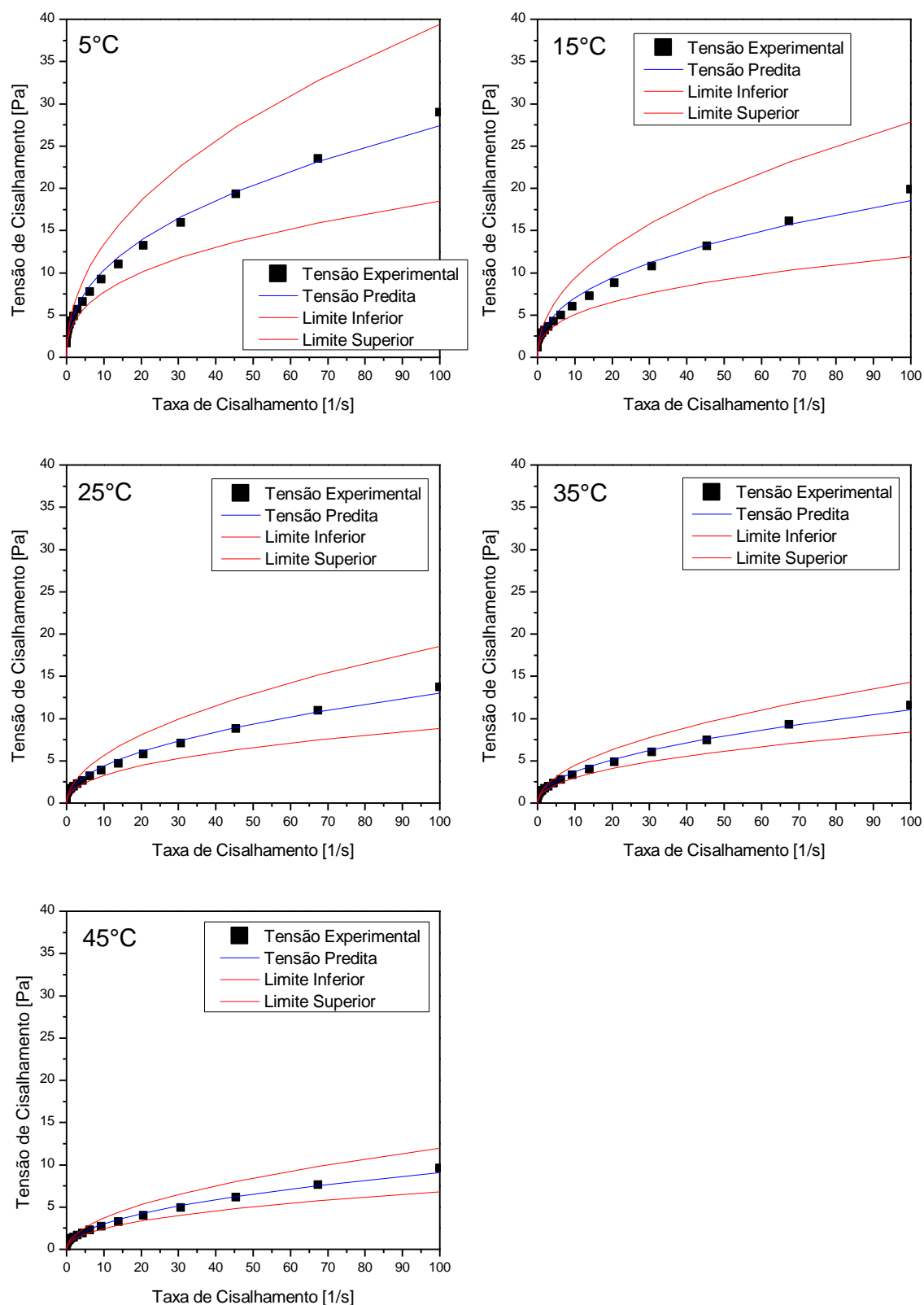


Figura 66. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência.  
Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .



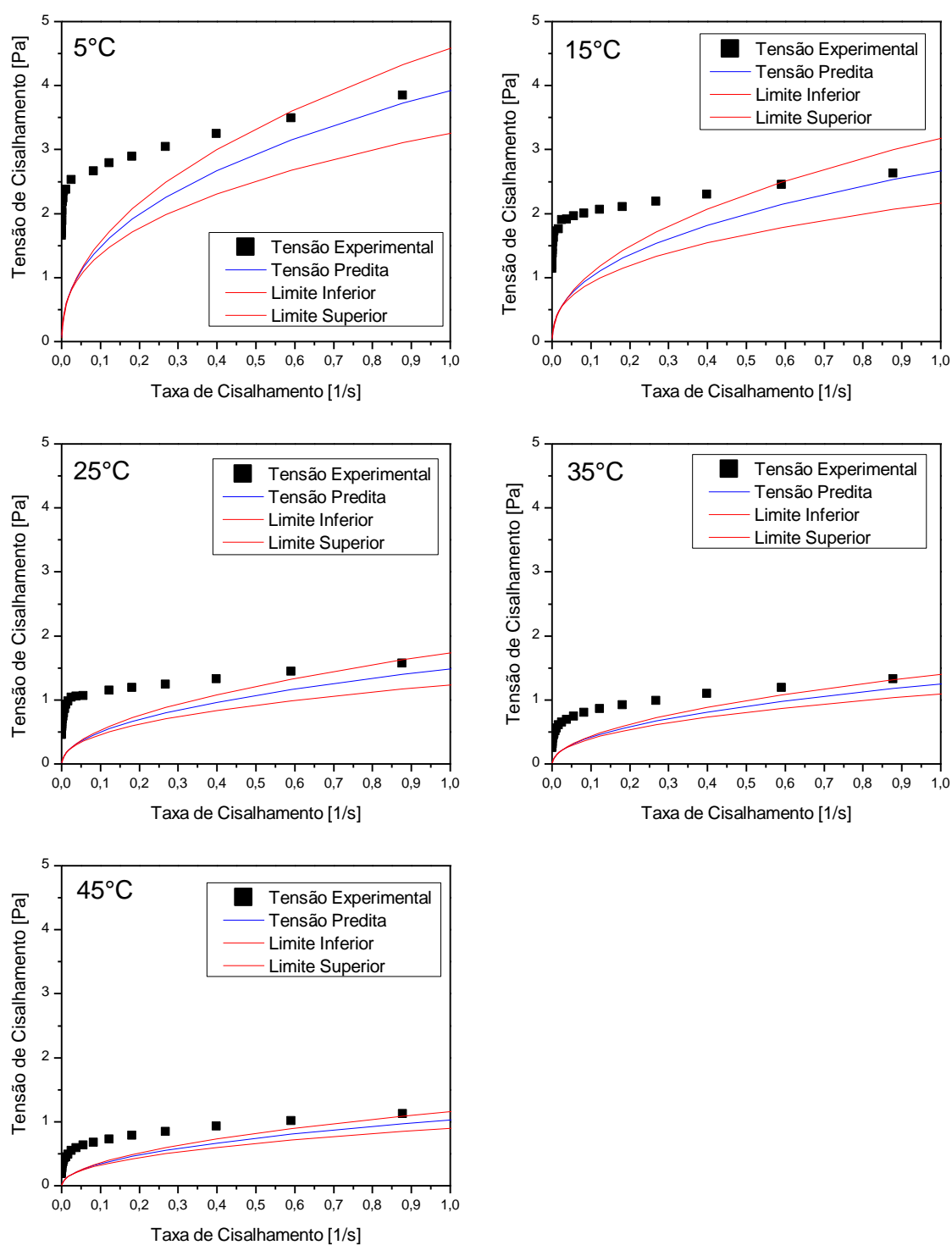


Figura 67. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

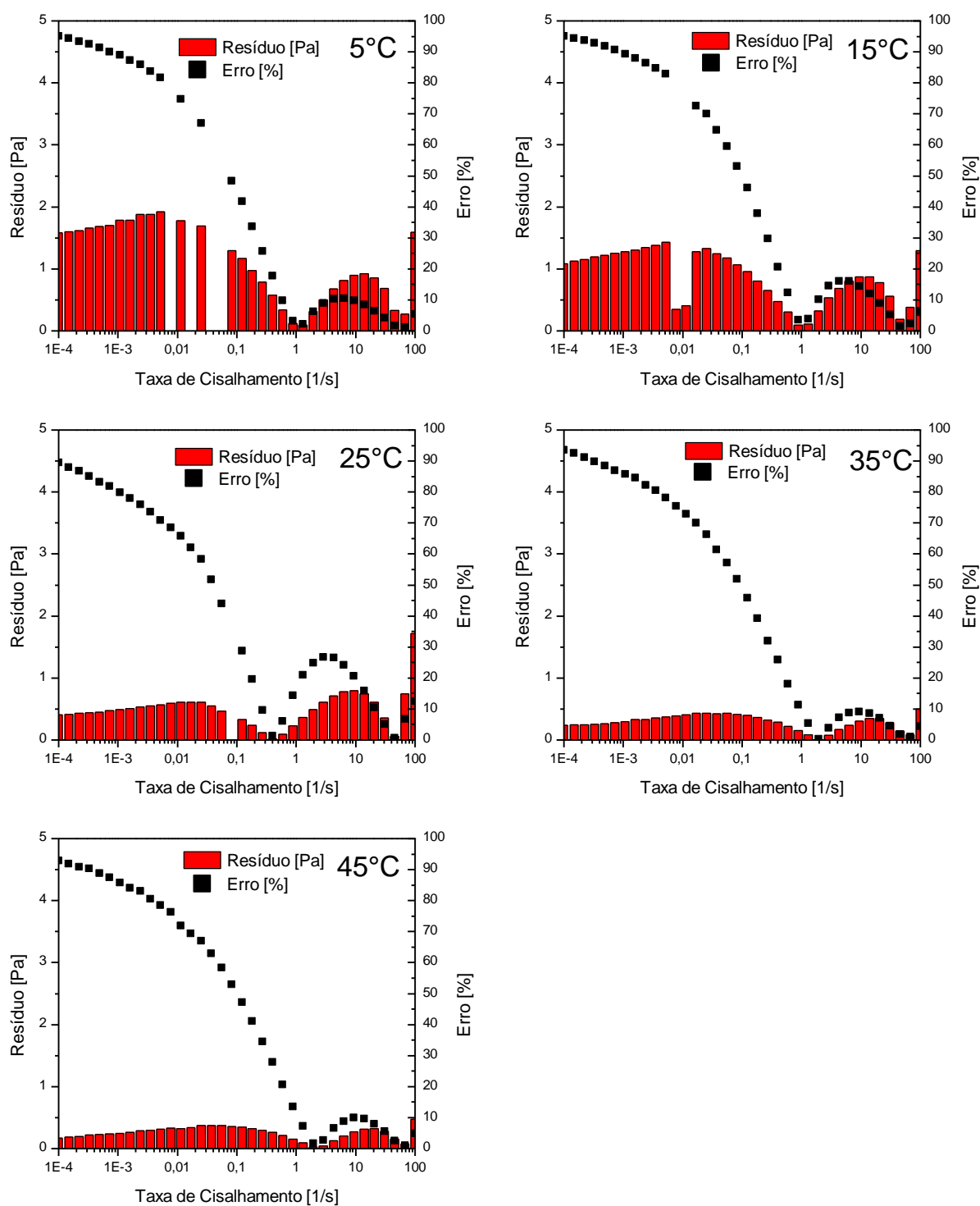


Tabela 37. Estimação de parâmetros do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley Potência no intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	1,97	1,88	2,05				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,09	2,00	2,18	0,74	0,67	0,55	1,58
	n [-]	0,56	0,55	0,57				
15°C	$\tau_0$ [Pa]	1,50	1,41	1,58				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,23	1,14	1,32	0,89	0,75	0,57	1,56
	n [-]	0,59	0,57	0,60				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	0,72	0,65	0,79				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,85	0,78	0,93	0,65	0,53	0,57	1,55
	n [-]	0,59	0,57	0,61				
35°C	$\tau_0$ [Pa]	0,44	0,38	0,49				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,85	0,79	0,92	0,46	0,36	0,58	1,54
	n [-]	0,56	0,54	0,57				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	0,37	0,32	0,43				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,69	0,63	0,75	0,42	0,33	0,58	1,54
	n [-]	0,56	0,54	0,58				

Tabela 38. Estimação de parâmetros do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	2,38	2,28	2,48				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,73	2,61	2,86	1,40	1,05	0,58	1,54
	n [-]	0,52	0,50	0,53				
15°C	$\tau_0$ [Pa]	1,70	1,62	1,78				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,76	1,67	1,86	0,82	0,65	0,57	1,56
	n [-]	0,54	0,53	0,55				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	1,02	0,95	1,10				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,44	1,35	1,53	0,71	0,54	0,57	1,55

	n [-]	0,52	0,51	0,54				
	$\tau_0$ [Pa]	0,58	0,51	0,65				
35°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,39	1,30	1,48	0,55	0,43	0,57	1,55
	n [-]	0,49	0,47	0,50				
	$\tau_0$ [Pa]	0,60	0,53	0,67				
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,21	1,12	1,30	0,63	0,47	0,58	1,54
	n [-]	0,49	0,48	0,51				

Tabela 39. Estimação de parâmetros do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
	$\tau_0$ [Pa]	1,57	1,43	1,71				
5°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,02	0,88	1,16	2,95	284,05	0,58	1,54
	n [-]	0,61	0,57	0,64				
	$\tau_0$ [Pa]	1,00	0,86	1,14				
25°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,33	1,14	1,53	1,62	156,02	0,58	1,54
	n [-]	0,37	0,34	0,41				
	$\tau_0$ [Pa]	0,48	0,42	0,54				
45°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,81	0,73	0,89	0,32	30,48	0,58	1,54
	n [-]	0,40	0,38	0,43				
	$\tau_0$ [Pa]	0,48	0,44	0,53				
65°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,54	0,48	0,60	0,19	18,68	0,58	1,54
	n [-]	0,42	0,40	0,45				
	$\tau_0$ [Pa]	0,44	0,40	0,48				
85°C	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,42	0,37	0,48	0,15	14,69	0,58	1,54
	n [-]	0,43	0,40	0,46				

Tabela 40. Estimação de parâmetros do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

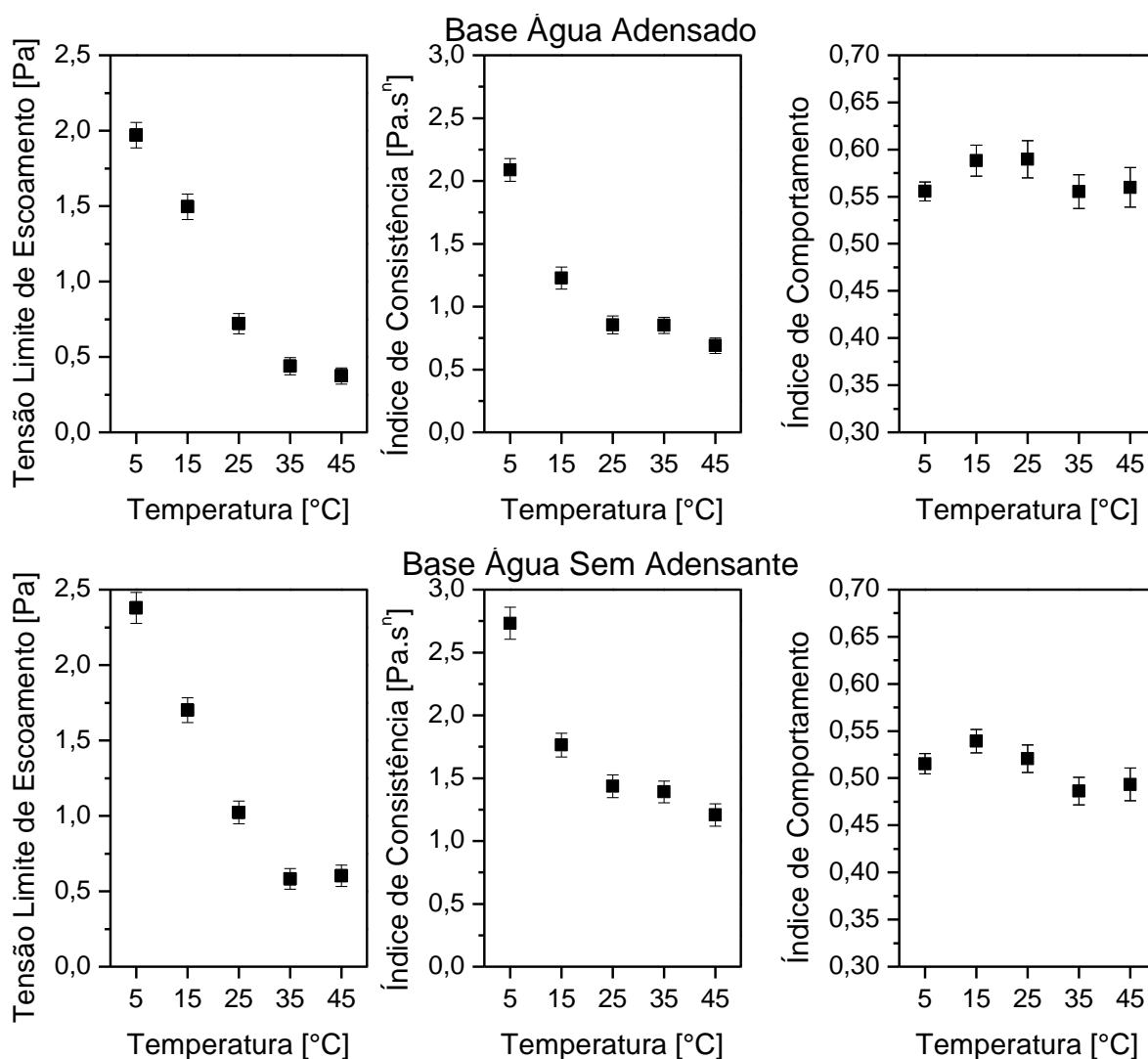
Temperatura	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
5°C	$\tau_0$ [Pa]	1,64	1,51	1,78				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,99	0,85	1,12	2,37	16,45	0,57	1,56
	n [-]	0,61	0,57	0,64				
25°C	$\tau_0$ [Pa]	0,93	0,82	1,04				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,57	0,43	0,70	1,55	10,12	0,58	1,54
	n [-]	0,50	0,44	0,56				
45°C	$\tau_0$ [Pa]	0,49	0,42	0,56				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,59	0,50	0,69	0,50	3,27	0,58	1,54
	n [-]	0,43	0,39	0,46				
65°C	$\tau_0$ [Pa]	0,32	0,29	0,36				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,52	0,46	0,57	0,14	0,90	0,58	1,54
	n [-]	0,41	0,38	0,43				
85°C	$\tau_0$ [Pa]	0,25	0,22	0,28				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,34	0,30	0,38	0,10	0,66	0,58	1,54
	n [-]	0,43	0,41	0,46				

Tabela 41. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Fluido	Temperatura	$\tau_0$ -M	$\tau_0$ -n	M-n
Água Adensado	5°C	-0,66	0,59	-0,98
	15°C	-0,63	0,57	-0,98
	25°C	-0,62	0,56	-0,98
	35°C	-0,65	0,58	-0,98
	45°C	-0,65	0,58	-0,98
Água Sem Adensante	5°C	-0,68	0,61	-0,98
	15°C	-0,66	0,59	-0,98
	25°C	-0,67	0,60	-0,98
	35°C	-0,70	0,62	-0,97
	45°C	-0,70	0,62	-0,98
Óleo Adensado	5°C	-0,62	0,55	-0,98
	25°C	-0,81	0,73	-0,96

	45°C	-0,79	0,70	-0,96
	65°C	-0,76	0,68	-0,96
	85°C	-0,76	0,68	-0,97
Óleo Sem Adensante	5°C	-0,63	0,56	-0,98
	25°C	-0,69	0,61	-0,98
	45°C	-0,76	0,68	-0,97
	65°C	-0,78	0,70	-0,97
	85°C	-0,75	0,67	-0,97

Figura 68. Efeito da temperatura nos parâmetros do modelo Herschel-Bulkley.



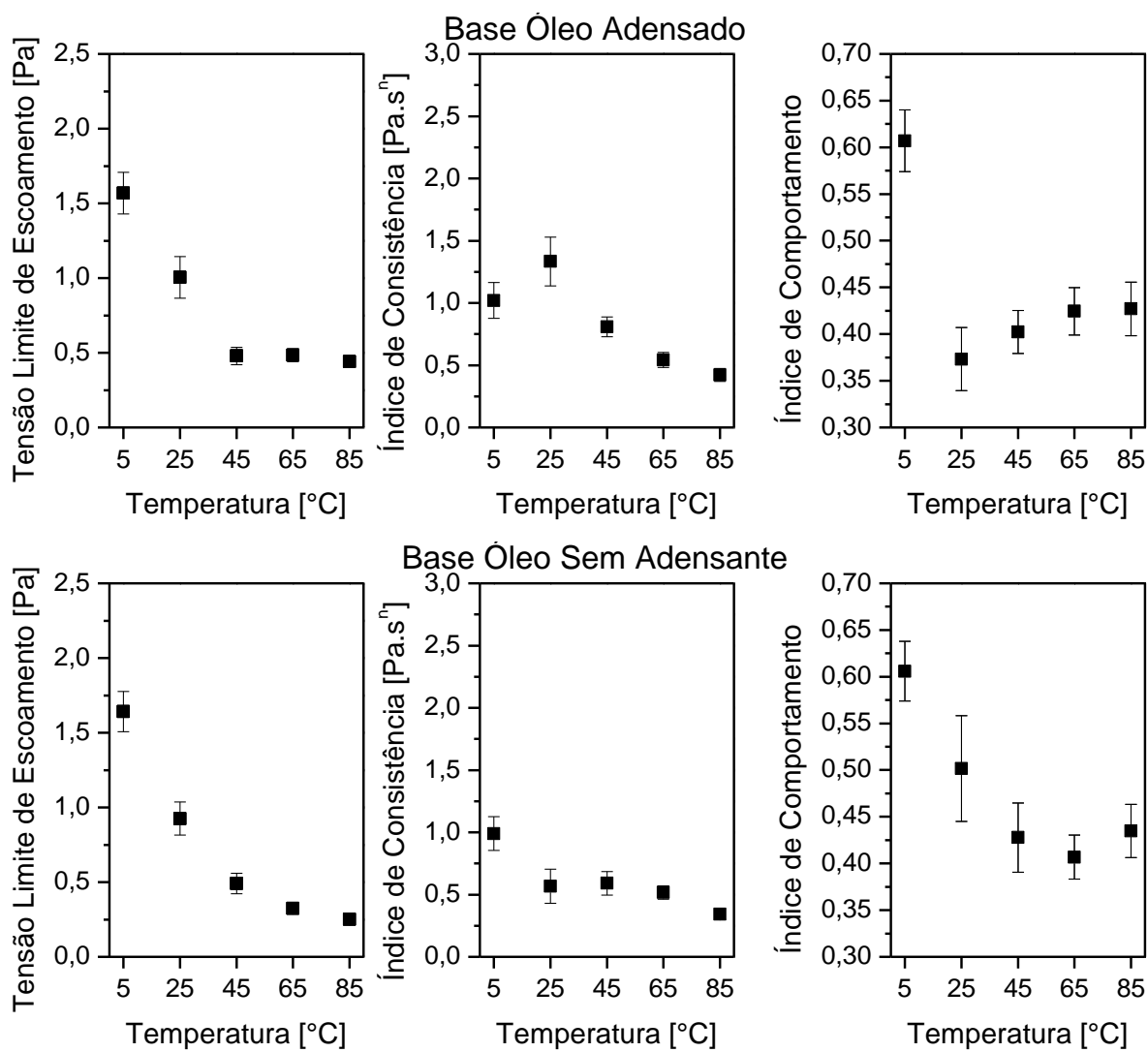


Figura 69. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

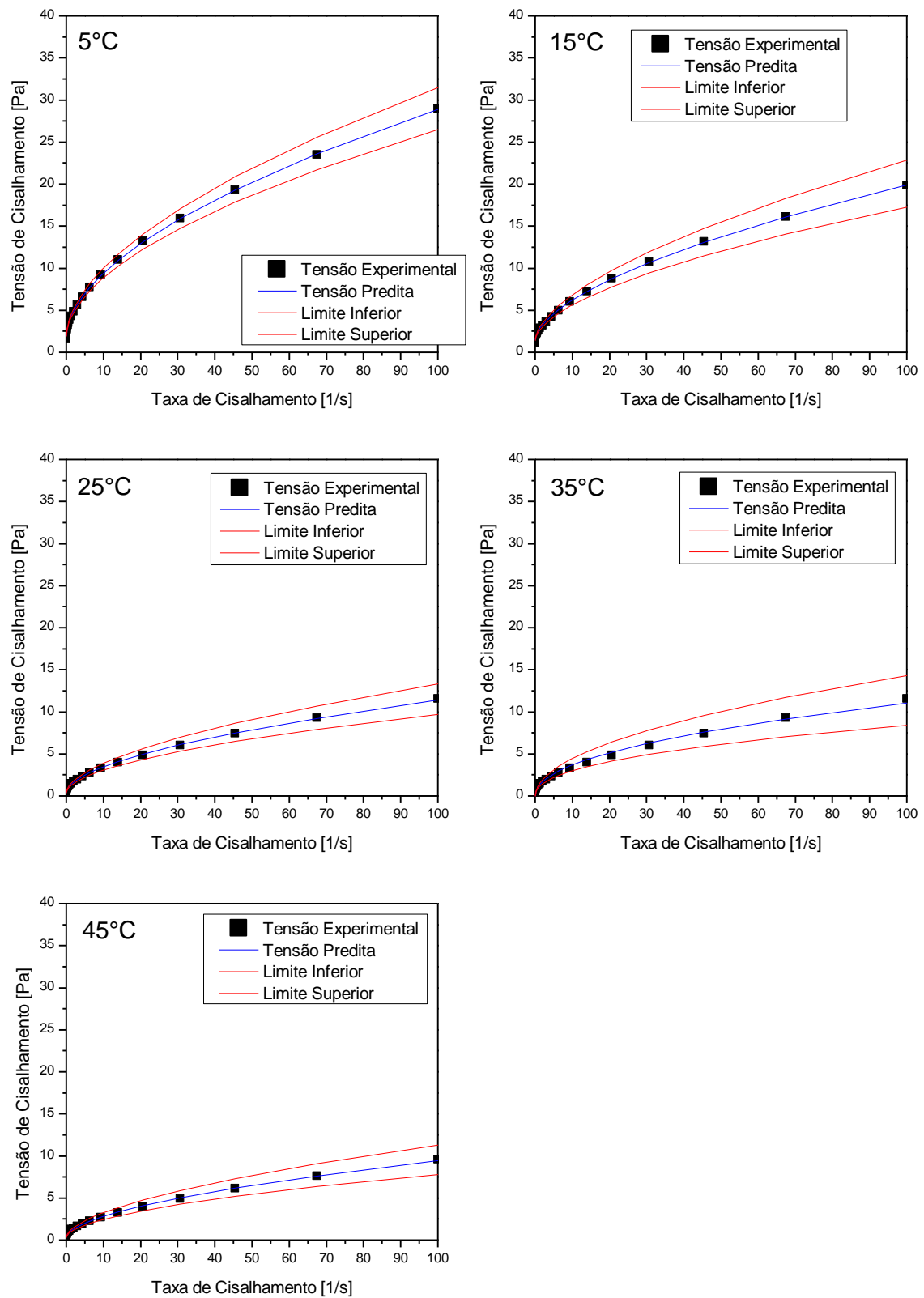




Figura 70. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley.

Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

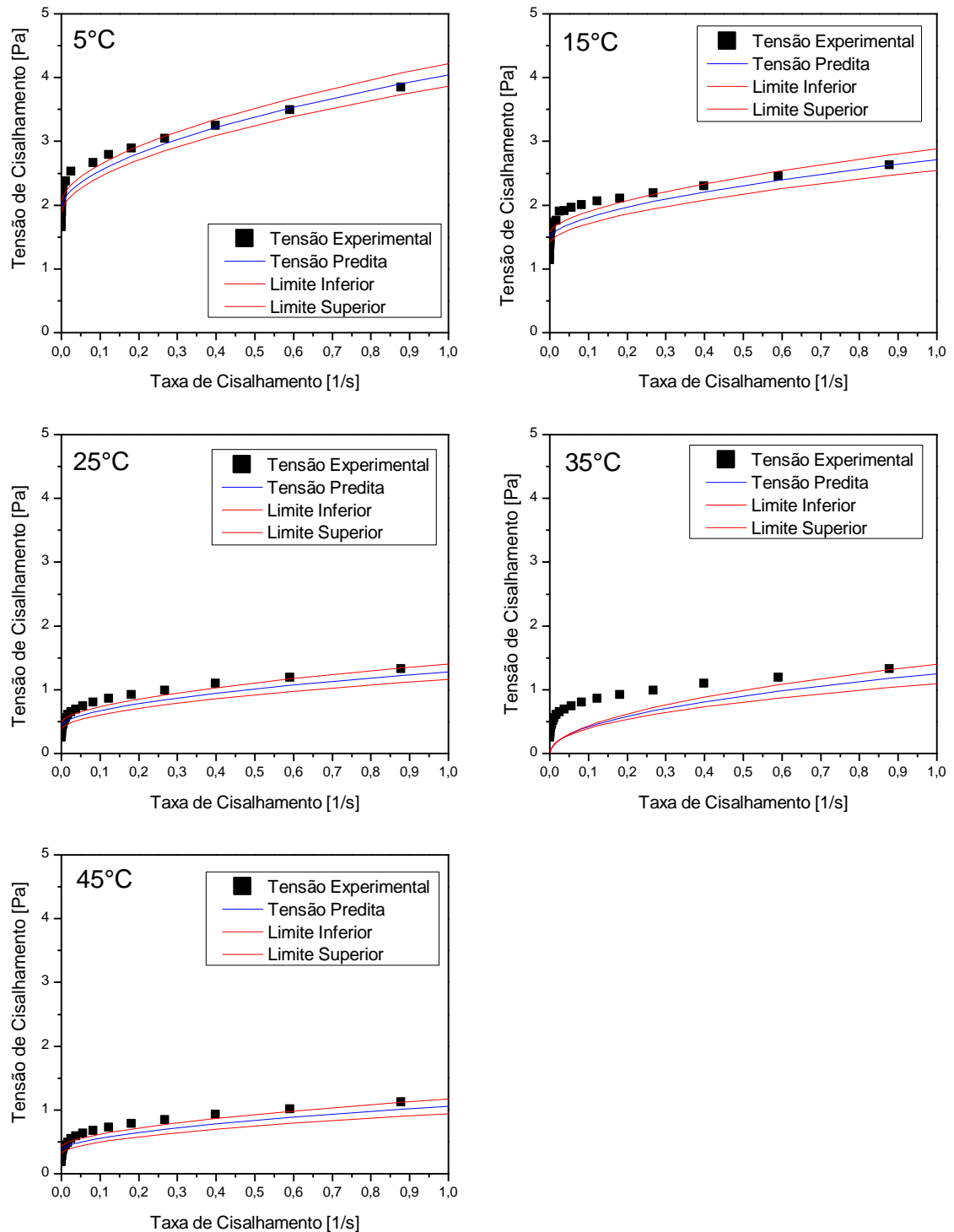
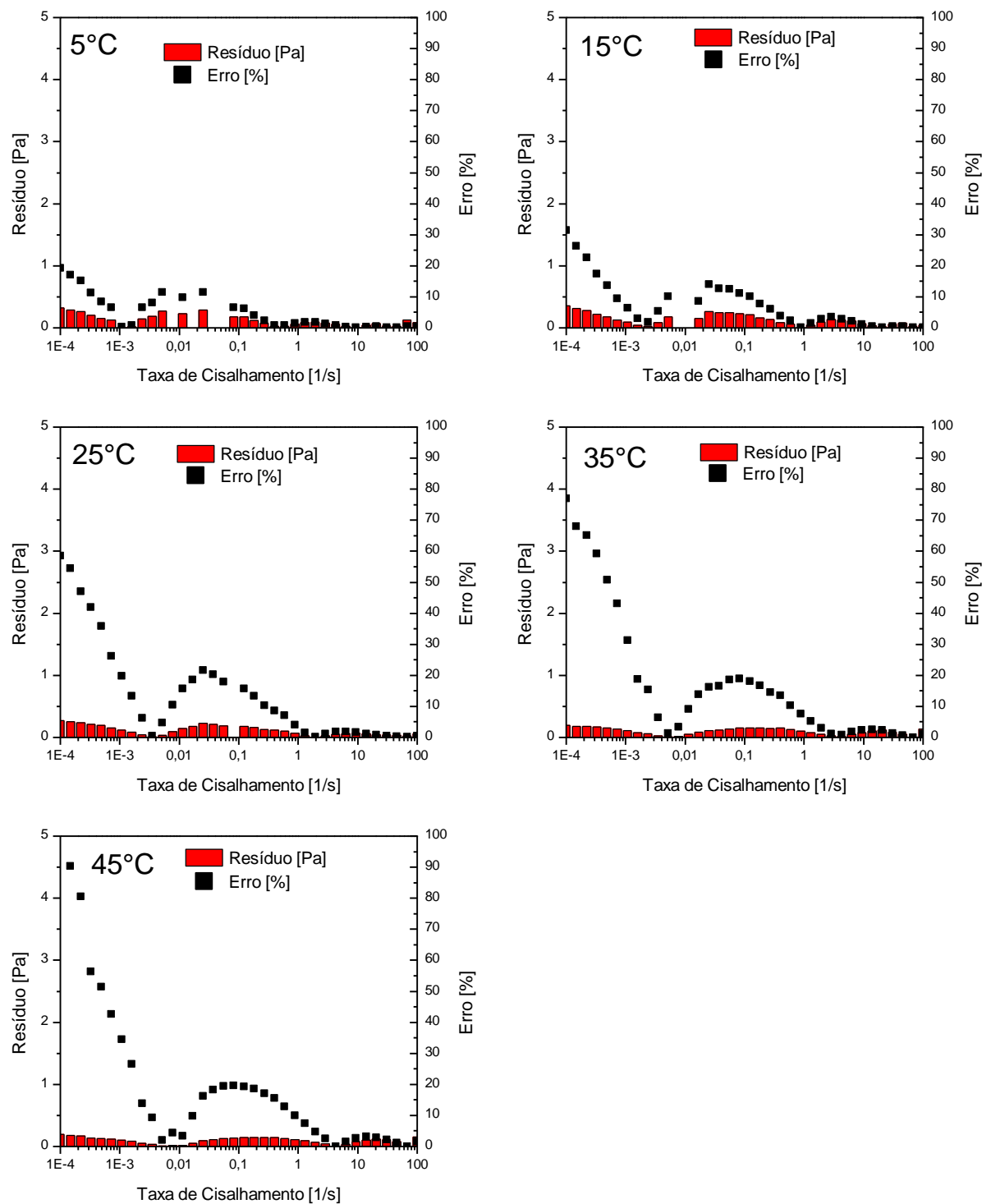


Figura 71. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .



#### 4.4.4. Estimação de parâmetros para modelos reológicos em função da temperatura

Uma vez observado os efeitos da temperatura nos parâmetros reológicos dos modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley, avaliou-se a capacidade de predizer os conjuntos de dados experimentais em função da taxa de cisalhamento e da temperatura. Para isso, fez-se uso das equações Lei de Potência com Arrhenius, Lei de Potência com WLF e Herschel-Bulkley com Arrhenius. O objetivo é comparar o comportamento dos parâmetros para os fluidos com e sem adensante. Considerando que a temperatura não é uma variável estatisticamente significativa na faixa  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ , avaliaram-se as faixas  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  e  $100 \text{ s}^{-1}$ .

Considerando a faixa de taxa de cisalhamento entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ , tem-se os resultados para Lei de Potência com Arrhenius nas tabelas 42 e 43 e nas figuras 72, 73 e 74; para Herschel-Bulkley com Arrhenius nas tabelas 44 e 45 e nas figuras 75, 76 e 77; e para Lei de Potência com WLF na tabela 46.

Considerando o modelo Lei de Potência com Arrhenius reparametrizada, para os fluidos base água, notou-se diferença estatística significativa entre os valores de índice de consistência (" $M$ "); já para os parâmetros índice de comportamento (" $n$ ") e energia de escoamento (" $\Delta H$ ") não foi estatisticamente significativo. Em outras palavras, os intervalos de confiança não se interceptaram para " $M$ ", mas se interceptaram para " $n$ " e " $\Delta H$ ". Aliás, os valores para " $n$ " e " $\Delta H$ " foram bem próximos. Ao comparar o comportamento do fluido base água com e sem adensante, caso o parâmetro " $M$ " seja pouco influente no resultado final da simulação, pode ser plausível utilizar os parâmetros do fluido base água sem adensante para descrever o fluido com adensante. Para os fluidos olefínicos, notou-se diferença estatística significativa entre os valores de índice de consistência (" $M$ ") e índice de comportamento (" $n$ "). Já para energia de escoamento (" $\Delta H$ "), os intervalos de confiança se interceptaram próximo aos limites inferior e superior, mas com uma diferença da ordem de  $1000 \text{ J/mol}$ . Nesse contexto, é provável que os resultados simulados também sejam distintos.

Considerando o modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius reparametrizada, para os fluidos aquosos, não é possível observar diferença estatística significativa entre os valores de tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ "), índice de consistência (" $M$ "), índice de comportamento (" $n$ ") e energia de escoamento (" $\Delta H$ "). Em outras palavras, os dois

fluidos tiveram parâmetros estimados estatisticamente idênticos. Além disso, é possível notar que os valores desses parâmetros são bem próximos. Nesse contexto, ao comparar o comportamento do fluido base água com e sem adensante, seria plausível utilizar os parâmetros do fluido base água sem adensante para descrever o fluido adensado. Para os fluidos olefínicos, houve interseção entre os intervalos de confiança apenas para energia de escoamento (" $\Delta H$ "). Houve diferença estatística significativa entre os valores de tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ ") e índice de consistência (" $M$ "). O índice de comportamento (" $n$ ") também é estatisticamente diferente; embora essa diferença esteja apenas na segunda casa decimal.

Considerando o modelo Lei de Potência com WLF, obteve-se resultados sem significado físico. O próprio *software* usado para as estimações emitiu um alerta para "soluções degeneradas". O parâmetro índice de comportamento (" $n$ ") assumiu valor igual a zero (a tensão predita seria independente da taxa) e igual a 1 (comportamento newtoniano). Além disso, os parâmetros " $c_1$ " e " $c_2$ " assumiram valores da ordem de grandeza entre  $10^5$  e  $10^{10}$ , o que é desprovido de qualquer sentido. Por essa razão, não foi feita qualquer outra análise sobre qualidade de ajuste ou qualidade de predição.

Para os quatro fluidos avaliados por esse modelo, o teste F mostrou que a razão entre a variância experimental e predita está acima do limite superior, de tal forma que o modelo não é capaz de prever corretamente os dados experimentais e que os erros de predição podem estar superestimados. Teve-se, portanto, um problema com a qualidade do modelo.

Observou-se também alta correlação entre índice de consistência (" $M$ ") e índice de comportamento (" $n$ "), sempre superior a 0,95, conforme já era esperado devido aos resultados apresentados nos tópicos anteriores. Por conta da reparametrização da equação do tipo Arrhenius utilizada, obteve-se baixa correlação entre o índice de consistência (" $M$ ") e do índice de comportamento (" $n$ ") com relação à energia de escoamento (" $\Delta H$ ").

Tabela 42. Parâmetros estimados Lei de Potência com Arrhenius (0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,86	5,60	6,10				
	n [-]	0,33	0,30	0,33	921,64	113,69	0,83	1,18
	$\Delta H$ [J/mol]	-9833,65	-10412,20	-9255,15				
Água Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6,52	6,30	6,74				
	n [-]	0,32	0,31	0,32	749,47	111,90	0,83	1,18
	$\Delta H$ [J/mol]	-9613,37	-10106,95	-9119,78				
Óleo Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,60	3,30	4,00				
	n [-]	0,50	0,40	0,50	2431,33	265,39	0,81	1,21
	$\Delta H$ [J/mol]	-14909,30	-15662,40	-14156,30				
Óleo Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,30	1,20	1,40				
	n [-]	0,60	0,60	0,60	565,42	112,71	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-15991,50	-16481,20	-15501,80				

Tabela 43. Correlação paramétrica do Lei de Potência com Arrhenius (0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

Fluido	M-n	M- $\Delta H$	n- $\Delta H$
Água Adensado	-0,96	0,11	5,94x10 <sup>-3</sup>
Água Sem Adensante	-0,96	0,11	3,20x10 <sup>-5</sup>
Óleo Adensado	-0,98	0,08	2,01x10 <sup>-3</sup>
Óleo Sem Adensante	-0,99	0,07	5,94x10 <sup>-3</sup>

Figura 72. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

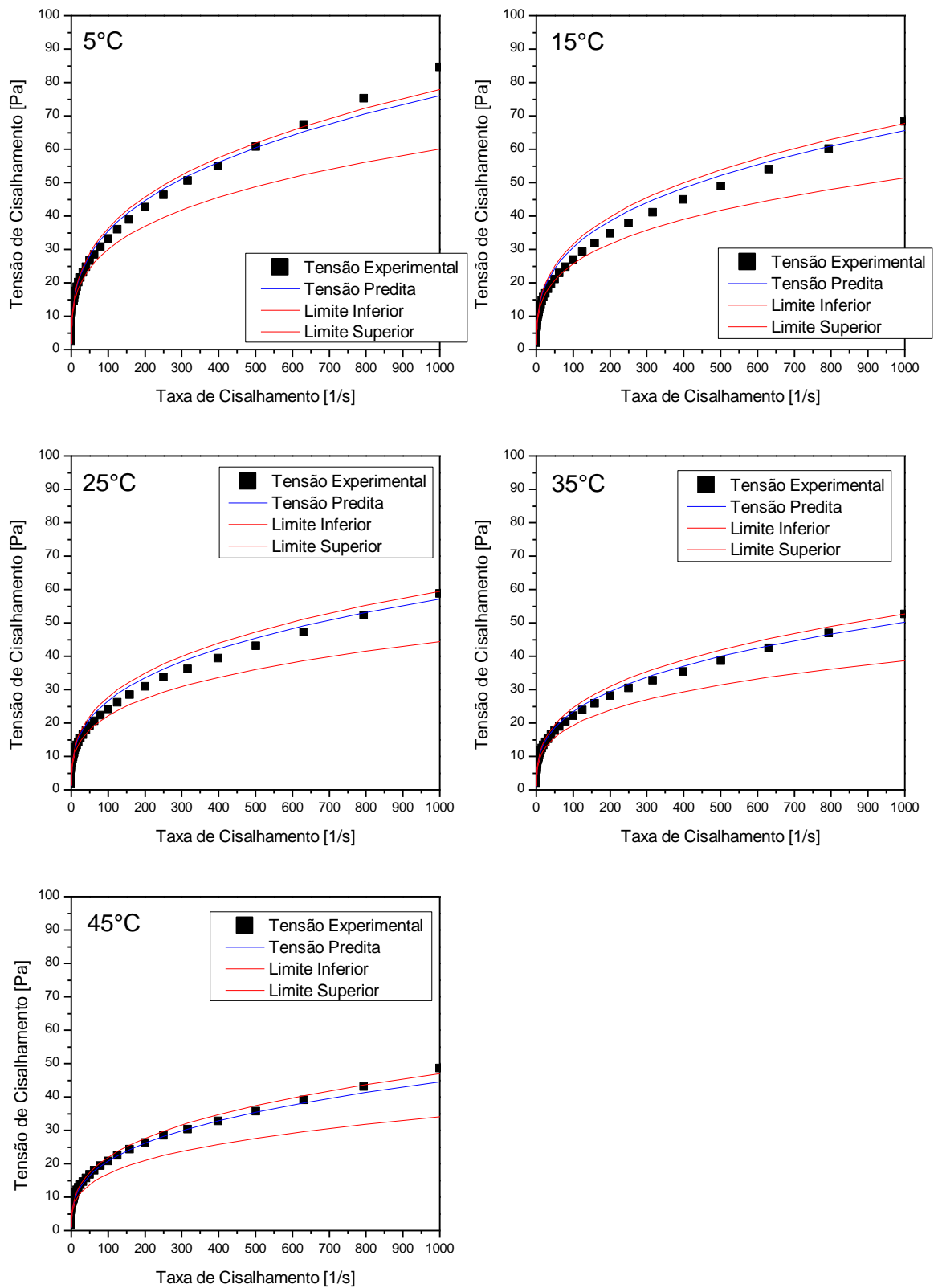


Figura 73. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

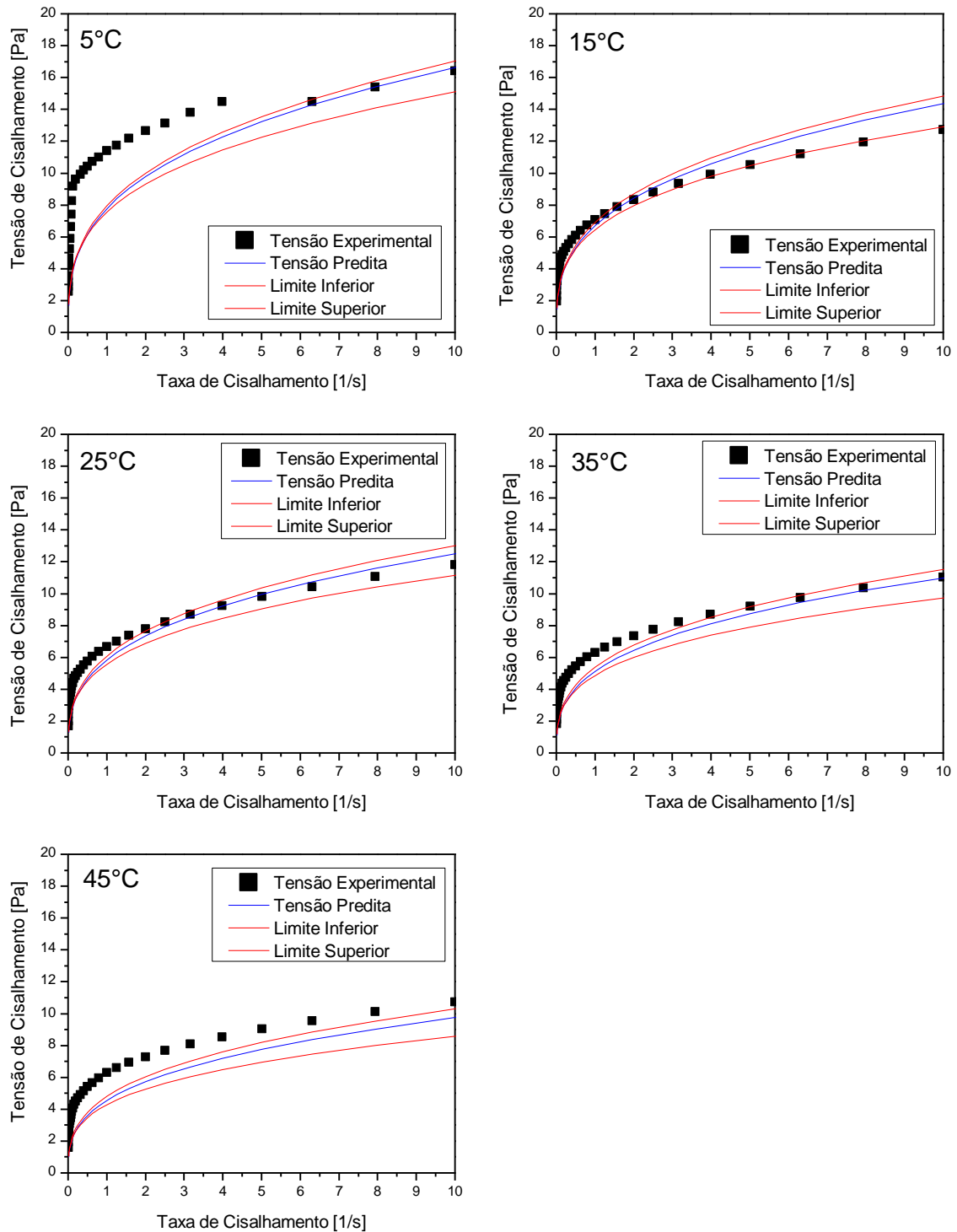


Figura 74. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

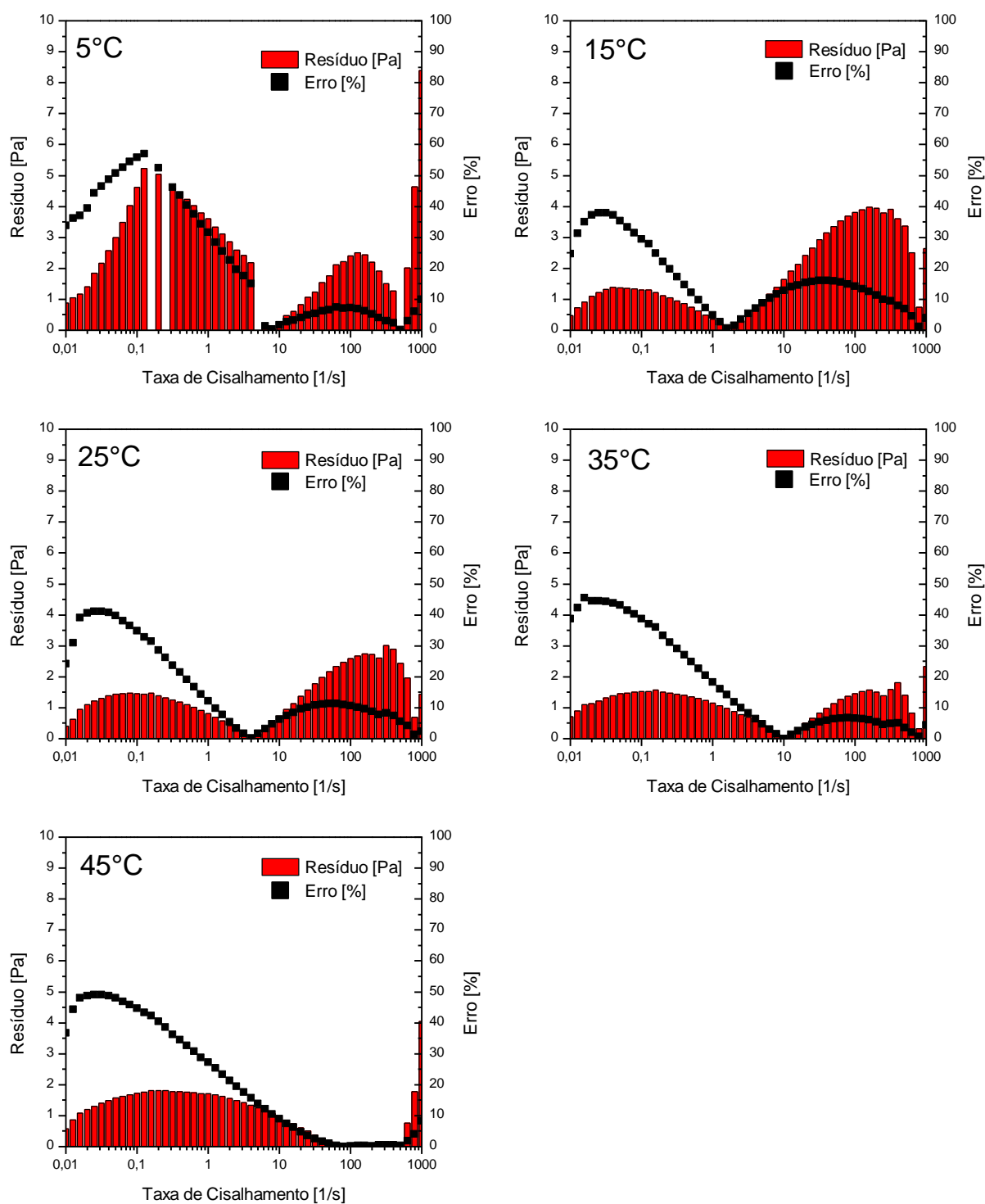




Tabela 44. Parâmetros estimados Herschel-Bulkley com Arrhenius (0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	$\tau_0$ [Pa]	3,20	2,80	3,50	446,54	55,31	0,83	1,18
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,50	3,30	3,80				
	n [-]	0,40	0,40	0,40				
	$\Delta H$ [J/mol]	-10951,70	-11418,40	-10485,00				
Água Sem Adensante	$\tau_0$ [Pa]	3,49	3,26	3,72	205,93	30,87	0,83	1,18
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,86	3,68	4,03				
	n [-]	0,39	0,38	0,40				
	$\Delta H$ [J/mol]	-10779,47	-11081,74	-10477,21				
Óleo Adensado	$\tau_0$ [Pa]	4,30	3,80	4,90	1176,50	129,12	0,81	1,21
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,80	1,60	2,00				
	n [-]	0,60	0,50	0,60				
	$\Delta H$ [J/mol]	-16613,20	-17251,20	-15975,20				
Óleo Sem Adensante	$\tau_0$ [Pa]	1,77	1,50	2,03	300,92	60,32	0,80	1,22
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,91	0,83	0,99				
	n [-]	0,63	0,62	0,65				
	$\Delta H$ [J/mol]	-16805,69	-17207,46	-16403,92				

Tabela 45. Correlação paramétrica para Herschel-Bulkley com Arrhenius.

Fluido	M-n	M- $\Delta H$	M- $\tau_0$	n- $\Delta H$	n- $\tau_0$	$\Delta H$ - $\tau_0$
Água Adensado	-0,98	0,27	-0,82	-0,20	0,76	-0,26
Água Sem Adensante	-0,98	0,27	-0,83	-0,21	0,77	-0,27
Óleo Adensado	-0,99	0,29	-0,66	-0,21	0,60	-0,34
Óleo Sem Adensante	-0,99	0,24	-0,60	-0,17	0,55	-0,31

Figura 75. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

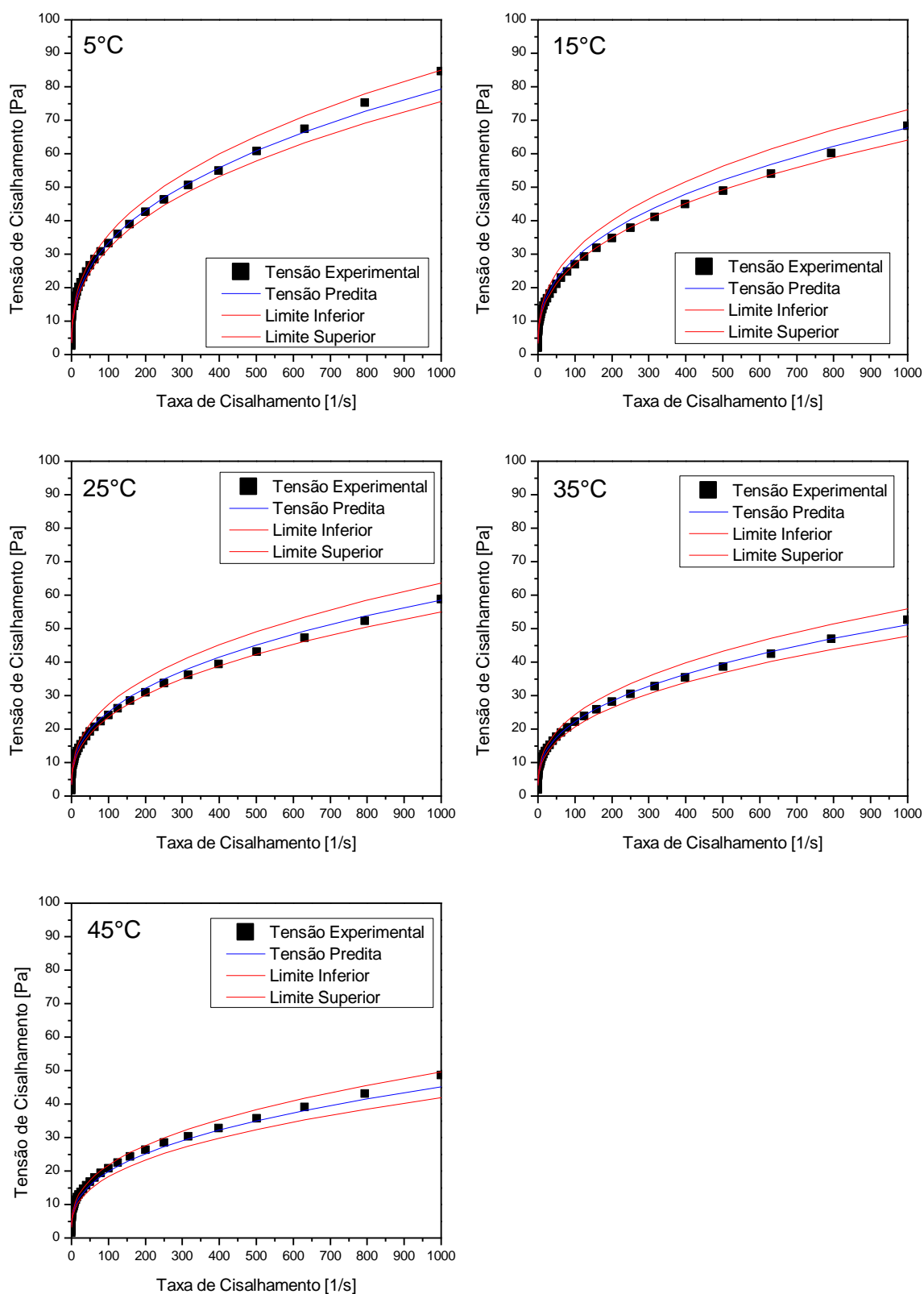


Figura 76. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

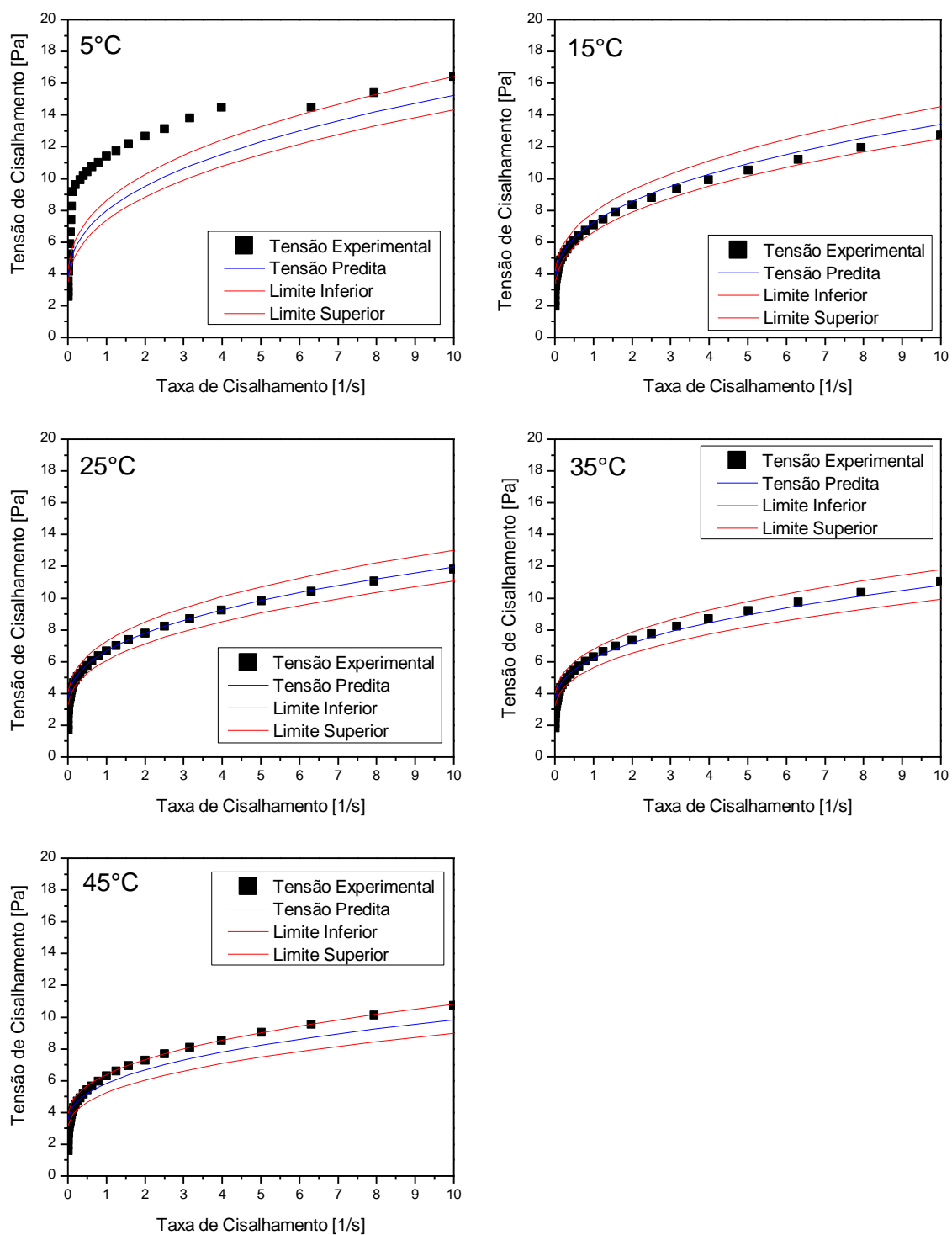


Figura 77. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

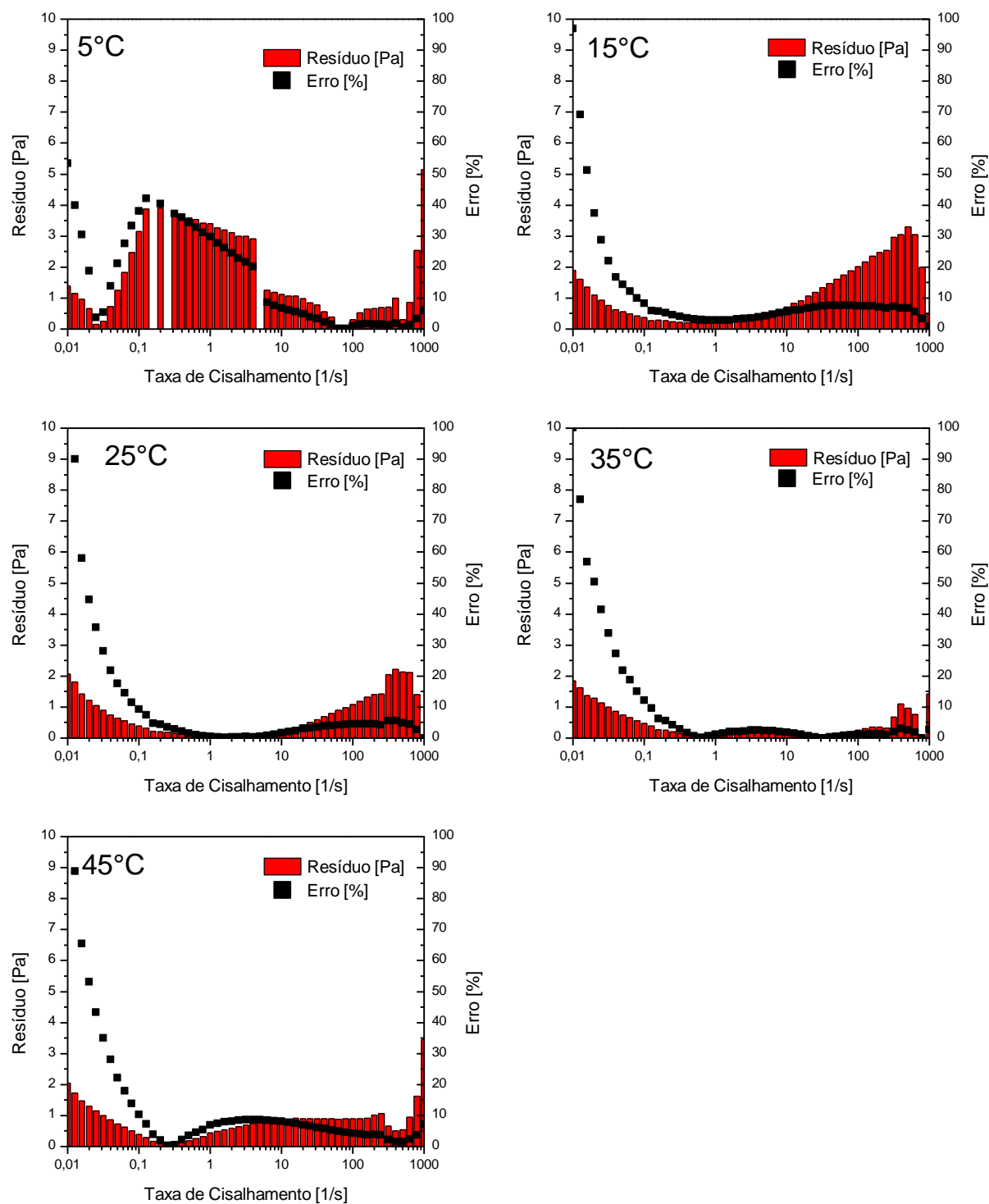


Tabela 46. Parâmetros estimados para Lei de Potência com WLF (0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	6	6	6	988,96	122,49	0,83	1,18
	n [-]	0	0	0				
	C <sub>1</sub> [-]	-1,21x10 <sup>5</sup>	-1,26x10 <sup>5</sup>	-1,15x10 <sup>5</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-8,98x10 <sup>6</sup>	-8,98x10 <sup>6</sup>	-8,98x10 <sup>6</sup>				
Água Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	7	6	7	779,48	116,84	0,83	1,18
	n [-]	0	0	0				
	C <sub>1</sub> [-]	-6,97x10 <sup>4</sup>	-7,26x10 <sup>4</sup>	-6,67x10 <sup>4</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-5,28x10 <sup>6</sup>	-5,28x10 <sup>6</sup>	-5,28x10 <sup>6</sup>				
Óleo Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	4,00	3,31	4,10	2468,43	270,90	0,81	1,21
	n [-]	0	0	0				
	C <sub>1</sub> [-]	-9,71x10 <sup>4</sup>	-8,84x10 <sup>8</sup>	8,84x10 <sup>8</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-4,90x10 <sup>6</sup>	-4,46x10 <sup>10</sup>	4,46x10 <sup>10</sup>				
Óleo Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,00	1,00	1,00	594,41	119,15	0,80	1,22
	n [-]	1,00	1,00	1,00				
	C <sub>1</sub> [-]	-4,00x10 <sup>5</sup>	-4,09x10 <sup>5</sup>	-3,90x10 <sup>7</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-1,87x10 <sup>7</sup>	-1,87x10 <sup>7</sup>	-1,87x10 <sup>7</sup>				

Considerando a faixa de taxa de cisalhamento entre 0,0001 s<sup>-1</sup> e 100 s<sup>-1</sup>, tem-se os resultados para Lei de Potência com Arrhenius nas tabelas 47 e 48 e nas figuras 78, 79 e 80; para Herschel-Bulkley com Arrhenius nas tabelas 49 e 50 e nas figuras 81, 82 e 83; e para Lei de Potência com WLF na tabela 51. Resultados qualitativamente semelhantes aos apresentados anteriormente foram obtidos para essa faixa de taxa de cisalhamento.

Novamente, o teste F mostrou que a razão entre a variância experimental e predita ficou acima do limite superior, indicando que o modelo não foi capaz de prever corretamente os dados experimentais e que o modelo não pode ser considerado bom. Por conta da reparametrização, a correlação da energia de

escoamento com os demais parâmetros foi mais próxima de zero. Para os demais, observou-se alta correlação.

Conforme já era esperado por conta dos resultados anteriores, a capacidade preditiva desses modelos não foi boa. Próximo a baixas taxas ( $0,0001 \text{ s}^{-1}$ ), os desvios chegaram a superar 50%.

Tabela 47. Parâmetros estimados para modelo Lei de Potência com Arrhenius no intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_{\varepsilon}^2 / \sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,90	1,70	2,00				
	n [-]	0,40	0,38	0,42	113,67	17,48	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-23246,00	-24680,70	-21811,30				
Água Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,90	2,70	3,10				
	n [-]	0,40	0,38	0,42	159,14	22,60	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-19548,70	-20877,00	-18220,30				
Óleo Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,10	2,00	2,30				
	n [-]	0,30	0,28	0,32	71,04	1273,41	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-16930,20	-18140,10	-15720,30				
Óleo Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,70	1,60	1,90				
	n [-]	0,30	0,28	0,32	73,58	90,36	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-21063,10	-22662,00	-19464,30				

Tabela 48. Correlação paramétrica para modelo Lei de Potência com Arrhenius no intervalo de  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

Fluido	M-n	M- $\Delta H$	n- $\Delta H$
Água Adensado	-0,91	0,29	$2,00 \times 10^{-3}$
Água Sem Adensante	-0,90	0,28	$1,45 \times 10^{-3}$
Óleo Adensado	-0,88	0,19	$1,08 \times 10^{-5}$
Óleo Sem Adensante	-0,87	0,28	$2,16 \times 10^{-3}$

Figura 78. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

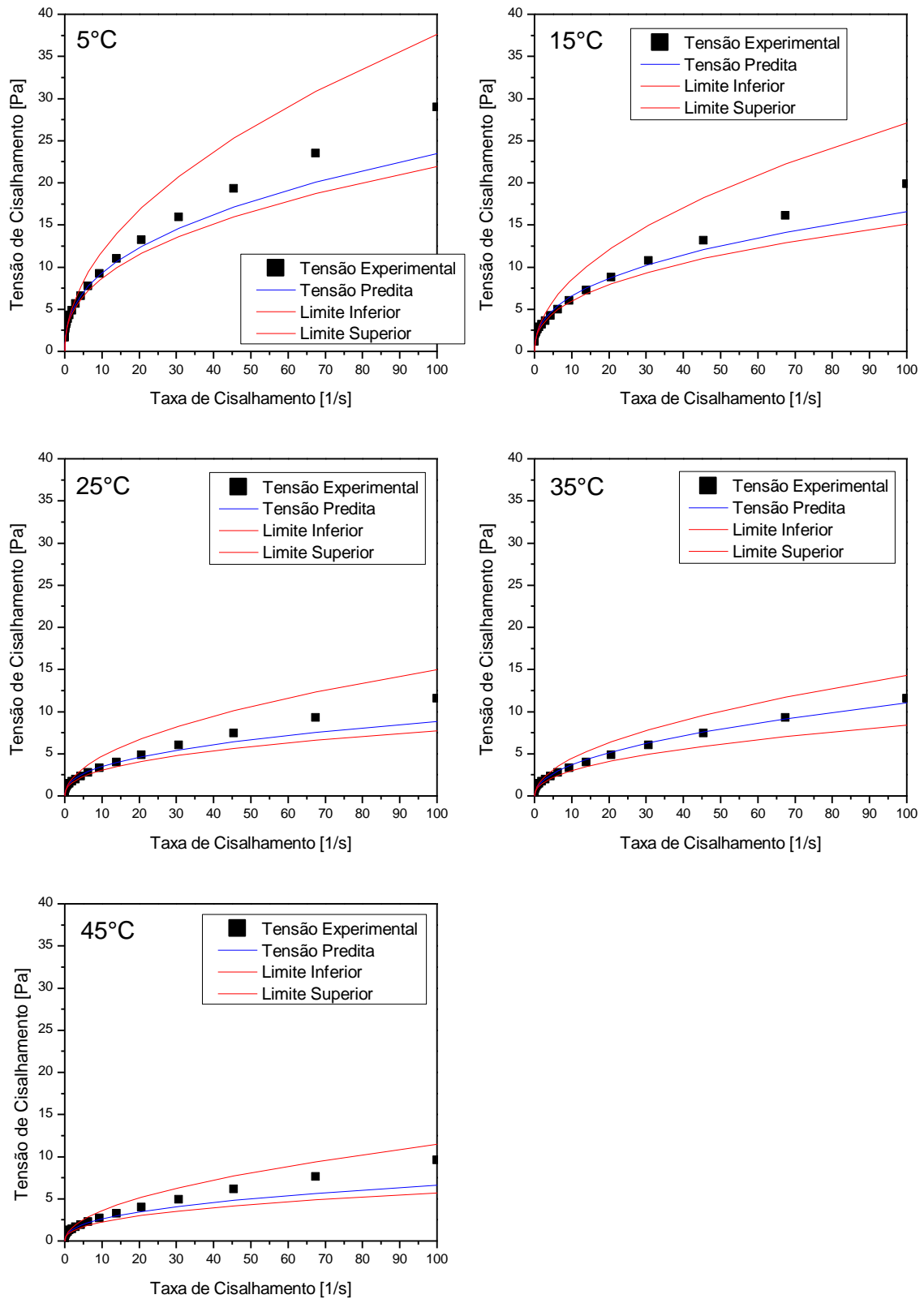


Figura 79. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

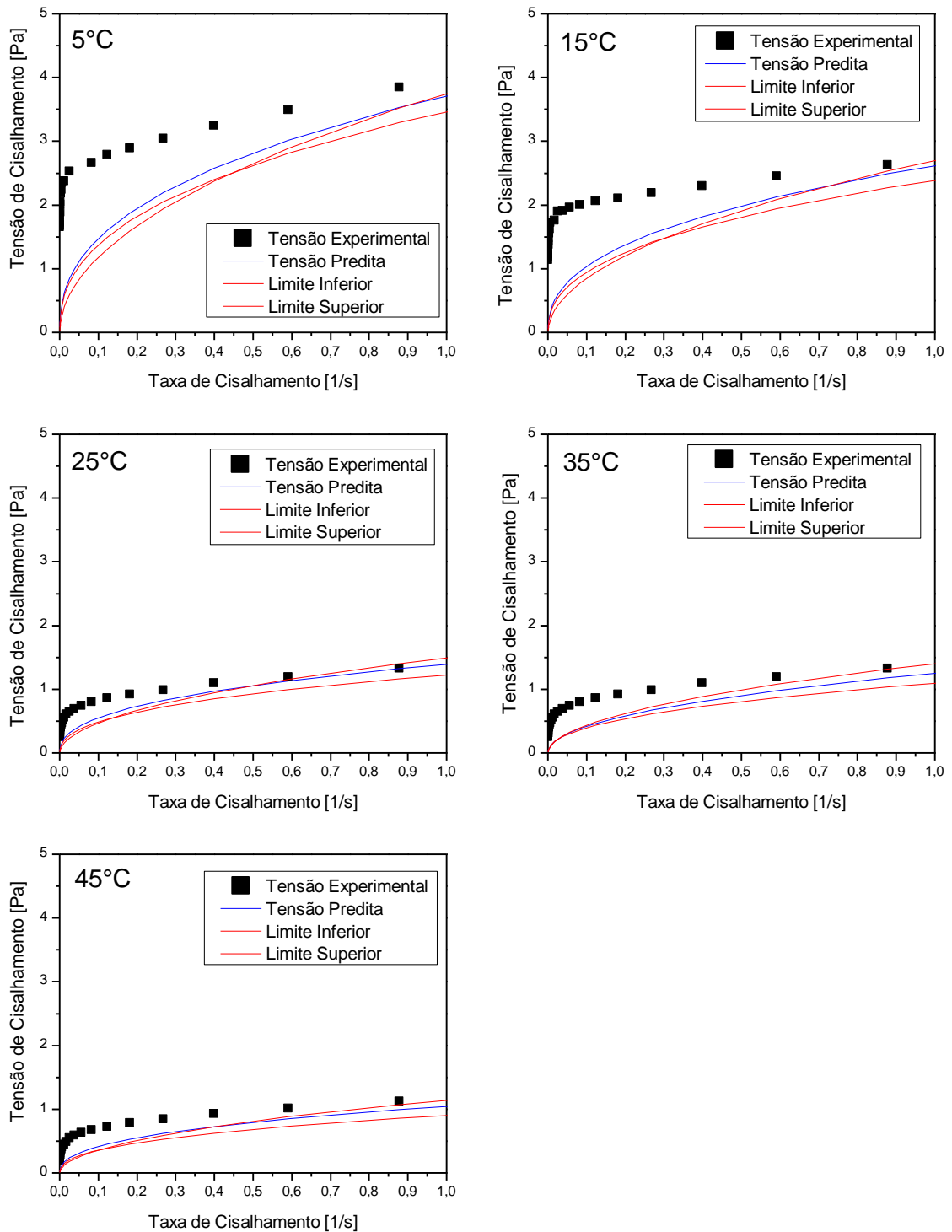




Figura 80. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

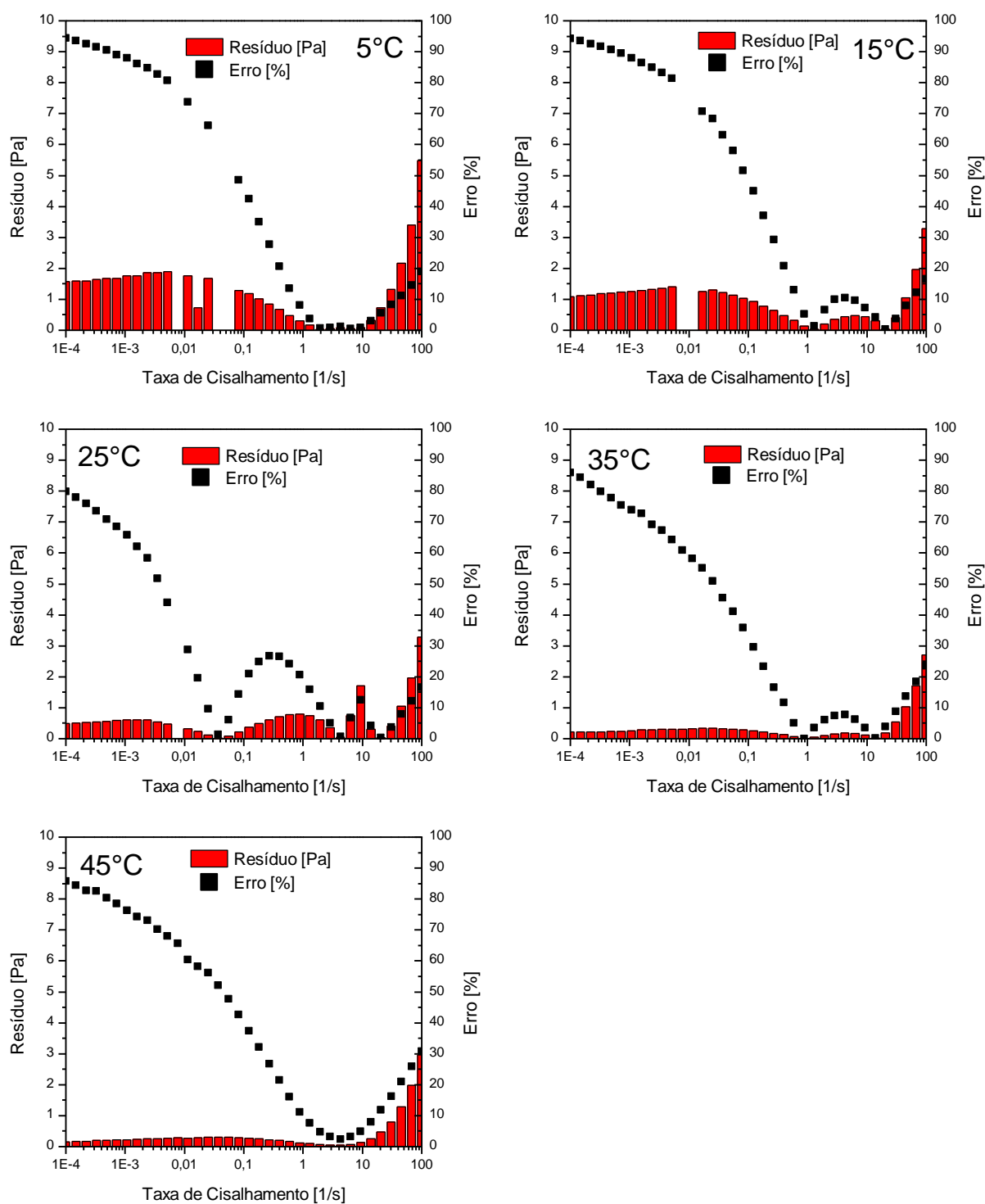


Tabela 49. Parâmetros estimados para modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	$\tau_0$ [Pa]	0,85	0,72	0,97				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,21	1,09	1,33				
	n [-]	0,52	0,50	0,54	56,88	8,80	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-25551,38	-26757,44	-24345,32				
Água Sem Adensante	$\tau_0$ [Pa]	1,15	1,01	1,29				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,74	1,59	1,89				
	n [-]	0,48	0,46	0,50	67,62	9,66	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-21813,58	-22852,72	-20774,44				
Óleo Adensado	$\tau_0$ [Pa]	0,80	0,70	0,90				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,00	0,90	1,10				
	n [-]	0,50	0,47	0,52	28,72	517,73	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-21230,10	-22364,60	-20095,60				
Óleo Sem Adensante	$\tau_0$ [Pa]	0,70	0,60	0,80				
	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,80	0,70	0,90				
	n [-]	0,50	0,47	0,53	36,37	44,92	0,80	1,22
	$\Delta H$ [J/mol]	-26854,00	-28609,60	-25098,50				

Tabela 50. Correlação paramétrica para modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Fluido	M-n	M- $\Delta H$	M- $\tau_0$	n- $\Delta H$	n- $\tau_0$	$\Delta H$ - $\tau_0$
Água Adensado	-0,95	0,39	-0,64	-0,16	0,54	-0,30
Água Sem Adensante	-0,95	0,37	-0,68	-0,17	0,58	-0,29
Óleo Adensado	-0,95	0,39	-0,63	-0,20	0,52	-0,39
Óleo Sem Adensante	-0,93	0,46	-0,60	-0,18	0,46	-0,40

Figura 81. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

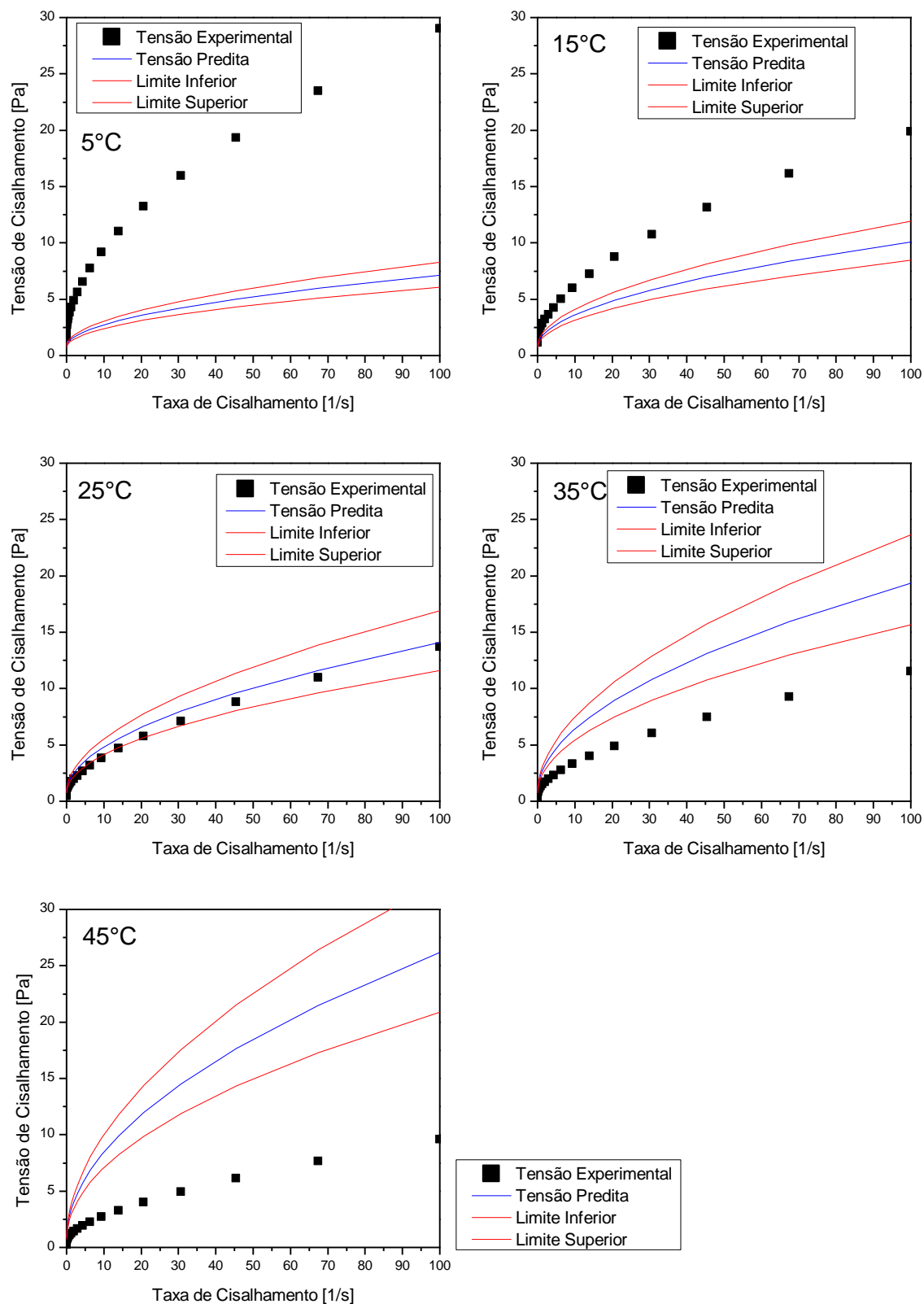


Figura 82. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

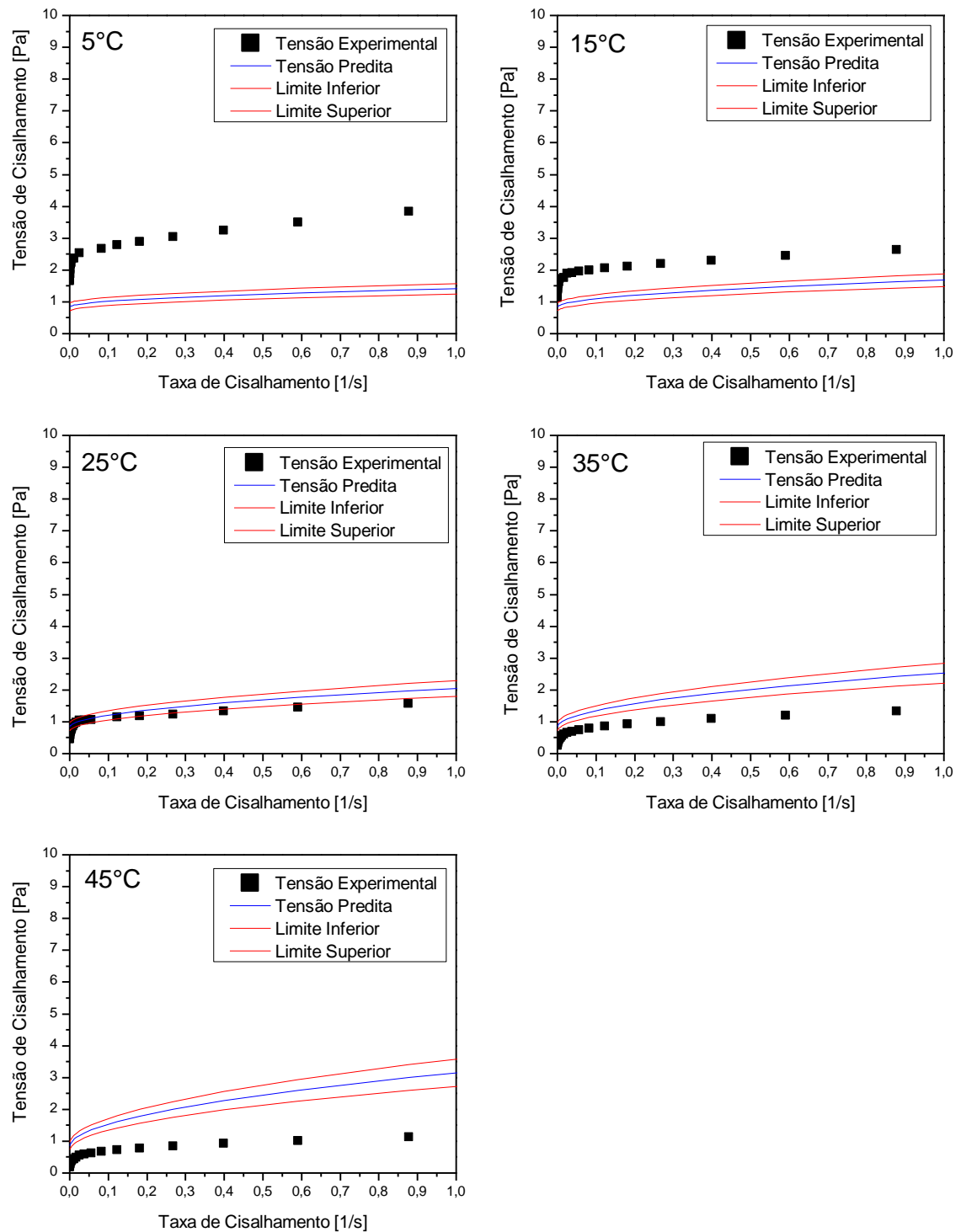


Figura 83. Resíduo e erro percentual do fluido base água adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

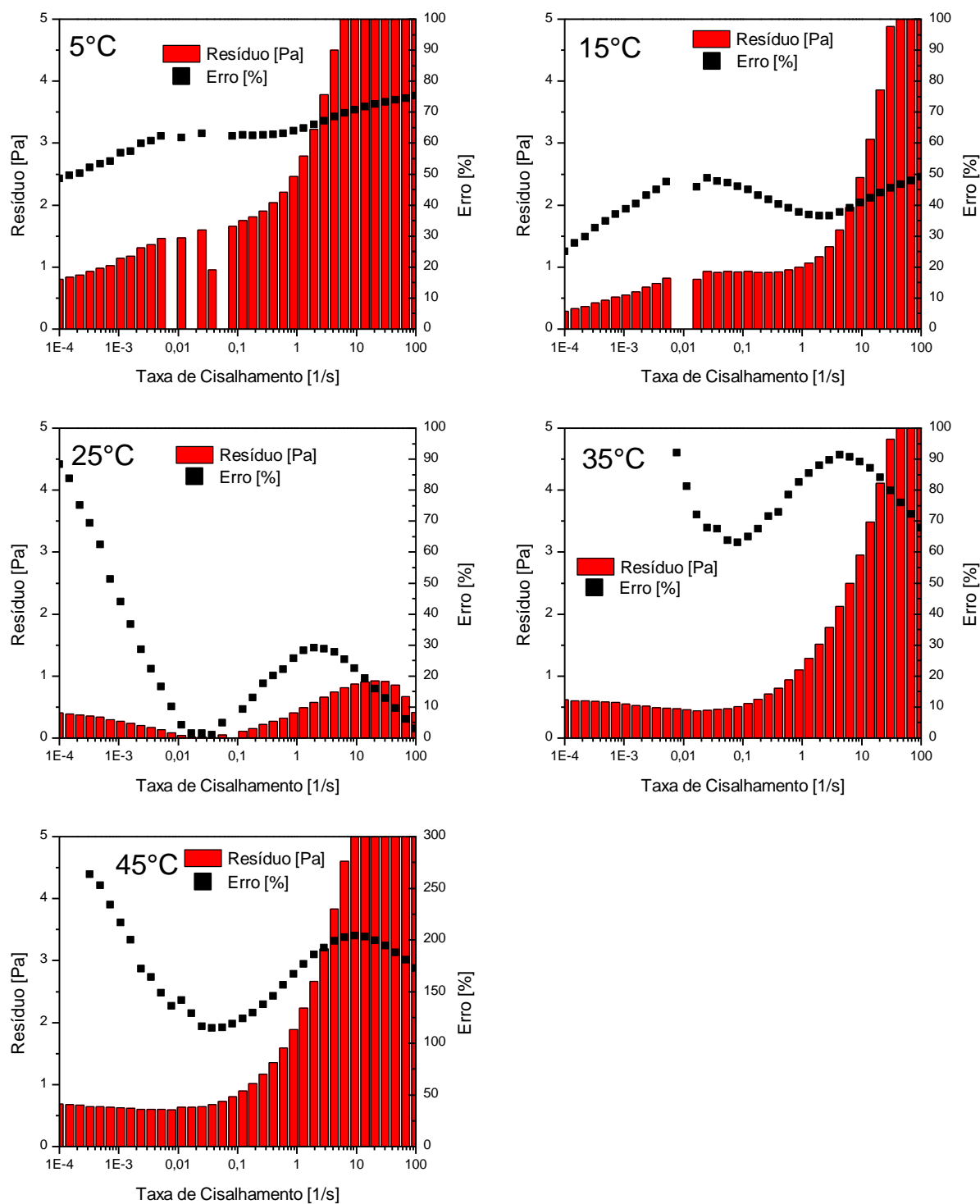


Tabela 51. Parâmetros estimados para modelo Lei de Potência com WLF no intervalo de 100 s<sup>-1</sup> até 0,0001 s<sup>-1</sup>.

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado	Intervalo de Confiança		Teste F de Fisher			
			Limite Inferior	Limite Superior	Função Objetivo	$\sigma_\varepsilon^2/\sigma_y^2$	Limite Inferior	Limite Superior
Água Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,00	1,76	2,08	120,99	18,71	0,798	1,224
	n [-]	0,00	0,00	0,00				
	C <sub>1</sub> [-]	-2,30x10 <sup>5</sup>	-2,42x10 <sup>5</sup>	-2,18x10 <sup>5</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-7,07x10 <sup>6</sup>	-7,07x10 <sup>6</sup>	-7,07x10 <sup>6</sup>				
Água Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,00	3,00	3,00	168,77	24,10	0,80	1,22
	n [-]	0,00	0,00	0,00				
	C <sub>1</sub> [-]	-2,12x10 <sup>5</sup>	-2,24x10 <sup>5</sup>	-2,00x10 <sup>5</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-7,81x10 <sup>6</sup>	-7,81x10 <sup>6</sup>	-7,81x10 <sup>6</sup>				
Óleo Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,00	2,00	2,00	76,67	1382,14	0,80	1,22
	n [-]	0,00	0,00	0,00				
	C <sub>1</sub> [-]	-2,18x10 <sup>5</sup>	-2,32x10 <sup>5</sup>	-2,05x10 <sup>5</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-9,95x10 <sup>6</sup>	-9,95x10 <sup>6</sup>	-9,95x10 <sup>6</sup>				
Óleo Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	2,00	2,00	2,00	83,71	103,39	0,80	1,22
	n [-]	0,00	0,00	0,00				
	C <sub>1</sub> [-]	-1,50x10 <sup>5</sup>	-1,60x10 <sup>5</sup>	-1,40x10 <sup>5</sup>				
	C <sub>2</sub> [K]	-5,41x10 <sup>6</sup>	-5,41x10 <sup>6</sup>	-5,41x10 <sup>6</sup>				

Tentou-se realizar outras estimações com um intervalo ainda menor, entre 0,0001 s<sup>-1</sup> e 0,01 s<sup>-1</sup>. No entanto, não houve melhora significativa nesses resultados e a capacidade preditiva piorou quando comparado aos outros intervalos avaliados. Isso ratifica que os modelos abordados nesse trabalho não conseguem ajustar adequadamente regiões de baixas taxas de cisalhamento.

## 4.5. TESTE DO EFEITO DA REOLOGIA EM CASOS NÃO ISOTÉRMICOS NA SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAL ADENSANTE

### 4.5.1. Escolha do Modelo Reológico

Ao comparar os três modelos matemáticos para ajuste da reologia em função da temperatura abordados, descartou-se inicialmente a abordagem Lei de Potência com WLF por conta das estimações com resultados poucos significativos.

Observou-se que, embora Herschel-Bulkley com Arrhenius ajustasse de forma razoável os dados para altas taxas (superiores a  $10 \text{ s}^{-1}$ ), suas previsões para baixas taxas (inferiores a  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ) eram ruins, com desvios superiores a 100%, principalmente para os fluidos base óleo.

Além disso, as duas abordagens do tipo Arrhenius apresentavam o mesmo comportamento de altos desvios em baixas taxas de cisalhamento e baixos desvios em altas taxas de cisalhamento.

Outro ponto relevante para a escolha foi a questão computacional e estrutura do programa. Implementar o parâmetro tensão limite de escoamento (" $\tau_0$ ") não é trivial e alteraria a estrutura da solução numérica do problema da sedimentação. Nesse contexto, escolheu-se o modelo Lei de Potência com Arrhenius para a abordagem não isotérmica.

### 4.5.2. Atualização do SimSag

Alguns dos resultados mais importantes do simulador é a profundidade da zona de formação de sedimentos e o gráfico de profundidade contra concentração volumétrica de sólidos. As quatro zonas da sedimentação (região de líquido clarificado, sedimentação livre, transição e formação do sedimento) estão representadas na Figura 156, ilustra cada uma dessas regiões para uma simulação de 5 anos. No eixo das ordenadas (" $y$ "), o referencial está invertido, aumentando no sentido da profundidade.

Para avaliar esses resultados e determinar a altura de sedimento formada, opta-se por uma interpretação mais conservadora, na qual tudo aquilo que está acima

da concentração da zona de sedimentação livre (concentração inicial) é considerado como zona de formação de sedimento, garantindo uma boa “margem de segurança”.

Para executar o simulador, o usuário precisa fornecer dados como propriedades do fluido de perfuração, dos sólidos adensantes, dados do poço, dados de simulação (tempos de sedimentação) e parâmetros numéricos (passo de tempo).

Anteriormente, na versão isotérmica, o simulador recebia os parâmetros reológicos e um valor de temperatura. Geralmente, esses dados são obtidos através de experimentos no viscosímetro FANN 35 A ( $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ) e em temperatura ambiente. Todos os volumes de controle recebiam os esses mesmos valores.

Após escolher o modelo Lei de Potência com Arrhenius para representar a abordagem reológica do problema e implementar o novo módulo do simulador SimSag, o usuário passou a informar os parâmetros reológicos ( $M$ ,  $n$  e  $\Delta H$ ), a temperatura do topo e do fundo do poço. A partir dessas informações, o simulador traçou um perfil de temperatura linear e realizou uma interpolação entre os volumes de controle da malha.

Depois de implementar o novo módulo, buscou-se validar a atualização. Para isso, verificou-se se o novo módulo produziria algum resultado diferente daquele observado na simulação isotérmica. Para isso, selecionou-se a mesma temperatura no topo e no fundo. Assim, todos os volumes de controle teriam a mesma temperatura.

Os resultados dessas simulações mostraram que não houve nenhuma diferença entre esses casos, ou seja, a implementação do novo módulo não trouxe qualquer prejuízo para o programa original, pois as curvas estão sobrepostas, conforme apresentada na Figura 156.

A interpolação funcionou adequadamente e o balanço de massa foi satisfeito. A nova versão necessitou de mais tempo para finalizar a execução (não mais do que 2 horas de diferença). É importante mencionar que o tempo computacional é influenciado pela capacidade de processamento do computador.

Em seguida, executou-se os casos bases descritos nas tabelas 8 e 9, que serviram para efeitos de comparação. Esses dados foram baseados em estudos de casos reais. Novamente o sistema de interpolação funcionou corretamente e o balanço de massa foi satisfeito. O resultado típico para o caso base de um fluido aquoso para uma simulação de 5 anos foi apresentado na Figura 157.



Figura 84. Resultado para simulação da sedimentação de um fluido aquoso em 5 anos sob condições isotérmicas antes e depois da atualização (dados da tabela 8).

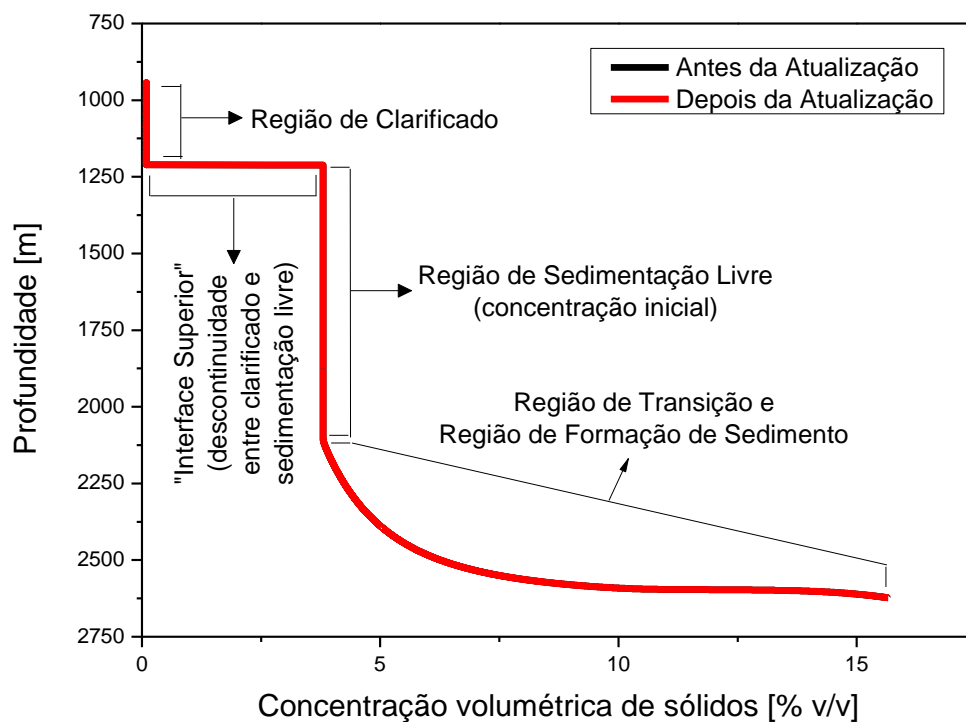
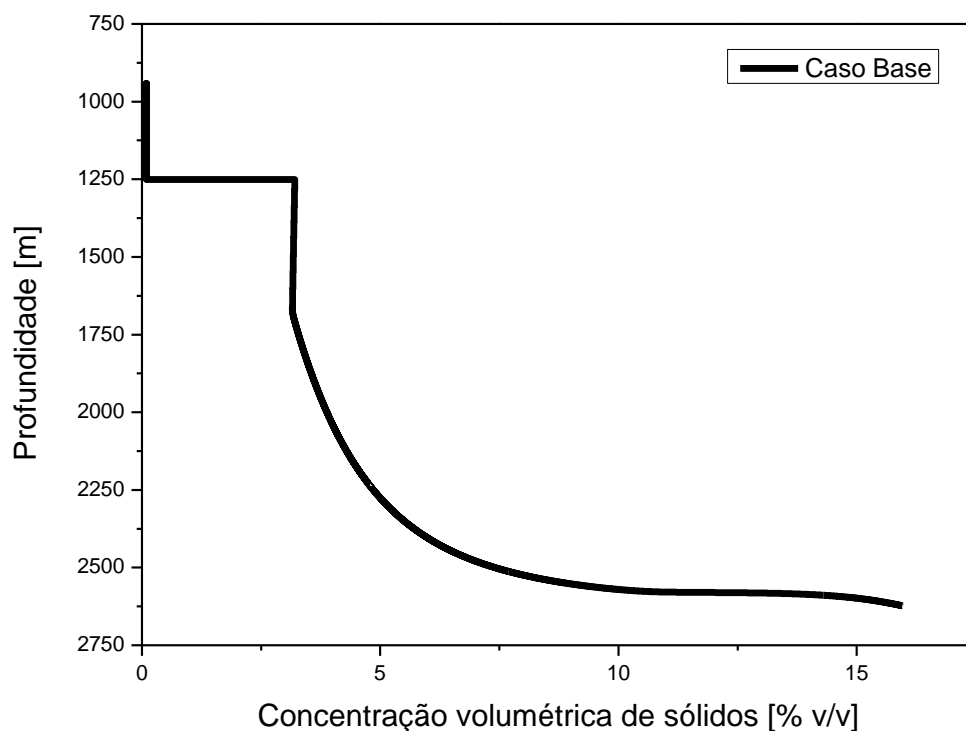


Figura 85. Resultado para simulação de fluido base água em 5 anos (caso base descrito na tabela 8).



#### 4.5.3. Teste de Sensibilidade aos Parâmetros $M$ , $n$ , $\Delta H$ e $dp$

Nesse tópico, foi avaliada a sensibilidade do simulador SimSag aos parâmetros índice de comportamento (" $M$ "), índice de consistência (" $n$ "), energia de escoamento (" $\Delta H$ ") e diâmetro de partícula (" $dp$ "). Para isso, utilizou-se o caso base com dados de poços reais, descrito na tabela 8.

Esse tópico destina-se a avaliar quatro dados de entrada e mapear algumas limitações de em seus valores. Para isso, avaliou-se a sensibilidade do simulador. Todas as simulações apresentadas para a investigação dessas variáveis são referentes a 5 anos. Índice de consistência (" $n$ ") maiores do que 0,6; energia de escoamento (" $\Delta H$ ") maiores do que 10000 J/mol e diâmetro de partícula (" $dp$ ") maiores do que 75  $\mu\text{m}$  atrasaram a execução, podendo em alguns casos travar e fechar o programa. Dos quatro avaliados, apenas índice de comportamento (" $M$ ") não interferiu no tempo de execução.

Em alguns casos, pode ser útil diminuir o passo de integração no tempo. Por exemplo, a simulação de " $n=0,6$ " só foi possível mediante redução para  $10^{-5}$  s. No entanto, isso aumenta consideravelmente o custo computacional e o tempo de execução do programa. O caso exemplificado requiriu quase 24h. Ainda assim, a redução do passo de integração não é garantia de que o programa executará corretamente até o final do tempo solicitado. Isso é relevante, pois indica que é preciso investigar o passo-a-passo do cálculo realizado entre os módulos a fim de otimizar a rotina de cálculo e investigar eventuais erros numéricos.

Quanto ao tempo computacional, entende-se que 24 horas é um tempo computacional relativamente pequeno considerando a importância da informação fornecida pelo simulador e o tempo simulado (24 horas de simulação para ter informações de 5 anos). Além disso, esse tempo pode ser reduzido ao utilizar computadores mais modernos e potentes.

Índice de consistência (" $M$ ") pode ser compreendido como a resistência do fluido ao escoamento. Quanto maior for seu valor, mais difícil será seu escoamento. No caso da sedimentação, maior será a resistência ao deslocamento da partícula em direção ao fundo. Até " $M=0,9 \text{ Pa.s}^n$ ", há uma diferença significativa entre os resultados simulados; a partir desse valor, a diferença é praticamente insignificativa, tanto para a zona de clarificado como para a zona de transição e formação de sedimento. Isso é

demonstrado na tabela 52 e na Figura 86. Não foi observado grandes diferenças no tempo de execução do programa em função dessa variável. As simulações para o índice de consistência (“ $M$ ”) estão de acordo com o esperado, pois quanto maior o seu valor, menor será a zona de clarificado (pois o material teria maior resistência a sedimentar) e mais ao fundo estarão as zonas de transição e formação de sedimento.

Figura 86. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do índice de consistência (“ $M$ ”).

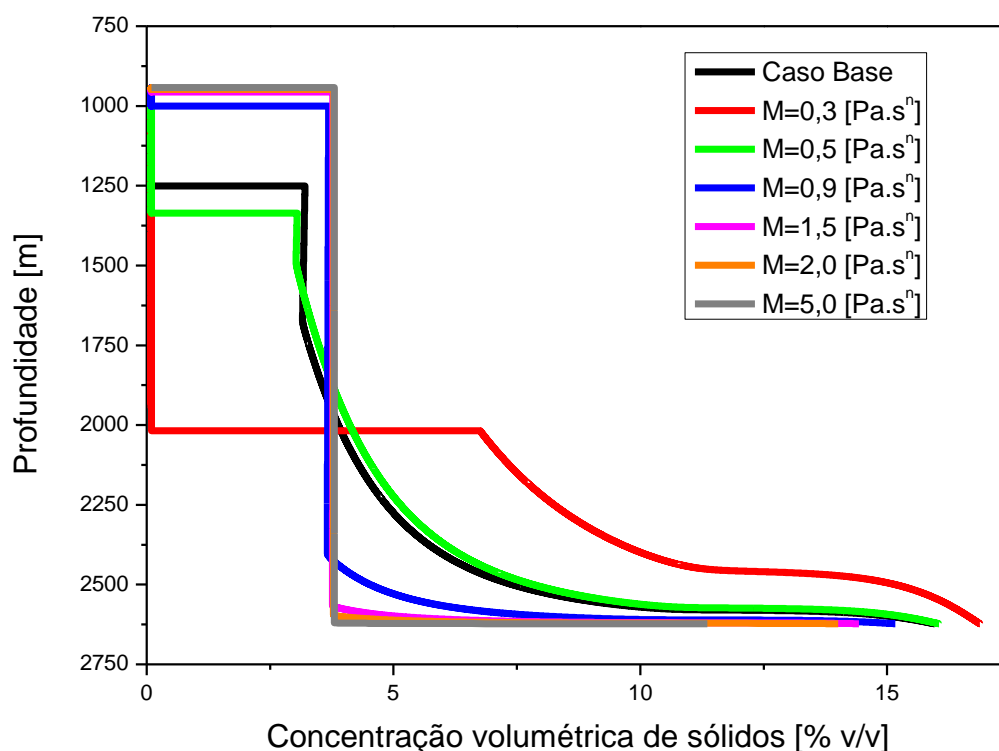


Tabela 52. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de consistência.

M [Pa.s <sup>n</sup> ]	Fim da Região de Clarificado [m]	Início da Região de Transição e Formação de Sedimento [m]
0,3	2017	2017
0,5	1335	1515
0,9	1000	2504
1,5	956	2564
2,0	948	2595
5,0	942	2619

Índice de comportamento (“ $n$ ”) indica fisicamente o afastamento do fluido em relação ao modelo Newtoniano. Quanto mais distante de 1, mais distante desse

comportamento o fluido estará. Essa variável mostrou ter uma influência relevante no resultado final da simulação, impactando todas as regiões do gráfico. Quanto menor for “ $n$ ”, menor será a região de clarificado, maior será a zona de sedimentação livre e mais profunda será o início da zona de transição e formação de sedimento. No entanto, ainda é preciso investigar os resultados para  $n=0,5$  e  $n=0,6$ , pois não foi observado a zona de sedimentação livre. Um outro ponto de alerta é que a concentração da zona de sedimentação livre é diferente da concentração inicial (3,8% v/v) para alguns casos. Isso é demonstrado na tabela 53 e na Figura 87. Quanto maior for o valor de “ $n$ ”, maior será o tempo de execução.

Figura 87. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do índice de comportamento (“ $n$ ”).

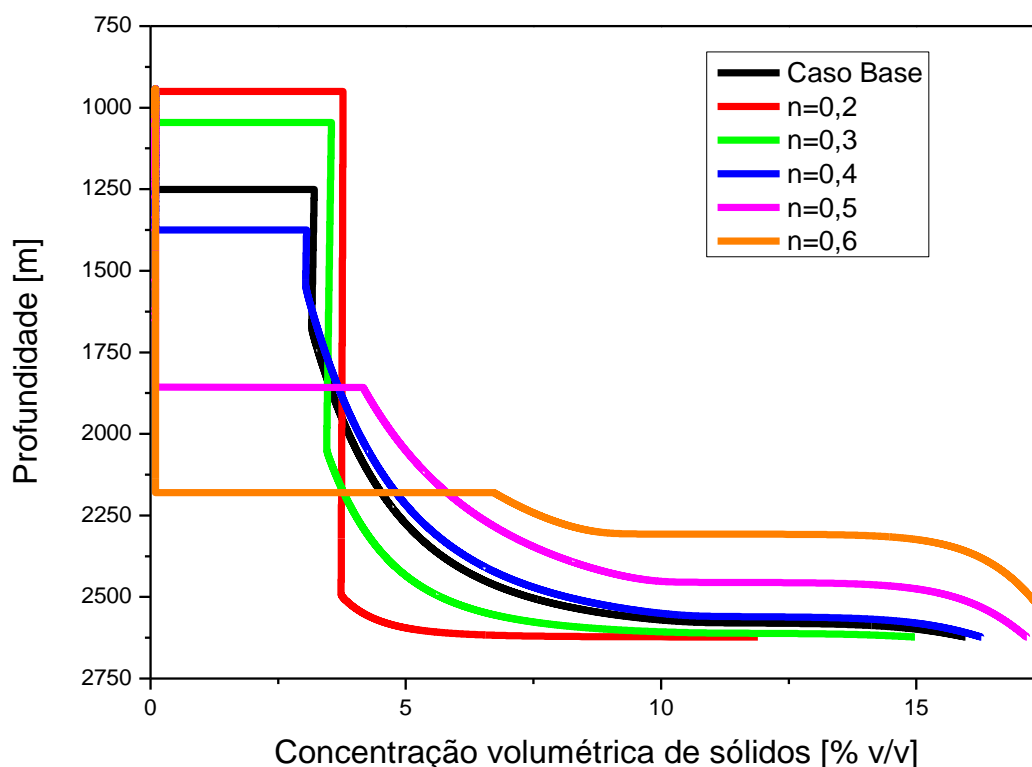


Tabela 53. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento.

$n$ [-]	Fim da Região de Clarificado [m]	Região de Transição e Formação de Sedimento [m]
0,2	949	2493
0,3	1045	2067
0,4	1374	1551
0,5	1857	1857
0,6	2179	2179

A energia de escoamento (" $\Delta H$ ") é um parâmetro que entrou na modelagem da reologia por meio da abordagem não isotérmica do tipo Arrhenius e mostrou-se como um dado de entrada muito relevante para a simulação. As estimações dos tópicos anteriores mostraram que pode assumir valores entre 10000 J/mol e 25000 J/mol.

Esse parâmetro possui ordem de grandeza maior do que os demais e um amplo intervalo de possíveis valores, conforme apresentado no tópico 4.4.

Além disso, a partir do valor de 6000 J/mol, já não é mais possível observar a zona de sedimentação livre. Quando observada, é obtido um valor diferente da concentração inicial de sólidos (3,8% v/v). Quanto maior for o valor de " $\Delta H$ ", maior será o tempo de execução. Futuras investigações sobre o comportamento dessa variável serão necessárias para elucidar alguns pontos. Isso é demonstrado na tabela 54 e na Figura 88.

Figura 88. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função da energia de escoamento (" $\Delta H$ ").

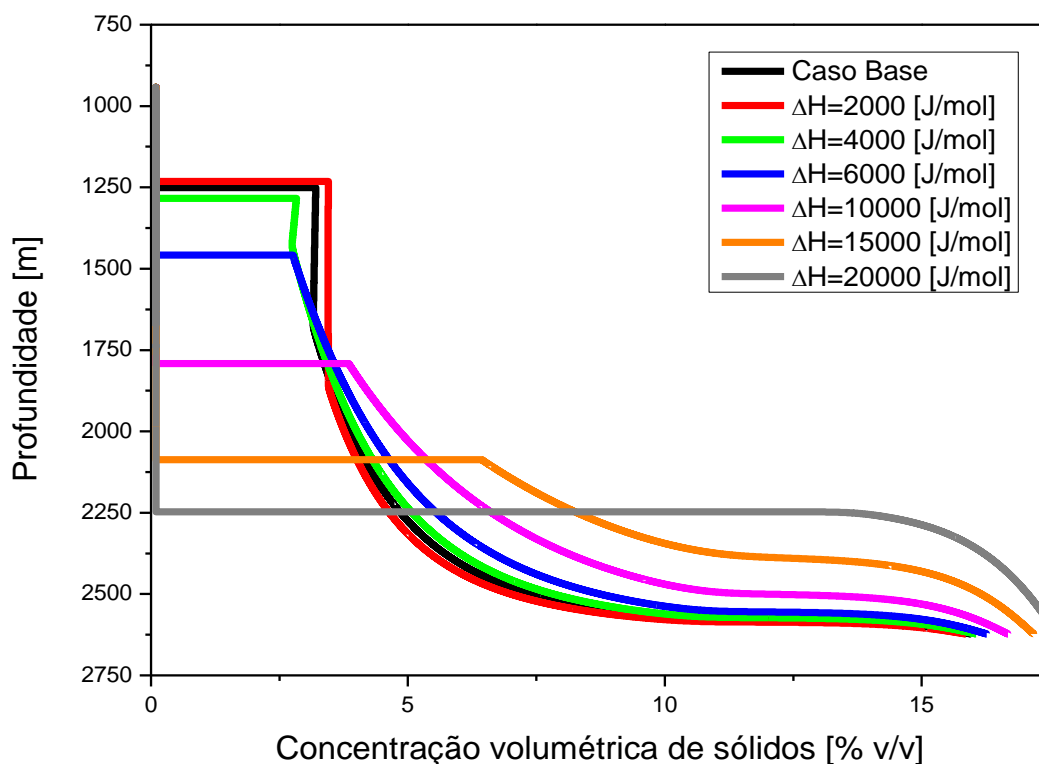


Tabela 54. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento.

$\Delta H$ [J/mol]	Fim da Região de Clarificado [m]	Região de Transição e Formação de Sedimento [m]
2000	1232	1861
4000	1283	1438
6000	1457	1457
10000	1791	1791
15000	2087	2087
20000	2246	2246

O diâmetro da partícula (“ $dp$ ”) é uma variável que impacta na dinâmica da sedimentação, pois quanto maior for, maior será a tendência da partícula sedimentar e aglomerar com outras, gerando novas partículas maiores.

Essa tendência foi observada na simulação. Quanto maior foi o diâmetro da partícula, maior foi a profundidade da zona de clarificado. Para valores maiores do que  $45\ \mu\text{m}$  (caso base), não foi observada a zona de sedimentação livre. Isso é demonstrado na tabela 55 e na Figura 89. Do ponto de vista computacional, quanto maior for o valor de “ $dp$ ”, maior será o tempo de execução.

Figura 89. Resultado para simulação de um fluido aquoso em 5 anos em função do diâmetro da partícula (“ $dp$ ”).

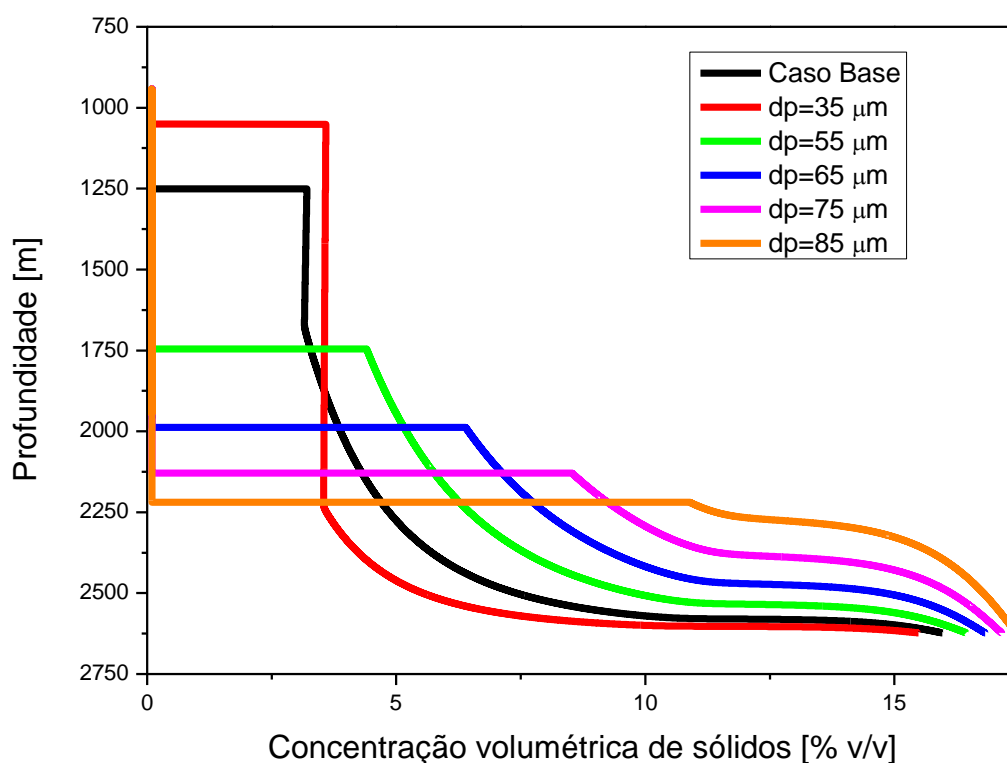


Tabela 55. Regiões de clarificado e transição para diferentes valores de índice de comportamento.

dp [ $\mu\text{m}$ ]	Fim da Região de Clarificado [m]	Início da Região de Transição e Formação de Sedimento [m]
35	1050	2230
45 (caso base)	1250	1689
55	1745	1745
65	1988	1988
75	2129	2129
85	2218	2218

#### 4.5.4. Efeito da reologia em fluidos com e sem adensantes na simulação

Um ponto relevante desse trabalho foi a comparação entre o comportamento e o efeito dos parâmetros reológicos dos fluidos de mesma base, com e sem adensante, em diferentes temperaturas e faixas de taxa de cisalhamento. As figuras 162 até 170 apresentam esse comparativo. O caso base para o fluido aquoso é diferente do fluido olefínico, conforme descrito no capítulo 3. Por isso, não é possível comparar fluidos de bases diferentes. Os casos bases são descritos nas tabelas 8 e 9. A faixa de temperatura simulada é 10°C (temperatura do topo) e 84°C (temperatura do fundo).

Para os fluidos base água, observou-se que os resultados para o intervalo entre 1 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup> e 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup> foram idênticos; só foi possível observar diferença entre os perfis de concentração ao comparar com o intervalo 0,0001 s<sup>-1</sup> até 100 s<sup>-1</sup>.

O fim da zona de clarificado ocorreu na mesma profundidade, independente da faixa de taxa de cisalhamento ou da presença do adensante. O início da zona de transição e formação de sedimento ocorreu praticamente na mesma profundidade para os intervalos 1 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup> e 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>; ao incluir baixas taxas (0,0001 s<sup>-1</sup> até 100 s<sup>-1</sup>), há uma diferença de 1067 metros para o fluido aquoso adensado e 212 metros para o fluido aquoso sem adensante. Essa diferença é muito relevante para o contexto de poços de perfuração.

Essa diferença significa que o modelo, ao usar parâmetros reológicos de baixas taxas de cisalhamento (0,0001 s<sup>-1</sup> até 100 s<sup>-1</sup>), estaria prevendo uma profundidade menor em relação aos casos até então obtidos, ou seja, superestimando a profundidade da zona de formação de sedimento.

No entanto, considerando uma região anular confinada e estática, exposta a baixas taxas de cisalhamento (o próprio material adensante seria o que provocaria o cisalhamento), era esperado que a profundidade não fosse tão baixa (ou pelo menos próxima dos demais casos).

Simulações adicionais para 10 e 15 anos, que não são apresentadas nesse trabalho, foram feitas e mostraram que entre  $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$  (faixa de operação do viscosímetro FANN 35 A), os resultados são semelhantes aos de 5 anos.

Diante do exposto, recomenda-se avaliar se esse comportamento se reproduz para outras formulações, a fim de validar e expandir o comportamento observado.

Ao comparar fluidos base óleo com e sem adensantes, foi possível notar clara diferença entre os resultados simulados. Isso já eram esperados por conta dos parâmetros obtidos no tópico 4.4.

Parte dessa diferença deve-se à combinação dos parâmetros índice de consistência (" $M$ ") e índice de comportamento (" $n$ ") estimados. De fato, mostra-se inviável a comparação entre os fluidos olefínicos com e sem adensantes.

Isso é relevante, pois, obter dados reológicos para taxas de cisalhamento inferiores à  $1 \text{ s}^{-1}$  pode ser tarefa difícil. Além disso, requer aparatos experimentais mais robustos e caros. Nesse sentido, é preciso avaliar se realmente há a necessidade de trabalhar em determinada faixa de taxa de cisalhamento.

Por fim, faz-se ainda necessária uma investigação a respeito da resposta da mudança da região de sedimentação livre e a de transição e formação de sedimento, a fim de justificar a descontinuidade observada. A profundidade na qual foi considerada que já houve formação de sedimento foi justamente onde ocorre essa descontinuidade.

Tabela 56. Parâmetros estimados para diferentes fluidos com e sem adensantes e em diferentes faixas de taxa de cisalhamento.

Fluido	Parâmetro	Valor Estimado		
		$1 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$	$0,01 \text{ s}^{-1}$ até $1000 \text{ s}^{-1}$	$0,0001 \text{ s}^{-1}$ até $100 \text{ s}^{-1}$
Água Adensado	$M [\text{Pa.s}^n]$	5,16	5,86	1,90
	$n [-]$	0,35	0,33	0,40
	$\Delta H [\text{J/mol}]$	-9742,49	-9833,65	-23246,00



Água Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	5,64	6,52	2,90
	n [-]	0,34	0,32	0,40
	ΔH [J/mol]	-9914,64	-9613,37	-19548,70
Óleo Adensado	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	3,20	3,60	2,10
	n [-]	0,50	0,50	0,30
	ΔH [J/mol]	-14921,90	-14909,30	-16930,20
Óleo Sem Adensante	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	1,30	1,30	1,70
	n [-]	0,60	0,60	0,30
	ΔH [J/mol]	-15933,40	-15991,50	-21063,10

Tabela 57. Regiões de clarificado e transição para parâmetros estimados pelo modelo Lei de Potência com Arrhenius.

Fluido	Faixa de taxa de cisalhamento	Fim da Região de Clarificado [m]	Início da Região de Transição e Formação de Sedimento [m]
Base Água Adensado	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	942	2619
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	942	2621
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	946	2257
Base Água Sem Adensante	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	942	2620
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	942	2621
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	943	2497
Base Óleo Adensado	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1054	2353
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1053	2352
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	1052	2590
Base Óleo Sem Adensante	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1079	2452
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1079	2452
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	1052	2628

Figura 90. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento  $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

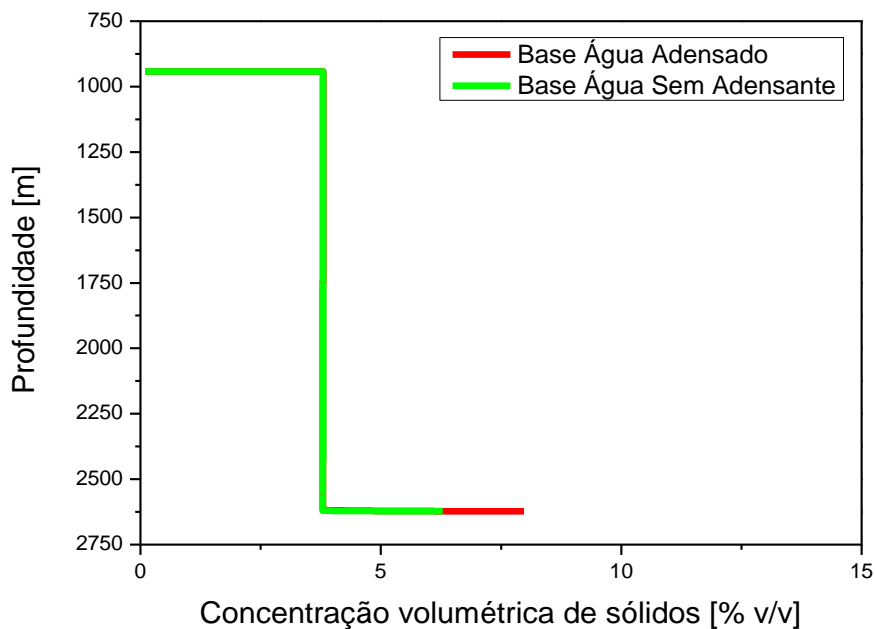


Figura 91. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

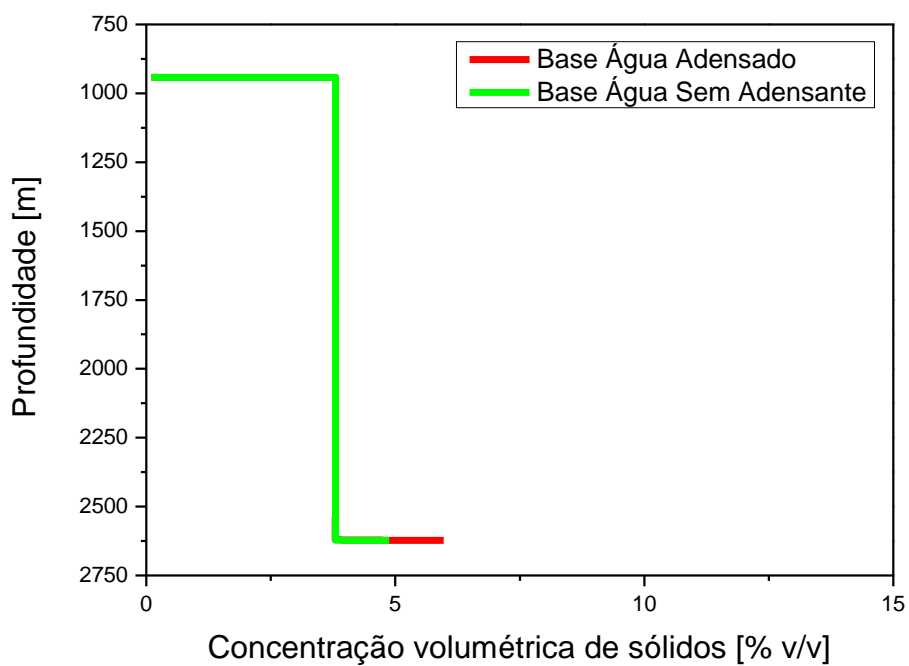


Figura 92. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos aquosos para faixa de taxa de cisalhamento  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ .

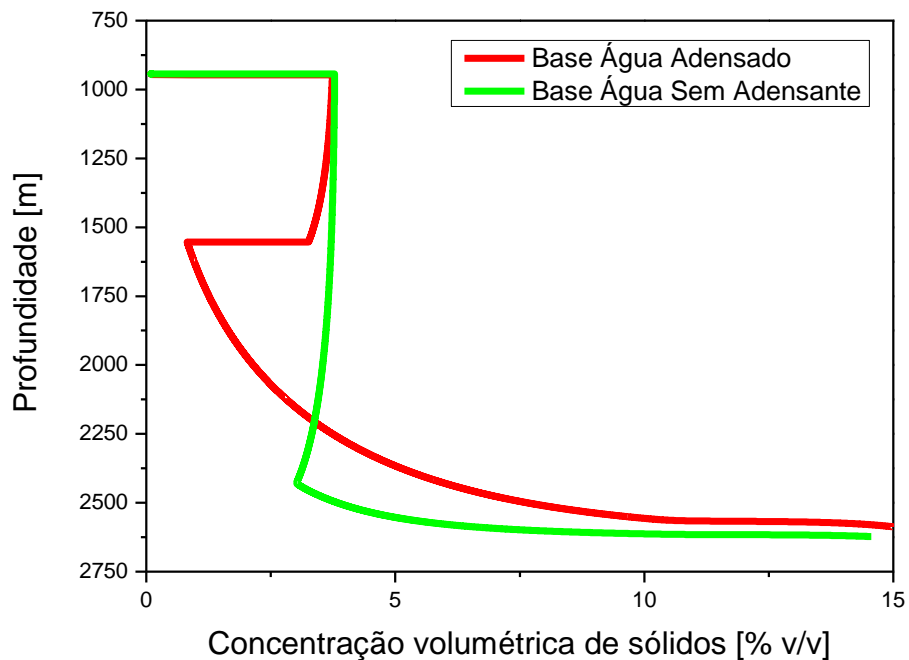


Figura 93. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento  $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

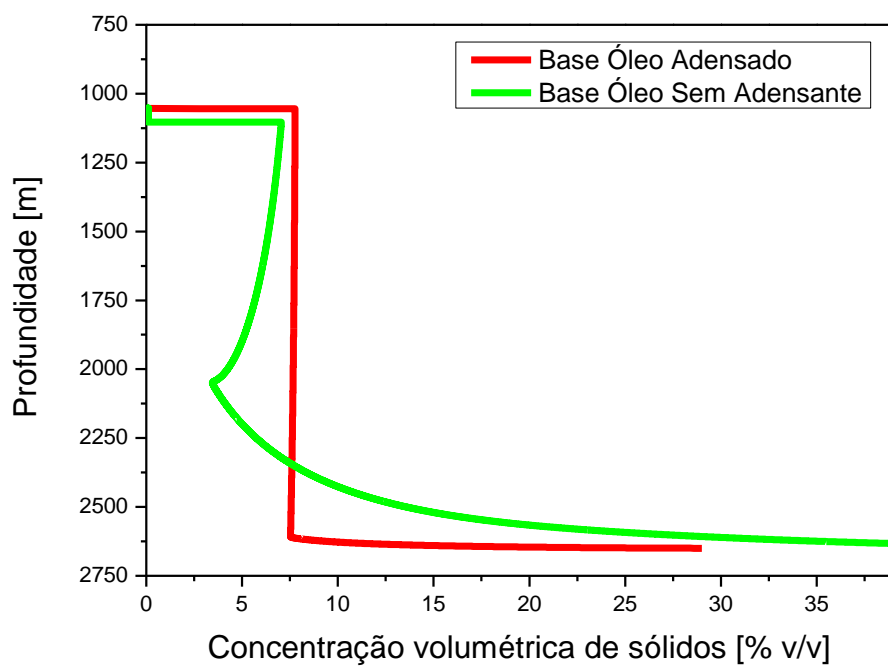


Figura 94. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

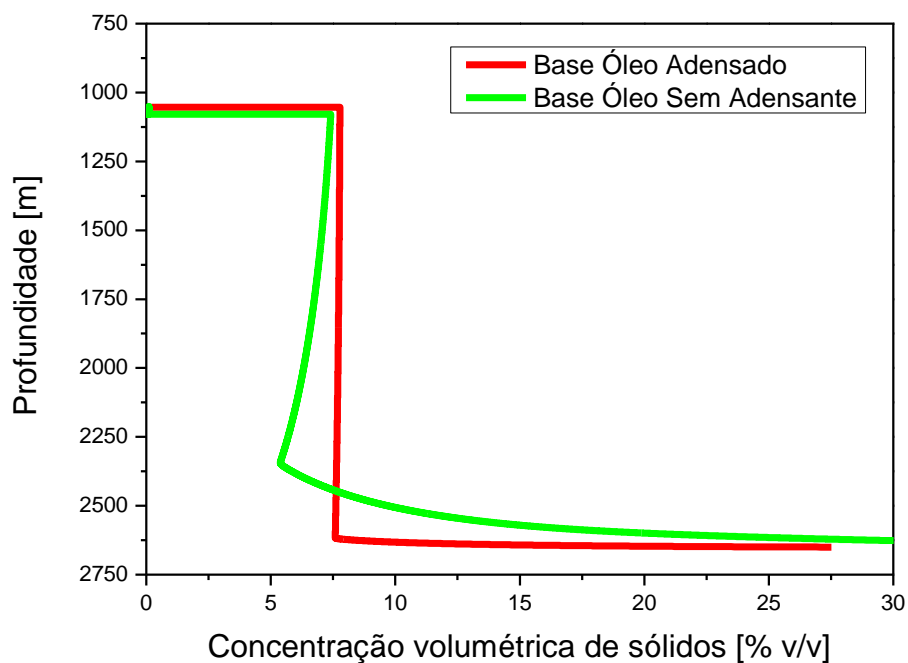


Figura 95. Resultado para simulação de 5 anos do efeito do adensante em fluidos olefínicos para faixa de taxa de cisalhamento  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ .

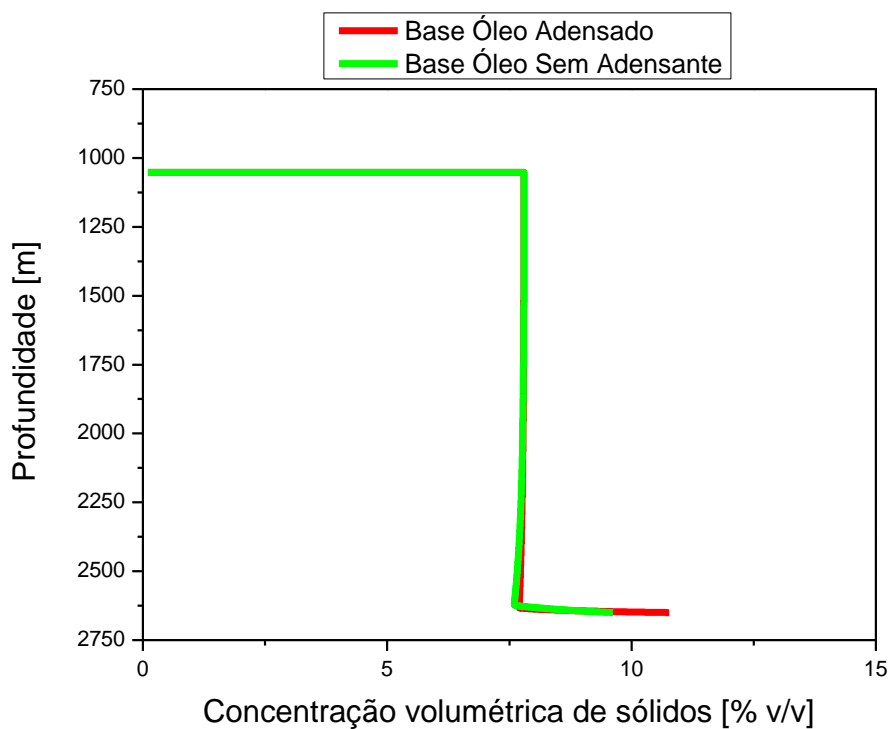


Figura 96. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido base água adensado.

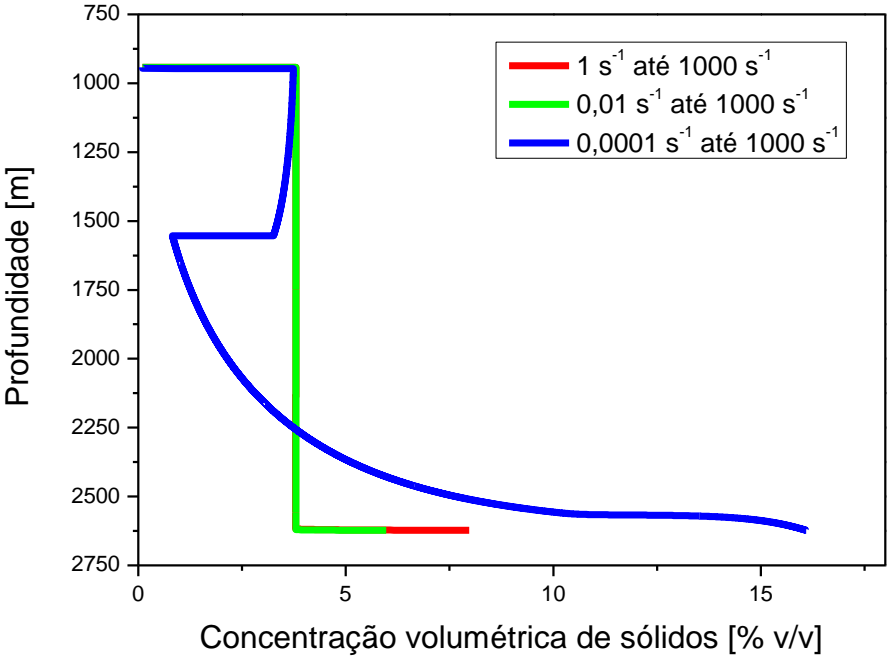


Figura 97. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido aquoso sem adensante.

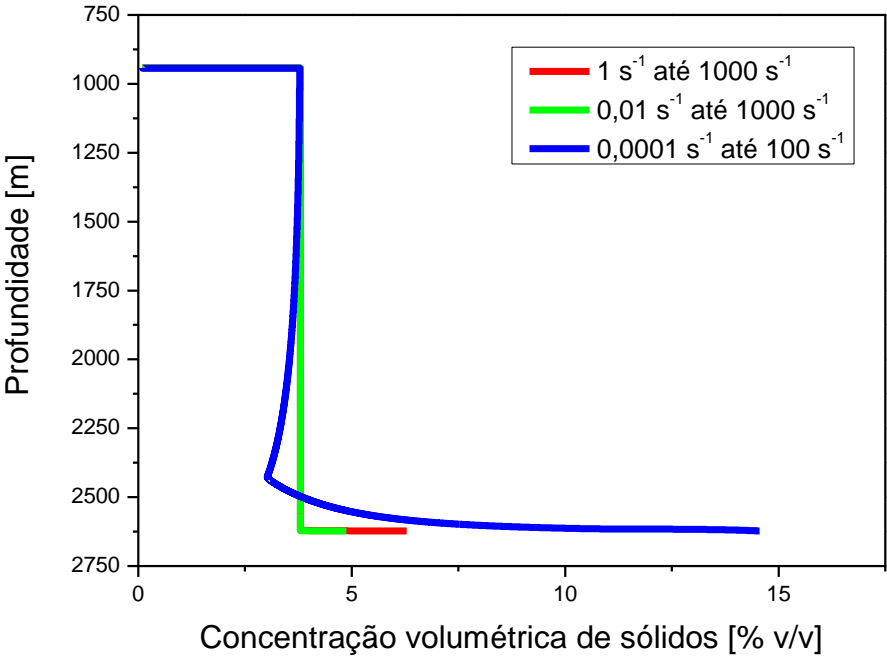


Figura 98. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido olefínico adensado.

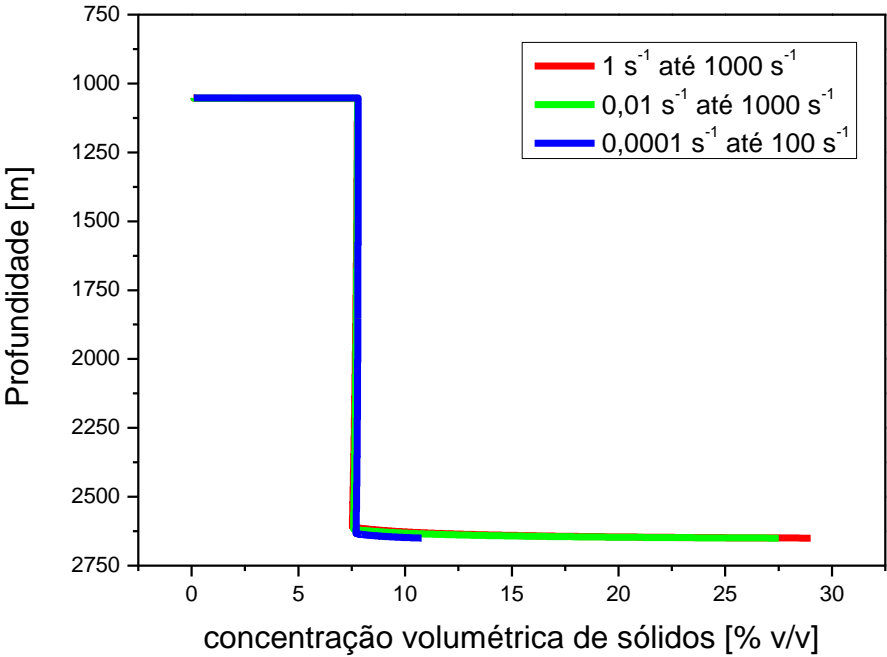
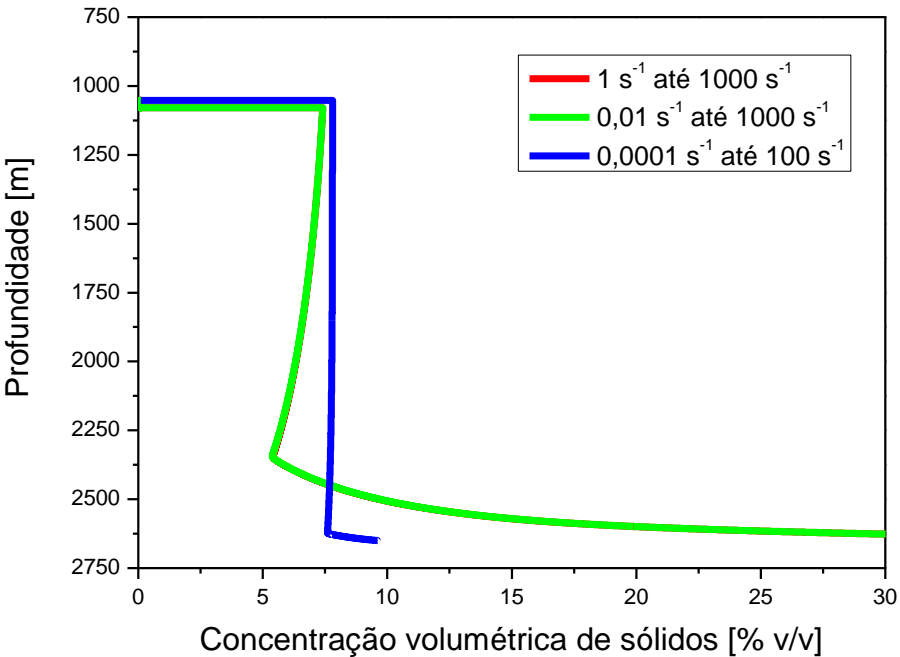


Figura 99. Resultado para simulação de 5 anos do efeito da faixa da taxa de cisalhamento para um fluido olefínico sem adensante.



#### 4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse tópico tem por finalidade apresentar algumas dificuldades encontradas durante essa pesquisa, a fim de que os trabalhos futuros tenham um ponto de partida e relatos de experiências anteriores. A ciência também é feita de erros e seu desenvolvimento passa por aprender com isso e encontrar novas soluções.

Estabelecer um protocolo de análise e repeti-lo é fundamental quando se trabalha com fluidos dessa natureza. Qualquer alteração pode produzir resultados experimentais completamente diferentes e confundir o analista. Além disso, é interessante avaliar a estabilidade e o comportamento do fluido ao longo do tempo (dias ou semanas) na condição operacional estabelecida como protocolar.

Outro ponto interessante é que esse tipo de fluido demanda um tempo de estabilização antes da leitura. Caso contrário, o dado tomado pelo equipamento após um período de tempo pré-programado qualquer, que geralmente é após alguns segundos, pode não estar correta.

Além disso, foram encontradas algumas dificuldades operacionais durante a execução deste trabalho, como a evaporação do solvente do fluido de perfuração para temperaturas acima de 45°C e a separação de fases do fluido base óleo para temperaturas acima de 65°C. Isso descaracteriza o fluido e invalida os resultados.

Tentou-se também utilizar outras geometrias. Para experimentos com placas paralelas lisas e jateadas foi observado que a amostra foi expulsa (ejetada) da geometria para taxas de cisalhamentos inferiores a 10 s<sup>-1</sup>. Isso acontece porque o fluido não conseguiu aderir às paredes e não é viscoso o suficiente para resistir à força centrífuga para permanecer na geometria. Quando isso acontece, a leitura fornecida pelo equipamento pode não ser fidedigna. Para placas paralelas ranhuradas, não foi observada a expulsão da amostra para valores até 100 s<sup>-1</sup>.

Por fim, é relevante comentar sobre a função objetivo utilizada nesse trabalho. Inicialmente, tinha-se a intenção de usar o *software* ESTIMA, que trabalha com a função de mínimos quadrados ponderados, enxame de partículas e máxima verossimilhança, assim como os trabalhos antecessores. No entanto, resultados “incomuns” para ajustes e previsão do modelo foram obtidos, principalmente para baixas taxas de cisalhamento. Quando isso ocorre, é possível abordar o problema de

duas formas: troca-se o modelo ou troca-se a função objetivo. Optou-se por trocar a função objetivo e manter o modelo.

Uma das possíveis justificativas para os resultados “incomuns” no ESTIMA é que foram obtidos baixos desvios experimentais por conta da precisão do reômetro e da execução da técnica. A função objetivo de mínimos quadrados ponderados depende da variância no denominador. Ao ter um valor muito pequeno de desvio, o valor da função objetivo tendeu ao infinito.

Uma outra hipótese que pode justificar esse problema é que de fato os modelos propostos não são os mais adequados para descrever esse conjunto de dados experimentais. Mesmo após adotar outra métrica e os dados preditos representarem o conjunto experimental da forma esperada, a qualidade do ajuste permaneceu duvidosa, conforme demonstrado pelo teste F, desvio relativo e erro percentual.

Isso tudo não descarta a hipótese de limitações da função objetivo utilizada e da técnica numérica empregada para obter os parâmetros. Novas investigações são necessárias, principalmente a respeito dos modelos reológicos. Por isso, o conjunto de dados experimentais encontra-se disponível nos apêndices A e B.



## 5 CONCLUSÃO

**Resumo:** Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o estudo da abordagem não isotérmica da sedimentação de adensantes em fluidos de perfuração. Além disso, foram propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

O comportamento reológico dos quatro fluidos de perfuração estudados está de acordo com o descrito na literatura: fluidos não newtonianos, com comportamento semelhante ao pseudoplástico e com viscosidade inversamente proporcional à temperatura. Além disso, foi observado que os fluidos são tixotrópicos.

Para avaliar taxas de cisalhamento inferiores a  $1 \text{ s}^{-1}$ , foi necessário sair do viscosímetro FANN 35 A e usar um reômetro Anton Paar MCR 302. Com geometrias de placas paralelas e cilindros concêntricos, foi possível chegar até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ . No entanto, por conta das características dos fluidos, não foi possível sobrepor as curvas obtidas em diferentes geometrias.

O comportamento reológico dos fluidos base água com e sem adensantes mostrou-se semelhante para as faixas de  $1 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$  e  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ ; os resultados simulados para essas faixas também foram semelhantes. Mas para faixas menores de taxas de cisalhamento ( $0,0001 \text{ s}^{-1}$  até  $100 \text{ s}^{-1}$ ), é possível notar diferença significativa nos parâmetros e nos resultados simulados.

Por outro lado, o comportamento reológico dos fluidos base óleo com e sem adensantes mostrou-se significativamente diferente, de tal forma que não se recomenda a comparação entre eles. Embora algumas simulações fornecessem resultados semelhantes, o comportamento reológico, os parâmetros estimados e o próprio comportamento da amostra em si apresentaram-se distintos.

Nesse contexto, recomenda-se a avaliação da necessidade de uma abordagem de baixas taxas de cisalhamento e a avaliação de outras correlações entre reologia, temperatura e taxa de cisalhamento a fim de validar as observações feitas.

Utilizou-se a função objetivo de mínimos quadrados por conta do baixo desvio experimental obtido. Ao utilizar a função de mínimos quadrados ponderados, o valor da função objetivo tendeu ao infinito. Isso não anula a hipótese de os modelos propostos não serem os mais adequados para descrever esse conjunto de dados

experimentais e nem a hipótese de limitações da função objetivo utilizada e da técnica numérica empregada para obter os parâmetros

A partir dos resultados de predição, foi possível concluir que os modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley ajustam bem os dados experimentais dentro do intervalo de taxas de cisalhamento entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ . No entanto, seus parâmetros estão compreendidos dentro do mesmo intervalo de confiança, o que permite concluir que a temperatura não é uma variável estatisticamente significativa para experimentos dentro dessa faixa de taxa de cisalhamento. De fato, isso corrobora um comportamento já observado anteriormente com o viscosímetro FANN 35 A.

A temperatura torna-se fator relevante para baixas taxas de cisalhamento. Ao fazer a estimação com dados entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  e  $100 \text{ s}^{-1}$  já é possível observar que o índice de comportamento é estatisticamente distinto em função da temperatura. Resultados semelhantes são obtidos para a tensão limite de escoamento e para o índice de comportamento (que oscilou nas casas decimais).

Ao realizar a abordagem não-isotérmica, notou-se que Lei de Potência com Arrhenius reparametrizado forneceu o melhor ajuste em comparação com os demais. O modelo Herschel-Bulkley com Arrhenius reparametrizado produziu erros percentuais elevados e, em alguns momentos, superiores a 100%, principalmente para baixas taxas de cisalhamento. Para a abordagem com WLF, obteve-se parâmetros sem significado físico.

Optou-se por implementar o modelo do tipo Lei de Potência com Arrhenius para atualização do simulador SimSag, pois foi o que melhor conseguiu conciliar ajuste dos dados experimentais e custos computacionais. Obteve-se parâmetros com grandes intervalos de confiança para altas taxas de cisalhamento e erros percentuais superiores a 10% para baixas taxas de cisalhamento.

Por fim, é importante fazer a ressalva de que todos os resultados aqui apresentados e discutidos foram obtidos para uma determinada formulação e uma determinada condição experimental. Para outras formulações e condições experimentais, é possível que se obtenha resultados diversos. Há descrito na literatura, trabalhos nos quais não foi detectada tixotropia, foi detectada tensão limite de escoamento ou fez-se uso de outro aparato experimental, obtendo-se outros resultados.

Tabela 58. Resumo dos parâmetros estimados para Lei de Potência com Arrhenius reparametrizado e da simulação.

Fluido	Faixa de taxa de cisalhamento	M [Pa.s <sup>n</sup> ]	n [-]	$\Delta H$ [J/mol]	Região de Formação de Sedimento [m]	Temperatura é estatisticamente significativa?
Base Água Adensado	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	5,16	0,35	-9742,49	2619	Não
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	5,86	0,33	-9833,65	2621	Sim
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	1,90	0,40	-23246,00	2257	Sim
Base Água Sem Adensante	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	5,64	0,34	-9914,64	2620	Não
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	6,52	0,32	-9613,37	2621	Sim
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	2,90	0,40	-19548,70	2497	Sim
Base Óleo Adensado	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	3,20	0,50	-14921,90	2353	Não
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	3,60	0,50	-14909,30	2352	Sim
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	2,10	0,30	-16930,20	2590	Sim
Base Óleo Sem Adensante	1 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1,30	0,60	-15933,40	2452	Não
	0,01 s <sup>-1</sup> até 1000 s <sup>-1</sup>	1,30	0,60	-15991,50	2452	Sim
	0,0001 s <sup>-1</sup> até 100 s <sup>-1</sup>	1,70	0,30	-21063,10	2628	Sim

## 5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a caracterização mais completa dos fluidos de perfuração, com testes oscilatórios e rotacionais, conforme apresentado na tabela 2.

Avaliar o comportamento reológico dos fluidos em diferentes tempos (dias ou semanas) de análise podem fornecer dados relevantes para a discussão de resultados. Alguns trabalhos da literatura indicam que os módulos elástico e viscoso sofrem alterações em função do tempo e da temperatura, ou seja, há a formação ou destruição de microestrutura em função dessas variáveis.

Além disso, alguns desses testes podem ser longos; nesse caso, recomenda-se avaliar a estabilidade e o comportamento do fluido ao longo do tempo de análise.

Alguns trabalhos relatam que a temperatura pode ativar alguns aditivos ou compostos químicos presentes na formulação, o que pode alterar o comportamento do módulo elástico, viscoso ou da curva de escoamento do fluido em uma determinada temperatura após certo período de tempo. Um ensaio de varredura de tempo poderia fornecer esses resultados.

- Avaliar os efeitos da temperatura em outras propriedades para além da reologia.

A hipótese proposta foi que o efeito da temperatura seria computado apenas na reologia. Mas é provável que a temperatura influencie outras propriedades e permita que outros fenômenos que impactam a sedimentação ocorram, como a convecção. Nesse contexto, recomenda-se que seja investigado o efeito da temperatura em outras propriedades.

- Permitir outros perfis de temperatura no simulador.

O perfil de temperatura linear para um poço de petróleo é uma aproximação para quando não se tem dados mais precisos. Então seria interessante permitir que o usuário tenha a possibilidade de introduzir um perfil de temperatura baseado em dados de campo, como dados geotérmicos, de tal forma que a temperatura em cada volume de controle possa ser obtida como função de interpolação de um par ordenado profundidade e temperatura. Isso aproximaria o simulador de um caso real, pois é comum que os poços atravessem diferentes camadas, que por sua vez possuem diferentes temperaturas, não necessariamente lineares.

- Estudar e comparar diferentes formulações.

Durante a revisão de literatura, observou-se que os resultados experimentais variam consideravelmente em função da formulação adotada. A presença ou ausência de determinado componente, bem como a sua concentração, podem influenciar no comportamento reológico do fluido. Além disso, seria possível aumentar o banco de dados dos fluidos de perfuração do simulador.

- Desenvolvimento de aparato experimental para aplicação de um perfil de temperatura e monitoramento da frente de sedimentação.

Um dos objetivos dos modelos matemáticos é descrever dados experimentais; quando necessário, faz-se uso de técnicas numéricas. No entanto, modelos matemáticos e soluções numéricas por si só não possuem significado físico. Por isso,

há uma necessidade de se obter dados experimentais confiáveis para que os modelos e suas soluções sejam validados.

Realizar experimentos nas mesmas condições operacionais de um poço de petróleo é fisicamente inviável. Mas ainda assim, deve-se buscar formas de melhor representar tal condição, como aplicar um gradiente de temperatura em uma pequena coluna acrílico ou vidro para acompanhar a sedimentação e verificar se há convecção. Além disso, é fundamental desenvolver técnicas de monitoramento da frente de sedimentação que possam ser aplicadas de diferentes formas e economicamente viáveis. Monitoramento com eletrodos (condutivímetros), por exemplo, possui limitações quando operando com formulações com altas concentrações de sais.

- Estudar outros modelos reológicos não isotérmicos e rever algumas hipóteses consideradas na construção do modelo matemático:

Uma das conclusões desse trabalho é a dificuldade em representar os dados experimentais de reologia obtidos em diferentes temperaturas à baixas taxas de cisalhamento usando os modelos Lei de Potência e Herschel-Bulkley. Por isso, sugere-se que outros modelos reológicos sejam avaliados.

Uma outra possibilidade pode ser uma abordagem com dois modelos: um para baixas taxas (algo entre  $0,0001 \text{ s}^{-1}$  e  $1 \text{ s}^{-1}$ ) e outro para altas taxas (algo entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

Além disso, recomenda-se que as hipóteses que norteiam a construção do modelo da sedimentação sejam revistas a fim de propor aprimorações.

Uma das hipóteses desse modelo é assumir que os efeitos convectivos sejam desprezados. Considerando os gradientes de temperatura e as demais condições operacionais, é muito provável que fenômenos oriundos da convecção possam promover a ressuspensão de sólidos.

Por fim, novas hipóteses podem ser formuladas a fim de abordar tópicos até então não explorados ou negligenciados, como razão água/óleo, o tamanho e forma da partícula. É sabido que isso influencia na dinâmica da sedimentação, mas tal efeito não foi quantificado para avaliar o seu impacto no resultado final. Se for relevante, novos módulos podem ser propostos e incorporados ao simulador.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJEI, S.; ELKAKTATNY, S.; SAKAMA-NEUYMAN, Y. A.; SARKODIE, K. **Evaluation and Remediation Techniques for Barite Sagging: A Review**. Geoenergy Science and Engineering, 2023.

ALLEN, E.; UHLHERR, P. H. T. **Nonhomogeneous Sedimentation in Viscoelastic Fluids**. Journal of Rheology, p. 627-638, 1989.

ÁLVAREZ, E.; CANCELA, M. A.; MACEIRAS, R. **Effect of Temperature on Rheological Properties of Different Jams**, International Journal of Food Properties. International Journal of Food Properties, p 135-146, 2006.

ANAWA, P. A. L.; Folayan, J. A. **Data Analyses On Temperature-Dependent Behaviour Of Water Based Drilling Fluid Rheological Models**. Data in Brief, p. 289 – 298, 2018.

ANDRADE, G. M. P. **Avaliação de incertezas na modelagem de sedimentação de sólidos adensantes via técnicas de Monte Carlo e abordagem Bayesiana**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2018.

ANSARI, M.; TURNEY, D. E.; MORRIS, J.; BANERJEE, S. **Investigation of Rheology and a Link to Microstructure of Oil-Based Drilling Fluids**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021.

ANTON PAAR. **Acessório Para MCR: Geometrias do Reômetro**. Disponível em: <<https://www.anton-paar.com/br-pt/produtos/detalhes/sistemas-de-medicao-reologica/>>. Acesso em 18/01/2023.

AROUCA, F. O. **Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batela**. Universidade Federal de Uberlândia, Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, MG, 2007.

BERN, P. A.; OORT, E. V.; NEUSTADT, B.; EBELTOFT, H.; ZURDO, C.; ZAMORA, M.; SLATER, K. S. **Barite Sag: Measurement, Modeling and Management**. SPE Drill. & Completion, vol. 15, 2000.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. Editora LTC, 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2004, 856 p.

BOBROFF, S.; PHILLIPS, R. J. **Nuclear magnetic resonance imaging investigation of sedimentation of concentrated suspensions in non-Newtonian fluids**. Journal of Rheology, vol. 42, 1998

BORGES, R. F. O. **Análise e Estimação das Propriedades de Tortas de Filtração de Fluidos de Perfuração Não-Newtonianos**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2019.

BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M.; PASSOS, C. N.; LAGE, D. F. S.; ABADIE, E.; CORDEIRO, F. G.; KRAHL, I. M.; FARAH, M. A.; CAMARGO, P. R. C.; PINTO, R. R. C. **Processamento de Petróleo e Gás**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011, 266 p.

BÜRGER, R.; CONCHA, F. TILLER, F. M. **Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes**. Chemical Engineering Journal, vol. 80, p 105–117, 2000.

BÜRGER, R.; CONCHA, F. TILLER, F. M. **Mathematical model and numerical simulation of the settling of flocculated suspensions**. International Journal of Multiphase Flow, vol. 24, p 1005-1023, 1998.

BUSCALL, R.; GOODWIN, J. W.; OTTEWILL, R. H.; TADROS Th. F. **The Settling of Particles through Newtonian and Non-Newtonian Media**. Journal of Colloid and Interface Science, vol. 85, p 78-86, 1982.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. C.; GEORGE, R. G. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. 6<sup>o</sup> Edition. Texas: Gulf Professional Publishing, 2011, 720 p.

CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M.; MELEIRO, L. A. C.; RIBEIRO JÚNIOR, J. M.; SEUFITELLI, G. V. S.; PELIANO, S. V.; SANTOS, H. F. L.; SOUZA, E. A.; MONTEIRO, V.; MARTINS, A. L. **Barite Sag and Its Impact On Annular Pressure Build Up Mitigation In Producing Offshore Wells**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dubai, UAE, 2016.

CALLISTER, W.D. JR.; RETHWISCH, D.G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. Editora LTC, 2012.

CARMAN, P. C. Fluid Flow Through Granular Beds. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, London, v. 15, 1937.

CAYEUX, E. Time, **Pressure and Temperature Dependent Rheological Properties of Drilling Fluids and Their Automatic Measurements**. IADC, SPE International Drilling Conference and Exhibition, 2020.

CHAKRAVARTI, A.; DELL, C. C. **The Behaviour of Highly Flocculated Suspensions in Batch Tests**. Power Technology, vol. 3, p 287-295, 1969/70.

CHENG, H.; WU, S.; LI, H.; ZHANG, X. **Influence Of Time And Temperature On Rheology And Flow Performance Of Cemented Paste Backfill**. Construction and Building Materials, 2020.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. O. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**. Editora Butterworth-Heinemann, 2<sup>o</sup> Edição, Oxford, UK, 2008, 536 p.

CHIEN, S.-F. **Settling Velocity of Irregularly Shaped Particles**. SPE Drilling & Completion, p. 281-289, 1994.



CHIPALAVELA, A. F. **Análise e Discussão das Operações de Perfuração e Completação em Poços Petrolíferos.** Instituto Superior Técnico Lisboa, 2013.

COE, H. S.; CLEVENGER, G. H. **Methods for Determining the Capacities os Slime-Settling Tanks.** American Institute of Mining Engineers, vol. 55, p 356-384, 1917.

COMINGS, E. W. **Thickening of Calcium Carbonate Slurries.** Industrial and Engineering Chemistry, vol 32, p 663-667, 1940.

CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. **A Modification of the Kynch Theory of Sedimentation.** AIChE Journal, vol. 33, p 312-315, 1987.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Tecnologia Química.** Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª edição, vol. 3, 1979.

DAMASCENO, J. J. R. **Uma contribuição ao Estudo do Espessamento Contínuo.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1992.

DAUGAN, S.; TALINI, L.; HERZHAFT, B.; ALLAIN, C. **Aggregation of particles settling in shear-thinning fluids: Part 1. Two-particle aggregation.** The European Physical Journal E, vol.7, p 73-81, 2002.

DAUGAN, S.; TALINI, L.; HERZHAFT, B.; ALLAIN, C. **Aggregation of particles settling in shear-thinning fluids: Part 2. Three-particle aggregation.** The European Physical Journal E, vol.9, p 55-62, 2002

D'ÁVILA, J. S. **Um Modelo Matemático para Sedimentação.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1978.

DIXON, D. C. **Momentum-Balance Aspects of Free-Settling Theory. I. Batch Thickening.** Journal Separation Science, vol. 12, p 171-191, 1977.

ELLER, F. M. **Estudo da Sedimentação de Barita em Fluidos de Perfuração**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2012.

FAGUNDES, F. M. **Estudo da Estabilidade da Suspensão Constituinte do Fluido Br-Mul/Petrobras**. Universidade Federal de Uberlândia, Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, MG, 2019.

FENG, Z. G.; MICHAELIDES, E. E. **Heat Transfer in Particulate Flows with Direct Numerical Simulation (DNS)**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 52, n. 3–4, p. 777–786, 2009.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3 ed. New York: John-Wiley & Sons Inc. 1980.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3<sup>a</sup>. ed. Berlin: Springer, 2002.

FITCH, B. **Kynch Theory and Compression Zones**. AIChE Journal, vol. 29, p 940-947, 1983.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Editora LTC, 8<sup>o</sup> Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2014, 884 p.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G.; BISCAIA JÚNIOR, E. C. **Study on batch sedimentation simulation — establishment of constitutive equations**. Powder Technology, vol. 101, p 157–164, 1999.

G1. **Opep prevê crescimento da demanda mundial de petróleo até 2035**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2022/10/31/opep-preve-crescimento-da-demanda-mundial-de-petroleo-ate-2035.ghtml>>. Acesso em 13/01/2023.

GAN, H.; CHANG, J.; FENG, J.; HU, H. **Direct Numerical Simulation of the Sedimentation of Solid Particles with Thermal Convection.** Journal of Fluid Mechanics, v. 481, n. 481, p. 385–411, 2003.

GUESLIN, B.; TALINI, L.; HERZHAFT, B.; PEYSSON, Y.; ALLAIN, C. **Aggregation behavior of two spheres falling through an aging fluid.** Physical Review, vol. 74, 2006.

HARRIS, C. C.; SOMASUNDARAN, P.; JENSEN, R. R. **Sedimentation Of Compressible Materials: Analysis Of Batch Sedimentatlca Curve.** Powder Technology, v. 11, p. 75-84, 1975.

HASHEMI, Z.; ABOUALI, O.; KAMALI, R. **Three Dimensional Thermal Lattice Boltzmann Simulation of Heating/Cooling Spheres Falling in a Newtonian Liquid.** International Journal of Thermal Sciences, v. 82, n. 1, p. 23–33, 2014.

HERZHAFT, B.; ROUSSEAU, L.; NEAU, L.; MOAN, M.; BOSSARD, F. **Influence of temperature and clays or emulsion microstructure on oil-based mud low shear rate rheology.** Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, 2002.

HOLDICH, R. G.; BUTT, G. **Compression and Channelling in Gravity Sedimenting Systems.** Minerals Engineering, v. 9, n. 1, p. 115-131, 1995.

KARIMNEJAD, S.; DELOUEI, A.; NAZARI, M.; SHAHMARDAN, M.; RASHIDI, M.; WONGWISES, S. **Immersed Boundary-Thermal Lattice Boltzmann Method for the Moving Simulation of non-Isothermal Elliptical Particles.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 138, n. 6, p. 4003–4017, 2019.

KARAMAN, S.; KAYACIER, A. **Effect of temperature on rheological characteristics of molasses: Modeling of apparent viscosity using Adaptive Neuro e Fuzzy**

**Inference System (ANFIS).** LWT – Food Science and Technology, p 1717 – 1725, 2011.

KINNEAR, D. J. **Biological Solids Sedimentation: a Model Incorporating Fundamental Settling Parameters.** Tese de Ph.D., University of Utah, 2002.

KYNCH, G. J. **A Theory of Sedimentation.** Transactions of the Faraday Society, vol. 48, p 166-176, 1952.

KOZENY, J. Ueber Kapillare Leitung des Wassers im Boden. **Sitzungsber Akad. Wiss.**, Wien, v. 136, 1927.

LALI, A. M.; KHARE, A. S.; JOSHI, J. B.; NIGAM, K. D. P. **Behaviour of Solid Particles in Viscous Non-Newtonian Solutions: Settling Velocity, Wall Effects and Bed Expansion in Solid-Liquid Fluidized Beds.** Powder Technology, vol. 57, p 39-50.

LARUCCIA, M. B. **Velocidade de Sedimentação em Fluidos Não-Newtonianos: Efeito da Forma e da Concentração de Partículas.** Universidade Estadual de Campinas, Campina, SP, 1990.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento De Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo.** Editora Interciência, 1º Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2002, 258 p.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications.** Editora Wiley, E.U.A., 1993.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** Editora LTC, 2ª edição, 2014.

MASSARANI, G.; TELLES, A. S. **Escoamento de Fluidos Não-Newtonianos na Vizinhança de Partículas Sólidas**. Revista Brasileira de Física, v. 8, n. 3, p. 550-561, 1978.

MAXWELL, J. C. **On the dynamical theory of gases**. Philosophical Transactions of the Royal Society, v.A157, p.49-88, 1867.

MOE, B.; ERPELDING, P. **Annular Pressure Buildup: What it is and what to do about it**. World Oil Deepwater Technology Supplement, p 21-23, Houston, 2000.

MOHAMED, A.; SALEHI, S.; AHMED, R. **Significance and Complications of Drilling Fluid Rheology in Geothermal Drilling: A Review**. Geothermics. 2021.

MONTALVO, D. S.; RUÍZ, F. T; LUNA, G. S.; CANTU, D. L. **Modeling Rheological Of Whey On Function Ofshear Rate, Temperature And Total Solids Concentration**. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, vol. 41, núm. 3, p 156-164, 2018

MOREIRA, B. A. **Estudo da Sedimentação em Suspensões de Fluidos com Características Reológicas Pseudoplásticas**. Universidade Federal de Uberlândia, Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, MG, 2014.

MOREIRA, B. A.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. **Analysis of suspension sedimentation in fluids with rheological shear-thinning properties and thixotropic effects**. Powder Technology, vol. 308, p 290-297, 2016.

MORENO, A. F. N. **Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova Lisboa, 2018.

MOYER, M. C. *et al.* **Challenges Associated with Drilling Deepwater, Subsalt Exploration Well in the Gulf of Mexico: Hadrian Prospect**. SPE Drilling & Completion, v. 15, p. 25-30, 2000.

NASCIMENTO, C. R. **Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais**. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 425-447.

NAVARRO, F. N. **Aplicação de um Modelo Reológico Não-Linear em Sistemas Poliméricos Dilatantes**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº 1, p. 41-47, 2002.

NGUYEN, T.; MISKA, S.; YU, M.; TAKACH, N.; AHMED, R.; SAASEN, A.; OMLAND, T. H.; MAXEY, J. **Experimental Study Of Dynamic Barite Sag In Oil-Based Drilling Fluids Using A Modified Rotational Viscometer And A Flow Loop**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011.

NOCON, W. **Practical aspects of batch sedimentation control based on fractional density changes**. Powder Technology, vol. 198, p 167–174, 2010.

OFEI, T. N.; KALAGA, D. V.; LUND, B.; SAASEN, A.; LINGA, H.; SANGESLAND, S.; GYLAND, K. R.; KAWAJI, M. **Laboratory Evaluation of Static and Dynamic Sag in Oil-Bases Drilling Fluids**. SPE Journal, 2020.

OFEI, T. N.; NGOUAMBA, E.; OPEDAL, N.; SAASEN, A. **Rheology Assessment And Barite Sag In A Typical North Sea Oil-Based Drilling Fluid At HPHT Conditions**. Korea-Australian Rheology Journal. 2023.

PEÇANHA, R. **Sistemas Particulados: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. Editora Elsevier, 1º Edição, Rio de Janeiro, Editora Elsevier, 2014, 377 p.

PELIANO, S. V. **Mitigação de APB pelo método da sapata aberta**. Universidade Federal Fluminense, Trabalho de Conclusão de Curso, Niterói, RJ, 2015.

PETROBRAS. **Novo Plano Estratégico (2023-2027) prevê investimentos de US\$ 78 bilhões nos próximos cinco anos**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/novo-plano-estrategico-2023-2027-preve->

[investimentos-de-us-78-bilhoes-nos-proximos-cinco-anos.htm](#)>. Acesso em 13/01/2023.

PHILLIPS, R. J. **Structural instability in the sedimentation of particulate suspensions through viscoelastic fluids**. Non-Newtonian Fluid Mech, vol. 165, p 479–488, 2010.

PINTO, A. A. R. **Modelagem e Simulação do Fenômeno de Sedimentação de Sólidos Adensantes em Suspensões Não Newtonianas Confinadas em Regiões Anulares Sob Condições Não Isotérmicas**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2020.

PINTO, J. C; LAGE, P. L. C. **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. Rio de Janeiro, Editora e-papers, 2001.

RAFE, A.; MASOOD, H. S. **The Rheological Modeling and Effect of Temperature on Steady Shear Flow Behavior of Cordia abyssinica Gum**. Journal of Food – Processing & Technology, 2014.

RIBEIRO JÚNIOR, J. M. **Modelagem e Simulação da Sedimentação de Sólidos Adensantes em Fluidos de Perfuração**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, J. M.; ELER, F. M.; MARTINS, A. L.; SCHEID, M.; CALÇADA, L. A.; MELEIRO, L. A. C. **A Simplified Model Applied to the Barite Sag and Fluid Flow in Drilling Muds: Simulation and Experimental Results**. Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles, vol. 72, 2017.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. **Sedimentation and Fluidisation: Part I**. Trans. Institution of Chemical Engineers, v. 32, p. 82-100, 1954.

ROCHA, L. A. S.; AZUGA, D.; ANDRADE, R.; VIEIRA, J. L. B.; SANTOS, O. L. A. **Perfuração Direcional**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008, 317 p.

ROCHA, R. R. **Estudo Teórico-Experimental da Sedimentação em Batelada: Monitoramento e Modelagem de Perfis de Concentração de Sólidos e Análise de Equações Constitutivas**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2018.

ROCHA, R. R.; OECHSLER, B. F.; MELEIRO, L. A. C.; FAGUNDES, F. M.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R.; SCHEID, C. M.; CALÇADA, L. A. **Settling Of Weighting Agents In Non-Newtonian Fluids To Off-Shore Drilling Wells: Modeling, Parameter Estimation And Analysis Of Constitutive Equations**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020.

SAASEN, A. LIU, D.; MARKEN, C. D.; STERRI, N.; HALSEY, G. W.; ISAMBOURG, P. **Prediction of Barite Sag Potencial of Drilling Fluids From Rheological Measurements**. SPE/IADC Drilling Conference, p 663-671, 1995.

SANTOS, P. H.; SILVA, L. H. M.; RODRIGUES, A. M. C. SOUZA, J. A. R. **Influence Of Temperature, Concentration And Shear Rate On The Rheological Behavior Of Malay Apple (*Syzygium Malaccense*) Juice**. Brazilian Journal of Food and Technology, v. 19, 2016.

SANTOS, N. B. C. S.; FAGUNDES, F. M.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. **Sedimentation of solids in drilling fluids used in oil well drilling operations**. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 162, p 137-142, 2017.

SARMIENTO, G.; URLHERR, P. H. T. **The Effect of Temperature on the Sedimentation Parameters of Flocculated Suspensions**. Powder Technology, v. 22, n. 1, p. 139–142, 1979.

SCHWAAB, M.; PINTO, J. C. **Análise de Dados Experimentais I - Fundamentos de Estatística e Estimação de Parâmetros**. Rio de Janeiro, editora e-papers, vol 1, 2007.

SCHWALBERT, M. P., **Simulação de escoamentos não newtonianos não isotérmicos e sua aplicação à engenharia de poços de petróleo**. Dissertação de



mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Química, 2013.

SCOTT, K. J. **Experimental Study of Continuous Thickening of a Flocculated Silica Slurry**. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, vol 7, p 582-595, 1968.

SHAH, S. N.; FADILI, Y.; CHHABRA, R. P. **New model for single spherical particle settling velocity in *Power Law* (visco-inelastic) fluids**. International Journal of Multiphase Flow, vol. 33, p 51–66, 2007.

SILVA, K. C. **Estudo da filtração com e sem sedimentação prévia de fluidos de perfuração com comportamentos Newtonianos e Não-Newtonianos**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2017.

STAMATAKIS, K.; TIEN, C. **Batch Sedimentation Calculations - the Effect of Compressible Sediments**. Powder Technology, v. 72, p. 227-240, 1992.

TALMAGE, W. P.; FITCH, E. B. **Determining Thickener Unit Areas**. Industrial and Engineering Chemistry, vol 47, p 38-41, 1955.

TAO, S.; HE, Q.; CHEN, B.; QUIN, F. **Distribution Function Correction-Based Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method for Thermal Particle Flows**. Computational Particle Mechanics, v. 8, n. 3, p. 459–469, 2021.

TELLES, A. S.; MASSARANI, G. **Escoamento de Fluidos Não Newtonianos em Sistemas Particulados**. Revista Brasileira de Física, Vol. 9, 1979.

THOMAS, J. E; TRIGGIA, A. A.; CORREIA, C. A.; VEROTTI FILHO, C.; XAVIER, J. A. D.; MACHADO, J. C. V.; SOUZA FILHO, J. E.; PAULA, J. L.; ROSSI, N. C. M.; PITOMBO, N. E. S.; GOUVEA, P. C. V. M; CARVALHO, R. S.; BARRAGAN, R. V.

**Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004, 271 p.

TILLER, F. M. **Revision of Kynch Sedimentation Theory.** AIChE Journal, vol. 27, p 823-828, 1981.

TILLER, F. M.; LEU, W. **Basic Data Fitting in Filtration.** Journal of the Chinese Institute of Engineers, v. 1, p. 61-70, 1980.

VARGO, R. F. *et al.* **Practical and Successfully Prevention of Annular Pressure Buildup on the Marlin Project.** SPE Drilling & Completion, p. 228-234, 2003.

VRYZAS, Z.; WUBULIKASIMU, Y.; GEROGIORGIS, D. I.; KELESSIDIS, V. C. **Understanding the Temperature Effect on the Rheology of Water-Bentonite Suspensions.** Annual Transactions Of The Nordic Rheology Society, vol. 24, 2016

WALAYAT, K.; ZHANG, Z.; USMAN, K; CHANG, J.; LIU, M. **Dynamics of Elliptic Particle Sedimentation with Thermal Convection.** Physics of Fluids, v. 30, n. 10, 2018.

WAKEMAN, R. J.; HOLDICH, R. G. **Theoretical and Experimental Modeling of Solids and Liquid Pressures in Batch Sedimentation.** Filtration & Separation, p. 420-422, 1984.

YANG, B.; CHEN, S.; CAO, C; LIU, Z.; ZHENG, C. **Lattice Boltzmann Simulation of Two Cold Particles Settling in Newtonian Fluid with Thermal Convection.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 93, p. 477–490, 2016.

ZHENG, Y.; BAGLEY, D. M. **Numerical Simulation of Batch Settling Process.** Journal of Environmental Engineering, p. 1007-1013, 1999.

## 7 APÊNDICE

### A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS CURVAS DE ESCOAMENTO COM GEOMETRIA DE CILINDROS CONCÊNTRICOS:

#### A.1 Fluido base água adensado – 5°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	2,4408	2,6787	2,6218
2	0,0126	2,7788	3,0705	2,8053
3	0,0158	3,2210	3,0289	3,2118
4	0,0200	3,5183	3,6073	3,5011
5	0,0251	4,0108	4,2091	4,2201
6	0,0316	4,5127	4,6943	4,7605
7	0,0398	5,1064	5,3084	5,3505
8	0,0501	5,7333	5,9431	6,0166
9	0,0631	6,4613	6,6666	6,7318
10	0,0794	7,2667	7,4396	7,5237
11	0,1000	8,1192	8,2988	8,3608
12	0,1260	9,0469	9,2012	9,2620
13	0,1580	9,9836	10,0880	10,1750
14	0,2000	9,6074	9,4811	9,7915
15	0,2510	10,2790	10,1300	10,4770
16	0,3160	9,8307	9,8347	10,0890
17	0,3980	10,1140	10,1200	10,3490
18	0,5010	10,3120	10,3670	10,6180
19	0,6310	10,6190	10,6730	10,8960
20	0,7940	10,8890	10,9410	11,1900
21	1,000	11,3240	11,3260	11,5600
22	1,260	11,6100	11,7170	11,8990
23	1,580	12,0070	12,0850	12,4330
24	2,000	12,4390	12,5570	12,9830
25	2,510	12,9640	13,0090	13,4570
26	3,160	13,6930	13,7010	14,0610
27	3,980	14,2840	14,3660	14,7720
28	5,010	14,9510	15,2400	15,6220
29	6,310	14,3730	14,4360	14,6900
30	7,940	15,2370	15,3370	15,6200
31	10,00	16,2300	16,3290	16,6320
32	12,60	17,3240	17,4010	17,8080
33	15,80	18,6740	18,6130	19,0000
34	20,00	19,9440	19,9820	20,4160
35	25,10	21,3460	21,4270	21,7410
36	31,60	22,9890	23,0850	23,2950
37	39,80	24,4660	24,7690	25,0080
38	50,10	26,4410	26,5600	26,8020
39	63,10	28,2550	28,3260	28,9020
40	79,40	30,6520	30,7010	31,0560
41	100,0	33,0740	33,1730	33,4470
42	126,0	35,6690	35,7640	36,4290
43	158,0	38,7290	38,8500	39,3970
44	200,0	42,3410	42,2900	43,1120
45	251,0	46,1190	46,1530	46,7870
46	316,0	50,1940	50,3090	51,2080
47	398,0	54,3260	55,0190	55,4320
48	501,0	60,0840	60,7930	61,2440
49	631,0	66,8230	67,4930	68,0430

50	794,0	74,5520	75,2480	75,8870
51	1000	83,8910	84,6260	85,1800
Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	85,3110	86,0720	86,3190
2	794,0	75,8790	76,2620	76,6290
3	631,0	67,8130	67,9380	68,3100
4	501,0	60,7380	60,8620	61,2950
5	398,0	54,6020	54,7430	55,0160
6	316,0	49,2730	49,4020	49,6030
7	251,0	44,4950	44,6240	44,8100
8	199,0	40,2430	40,3720	40,4740
9	158,0	36,4690	36,6130	36,7400
10	126,0	33,2530	33,3670	33,5130
11	100,0	30,4540	30,5180	30,6560
12	79,40	27,9220	27,9740	28,1070
13	63,10	25,6330	25,6880	25,8240
14	50,10	23,5750	23,6290	23,7650
15	39,80	21,7330	21,7810	21,9070
16	31,60	20,0770	20,1140	20,2300
17	25,10	18,5830	18,6110	18,7160
18	20,00	17,2330	17,2550	17,3480
19	15,80	16,0120	16,0290	16,1150
20	12,60	14,9080	14,9210	14,9980
21	10,00	13,9110	13,9190	13,9900
22	7,940	13,0060	13,0140	13,0780
23	6,310	12,1900	12,1940	12,2560
24	5,010	11,4500	11,4530	11,5130
25	3,980	10,7810	10,7840	10,8400
26	3,160	10,1740	10,1810	10,2320
27	2,510	9,6286	9,6323	9,6851
28	2,000	9,1632	9,1706	9,2200
29	1,580	8,7391	8,7458	8,7962
30	1,260	8,3496	8,3591	8,4063
31	1,000	7,9979	8,0055	8,0836
32	0,7940	7,7074	7,7169	7,7827
33	0,6310	7,4344	7,4450	7,5075
34	0,5010	7,1841	7,1924	7,2552
35	0,3980	6,9803	6,9580	7,0501
36	0,3160	6,7815	6,7656	6,8497
37	0,2510	6,5884	6,5742	6,6560
38	0,2000	6,4217	6,3846	6,4672
39	0,1580	6,2230	6,2135	6,3027
40	0,1260	5,8794	5,8609	5,9570
41	0,1000	5,5699	5,7578	5,6437
42	0,0794	5,5770	5,5000	5,6158
43	0,0631	5,2728	5,2001	5,3557
44	0,0501	4,9161	4,8130	4,9947
45	0,0398	4,5617	4,4343	4,6388
46	0,0316	4,2149	4,0588	4,2863
47	0,0251	3,8708	3,7014	3,9379
48	0,0200	3,5498	3,3560	3,6100
49	0,0159	3,2356	3,0467	3,2712
50	0,0126	2,6584	2,7234	2,9395
51	0,0100	2,4371	2,2863	2,7479

## A.2 Fluido base água adensado – 15°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,9577	1,7915	2,1112
2	0,0126	2,1429	2,2425	2,5447
3	0,0158	2,6125	2,6501	2,6272
4	0,0200	2,9806	2,9326	2,9358
5	0,0251	3,2411	3,1945	3,1914
6	0,0316	3,4915	3,4531	3,4454
7	0,0398	3,7265	3,6912	3,6841
8	0,0501	3,8984	3,8695	3,8547
9	0,0631	4,0762	4,0501	4,0467
10	0,0794	4,2746	4,2502	4,2502
11	0,1000	4,4687	4,4445	4,4491
12	0,1260	4,7189	4,6940	4,7008
13	0,1580	4,8822	4,8573	4,8684
14	0,2000	5,0866	5,0629	5,075
15	0,2510	5,3248	5,2845	5,315
16	0,3160	5,5562	5,5390	5,5621
17	0,3980	5,8261	5,8031	5,8238
18	0,5010	6,1089	6,0841	6,1049
19	0,6310	6,4113	6,3862	6,4078
20	0,7940	6,7349	6,7115	6,7347
21	1,000	7,0831	7,0630	7,0841
22	1,260	7,4650	7,4434	7,4625
23	1,580	7,8813	7,8576	7,8789
24	2,000	8,3285	8,3052	8,3294
25	2,510	8,8161	8,7751	8,8173
26	3,160	9,3426	9,2973	9,3443
27	3,980	9,9139	9,8671	9,9207
28	5,010	10,5350	10,4890	10,544
29	6,310	11,2050	11,1550	11,214
30	7,940	11,9410	11,8890	11,958
31	10,00	12,7620	12,6950	12,75
32	12,60	13,6410	13,5500	13,637
33	15,80	14,6060	14,5650	14,609
34	20,00	15,6650	15,6210	15,674
35	25,10	16,8320	16,7820	16,848
36	31,60	18,1180	18,0350	18,141
37	39,80	19,5410	19,4710	19,584
38	50,10	21,1180	21,0530	21,166
39	63,10	22,8640	22,8030	22,919
40	79,40	24,8000	24,7330	24,85
41	100,0	26,9340	26,8600	26,991
42	126,0	29,2710	29,2100	29,344
43	158,0	31,8360	31,7710	31,916
44	200,0	34,6930	34,6140	34,774
45	251,0	37,8430	37,7750	37,977
46	316,0	40,9490	40,8870	41,232
47	398,0	44,8910	44,7990	44,979
48	501,0	48,7500	49,0000	49,09
49	631,0	53,9140	53,9500	53,975
50	794,0	60,2020	60,1150	60,177
51	1000	69,4020	67,7700	67,883

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	69,9590	70,1680	70,0520
2	794,0	62,2390	62,3920	62,2000
3	631,0	55,7260	55,8640	55,7690
4	501,0	50,2540	50,3140	50,3100
5	398,0	45,4590	45,5550	45,5980
6	316,0	41,2170	41,3230	41,3770
7	251,0	37,4800	37,5560	37,6170
8	199,0	34,0880	34,1770	34,2250
9	158,0	31,0770	31,1540	31,2030
10	126,0	28,4000	28,5260	28,5430
11	100,0	26,0230	26,1490	26,1660
12	79,40	23,9150	24,0510	24,0450
13	63,10	22,0130	22,1250	22,1340
14	50,10	20,2960	20,4000	20,4100
15	39,80	18,7610	18,8370	18,8650
16	31,60	17,3730	17,4370	17,4710
17	25,10	16,1100	16,1670	16,2020
18	20,00	14,9620	15,0140	15,0480
19	15,80	13,9160	13,9630	13,9950
20	12,60	12,9620	13,0060	13,0360
21	10,00	12,0910	12,1310	12,1610
22	7,940	11,2960	11,3330	11,3590
23	6,310	10,5670	10,6010	10,6260
24	5,010	9,8998	9,9320	9,9550
25	3,980	9,2911	9,3206	9,3418
26	3,160	8,7340	8,7626	8,7801
27	2,510	8,2214	8,2479	8,2637
28	2,000	7,7547	7,7803	7,7931
29	1,580	7,3249	7,3478	7,3605
30	1,260	6,9283	6,9518	6,9620
31	1,000	6,5661	6,5902	6,5965
32	0,7940	6,2327	6,2548	6,2608
33	0,6310	5,9234	5,9451	5,9502
34	0,5010	5,6371	5,6584	5,6620
35	0,3980	5,3712	5,3915	5,3935
36	0,3160	5,1212	5,1436	5,1439
37	0,2510	4,9013	4,9250	4,9228
38	0,2000	4,6907	4,7164	4,7103
39	0,1580	4,4887	4,5168	4,5085
40	0,1260	4,2435	4,2743	4,2618
41	0,1000	4,0278	4,0620	4,0451
42	0,0794	3,9161	3,9658	3,9328
43	0,0631	3,7560	3,8031	3,7719
44	0,0501	3,5912	3,6425	3,6076
45	0,0398	3,4381	3,4931	3,4546
46	0,0316	3,2414	3,2989	3,2588
47	0,0251	3,0608	3,1239	3,0782
48	0,0200	2,8909	2,9580	2,9127
49	0,0159	2,7301	2,8025	2,7523
50	0,0126	2,4515	2,6317	2,4778
51	0,0100	2,2535	2,2795	2,4945

### A.3 Fluido base água adensado – 25°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,7878	1,7346	1,5528
2	0,0126	1,8827	2,1557	1,9722
3	0,0158	2,4437	2,4588	2,436
4	0,0200	2,7664	2,6883	2,6967
5	0,0251	2,9960	2,9280	2,9266
6	0,0316	3,2284	3,1615	3,1644
7	0,0398	3,4565	3,3927	3,3981
8	0,0501	3,6451	3,6179	3,5962
9	0,0631	3,8315	3,7860	3,8018
10	0,0794	4,0352	3,9842	3,9996
11	0,1000	4,2321	4,1801	4,1955
12	0,1260	4,4332	4,3778	4,3963
13	0,1580	4,6879	4,6296	4,6491
14	0,2000	4,8619	4,8018	4,8227
15	0,2510	5,0693	5,0078	5,0282
16	0,3160	5,2962	5,2262	5,2422
17	0,3980	5,5288	5,4803	5,4978
18	0,5010	5,7921	5,7459	5,7653
19	0,6310	6,0751	6,0253	6,0452
20	0,7940	6,3750	6,3242	6,3435
21	1,000	6,6958	6,6418	6,6635
22	1,260	7,0424	6,9834	7,01
23	1,580	7,4141	7,3566	7,384
24	2,000	7,8141	7,7594	7,7867
25	2,510	8,2500	8,1935	8,2253
26	3,160	8,7181	8,6629	8,7443
27	3,980	9,2831	9,2168	9,2662
28	5,010	9,8391	9,7724	9,8306
29	6,310	10,4440	10,3740	10,441
30	7,940	11,1040	11,0320	11,102
31	10,00	11,8170	11,7460	11,823
32	12,60	12,5960	12,5250	12,611
33	15,80	13,4470	13,3780	13,471
34	20,00	14,3820	14,3140	14,416
35	25,10	15,4090	15,3400	15,453
36	31,60	16,5350	16,4690	16,59
37	39,80	17,7790	17,7180	17,848
38	50,10	19,1540	19,0930	19,233
39	63,10	20,6740	20,6050	20,759
40	79,40	22,3350	22,2730	22,445
41	100,0	24,1750	24,1130	24,3
42	126,0	26,2050	26,1420	26,342
43	158,0	28,4370	28,3740	28,586
44	200,0	30,9110	30,8390	31,062
45	251,0	33,6400	33,6110	33,808
46	316,0	35,9200	35,8890	36,621
47	398,0	39,3360	39,2650	39,465
48	501,0	43,0070	43,0540	43,37
49	631,0	46,9000	47,2570	47,542
50	794,0	51,9050	52,4750	52,763
51	1000	58,2240	58,7380	59,155

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	59,9940	60,1050	60,8070
2	794,0	53,5110	53,8170	54,3210
3	631,0	48,2770	48,2880	48,9130
4	501,0	43,6660	43,5220	44,2050
5	398,0	39,6770	39,5750	40,1650
6	316,0	36,1410	36,0740	36,5930
7	251,0	32,9960	32,9510	33,4190
8	199,0	30,1270	30,0700	30,5350
9	158,0	27,5410	27,4850	27,9070
10	126,0	25,2480	25,1940	25,5970
11	100,0	23,2070	23,1580	23,5340
12	79,40	21,3810	21,3240	21,6730
13	63,10	19,7370	19,6850	19,9960
14	50,10	18,2520	18,2040	18,4880
15	39,80	16,9070	16,8680	17,1230
16	31,60	15,6890	15,6570	15,8870
17	25,10	14,5810	14,5540	14,7640
18	20,00	13,5740	13,5500	13,7410
19	15,80	12,6530	12,6320	12,8080
20	12,60	11,8130	11,7950	11,9570
21	10,00	11,0440	11,0280	11,1750
22	7,940	10,3390	10,3260	10,4620
23	6,310	9,6946	9,6815	9,8070
24	5,010	9,1045	9,0923	9,2070
25	3,980	8,5643	8,5539	8,6607
26	3,160	8,0675	8,0589	8,1579
27	2,510	7,6140	7,6039	7,6955
28	2,000	7,1966	7,1880	7,2730
29	1,580	6,8144	6,8049	6,8843
30	1,260	6,4615	6,4515	6,5254
31	1,000	6,1350	6,1256	6,1940
32	0,7940	5,8344	5,8254	5,8899
33	0,6310	5,5560	5,5460	5,6072
34	0,5010	5,2973	5,3001	5,3438
35	0,3980	5,0685	5,0499	5,0957
36	0,3160	4,8328	4,8181	4,8798
37	0,2510	4,6227	4,6121	4,6652
38	0,2000	4,4283	4,4179	4,4583
39	0,1580	4,2385	4,2286	4,2673
40	0,1260	4,0022	3,9932	4,0306
41	0,1000	3,7948	3,7849	3,8996
42	0,0794	3,7003	3,6918	3,7362
43	0,0631	3,5412	3,5318	3,5732
44	0,0501	3,3931	3,3732	3,4095
45	0,0398	3,1991	3,2132	3,2580
46	0,0316	3,0233	3,0296	3,0677
47	0,0251	2,8582	2,8590	2,8927
48	0,0200	2,7020	2,7007	2,7291
49	0,0159	2,5530	2,5494	2,5786
50	0,0126	2,2072	2,3264	2,3325
51	0,0100	2,1427	2,3664	2,1330



#### A.4 Fluido base água adensado – 35°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,7848	2,0974	1,6356
2	0,0126	1,9562	2,3434	2,0166
3	0,0158	2,2886	2,6574	2,2800
4	0,0200	2,4824	2,6748	2,4873
5	0,0251	2,6881	2,8823	2,6899
6	0,0316	2,8962	3,0863	2,8975
7	0,0398	3,1045	3,2990	3,1048
8	0,0501	3,3132	3,5067	3,3129
9	0,0631	3,4843	3,6483	3,4817
10	0,0794	3,6817	3,8460	3,6780
11	0,1000	3,8796	4,0405	3,8744
12	0,1260	4,0791	4,2369	4,0719
13	0,1580	4,3251	4,4846	4,3185
14	0,2000	4,4955	4,6359	4,4903
15	0,2510	4,6916	4,8460	4,6946
16	0,3160	4,9266	5,0671	4,9041
17	0,3980	5,1648	5,3148	5,1510
18	0,5010	5,4159	5,5654	5,4065
19	0,6310	5,6809	5,8288	5,6744
20	0,7940	5,9616	6,1087	5,9574
21	1,000	6,2604	6,4076	6,2592
22	1,260	6,5822	6,7304	6,5815
23	1,580	6,9303	7,0771	6,9308
24	2,000	7,3029	7,4475	7,3048
25	2,510	7,7068	7,8513	7,7069
26	3,160	8,1853	8,2840	8,1868
27	3,980	8,6597	8,7551	8,6623
28	5,010	9,1708	9,2630	9,1743
29	6,310	9,7244	9,8343	9,7278
30	7,940	10,3260	10,4340	10,3310
31	10,00	10,9780	11,0860	10,9830
32	12,60	11,6850	11,7930	11,6930
33	15,80	12,4580	12,5660	12,4670
34	20,00	13,3000	13,4090	13,3110
35	25,10	14,2220	14,3330	14,2360
36	31,60	15,2340	15,3490	15,2500
37	39,80	16,3480	16,4660	16,3630
38	50,10	17,5680	17,6940	17,5850
39	63,10	18,9120	19,0450	18,9340
40	79,40	20,4000	20,5330	20,4170
41	100,0	22,0330	22,1720	22,0590
42	126,0	23,8340	23,9730	23,8620
43	158,0	25,8100	25,9620	25,8430
44	200,0	28,0170	28,1910	28,0640
45	251,0	30,4610	30,5980	30,4990
46	316,0	32,6160	32,8840	33,0090
47	398,0	35,2370	35,3310	35,4560
48	501,0	38,6570	38,7200	38,6660
49	631,0	42,3740	42,3850	42,4940
50	794,0	46,9230	46,9810	47,0580
51	1000	52,4100	52,9970	52,6250

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	52,6480	53,8000	54,5010
2	794,0	47,8430	48,3850	48,8410
3	631,0	43,3460	43,6600	44,0190
4	501,0	39,3720	39,5960	39,8810
5	398,0	35,8680	36,0980	36,3370
6	316,0	32,7730	32,9930	33,1440
7	251,0	30,0080	30,2270	30,2980
8	199,0	27,4970	27,6980	27,7520
9	158,0	25,2200	25,3920	25,4290
10	126,0	23,1970	23,3260	23,3580
11	100,0	21,3760	21,4910	21,5130
12	79,40	19,7390	19,8290	19,8520
13	63,10	18,2640	18,3400	18,3530
14	50,10	16,9300	16,9950	17,0010
15	39,80	15,7210	15,7770	15,7800
16	31,60	14,6210	14,6690	14,6720
17	25,10	13,6170	13,6580	13,6620
18	20,00	12,7010	12,7360	12,7390
19	15,80	11,8620	11,8920	11,8960
20	12,60	11,0930	11,1200	11,1250
21	10,00	10,3910	10,4130	10,4180
22	7,940	9,7450	9,7642	9,7704
23	6,310	9,1538	9,1708	9,1756
24	5,010	8,6113	8,6261	8,6311
25	3,980	8,1120	8,1261	8,1301
26	3,160	7,6550	7,6665	7,6714
27	2,510	7,2348	7,2436	7,2481
28	2,000	6,8477	6,8558	6,8601
29	1,580	6,4898	6,4991	6,4989
30	1,260	6,1593	6,1665	6,1677
31	1,000	5,8547	5,8592	5,8610
32	0,7940	5,5699	5,5751	5,5739
33	0,6310	5,3189	5,3256	5,3044
34	0,5010	5,0809	5,0870	5,0678
35	0,3980	4,8543	4,8583	4,8421
36	0,3160	4,6398	4,6410	4,6267
37	0,2510	4,4388	4,4385	4,4230
38	0,2000	4,2438	4,2450	4,2280
39	0,1580	4,0596	4,0582	4,0518
40	0,1260	3,8270	3,8259	3,8124
41	0,1000	3,7027	3,7126	3,6818
42	0,0794	3,5467	3,5529	3,5198
43	0,0631	3,3899	3,3943	3,3562
44	0,0501	3,2568	3,2385	3,2072
45	0,0398	3,1084	3,0976	3,0163
46	0,0316	2,9281	2,9197	2,8424
47	0,0251	2,7617	2,7562	2,6796
48	0,0200	2,6077	2,6041	2,5288
49	0,0159	2,4628	2,4605	2,3860
50	0,0126	2,2409	2,2073	2,2487
51	0,0100	2,3294	2,3919	1,8400

## A.5 Fluido base água adensado – 45°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,5453	1,5647	1,6258
2	0,0126	1,8876	1,9440	1,9849
3	0,0158	2,1506	2,2430	2,3218
4	0,0200	2,3647	2,4538	2,5371
5	0,0251	2,5650	2,6610	2,7472
6	0,0316	2,7715	2,8638	2,9541
7	0,0398	2,9759	3,0683	3,1627
8	0,0501	3,1841	3,2701	3,3678
9	0,0631	3,3742	3,4535	3,5445
10	0,0794	3,5694	3,6468	3,7496
11	0,1000	3,7725	3,8476	3,9547
12	0,1260	3,9786	4,0532	4,1631
13	0,1580	4,1929	4,2997	4,4130
14	0,2000	4,4481	4,4772	4,5852
15	0,2510	4,6405	4,6831	4,7982
16	0,3160	4,8648	4,7954	5,0220
17	0,3980	5,1124	5,0585	5,2694
18	0,5010	5,3637	5,3218	5,5192
19	0,6310	5,6266	5,5918	5,7795
20	0,7940	5,9011	5,8683	6,0521
21	1,000	6,1920	6,3147	6,3427
22	1,260	6,5056	6,6402	6,6546
23	1,580	6,8408	6,9716	6,9869
24	2,000	7,1984	7,3306	7,3410
25	2,510	7,5860	7,7167	7,7260
26	3,160	8,0166	8,1259	8,1379
27	3,980	8,4652	8,5671	8,5988
28	5,010	8,9499	9,0440	9,0967
29	6,310	9,4726	9,5601	9,6176
30	7,940	10,0210	10,1450	10,1790
31	10,00	10,6450	10,7460	10,7880
32	12,60	11,3130	11,3990	11,4470
33	15,80	12,0370	12,1060	12,1630
34	20,00	12,8240	12,8760	12,9420
35	25,10	13,6790	13,7140	13,7880
36	31,60	14,6110	14,6320	14,7140
37	39,80	15,6330	15,6380	15,7280
38	50,10	16,7500	16,7410	16,8440
39	63,10	17,9760	17,9530	18,0680
40	79,40	19,3240	19,2890	19,4140
41	100,0	20,8130	20,7610	20,8950
42	126,0	22,4470	22,3890	22,5240
43	158,0	24,2540	24,1980	24,3270
44	200,0	26,2730	26,2280	26,3560
45	251,0	28,4790	28,2880	28,5320
46	316,0	30,3880	30,3340	30,3900
47	398,0	32,8540	32,6120	32,8460
48	501,0	35,6470	35,4730	35,7340
49	631,0	39,1090	38,9650	39,1990
50	794,0	43,1240	43,0490	43,2260
51	1000	48,1220	48,1070	49,8060

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	49,8040	49,9060	49,8840
2	794,0	44,6810	44,7020	44,5850
3	631,0	40,2860	40,2150	40,0720
4	501,0	36,5290	36,4570	36,2740
5	398,0	33,2770	33,2470	32,9820
6	316,0	30,4390	30,4330	30,1050
7	251,0	27,9920	27,9230	27,6160
8	199,0	25,6620	25,6250	25,3450
9	158,0	23,5540	23,5330	23,3110
10	126,0	21,6730	21,6640	21,4930
11	100,0	20,0070	20,0060	19,8620
12	79,40	18,5110	18,5150	18,3870
13	63,10	17,1630	17,1660	17,0490
14	50,10	15,9430	15,9460	15,8350
15	39,80	14,8300	14,8340	14,7250
16	31,60	13,8140	13,8190	13,7190
17	25,10	12,8840	12,8930	12,8390
18	20,00	12,0320	12,0470	11,9620
19	15,80	11,2500	11,2700	11,1880
20	12,60	10,5320	10,5560	10,4710
21	10,00	9,8751	9,8995	9,8181
22	7,940	9,2691	9,2984	9,2197
23	6,310	8,7144	8,7438	8,6687
24	5,010	8,2040	8,2341	8,1635
25	3,980	7,7332	7,7661	7,6971
26	3,160	7,2995	7,3342	7,2708
27	2,510	6,9018	6,9341	6,8747
28	2,000	6,5329	6,5692	6,5118
29	1,580	6,1951	6,2284	6,1728
30	1,260	5,8795	5,9133	5,8794
31	1,000	5,6024	5,6405	5,6013
32	0,7940	5,3248	5,3629	5,3231
33	0,6310	5,0867	5,1235	5,0801
34	0,5010	4,8389	4,8946	4,8522
35	0,3980	4,6284	4,6783	4,6372
36	0,3160	4,4227	4,4719	4,4322
37	0,2510	4,2269	4,2755	4,2352
38	0,2000	4,0519	4,0867	4,0604
39	0,1580	3,8160	3,8517	3,8253
40	0,1260	3,6056	3,6409	3,6155
41	0,1000	3,5216	3,5489	3,5163
42	0,0794	3,3623	3,4075	3,3753
43	0,0631	3,2212	3,2653	3,2308
44	0,0501	3,0895	3,1313	3,0868
45	0,0398	2,9284	2,9846	2,9431
46	0,0316	2,7532	2,8047	2,7624
47	0,0251	2,5900	2,6380	2,5960
48	0,0200	2,4366	2,4820	2,4431
49	0,0159	2,2930	2,3367	2,2942
50	0,0126	2,0788	2,2061	2,0232
51	0,0100	2,0016	2,1740	1,5925

## A.6 Fluido base água sem adensante – 5°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	2,3220	2,6080	2,8208
2	0,0126	2,6702	2,9429	3,1633
3	0,0158	3,0901	3,2824	3,5697
4	0,0200	3,4807	3,5766	3,7729
5	0,0251	4,2640	4,3440	4,5837
6	0,0316	5,6355	4,9654	5,9296
7	0,0398	6,1433	6,2686	6,4075
8	0,0501	6,6396	6,7978	6,8749
9	0,0631	7,1135	7,3121	7,3436
10	0,0794	7,5623	7,8158	7,7751
11	0,1000	7,6831	8,0089	7,8833
12	0,1260	8,0922	8,2131	8,2922
13	0,1580	8,1248	8,6393	8,6865
14	0,2000	8,3937	8,6488	8,5886
15	0,2510	8,6229	8,8594	8,8161
16	0,3160	8,9039	9,1574	9,0656
17	0,3980	9,1901	9,3818	9,3699
18	0,5010	9,4492	9,7043	9,6759
19	0,6310	9,7761	9,9939	9,9939
20	0,7940	10,1110	10,3370	10,2820
21	1,000	10,4270	10,6500	10,6440
22	1,260	10,8280	11,0320	10,9880
23	1,580	11,2970	11,4440	11,4550
24	2,000	11,7460	11,8940	11,9000
25	2,510	12,3070	12,4430	12,3440
26	3,160	12,9630	13,0350	12,9630
27	3,980	13,6170	13,6970	13,6740
28	5,010	14,3860	14,4040	14,3920
29	6,310	15,1640	15,2270	15,2310
30	7,940	16,0770	16,0710	16,1270
31	10,00	17,0650	17,0590	17,1070
32	12,60	18,1460	18,1370	18,1130
33	15,80	19,3260	19,3140	19,2920
34	20,00	20,6270	20,6090	20,5850
35	25,10	22,1590	22,0300	22,0550
36	31,60	23,7370	23,6000	23,7570
37	39,80	25,4760	25,3270	25,4960
38	50,10	27,3940	27,2170	27,3930
39	63,10	29,5180	29,3130	29,4970
40	79,40	31,8620	31,6420	31,8320
41	100,0	34,4580	34,2100	34,3020
42	126,0	37,3590	37,0660	37,2160
43	158,0	40,4470	40,1200	40,4510
44	200,0	44,0680	43,7030	43,8770
45	251,0	48,1600	47,7160	47,9430
46	316,0	52,5340	51,7440	52,5090
47	398,0	57,0140	56,3570	57,1200
48	501,0	62,8490	62,3100	63,0300
49	631,0	69,2670	69,1020	69,0900
50	794,0	76,2750	75,4450	76,8440
51	1000	84,2530	84,3530	84,8930

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	84,0340	84,1860	84,5270
2	794,0	74,3680	74,3420	74,7460
3	631,0	66,4590	66,2500	66,7140
4	501,0	59,7250	59,5330	59,8750
5	398,0	53,9110	53,7370	54,0050
6	316,0	48,8710	48,6240	48,8940
7	251,0	44,3480	44,0190	44,2980
8	199,0	40,3390	40,0190	40,2790
9	158,0	36,8140	36,5670	36,7750
10	126,0	33,7130	33,5080	33,6630
11	100,0	30,9840	30,7800	30,9370
12	79,40	28,5650	28,3500	28,5090
13	63,10	26,3980	26,1960	26,3310
14	50,10	24,4430	24,2610	24,3720
15	39,80	22,6690	22,5030	22,6100
16	31,60	21,0590	20,9030	21,0100
17	25,10	19,5920	19,4520	19,5540
18	20,00	18,2560	18,1300	18,2270
19	15,80	17,0380	16,9240	17,0190
20	12,60	15,9270	15,8210	15,9150
21	10,00	14,9120	14,8190	14,9090
22	7,940	13,9870	13,9000	13,9870
23	6,310	13,1360	13,0640	13,1480
24	5,010	12,3610	12,2970	12,3800
25	3,980	11,6510	11,5940	11,6760
26	3,160	11,0040	10,9520	11,0320
27	2,510	10,4060	10,3660	10,4460
28	2,000	9,8640	9,8278	9,9053
29	1,580	9,3628	9,3330	9,4139
30	1,260	8,9043	8,8837	8,9633
31	1,000	8,4869	8,4690	8,5481
32	0,7940	8,1260	8,1116	8,1942
33	0,6310	7,7870	7,7792	7,8641
34	0,5010	7,4745	7,4704	7,5593
35	0,3980	7,1858	7,1851	7,2760
36	0,3160	6,9177	6,9434	7,0378
37	0,2510	6,6678	6,6886	6,7846
38	0,2000	6,4574	6,4775	6,5757
39	0,1580	6,2521	6,2703	6,3726
40	0,1260	5,9416	5,9610	6,0640
41	0,1000	5,6673	5,6859	5,7910
42	0,0794	5,6406	5,6778	5,5357
43	0,0631	5,4893	5,5358	5,2882
44	0,0501	5,3374	5,3696	5,3540
45	0,0398	5,1206	5,1622	5,1913
46	0,0316	4,8308	4,8629	4,9179
47	0,0251	4,5582	4,5798	4,6589
48	0,0200	4,2271	4,2645	4,1873
49	0,0159	3,4331	3,8315	3,3722
50	0,0126	3,6472	3,5760	3,4129
51	0,0100	3,4577	3,3526	3,1455

# A.7 Fluido base água sem adensante – 15°C

Curva Ascendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	2,2921	2,3258	1,8328
2	0,0126	2,6721	2,0861	2,3282
3	0,0158	3,0544	2,6200	2,8804
4	0,0200	3,3670	3,3325	3,4476
5	0,0251	4,0423	4,0080	3,8846
6	0,0316	4,3371	4,3154	4,1835
7	0,0398	4,6070	4,5873	4,4561
8	0,0501	4,8514	4,8397	4,7079
9	0,0631	5,0372	5,0453	4,9169
10	0,0794	5,2491	5,2525	5,1295
11	0,1000	5,5091	5,5156	5,3910
12	0,1260	5,6632	5,7592	5,5649
13	0,1580	5,8811	5,8993	5,7770
14	0,2000	6,1220	6,1435	6,0064
15	0,2510	6,3707	6,3910	6,2622
16	0,3160	6,6125	6,6524	6,5252
17	0,3980	6,9028	6,9349	6,8051
18	0,5010	7,2046	7,2373	7,1054
19	0,6310	7,5245	7,5658	7,4270
20	0,7940	7,8703	7,9177	7,7720
21	1,000	8,2439	8,3018	8,1449
22	1,260	8,6478	8,7176	8,5497
23	1,580	9,0854	9,1711	8,9862
24	2,000	9,5478	9,6607	9,4462
25	2,510	10,0130	10,1950	9,9301
26	3,160	10,5770	10,7700	10,4800
27	3,980	11,1850	11,4020	11,0860
28	5,010	11,8540	12,0840	11,7450
29	6,310	12,5720	12,8220	12,4540
30	7,940	13,3500	13,6290	13,2330
31	10,00	14,2060	14,5060	14,0760
32	12,60	15,1340	15,4450	14,9910
33	15,80	16,4710	16,5200	16,2560
34	20,00	17,6110	17,6460	17,3840
35	25,10	18,8730	18,9020	18,6130
36	31,60	20,2480	20,2900	19,9690
37	39,80	21,7610	21,8180	21,4590
38	50,10	23,4270	23,5030	23,0920
39	63,10	25,2580	25,3420	24,8890
40	79,40	27,2660	27,3560	26,8630
41	100,0	29,4660	29,5710	29,0330
42	126,0	31,8900	32,0140	31,4270
43	158,0	34,5610	34,7090	34,0760
44	200,0	37,5130	37,6800	37,0000
45	251,0	40,6690	40,8640	40,3130
46	316,0	44,1980	44,3800	43,7470
47	398,0	48,1300	48,3700	47,4000
48	501,0	52,9900	52,7370	52,2380
49	631,0	58,0660	58,0270	57,2290
50	794,0	64,2050	63,9860	63,5930
51	1000	71,6130	71,4980	70,3630

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	71,3070	71,2440	70,2780
2	794,0	63,1850	63,3300	62,4910
3	631,0	56,7030	56,8760	56,0780
4	501,0	51,2450	51,1570	50,6440
5	398,0	46,4300	46,2090	45,8770
6	316,0	42,2400	41,9730	41,7140
7	251,0	38,4880	38,2610	38,0080
8	199,0	35,0910	34,9970	34,6580
9	158,0	32,1310	32,0300	31,7420
10	126,0	29,5330	29,4260	29,1820
11	100,0	27,2130	27,1140	26,8960
12	79,40	25,1350	25,0550	24,8500
13	63,10	23,2710	23,1870	22,9970
14	50,10	21,5760	21,4920	21,3160
15	39,80	20,0390	19,9580	19,7920
16	31,60	18,6400	18,5670	18,4090
17	25,10	17,3620	17,3010	17,1460
18	20,00	16,1980	16,1440	15,9930
19	15,80	15,1320	15,0850	14,9410
20	12,60	14,1580	14,1130	13,9790
21	10,00	13,2610	13,2240	13,0960
22	7,940	12,4420	12,4030	12,2850
23	6,310	11,6850	11,6560	11,5400
24	5,010	10,9910	10,9670	10,8540
25	3,980	10,3550	10,3330	10,2230
26	3,160	9,7706	9,7474	9,6445
27	2,510	9,2291	9,2128	9,1099
28	2,000	8,7342	8,7171	8,6214
29	1,580	8,2760	8,2631	8,1710
30	1,260	7,8544	7,8449	7,7538
31	1,000	7,4673	7,4580	7,3703
32	0,7940	7,1089	7,1009	7,0180
33	0,6310	6,7780	6,7698	6,6917
34	0,5010	6,4702	6,4628	6,3895
35	0,3980	6,1824	6,1797	6,1072
36	0,3160	5,9172	5,9144	5,8596
37	0,2510	5,6663	5,6832	5,6212
38	0,2000	5,4497	5,4585	5,3992
39	0,1580	5,2395	5,2457	5,1879
40	0,1260	4,9791	4,9862	4,9284
41	0,1000	4,7513	4,7582	4,7025
42	0,0794	4,6394	4,5441	4,4901
43	0,0631	4,4777	4,3413	4,2887
44	0,0501	4,3133	4,3131	4,2286
45	0,0398	4,1648	4,1628	4,0912
46	0,0316	3,9605	4,0123	3,9580
47	0,0251	3,7763	3,8156	3,7611
48	0,0200	3,6030	3,6372	3,5498
49	0,0159	3,5613	3,3269	3,3792
50	0,0126	3,4173	2,6901	3,2556
51	0,0100	3,2201	3,0692	3,1781



## A.8 Fluido base água sem adensante – 25°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	2,6589	3,0856	2,8300
2	0,0126	2,8073	3,2825	2,8566
3	0,0158	3,3648	3,5783	3,2899
4	0,0200	3,6264	3,7756	3,2806
5	0,0251	3,8908	4,0278	3,9699
6	0,0316	4,1505	4,3174	4,2695
7	0,0398	4,3721	4,5122	4,4870
8	0,0501	4,5615	4,7031	4,6581
9	0,0631	4,7543	4,8882	4,8510
10	0,0794	4,9474	5,0732	5,0399
11	0,1000	5,1938	5,3159	5,2852
12	0,1260	5,3521	5,4483	5,4319
13	0,1580	5,5484	5,6465	5,6198
14	0,2000	5,7576	5,8538	5,8238
15	0,2510	5,9956	6,0736	6,0394
16	0,3160	6,2406	6,3220	6,2881
17	0,3980	6,4972	6,5807	6,5459
18	0,5010	6,7714	6,8514	6,8175
19	0,6310	7,0644	7,1403	7,1064
20	0,7940	7,3792	7,4486	7,4189
21	1,000	7,7201	7,7756	7,7513
22	1,260	8,0908	8,1325	8,0755
23	1,580	8,4902	8,5272	8,4847
24	2,000	8,9172	8,9531	8,9177
25	2,510	9,3701	9,4186	9,3868
26	3,160	9,8801	9,9192	9,8879
27	3,980	10,4280	10,4640	10,4420
28	5,010	11,0260	11,0510	11,0330
29	6,310	11,6650	11,6950	11,6810
30	7,940	12,3650	12,3900	12,3810
31	10,00	13,1240	13,2550	13,3000
32	12,60	13,9770	14,0880	14,1410
33	15,80	14,9670	14,9980	15,0600
34	20,00	15,9610	15,9930	16,0600
35	25,10	17,0500	17,0760	17,1600
36	31,60	18,2420	18,2720	18,3660
37	39,80	19,5530	19,5830	19,6890
38	50,10	20,9950	21,0230	21,1400
39	63,10	22,5750	22,6060	22,7340
40	79,40	24,3150	24,3380	24,4830
41	100,0	26,2280	26,2460	26,4030
42	126,0	28,3290	28,3360	28,5030
43	158,0	30,6340	30,6320	30,8090
44	200,0	33,1600	33,1730	33,3430
45	251,0	36,0150	36,0320	36,1920
46	316,0	38,7440	38,7490	39,1300
47	398,0	42,2120	42,1290	42,4500
48	501,0	45,6210	46,0210	45,8820
49	631,0	49,9910	50,0430	50,4120
50	794,0	55,1880	55,2830	55,6420
51	1000	61,2560	61,5410	61,8010

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	61,0720	61,3390	61,7010
2	794,0	54,3930	54,6060	54,7530
3	631,0	48,9880	49,0380	49,1960
4	501,0	44,4450	44,3890	44,6120
5	398,0	40,4350	40,4200	40,7000
6	316,0	36,9220	36,9030	37,2330
7	251,0	33,8000	33,7900	34,0530
8	199,0	30,9480	30,9500	31,1810
9	158,0	28,3990	28,4200	28,6250
10	126,0	26,1870	26,1950	26,3800
11	100,0	24,2140	24,2160	24,3880
12	79,40	22,3880	22,4100	22,5730
13	63,10	20,7410	20,7670	20,9120
14	50,10	19,2480	19,2790	19,4110
15	39,80	17,8930	17,9270	18,0520
16	31,60	16,6630	16,6980	16,8130
17	25,10	15,5410	15,5720	15,6800
18	20,00	14,5150	14,5440	14,6450
19	15,80	13,5790	13,6070	13,7000
20	12,60	12,7190	12,7480	12,8320
21	10,00	11,9330	11,9590	12,0380
22	7,940	11,2080	11,2350	11,3070
23	6,310	10,5460	10,5700	10,6360
24	5,010	9,9363	9,9591	10,0190
25	3,980	9,3754	9,3986	9,4519
26	3,160	8,8582	8,8809	8,9317
27	2,510	8,3863	8,4067	8,4503
28	2,000	7,9485	7,9682	8,0108
29	1,580	7,5483	7,5688	7,6029
30	1,260	7,1800	7,1985	7,2295
31	1,000	6,8380	6,8556	6,8845
32	0,7940	6,5224	6,5403	6,5656
33	0,6310	6,2313	6,2486	6,2695
34	0,5010	5,9598	5,9788	5,9955
35	0,3980	5,7087	5,7249	5,7387
36	0,3160	5,4908	5,5060	5,4996
37	0,2510	5,2808	5,2950	5,2936
38	0,2000	5,0821	5,0955	5,0942
39	0,1580	4,8942	4,9055	4,9033
40	0,1260	4,7135	4,7243	4,7209
41	0,1000	4,4812	4,4909	4,4865
42	0,0794	4,2782	4,2875	4,3733
43	0,0631	4,0899	4,0985	4,2226
44	0,0501	4,0505	4,0452	4,0717
45	0,0398	3,9199	3,9205	3,9331
46	0,0316	3,7981	3,7824	3,7883
47	0,0251	3,6100	3,5952	3,5993
48	0,0200	3,4393	3,3795	3,4284
49	0,0159	3,3396	3,2983	3,1418
50	0,0126	3,2461	3,1104	3,2383
51	0,0100	3,2241	2,9313	3,1464

### A.9 Fluido base água sem adensante – 35°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,5038	1,5844	1,7095
2	0,0126	1,8907	1,9431	2,1004
3	0,0158	2,3349	2,4415	2,5598
4	0,0200	2,9187	3,0658	3,0581
5	0,0251	3,1977	3,3154	3,3271
6	0,0316	3,4299	3,5384	3,5468
7	0,0398	3,6541	3,7551	3,7599
8	0,0501	3,8695	3,9440	3,9437
9	0,0631	4,0613	4,1380	4,1345
10	0,0794	4,2598	4,3349	4,3268
11	0,1000	4,4605	4,5293	4,5213
12	0,1260	4,7048	4,7737	4,7639
13	0,1580	4,8699	4,9367	4,9245
14	0,2000	5,0723	5,1363	5,1241
15	0,2510	5,2862	5,3486	5,3489
16	0,3160	5,5220	5,5858	5,5610
17	0,3980	5,7472	5,8251	5,8047
18	0,5010	5,9859	6,0504	6,0289
19	0,6310	6,2687	6,3230	6,3041
20	0,7940	6,5633	6,6167	6,5980
21	1,000	6,8772	6,9274	6,9119
22	1,260	7,2166	7,2617	7,2491
23	1,580	7,5793	7,6250	7,6106
24	2,000	7,9710	8,0167	7,9993
25	2,510	8,3976	8,4373	8,4255
26	3,160	8,8553	8,8886	8,8821
27	3,980	9,3500	9,3842	9,3739
28	5,010	9,9638	10,0140	10,0070
29	6,310	10,5520	10,5950	10,5950
30	7,940	11,1860	11,2280	11,2300
31	10,00	11,8740	11,9100	11,9200
32	12,60	12,6200	12,6510	12,6730
33	15,80	13,4310	13,4520	13,4860
34	20,00	14,3140	14,3300	14,3730
35	25,10	15,2790	15,2900	15,3410
36	31,60	16,3360	16,3400	16,4050
37	39,80	17,4910	17,4940	17,5690
38	50,10	18,7540	18,7590	18,8400
39	63,10	20,1440	20,1390	20,2390
40	79,40	21,6680	21,6630	21,7680
41	100,0	23,3450	23,3280	23,4530
42	126,0	25,1810	25,1490	25,2980
43	158,0	27,1960	27,1530	27,3150
44	200,0	29,4460	29,3690	29,5560
45	251,0	31,9290	31,8160	32,0650
46	316,0	33,9910	34,3690	34,6830
47	398,0	37,0200	37,1770	37,5280
48	501,0	40,1380	40,3870	40,6570
49	631,0	43,8620	44,1440	44,3460
50	794,0	48,1430	48,6560	48,8760
51	1000	53,5370	53,7110	53,7550

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	53,3820	53,5210	53,6470
2	794,0	47,6600	47,8040	47,9840
3	631,0	42,9620	43,1790	43,3040
4	501,0	39,0460	39,2700	39,4060
5	398,0	35,6410	35,8370	35,9660
6	316,0	32,6400	32,7890	32,8970
7	251,0	29,9680	30,0820	30,1780
8	199,0	27,5420	27,6390	27,7180
9	158,0	25,3670	25,4450	25,5080
10	126,0	23,3950	23,4610	23,5240
11	100,0	21,6200	21,6740	21,7320
12	79,40	20,0160	20,0600	20,1140
13	63,10	18,5700	18,6050	18,6490
14	50,10	17,2550	17,2820	17,3260
15	39,80	16,0580	16,0800	16,1250
16	31,60	14,9650	14,9870	15,0280
17	25,10	13,9670	13,9890	14,0220
18	20,00	13,0550	13,0760	13,1050
19	15,80	12,2180	12,2400	12,2640
20	12,60	11,4510	11,4720	11,4930
21	10,00	10,7450	10,7680	10,7860
22	7,940	10,0950	10,1200	10,1360
23	6,310	9,4989	9,5265	9,5369
24	5,010	8,9500	8,9792	8,9864
25	3,980	8,4446	8,4755	8,4805
26	3,160	7,9785	8,0097	8,0157
27	2,510	7,5503	7,5857	7,5857
28	2,000	7,1552	7,1900	7,1932
29	1,580	6,7928	6,8285	6,8286
30	1,260	6,4558	6,4945	6,4905
31	1,000	6,1433	6,1831	6,1808
32	0,7940	5,8556	5,8951	5,8931
33	0,6310	5,5876	5,6284	5,6247
34	0,5010	5,3365	5,3786	5,3748
35	0,3980	5,1185	5,1616	5,1560
36	0,3160	4,9062	4,9504	4,9433
37	0,2510	4,7034	4,7424	4,7369
38	0,2000	4,5040	4,5516	4,5412
39	0,1580	4,3174	4,3697	4,3625
40	0,1260	4,0860	4,1390	4,1324
41	0,1000	3,8814	3,9348	3,9310
42	0,0794	3,7985	3,8544	3,8514
43	0,0631	3,6480	3,7204	3,7032
44	0,0501	3,5107	3,5799	3,5810
45	0,0398	3,3817	3,4495	3,4390
46	0,0316	3,1945	3,2611	3,2519
47	0,0251	3,0258	3,0891	3,0822
48	0,0200	2,8680	2,9307	2,9221
49	0,0159	2,4031	2,5528	2,7514
50	0,0126	2,0083	2,0537	2,7694
51	0,0100	2,6414	2,2599	2,9911

# A.10 Fluido base água sem adensante – 45°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,3954	2,3263	1,5149
2	0,0126	2,2677	2,3528	1,9115
3	0,0158	2,6467	2,5622	2,3881
4	0,0200	2,7275	3,0469	2,6355
5	0,0251	2,9518	2,9507	2,8609
6	0,0316	3,1779	3,1817	3,0848
7	0,0398	3,3997	3,4056	3,3071
8	0,0501	3,6169	3,6245	3,5257
9	0,0631	3,8074	3,8124	3,7247
10	0,0794	4,0035	4,0045	3,9273
11	0,1000	4,2016	4,1997	4,1324
12	0,1260	4,4034	4,3987	4,3405
13	0,1580	4,6506	4,6441	4,5888
14	0,2000	4,8184	4,8075	4,7637
15	0,2510	5,0175	5,0017	4,9690
16	0,3160	5,2332	5,1987	5,1803
17	0,3980	5,4757	5,4412	5,4256
18	0,5010	5,7061	5,6690	5,6757
19	0,6310	5,9711	5,9316	5,9375
20	0,7940	6,2477	6,2061	6,2131
21	1,000	6,5408	6,4975	6,5058
22	1,260	6,8564	6,8109	6,8202
23	1,580	7,1931	7,1449	7,1595
24	2,000	7,5555	7,5033	7,5250
25	2,510	7,9513	7,8964	7,9181
26	3,160	8,3765	8,3195	8,3421
27	3,980	8,8355	8,8560	8,8020
28	5,010	9,3347	9,3575	9,3594
29	6,310	9,9102	9,9017	9,8990
30	7,940	10,4950	10,4870	10,4850
31	10,00	11,1280	11,1210	11,1170
32	12,60	11,8130	11,8080	11,7990
33	15,80	12,5560	12,5510	12,5370
34	20,00	13,3610	13,3570	13,3390
35	25,10	14,2360	14,2310	14,2120
36	31,60	15,1920	15,1860	15,1650
37	39,80	16,2340	16,2290	16,2050
38	50,10	17,3720	17,3690	17,3390
39	63,10	18,6090	18,6150	18,5810
40	79,40	19,9710	19,9810	19,9430
41	100,0	21,4650	21,4820	21,4410
42	126,0	23,1000	23,1240	23,0790
43	158,0	24,8930	24,9300	24,8870
44	200,0	26,8930	26,9420	26,8960
45	251,0	29,0890	29,1770	29,1000
46	316,0	31,0850	31,4710	31,3900
47	398,0	33,7690	33,8470	33,8470
48	501,0	36,5550	36,5990	36,7250
49	631,0	39,7950	39,9620	39,9010
50	794,0	43,5920	43,9320	43,9040
51	1000	48,0480	48,5760	48,5870

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	47,9210	48,4510	48,4610
2	794,0	42,9490	43,3280	43,2670
3	631,0	38,8640	39,1280	39,0970
4	501,0	35,3520	35,6550	35,5500
5	398,0	32,2840	32,5850	32,4720
6	316,0	29,5940	29,8580	29,7520
7	251,0	27,2070	27,4490	27,3470
8	199,0	25,0260	25,2630	25,1770
9	158,0	23,0890	23,2950	23,2150
10	126,0	21,3330	21,5170	21,4500
11	100,0	19,7430	19,9070	19,8540
12	79,40	18,3040	18,4550	18,4070
13	63,10	17,0020	17,1400	17,0940
14	50,10	15,8170	15,9430	15,9010
15	39,80	14,7350	14,8500	14,8130
16	31,60	13,7440	13,8500	13,8180
17	25,10	12,8370	12,9340	12,9070
18	20,00	12,0020	12,0930	12,0700
19	15,80	11,2350	11,3200	11,3010
20	12,60	10,5280	10,6090	10,5940
21	10,00	9,8783	9,9546	9,9422
22	7,940	9,2789	9,3519	9,3442
23	6,310	8,7293	8,7951	8,7913
24	5,010	8,2221	8,2844	8,2834
25	3,980	7,7549	7,8141	7,8166
26	3,160	7,3237	7,3807	7,3865
27	2,510	6,9282	6,9803	6,9888
28	2,000	6,5609	6,6126	6,6245
29	1,580	6,2247	6,2727	6,2863
30	1,260	5,9127	5,9574	5,9720
31	1,000	5,6216	5,6634	5,6819
32	0,7940	5,3508	5,3888	5,4135
33	0,6310	5,0975	5,1383	5,1613
34	0,5010	4,8734	4,9187	4,9400
35	0,3980	4,6640	4,7064	4,7294
36	0,3160	4,4630	4,5040	4,5287
37	0,2510	4,2735	4,3143	4,3381
38	0,2000	4,0914	4,1322	4,1559
39	0,1580	3,8639	3,9693	3,9975
40	0,1260	3,6625	3,7443	3,7702
41	0,1000	3,4712	3,6411	3,6661
42	0,0794	3,4127	3,5010	3,5142
43	0,0631	3,2897	3,3597	3,3790
44	0,0501	3,1598	3,2195	3,2507
45	0,0398	3,0167	3,0791	3,1182
46	0,0316	2,8321	2,8933	2,9277
47	0,0251	2,6637	2,7247	2,7556
48	0,0200	2,5048	2,5657	2,5942
49	0,0159	2,2928	2,5265	2,4409
50	0,0126	1,7982	2,5225	2,2121
51	0,0100	2,3847	2,3116	1,7746

# A.11 Fluido base óleo adensado – 5°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,3307	3,4822	1,3397
2	0,0126	1,4313	1,3768	1,3946
3	0,0158	1,5184	1,4870	1,5199
4	0,0200	1,6971	1,6784	1,7015
5	0,0251	1,9530	1,9429	1,9487
6	0,0316	2,2909	2,2875	2,2719
7	0,0398	2,7333	2,7424	2,6981
8	0,0501	3,3347	3,3724	3,2947
9	0,0631	4,1497	4,1822	4,0277
10	0,0794	3,6466	3,5958	3,5319
11	0,1000	4,6510	4,6302	4,5124
12	0,1260	5,7003	5,6969	5,5575
13	0,1580	7,0397	7,1095	6,9771
14	0,2000	8,6267	8,6614	8,4916
15	0,2510	10,3710	10,4080	10,2100
16	0,3160	11,5650	11,3880	11,3620
17	0,3980	12,5060	12,4100	12,3080
18	0,5010	13,3480	13,2310	13,1720
19	0,6310	13,0870	12,8290	12,8450
20	0,7940	13,1340	12,8560	12,8480
21	1,000	13,2230	12,9850	12,9830
22	1,260	13,3010	13,0580	13,1020
23	1,580	13,4660	13,2100	13,1790
24	2,000	13,4680	13,2750	13,2750
25	2,510	12,7220	12,5000	12,5270
26	3,160	12,8980	12,6670	12,6930
27	3,980	13,1610	12,9280	12,9550
28	5,010	13,5650	13,3320	13,3560
29	6,310	14,0810	13,8470	13,8670
30	7,940	14,7950	14,5490	14,6250
31	10,00	15,7070	15,4500	15,4920
32	12,60	16,7660	16,4950	16,5200
33	15,80	18,0630	17,7790	17,7960
34	20,00	19,6220	19,3150	19,3310
35	25,10	21,4720	21,1370	21,1540
36	31,60	23,5530	23,1930	23,2170
37	39,80	26,0240	25,6290	25,6740
38	50,10	28,9250	28,4880	28,5690
39	63,10	32,3180	31,8480	31,9620
40	79,40	36,4300	35,7600	35,7070
41	100,0	40,5450	40,0550	40,2920
42	126,0	45,3620	44,9960	44,9770
43	158,0	50,9950	50,5030	50,5270
44	200,0	57,0800	56,6770	56,5370
45	251,0	64,6330	64,1160	64,0910
46	316,0	73,6230	73,0130	73,0610
47	398,0	83,5710	82,6400	83,3260
48	501,0	95,8350	95,0110	95,0420
49	631,0	109,0500	109,1000	109,1700
50	794,0	125,3800	125,0800	125,0900
51	1000	143,3800	142,3900	141,8400

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	142,8200	141,8300	141,2900
2	794,0	118,1000	117,2900	116,8400
3	631,0	98,3710	97,7110	97,3510
4	501,0	82,2750	81,7560	81,4530
5	398,0	69,2730	68,8230	68,5930
6	316,0	58,4030	58,0010	57,8320
7	251,0	49,3470	49,0000	48,8570
8	199,0	41,7680	41,4270	41,3310
9	158,0	35,4410	35,1220	35,0610
10	126,0	30,2050	29,9120	29,8740
11	100,0	25,8730	25,6060	25,5870
12	79,40	22,3870	22,1430	22,1260
13	63,10	19,4840	19,2510	19,2370
14	50,10	17,0830	16,8500	16,8380
15	39,80	15,1450	14,8630	14,8510
16	31,60	13,4590	13,2180	13,2030
17	25,10	12,0760	11,8590	11,8460
18	20,00	10,9360	10,7400	10,6830
19	15,80	10,0040	9,8123	9,8365
20	12,60	9,2411	9,0554	9,0670
21	10,00	8,6195	8,4397	8,4473
22	7,940	8,1164	7,9403	7,9503
23	6,310	7,7150	7,5429	7,5503
24	5,010	7,3716	7,2285	7,2379
25	3,980	7,1478	7,0120	6,9969
26	3,160	6,9785	6,8275	6,8202
27	2,510	6,8914	6,7339	6,7274
28	2,000	6,8439	6,7036	6,6934
29	1,580	6,8568	6,7202	6,6607
30	1,260	6,8822	6,7250	6,6778
31	1,000	6,9189	6,7387	6,7015
32	0,7940	6,9570	6,7653	6,7547
33	0,6310	7,0283	6,8540	6,8093
34	0,5010	7,0849	6,9109	6,8936
35	0,3980	7,1504	7,0029	6,9464
36	0,3160	6,9999	6,8736	6,8388
37	0,2510	6,6294	6,5223	6,4785
38	0,2000	5,9289	5,8919	5,8254
39	0,1580	5,0278	4,9986	4,9631
40	0,1260	4,2380	4,2119	4,1906
41	0,1000	3,5686	3,5352	3,5239
42	0,0794	2,9897	2,9633	2,9589
43	0,0631	2,5240	2,5118	2,5265
44	0,0501	2,1435	2,1519	2,1580
45	0,0398	1,8193	1,8277	1,8350
46	0,0316	1,5618	1,5639	1,5723
47	0,0251	1,3508	1,3530	1,3745
48	0,0200	1,2302	1,2294	1,2496
49	0,0159	1,1326	1,1293	1,1462
50	0,0126	1,0687	1,0638	1,0805
51	0,0100	0,9696	0,9646	0,9914



## A.12 Fluido base óleo adensado – 25°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	2,2901	2,2681	2,1794
2	0,0126	2,5123	2,5020	2,3644
3	0,0158	2,4171	2,4784	2,2421
4	0,0200	2,3073	2,3557	2,1483
5	0,0251	2,2695	2,3092	2,1286
6	0,0316	2,2841	2,3161	2,1599
7	0,0398	2,3504	2,3722	2,2430
8	0,0501	2,4736	2,4878	2,3860
9	0,0631	2,8038	2,7942	2,7036
10	0,0794	2,8678	3,0664	2,6965
11	0,1000	3,0530	3,0442	3,0481
12	0,1260	3,5787	3,5652	3,5161
13	0,1580	4,1554	4,1382	4,1116
14	0,2000	4,8387	4,8159	4,7953
15	0,2510	5,5944	5,5610	5,5764
16	0,3160	6,4545	6,4068	6,4556
17	0,3980	7,2946	7,2324	7,2536
18	0,5010	8,2614	8,1846	8,2347
19	0,6310	8,7387	8,6533	8,7183
20	0,7940	9,1593	9,1022	9,3145
21	1,000	9,6666	9,5535	9,7678
22	1,260	10,0730	10,0310	10,2640
23	1,580	10,5510	10,4060	10,6920
24	2,000	10,9410	10,8150	11,1010
25	2,510	11,2690	11,1530	11,4480
26	3,160	11,5560	11,4470	11,7500
27	3,980	11,8520	11,7460	12,0620
28	5,010	12,1160	12,0150	12,3490
29	6,310	12,3800	12,2810	12,6300
30	7,940	12,6590	12,5650	12,9290
31	10,00	12,9780	12,8870	13,2760
32	12,60	13,4070	13,3150	13,7380
33	15,80	13,9260	13,8340	14,2960
34	20,00	14,5750	14,4810	14,9880
35	25,10	15,3880	15,2890	15,8520
36	31,60	16,3430	16,2910	16,9200
37	39,80	17,6030	17,4650	18,1680
38	50,10	19,0640	18,9280	19,7140
39	63,10	20,8570	20,7130	21,5930
40	79,40	22,9450	22,8720	23,7610
41	100,0	25,5990	25,4770	26,4890
42	126,0	28,6100	28,6900	29,8060
43	158,0	31,9900	31,9490	32,9580
44	200,0	36,1540	35,9160	36,8220
45	251,0	40,5340	40,4720	41,2850
46	316,0	46,0560	45,9220	46,6260
47	398,0	52,4320	52,2650	53,0070
48	501,0	59,9360	59,5220	60,1940
49	631,0	68,1530	68,0490	68,3630
50	794,0	77,3450	77,1740	77,4380
51	1000	88,8620	88,6070	88,4120

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	88,5300	88,2920	88,1070
2	794,0	73,5990	73,3950	73,2920
3	631,0	61,6880	61,5170	61,4680
4	501,0	52,0190	51,8790	51,8730
5	398,0	44,0690	43,9510	43,9740
6	316,0	37,4930	37,4040	37,4420
7	251,0	32,0530	31,9850	32,0320
8	199,0	27,5510	27,4920	27,5480
9	158,0	23,8120	23,7640	23,8220
10	126,0	20,7380	20,6990	20,7530
11	100,0	18,2220	18,1970	18,2430
12	79,40	16,1600	16,1440	16,1840
13	63,10	14,4650	14,4540	14,4910
14	50,10	13,0690	13,0600	13,0890
15	39,80	11,9160	11,9080	11,9270
16	31,60	10,9610	10,9530	10,9580
17	25,10	10,1650	10,1590	10,1490
18	20,00	9,4998	9,4931	9,4688
19	15,80	8,9366	8,9294	8,8909
20	12,60	8,4535	8,4442	8,3929
21	10,00	8,0287	8,0189	7,9569
22	7,940	7,6470	7,6340	7,5604
23	6,310	7,2872	7,2940	7,2113
24	5,010	6,9648	6,9596	6,8683
25	3,980	6,6321	6,6233	6,5275
26	3,160	6,2915	6,2797	6,1958
27	2,510	5,9570	5,9444	5,8344
28	2,000	5,6044	5,6066	5,5053
29	1,580	5,2389	5,2368	5,1426
30	1,260	4,8699	4,8664	4,7790
31	1,000	4,5483	4,5260	4,4657
32	0,7940	4,2203	4,2060	4,1476
33	0,6310	3,9344	3,9131	3,8707
34	0,5010	3,6262	3,6133	3,5695
35	0,3980	3,2560	3,2483	3,2098
36	0,3160	2,9498	2,9479	2,9111
37	0,2510	2,8281	2,8324	2,7973
38	0,2000	2,6053	2,6278	2,5616
39	0,1580	2,4787	2,4744	2,4172
40	0,1260	2,2863	2,2871	2,2311
41	0,1000	2,1284	2,1322	2,0749
42	0,0794	1,9851	2,0053	1,9263
43	0,0631	1,8759	1,8933	1,8021
44	0,0501	1,7805	1,7692	1,7046
45	0,0398	1,6647	1,6359	1,6307
46	0,0316	1,5367	1,5044	1,5597
47	0,0251	1,4123	1,3816	1,4483
48	0,0200	1,2971	1,2694	1,3402
49	0,0159	1,1940	1,1703	1,2327
50	0,0126	1,0987	1,0783	1,1380
51	0,0100	1,0117	0,9931	1,0467

### A.13 Fluido base óleo adensado – 45°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	1,4775	1,5202	1,4881
2	0,0126	1,6078	1,6461	1,6131
3	0,0158	1,7403	1,7683	1,7486
4	0,0200	1,9488	1,9777	1,9565
5	0,0251	2,1609	2,1864	2,1655
6	0,0316	2,3666	2,3942	2,3798
7	0,0398	2,5618	2,5950	2,5742
8	0,0501	2,7385	2,7909	2,7628
9	0,0631	2,8927	2,9479	2,9137
10	0,0794	3,0330	3,1104	3,0704
11	0,1000	3,1671	3,2355	3,1958
12	0,1260	3,3723	3,3769	3,4006
13	0,1580	3,5946	3,6215	3,5703
14	0,2000	3,8577	3,9008	3,8964
15	0,2510	4,2086	4,2615	4,2377
16	0,3160	4,6189	4,6946	4,6742
17	0,3980	5,0966	5,1980	5,1767
18	0,5010	5,6258	5,7617	5,7363
19	0,6310	6,2102	6,3802	6,3505
20	0,7940	6,5302	6,7544	6,7167
21	1,000	6,9334	7,1604	7,1148
22	1,260	7,3292	7,5869	7,5193
23	1,580	7,7254	7,9967	7,9396
24	2,000	8,1239	8,4012	8,3747
25	2,510	8,5305	8,8074	8,7577
26	3,160	8,9758	9,2172	9,1563
27	3,980	9,4167	9,6370	9,5698
28	5,010	9,8683	10,1030	10,0310
29	6,310	10,3340	10,5390	10,4970
30	7,940	10,8170	11,0360	10,9420
31	10,00	11,3230	11,5890	11,4980
32	12,60	11,8970	12,1100	12,0650
33	15,80	12,4930	12,7160	12,6130
34	20,00	13,1270	13,3590	13,2600
35	25,10	13,8170	14,0560	13,9610
36	31,60	14,5850	14,8320	14,7400
37	39,80	15,4570	15,7140	15,6260
38	50,10	16,4630	16,7330	16,6460
39	63,10	17,6410	17,9230	17,8360
40	79,40	19,0310	19,3250	19,2400
41	100,0	20,7840	21,0900	21,0060
42	126,0	22,9330	23,2560	23,1690
43	158,0	24,9160	25,1380	25,0570
44	200,0	27,2420	27,6080	27,5030
45	251,0	30,4050	30,5160	30,5270
46	316,0	33,6260	33,9270	33,7700
47	398,0	37,6640	37,7760	37,7850
48	501,0	42,0570	42,2070	42,1550
49	631,0	47,1750	47,3020	47,0610
50	794,0	53,8590	53,7150	53,7370
51	1000	61,7390	61,8280	61,8120

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	1000	61,5260	61,6040	61,5790
2	794,0	51,4820	51,5550	51,5270
3	631,0	43,5870	43,6560	43,6250
4	501,0	37,2020	37,2700	37,2460
5	398,0	31,9840	32,0540	32,0320
6	316,0	27,7130	27,7850	27,7630
7	251,0	24,1330	24,2080	24,1890
8	199,0	21,1350	21,2030	21,1800
9	158,0	18,6490	18,7130	18,6910
10	126,0	16,5560	16,6080	16,5790
11	100,0	14,8000	14,8480	14,8190
12	79,40	13,3410	13,3870	13,3590
13	63,10	12,1060	12,1490	12,1200
14	50,10	11,0460	11,0880	11,0570
15	39,80	10,1280	10,1660	10,1340
16	31,60	9,3206	9,3567	9,3236
17	25,10	8,6020	8,6364	8,6022
18	20,00	7,9550	7,9868	7,9527
19	15,80	7,3653	7,3957	7,3617
20	12,60	6,8478	6,8777	6,8440
21	10,00	6,3642	6,3938	6,3616
22	7,940	5,9368	5,9462	5,9174
23	6,310	5,5351	5,5543	5,5277
24	5,010	5,1672	5,1900	5,1488
25	3,980	4,8320	4,8591	4,8286
26	3,160	4,5274	4,5578	4,5325
27	2,510	4,2502	4,2872	4,2646
28	2,000	4,0008	4,0576	4,0385
29	1,580	3,7769	3,8399	3,8367
30	1,260	3,5804	3,6605	3,6433
31	1,000	3,3920	3,4733	3,4622
32	0,7940	3,2301	3,2994	3,2916
33	0,6310	3,0608	3,1244	3,1195
34	0,5010	2,9152	2,9770	2,9741
35	0,3980	2,7885	2,8431	2,8179
36	0,3160	2,6503	2,6996	2,6843
37	0,2510	2,5216	2,5658	2,5651
38	0,2000	2,3356	2,3770	2,3778
39	0,1580	2,1710	2,2105	2,2126
40	0,1260	2,0198	2,0584	2,0617
41	0,1000	2,0253	2,0488	2,0669
42	0,0794	1,9294	1,9445	1,9465
43	0,0631	1,8192	1,8124	1,8304
44	0,0501	1,6917	1,6946	1,7053
45	0,0398	1,5712	1,5764	1,5862
46	0,0316	1,4587	1,4649	1,4733
47	0,0251	1,3530	1,3604	1,3683
48	0,0200	1,2539	1,2628	1,2696
49	0,0159	1,1631	1,1718	1,1770
50	0,0126	1,0797	1,0818	1,0926
51	0,0100	0,9996	1,0037	1,0137

#### A.14 Fluido base óleo adensado – 65°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	0,4012	0,4225	0,3648
2	0,0126	0,4210	0,4442	0,3841
3	0,0158	0,4466	0,4722	0,4111
4	0,0200	0,4749	0,5041	0,4437
5	0,0251	0,5085	0,5425	0,3385
6	0,0316	0,5476	0,5933	0,3700
7	0,0398	0,5923	0,6466	0,4096
8	0,0501	0,6435	0,7021	0,4508
9	0,0631	0,6507	0,7588	0,4450
10	0,0794	0,7221	0,4678	0,3801
11	0,1000	0,8061	0,5114	0,4256
12	0,1260	0,5321	0,5654	0,4834
13	0,1580	0,5990	0,6317	0,5567
14	0,2000	0,6829	0,7132	0,6493
15	0,2510	0,7867	0,8143	0,7654
16	0,3160	0,9147	0,9381	0,9093
17	0,3980	1,0728	1,0949	1,0943
18	0,5010	1,2712	1,2946	1,3455
19	0,6310	1,5246	1,6090	1,6749
20	0,7940	1,8831	2,1488	2,1424
21	1,000	2,4596	2,7006	2,6913
22	1,260	3,2377	3,3835	3,3788
23	1,580	4,1016	4,2236	4,2320
24	2,000	5,1390	5,1260	5,2032
25	2,510	5,8456	5,3492	5,8746
26	3,160	6,0178	5,6348	6,0554
27	3,980	6,3685	5,9247	6,3828
28	5,010	6,6506	6,1708	6,6738
29	6,310	6,9086	6,4386	6,8856
30	7,940	7,0736	6,6765	7,1548
31	10,00	7,3518	6,9347	7,3928
32	12,60	7,6079	7,1874	7,6197
33	15,80	7,8630	7,4796	7,8830
34	20,00	8,1611	7,8461	8,2229
35	25,10	8,4756	8,2294	8,5745
36	31,60	8,8904	8,6808	8,9939
37	39,80	9,3747	9,2178	9,4525
38	50,10	10,0010	9,8634	10,0650
39	63,10	10,8020	10,7320	10,8960
40	79,40	11,6710	11,5550	11,6750
41	100,0	13,0610	12,9550	13,0790
42	126,0	13,4430	13,7160	13,5040
43	158,0	15,1000	14,8660	15,1000
44	200,0	16,9670	16,7440	16,9360
45	251,0	18,6380	18,6720	18,9930
46	316,0	20,8510	21,3130	21,4390
47	398,0	23,9700	24,5300	24,6900
48	501,0	27,3070	28,3340	27,9420
49	631,0	31,7210	33,3050	32,2490
50	794,0	36,8450	38,2390	37,6530
51	1000	43,7430	45,6310	45,1030

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2.	Replicata 3
1	1000	44,1400	45,4580	44,8300
2	794,0	36,6840	37,7530	37,3120
3	631,0	30,7960	31,6570	31,3250
4	501,0	26,0130	26,7270	26,4770
5	398,0	22,0910	22,6860	22,4990
6	316,0	18,8440	19,3390	19,2060
7	251,0	16,1250	16,5320	16,4260
8	199,0	13,8610	14,2000	14,1170
9	158,0	11,9860	12,2670	12,2000
10	126,0	10,4090	10,6660	10,6040
11	100,0	9,1095	9,3347	9,2814
12	79,40	8,0394	8,2363	8,1875
13	63,10	7,1497	7,3237	7,2762
14	50,10	6,4088	6,5581	6,5134
15	39,80	5,7889	5,9163	5,8773
16	31,60	5,2693	5,3791	5,3437
17	25,10	4,8316	4,9236	4,8934
18	20,00	4,4604	4,5395	4,5123
19	15,80	4,1435	4,2109	4,1867
20	12,60	3,8692	3,9270	3,9065
21	10,00	3,6292	3,6778	3,6622
22	7,940	3,4180	3,4583	3,4477
23	6,310	3,2294	3,2614	3,2548
24	5,010	3,0577	3,0843	3,0807
25	3,980	2,8998	2,9228	2,9216
26	3,160	2,7508	2,7717	2,7730
27	2,510	2,6101	2,6269	2,6281
28	2,000	2,4707	2,4876	2,4905
29	1,580	2,3325	2,3471	2,3533
30	1,260	2,1921	2,2067	2,2095
31	1,000	2,0377	2,0535	2,0545
32	0,7940	1,8646	1,8815	1,8786
33	0,6310	1,6586	1,6783	1,6814
34	0,5010	1,4235	1,4423	1,4428
35	0,3980	1,1928	1,2190	1,2133
36	0,3160	0,9660	0,9967	0,9953
37	0,2510	0,7843	0,8157	0,8173
38	0,2000	0,6361	0,6606	0,6652
39	0,1580	0,5219	0,5518	0,5472
40	0,1260	0,4413	0,4699	0,4581
41	0,1000	0,3718	0,4028	0,3928
42	0,0794	0,3249	0,3472	0,3409
43	0,0631	0,2893	0,3100	0,3030
44	0,0501	0,2605	0,2801	0,2723
45	0,0398	0,2375	0,2557	0,2480
46	0,0316	0,2168	0,2363	0,2222
47	0,0251	0,2008	0,2181	0,2066
48	0,0200	0,1879	0,2047	0,1942
49	0,0159	0,1780	0,1932	0,1841
50	0,0126	0,1689	0,1843	0,1759
51	0,0100	0,1607	0,1759	0,1691

# A.15 Fluido base óleo sem adensante – 5°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	0,5900	0,7705	1,7613
2	0,0126	0,6277	0,8218	0,7782
3	0,0158	0,6889	0,8976	0,8281
4	0,0200	0,7761	0,9959	0,8966
5	0,0251	0,8912	1,1170	0,9813
6	0,0316	1,0361	1,2650	1,0024
7	0,0398	1,2353	1,4424	1,1334
8	0,0501	1,1093	1,1946	1,3171
9	0,0631	1,3099	1,3756	1,5306
10	0,0794	1,6943	1,6430	1,5916
11	0,1000	2,1133	1,9490	1,8424
12	0,1260	2,6403	2,3138	2,1821
13	0,1580	3,3216	2,7614	2,6672
14	0,2000	4,1571	3,3663	3,2618
15	0,2510	5,0820	4,4876	4,0460
16	0,3160	6,0798	5,6535	5,1850
17	0,3980	6,4248	6,5625	6,0627
18	0,5010	6,3134	6,4136	6,9707
19	0,6310	6,3198	6,4306	6,2470
20	0,7940	6,4265	6,4762	6,3278
21	1,000	6,5272	6,5327	6,4129
22	1,260	6,5426	5,8496	6,4229
23	1,580	5,9073	5,9753	5,8921
24	2,000	6,0781	6,1756	6,0212
25	2,510	6,3076	6,3639	6,1353
26	3,160	6,3414	6,3432	6,3386
27	3,980	6,6927	6,7339	6,6803
28	5,010	7,1166	7,1516	7,0895
29	6,310	7,6414	7,6745	7,6026
30	7,940	8,2739	8,3086	8,2056
31	10,00	8,9966	9,0674	8,9808
32	12,60	9,8761	9,9302	9,8523
33	15,80	10,9210	10,9750	10,9390
34	20,00	12,2050	12,2160	12,1640
35	25,10	13,6460	13,7330	13,6770
36	31,60	15,3620	15,4300	15,4400
37	39,80	17,4520	17,5130	17,4410
38	50,10	19,8860	19,9490	19,9030
39	63,10	22,7490	22,7240	22,7720
40	79,40	25,8080	25,8940	25,9460
41	100,0	29,5140	29,4730	29,6560
42	126,0	33,4380	33,5710	33,5760
43	158,0	37,6480	37,8930	37,7850
44	200,0	43,3240	42,7590	42,8090
45	251,0	48,5900	48,6220	48,6070
46	316,0	55,9270	56,2150	56,0190
47	398,0	64,8230	64,9870	64,9440
48	501,0	75,1880	75,5970	75,5480
49	631,0	87,8010	87,6520	87,6820
50	794,0	102,6300	102,5700	102,7200
51	1000	120,5300	121,1500	120,5300

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2.	Replicata 3
1	1000	120,2000	120,8300	120,4300
2	794,0	99,3010	99,6320	98,7230
3	631,0	82,1720	82,5230	81,8160
4	501,0	68,2520	68,5690	68,0540
5	398,0	56,9990	57,2960	56,8920
6	316,0	47,6240	47,8800	47,5200
7	251,0	39,7440	39,8200	39,6620
8	199,0	33,0370	33,1390	32,9660
9	158,0	27,4870	27,5960	27,4180
10	126,0	22,9910	23,0950	22,9320
11	100,0	19,2540	19,3500	19,1960
12	79,40	16,1630	16,2480	16,1070
13	63,10	13,6140	13,6890	13,5620
14	50,10	11,5600	11,6240	11,4710
15	39,80	9,8475	9,9077	9,7867
16	31,60	8,4289	8,4869	8,3849
17	25,10	7,2584	7,3138	7,2242
18	20,00	6,2972	6,3479	6,2685
19	15,80	5,5103	5,5560	5,4860
20	12,60	4,8866	4,9259	4,8665
21	10,00	4,3579	4,3922	4,3428
22	7,940	3,9483	3,9792	3,9368
23	6,310	3,6048	3,6319	3,5946
24	5,010	3,3354	3,3601	3,3244
25	3,980	3,1406	3,1630	3,1258
26	3,160	3,0084	3,0259	2,9766
27	2,510	2,9466	2,9463	2,8705
28	2,000	3,0117	3,0102	2,9193
29	1,580	3,4045	3,5504	3,4002
30	1,260	3,6262	3,6259	3,4910
31	1,000	3,7276	3,7308	3,6852
32	0,7940	3,8904	3,8726	3,7964
33	0,6310	4,0343	3,9885	3,8983
34	0,5010	4,1878	4,0949	4,0303
35	0,3980	4,0310	3,9826	3,9236
36	0,3160	3,9921	4,0652	3,9462
37	0,2510	3,4746	3,5885	3,4609
38	0,2000	3,0408	3,1679	3,0469
39	0,1580	2,5740	2,7115	2,5932
40	0,1260	2,1653	2,3042	2,1923
41	0,1000	1,8197	1,9584	1,8514
42	0,0794	1,5339	1,6722	1,5702
43	0,0631	1,3018	1,4395	1,3411
44	0,0501	1,1171	1,2519	1,1568
45	0,0398	0,9822	1,1039	1,0262
46	0,0316	0,8664	0,9853	0,9183
47	0,0251	0,7765	0,9104	0,8171
48	0,0200	0,7002	0,8992	0,7389
49	0,0159	0,6528	0,8475	0,6891
50	0,0126	0,6136	0,8229	0,6376
51	0,0100	0,5855	0,7639	0,6646



# A.16 Fluido base óleo sem adensante – 25°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	0,8656	0,9079	0,8378
2	0,0126	0,9811	1,0394	1,0122
3	0,0158	1,1054	1,1582	1,1910
4	0,0200	1,2298	1,2891	1,3205
5	0,0251	1,3524	1,4144	1,4452
6	0,0316	1,4625	1,5244	1,5569
7	0,0398	1,5386	1,5987	1,5949
8	0,0501	1,3836	1,4290	1,6131
9	0,0631	1,5396	1,5942	1,7390
10	0,0794	1,6967	1,7444	1,8639
11	0,1000	1,8512	1,9090	1,8169
12	0,1260	1,8335	1,9470	2,0984
13	0,1580	2,1078	2,1720	2,3190
14	0,2000	2,3517	2,4112	2,5626
15	0,2510	2,6191	2,6865	2,8360
16	0,3160	2,8271	2,8913	3,1384
17	0,3980	3,1374	3,2053	3,1680
18	0,5010	3,2139	3,2716	3,3432
19	0,6310	3,4206	3,4700	3,5382
20	0,7940	3,6287	3,6747	3,7368
21	1,000	3,8533	3,8939	3,9509
22	1,260	4,0854	4,1254	4,1769
23	1,580	4,3235	4,3447	4,3917
24	2,000	4,5326	4,5616	4,6032
25	2,510	4,7612	4,7937	4,8310
26	3,160	4,9887	5,0216	5,0564
27	3,980	5,2231	5,2739	5,2896
28	5,010	5,4920	5,5369	5,5440
29	6,310	5,7837	5,8264	5,8411
30	7,940	6,1141	6,1554	6,1762
31	10,00	6,5001	6,5407	6,5669
32	12,60	6,9589	6,9994	7,0296
33	15,80	7,5092	7,5506	7,5855
34	20,00	8,1737	8,2165	8,2559
35	25,10	8,9772	9,0207	9,0649
36	31,60	9,9463	9,9910	10,0400
37	39,80	11,0730	11,1170	11,1700
38	50,10	12,4370	12,4820	12,5370
39	63,10	14,0660	14,1110	14,1690
40	79,40	15,9360	15,9810	16,0400
41	100,0	18,1580	18,2040	18,2610
42	126,0	20,9110	20,9550	21,0060
43	158,0	23,6460	23,6960	23,7440
44	200,0	26,9530	26,8810	27,0430
45	251,0	30,8370	30,6790	30,7820
46	316,0	35,3490	35,2540	35,3260
47	398,0	40,6390	40,7410	40,7850
48	501,0	47,0880	46,9620	46,9910
49	631,0	54,7170	54,6380	54,6610
50	794,0	63,8740	63,8220	63,8160
51	1000	74,9710	74,8910	74,8970

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2.	Replicata 3
1	1000	74,7380	74,6600	74,6620
2	794,0	61,7940	61,7290	61,7280
3	631,0	51,4490	51,3980	51,4000
4	501,0	42,9660	42,9160	42,9220
5	398,0	35,9480	35,8940	35,9120
6	316,0	30,1150	30,0840	30,0920
7	251,0	25,2670	25,2370	25,2400
8	199,0	21,2260	21,1950	21,1960
9	158,0	17,8640	17,8410	17,8430
10	126,0	15,0810	15,0630	15,0630
11	100,0	12,7890	12,7760	12,7770
12	79,40	10,9130	10,9040	10,9020
13	63,10	9,3808	9,3739	9,3718
14	50,10	8,1311	8,1268	8,1245
15	39,80	7,1126	7,1098	7,1071
16	31,60	6,2806	6,2788	6,2758
17	25,10	5,5982	5,5965	5,5935
18	20,00	5,0337	5,0325	5,0292
19	15,80	4,5622	4,5611	4,5577
20	12,60	4,1635	4,1619	4,1592
21	10,00	3,8206	3,8188	3,8164
22	7,940	3,5212	3,5195	3,5166
23	6,310	3,2523	3,2506	3,2491
24	5,010	3,0069	3,0060	3,0041
25	3,980	2,7786	2,7765	2,7763
26	3,160	2,5679	2,5591	2,5664
27	2,510	2,3614	2,3553	2,3604
28	2,000	2,1568	2,1594	2,1563
29	1,580	1,9577	1,9578	1,9591
30	1,260	1,7696	1,7706	1,7726
31	1,000	1,5830	1,5956	1,5887
32	0,7940	1,4198	1,4282	1,4278
33	0,6310	1,2972	1,3072	1,3081
34	0,5010	1,1855	1,1841	1,1954
35	0,3980	1,1026	1,1122	1,1194
36	0,3160	0,9704	1,0321	1,0464
37	0,2510	0,9414	0,9281	0,9515
38	0,2000	0,8679	0,8596	0,8778
39	0,1580	0,7636	0,7654	0,7756
40	0,1260	0,6833	0,6927	0,6881
41	0,1000	0,6288	0,6196	0,6099
42	0,0794	0,5649	0,5510	0,5406
43	0,0631	0,5040	0,4889	0,4793
44	0,0501	0,4480	0,4343	0,4255
45	0,0398	0,3987	0,3870	0,3787
46	0,0316	0,3551	0,3472	0,3382
47	0,0251	0,3188	0,3125	0,3044
48	0,0200	0,2871	0,2819	0,2748
49	0,0159	0,2590	0,2548	0,2484
50	0,0126	0,2341	0,2303	0,2253
51	0,0100	0,2129	0,2093	0,2042

# A.17 Fluido base óleo sem adensante – 45°C

Ponto	Curva Ascendente			
	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	0,6577	0,7097	0,6859
2	0,0126	0,2839	0,7648	0,7437
3	0,0158	0,3027	0,3323	0,7958
4	0,0200	0,3264	0,3515	0,3668
5	0,0251	0,3562	0,3757	0,3908
6	0,0316	0,3920	0,4048	0,4198
7	0,0398	0,4339	0,4395	0,4522
8	0,0501	0,4851	0,4811	0,4913
9	0,0631	0,5432	0,5333	0,5373
10	0,0794	0,6131	0,5936	0,5901
11	0,1000	0,7030	0,6610	0,6490
12	0,1260	0,8145	0,7428	0,7192
13	0,1580	0,9473	0,8312	0,8016
14	0,2000	1,1067	0,9439	1,1279
15	0,2510	1,3035	1,0990	1,3543
16	0,3160	1,5399	1,2895	1,6183
17	0,3980	1,8583	1,5870	1,9323
18	0,5010	2,2453	1,9111	2,2977
19	0,6310	2,7679	2,4421	2,7418
20	0,7940	3,3933	3,1435	3,2884
21	1,000	4,3241	4,0590	3,8981
22	1,260	5,0053	4,6978	4,5717
23	1,580	5,7783	5,4296	5,3433
24	2,000	5,3505	6,2326	6,3651
25	2,510	5,3781	5,3272	5,3627
26	3,160	5,4452	5,4017	5,4245
27	3,980	5,5530	5,5143	5,5296
28	5,010	5,7048	5,6503	5,6783
29	6,310	5,8603	5,8349	5,8320
30	7,940	6,0770	6,0748	6,0468
31	10,00	6,3325	6,3238	6,3015
32	12,60	6,6593	6,6239	6,6268
33	15,80	7,0087	6,9790	6,9742
34	20,00	7,4279	7,3988	7,3906
35	25,10	7,9240	7,8956	7,8844
36	31,60	8,5110	8,4830	8,4680
37	39,80	9,1682	9,1406	9,1217
38	50,10	9,9559	9,9284	9,9060
39	63,10	10,8450	10,8170	10,7920
40	79,40	11,9060	11,8770	11,8510
41	100,0	13,1790	13,2040	13,1270
42	126,0	14,9370	14,9640	14,5640
43	158,0	16,1950	16,1860	16,1130
44	200,0	18,2250	18,1400	18,1520
45	251,0	20,6920	20,6370	20,6290
46	316,0	23,5810	23,5360	23,5260
47	398,0	27,1370	27,0780	27,0890
48	501,0	31,3390	31,2740	31,6530
49	631,0	36,5910	36,6510	36,5980
50	794,0	43,6790	43,5180	43,6540
51	1000	50,9800	50,9640	50,9930

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2.	Replicata 3
1	1000	50,8100	50,7920	50,8240
2	794,0	42,0580	42,0380	42,0530
3	631,0	35,0680	35,0420	35,0470
4	501,0	29,3840	29,3590	29,3560
5	398,0	24,7140	24,6900	24,6840
6	316,0	20,8540	20,8270	20,8260
7	251,0	17,6430	17,6220	17,6230
8	199,0	14,9770	14,9570	14,9560
9	158,0	12,7660	12,7470	12,7460
10	126,0	10,9510	10,9300	10,9300
11	100,0	9,4703	9,4494	9,4455
12	79,40	8,2990	8,2790	8,2734
13	63,10	7,3397	7,3231	7,3184
14	50,10	6,5593	6,5458	6,5449
15	39,80	5,9218	5,9102	5,9142
16	31,60	5,3955	5,3847	5,3929
17	25,10	4,9564	4,9456	4,9562
18	20,00	4,5761	4,5638	4,5869
19	15,80	4,2618	4,2473	4,2630
20	12,60	3,9954	3,9884	3,9928
21	10,00	3,7692	3,7536	3,7635
22	7,940	3,5751	3,5570	3,5667
23	6,310	3,4166	3,3880	3,4065
24	5,010	3,2692	3,2530	3,2567
25	3,980	3,1462	3,1310	3,1409
26	3,160	3,0507	3,0278	3,0379
27	2,510	2,9662	2,9408	2,9489
28	2,000	2,8913	2,8650	2,8741
29	1,580	2,8269	2,7974	2,8163
30	1,260	2,7851	2,7485	2,7593
31	1,000	2,7291	2,6945	2,7134
32	0,7940	2,6764	2,6425	2,6564
33	0,6310	2,5992	2,5763	2,5820
34	0,5010	2,4645	2,4414	2,4350
35	0,3980	2,1699	2,1786	2,1452
36	0,3160	1,8913	1,8786	1,8434
37	0,2510	1,6223	1,5874	1,5669
38	0,2000	1,3595	1,3380	1,3160
39	0,1580	1,1431	1,1308	1,1226
40	0,1260	0,9889	0,9787	0,9696
41	0,1000	0,8623	0,8640	0,8412
42	0,0794	0,7619	0,7620	0,7326
43	0,0631	0,6827	0,6960	0,6470
44	0,0501	0,6121	0,6245	0,5745
45	0,0398	0,5513	0,5779	0,5147
46	0,0316	0,4999	0,5374	0,4622
47	0,0251	0,4632	0,5028	0,4195
48	0,0200	0,4315	0,4749	0,3877
49	0,0159	0,4048	0,4273	0,3614
50	0,0126	0,3825	0,4082	0,3395
51	0,0100	0,3618	0,3894	0,3186

# A.18 Fluido base óleo sem adensante – 65°C

Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Curva Ascendente		
		Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2	Replicata 3
1	0,0100	0,2800	0,2366	0,0931
2	0,0126	0,1284	0,2045	0,0951
3	0,0158	0,1159	0,1055	0,1000
4	0,0200	0,1071	0,1068	0,0939
5	0,0251	0,1053	0,1066	0,0979
6	0,0316	0,1015	0,1108	0,1081
7	0,0398	0,1077	0,1173	0,1188
8	0,0501	0,1117	0,1251	0,1327
9	0,0631	0,1151	0,1338	0,1473
10	0,0794	0,1242	0,1507	0,1702
11	0,1000	0,1303	0,1714	0,1988
12	0,1260	0,1315	0,1908	0,2278
13	0,1580	0,1403	0,2200	0,2700
14	0,2000	0,1599	0,2561	0,3126
15	0,2510	0,1687	0,2897	0,3630
16	0,3160	0,1967	0,3365	0,4359
17	0,3980	0,2628	0,3966	0,5244
18	0,5010	0,3093	0,4700	0,4506
19	0,6310	0,3679	0,5598	0,4806
20	0,7940	0,4414	0,5888	0,6049
21	1,000	0,5371	0,7027	0,7635
22	1,260	0,9494	0,9012	0,9239
23	1,580	1,2281	1,3596	1,4533
24	2,000	1,4916	1,6367	1,7343
25	2,510	1,9475	1,9584	2,0937
26	3,160	2,2288	2,1431	2,1132
27	3,980	2,1540	2,1859	2,2529
28	5,010	2,3250	2,3293	2,4384
29	6,310	2,5284	2,5213	2,6551
30	7,940	2,7737	2,8213	2,9044
31	10,00	2,7376	3,0849	2,9942
32	12,60	2,9465	3,1129	3,1664
33	15,80	3,1616	3,3180	3,3893
34	20,00	3,4347	3,5999	3,6707
35	25,10	3,7727	3,9353	4,0064
36	31,60	4,1526	4,3339	4,4051
37	39,80	4,6059	4,8055	4,8774
38	50,10	5,1835	5,3452	5,4397
39	63,10	5,8180	6,0391	6,1363
40	79,40	6,6853	6,8946	6,9699
41	100,0	7,7146	7,9482	8,0347
42	126,0	8,9472	9,2325	9,3258
43	158,0	9,8215	10,1480	10,3320
44	200,0	11,4100	11,7960	12,0560
45	251,0	13,3600	13,6410	14,0380
46	316,0	15,5270	16,0050	16,2990
47	398,0	18,1300	18,6430	18,9440
48	501,0	21,3180	21,9410	22,3560
49	631,0	25,3660	26,1690	25,7620
50	794,0	28,9050	29,8000	30,0500
51	1000	33,6570	34,7400	35,1970

Curva Descendente				
Ponto	Taxa de cisalhamento [1/s]	Tensão de cisalhamento [Pa]		
		Replicata 1	Replicata 2.	Replicata 3
1	1000	33,5310	34,6120	35,0630
2	794,0	27,7150	28,6130	28,9820
3	631,0	23,0680	23,8180	24,1180
4	501,0	19,3040	19,9290	20,1750
5	398,0	16,2220	16,7470	16,9480
6	316,0	13,6690	14,1210	14,2760
7	251,0	11,5480	11,9310	12,0580
8	199,0	9,7797	10,1080	10,2150
9	158,0	8,3085	8,5924	8,6859
10	126,0	7,0828	7,3314	7,4149
11	100,0	6,0641	6,2851	6,3573
12	79,40	5,2183	5,4178	5,4801
13	63,10	4,5183	4,6998	4,7535
14	50,10	3,9351	4,1029	4,1514
15	39,80	3,4474	3,6055	3,6518
16	31,60	3,0394	3,1921	3,2360
17	25,10	2,6974	2,8486	2,8914
18	20,00	2,4155	2,5645	2,6070
19	15,80	2,1821	2,3299	2,3720
20	12,60	1,9892	2,1361	2,1772
21	10,00	1,8286	1,9740	2,0144
22	7,940	1,6952	1,8381	1,8773
23	6,310	1,5802	1,7196	1,7567
24	5,010	1,4817	1,6174	1,6534
25	3,980	1,3945	1,5273	1,5609
26	3,160	1,3175	1,4441	1,4775
27	2,510	1,2447	1,3645	1,3965
28	2,000	1,1719	1,2902	1,3186
29	1,580	1,1025	1,2087	1,2406
30	1,260	1,0284	1,1323	1,1573
31	1,000	0,9527	1,0449	1,0624
32	0,7940	0,8634	0,9374	0,9555
33	0,6310	0,7559	0,8169	0,8278
34	0,5010	0,6445	0,6936	0,7007
35	0,3980	0,5345	0,5579	0,5662
36	0,3160	0,4353	0,4436	0,4569
37	0,2510	0,3550	0,3757	0,3772
38	0,2000	0,2944	0,3162	0,3208
39	0,1580	0,2456	0,2713	0,2770
40	0,1260	0,2087	0,2354	0,2406
41	0,1000	0,1789	0,2097	0,2131
42	0,0794	0,1552	0,1879	0,1899
43	0,0631	0,1377	0,1694	0,1694
44	0,0501	0,1234	0,1537	0,1514
45	0,0398	0,1117	0,1398	0,1362
46	0,0316	0,1023	0,1276	0,1231
47	0,0251	0,0945	0,1162	0,1117
48	0,0200	0,0880	0,1070	0,1015
49	0,0159	0,0824	0,0996	0,0938
50	0,0126	0,0774	0,0932	0,0871
51	0,0100	0,0742	0,0883	0,0816

**B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS CURVAS DE ESCOAMENTO COM  
GEOMETRIA DE PLACAS PARALELAS RANHURADAS:**

**B.1 Fluido aquoso adensado**

Ponto	Taxa de Cisalhamento [1/s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]						
		5°C	15°C	25°C(1)	25°C(2)	25°C(3)	35°C	45°C
1	100,00	29,0110	19,8900	13,8890	14,2340	14,2340	11,5560	9,6096
2	67,400	23,4930	16,1400	11,1100	11,4560	11,4560	9,2623	7,6559
3	45,400	19,3270	13,1540	8,8718	9,1272	9,1272	7,4720	6,1380
4	30,600	15,9660	10,7430	7,1197	7,4213	7,4213	6,0433	4,9425
5	20,600	13,2420	8,7905	5,7215	6,0426	6,0426	4,8914	4,0077
6	13,900	11,0150	7,2378	4,6133	4,9477	4,9477	4,0061	3,2785
7	9,3600	9,2075	6,0030	3,7463	4,0769	4,0769	3,3085	2,7121
8	6,3100	7,7487	5,0150	3,0700	3,3974	3,3974	2,7570	2,2733
9	4,2500	6,5725	4,2474	2,5491	2,8645	2,8645	2,3183	1,9247
10	2,8600	5,6308	3,6416	2,1500	2,4520	2,4520	1,9867	1,6571
11	1,9300	4,8874	3,2125	1,8467	2,1416	2,1416	1,7178	1,4377
12	1,3000	4,3030	2,8828	1,6140	1,8913	1,8913	1,5030	1,2659
13	0,87700	3,8491	2,6346	1,4536	1,7047	1,7047	1,3302	1,1265
14	0,59100	3,4979	2,4528	1,3351	1,5595	1,5595	1,1965	1,0181
15	0,39800	3,2489	2,2977	1,2258	1,4372	1,4372	1,0966	0,9293
16	0,26800	3,0465	2,1944	1,1267	1,3594	1,3594	0,9924	0,8491
17	0,18100	2,8937	2,1085	1,0948	1,3007	1,3007	0,9228	0,7848
18	0,12200	2,7917	2,0608	1,0598	1,2355	1,2355	0,8588	0,7261
19	0,08210	2,6662	2,0027	1,0216	1,1105	1,1105	0,8033	0,6760
20	0,05540	2,4425	1,9663	0,9946	1,1430	1,1430	0,7482	0,6331
21	0,03730	2,2923	1,9159	1,0097	1,1114	1,1114	0,6898	0,5911
22	0,02510	2,5299	1,9020	0,9786	1,1151	1,1151	0,6545	0,5506
23	0,01690	2,5393	1,7584	0,8915	1,0998	1,0998	0,6119	0,4923
24	0,01140	2,3743	1,6469	0,8237	1,0104	1,0104	0,5601	0,4450
25	0,00769	2,4868	1,8299	0,7644	0,9370	0,9370	0,5124	0,4379
26	0,00518	2,3519	1,7265	0,7165	0,8629	0,8629	0,4773	0,4021
27	0,00349	2,2418	1,6272	0,6728	0,8051	0,8051	0,4461	0,3685
28	0,00236	2,1849	1,5594	0,6350	0,7593	0,7593	0,4052	0,3488
29	0,00159	2,0440	1,4783	0,5896	0,7098	0,7098	0,3887	0,3101
30	0,00107	2,0099	1,4265	0,5692	0,6700	0,6700	0,3485	0,2891
31	0,00072	1,8833	1,3825	0,5378	0,6276	0,6276	0,3167	0,2704
32	0,00049	1,8442	1,3281	0,5086	0,5812	0,5812	0,2987	0,2532
33	0,00033	1,7907	1,2831	0,4759	0,5544	0,5544	0,2813	0,2438
34	0,00022	1,7256	1,2264	0,4641	0,5269	0,5269	0,2701	0,2105
35	0,00015	1,6957	1,1892	0,4448	0,5019	0,5019	0,2646	0,1989
36	0,00010	1,6614	1,1421	0,4290	0,4930	0,4930	0,2505	0,1854

## B.2 Fluido aquoso sem adensante

Ponto	Taxa de Cisalhamento [1/s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]						
		5°C	15°C	25°C(1)	25°C(2)	25°C(3)	35°C	45°C
1	100,00	31,8290	22,8220	16,5540	16,4070	17,7200	13,8060	12,4980
2	67,400	26,2800	18,7780	13,5360	13,5210	14,5440	11,3750	10,2290
3	45,400	21,8300	15,5260	11,2000	11,1970	11,9930	9,4198	8,4682
4	30,600	18,2590	12,8850	9,2564	9,3169	9,9279	7,8296	7,0394
5	20,600	15,3560	10,7370	7,6928	7,7662	8,2621	6,5395	5,8758
6	13,900	12,9780	8,9879	6,4608	6,5041	6,9018	5,4846	4,9270
7	9,3600	11,0120	7,5624	5,4432	5,4756	5,7922	4,6195	4,1537
8	6,3100	9,4056	6,4022	4,6199	4,6368	4,8872	3,9138	3,5219
9	4,2500	8,0787	5,4631	3,9557	3,9581	4,1569	3,3428	3,0100
10	2,8600	7,0022	4,7148	3,4217	3,4075	3,5593	2,8708	2,6165
11	1,9300	6,1178	4,1170	2,9816	2,9742	3,0832	2,5243	2,2781
12	1,3000	5,4126	3,6702	2,6187	2,6186	2,7079	2,2089	2,0189
13	0,87700	4,8875	3,2948	2,4208	2,3521	2,4210	1,9750	1,8228
14	0,59100	4,4536	3,0477	2,2145	2,1327	2,1811	1,7643	1,6409
15	0,39800	4,1190	2,8190	2,0232	1,9633	2,0248	1,6228	1,5087
16	0,26800	3,8554	2,6915	1,8787	1,8362	1,8536	1,4990	1,3925
17	0,18100	3,6274	2,5396	1,7470	1,7814	1,7282	1,3587	1,3131
18	0,12200	3,4873	2,4750	1,5667	1,6011	1,5549	1,2111	1,1732
19	0,08210	3,3817	2,2383	1,4132	1,4484	1,4104	1,0918	1,1365
20	0,05530	3,3241	2,0589	1,5433	1,5385	1,5591	1,1341	1,0810
21	0,03730	3,2229	2,2924	1,5373	1,5404	1,5207	1,0697	1,0074
22	0,02510	3,1436	2,2303	1,4762	1,4983	1,4962	0,9685	0,9640
23	0,01690	3,1064	2,0723	1,4171	1,3815	1,3775	0,8854	0,8761
24	0,01140	2,9101	2,1343	1,3162	1,3595	1,3657	0,8274	0,8217
25	0,00769	2,7547	2,0827	1,3028	1,2705	1,2758	0,7659	0,7628
26	0,00518	2,6333	1,9892	1,2329	1,2064	1,2010	0,7086	0,7148
27	0,00349	2,5289	1,9002	1,1680	1,1438	1,1190	0,6622	0,6662
28	0,00235	2,4541	1,8087	1,1058	1,0760	1,0554	0,6048	0,6163
29	0,00158	2,3859	1,7470	1,0305	1,0060	1,0026	0,5726	0,5955
30	0,00107	2,3231	1,6721	0,9723	0,9522	0,9387	0,5491	0,5393
31	0,00072	2,2445	1,6039	0,9212	0,9168	0,8983	0,4796	0,5022
32	0,00049	2,2020	1,5396	0,8877	0,8673	0,8313	0,4552	0,4577
33	0,00033	2,1440	1,5119	0,8701	0,8216	0,8032	0,4355	0,4374
34	0,00022	2,0871	1,4535	0,8181	0,7953	0,7685	0,4186	0,4210
35	0,00015	2,0497	1,4015	0,7749	0,7716	0,7241	0,4016	0,3736
36	0,00010	1,9657	1,3720	0,7356	0,7318	0,7020	0,3680	0,3446



### B.3 Fluido olefínico adensado

Ponto	Taxa de Cisalhamento [1/s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]						
		5°C	15°C	25°C(1)	25°C(2)	25°C(3)	35°C	45°C
1	100,00	18,7660	8,9883	5,9224	5,8438	5,8771	4,4692	3,5898
2	67,400	14,6240	7,4719	4,9077	4,8418	4,8822	3,7320	3,0046
3	45,400	11,5830	6,3390	4,1448	4,0849	4,1287	3,1592	2,5468
4	30,600	9,3319	5,4775	3,5568	3,5039	3,5430	2,7089	2,1869
5	20,600	7,6544	4,8004	3,0887	3,0436	3,0799	2,3501	1,9006
6	13,900	6,3974	4,2697	2,7126	2,6701	2,7042	2,0593	1,6717
7	9,3600	5,4439	3,8460	2,4012	2,3659	2,3953	1,8237	1,4878
8	6,3100	4,7142	3,5018	2,1407	2,1108	2,1378	1,6291	1,3356
9	4,2500	4,1463	3,2210	1,9257	1,8936	1,9196	1,4694	1,2088
10	2,8600	3,7040	2,9774	1,7439	1,7154	1,7388	1,3407	1,1070
11	1,9300	3,3542	2,7925	1,5803	1,5544	1,5779	1,2267	1,0202
12	1,3000	3,0687	2,6066	1,4468	1,4232	1,4431	1,1307	0,9466
13	0,87700	2,8421	2,4477	1,3274	1,3035	1,3209	1,0508	0,8834
14	0,59100	2,6633	2,3090	1,2302	1,2080	1,2252	0,9883	0,8392
15	0,39800	2,5149	2,1904	1,1478	1,1252	1,1424	0,9339	0,7850
16	0,26800	2,3771	2,0582	1,0586	1,0399	1,0574	0,8750	0,7539
17	0,18100	2,2612	1,9584	0,9998	0,9835	0,9930	0,8228	0,7128
18	0,12200	2,1713	1,8523	0,9356	0,9165	0,9320	0,7776	0,6823
19	0,08210	2,0820	1,7496	0,8769	0,8581	0,8725	0,7431	0,6599
20	0,05530	1,9970	1,6521	0,8268	0,8129	0,8229	0,7155	0,6334
21	0,03730	1,9161	1,5691	0,7806	0,7686	0,7772	0,6944	0,6130
22	0,02510	1,8428	1,5093	0,7407	0,7327	0,7320	0,6695	0,5883
23	0,01690	1,7590	1,3966	0,7003	0,6958	0,6822	0,6422	0,5689
24	0,01140	1,6617	1,3686	0,6595	0,6510	0,6642	0,6110	0,5501
25	0,00769	1,6454	1,2836	0,6325	0,6081	0,6351	0,5925	0,5284
26	0,00518	1,5723	1,2621	0,6043	0,5671	0,5867	0,5740	0,5063
27	0,00349	1,5378	1,1819	0,5842	0,5413	0,5537	0,5453	0,4888
28	0,00235	1,4620	1,1022	0,5548	0,5097	0,5362	0,5180	0,4797
29	0,00158	1,3949	1,0384	0,5203	0,4908	0,5040	0,4904	0,4486
30	0,00107	1,3336	0,9733	0,5006	0,4635	0,4737	0,4733	0,4383
31	0,00072	1,2798	0,9303	0,4699	0,4351	0,4499	0,4506	0,4210
32	0,00049	1,2283	0,8795	0,4423	0,4100	0,4285	0,4348	0,3943
33	0,00033	1,1862	0,8443	0,4156	0,3904	0,4094	0,4131	0,3770
34	0,00022	1,1472	0,8042	0,3928	0,3714	0,3849	0,3934	0,3514
35	0,00015	1,1011	0,7644	0,3756	0,3482	0,3665	0,3669	0,3243
36	0,00010	1,0685	0,7294	0,3551	0,3336	0,3478	0,3370	0,2955

#### B.4 Fluido olefínico sem adensante

Ponto	Taxa de Cisalhamento [1/s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]						
		5°C	25°C	45°C(1)	45°C(2)	45°C(3)	65°C	85°C
1	100,00	18,2080	7,0082	4,8886	5,3332	4,8659	3,8352	2,9077
2	67,400	14,1870	5,5976	3,9624	4,2941	3,9515	3,1929	2,3941
3	45,400	11,3010	4,5908	3,2970	3,5489	3,2907	2,7026	2,0040
4	30,600	9,1951	3,8519	2,8017	2,9977	2,7988	2,3186	1,6961
5	20,600	7,6155	3,2953	2,4247	2,5805	2,4244	2,0121	1,4544
6	13,900	6,4018	2,8703	2,1308	2,2561	2,1322	1,7625	1,2762
7	9,3600	5,4565	2,5360	1,8995	2,0013	1,9017	1,5587	1,1215
8	6,3100	4,7106	2,2778	1,7112	1,7972	1,7151	1,3871	0,9907
9	4,2500	4,1253	2,0761	1,5601	1,6281	1,5602	1,2414	0,8826
10	2,8600	3,6532	1,9151	1,4323	1,4899	1,4334	1,1208	0,7963
11	1,9300	3,2832	1,7918	1,3264	1,3672	1,3194	1,0155	0,7221
12	1,3000	2,9913	1,6989	1,2305	1,2680	1,2274	0,9250	0,6634
13	0,87700	2,7592	1,6180	1,1408	1,1784	1,1432	0,8503	0,6124
14	0,59100	2,5733	1,5758	1,0692	1,1030	1,0748	0,7938	0,5696
15	0,39800	2,4464	1,5185	1,0095	1,0427	1,0172	0,7446	0,5428
16	0,26800	2,3470	1,4793	0,9539	0,9715	0,9497	0,6923	0,5112
17	0,18100	2,2632	1,4330	0,9038	0,9254	0,9099	0,6584	0,4840
18	0,12200	2,2060	1,3809	0,8579	0,8717	0,8612	0,6182	0,4537
19	0,08210	2,1785	1,3428	0,8176	0,8298	0,8109	0,5838	0,4350
20	0,05530	2,1269	1,3066	0,7782	0,7920	0,7730	0,5568	0,4131
21	0,03730	2,0494	1,2744	0,7404	0,7381	0,7433	0,5244	0,3857
22	0,02510	1,9097	1,2264	0,6933	0,7080	0,7041	0,4935	0,3575
23	0,01690	1,7999	1,1720	0,6420	0,6721	0,6495	0,4763	0,3459
24	0,01140	1,7110	1,0978	0,6128	0,6453	0,6285	0,4450	0,3227
25	0,00769	1,8029	1,0292	0,5864	0,6093	0,5867	0,4191	0,3067
26	0,00518	1,7900	0,9639	0,5534	0,5679	0,5524	0,3914	0,2900
27	0,00349	1,7036	0,9130	0,5189	0,5368	0,5207	0,3765	0,2783
28	0,00235	1,6095	0,8604	0,4984	0,5028	0,4984	0,3579	0,2618
29	0,00158	1,5577	0,8080	0,4685	0,4748	0,4724	0,3410	0,2484
30	0,00107	1,4919	0,7622	0,4429	0,4460	0,4476	0,3243	0,2355
31	0,00072	1,4528	0,7205	0,4162	0,4221	0,4230	0,3069	0,2243
32	0,00049	1,3253	0,6858	0,3936	0,3994	0,4042	0,2851	0,2135
33	0,00033	1,2785	0,6569	0,3748	0,3795	0,3859	0,2711	0,1965
34	0,00022	1,1980	0,6271	0,3588	0,3673	0,3643	0,2556	0,1827
35	0,00015	1,1363	0,5853	0,3358	0,3434	0,3331	0,2368	0,1709
36	0,00010	1,0853	0,5668	0,3061	0,3138	0,3130	0,2192	0,1602

## C – MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO

O apêndice C destina-se a apresentar as hipóteses assumidas, o método numérico empregado para solucionar as equações diferenciais parciais e o modelo matemático da sedimentação para condições não isotérmicas.

O fenômeno da sedimentação pode ser estudado através de experimentos (diferentes metodologias, equipamentos e sensores) e simulações (diferentes equacionamentos e *softwares*). Melhores resultados geralmente são obtidos quando se opta por uma abordagem fenomenológica do problema. Abordagens puramente empíricas são difíceis de extrapolar e costumam apresentar elevados desvios de predição para condições diferentes da validada.

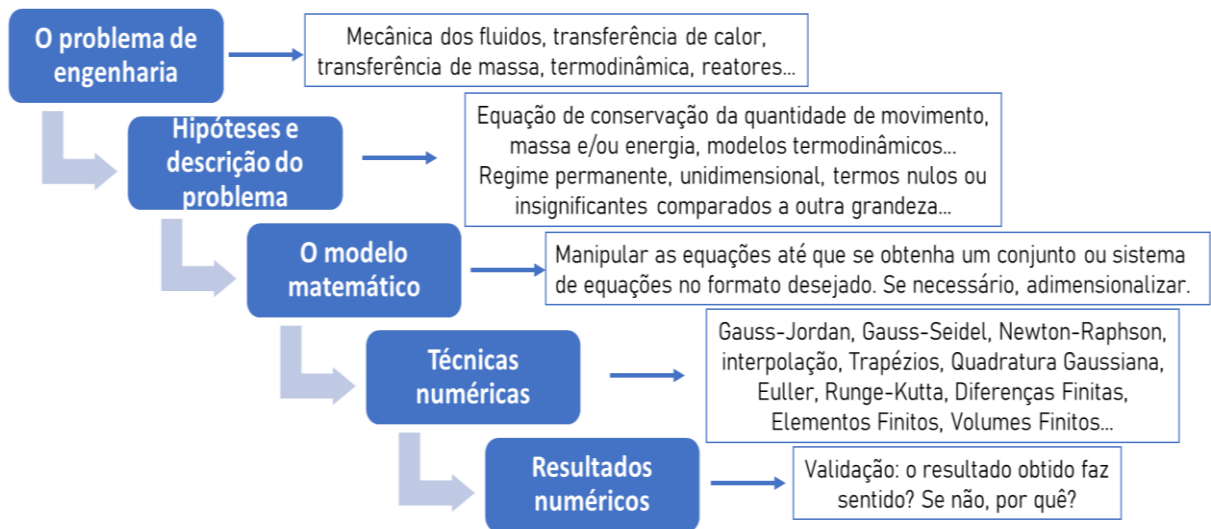
As principais etapas da modelagem são a escolha das hipóteses que serão consideradas e a escolha do método de solução mais adequado, tanto do ponto de vista matemático como computacional. A depender do problema, as equações podem ser discretizadas e adimensionalizadas para facilitar a implementação. Ao final, é importante que o modelo represente o fenômeno físico com fidelidade. A Figura 100 apresenta um resumo dessas etapas.

Com a evolução dos computadores e processadores, tornou-se possível realizar cálculos complexos em poucos segundos. Contudo, ainda assim, a implementação de certos algoritmos e equacionamentos pode ser tarefa difícil e algumas técnicas numéricas podem apresentar rigidez ou até mesmo divergir.

Uma vez consolidados e implementados, pode-se realizar simulações e avaliar casos até então não estudados a nível experimental. Deve-se ter em mente que obter dados experimentais envolve viabilidade econômica (custos podem ser altos) e técnica (dificuldade ou até mesmo impossibilidade de obter dados).

O SimSag – Simulador da Sedimentação de Sólidos Adensantes, desenvolvido pelo Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF/UFRuralRJ) em parceria com CENPES/Petrobras – preza pelo baixo tempo computacional, não exigindo computadores potentes para sua execução, entrada de dados simplificada, facilidade de edição de suas linhas de código por meio de um programa modularizado e abordagem fenomenológica do problema da sedimentação.

Figura 100. Etapas da simulação numérica.



Fonte: autor.

## C.1 MODELO MATEMÁTICO DA SEDIMENTAÇÃO

### C.1.1 Considerações iniciais

O presente trabalho busca dar sequência à uma série de pesquisas antecessoras e avançar na compreensão da dinâmica de sedimentação. Para maiores detalhes sobre a construção do modelo da sedimentação, consultar “Estudo Teórico-Experimental da Sedimentação em Batelada: Monitoramento e Modelagem de Perfis de Concentração de Sólidos e Análise De Equações Constitutivas” de ROCHA (2018) e “Settling of Weighting Agents in Non-Newtonian Fluids to Off-Shore Drilling Wells: Modeling, Parameter Estimation and Analysis of Constitutive Equations” de ROCHA, *et al.* (2020).

Em fenômenos de transporte, embora a maioria dos campos de escoamento sejam intrinsecamente tridimensional, a análise baseada em menos dimensões pode satisfazer o problema. No contexto do modelo matemático proposto para a sedimentação, foi utilizada a abordagem unidimensional.

Tal modelo consiste em descrever a dinâmica de sedimentação de sólidos adensantes por meio de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP) obtidas a partir de uma abordagem fenomenológica. Para isso, parte-se da equação da continuidade (92) e do movimento (93) em regime transiente e unidimensional na

direção “z” para fase sólida. Além disso, faz-se uso de correlações empíricas e constitutivas para descrever a permeabilidade do meio e as forças de interação sólido-sólido e sólido-líquido.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_s v_s}{\partial z} = 0 \quad (92)$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left( \frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_s}{\partial z} + m_z + \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z \quad (93)$$

Sendo,  $\varepsilon_s$ : concentração volumétrica de sólidos; t: tempo;  $v_s$ : velocidade dos sólidos; z: posição axial na coluna;  $\rho_s$ : densidade dos sólidos;  $\tau_s$ : tensão nos sólidos;  $m_z$ : força resistiva ou de interação sólido-líquido;  $\rho_f$ : densidade do líquido; g: aceleração da gravidade.

Partindo-se das equações da continuidade e do movimento, assumiu-se algumas hipóteses e considerou-se equações constitutivas para pressão nos sólidos, permeabilidade do meio, esfericidade e força resistiva a fim de obter um sistema de equações capaz de descrever o fenômeno da sedimentação.

Equação constitutiva, também chamada de função material, é uma relação entre as variáveis termodinâmicas ou mecânicas de um sistema físico e são usadas para caracterização das propriedades materiais dos constituintes. São equações adicionais necessárias para fechar um problema matemático de mecânica do contínuo e vem geralmente de observações empíricas, que tentam descrever o comportamento observado dos materiais ou fluidos. Cada material tem uma equação constitutiva específica.

Para construção do modelo, assume que o fluido e as partículas são incompressíveis. Dessa forma, o volume do fluido e do sólido não variam ao modificar a pressão e, por conseguinte, a massa específica é constante.

Segundo os trabalhos de Bürger e Concha (1998) e Damasceno (1992), os termos de aceleração local e transporte convectivo de quantidade de movimento presentes na equação 96 são desprezíveis e podem ser negligenciados para escoamentos lentos, como é o caso da sedimentação em batelada de sólidos em fluidos viscosos. Assim, a equação 93 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$0 = \frac{\partial \tau_s}{\partial z} + m_z + \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z \quad (94)$$

### C.1.2 Tensor tensão como pressão nos sólidos

Uma outra hipótese assumida é que o sistema sólido-fluido é um meio isotrópico, ou seja, suas propriedades físicas são constantes independente da direção considerada. Junto a isso, estudos de restrições internas de natureza mecânica, permitiram a D'Ávila e Sampaio (1977), *apud* Damasceno (1992) e Arouca (2007), descrever o tensor tensão total como pressão, a qual é função apenas da concentração volumétrica de sólidos, que – por sua vez – é função de tempo e posição. Assim:

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = -\frac{\partial P_s}{\partial z} = -\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \quad (95)$$

Dessa forma, a equação 96 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$0 = -\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} + m_z + \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z \quad (96)$$

A pressão nos sólidos ( $P_s$ ) adotada foi uma equação constitutiva proposta por proposta por Tiller e Leu (1980) e reparametrizada por Rocha (2018). Isso se faz necessário, pois o fenômeno da sedimentação em batelada é caracterizado pela existência simultânea de zonas com diferentes concentrações de sólidos, nas quais há interações sólido-sólido. Além disso, deseja-se que todas as zonas sejam descritas pelo mesmo conjunto de equações diferenciais parciais. Assim:

$$P_s = P_{s,ref} \exp \left[ -\beta \left( \frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{s,ref}} \right) \right] \quad (97)$$

Sendo,  $\varepsilon_{s,ref}$ : concentração de sólidos de referência;  $P_{s,ref}$ : pressão dos sólidos em uma concentração de referência.  $\beta$  e  $P_{s,ref}$  são parâmetros a serem estimados.

Partindo-se da hipótese apresentada anteriormente de que a pressão nos sólidos é função apenas da concentração volumétrica de sólidos, é possível calcular

o gradiente (nesse caso, a derivada total) de pressão nos sólidos. O resultado, descrito na equação 101, permite ainda agrupar o produto dos parâmetros  $\beta$  e  $P_{s,ref}$  em um novo parâmetro. Assim:

$$\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} = \frac{P_{s,ref}\beta}{\varepsilon_s^2} \exp \left[ -\beta \left( \frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{s,ref}} \right) \right] \quad (98)$$

### C.1.3 Força resistiva

Já para a força resistiva ( $m_z$ ) foi considerada a equação constitutiva proposta por Telles e Massarani (1979), obtida por análise dimensional, para um comportamento reológico não newtoniano. A equação é função da permeabilidade do meio; tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e densidade da suspensão; e densidade, concentração inicial e velocidade dos sólidos.

$$m_z = \frac{1}{K} \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \left[ 1 + c \frac{\rho_L \sqrt{K} \|q\|}{\frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c}} + \frac{c_1 \sigma_1(\dot{\gamma}_c)}{\tau(\dot{\gamma}_c)} + \frac{c_2 \sigma_2(\dot{\gamma}_c)}{\tau(\dot{\gamma}_c)} \right] \dot{q} \quad (99)$$

Sendo,  $K$ : permeabilidade do meio poroso;  $\dot{\gamma}_c$ : taxa de cisalhamento característica;  $\tau(\dot{\gamma}_c)$ ,  $\sigma_1(\dot{\gamma}_c)$  e  $\sigma_2(\dot{\gamma}_c)$ : funções materiais dependentes da taxa de cisalhamento característica;  $c$ ,  $c_1$  e  $c_2$ : fatores geométricos a serem determinados;  $\dot{q}$ : velocidade superficial da fase fluida relativa a um referencial fixo da matriz porosa.

Segundo Bird, *et al.* (2002),  $\tau(\dot{\gamma}_c)$  define tensões cisalhantes e  $\sigma_1(\dot{\gamma}_c)$  e  $\sigma_2(\dot{\gamma}_c)$  definem tensões normais. Já a velocidade superficial da fase fluida relativa a um referencial fixo da matriz porosa é dada por:

$$q = \varepsilon_L U_z = (1 - \varepsilon_s) U_z \quad (100)$$

$$U_z = v_L - v_s \quad (101)$$

Sendo  $U_z$ : velocidade relativa da mistura sólido-líquido;  $v_L$ : velocidade da fase líquida;  $v_s$ : velocidade da fase sólida.

Na equação 102 é possível verificar a presença de efeitos inerciais por meio do número de Reynolds; na 103 é possível verificar os efeitos de tensões normais por meio do número de Deborah.

$$Re = c \frac{\rho_L \sqrt{K} \|q\|}{\frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c}} \quad (102)$$

$$De_i = \frac{c_i \sigma_i(\dot{\gamma}_c)}{\tau(\dot{\gamma}_c)}; i = 1, 2. \quad (103)$$

No contexto da sedimentação de sólidos adensantes em fluidos de perfuração, pode-se assumir que os efeitos viscosos são tão elevados que a velocidade de sedimentação e a taxa de cisalhamento são suficientemente baixas para justificar a eliminação dos termos relativos ao número de Reynolds e Deborah. Assim, 99 pode ser reescrito como:

$$m_z = \frac{1}{K} \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \dot{q} \quad (104)$$

Ainda segundo Telles e Massarani (1979), o termo  $\tau(\dot{\gamma}_c)/\dot{\gamma}_c$  na equação 104 deve ser interpretado como viscosidade aparente do líquido. No entanto, no caso do presente estudo, não se trata de um líquido propriamente dito, mas sim de uma suspensão. Deve-se recordar que a composição de um fluido de perfuração é essencialmente fase contínua, aditivos e adensantes. Além disso, esse fluido está confinado, semelhante a um processo de batelada. Nesse contexto, as partículas sólidas presentes na suspensão é que são responsáveis por cisalhar o meio contínuo. Por conta disso, foi preciso definir uma função para expressar a viscosidade da fase líquida na presença de sólidos, ou seja, a viscosidade da suspensão.

Assumindo a suspensão como um fluido visco-linear monofásico, considera-se que a viscosidade global da suspensão é igual à viscosidade representada por uma regra de mistura, conforme apresentado abaixo (BÜRGUER, 2000).

$$\eta_{mix}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) = \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) = \eta_L(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) + \eta_S(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) \quad (105)$$

Sendo,  $\eta_L(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s)$ : viscosidade da fase líquida;  $\eta_S(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s)$ : viscosidade da fase sólida;  $\eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s)$ : viscosidade global da suspensão, a qual é experimentalmente quantificável por meio de experimentos de reologia, mais precisamente de curvas de escoamento.



Ainda segundo as hipóteses e discussões de Bürguer (2000), é possível reorganizar a equação 108, explicitando a viscosidade da fase líquida deformada por sólidos presentes em sua própria composição da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\eta_L(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) &= \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) - \eta_s(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) \\ \eta_s(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) &= \frac{\rho_s \varepsilon_s}{\rho_{susp}} \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) \\ \eta_L(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) &= \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) - \frac{\rho_s \varepsilon_s}{\rho_{susp}} \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) \\ \eta_L(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) &= \eta_{susp}(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s) \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_s}{\rho_{susp}} \right)\end{aligned}$$

Quando o limite da taxa de cisalhamento tendendo a zero, tem-se a viscosidade, da seguinte forma:

$$\lim_{\dot{\gamma}_c \rightarrow 0} \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} = \eta$$

Assim:

$$\left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s)}{\dot{\gamma}_c} \right)_L = \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_s)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_s}{\rho_{susp}} \right) \quad (106)$$

Além disso, as propriedades reológicas dos fluidos de perfuração foram medidas na concentração inicial de sólidos ( $\varepsilon_{s0}$ ), de tal forma que se pode substituir  $\varepsilon_s$  por  $\varepsilon_{s0}$ . Deve-se notar também que ao fazer essa substituição, não há necessidade de demonstrar explicitamente a dependência de viscosidade aparente da suspensão com a concentração inicial de sólidos. Assim:

$$\left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c, \varepsilon_{s0})}{\dot{\gamma}_c} \right)_L = \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_{s0}}{\rho_{susp}} \right) \quad (107)$$

Após algum algebrismo, a equação 107 representa a viscosidade da fase líquida para o caso de fase líquida deformada por sólidos presentes em sua própria composição. É possível substituir 107 em 104, da seguinte forma:

$$m_z = \frac{1}{K} \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_{s0}}{\rho_{susp}} \right) \dot{q} \quad (108)$$

Essa abordagem fenomenológica está baseada nas propriedades do líquido e do sólido; não há mistura ou suspensão. Para poder descrever o comportamento do fluido de perfuração, adotou-se uma regra de mistura, a qual corrige o valor da viscosidade aparente.

Nesses casos, o usuário alimenta os parâmetros da suspensão no simulador e uma sub-rotina converte viscosidade aparente da suspensão em viscosidade aparente do líquido por meio dessa regra de mistura.

No entanto, essa abordagem leva em conta a contribuição do líquido e do sólido. Para o caso dos fluidos sem adensantes abordados nesse trabalho, essa regra de mistura não se faz necessária, pois não há sólidos na mistura. Dessa forma, o parâmetro reológico alimentado no simulador não precisa de correções, pois já são os parâmetros do líquido.

Ainda é possível substituir a equação 100 e 101 na equação 108, explicitando os termos de velocidade de líquido e sólido, da seguinte forma:

$$m_z = \frac{1}{K} \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_{s0}}{\rho_{susp}} \right) (1 - \varepsilon_s)(v_L - v_s) \quad (109)$$

Feito isso, pode-se, então, substituir a equação 109 em 96. Nesse momento, é de interesse explicitar os termos de velocidade, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} + m_z + \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z \\ m_z &= -\left[ \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \\ \frac{1}{K} \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_{s0}}{\rho_{susp}} \right) (1 - \varepsilon_s)(v_L - v_s) &= -\left[ \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (96)$$

A seguinte igualdade é verdadeira:  $\left( 1 - \frac{\rho_s \varepsilon_{s0}}{\rho_{susp}} \right) = \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}}$

$$\frac{1}{K} \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) (1 - \varepsilon_s)(v_L - v_s) = -\left[ \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f)g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]$$

Isolando os termos de velocidade:

$$(v_L - v_S) = - \frac{K}{(1 - \varepsilon_S) \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_S (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \quad (110)$$

Para a determinação da velocidade de queda dos sólidos em um processo de sedimentação em batelada é preciso determinar a velocidade de ascensão do líquido. Rocha (2018) propõe a combinação da equação da continuidade para as fases sólida e líquida da seguinte forma:

$$\frac{\partial [\varepsilon_S - (1 - \varepsilon_S)]}{\partial t} + \frac{\partial [\varepsilon_S v_S + (1 - \varepsilon_S) v_L]}{\partial z} = 0 \quad (111)$$

O primeiro membro da equação 111 é uma constante e a derivada de uma constante é igual a zero. Já o segundo membro, ao ser integrado, gera uma constante de integração. Dessa forma, tem-se que:

$$\varepsilon_S v_S + (1 - \varepsilon_S) v_L = q(t) \quad (112)$$

Sendo  $q(t)$ : velocidade superficial total da mistura, que é a constante de integração, que precisa ser determinada. Para isso, é necessário conhecer as condições de contorno.

Partindo-se do princípio de que na base e no topo da coluna não há fluxo de sólidos ou líquido, ou seja, a velocidade na base e no topo são nulas, D'Ávila (1978) apresentou uma relação entre as velocidades dos sólidos e do líquido. Essa relação entre as velocidades dos dois constituintes é conhecida como restrição cinemática e mostram que a velocidade superficial total da mistura não depende da posição, sendo, portanto, válida para todas as posições da coluna de sedimentação. Assim:

$$q(t) = \varepsilon_S v_S|_{z=0,t} + (1 - \varepsilon_S) v_L|_{z=0,t} = 0 \quad (113)$$

$$v_L = - \frac{\varepsilon_S}{(1 - \varepsilon_S)} v_S \quad (114)$$

A partir da substituição da equação 114 em 110, pode-se isolar o termo  $v_s$ , que é a velocidade dos sólidos. Para isso, deve-se trabalhar o lado esquerdo da equação 110 para explicitar  $v_s$  e cancelar o termo  $(1-\epsilon_s)$  e o sinal de negativo, da seguinte forma:

$$(v_L - v_s) = \left( \left( -\frac{\epsilon_s}{(1-\epsilon_s)} v_s \right) - v_s \right) = v_s \left( -\frac{\epsilon_s}{(1-\epsilon_s)} - 1 \right) = v_s \left( \frac{-1}{(1-\epsilon_s)} \right)$$

Assim, é possível retornar à equação 110 e executar o seguinte algebrismo:

$$\begin{aligned} v_s \left( \frac{-1}{(1-\epsilon_s)} \right) &= - \frac{K}{(1-\epsilon_s) \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \epsilon_{s0}} \right) \left[ \epsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z \right. \\ &\quad \left. - \frac{dP_s}{d\epsilon_s} \frac{\partial \epsilon_s}{\partial z} \right] \\ v_s &= - \frac{-(1-\epsilon_s)K}{(1-\epsilon_s) \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \epsilon_{s0}} \right) \left[ \epsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\epsilon_s} \frac{\partial \epsilon_s}{\partial z} \right] \\ v_s &= \frac{K}{\left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \epsilon_{s0}} \right) \left[ \epsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\epsilon_s} \frac{\partial \epsilon_s}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (115)$$

#### C.1.4 Permeabilidade do meio

O termo de permeabilidade do meio poroso (" $K$ ") apareceu em decorrência da força resistiva (" $m$ ") descrita por Telles e Massarani (1979). Para sua representação adotou-se a proposta de Kozeny (1927) e Carman (1937), de tal forma que a permeabilidade do meio seja função de esfericidade (tópico C.1.6), diâmetro da partícula e concentração volumétrica de sólidos.

$$K = \frac{(\phi d_p)^2 (1-\epsilon_s)^3}{36 B \epsilon_s^2} \quad (116)$$

### C.1.5 Taxa de cisalhamento característica

O termo de taxa de cisalhamento característica também apareceu em decorrência da força resistiva (“ $m$ ”) descrita por Telles e Massarani (1979). Trata-se de uma grandeza cinemática e possui dependência funcional com a geometria (tamanho e forma) e a velocidade das partículas.

Para sua representação adotou-se a proposta de Massarani e Telles (1978), a qual estabelece que a taxa de cisalhamento característica, quando o escoamento de fluidos não newtonianos na vizinhança de partículas sólidas, pode ser dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{\vec{U}}{d_p} \theta(\phi) \quad (117)$$

Sendo  $d_p$ : diâmetro da partícula;  $\theta(\Phi)$ : função da esfericidade;  $\vec{U}$ : vetor velocidade relativa da mistura sólido-líquido. Para coordenadas cartesianas e escoamento unidimensional na direção  $z$ , o vetor velocidade pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\vec{U} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} = \sqrt{U_z^2} = U_z \quad (118)$$

Por conta da restrição cinemática, descrita na equação 114, tem-se que:

$$\vec{U} = U_z = -\frac{v_s}{(1 - \varepsilon_s)} \quad (119)$$

Ao substituir a equação 119 em 117, tem-se a forma final da taxa de cisalhamento característica, dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{(1 - \varepsilon_s)} \frac{\theta(\phi)}{d_p} \quad (120)$$

### C.1.6 Função da esfericidade

A função da esfericidade,  $\theta(\Phi)$ , tem por objetivo considerar o formato da partícula que está sedimentando no fluido. Para isso, utilizou-se a proposta de Laruccia (1990), que é uma função empírica, obtida por experimentos utilizando

diferentes fluidos não newtonianos e é válida para a faixa de 0,5 a 1,0. Ressalta-se, no entanto, que dentro das hipóteses adotadas, assume-se que todas as partículas possuem o mesmo tamanho e formato, ou seja, todas as partículas são uniformes.

$$\theta(\phi) = -3,45\phi^2 + 5,25\phi - 1,41 \quad (121)$$

## C.2 MODELO REOLÓGICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Para concluir a construção do modelo, ainda é preciso descrever o comportamento reológico do fluido. Até esse tópico, o sistema de equações é capaz de acomodar qualquer modelo reológico.

Conforme apresentado na revisão de literatura, os fluidos de perfuração possuem comportamento semelhante a um pseudoplástico, o qual pode ser eficientemente predito pelo modelo Lei de Potência. Seguindo esse exemplo:

$$\eta_{susp} = \left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp} = M(\dot{\gamma}_c)^{n-1} \quad (122)$$

$$\tau(\dot{\gamma}_c) = M(\dot{\gamma}_c)^n \quad (123)$$

Sendo  $M$ : índice de consistência;  $n$ : índice de comportamento.  $M$  e  $n$  são parâmetros reológicos a serem estimados. Quando  $n < 1$ , o fluido é considerado pseudoplástico; quando  $n = 1$ , o fluido é considerado newtoniano; e quando  $n > 1$ , o fluido é considerado dilatante. Esse é um dos modelos não newtonianos mais simples e por depender de apenas de dois parâmetros, tem uma boa relação custo-benefício ao implementar e solucionar problemas de reologia. No entanto, ao descrever dessa forma, não é possível levar em consideração os efeitos da temperatura na reologia.

### C.2.1 Equação de Arrhenius

Para a construção do modelo matemático para ajuste da reologia em função da temperatura assumiu-se que o efeito da temperatura influenciaria apenas a reologia

do fluido, ou seja, foi proposto que o fator temperatura modificaria apenas o modelo reológico. Tal alteração se deu mediante uso de um fator de correção de natureza exponencial incorporado ao cálculo da viscosidade.

$$\eta(T) = \eta_{ref} \exp(a_T) \quad (124)$$

Para um modelo do tipo Arrhenius, tem-se:

$$a_T = \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (125)$$

Que ainda pode ser reparametrizada da seguinte forma:

$$a_T = \exp\left[-\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad (126)$$

Sendo  $\Delta H$ : energia de escoamento;  $R$ : constante universal dos gases ideais;  $T$ : temperatura em uma dada condição experimental;  $T_{ref}$ : temperatura de referência.

A equação 123 descreve a viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Já a equação 124 descrevem a viscosidade em função da temperatura. Uma forma de obter uma única equação da viscosidade em função de taxa de cisalhamento e temperatura é multiplicando-as, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \eta(\dot{\gamma}_c, T) &= [M(\dot{\gamma}_c)^{n-1}] [\eta_{ref} \exp(a_T)] \\ \eta(\dot{\gamma}_c, T) &= M_{ref} \exp(a_T) (\dot{\gamma}_c)^{n-1} \end{aligned} \quad (127)$$

Como viscosidade pode ser descrita como função da razão entre tensão e taxa de cisalhamento, conforme apresentado na equação 122, pode-se reescrever a equação 127 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \eta(\dot{\gamma}_c, T) &= \left(\frac{\tau(\dot{\gamma}_c, T)}{\dot{\gamma}_c}\right) = [M(\dot{\gamma}_c)^{n-1}] [\eta_{ref} \exp(a_T)] \\ \tau(\dot{\gamma}_c, T) &= M_{ref} \exp(a_T) (\dot{\gamma}_c)^n \end{aligned} \quad (128)$$

Assim, para o modelo reológico que segue a lei de potência com o modelo de Arrhenius é:

$$\tau(\dot{\gamma}_c, T) = M_{ref} \exp \left[ -\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] (\dot{\gamma}_c)^n \quad (129)$$

### C.2.2 Inclusão do Modelo Reológico na Sedimentação

Para concluir o modelo da sedimentação ainda é preciso colocar o modelo reológico não isotérmico na equação 115, de tal forma que:

$$v_s = \frac{K}{\left( \frac{\tau(\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} \right)_{susp}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \quad (118)$$

$$v_s = \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (\dot{\gamma}_c)^{n-1}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]$$

Recordando que taxa de cisalhamento característica é dada por 117. Assim:

$$v_s = \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) \left[ \frac{v_s}{(1 - \varepsilon_s)} \frac{\theta(\phi)}{d_p} \right]^{n-1}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]$$

Isolando  $v_s$ :

$$\frac{v_s}{v_s^{(1-n)}} = \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \varepsilon_s)^{1-n} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]$$

$$v_s^n = \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \varepsilon_s)^{1-n} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]$$

Finalmente, tem-se que:

$$v_s = \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \varepsilon_s)^{1-n} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1}} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (130)$$

### C.2.3 Adimensionalização

Até o momento, tem-se duas equações para predizer o comportamento de sedimentação de sólidos adensantes: a equação da continuidade (92) e a equação do movimento após a definições de cada termo e modificações pertinentes (130).



Ainda na equação do movimento (130), deve-se mencionar a dependência com a equação 95 (referente ao gradiente de pressão), com a equação 116 (referente à permeabilidade do meio poroso) e com a equação 121 (referente à esfericidade). Todas as equações citadas são mencionadas abaixo a fim de facilitar a leitura e compreensão do assunto.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_s v_s}{\partial z} = 0 \quad (95)$$

$$v_s = \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T)(1 - \varepsilon_s)^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[ \varepsilon_s(\rho_s - \rho_f) g_z - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (133)$$

$$\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} = \frac{P_{s,ref} \beta}{\varepsilon_s^2} \exp \left[ -\beta \left( \frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{s,ref}} \right) \right] \quad (95)$$

$$K = \frac{(\phi d_p)^2 (1 - \varepsilon_s)^3}{36 B \varepsilon_s^2} \quad (116)$$

$$\theta(\phi) = -3,45\phi^2 + 5,25\phi - 1,41 \quad (121)$$

O sistema de equações formado pelas equações 95 e 133 é válido no domínio  $0 \leq t \leq t_f$  e  $0 \leq z \leq L_0$ , sendo  $t_f$  o tempo final do processo de sedimentação e  $L_0$  a altura da suspensão. Para solucionar esse sistema, é preciso especificar uma condição inicial e duas condições de contorno.

A condição inicial assume a homogeneidade da suspensão, com concentração inicial igual a  $\varepsilon_0$ . Já as duas condições de contorno fazem menção à base e ao topo da coluna de sedimentação, onde o fluxo de sólidos ( $q_s$ ) é nulo.

$$\begin{aligned} \text{Condição Inicial: } \varepsilon_s(z, t = 0) &= \varepsilon_{s0} \\ \text{Condição de Contorno 1: } q_s(z = 0, t) &= 0 \\ \text{Condição de Contorno 2: } q_s(z = L_0, t) &= 0 \end{aligned}$$

Como as variáveis envolvidas no processo apresentam diferentes ordens de grandeza, recomenda-se que as equações sejam adimensionalizadas a fim de facilitar a resolução numérica e reduzir o problema de rigidez numérica. Para isso, definiu-se as seguintes variáveis:

$$\xi = \frac{t}{t_f}; z^* = \frac{z}{L_0}; \Theta_S = \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_{S0}}; u_S = \frac{v_S}{v_{stk}}; S = \frac{v_{stk} t_f}{L_0} \quad (131)$$

$$v_{t,stk} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_l) g}{18 \mu_{susp} (\dot{\gamma})} \quad (132)$$

Sendo  $\xi$ : o adimensional do tempo;  $z^*$ : o adimensional da posição;  $\Theta_S$ : o adimensional da concentração;  $u_S$ : o adimensional da velocidade;  $v_{stk}$ : velocidade terminal de Stokes, que é a maior velocidade possível para uma partícula isolada;  $S$ : um grupamento paramétrico gerado por conta da etapa de adimensionação.

As equações 21 e 132 descrevem a velocidade terminal de Stokes. No entanto, 132 foi adaptada a partir de 21 para descrever um fluido não newtoniano.

A etapa de adimensionação será demonstrada para as duas equações. Para a equação da continuidade (95):

$$t = \xi t_f; z = z^* L_0; \varepsilon_S = \Theta_S \varepsilon_{S0}; v_S = u_S v_{stk}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_S}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_S v_S}{\partial z} = 0 \rightarrow \frac{\partial (\Theta_S \varepsilon_{S0})}{\partial (\xi t_f)} + \frac{\partial [(\Theta_S \varepsilon_{S0})(u_S v_{stk})]}{\partial (z^* L_0)} = 0$$

Tirando as constantes da derivada:

$$\frac{\varepsilon_{S0}}{t_f} \frac{\partial (\Theta_S)}{\partial (\xi)} + \frac{\varepsilon_{S0} v_{stk}}{L_0} \frac{\partial [(\Theta_S)(u_S)]}{\partial (z^*)} = 0$$

Multiplicando a equação por  $t_f / \varepsilon_{S0}$ , tem-se que:

$$\frac{\partial \Theta_S}{\partial \xi} + \frac{t_f v_{stk}}{L_0} \frac{\partial [(\Theta_S)(u_S)]}{\partial z^*} = 0$$

Portanto:

$$\frac{\partial \Theta_S}{\partial \xi} + S \frac{\partial (\Theta_S u_S)}{\partial z^*} = 0 \quad (133)$$

Para a equação do movimento (130):

$$u_S v_{stk} = \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) [1 - (\Theta_S \varepsilon_{S0})]^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_S \varepsilon_{S0}} \right) \left[ \varepsilon_S (\rho_S - \rho_f) g_z - \frac{dP_S}{d\varepsilon_S} \frac{\partial(\Theta_S \varepsilon_{S0})}{\partial(z^* L_0)} \right] \right\}^{\frac{1}{n}}$$

Tirando as constantes da derivada e passando  $v_{stk}$  para o outro lado:

$$u_S = \frac{1}{v_{stk}} \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \Theta_S \varepsilon_{S0})^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_S \varepsilon_{S0}} \right) \left[ \Theta_S \varepsilon_{S0} (\rho_S - \rho_f) g_z - \frac{\varepsilon_{S0}}{L_0} \frac{dP_S}{d\varepsilon_S} \frac{\partial \Theta_S}{\partial z^*} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (134)$$

Assim como as equações (133) e (134), também é preciso adimensionalizar suas respectivas condições de contorno, de tal forma que:

$$\text{Condição Inicial: } \Theta_S(z^*, \xi = 0) = 1$$

$$\text{Condição de Contorno 1: } F_S(z^* = 0, \xi) = 0$$

$$\text{Condição de Contorno 2: } F_S(z^* = 1, \xi) = 0$$

### C.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA - MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

As equações 133 e 134, que representam o fenômeno da sedimentação na forma adimensional, precisam ser resolvidas simultaneamente e não possuem solução exata. Por isso, técnicas numéricas devem ser utilizadas para solucionar o problema. Para isso, fez-se uso do método dos volumes finitos, discretizando a variável espacial ( $z^*$ ) e integrando a variável temporal adimensional ( $\xi$ ) com auxílio de uma rotina computacional.

Isso posto, é relevante compreender que o modelo da sedimentação construído no tópico anterior possui natureza hiperbólica-parabólica devido aos mecanismos que governam a separação das fases de cada zona de sedimentação. O comportamento hiperbólico é típico das regiões de clarificado e de sedimentação livre, nas quais o

gradiente de pressão nos sólidos é muito pequeno ou inexistente. Já o comportamento parabólico é típico das regiões de transição e compressão, nas quais os gradientes de pressão nos sólidos são significativos (ROCHA, 2018).

Por conta dessa característica, métodos de aproximação global, como a técnica de colocação ortogonal, costumam falhar por conta dos elevados gradientes desenvolvidos nos perfis da variável discretizada. Já técnicas de aproximação local, como os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos, costumam apresentar melhores resultados (PINTO e LAGE, 2001).

A escolha do método de volumes finitos se deve a sua característica de garantir a conservação da propriedade sob análise nos volumes da malha de discretização. Dessa forma, não existe a possibilidade da existência de geração ou consumo de quantidades da propriedade em estudo, seja massa, energia ou quantidade de movimento, no interior do domínio de cálculo (MALISKA, 2014).

Além disso, esse método é capaz de lidar com condições de contorno complicadas, como contornos não lineares e condições de contorno de fluxo de calor de superfície, diferentes geometrias e pode ser adaptado para incluir efeitos difusivos, convectivos e reacionais.

Portanto, trata-se de um método conservativo, no qual os balanços de conservação devem ser satisfeitos em cada volume, para qualquer tamanho de malha, e todos os princípios de conservação podem ser conferidos. A Figura 170 ilustra a discretização da malha.

O método dos volumes finitos é por vezes confundido com o método das diferenças finitas, pois as equações discretizadas obtidas por ambos os métodos são semelhantes em alguns problemas mais simples. No entanto, para problemas mais complexos, como é o caso da sedimentação, o método das diferenças finitas não consegue solucionar o problema. Isso se deve ao fato de os dois métodos possuírem bases de formulação bem diferentes.

Enquanto o método das diferenças finitas tem uma dedução puramente matemática, a partir das aproximações de derivadas usando séries de Taylor, a formulação do método dos volumes finitos tem base física (PINTO E LAGE, 2001). Como resultado, para o método de volumes finitos, forma-se uma malha que define fronteiras e baseia-se em aproximar a solução em volumes de controle ao utilizar as informações nas fronteiras destes volumes para calcular uma solução aproximada;

diferente de diferenças finitas, que define a localização de pontos discretos (FERZIGER e PERIC, 2002).

A aplicação do método de volumes finitos pode ser subdividida em 3 etapas: geração da malha, discretização e solução das equações.

### C.3.1 Geração de Malha

Na primeira etapa, deve-se dividir o domínio em volumes de controle para construir uma malha adequada ao problema. Os volumes não devem se sobrepor, de tal forma que cada face deve ser única a dois volumes vizinhos.

Em casos mais simples, como uma abordagem cartesiana e unidimensional, os volumes podem assumir formas de um quadrado, conforme ilustrado na Figura 101. Mas nada impede que o volume de controle assuma diferentes formas geométricas a depender do caso. O importante é que os volumes não se sobreponham e que a malha construída seja adequada ao problema.

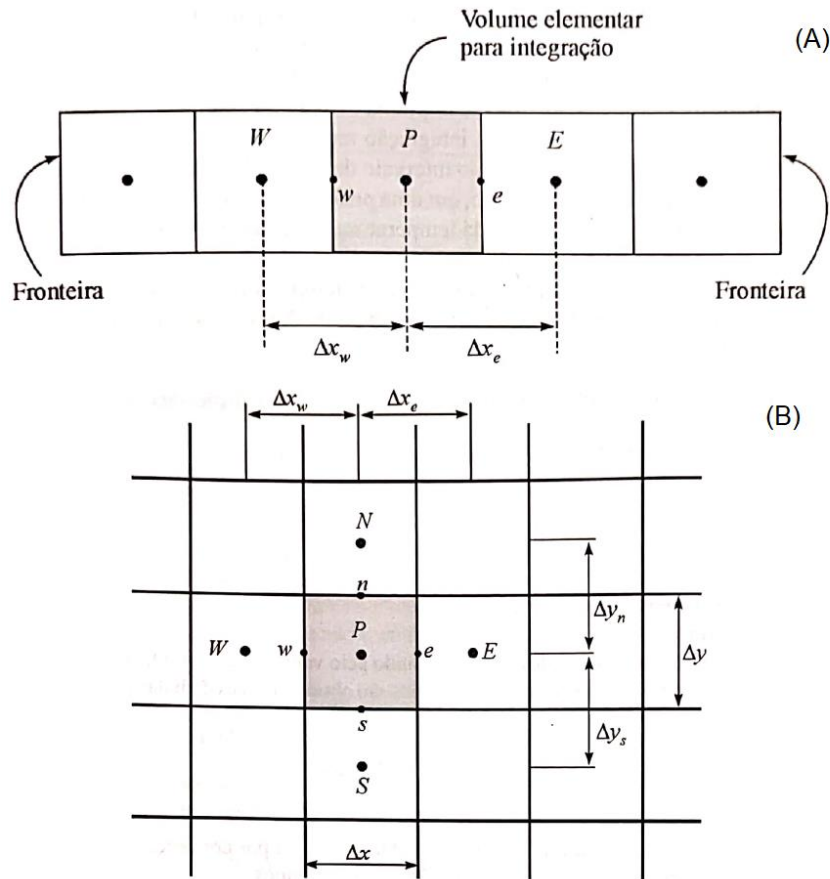
Deve-se também atribuir um nó ao centro de cada um dos volumes de controle para que os valores das propriedades de interesse sejam calculados através das equações de conservação discretizadas. Há descrito na literatura diversos esquemas de interpolação para esse caso.

Feito isso, o próximo passo é adequar a malha à condição de contorno. Para problemas com *condições de contorno de primeiro tipo* (um dado valor é usado para especificar a fronteira do domínio) e *condições de contorno de terceiro tipo* (fluxo difusivo da grandeza no contorno é dado através de uma relação linear) pode-se localizar o centro do volume no próprio contorno, surgindo o que se chama de meio-volume. Para *condições de contorno de segundo tipo* (fluxo difusivo da grandeza de contorno é conhecido) é mais conveniente utilizar um volume inteiro no contorno. Pode-se ainda ter casos de utilização de volumes fictícios para impor as condições de contorno do problema fora do domínio, forçando que a lei de conservação seja imposta em todo o domínio de cálculo (PINTO e LAGE, 2001).

Para problemas de sedimentação em batelada, as condições de contorno descrevem a nulidade de fluxo no topo e na base da coluna.

Figura 101. Representação de uma malha discretizada pelo método de volumes finitos.

(a) exemplo unidimensional; (b) exemplo bidimensional.



Fonte: MALISKA, 2014.

### C.3.2 Discretização

A segunda etapa consiste na integração do modelo ao longo de um volume de controle para produzir uma equação discretizada em seu nó central. Cada volume de controle terá sua equação discreta.

Considerando o problema da sedimentação, no qual a integração acontece em duas variáveis (tempo e espaço unidimensional) e a depender das ferramentas disponíveis, pode-se discretizar apenas uma das variáveis, integrando a outra via rotinas computacionais, ou discretizar as duas variáveis.

Maliska (2014), por exemplo, apresenta uma abordagem para transferência de calor, na qual as duas variáveis – tempo e espaço unidimensional – foram discretizadas. Para o tempo, utilizou-se Método de Euler com formulações explícita,

implícita e totalmente implícita; para o espaço, usou-se o método de volumes finitos. Isso reduziu o sistema de equações diferenciais parciais para um sistema de equações algébricas, o qual deve ser solucionado a cada passo de tempo.

No entanto, discretizar o tempo pode causar algumas limitações de convergência e precisão. Além disso, há disponível diversas rotinas computacionais em diferentes programas capazes de integrar de forma satisfatória esse tipo de equações no tempo, fornecendo excelentes resultados. Isso reduz o sistema de equações diferenciais parciais para um sistema de equações diferenciais ordinárias, o qual deve ser solucionado a cada passo de tempo.

Após discretizar as equações, deve-se ainda realizar interpolação entre os volumes, uma vez que os valores dos fluxos nas faces são desconhecidos. Deve-se recordar que os valores do volume de controle ficam armazenados no nó central. Os cálculos desses fluxos devem ser realizados em função dos valores da função nos pontos nodais, ou seja, a função de interpolação tem o papel de conectar os pontos nodais. A escolha da função de interpolação deve-se basear na obtenção do menor erro possível e que não envolva muitos pontos nodais para não criar uma matriz com estrutura muito complexa. Há na literatura diferentes técnicas de interpolação para sistema unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

### C.3.3 Solução das equações

A depender da forma como as equações foram discretizadas, é possível obter desde um sistema de equações algébricas lineares até um sistema de equações diferenciais ordinárias.

Sistemas algébricos lineares são facilmente solucionados com eliminação de Gauss, Gauss-Jordan ou Gauss-Seidel, por exemplo. Caso tenha-se um sistema de equações algébricas não lineares, pode-se lançar mão de técnicas como bisseção, secante ou Newton-Raphson. É importante escolher a técnica mais adequada para cada problema a fim de obter uma solução precisa e eficiente.

Já para o caso de um sistema de equações diferenciais ordinárias, tem-se ferramentas como Euler, Runge-Kutta e Crank-Nicholson para obter uma solução. Por fim, para casos de equações diferenciais parciais, tem-se os métodos de diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos e Galerkin, por exemplo.

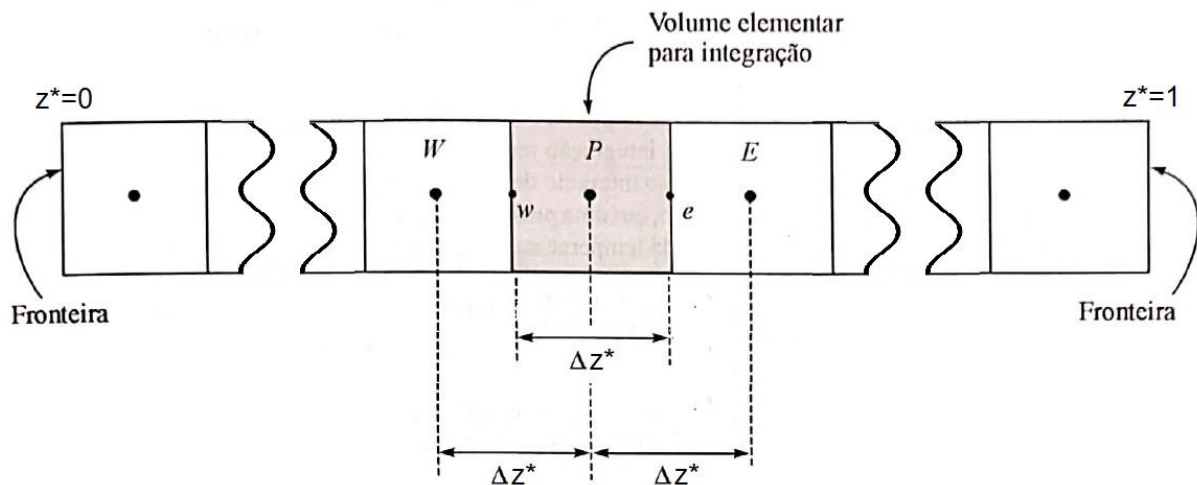
Pode-se, ainda, utilizar pacotes computacionais para integrar as equações discretizadas. Geralmente, a opção computacional tem em seus códigos algum desses métodos previamente programados e otimizados, de forma a agilizar os cálculos e a construção do programa.

#### C.3.4 Aplicação de Volumes Finitos no Modelo da Sedimentação

A aplicação da técnica de volumes finitos no modelo da sedimentação, que é descrito pelas equações 133 e 134, inicia-se pela geração da malha. Para isso, dividiu-se o domínio em pequenos volumes de controle uniformes e estabeleceu-se os pontos nodais, de tal forma que fosse adequado à condição de contorno.

Recorda-se que as condições de contorno do problema da sedimentação descrevem a nulidade de fluxo no topo e na base da coluna. Segundo Pinto e Lage (2001), trata-se de um problema de *condição de contorno de segundo tipo* e é conveniente utilizar um volume inteiro no contorno, de tal forma que a face do volume constitua uma fronteira do sistema, conforme apresentado na Figura 102.

Figura 102. Esquema de discretização e adequação da malha pelo método de volumes finitos.



Fonte: Maliska, 2014 (Adaptado).

A partir da Figura 102, é importante estabelecer algumas nomenclaturas que serão usadas nos próximos passos.  $P$  representa um nó central qualquer; os volumes vizinhos são representados pelas letras  $W$  (maiúsculo, a oeste/esquerda) e  $E$  (maiúsculo, a leste/direita). A face oeste do volume de controle é representada por  $w$



(minúsculo) e a face leste é referida como  $e$  (minúsculo). Como adotou-se uma malha uniforme,  $\Delta z^*$  representa a distância entre os pontos nodais  $W$  e  $P$ , entre  $P$  e  $E$  e entre as fronteiras  $w$  e  $e$ . O referencial  $z^*=0$  está no topo da coluna.

Na verdade, no contexto da sedimentação, a Figura 102 estaria na vertical (em pé), representando uma coluna de sedimentação dividida em “ $n$ ” volumes de controle. Contudo, por uma questão de espaço e melhor aproveitamento da escrita, convencionou-se apresentar dessa forma, na horizontal.

Após definir a malha, a próxima etapa é a discretização. Optou-se por discretizar somente a variável espaço adimensional ( $z^*$ ).

Para a equação da continuidade (133), utilizou-se o Método das Linhas com discretização por Volumes Finitos, reduzindo o conjunto de equações diferenciais parciais a um conjunto de equações diferenciais ordinárias, o qual pode ser solucionado por métodos numéricos de problemas de valor inicial (PINTO e LAGE, 2001; ROCHA, 2018).

Para aplicação do Método das Linhas, o termo da derivada temporal adimensional ( $\xi$ ) foi aproximado com o auxílio do Teorema do Valor Médio, que é uma aproximação precisa e simples, a partir do qual a integral é substituída pelo produto do valor médio do integrando com o tamanho do volume de controle. O valor médio do integrando, por sua vez, é aproximado pelo seu valor no centro nodal  $P$ .

Caso fosse de interesse discretizar o domínio espaço adimensional e tempo adimensional, o operador seria uma integral dupla, uma integral para cada variável.

Dessa forma, a integração é realizada entre as faces  $w$  e  $e$  por meio do seguinte operador:

$$\int_w^e dz^* \quad (135)$$

Ao aplicar esse operador na equação 133, tem-se:

$$\int_w^e \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi} dz^* + \int_w^e S \frac{\partial (\theta_s u_s)}{\partial z^*} dz^* = 0 \quad (136)$$

Sendo  $\theta_s u_s$ : fluxo de sólidos. A equação 136 aplica-se a cada volume de controle e, assim, ao domínio como um todo. A adição das equações de todos os volumes de controle gera a equação de conservação global.

Aplicando o Teorema do Valor Médio na derivada temporal adimensional ( $\xi$ ), tem-se que:

$$\int_w^e \frac{\partial \Theta_S}{\partial \xi} dz^* = \frac{\partial \bar{\Theta}_S}{\partial \xi} \int_w^e dz^* \cong \frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} \Delta z^* \quad (137)$$

Sendo  $\bar{\Theta}_S$ : a concentração média de sólidos;  $\bar{\Theta}_{S,P}$ : a concentração média de sólidos no centro nodal  $P$ ;  $\Theta_{S,P}$ : concentração adimensional no centro nodal  $P$ . Substituindo a equação 137 em 136, tem-se que:

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} \Delta z^* + S \frac{\partial (\bar{\Theta}_S \bar{u}_S)}{\partial z^*} \int_w^e dz^* = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} \Delta z^* + S \frac{\partial (\bar{\Theta}_S \bar{u}_S)}{\partial z^*} \Delta z^* = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} + S \frac{\partial (\bar{\Theta}_S \bar{u}_S)}{\partial z^*} = 0$$

Discretizando a variável espacial adimensional:

$$\frac{\partial (\bar{\Theta}_S \bar{u}_S)}{\partial z^*} \cong \frac{(\Theta_S u_S)_e - (\Theta_S u_S)_w}{2 \frac{\Delta z^*}{2}}$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} + S \left[ \frac{(\Theta_S u_S)_e - (\Theta_S u_S)_w}{\Delta z^*} \right] = 0 \quad (138)$$

Sendo  $(\theta_S u_S)_e$ : fluxo de sólidos na face  $e$  (leste);  $(\theta_S u_S)_w$ : fluxo de sólidos na face  $w$  (oeste). Deve-se observar que a distância entre o centro nodal  $W$  e a fronteira  $w$  é de apenas  $\Delta z^*/2$ ; da mesma forma que a distância entre o centro nodal  $E$  e a fronteira  $e$  também é de apenas  $\Delta z^*/2$ .

A equação 138 é válida para os volumes de controle internos, pois os de fronteira estão sujeitos às condições de contorno.

Como não há fluxo de sólidos no topo da coluna, o valor dessa propriedade no volume de controle a oeste é nulo, logo  $(\Theta_S u_S)_w = 0$ . Da mesma forma, como não há fluxo de sólidos na base da coluna, o valor dessa propriedade no volume de controle a leste é nula, logo  $(\Theta_S u_S)_e = 0$ . Portanto:

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} + S \left[ \frac{(\Theta u_S)_e}{\Delta z^*} \right] = 0; em z^* = 0 \quad (139)$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} - S \left[ \frac{(\Theta u_S)_w}{\Delta z^*} \right] = 0; em z^* = 1 \quad (140)$$

Isso posto, é necessário utilizar um esquema de interpolação para determinar o fluxo de sólidos nas faces “e” e “w”, pois é conhecido apenas o fluxo no centro nodal do volume de controle, mas não nas fronteiras. Rocha (2018) propôs a interpolação de tal forma que o fluxo ou concentração de sólidos na face seja aproximado pelo fluxo ou concentração de sólidos no centro nodal do volume de controle a jusante, ou seja, a propriedade na face é igual ao do centro nodal do volume de controle seguinte (“downwind”). Veja Figura 102 novamente. Assim:

$$(\Theta u_S)_e = (\Theta u_S)_E \quad (141)$$

$$(\Theta u_S)_w = (\Theta u_S)_P \quad (142)$$

Aplicando esse esquema de interpolação, tem-se que:

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} + S \left[ \frac{(\Theta u_S)_E - (\Theta u_S)_P}{\Delta z^*} \right] = 0 \quad (143)$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} + S \left[ \frac{(\Theta u_S)_E}{\Delta z^*} \right] = 0; em z^* = 0 \quad (144)$$

$$\frac{\partial \Theta_{S,P}}{\partial \xi} - S \left[ \frac{(\Theta u_S)_W}{\Delta z^*} \right] = 0; em z^* = 1 \quad (145)$$

Já para a equação do movimento adimensionalizada e rearranjada para calcular a velocidade dos sólidos (134) foi necessário adotar um esquema de discretização diferente para variável espacial adimensional.

Segundo Pinto e Lage (2001), o fluxo que cruza uma determinada fronteira entre dois volumes vizinhos precisa ser calculado pela mesma expressão das equações discretizadas a estes dois volumes. Caso contrário, a conservação global da grandeza pode ser violada.

Segundo Rocha (2018), a forma de contornar esse problema é usar a ferramenta de diferenças finitas para o termo da derivada espacial adimensional presente nessa equação. Usando diferenças finitas centrais, tem-se que:

$$\begin{aligned}
f'(x_0) &\cong \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} \\
\frac{\partial \Theta_{S,face}}{\partial Z^*} &\cong \frac{\Theta_{S,jusante} - \Theta_{S,montante}}{2 \frac{\Delta Z^*}{2}} \\
\frac{\partial \Theta_{S,face}}{\partial Z^*} &\cong \frac{\Theta_{S,jusante} - \Theta_{S,montante}}{\Delta Z^*}
\end{aligned} \tag{146}$$

Dessa forma, usando a Figura 102 como referência, é possível exemplificar da seguinte forma:

$$\frac{\partial \Theta_{S,e}}{\partial Z^*} \cong \frac{\Theta_{S,E} - \Theta_{S,P}}{\Delta Z^*} \tag{147}$$

Substituindo a equação 147 em 134, tem-se as equações para a velocidade dos sólidos avaliadas nas faces “e” e “w” dos seus volumes de controle.

$$\begin{aligned}
u_{S,e} &= u_{S,E} \\
&= \frac{1}{v_{stk}} \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \Theta_S \varepsilon_{S0})^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_S \varepsilon_{S0}} \right) \left[ \Theta_{S,E} \varepsilon_{S0} (\rho_S \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \rho_f) g_z - \frac{1}{L_0} \frac{dP_S}{d\varepsilon_S} \left( \frac{\Theta_{S,E} - \Theta_{S,P}}{\Delta Z^*} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n}}
\end{aligned} \tag{148}$$

$$\begin{aligned}
u_{S,w} &= u_{S,P} \\
&= \frac{1}{v_{stk}} \left\{ \frac{K}{M_{ref} \exp(a_T) (1 - \Theta_S \varepsilon_{S0})^{1-n}} \left[ \frac{d_p}{\theta(\phi)} \right]^{n-1} \left( \frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_S \varepsilon_{S0}} \right) \left[ \Theta_{S,P} \varepsilon_{S0} (\rho_S \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \rho_f) g_z - \frac{1}{L_0} \frac{dP_S}{d\varepsilon_S} \left( \frac{\Theta_{S,E} - \Theta_{S,P}}{\Delta Z^*} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n}}
\end{aligned} \tag{149}$$

Finalmente, pode-se abordar a última etapa: a solução das equações. As equações 143, 144 e 145, que representam um sistema de equações diferenciais ordinárias configuradas nos centros nodais de cada volume de controle e devem ser resolvidas simultaneamente com as equações 148 e 149 a fim de obter o perfil de concentração de sólidos ao longo da coluna de sedimentação.

As equações do modelo desenvolvido para a sedimentação em batelada foram integradas no domínio do tempo usando a rotina computacional DASSL e o programa foi construído em linguagem Fortran.

## C.4 ATUALIZAÇÃO DO SIMSAG

O “Simulador de Sólidos Adensantes”, “*SimSag*”, está em desenvolvimento desde 2010 e é um produto tecnológico do Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF-UFRuralRJ) em parceria com o CENPES/Petrobras.

O “*SimSag*” simula o processo de sedimentação dinâmica de sólidos adensantes em um fluido de perfuração e é útil para propor estratégias de operação e intervenções em poços em diversas situações no contexto da indústria de óleo e gás. Sua primeira implementação foi em 2016 e já atendeu pelo menos 15 demandas. A última versão, implementada em 2020, operava com um modelo unidimensional, isotérmico, diâmetro médio de partículas (monodisperso), aplica-se para um único fluido presente no sistema, reologia baseada no modelo lei de potência e estava validado para algumas famílias de fluidos base óleo e base água.

A escolha da linguagem Fortran se deu por conta de pontos como velocidade na execução de cálculos complexos e no processamento de banco de dados, programação de baixo nível que é compilada diretamente para código da máquina (ou seja, os programas escritos nessa linguagem são muito rápidos em comparação com outras de alto nível, como Python ou Java), possibilidade de executar o programa em computadores comuns (não são exigidos requisitos como processadores modernos, alta memória RAM ou placa de vídeo) e amplo suporte para computação científica com diversas bibliotecas de softwares disponíveis.

No contexto do simulador SIMSAG, anteriormente, o usuário informava qual era a temperatura média da coluna nos dados de entrada e o programa executava todos cálculos pertinentes. Era uma abordagem isotérmica.

A fim de expandir a aplicação desse simulador e considerar os efeitos térmicos, implementou-se mais um módulo para fazer o cálculo da viscosidade como função da temperatura. Para isso, assumiu-se que o efeito da temperatura influenciaria apenas na reologia do fluido, ou seja, foi proposto que o fator temperatura modificaria apenas o modelo reológico, desconsiderando qualquer outra contribuição.

Nesse novo módulo, os parâmetros reológicos são atualizados em função da temperatura. Esses parâmetros reológicos influenciarão no cálculo da velocidade dos sólidos e da viscosidade do fluido.

Para isso, o usuário deve informar a temperatura do topo e da base da coluna nos dados de entrada, o programa traçará um perfil de temperatura linear e executará os cálculos pertinentes. Os valores de temperatura são armazenados nos centros nodais dos volumes de controle. Mas para calcular os fluxos, é necessário conhecer a temperatura nas faces. Para isso, foi empregada a interpolação por diferenças finitas centrais. Alguns outros módulos precisaram de ajustes pontuais por conta das novas variáveis e dados calculados.

## C.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resume-se abaixo as hipóteses propostas para a construção do modelo matemático da sedimentação, com ajuste da reologia em função da temperatura:

- Modelo unidimensional baseado na mecânica do contínuo (abordagem fenomenológica);
- Assume que o fluido e as partículas são incompressíveis;
- Os termos de aceleração local e transporte convectivo de quantidade de movimento podem ser negligenciados para escoamentos lentos (Bürger e Concha (1998) e Damasceno (1992));
- O tensor tensão total pode ser interpretado como pressão, a qual é função apenas da concentração volumétrica de sólidos (D'Ávila e Sampaio (1977));
- A pressão nos sólidos é uma equação constitutiva proposta por Tiller e Leu (1980) e reparametrizada por Rocha (2018);
- A força resistiva é uma equação constitutiva proposta por Telles e Massarani (1979), a qual envolve permeabilidade do meio, tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento característica, densidade do sólido e da suspensão e velocidade relativa da mistura sólido-líquido, que em última análise gerará o termo de velocidade do sólido;
- A velocidade do líquido é dada por uma restrição cinemática apresentada por D'ávila (1978)
- A permeabilidade do meio é dada por Kozeny (1927) e Carman (1937);

- A taxa de cisalhamento característica é uma função proposta por Telles e Massarani (1979), a qual é função da velocidade e concentração de sólidos, esfericidade e diâmetro da partícula;
- Função da esfericidade dada por Larucia (1990);
- Modelo reológico segundo Lei de Potência acoplado a um fator de correção de natureza exponencial, segundo tipo Arrhenius ou WLF.

Após essas hipóteses supracitadas e certo algebrismo, obtém-se um sistema de equações diferenciais parciais, as quais não possuem solução exata. Nesse contexto, fez-se uso de uma ferramenta numérica: método dos volumes finitos. A escolha desse método deu-se por sua capacidade de garantir a conservação da propriedade sob análise nos volumes da malha de discretização. Para facilitar a aplicação da técnica, optou-se por adimensionalizar as equações. Em seguida, criou-se uma malha, discretizou-se as equações e integrou-se no domínio do tempo usando uma rotina computacional.

Dentre os resultados fornecidos pelo simulador estão perfil axial de concentração de sólidos, perfil axial de pressão, altura máxima de sedimento e a profundidade na qual se encontra a região de formação de sedimentos.

## D – AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Figura 103. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

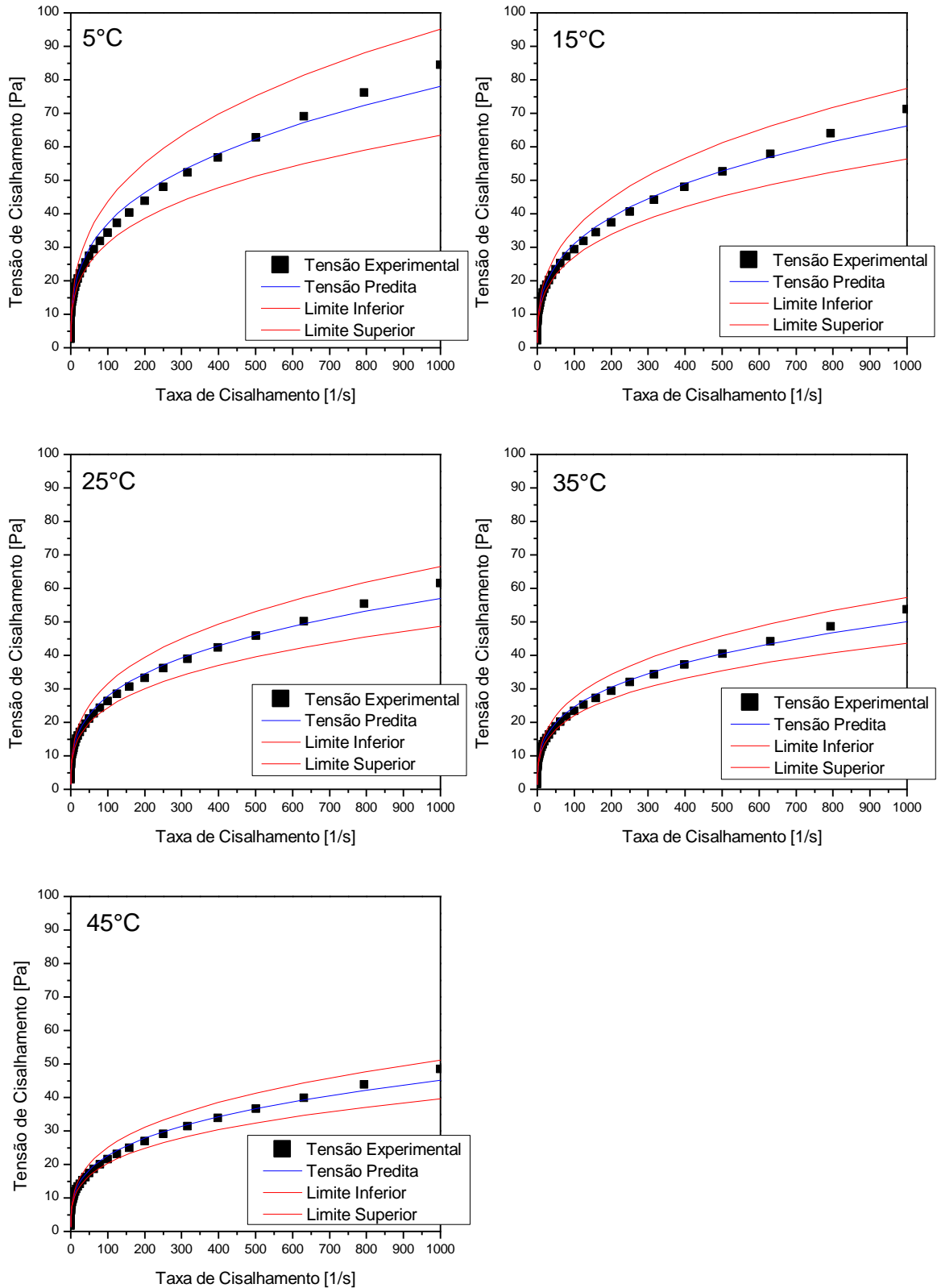




Figura 104. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência. (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

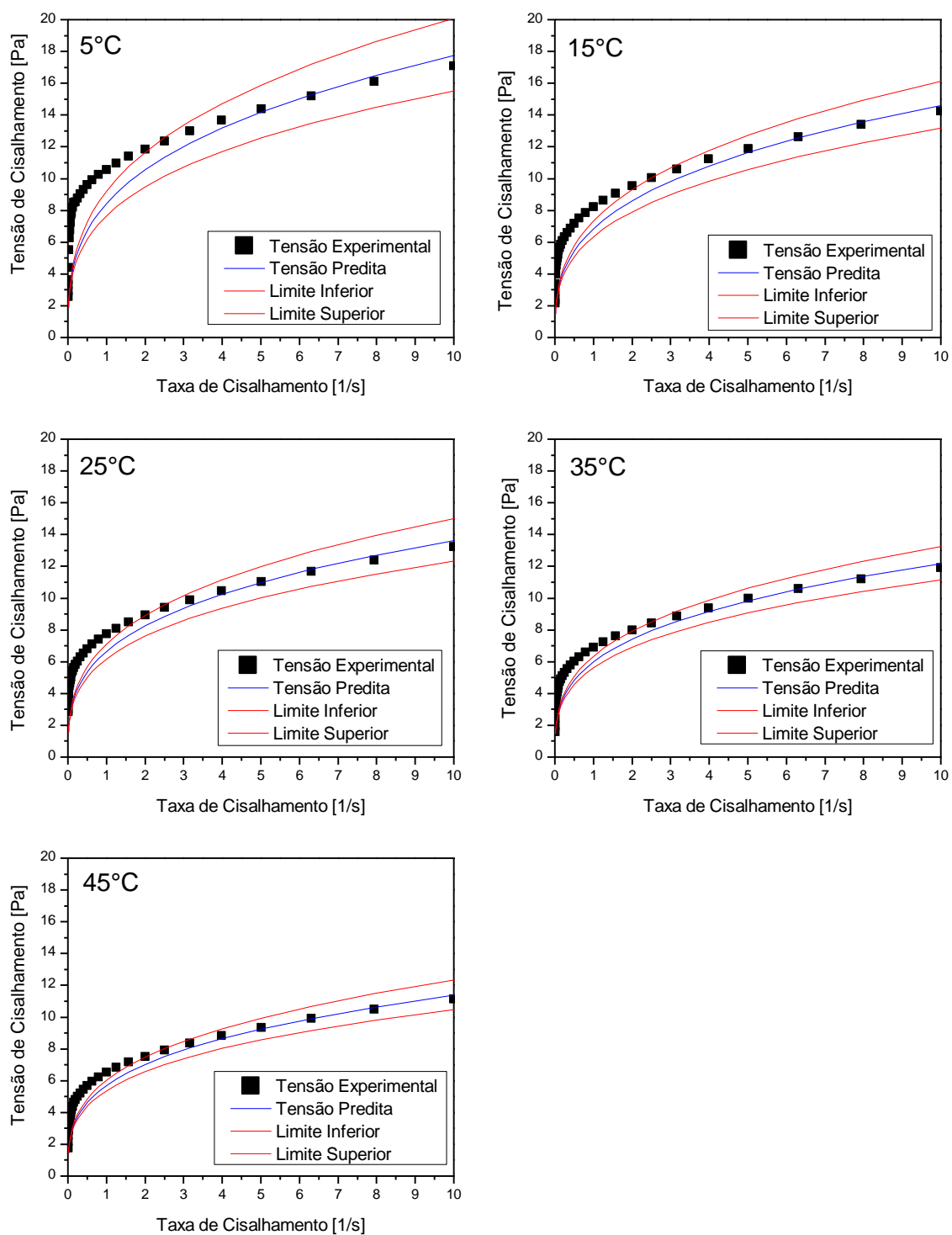


Figura 105. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

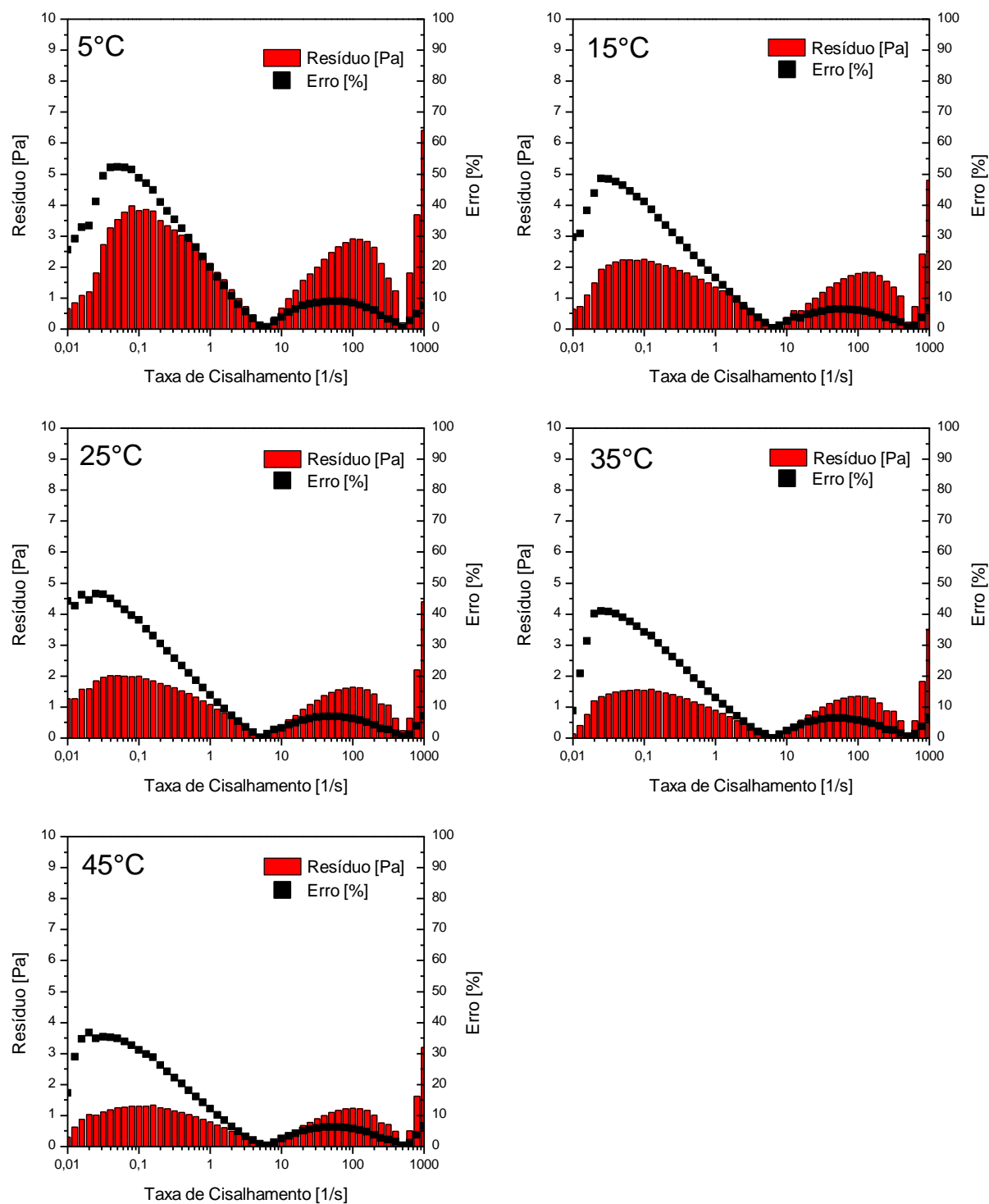


Figura 106. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência  
(intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

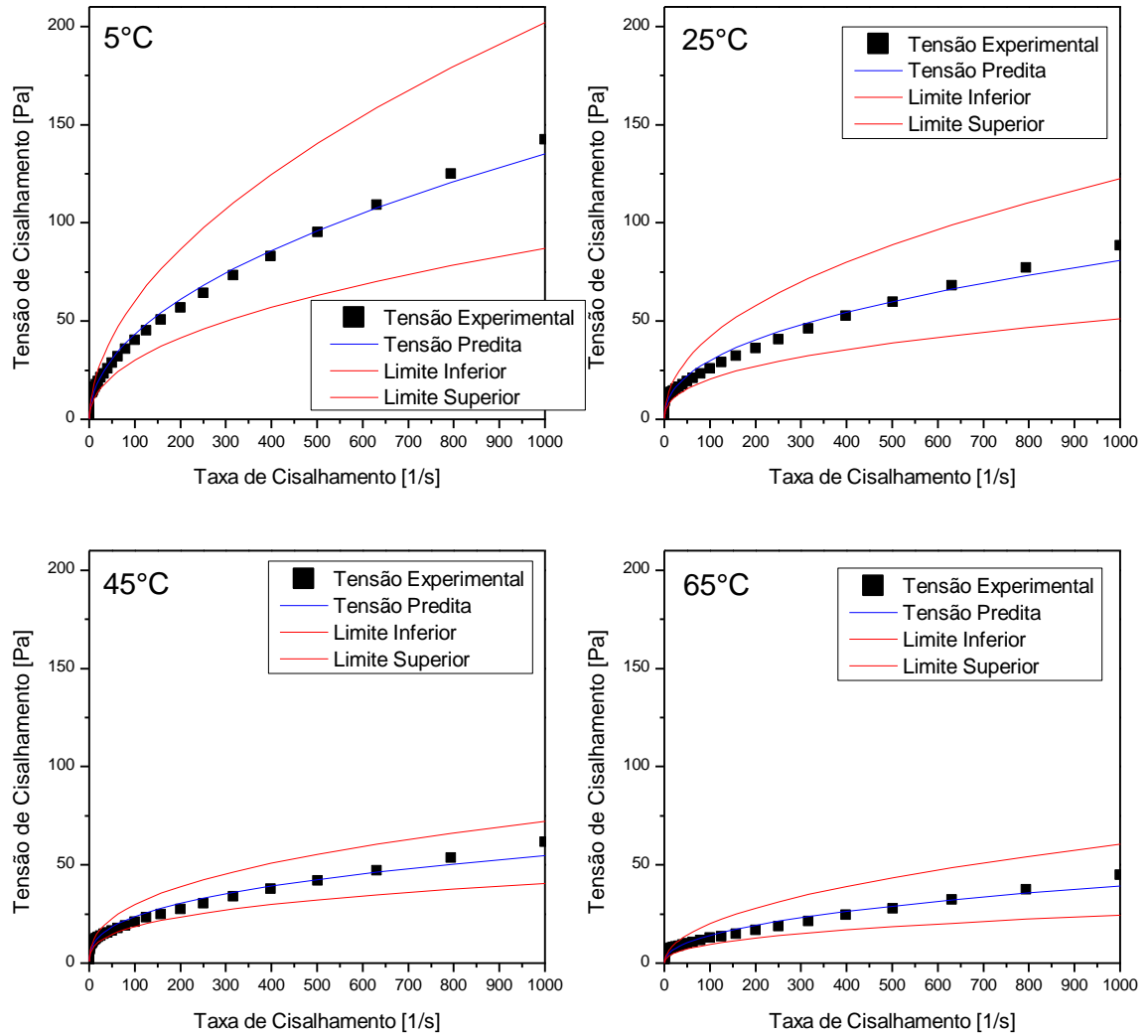


Figura 107. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência.  
(intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

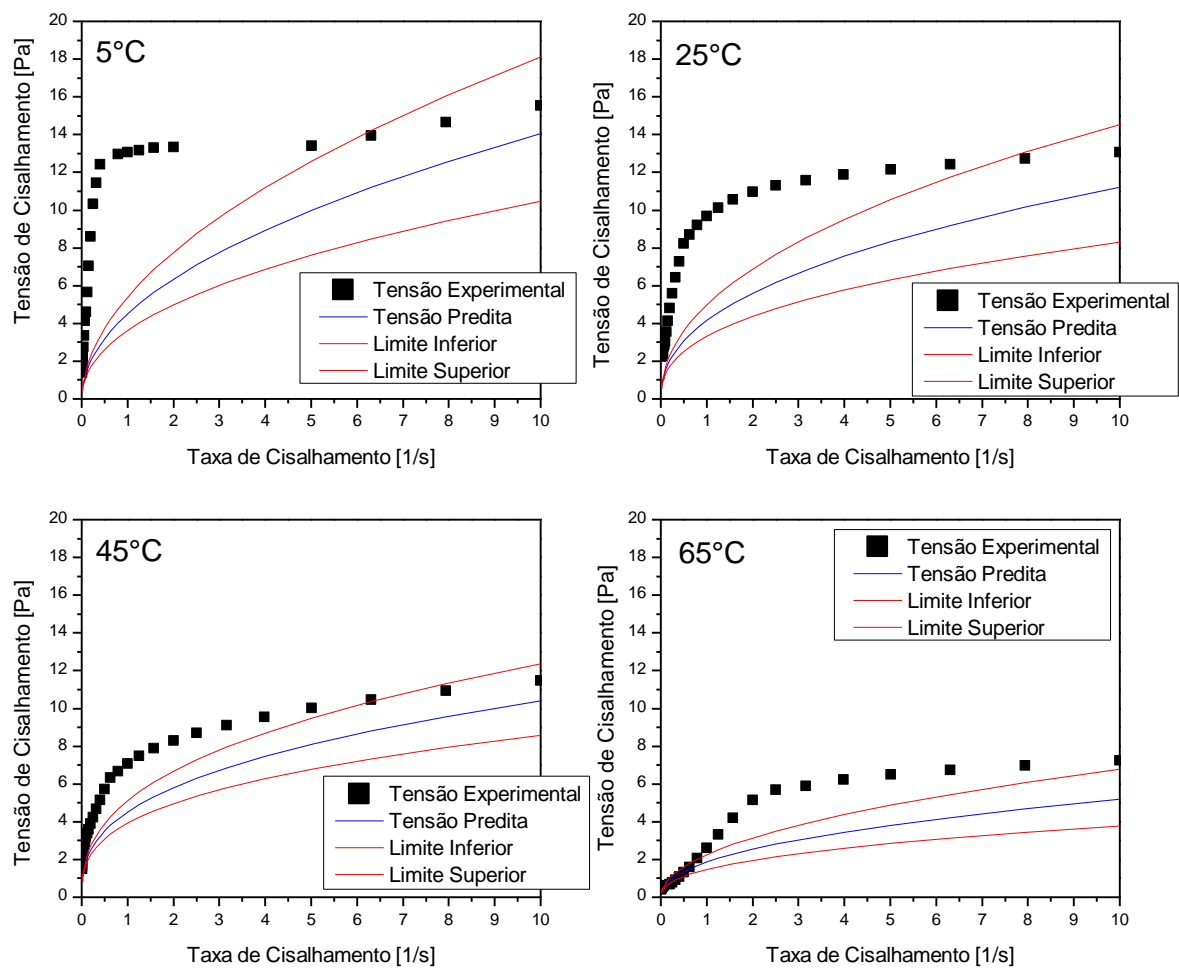


Figura 108. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

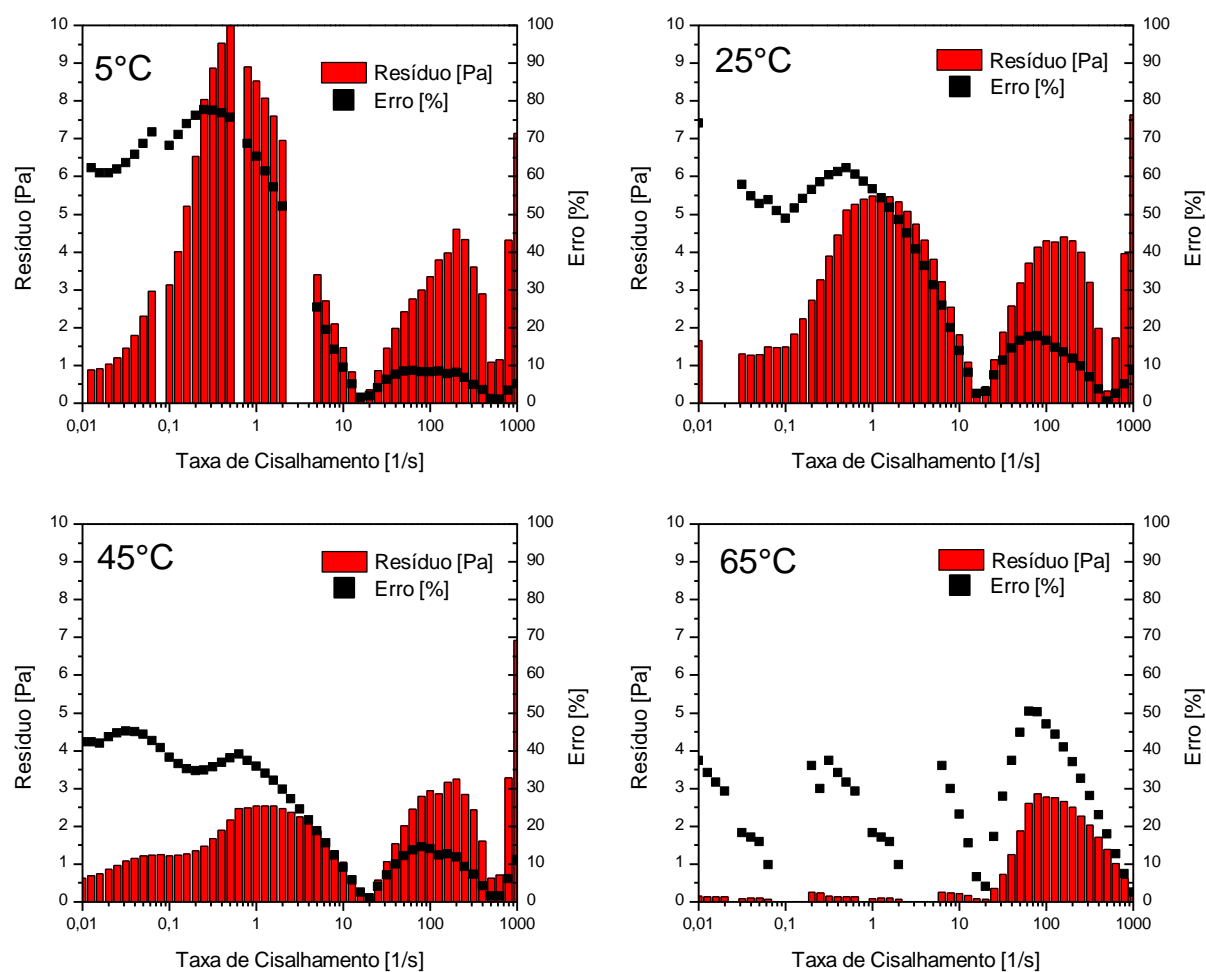


Figura 109. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

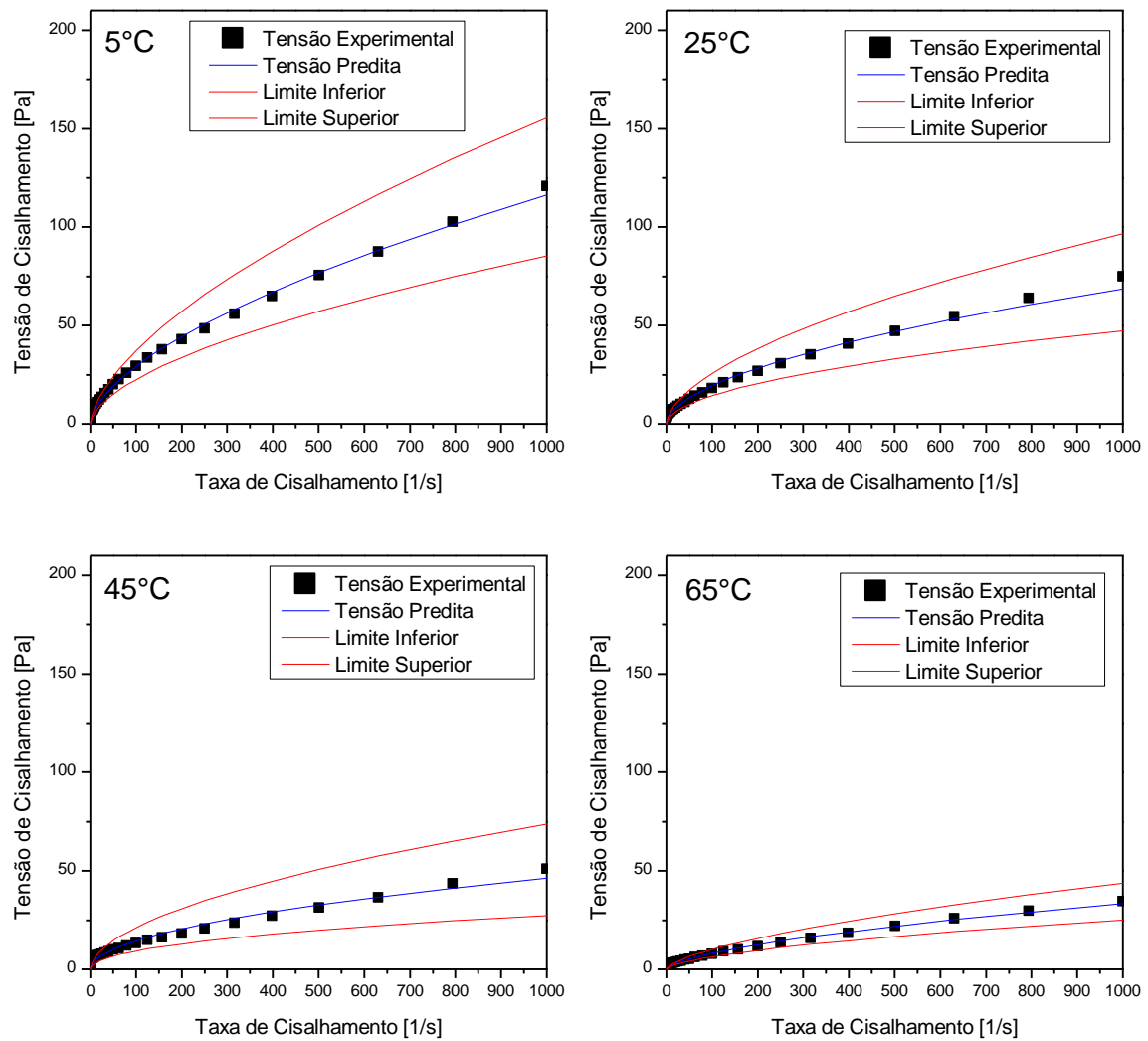


Figura 110. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

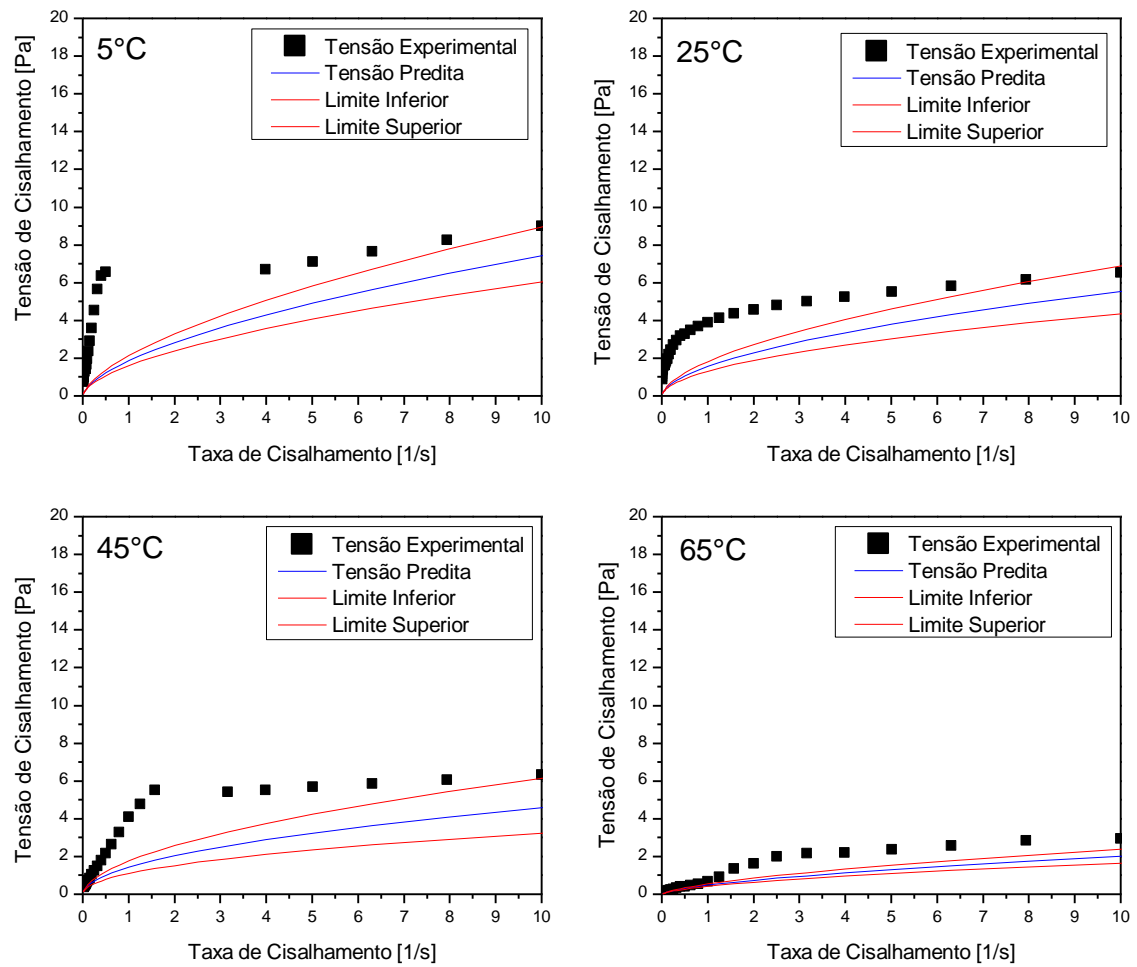


Figura 111. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

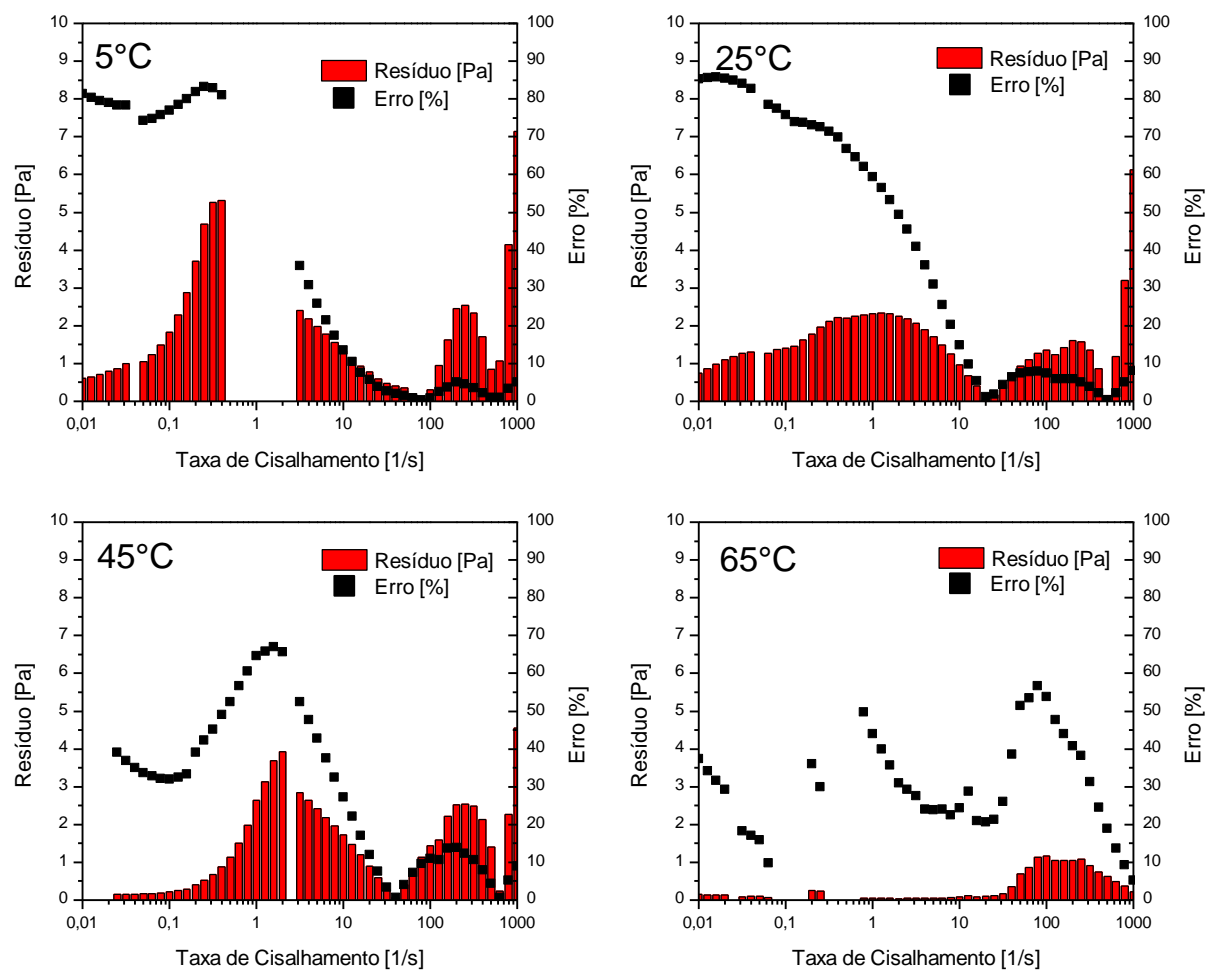




Figura 112. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

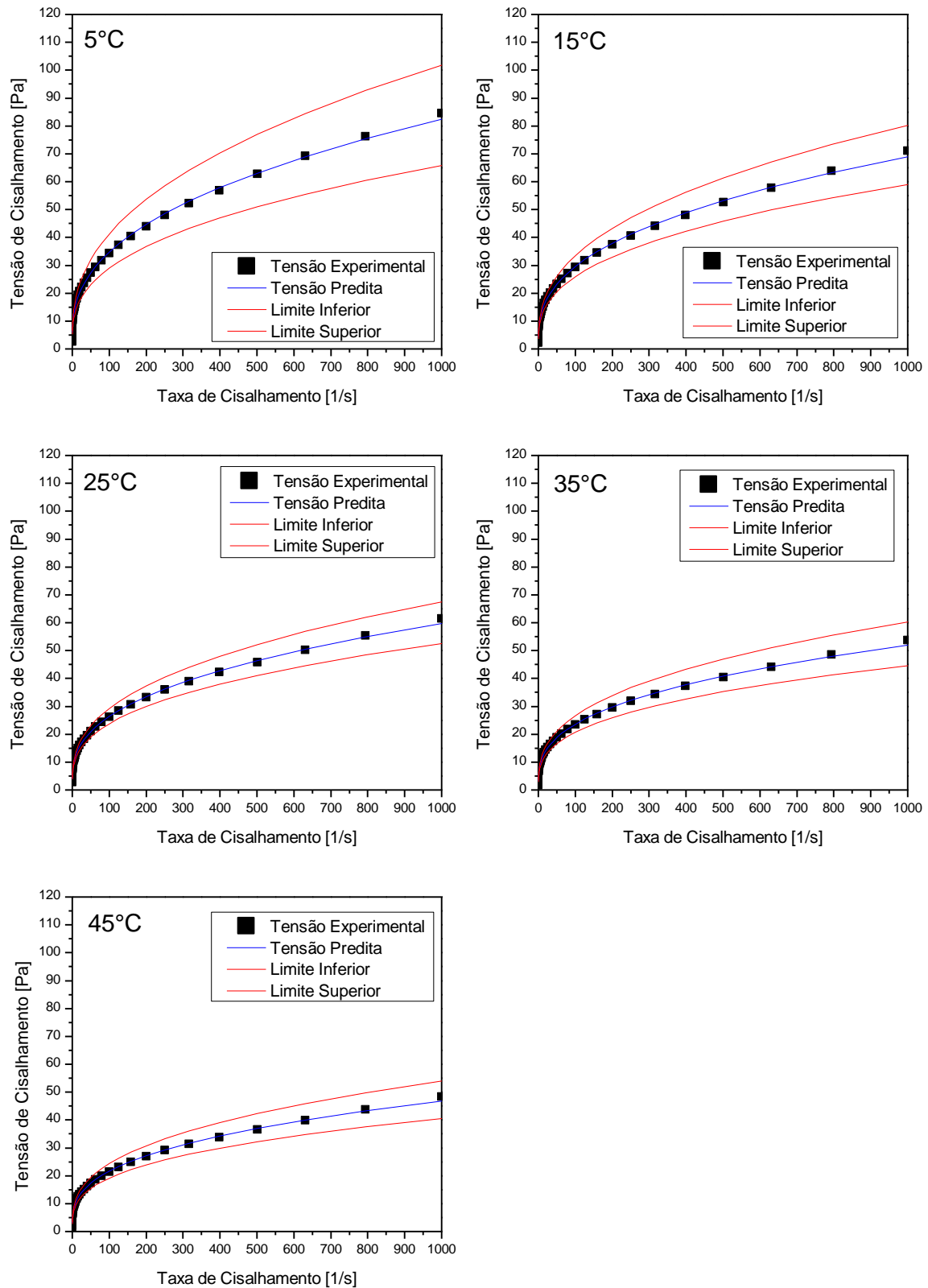


Figura 113. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

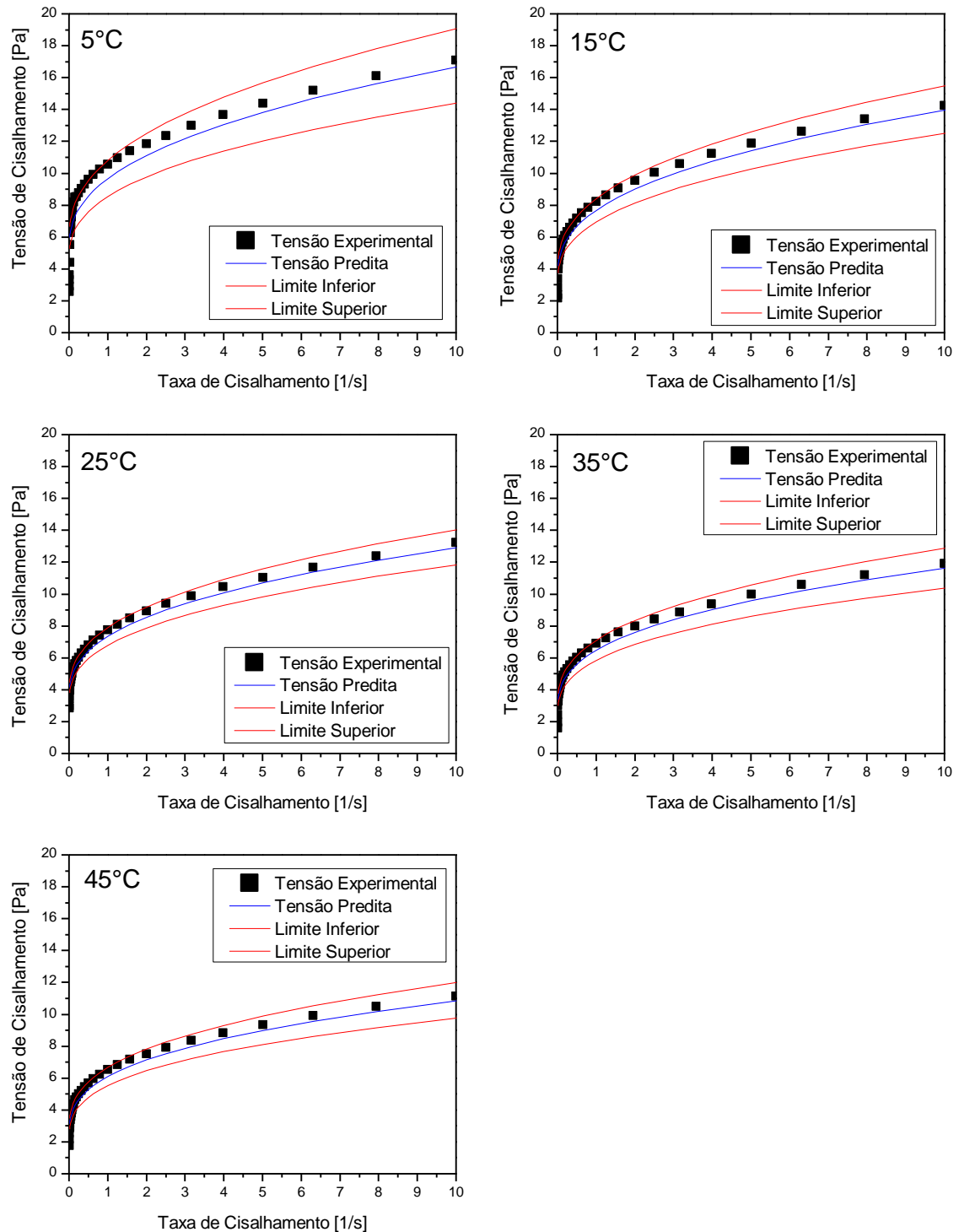


Figura 114. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

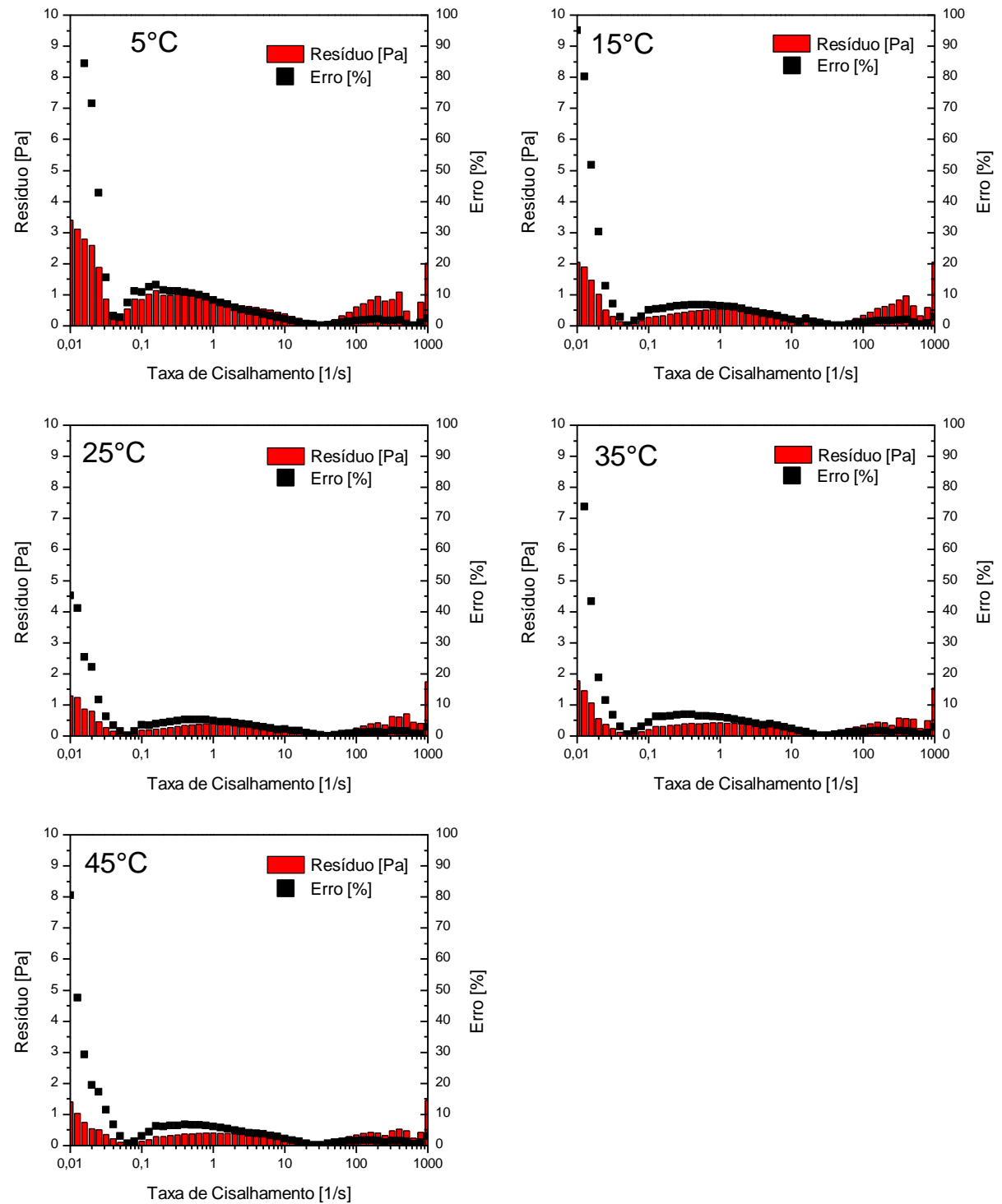


Figura 115. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo 0,01 s<sup>-1</sup> até 1000 s<sup>-1</sup>).

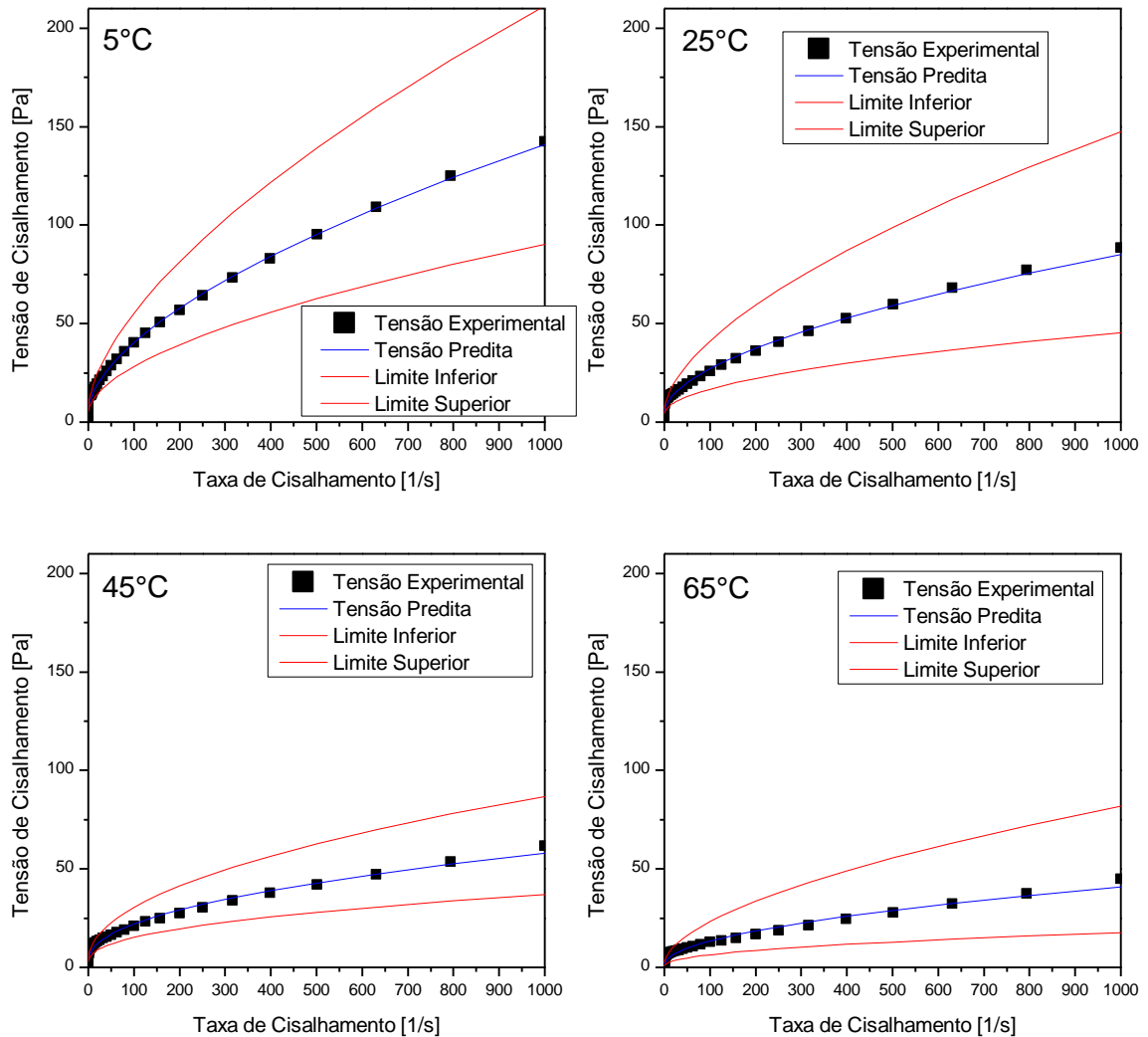


Figura 116. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

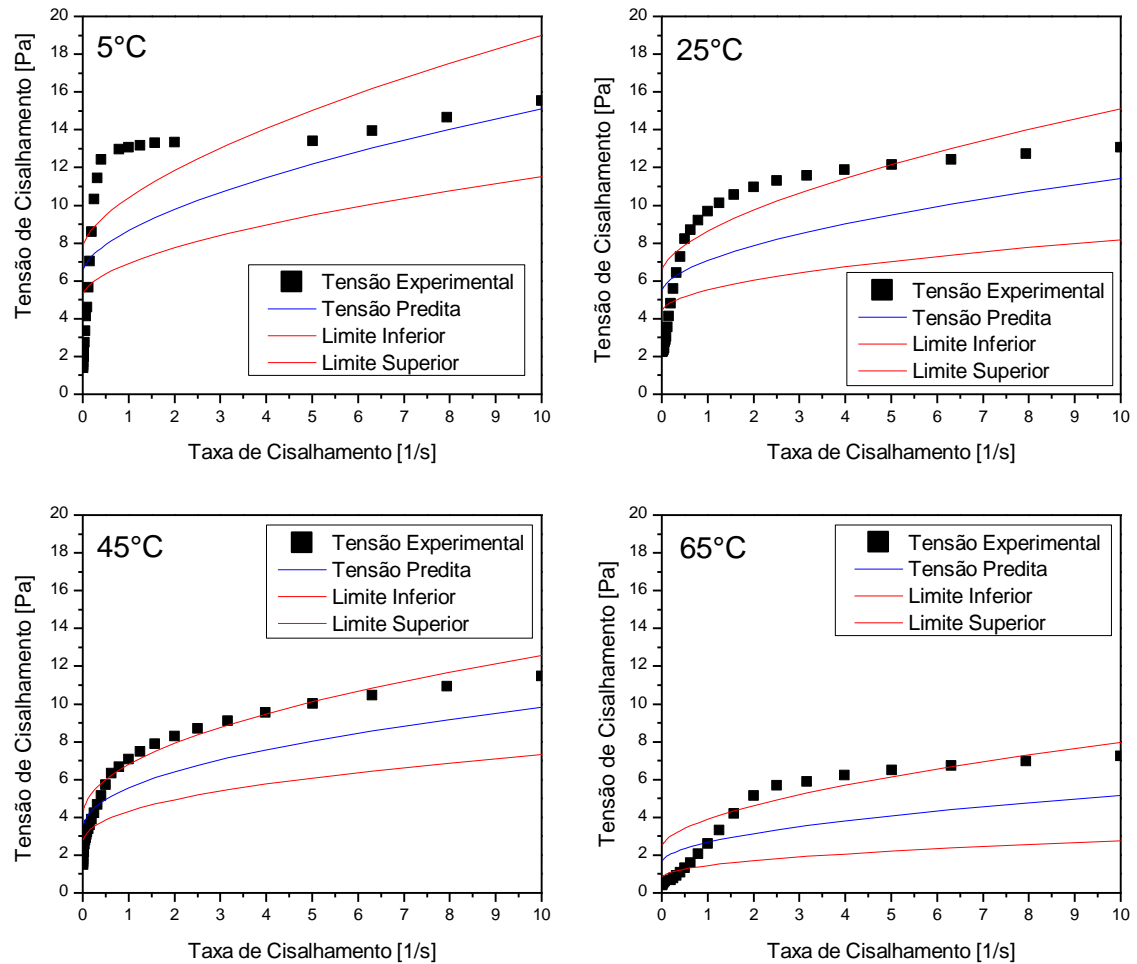


Figura 117. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

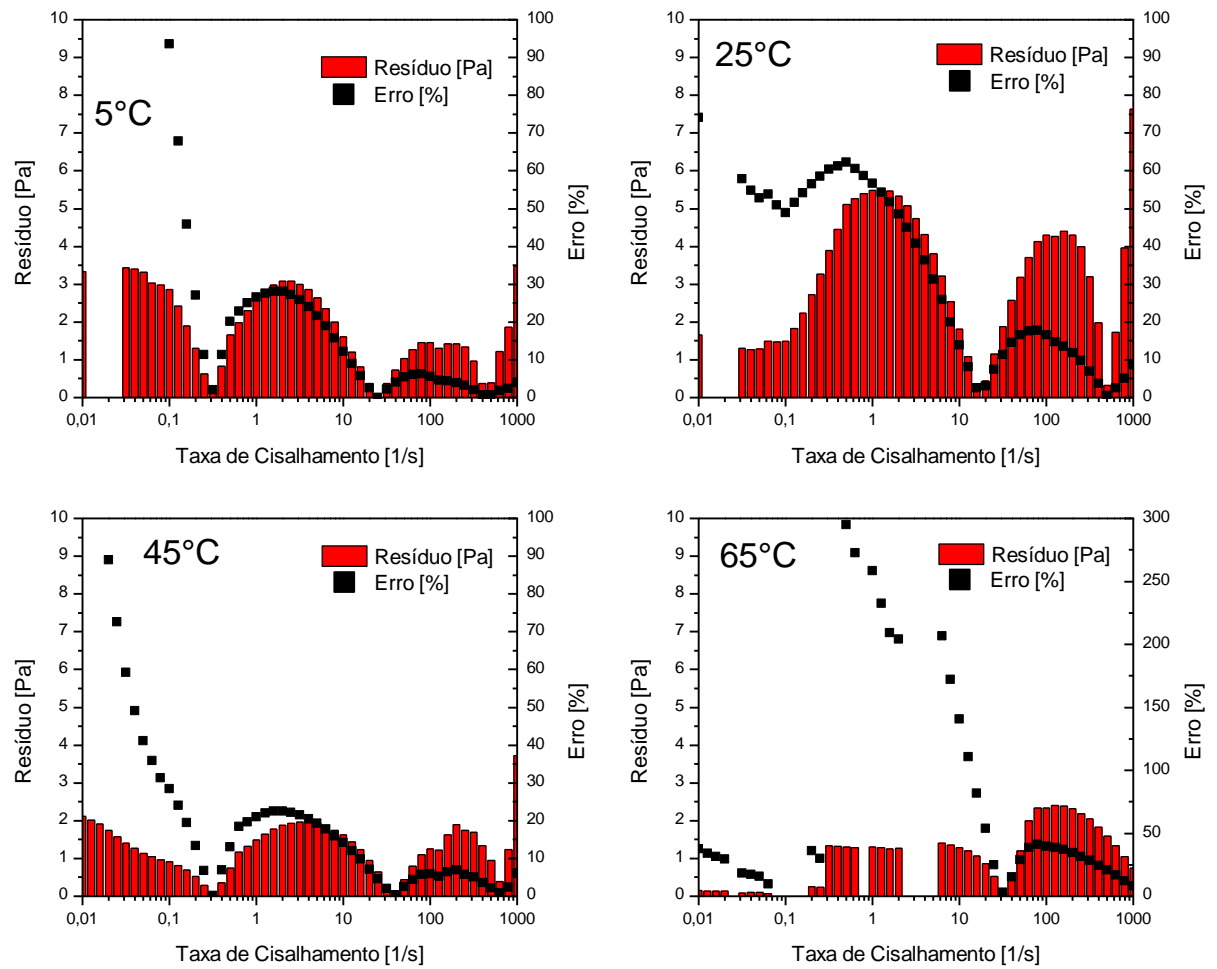


Figura 118. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

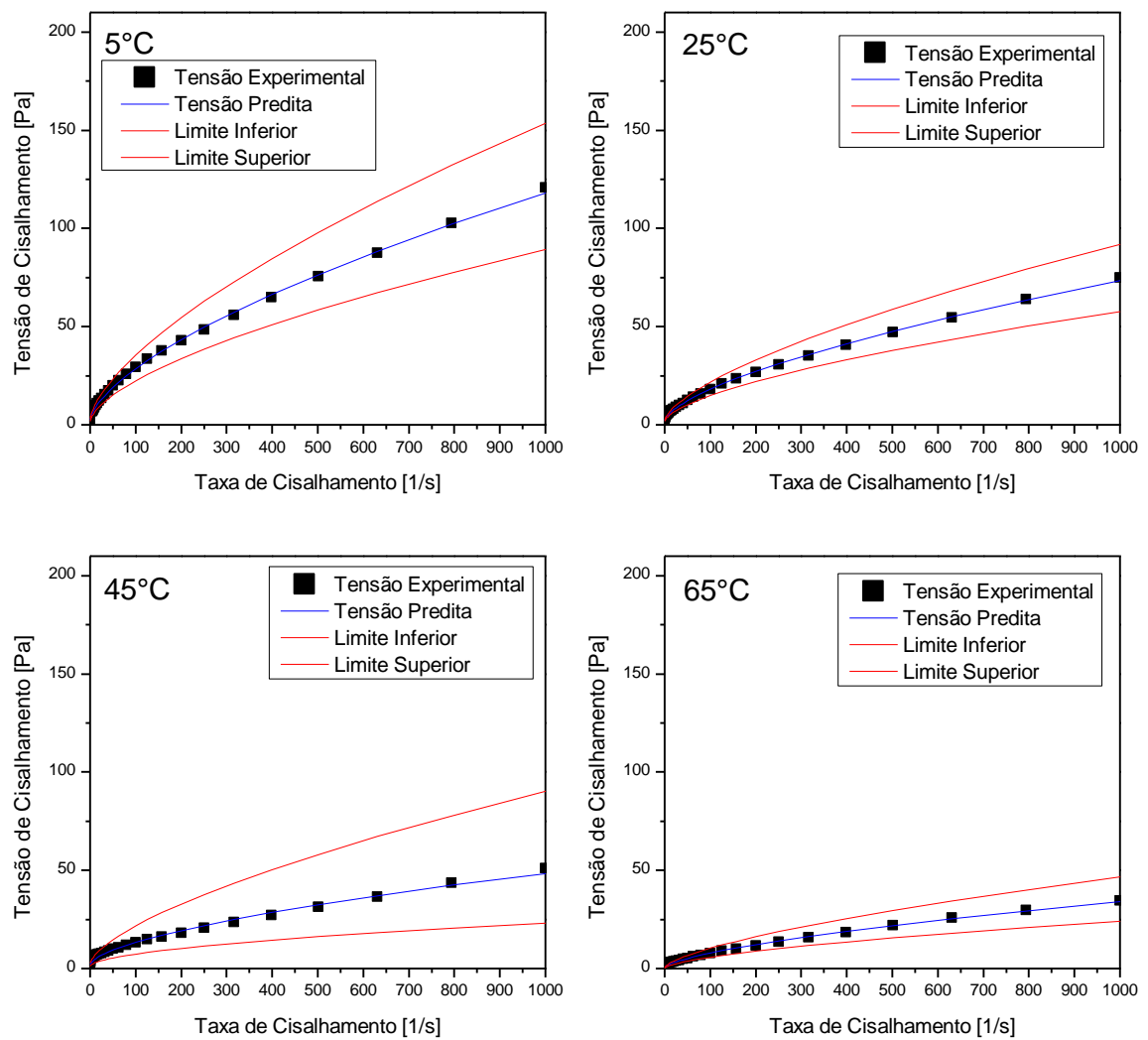


Figura 119. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

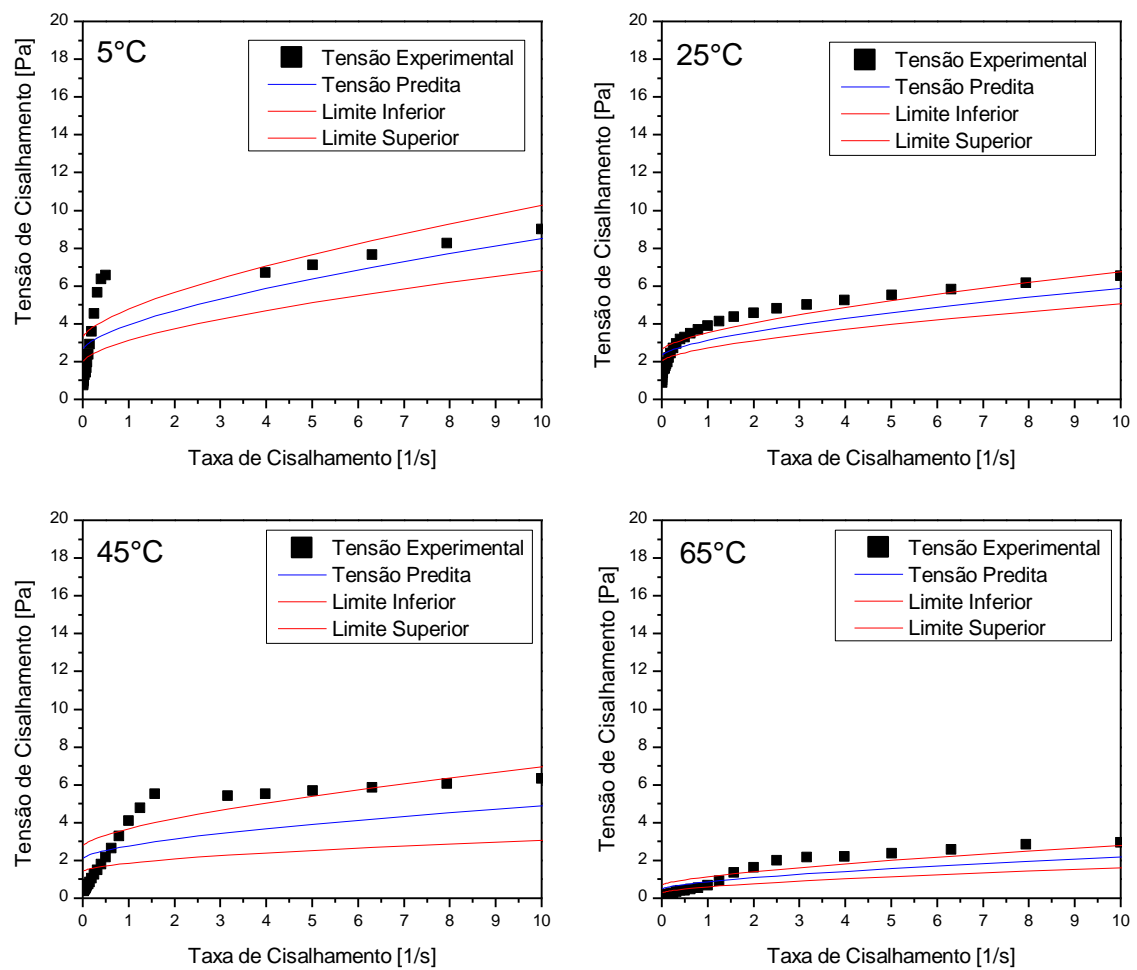




Figura 120. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley (intervalo  $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

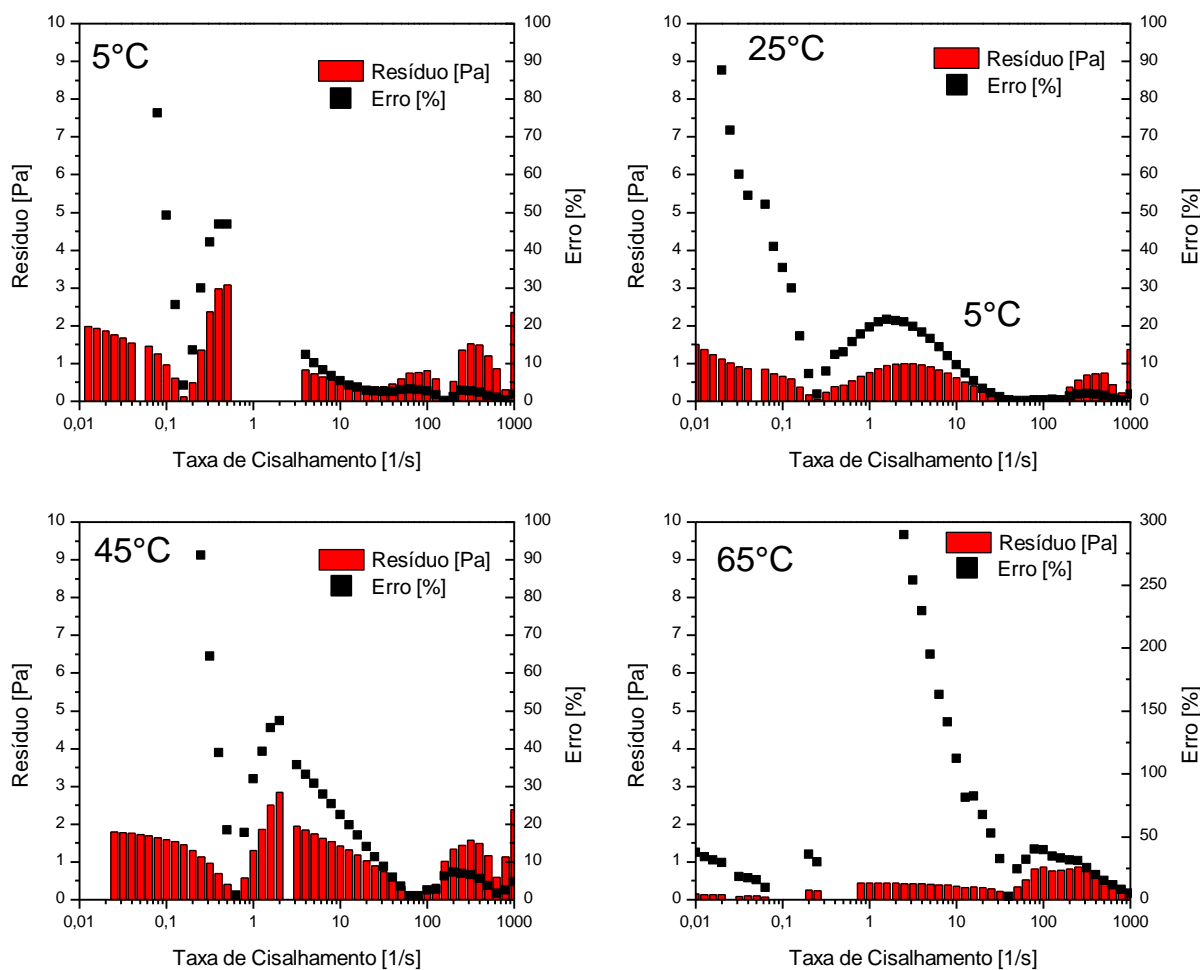


Figura 121. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

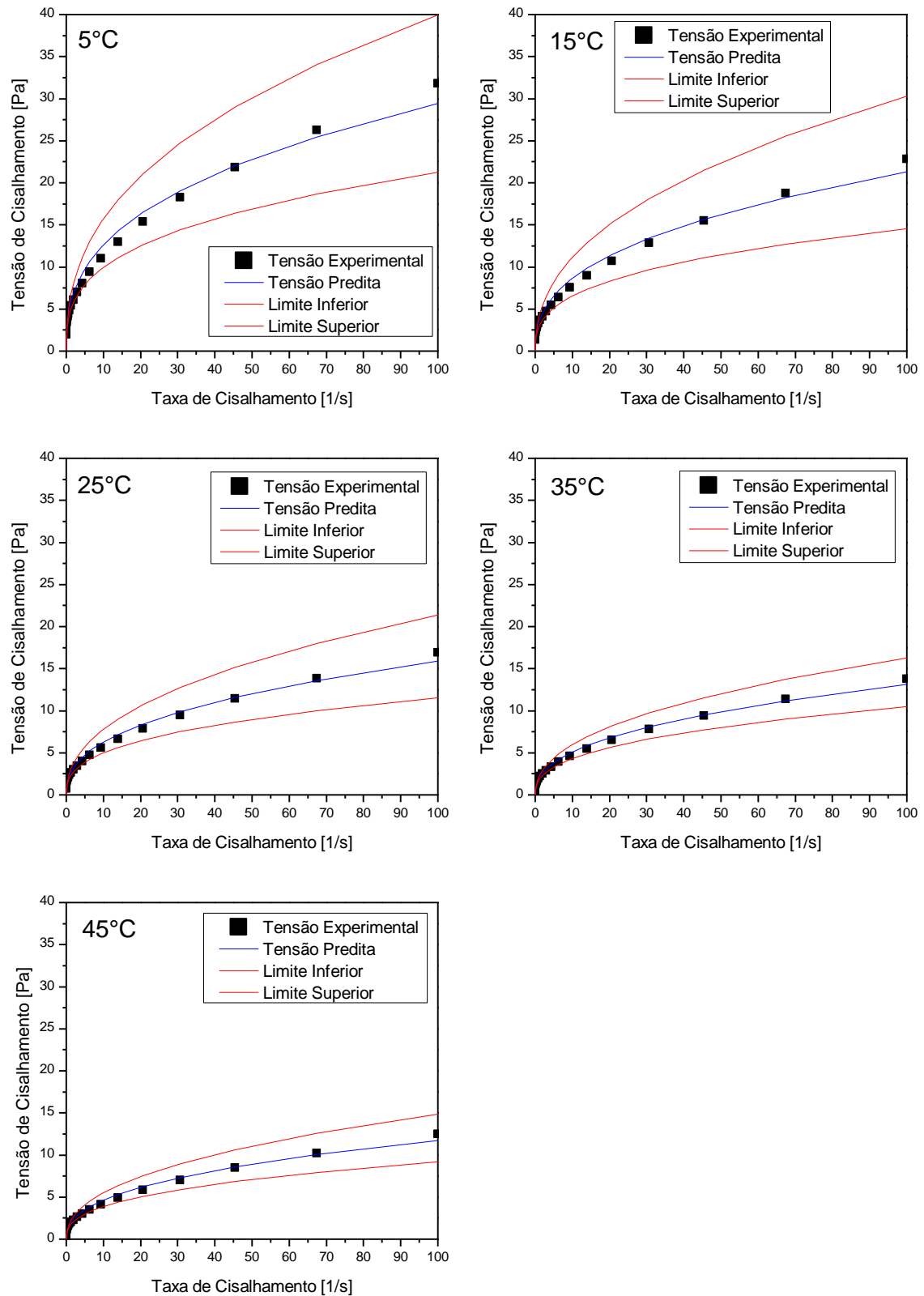


Figura 122. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

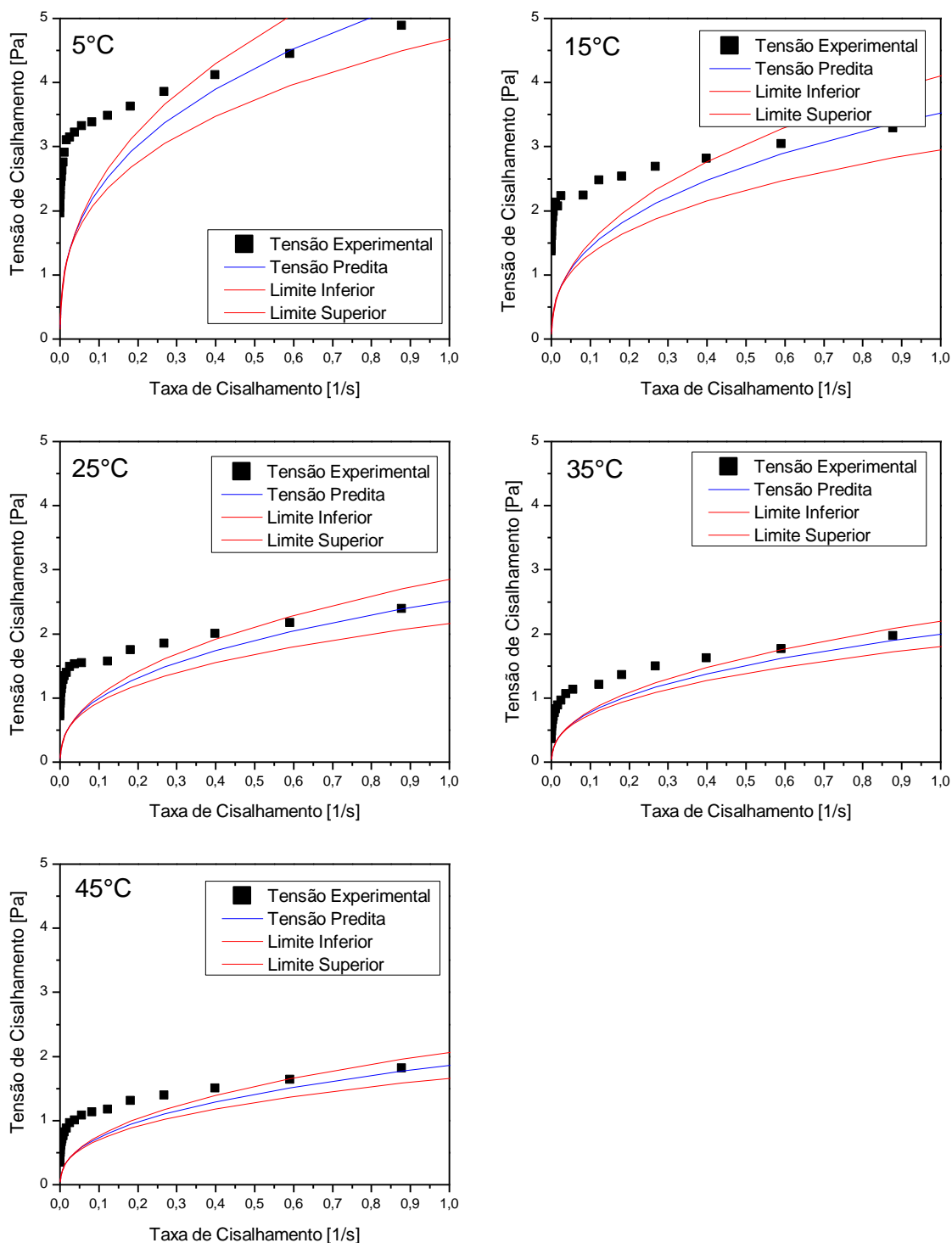


Figura 123. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

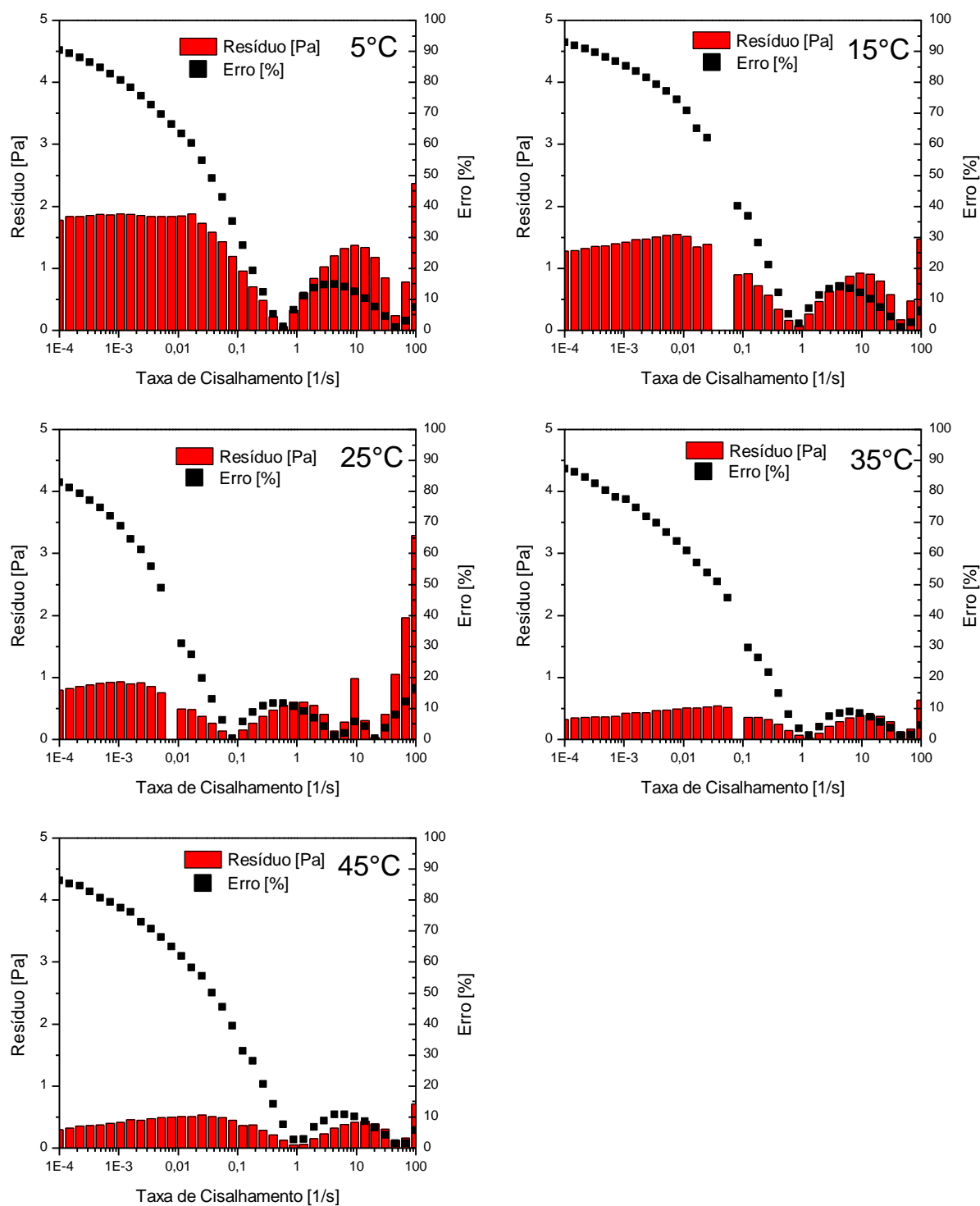


Figura 124. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

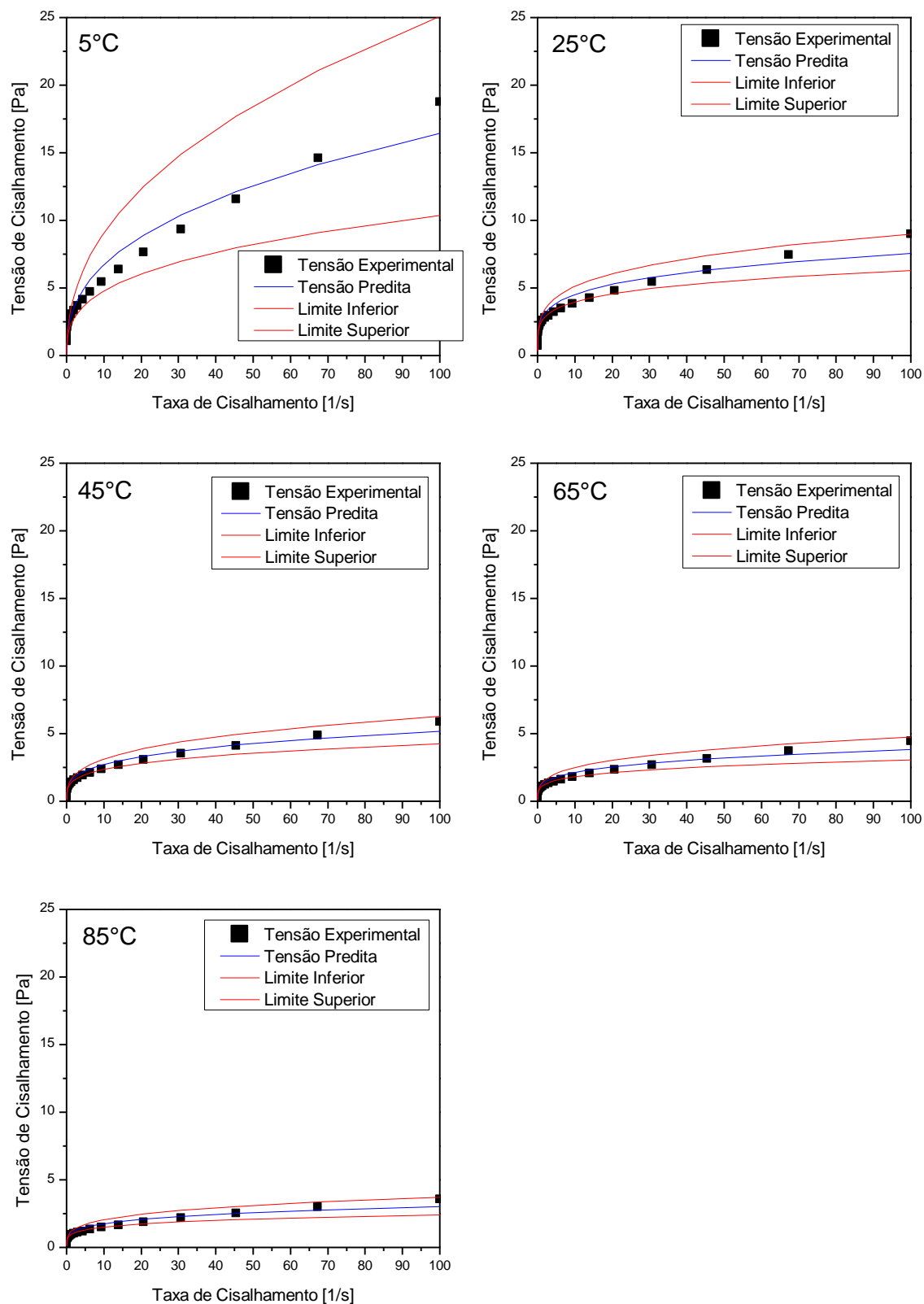


Figura 125. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência.  
Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

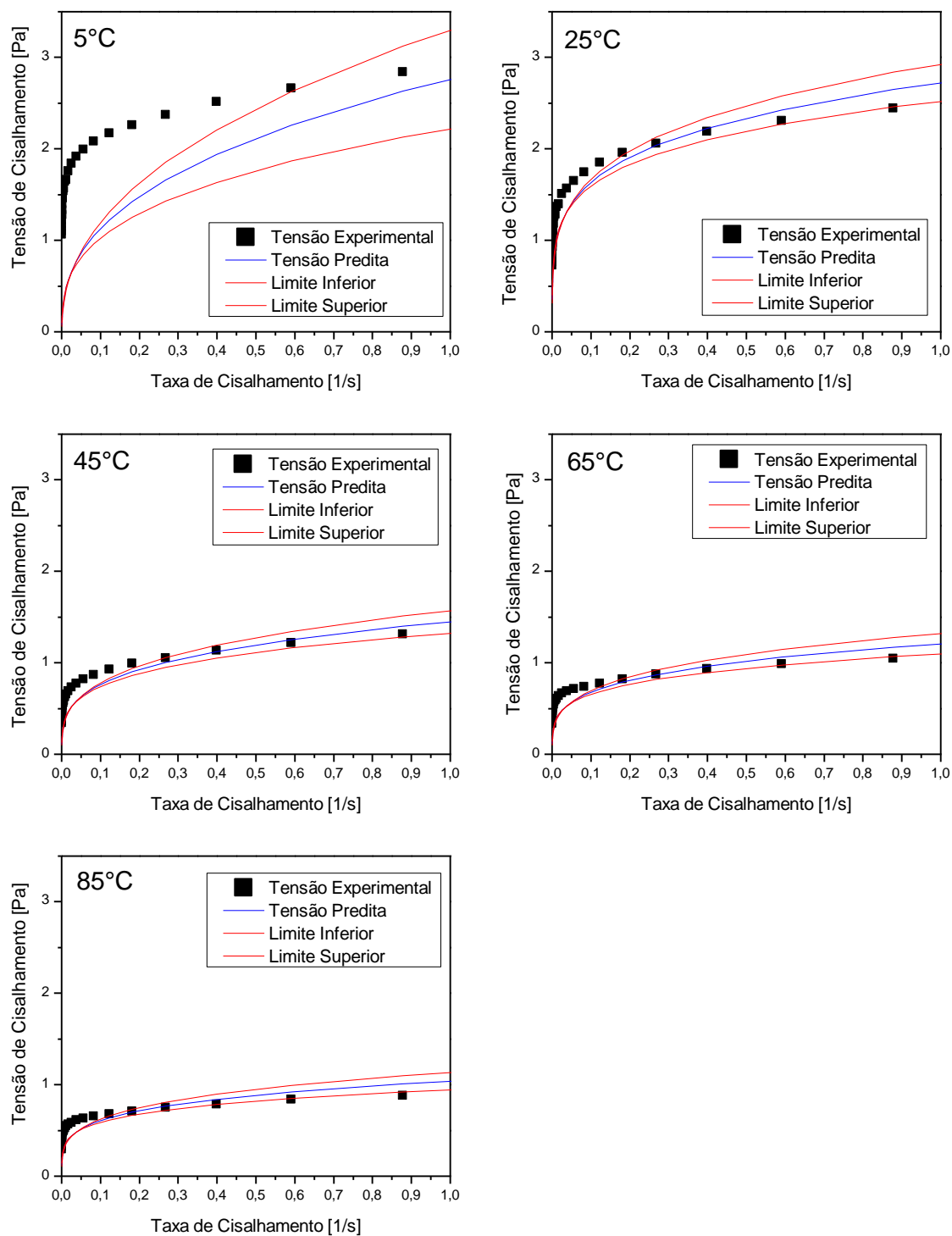


Figura 126. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

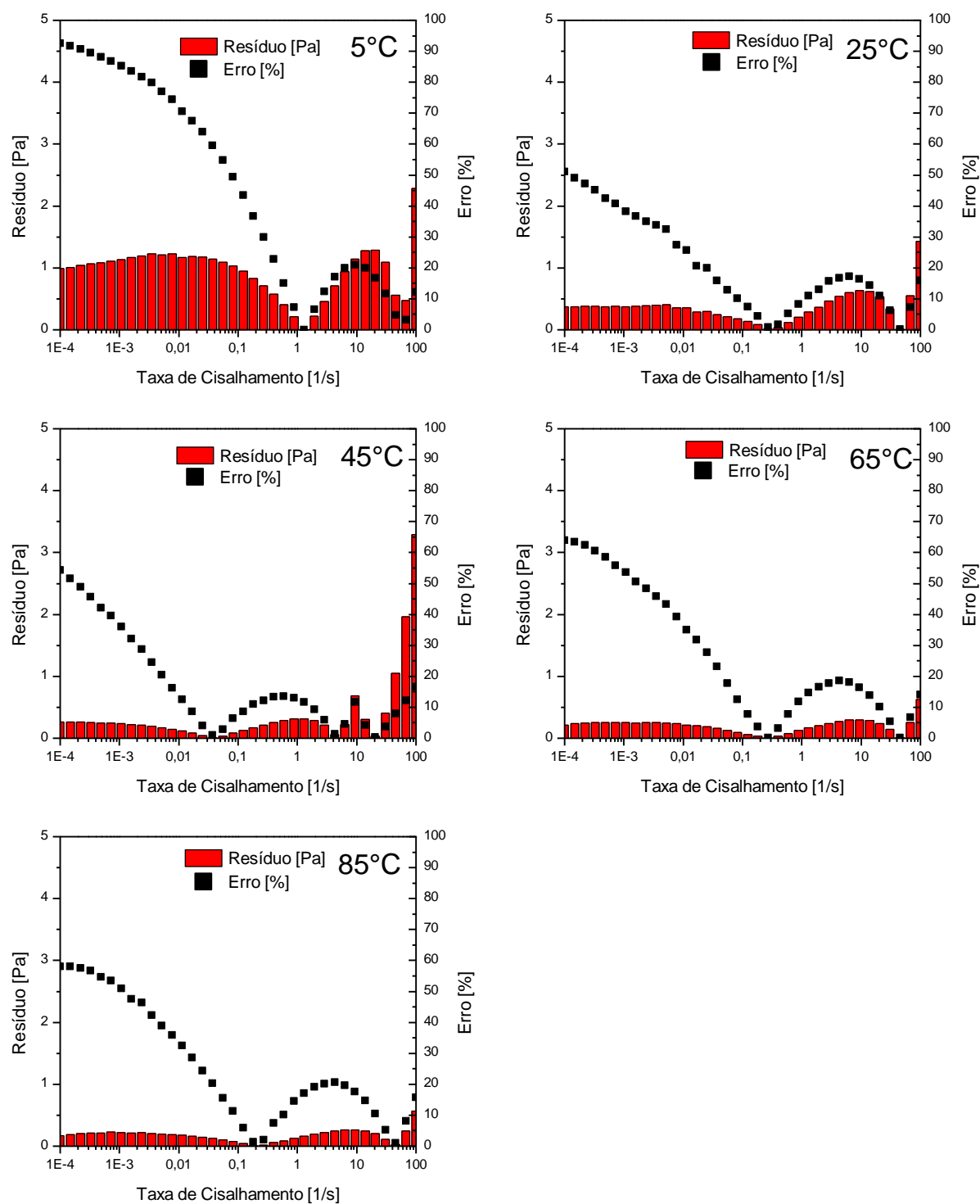


Figura 127. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

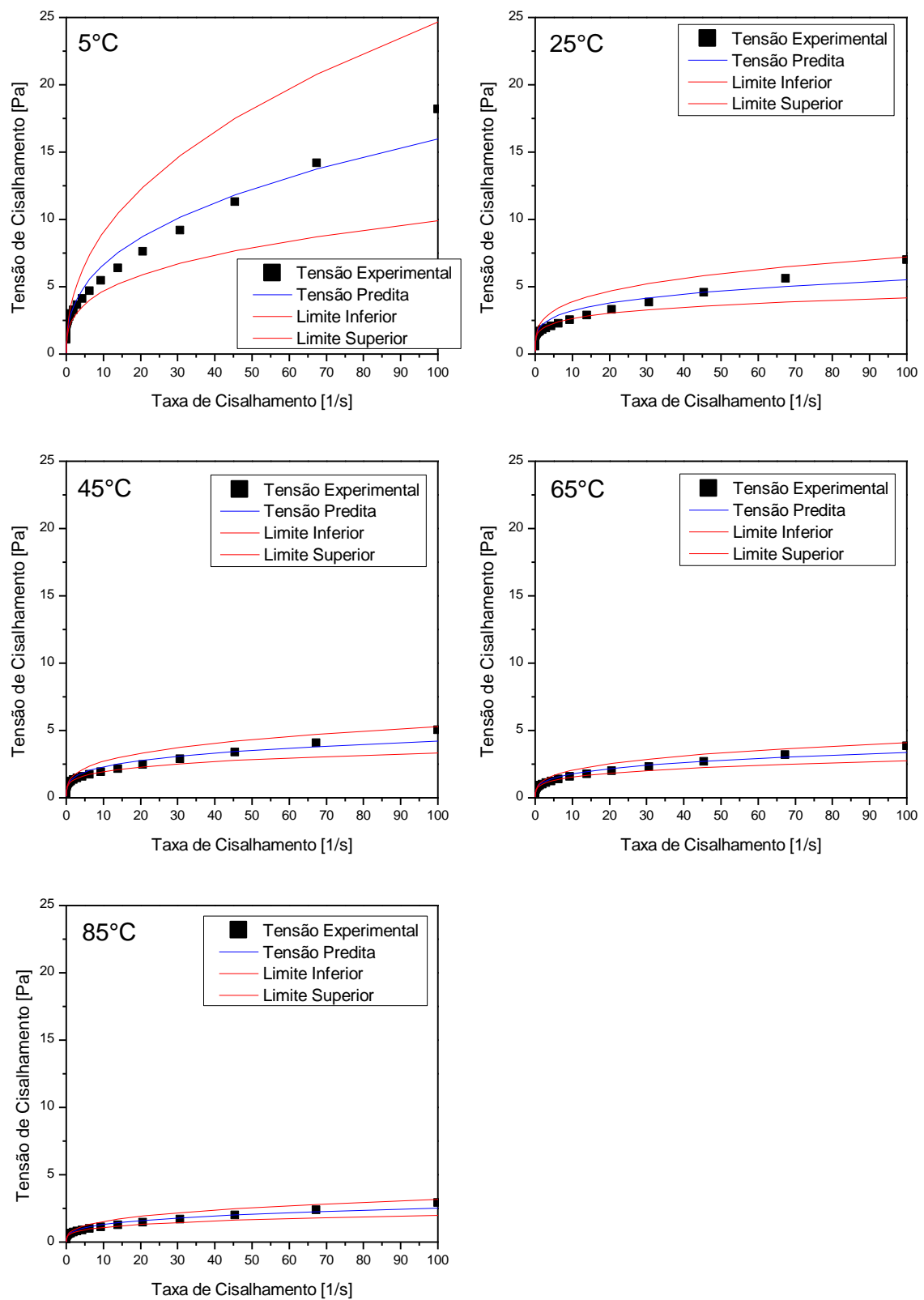




Figura 128. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência.  
Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

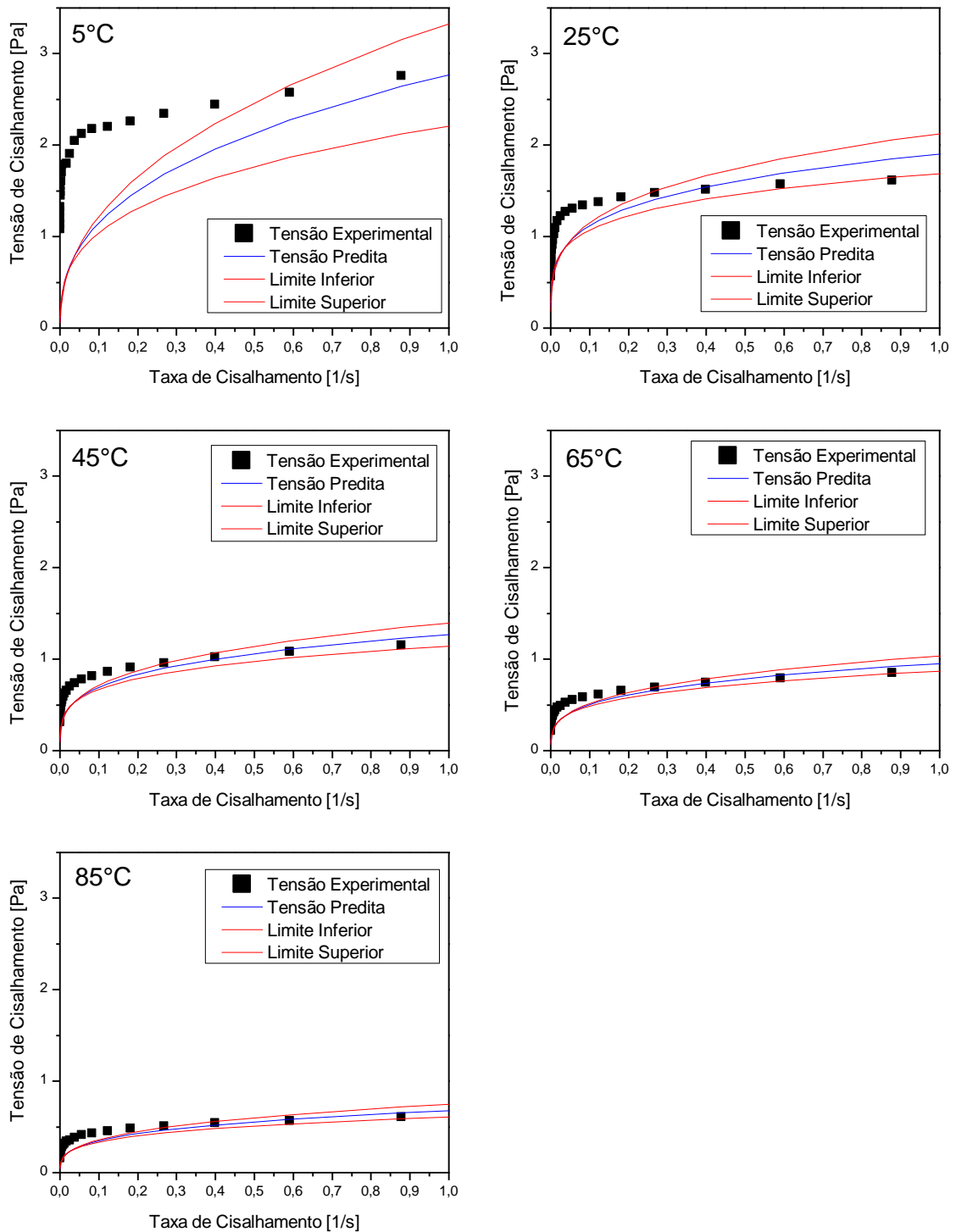


Figura 129. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

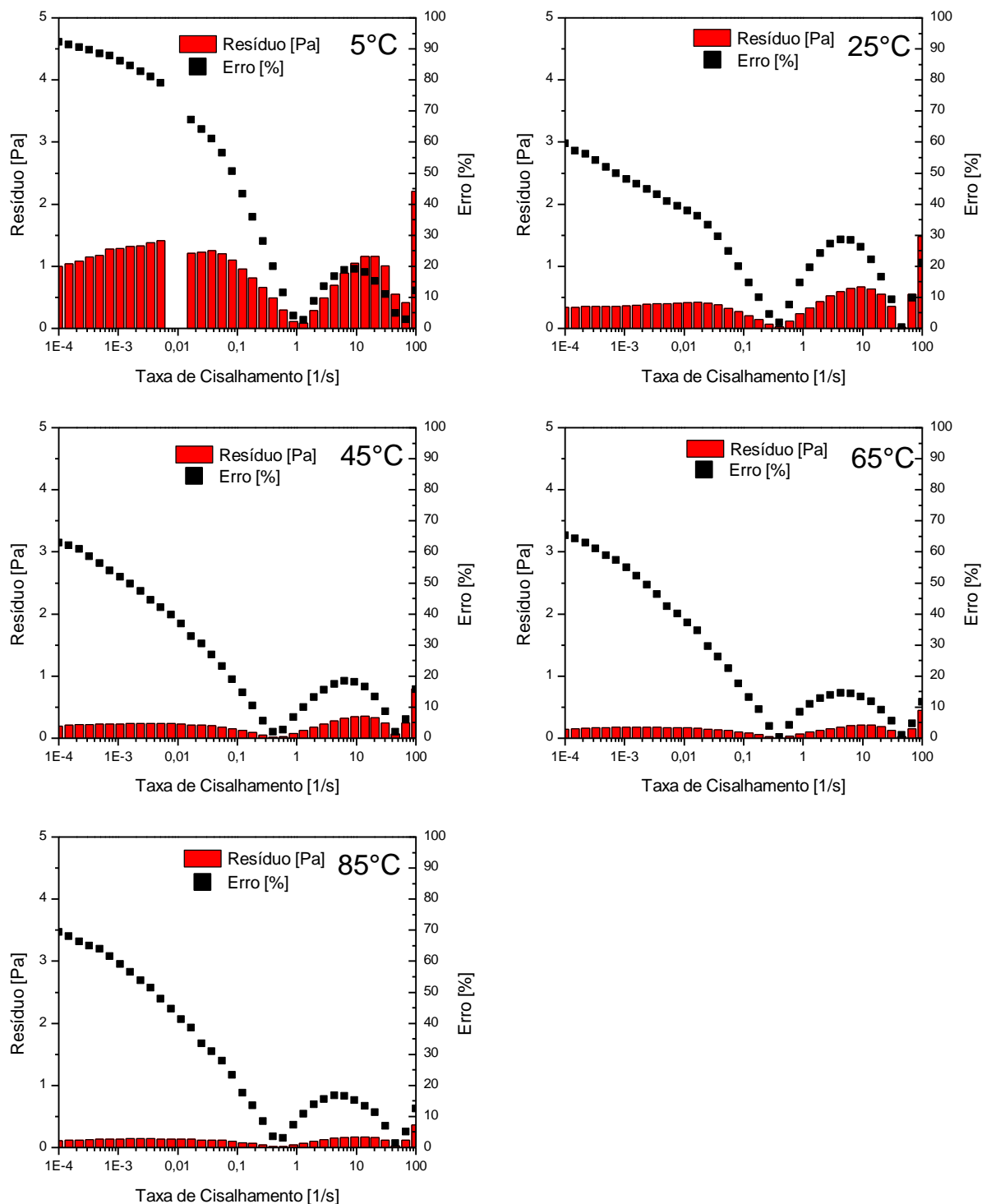


Figura 130. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

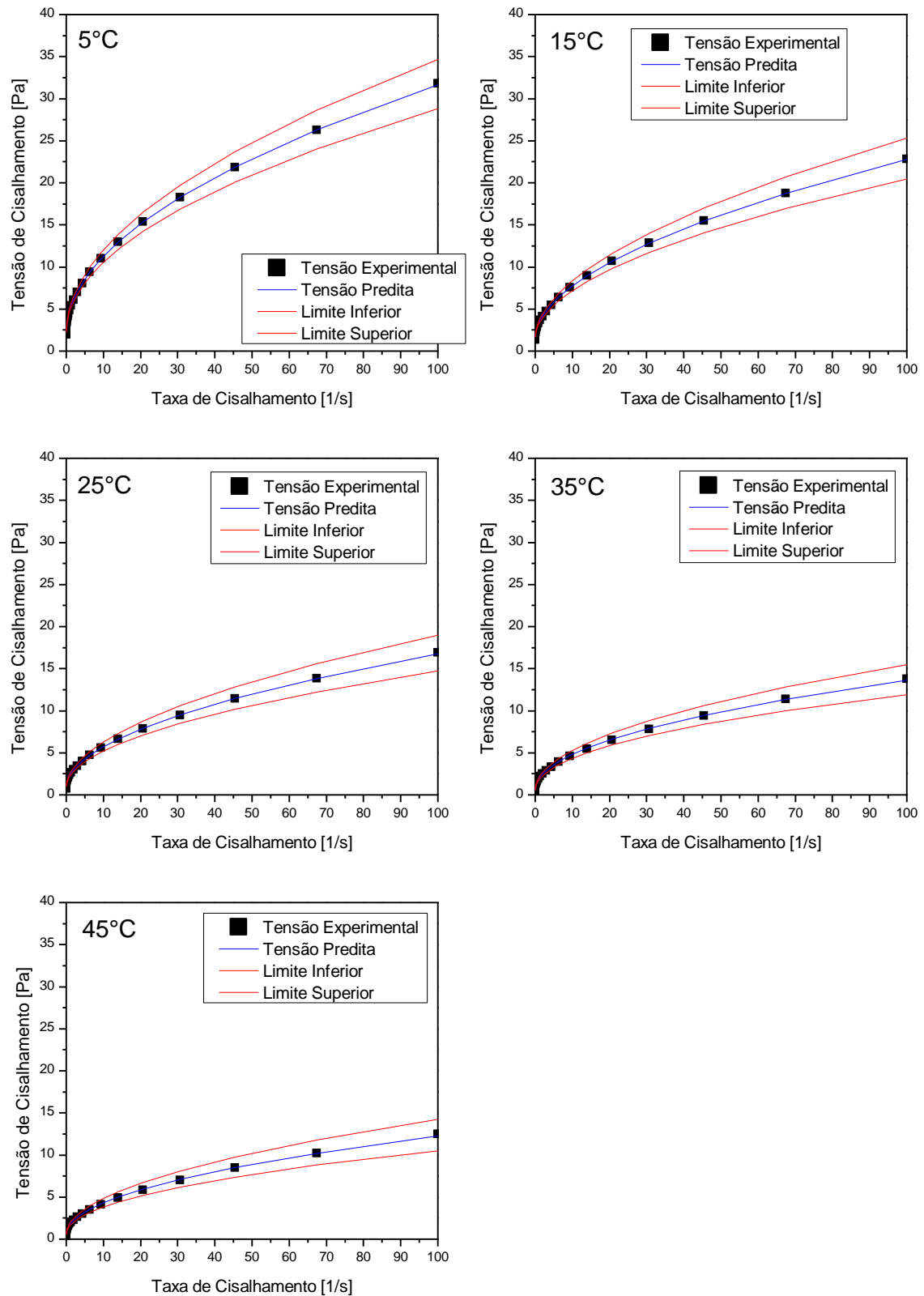


Figura 131. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

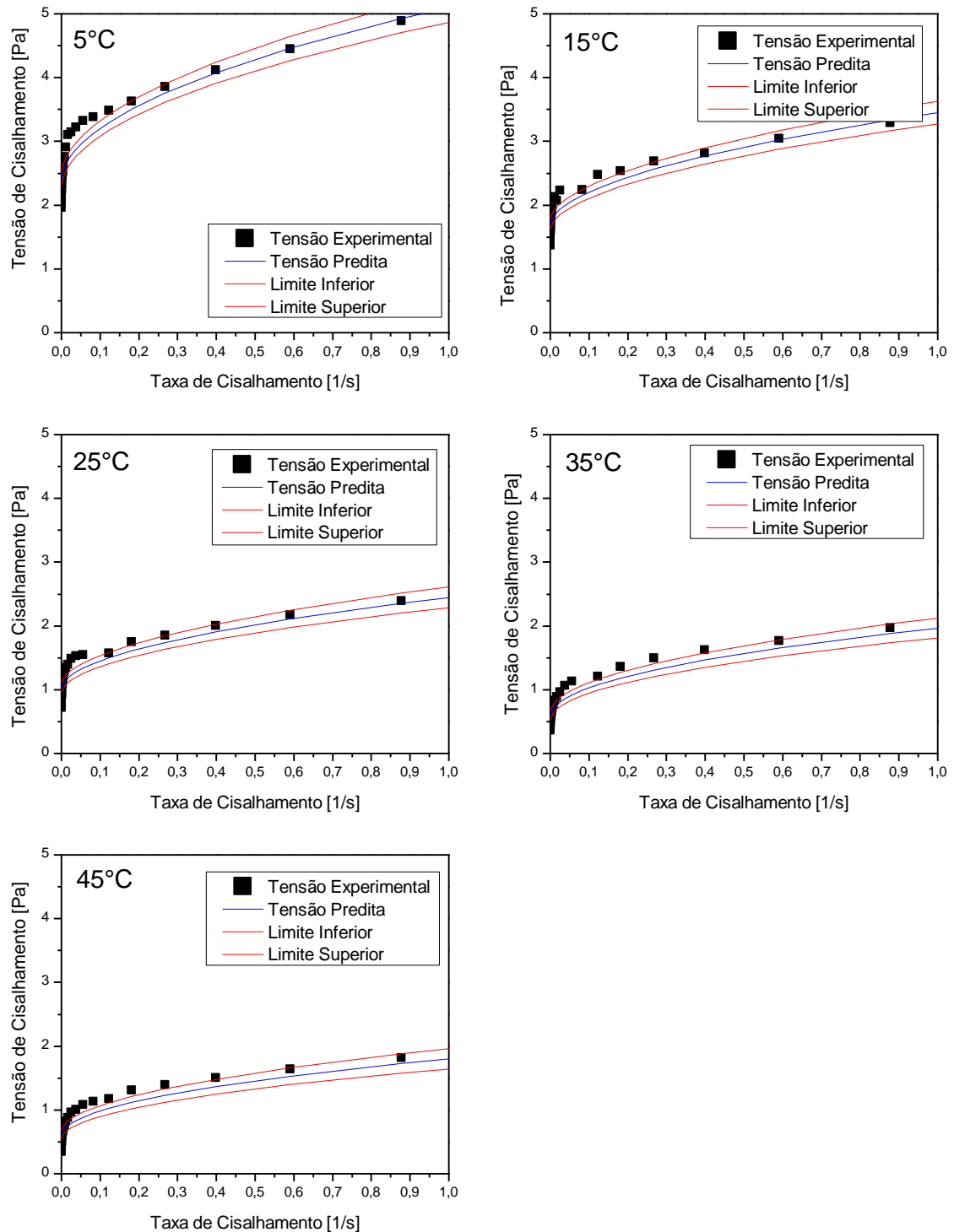


Figura 132. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

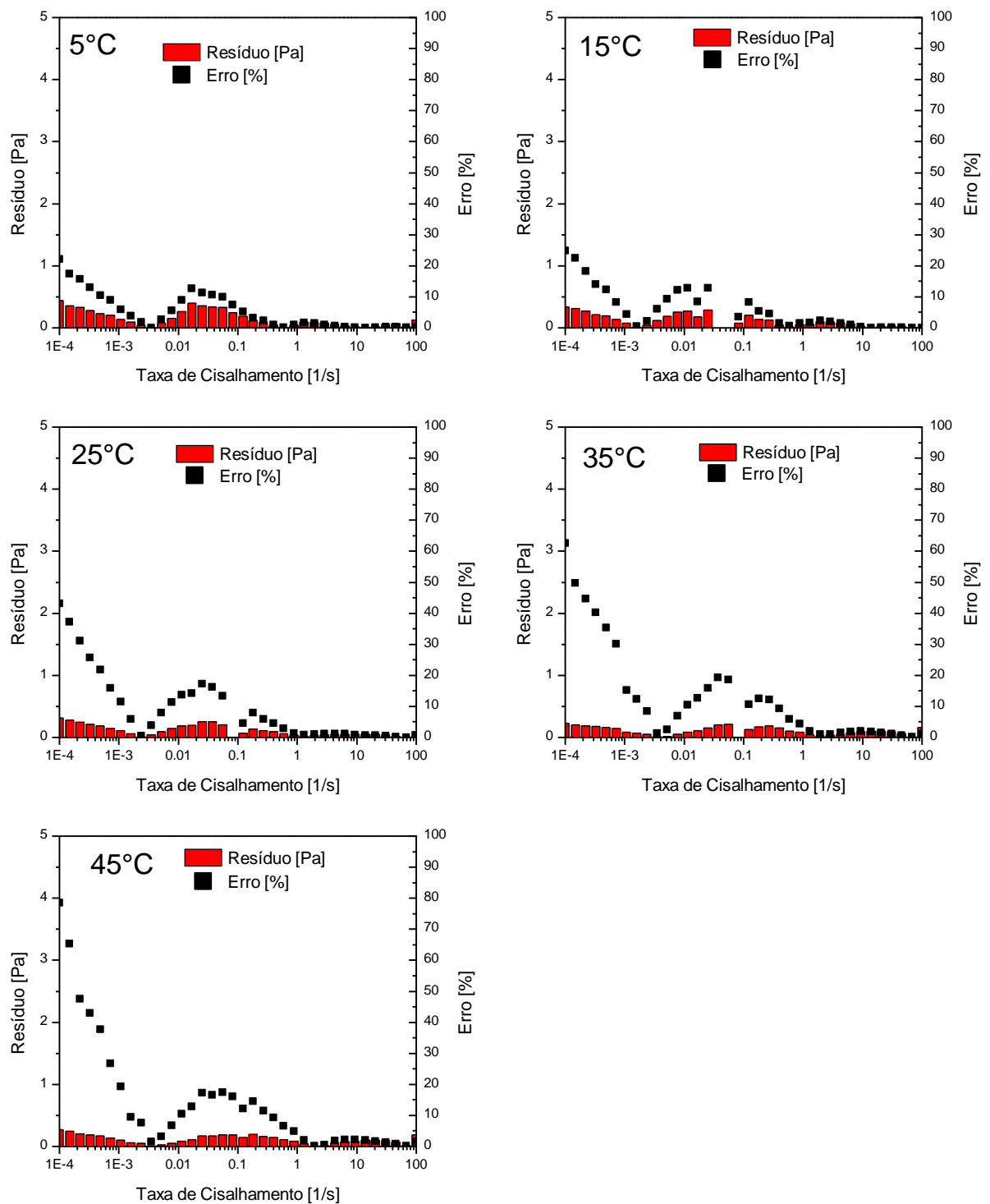


Figura 133. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

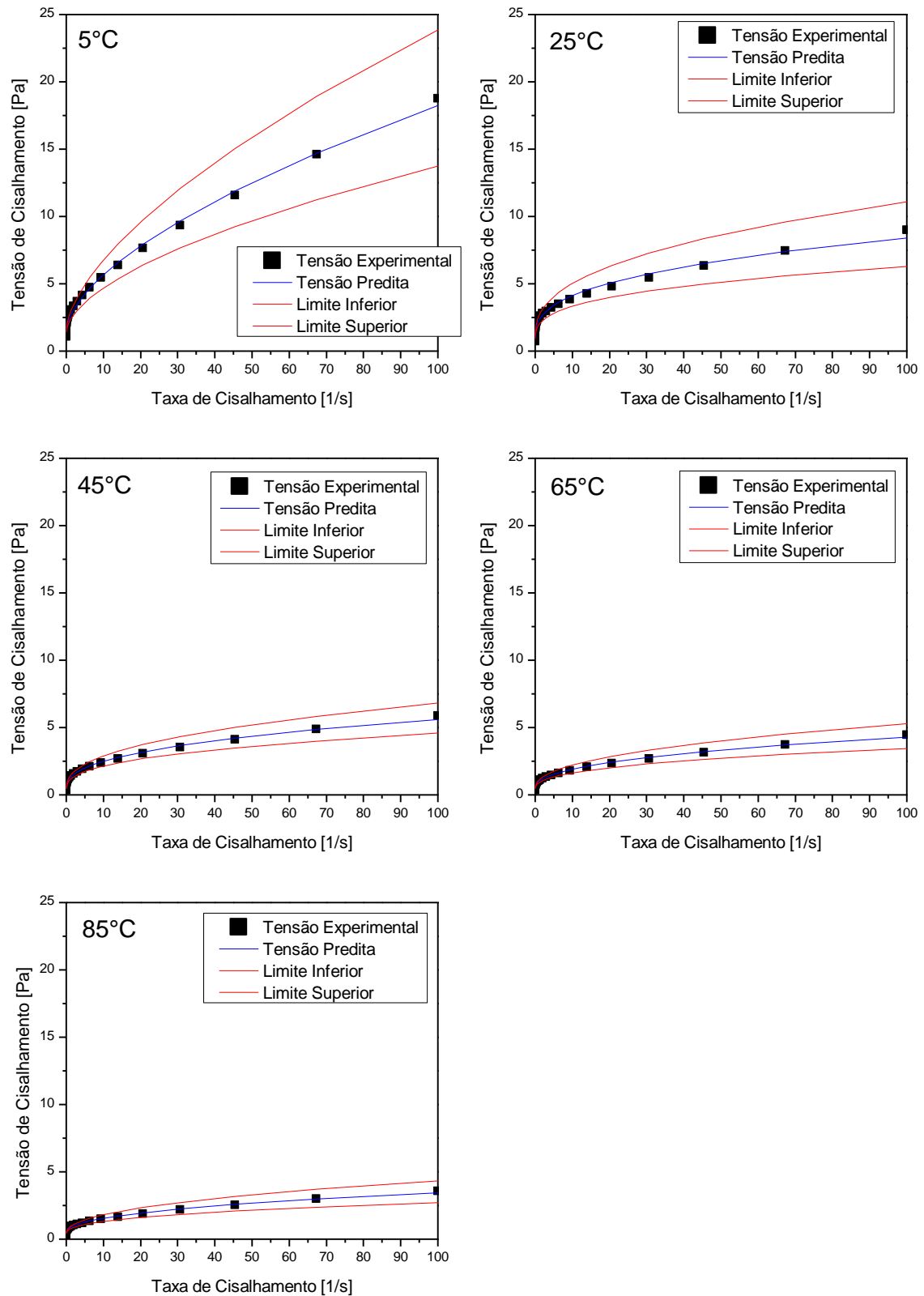


Figura 134. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley.

Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

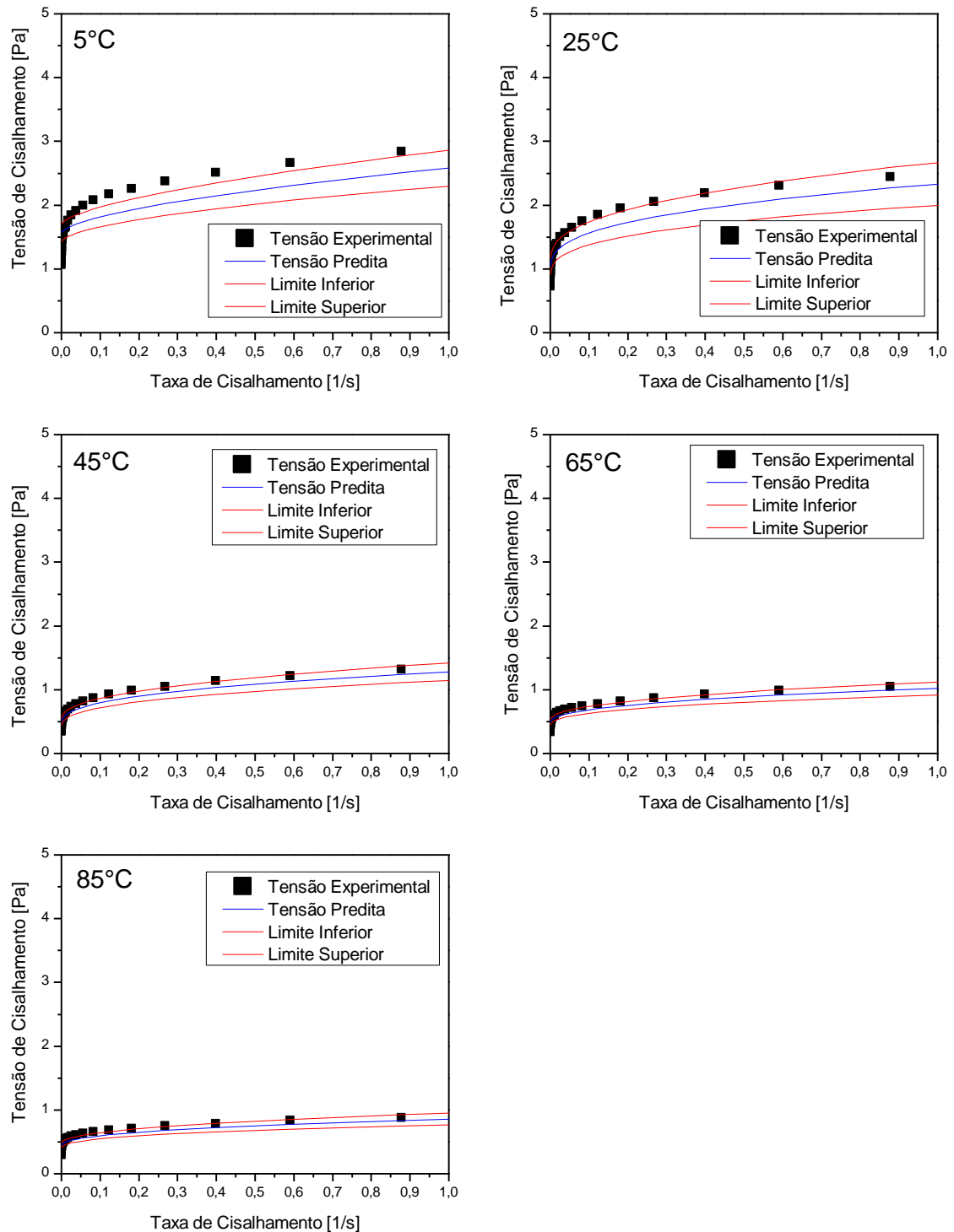


Figura 135. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

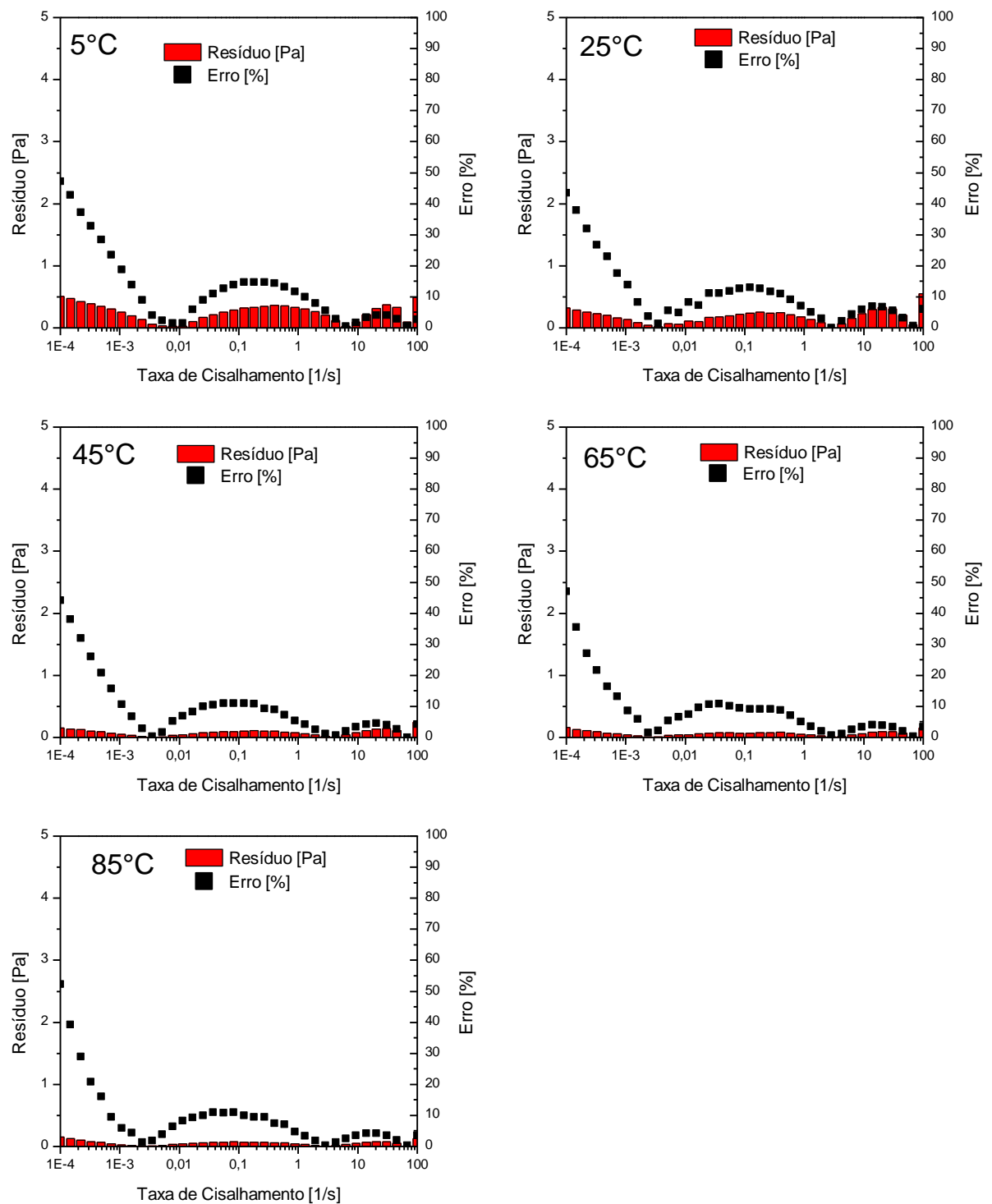




Figura 136. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

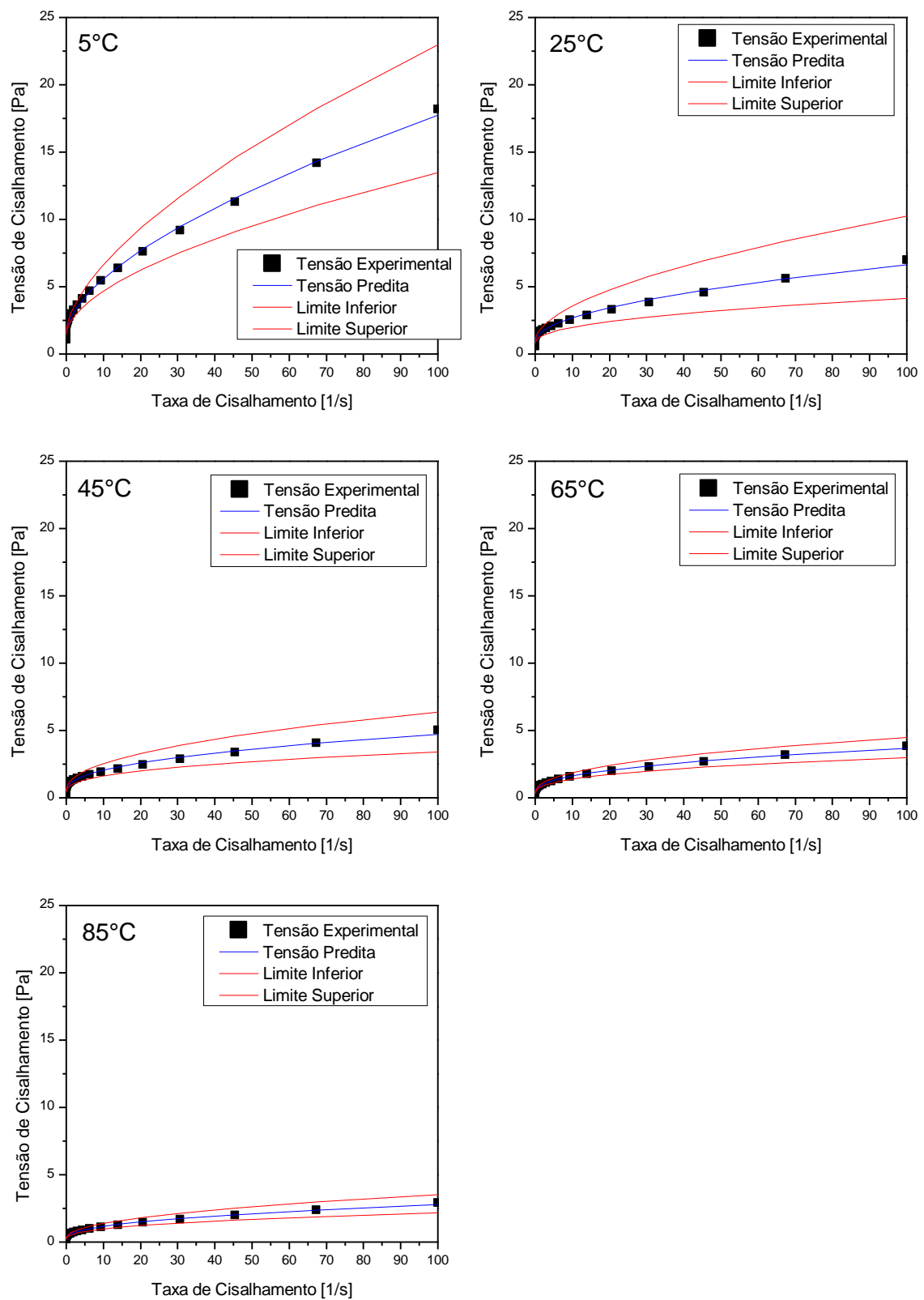


Figura 137. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

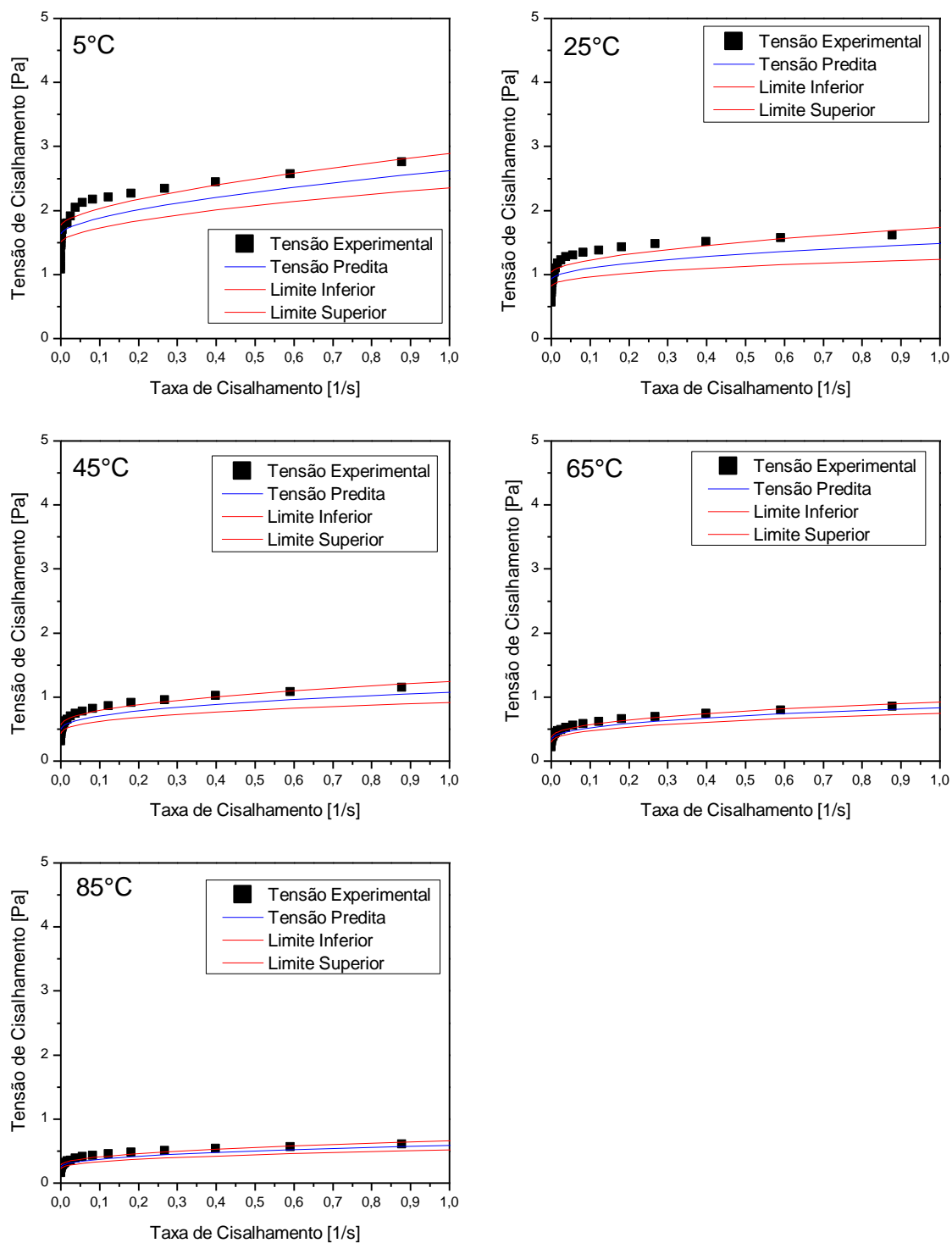


Figura 138. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

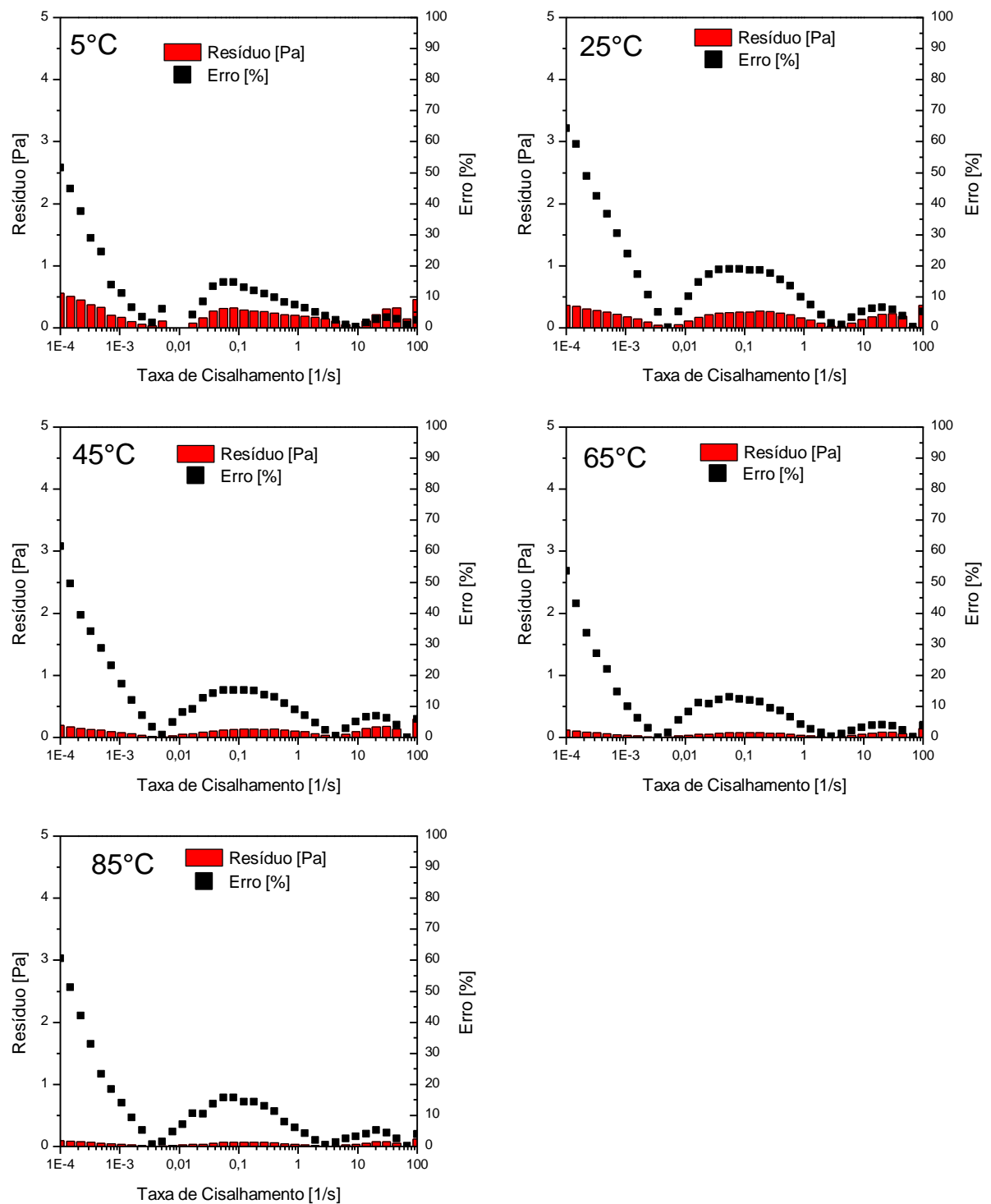


Figura 139. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

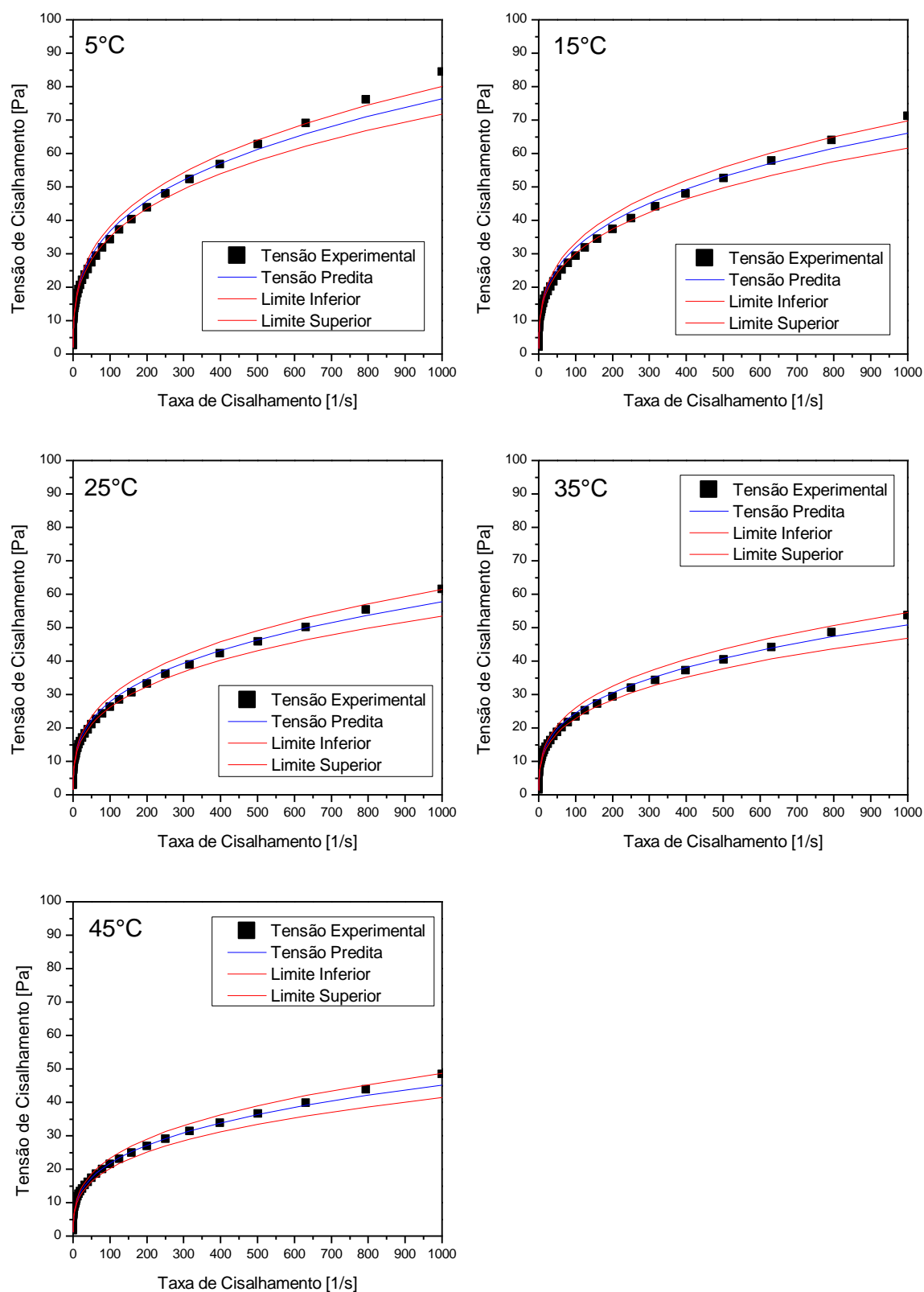


Figura 140. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

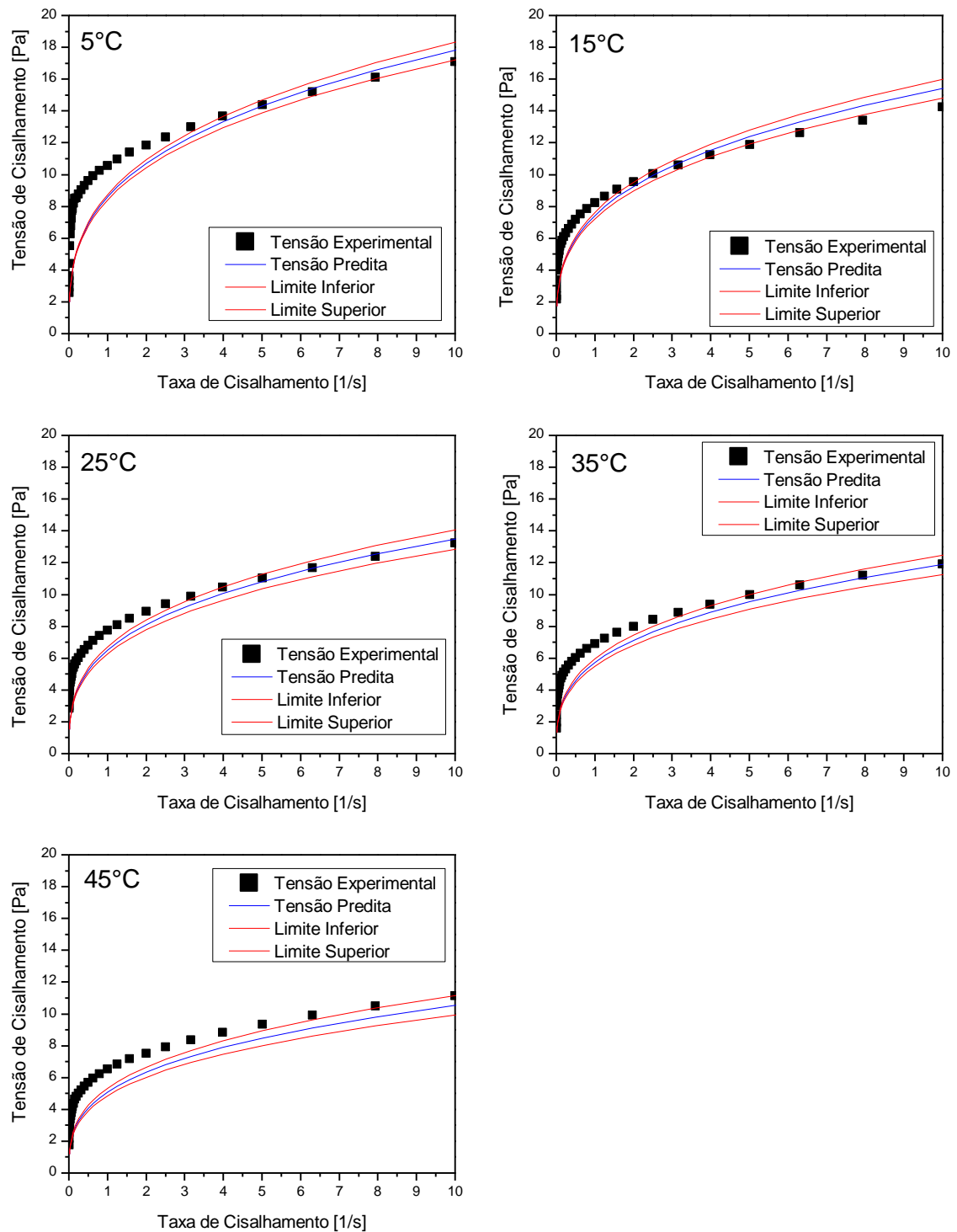


Figura 141. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

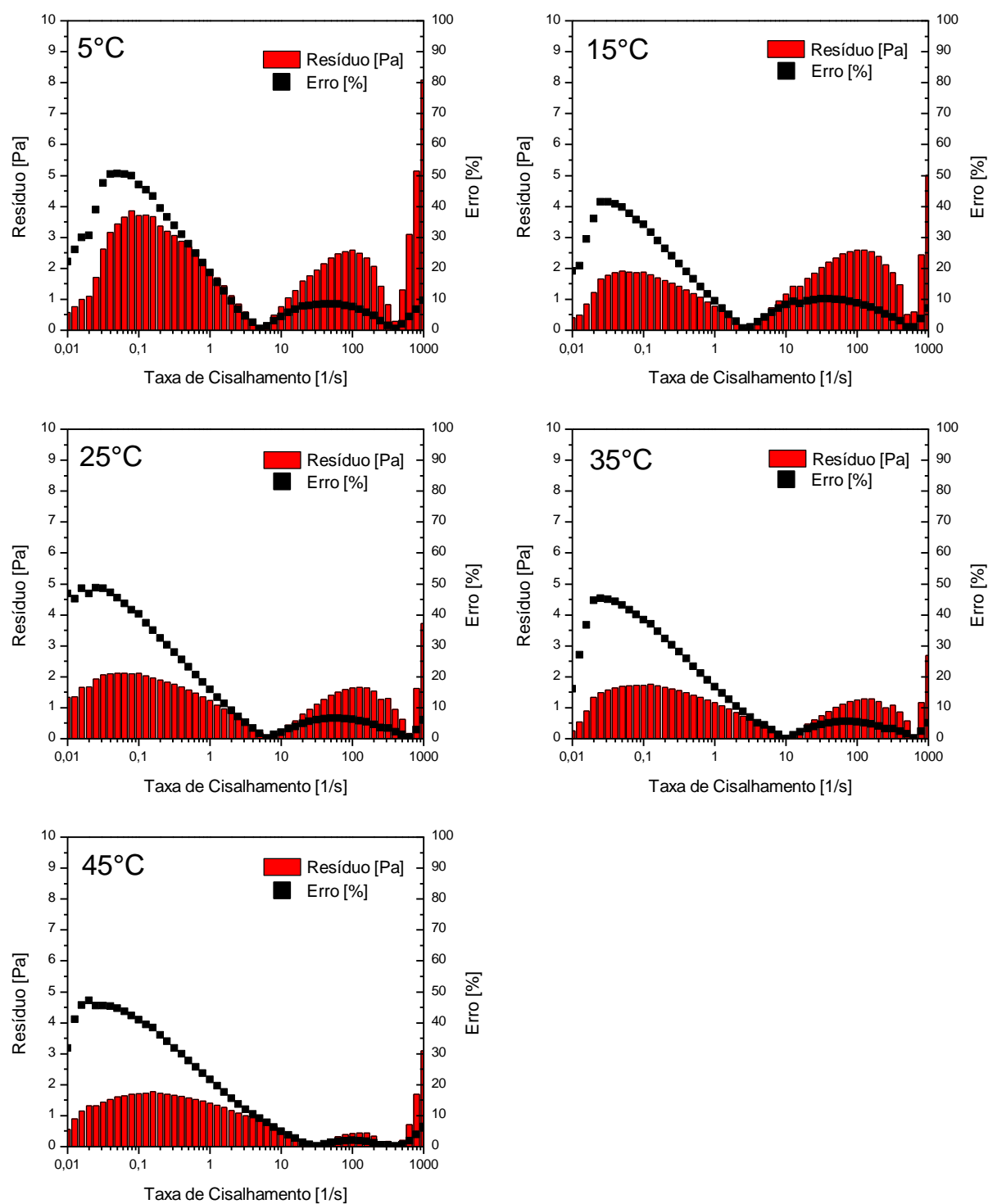


Figura 142. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

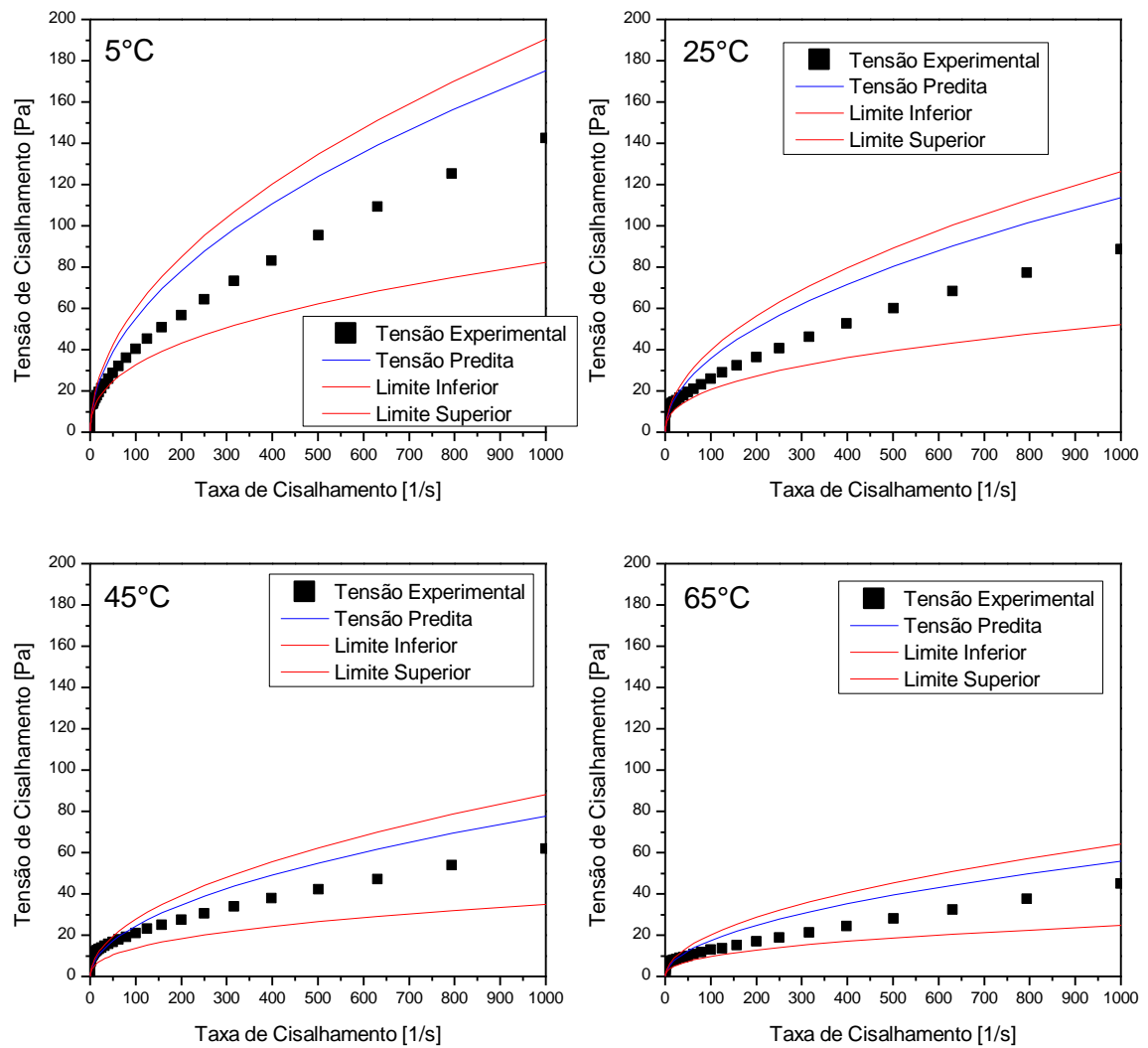


Figura 143. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

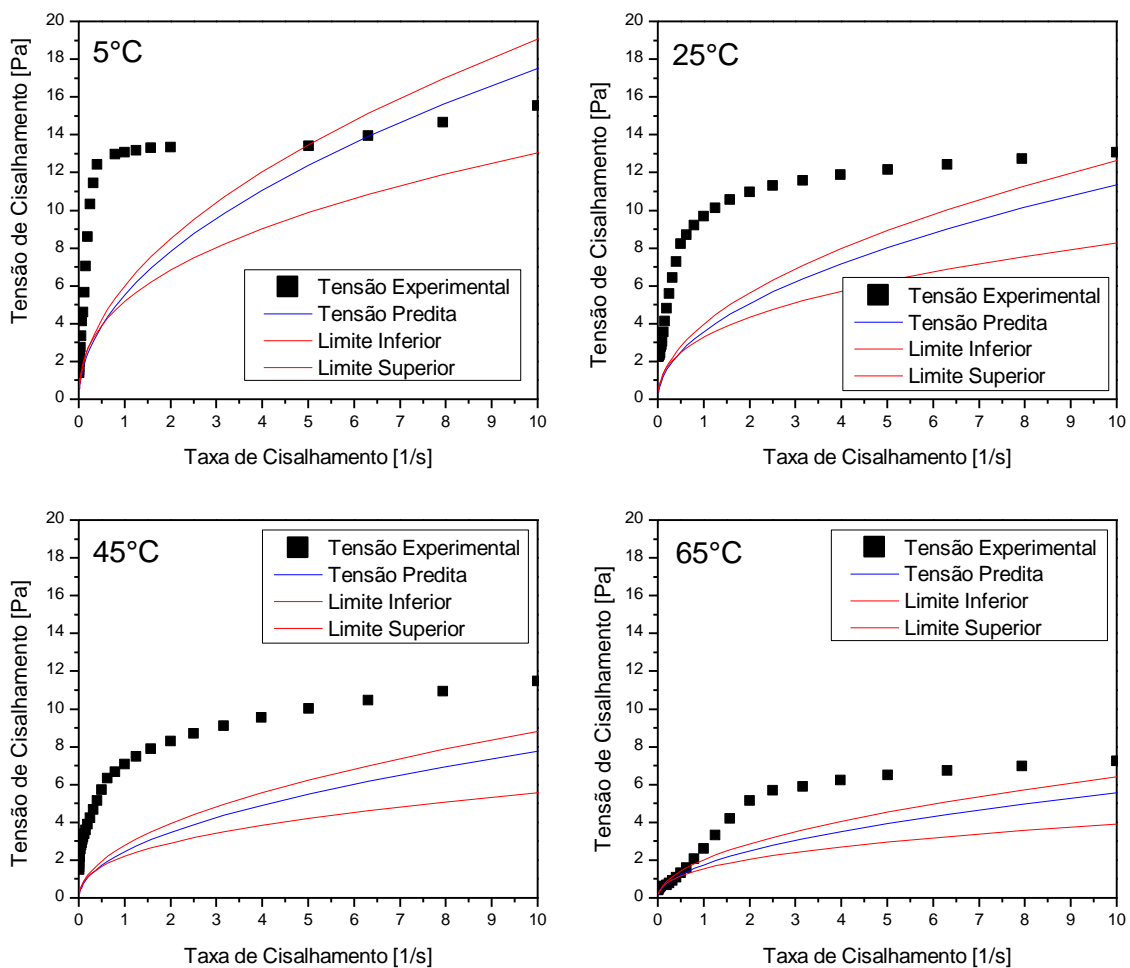




Figura 144. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

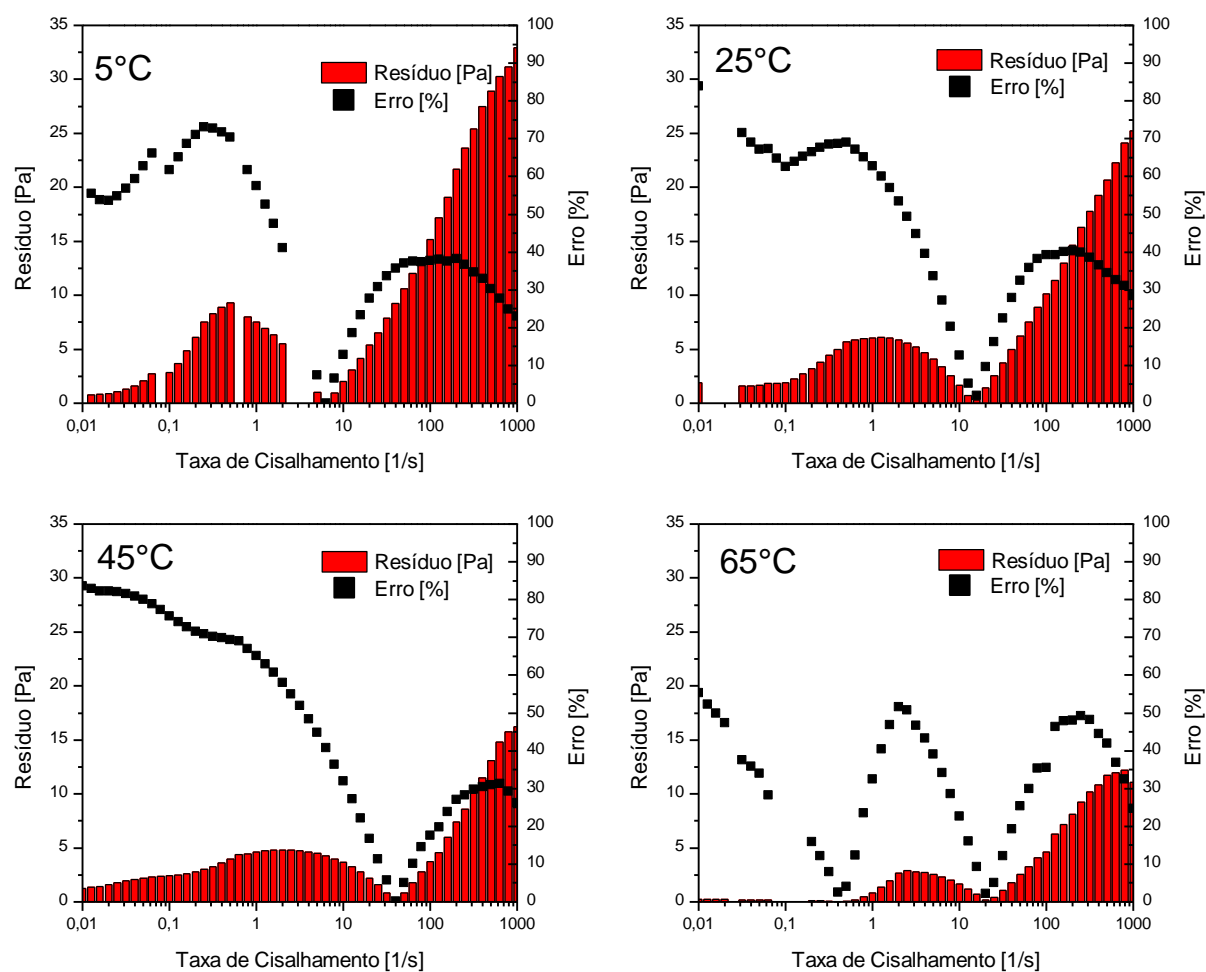


Figura 145. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

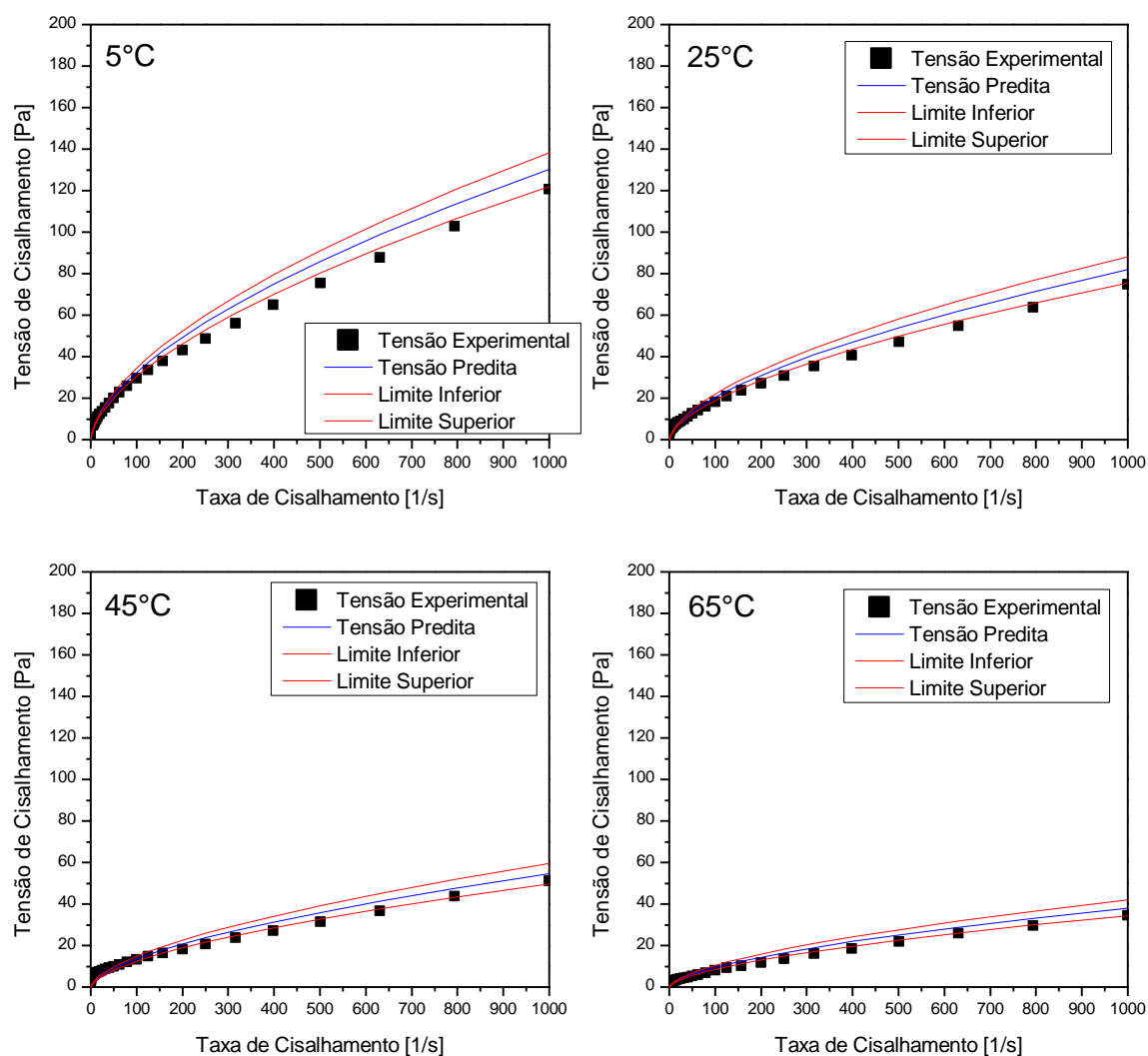


Figura 146. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

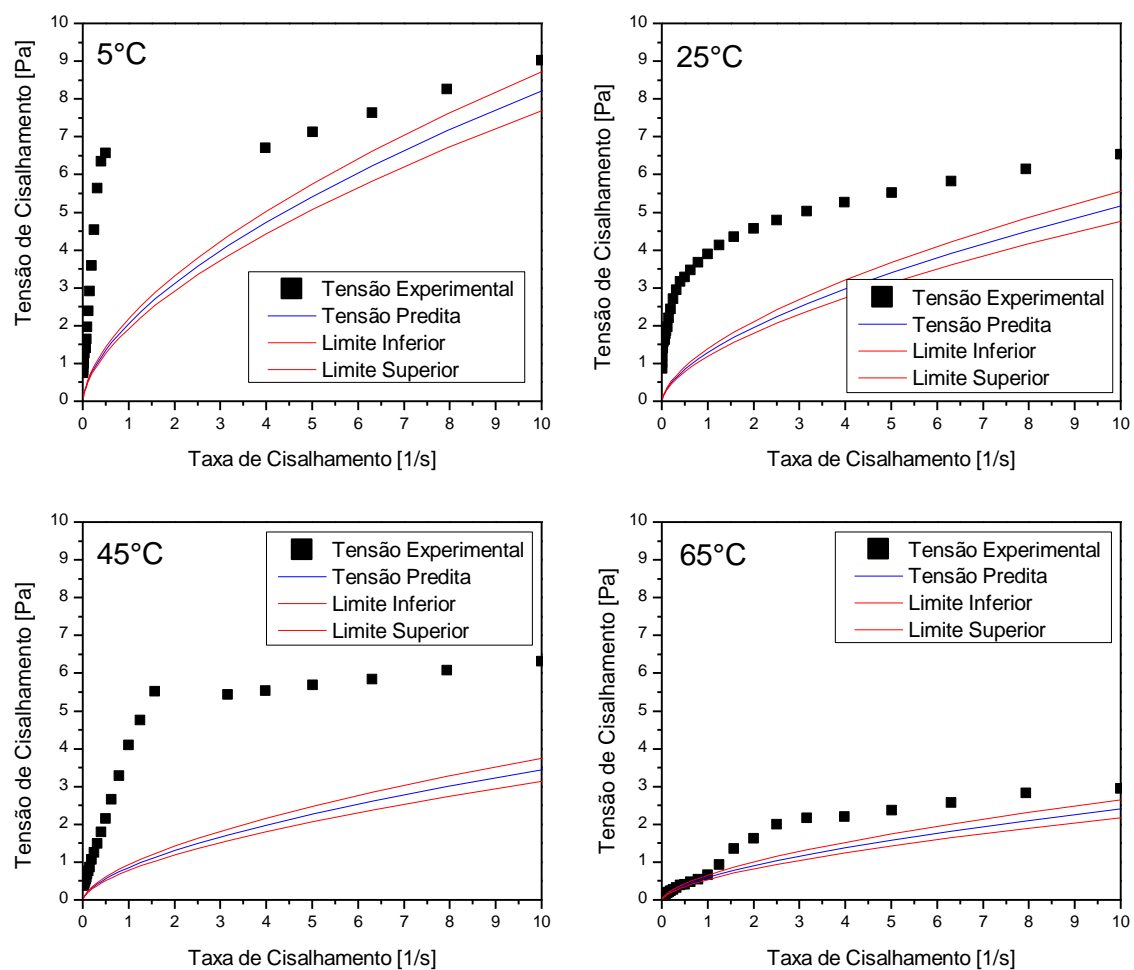


Figura 147. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

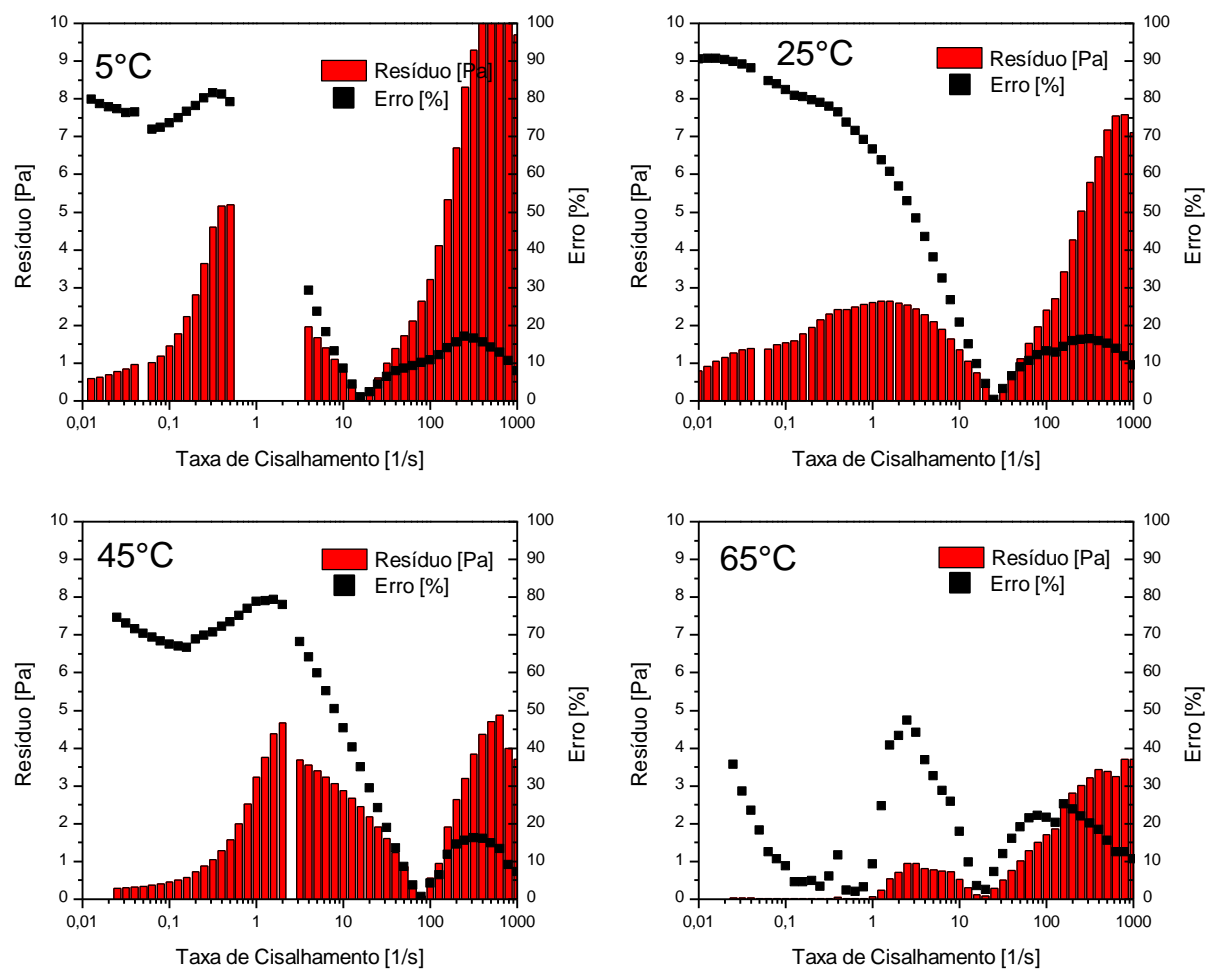


Figura 148. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

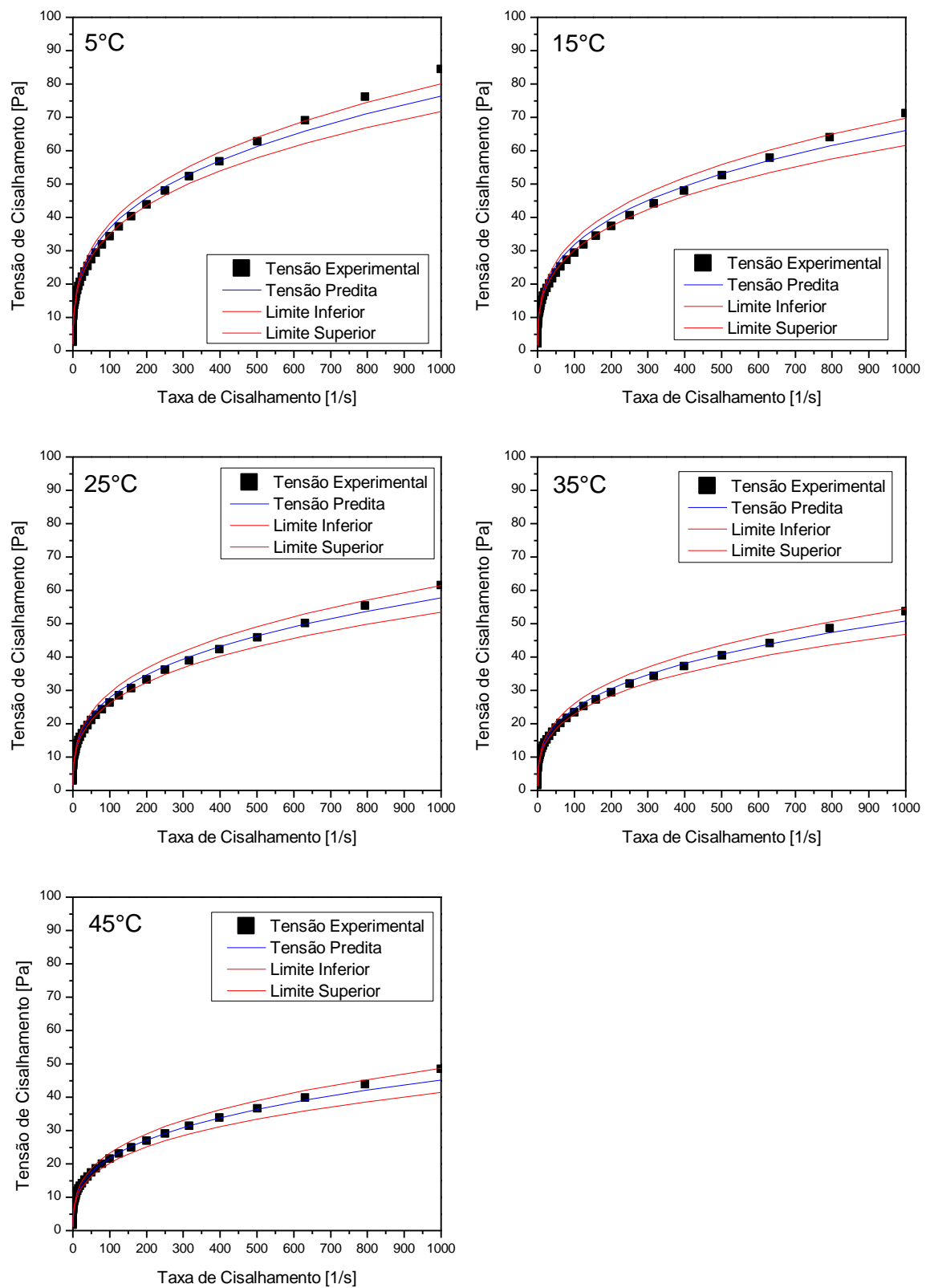


Figura 149. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

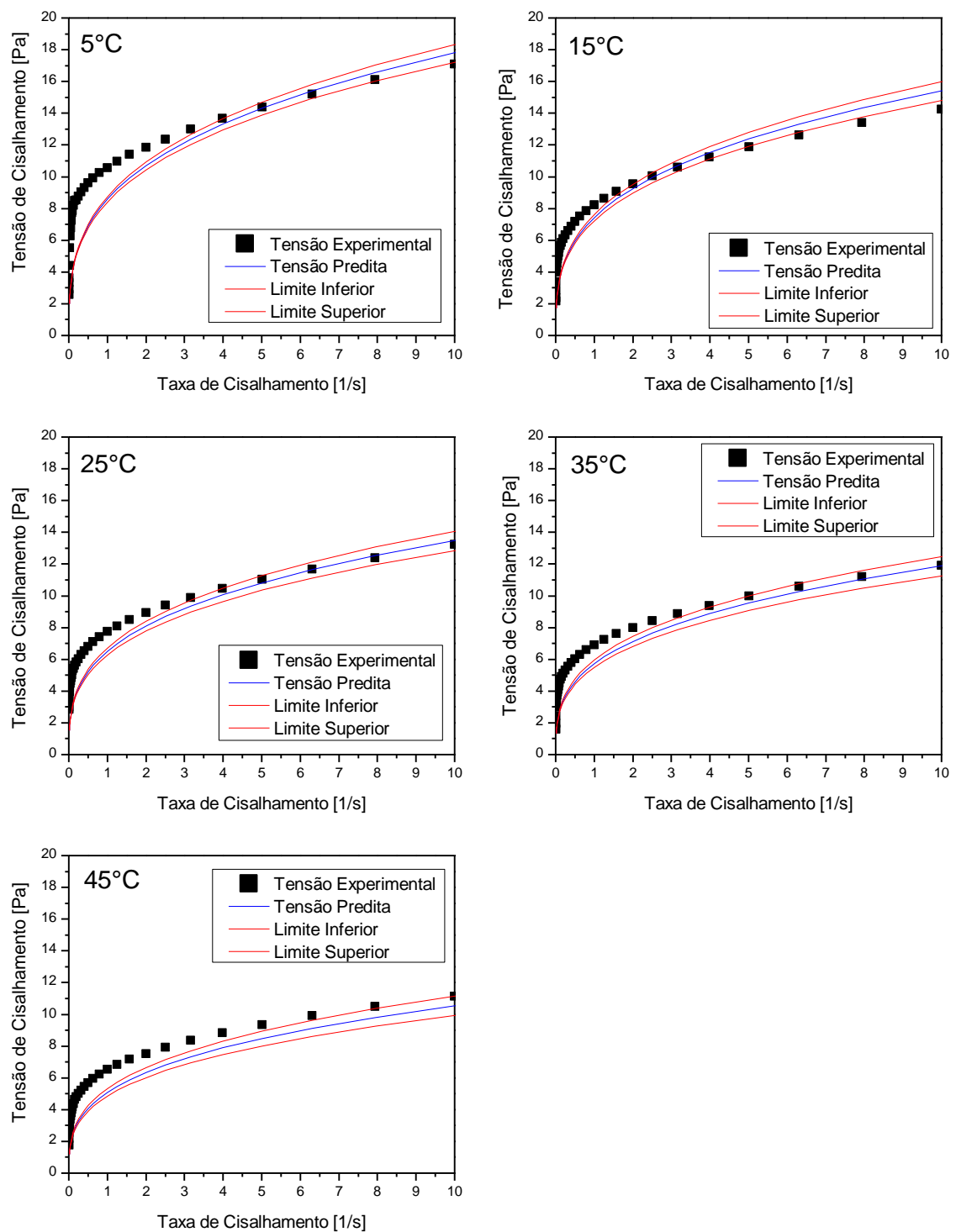


Figura 150. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

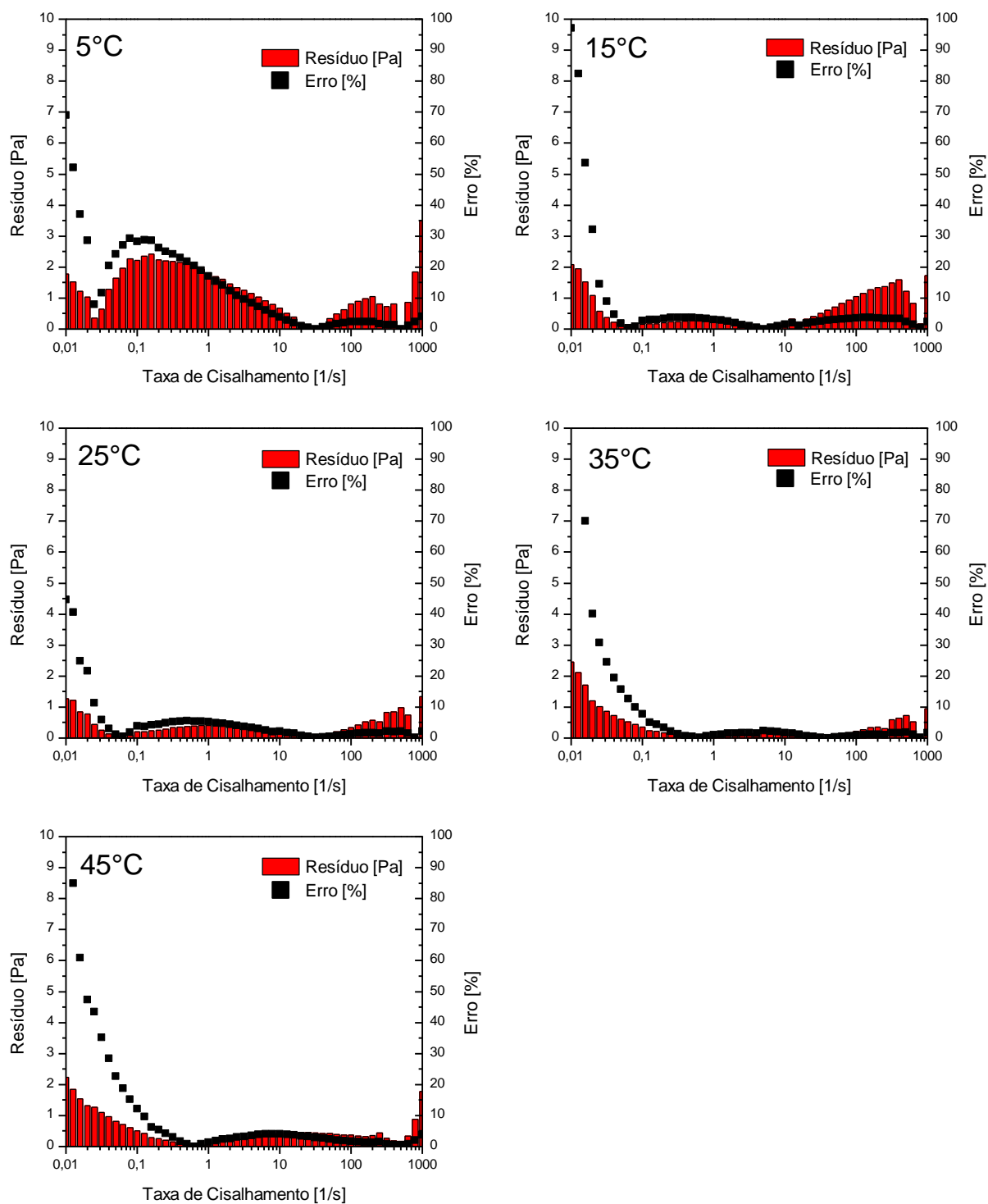


Figura 151. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

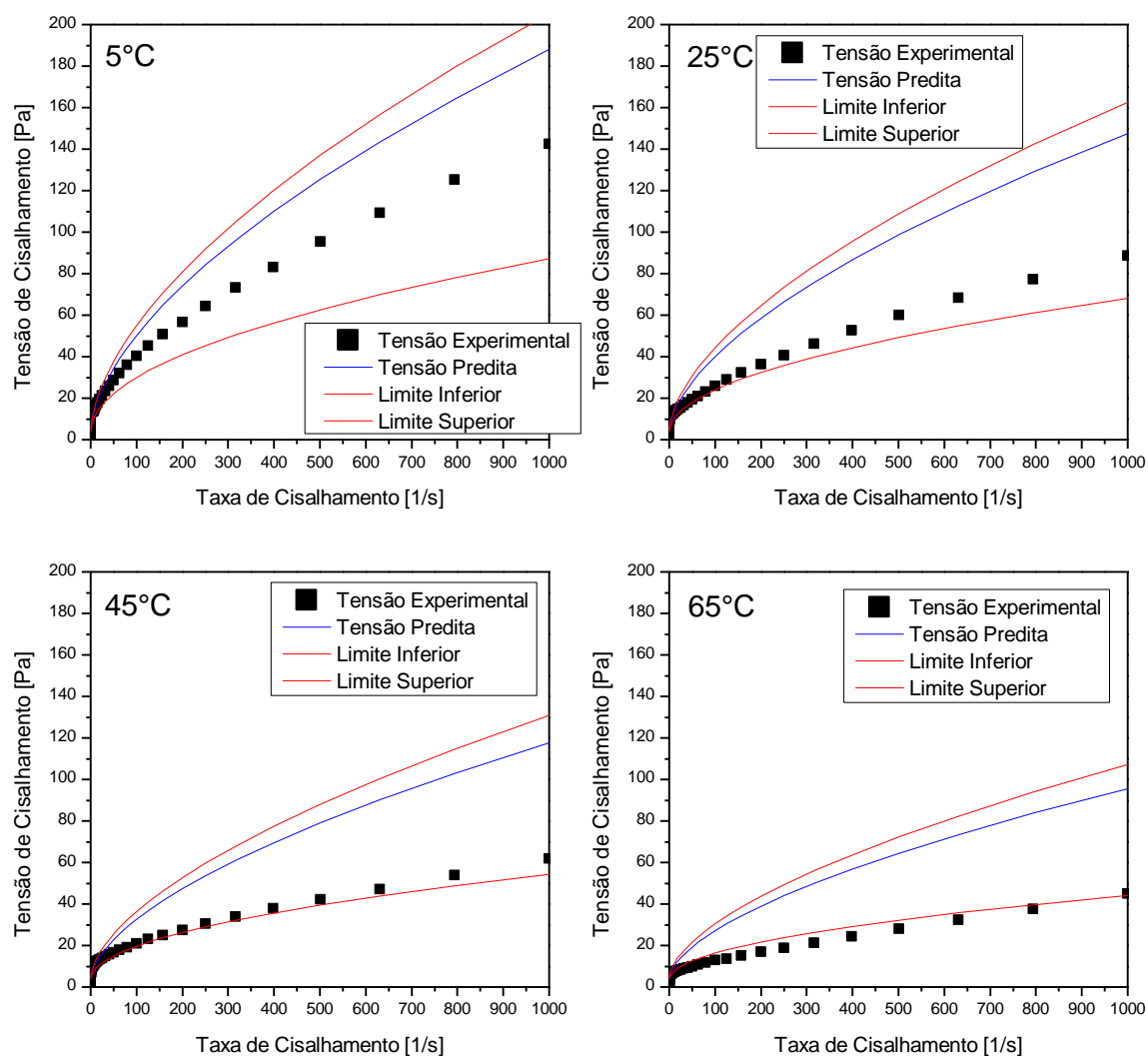




Figura 152. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

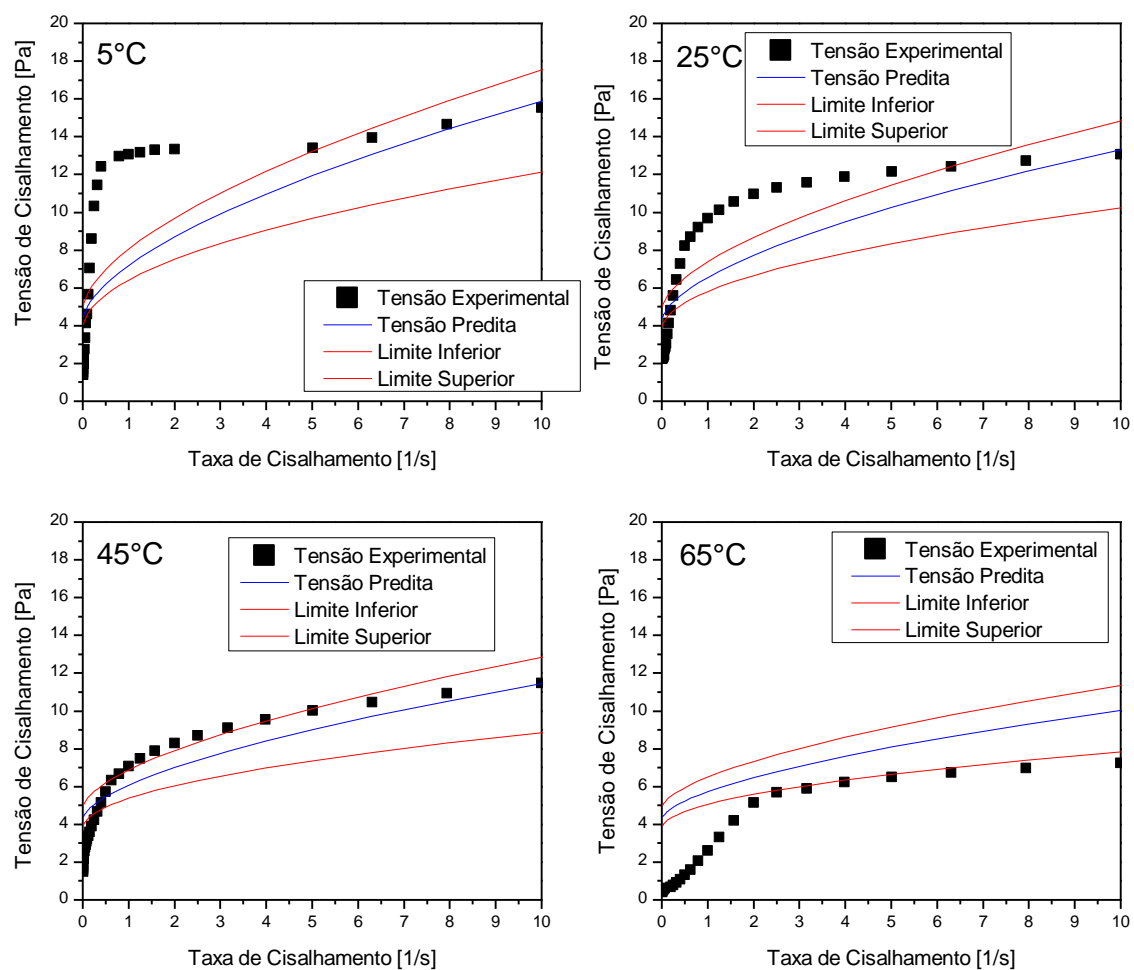


Figura 153. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

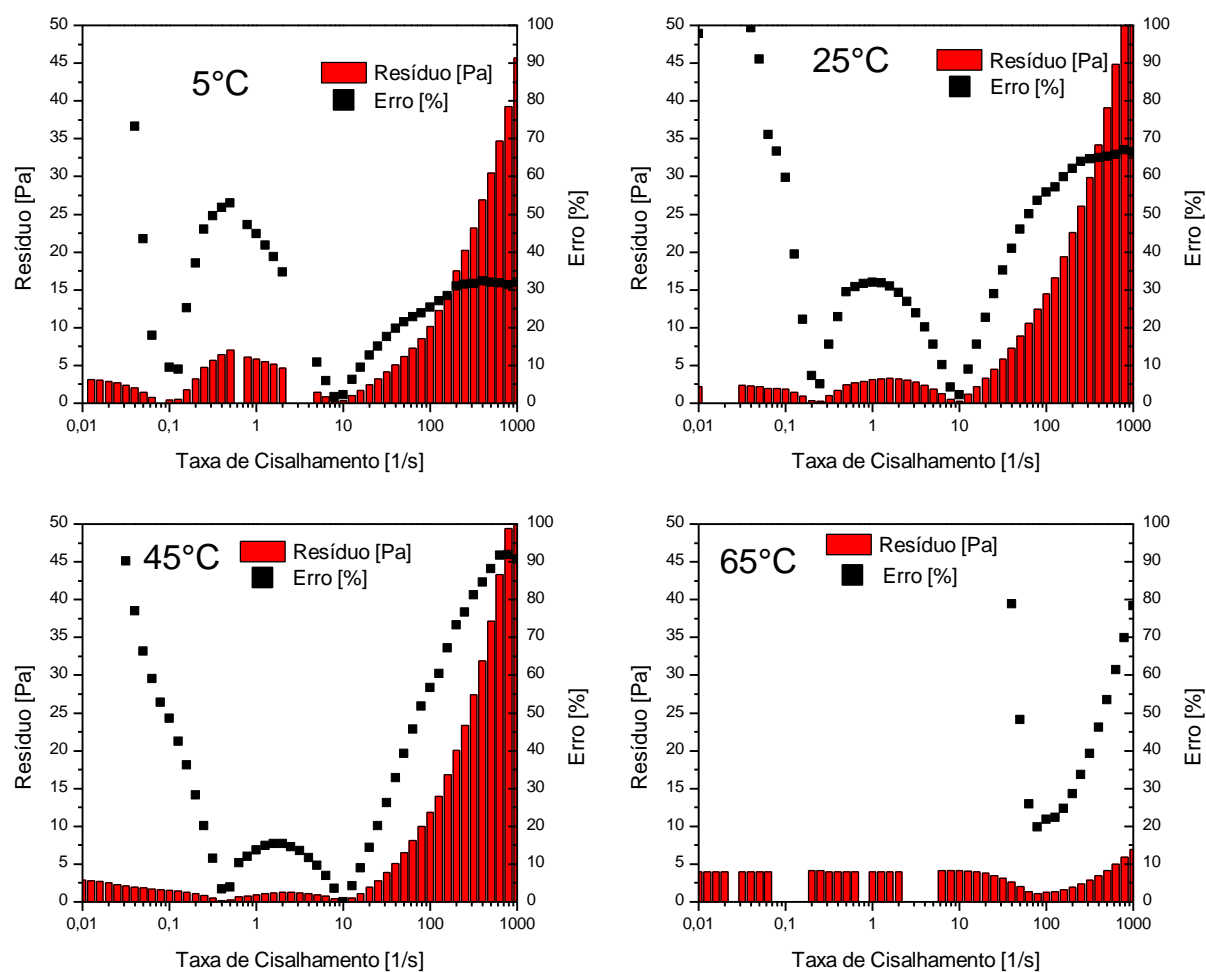


Figura 154. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

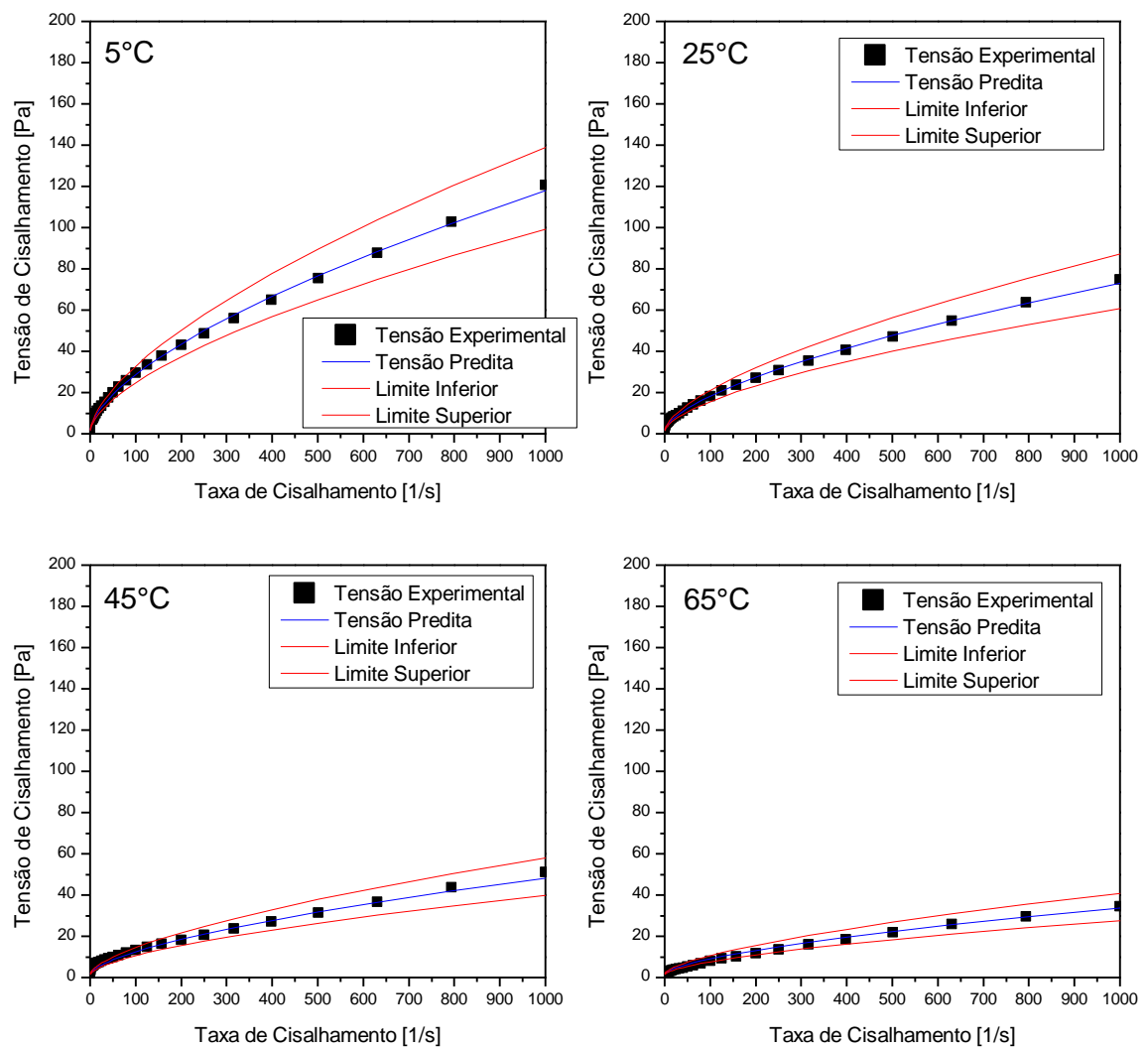


Figura 155. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ). Recorte entre  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $10 \text{ s}^{-1}$ .

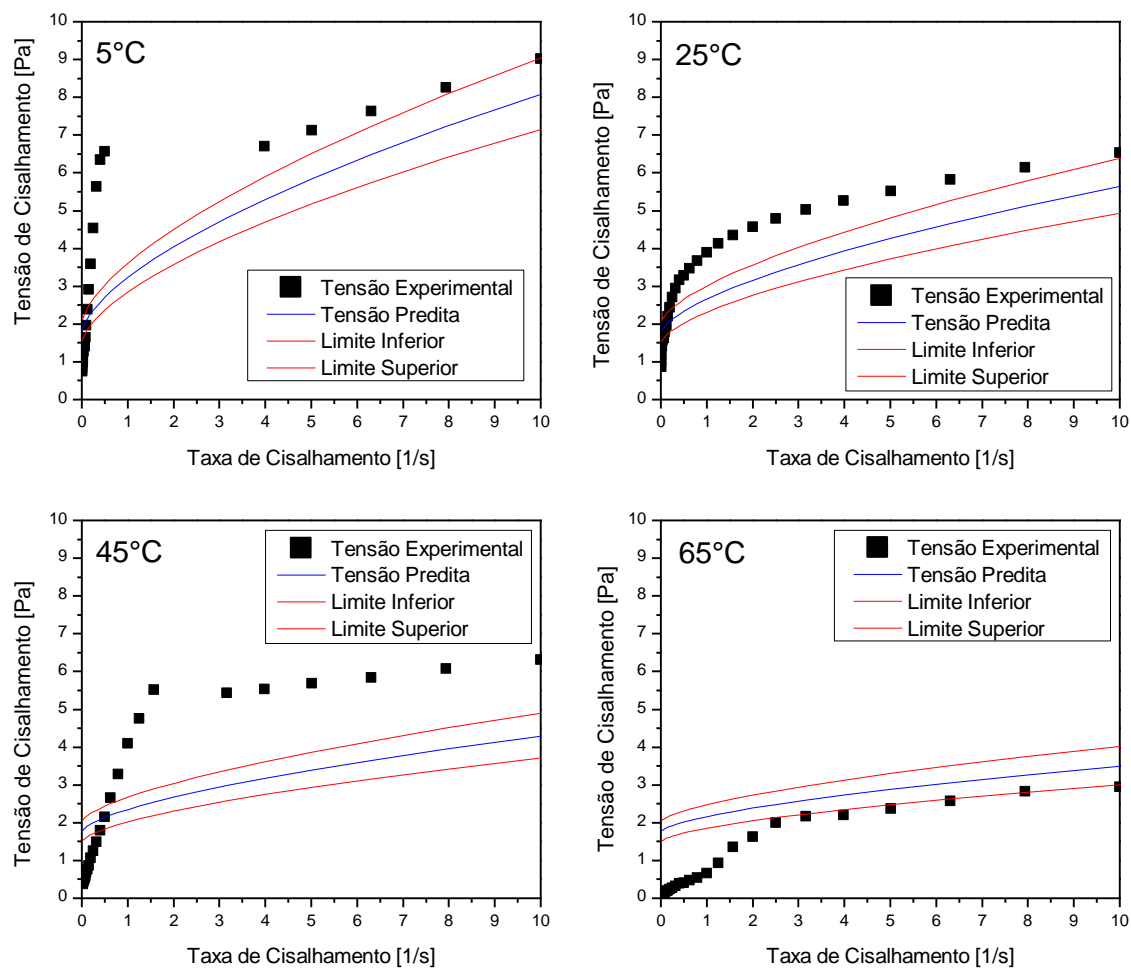


Figura 156. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  até  $1000 \text{ s}^{-1}$ ).

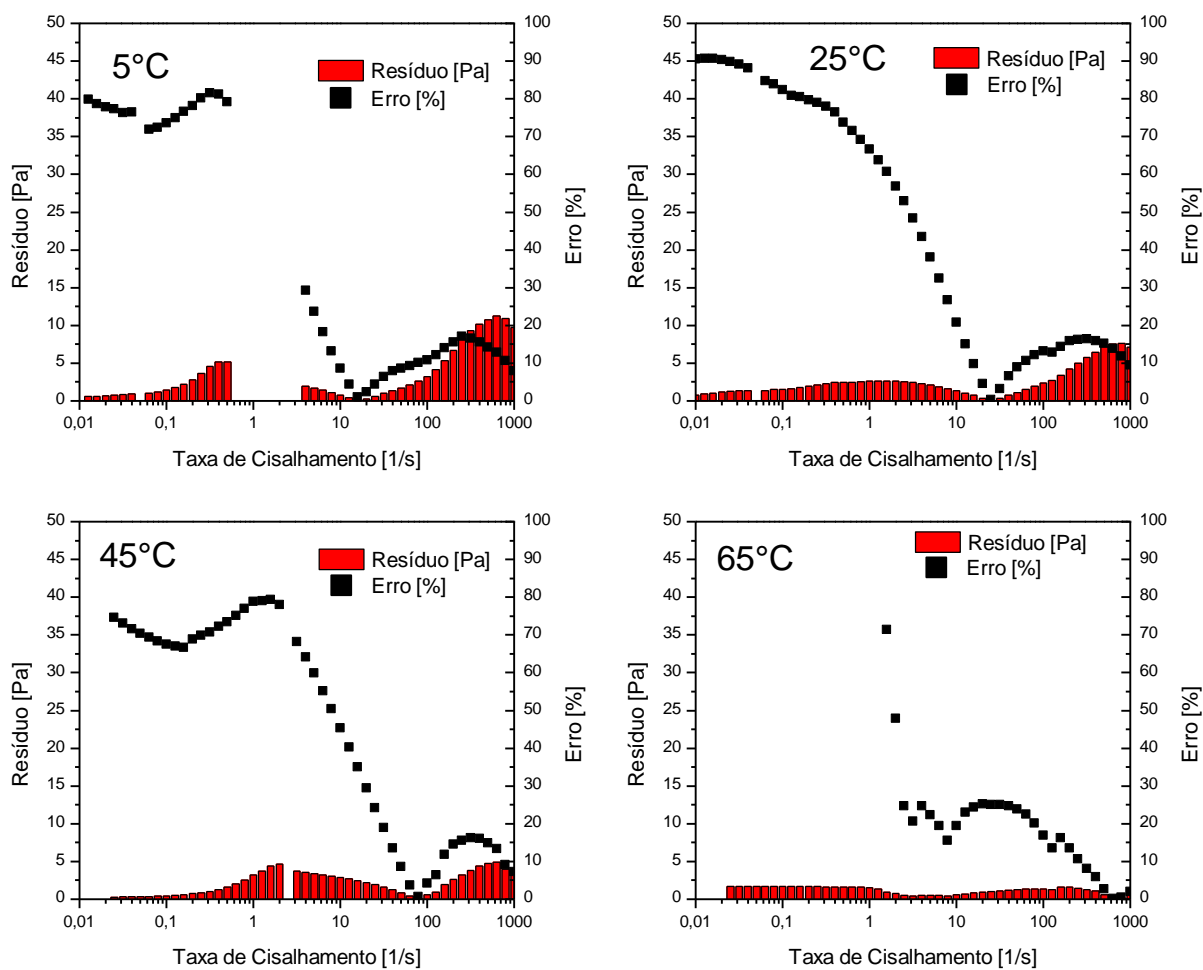


Figura 157. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

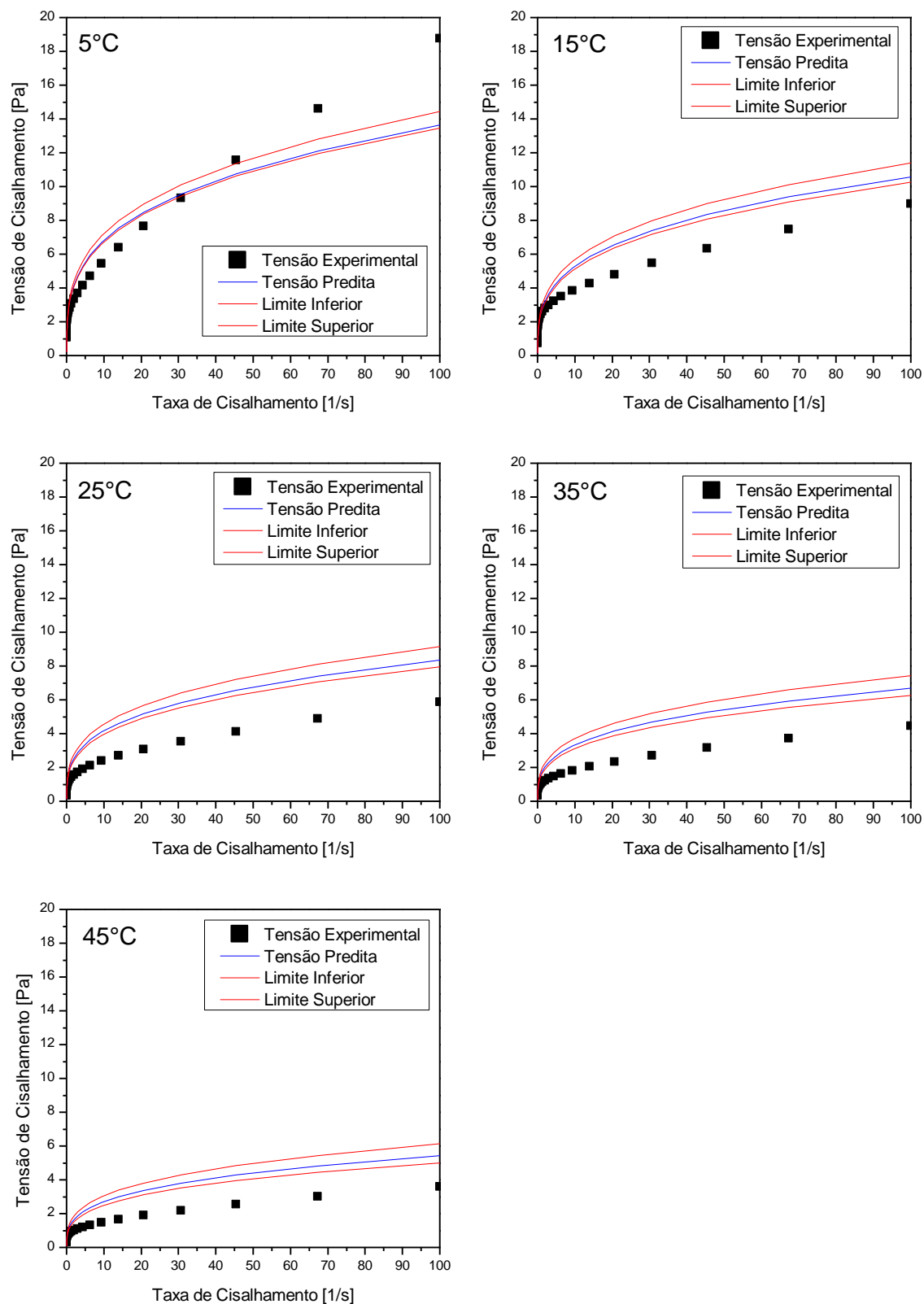


Figura 158. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

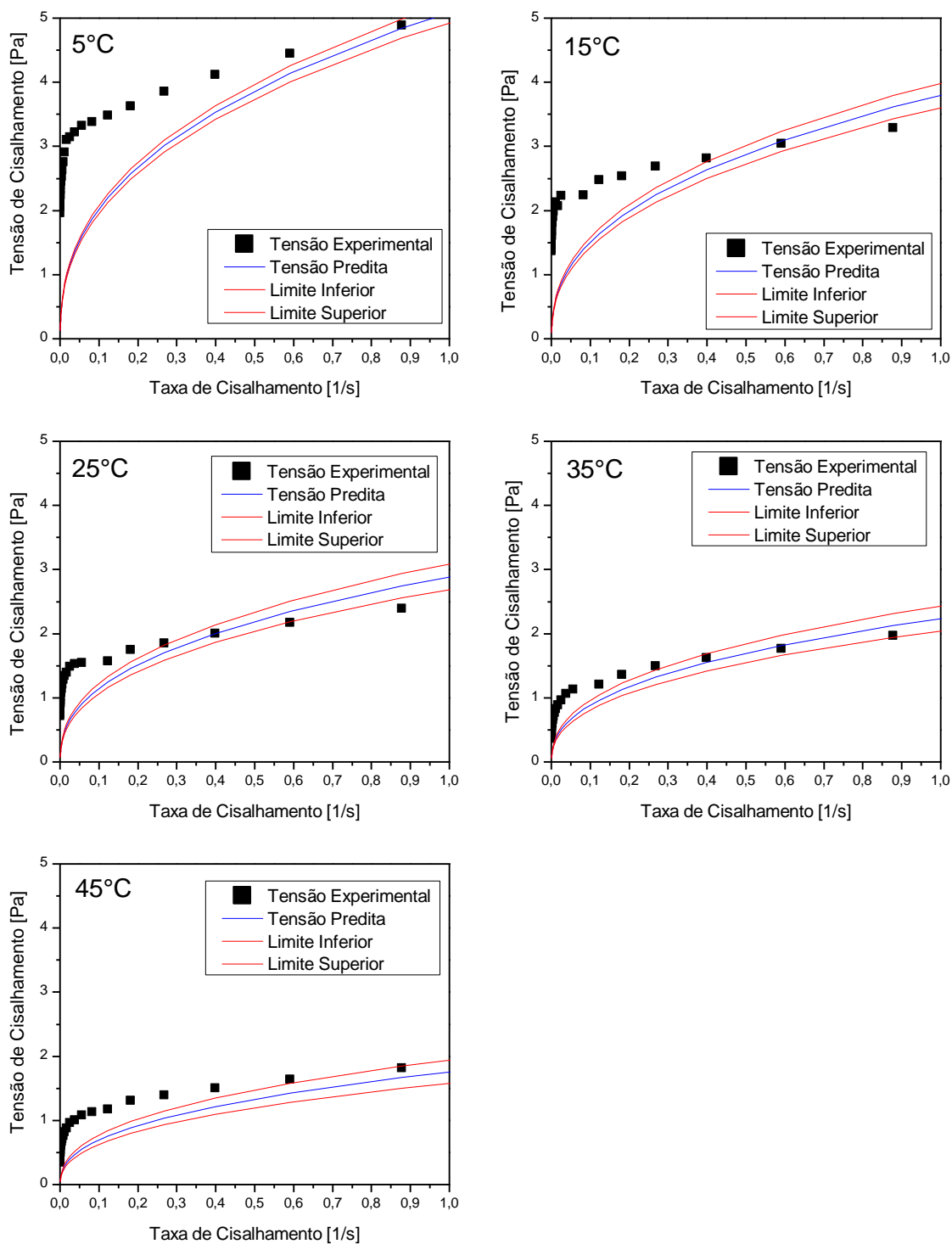


Figura 159. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

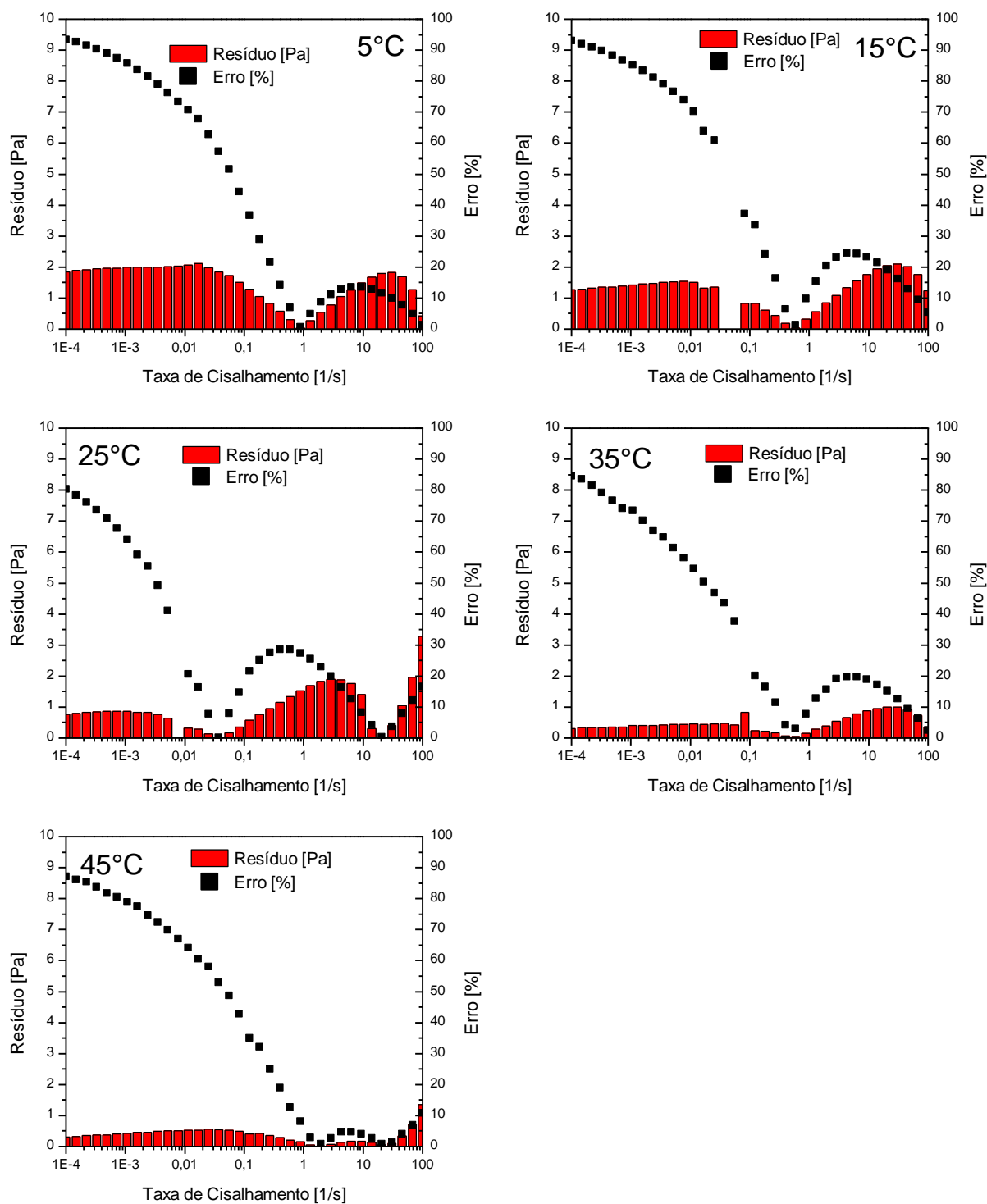




Figura 160. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

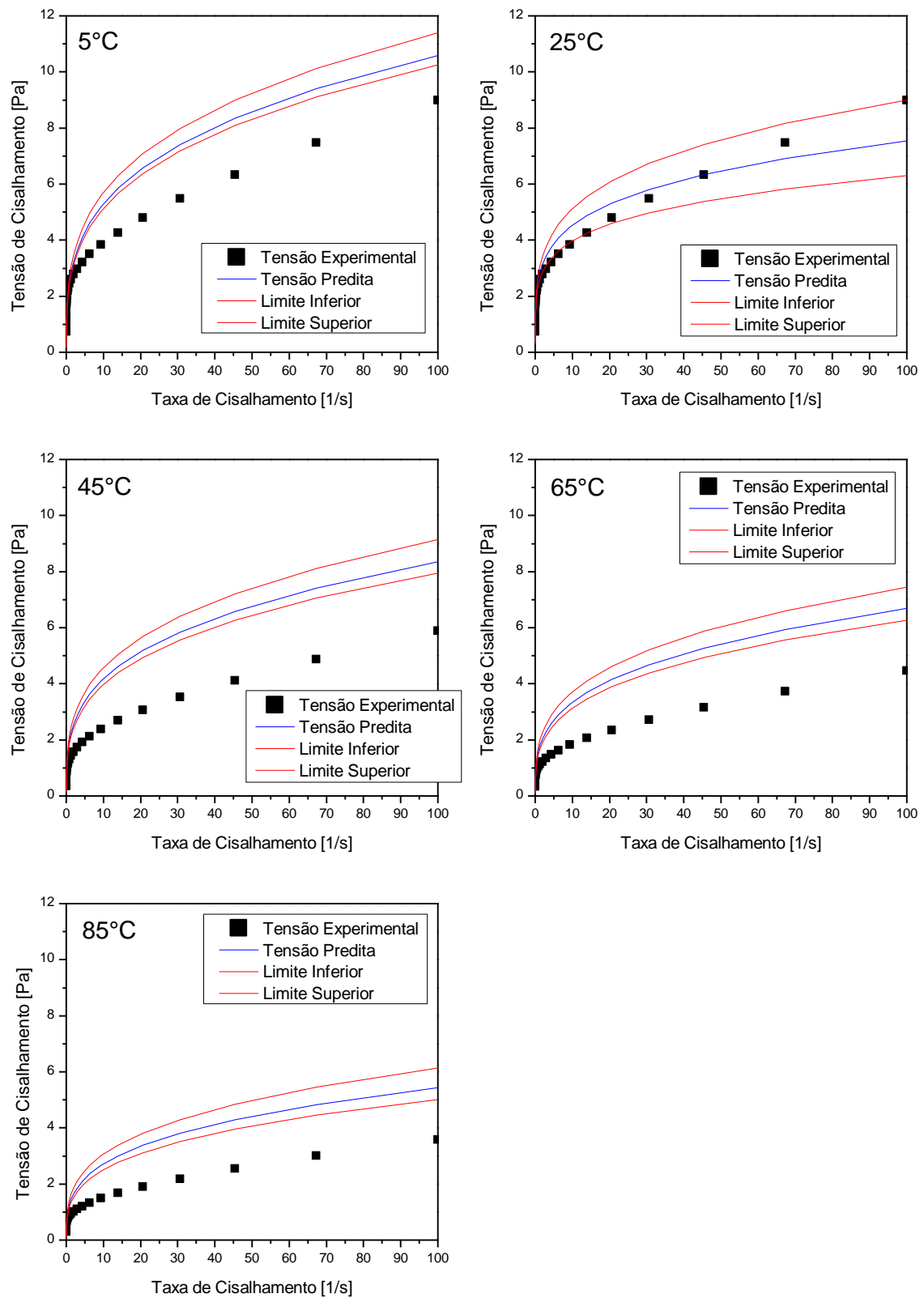


Figura 161. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

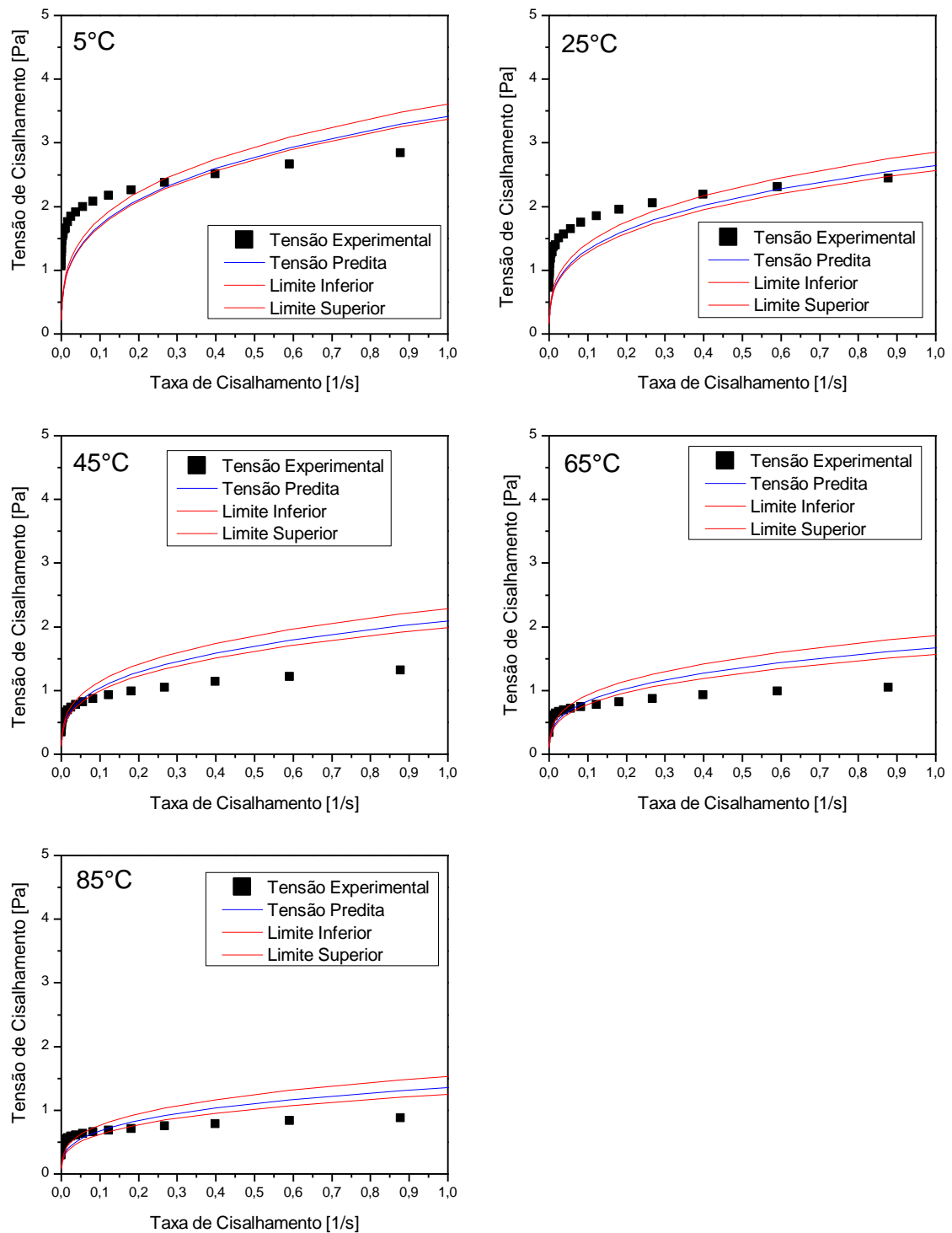


Figura 162. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

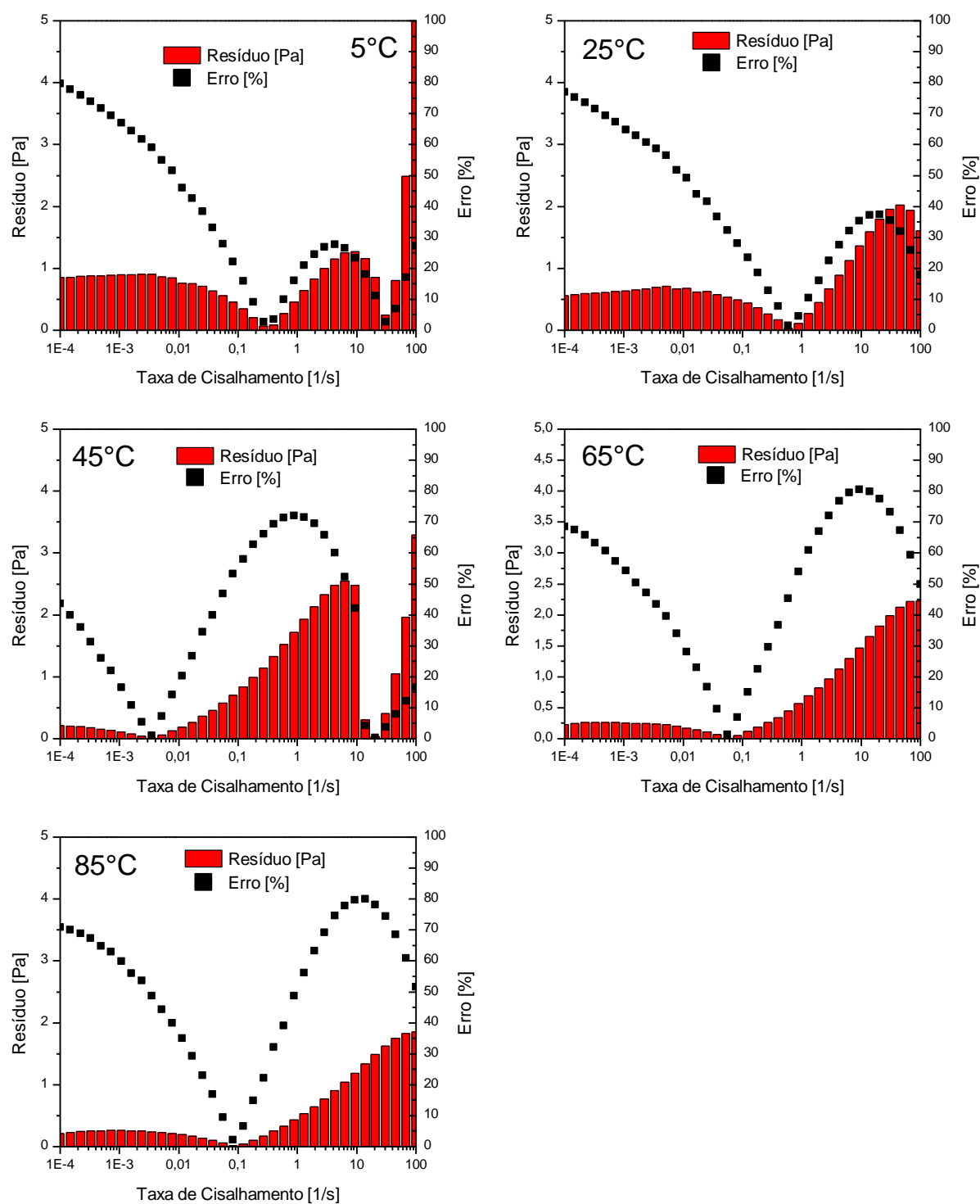


Figura 163. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

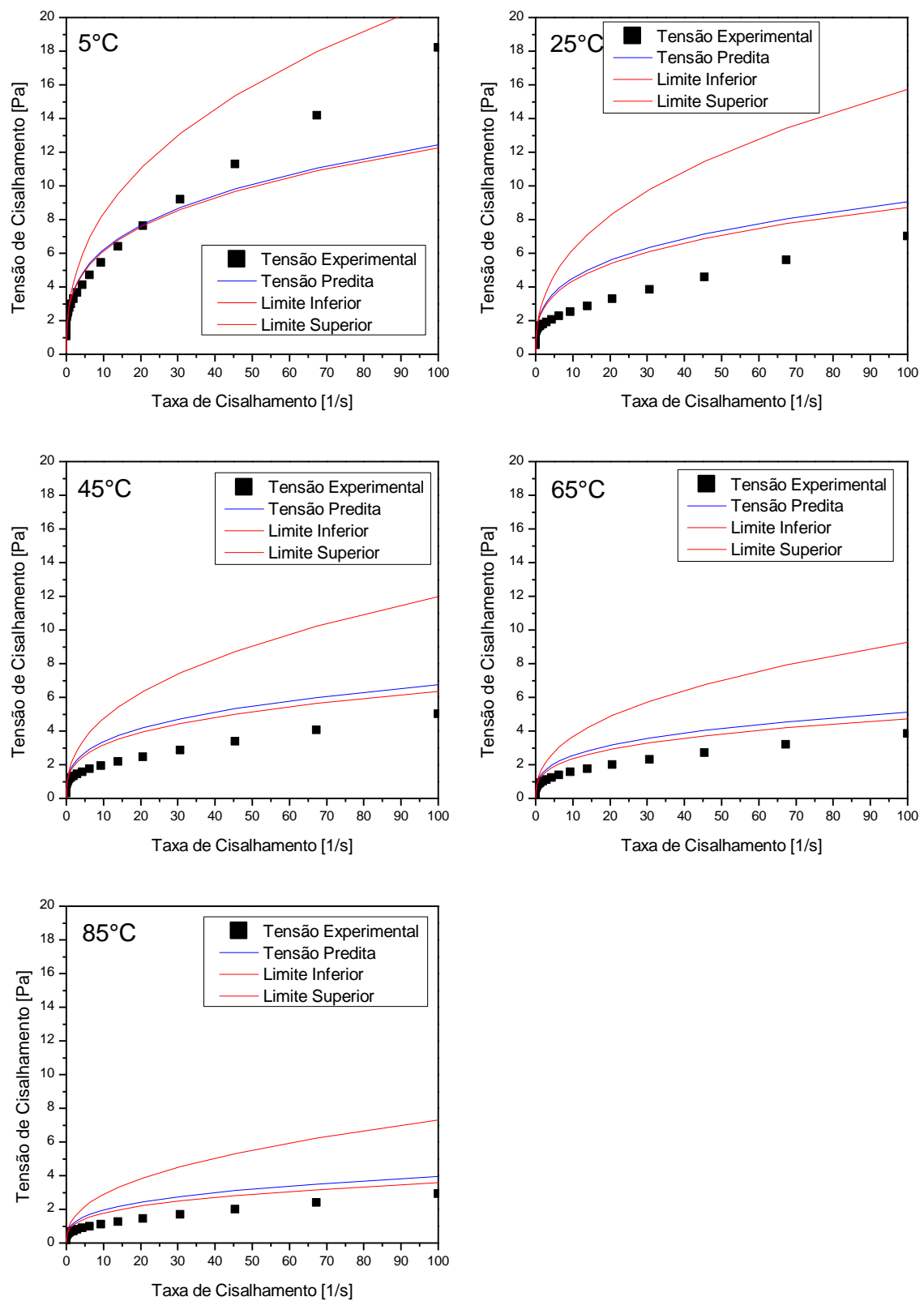


Figura 164. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

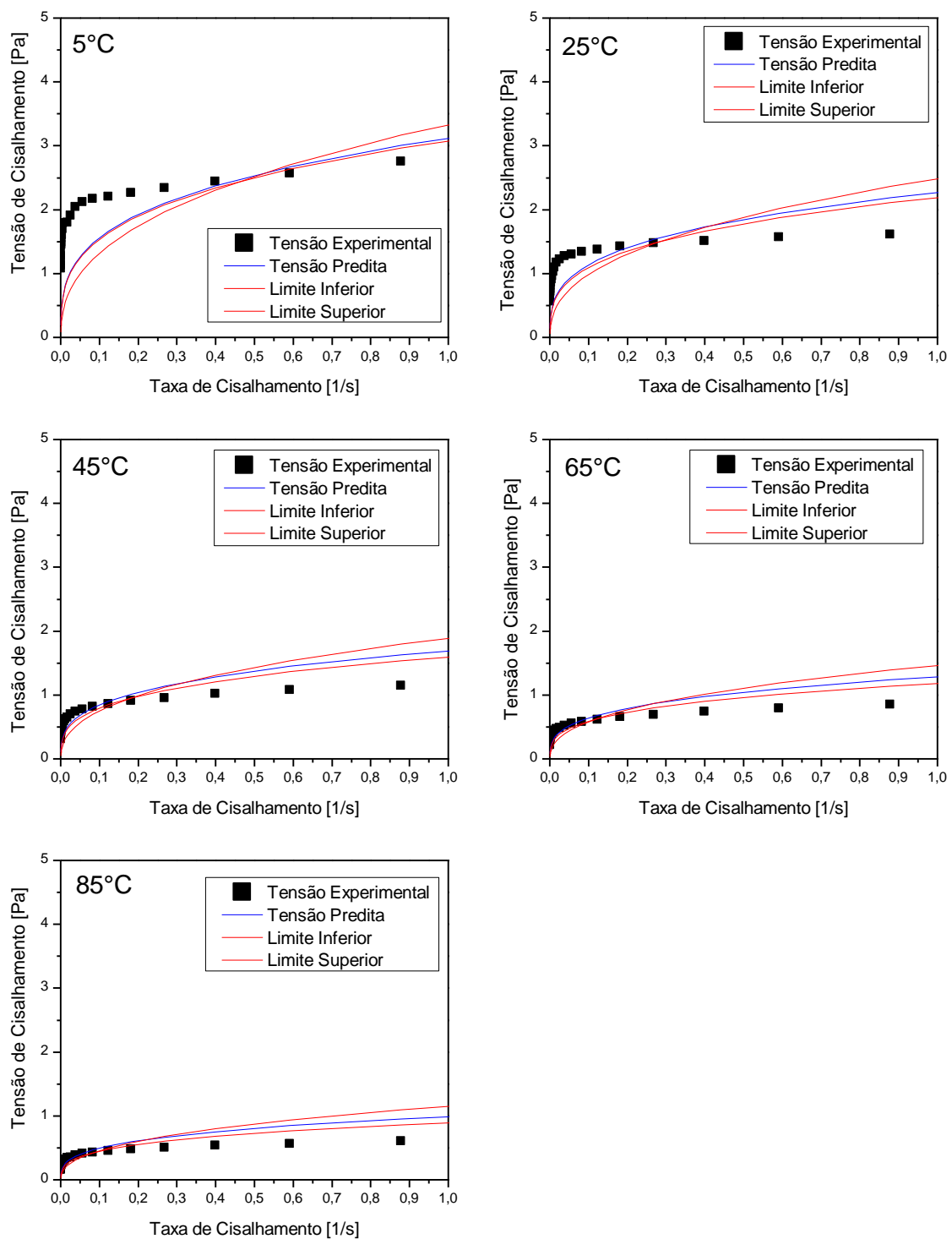


Figura 165. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Lei de Potência com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

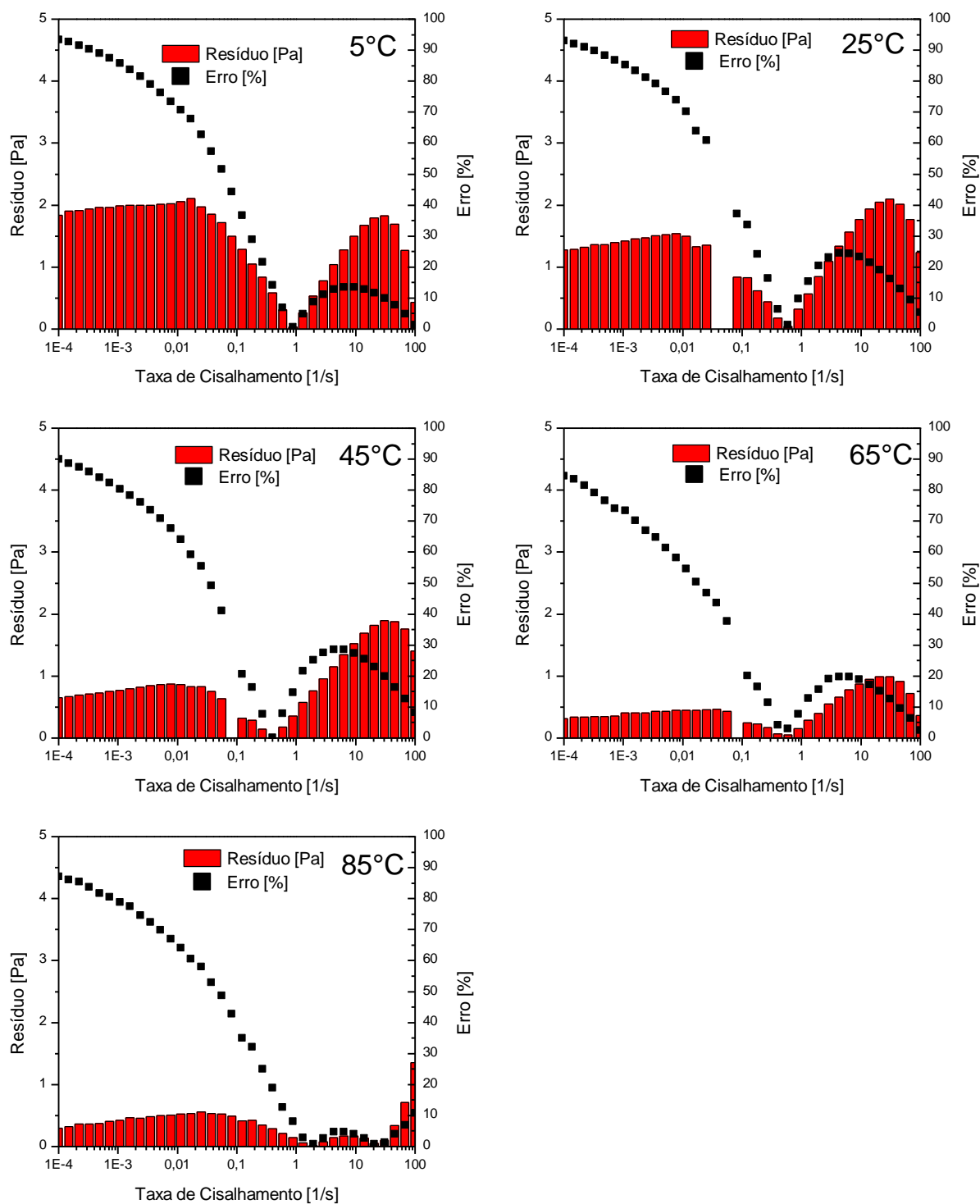


Figura 166. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

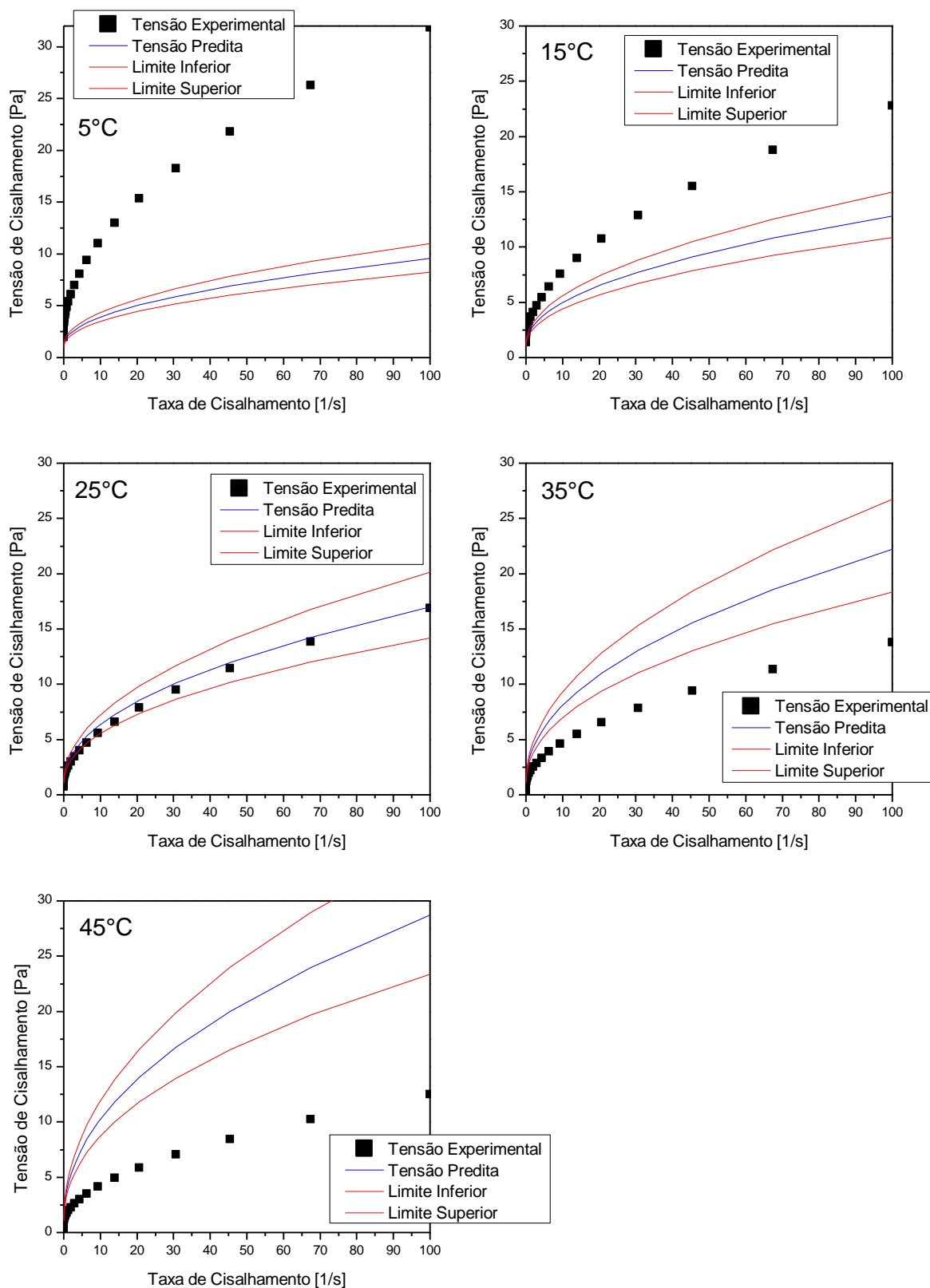


Figura 167. Ajuste dos dados experimentais do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

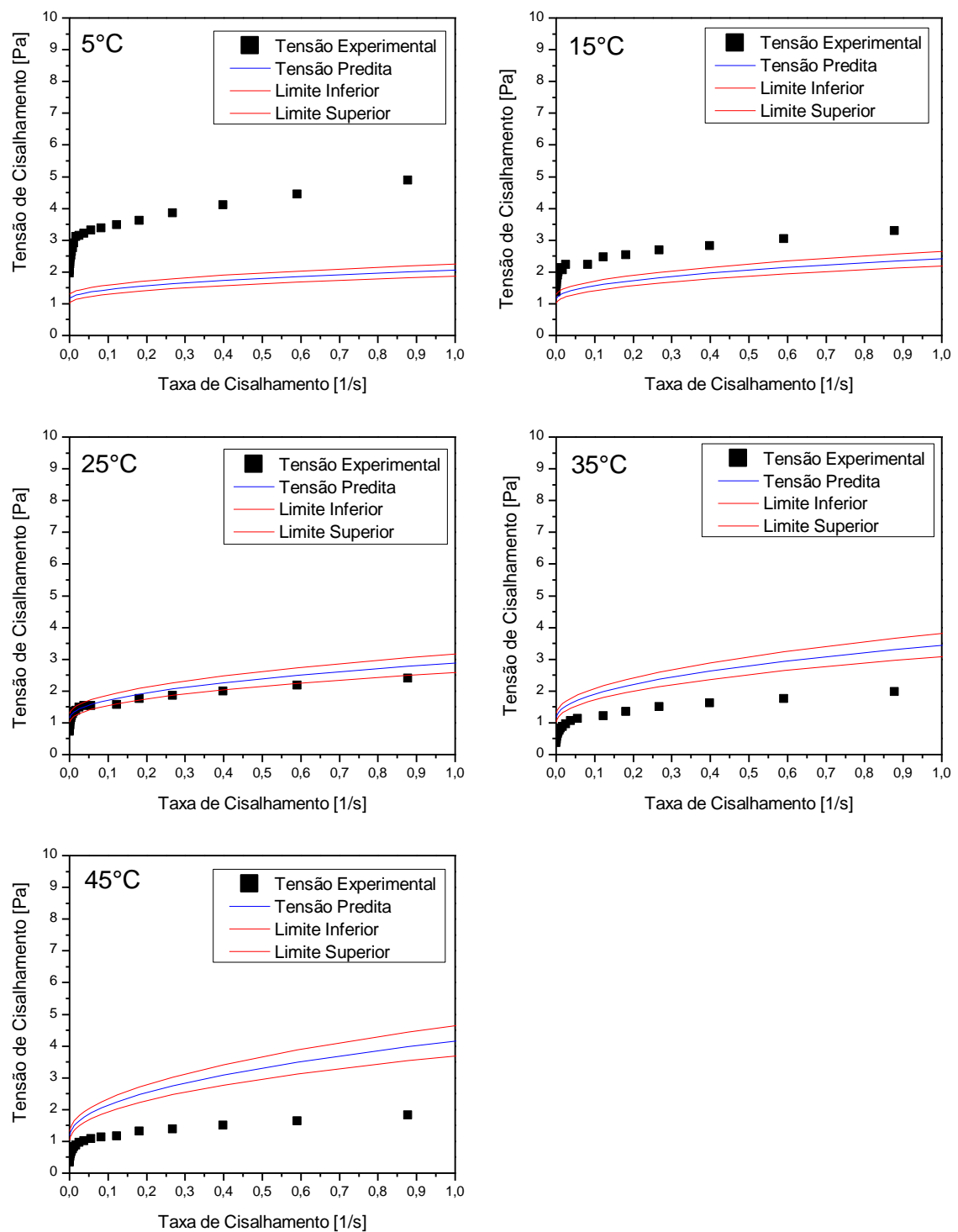




Figura 168. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base água sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

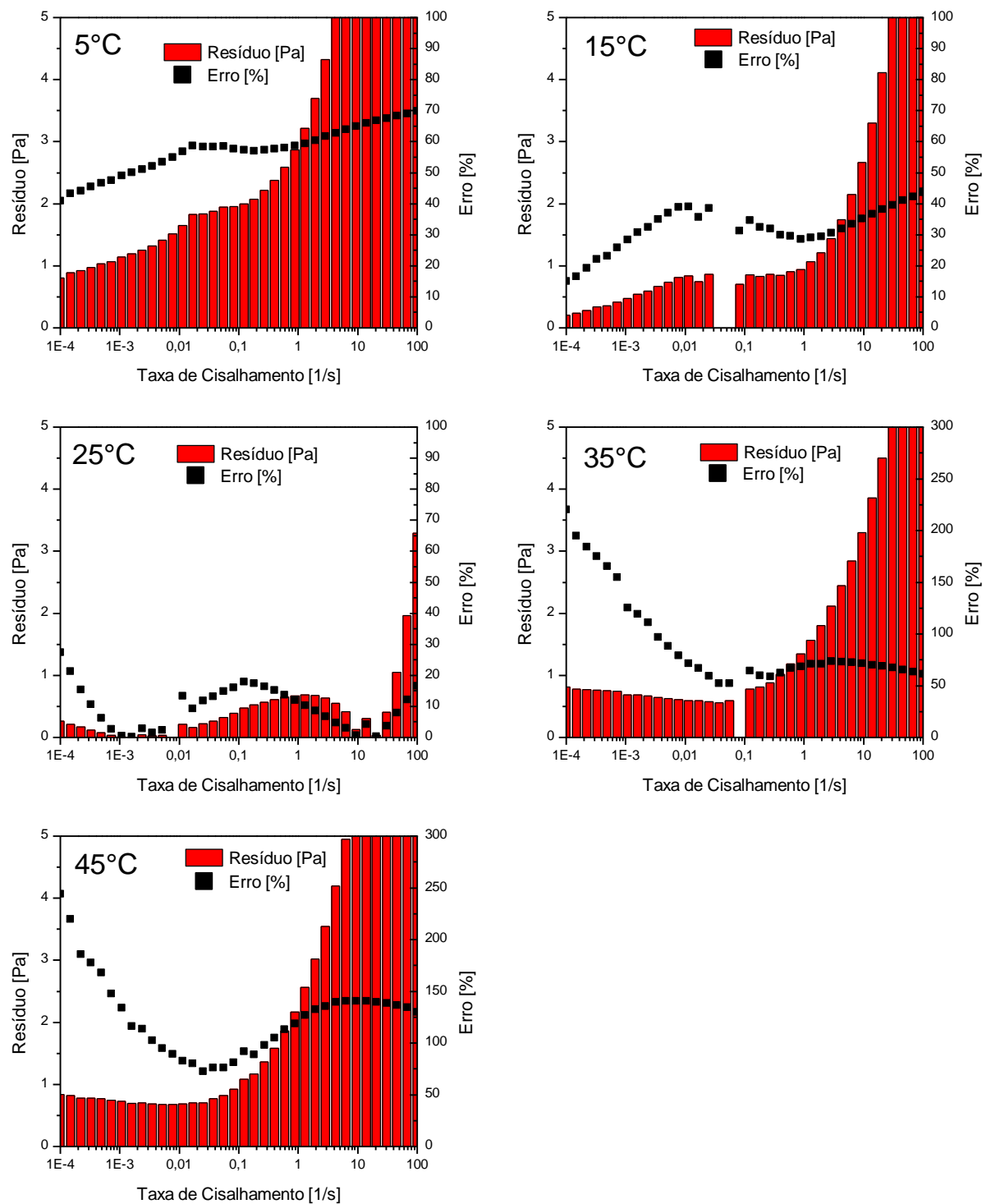


Figura 169. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

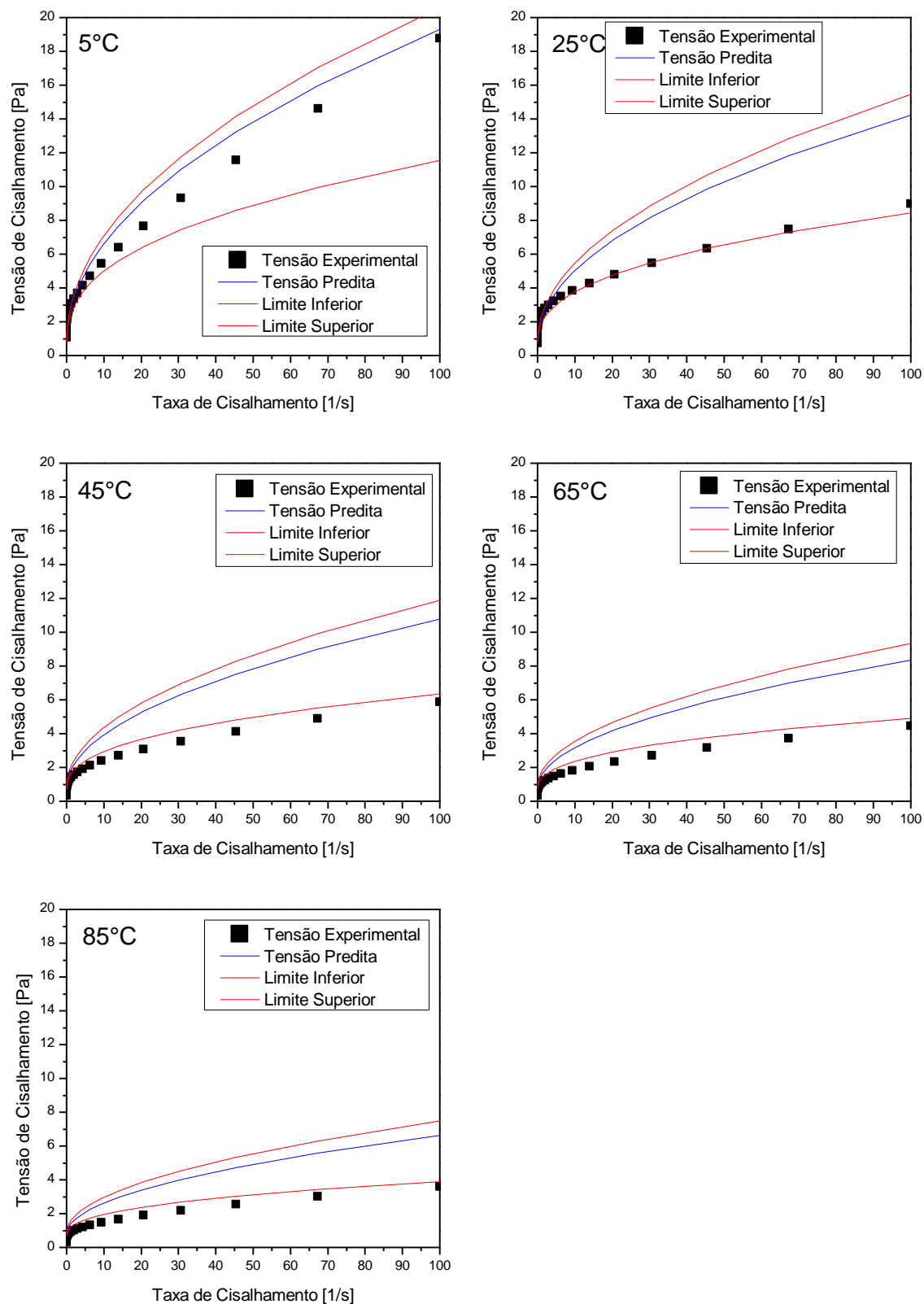


Figura 170. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

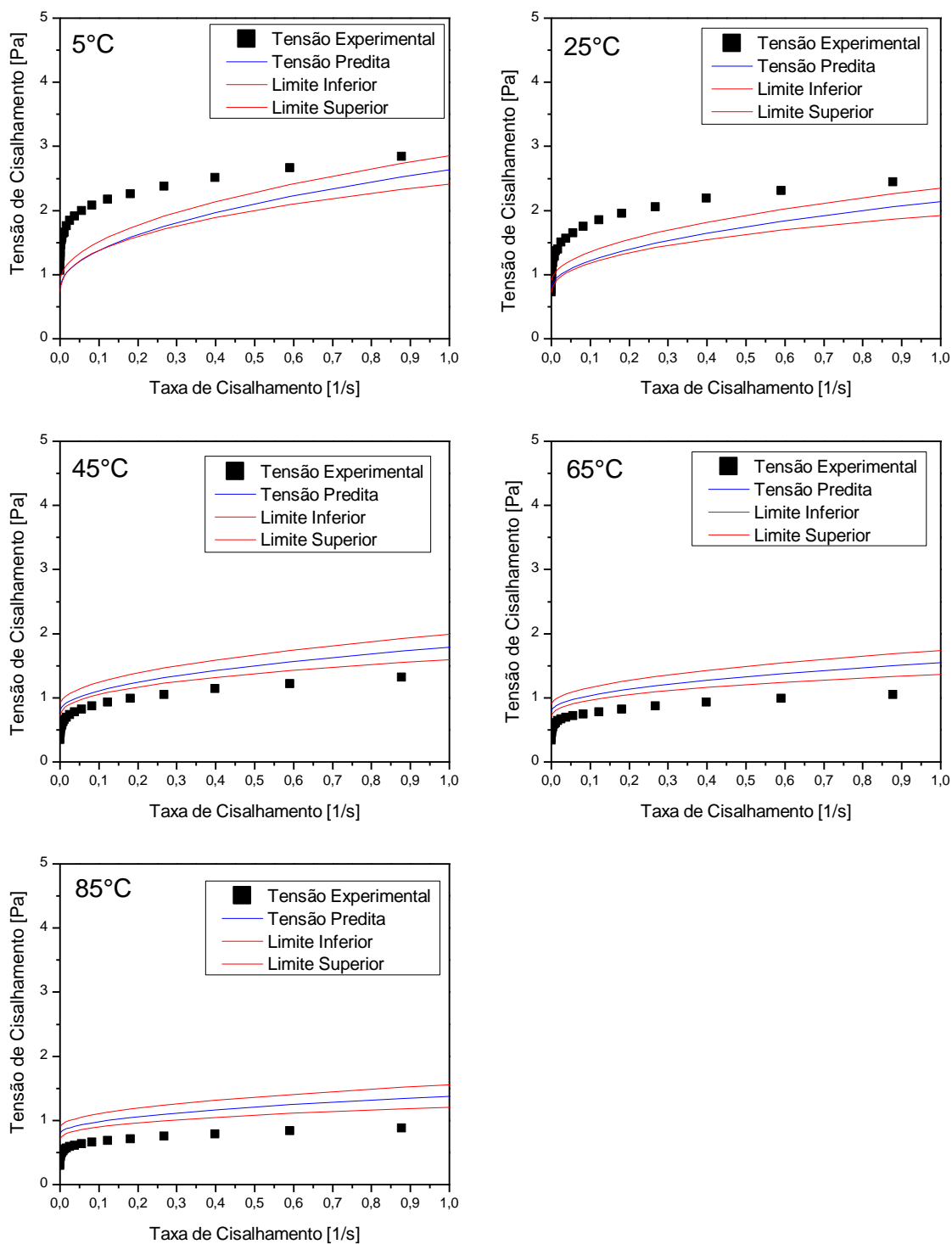


Figura 171. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo adensado para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

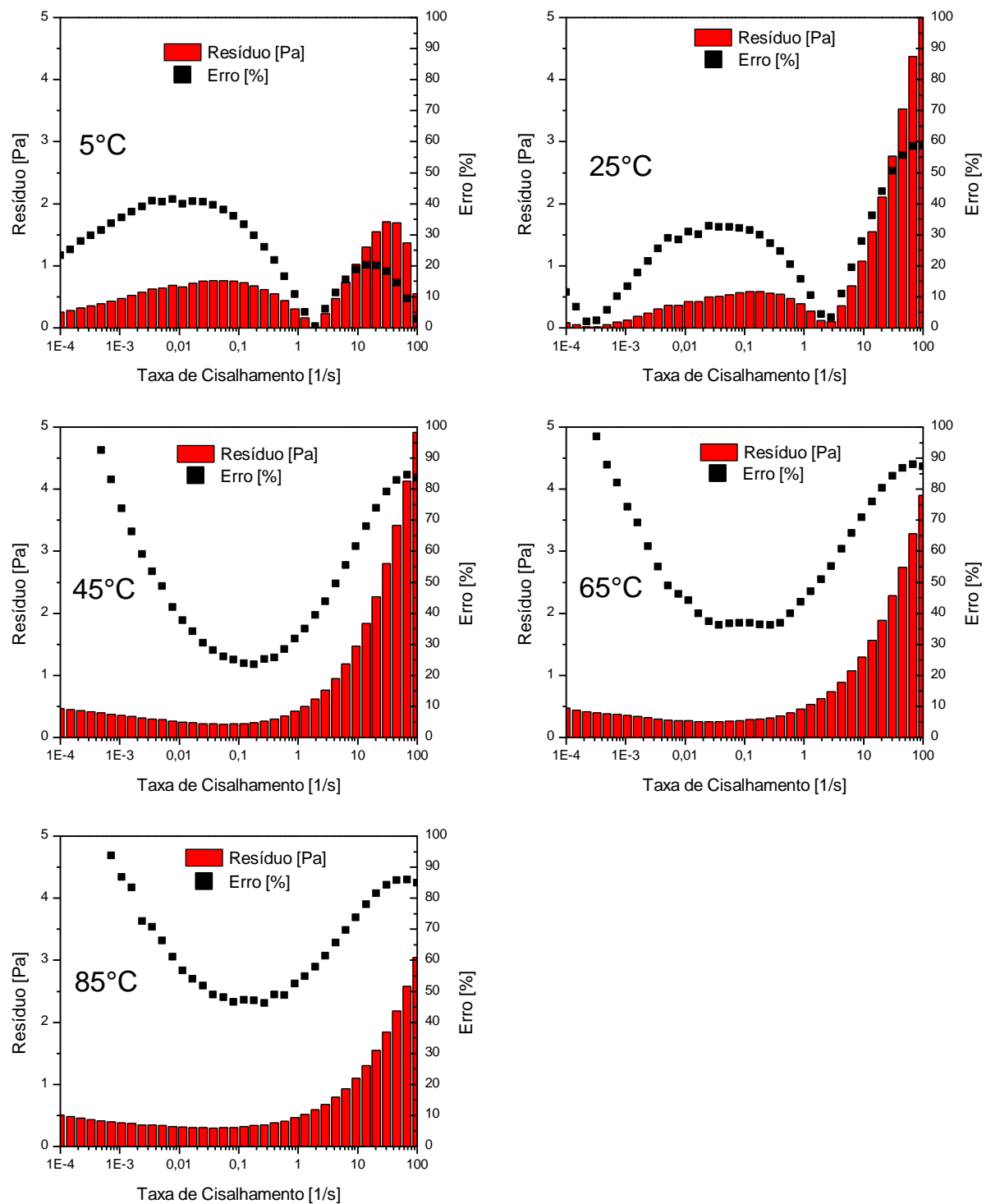


Figura 172. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

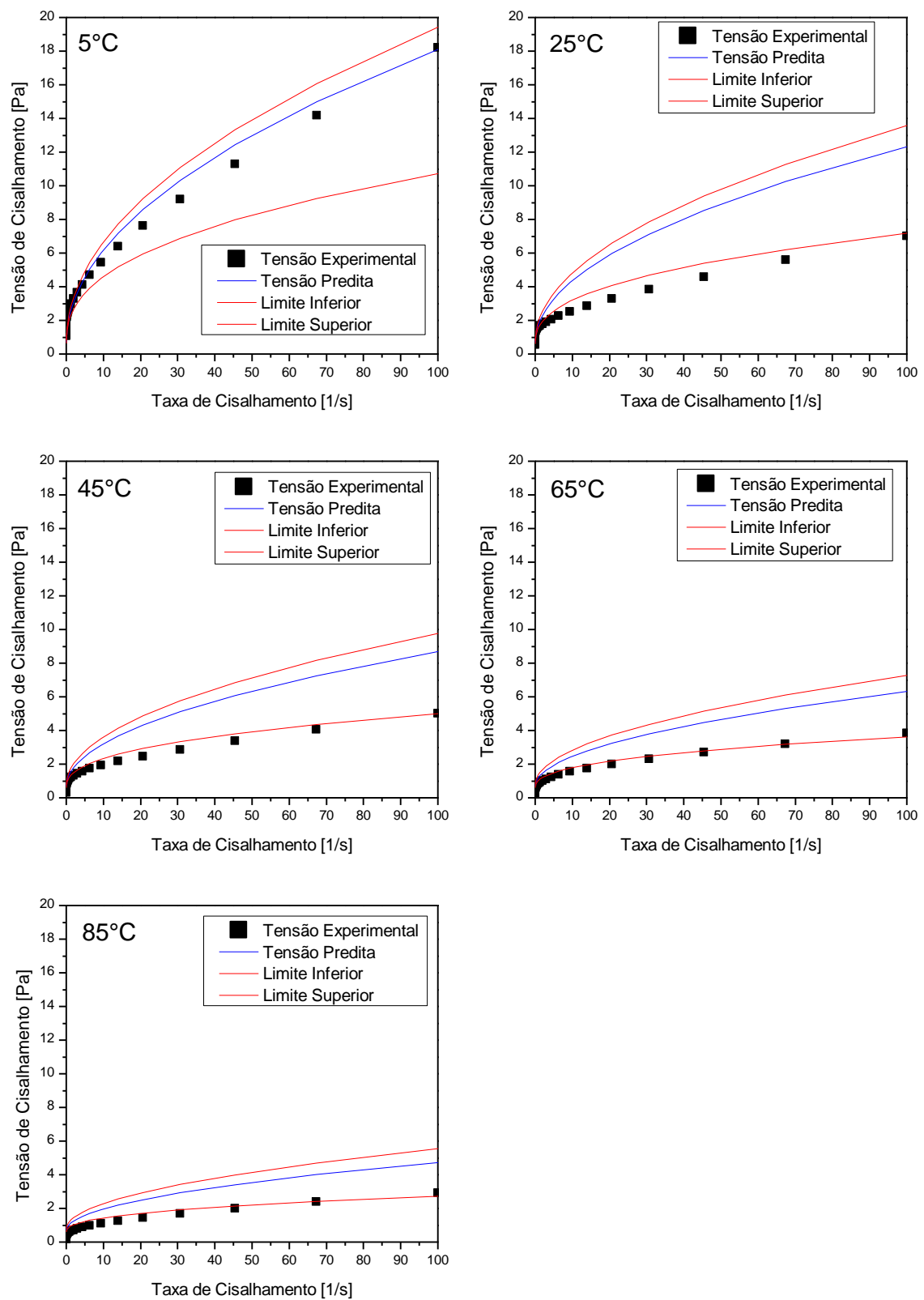


Figura 173. Ajuste dos dados experimentais do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius. Recorte entre  $1 \text{ s}^{-1}$  e  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

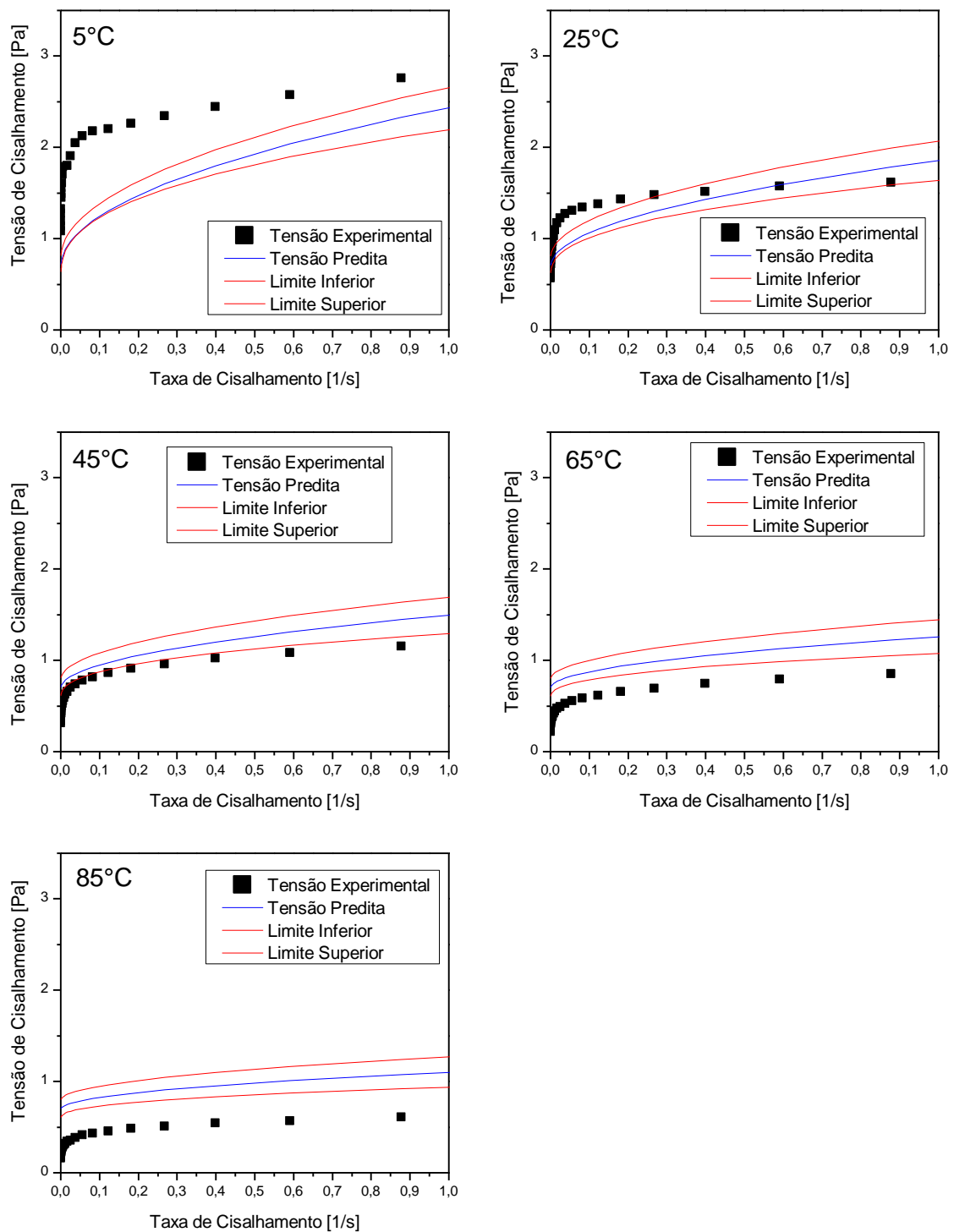


Figura 174. Resíduo e erro percentual da tensão do fluido base óleo sem adensante para Herschel-Bulkley com Arrhenius no intervalo  $100 \text{ s}^{-1}$  até  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ .

