

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TAINAN GABARDO MIRANDA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE TIXOTROPIA APLICADOS A  
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

TAINAN GABARDO MIRANDA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE TIXOTROPIA APLICADOS A  
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão,  
Ph.D

Co-Orientador: Diogo Elias da Vinha Andrade, MsC.

CURITIBA

2013

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO DE MODELOS DE TIXOTROPIA APLICADOS A FLUIDOS DE PERFURAÇÃO", realizado pelo aluno TAINAN GABARDO MIRANDA DOS SANTOS, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, Ph.D

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Diogo Elias da Vinha Andrade, MsC

LACIT, UTFPR

Co-Orientador

Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 02 de Setembro de 2013.

## DEDICATÓRIA

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, aos meus pais, Nilice e Miranda, por todo apoio, dedicação, carinho, incentivo e condições que me deram desde que eu era pequeno até o presente momento.

A minha família, que sempre foi meu porto seguro, lugar de conforto e carinho. Além do grande suporte, ela me proporcionou diversos momentos de descontração e diversão..

Aos meus amigos, pessoas incríveis, pelos momentos de diversão, pelas risadas, pela amizade, por serem a minha segunda família, ajudando-me nas horas de dificuldade e celebrando nos momentos de alegria.

Ao professor Negrão, por estar disposto a esclarecer dúvidas, por toda a orientação, pelo suporte contínuo, por me fazer ver a realidade e por acreditar no meu trabalho.

Ao meu co-orientador, Diogo, pela infinita paciência, pelo suporte, pelas explicações, pelos incentivos e por estar presente sempre que solicitado.

Aos professores do LACIT, pessoas essenciais durante o meu percurso na universidade. Principalmente, aos professores da banca, Admilson e Luciano, por toda gentileza e agilidade na correção do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos professores e servidores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por todos os ensinamentos e lições aprendidas.

A Petrobras pelo suporte técnico e financeiro para o desenvolvimento do tema.

A Deus, por toda a força e por mais uma conquista.

*“Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas acreditar.”*

Anatole France

## RESUMO

SANTOS, Tainan Gabardo Miranda dos Santos. Avaliação de modelos de tixotropia aplicados a fluidos de perfuração. 2013. 117 f. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Fluidos de perfuração apresentam comportamento tixotrópico e normalmente gelificam quando em repouso. A gelificação é fundamental para evitar que cascalhos provenientes da perfuração do poço se depositem sobre a broca em eventuais paradas no processo. Nessas condições são necessárias altas pressões para reiniciar o escoamento do fluido e, conseqüentemente, a perfuração. Por outro lado, pressões muito elevadas podem danificar as formações rochosas no fundo do poço. Dessa forma, um maior conhecimento sobre tixotropia se torna inevitável para melhor controle do processo. Tixotropia é definida como o decréscimo contínuo da viscosidade com o tempo quando uma amostra que tenha estado previamente em repouso é submetida ao escoamento e a subsequente recuperação da viscosidade no tempo quando o escoamento é descontinuado. O mecanismo que controla o fenômeno de tixotropia ainda não é bem definido e a modelagem matemática representa um desafio. No presente estudo é feita uma revisão de trabalhos encontrados na literatura que abordam o fenômeno de tixotropia e sobre os diferentes modelos matemáticos utilizados para prever o comportamento de materiais que apresentam essa característica. Alguns desses modelos são selecionados e ajustados a dados reológicos de um fluido de perfuração. Os parâmetros dos modelos matemáticos são ajustados a partir de resultados experimentais de testes com controle de taxa de cisalhamento. Após a calibração das constantes, os modelos são validados a partir de comparações de testes realizados com controle de tensão de cisalhamento. Observa-se que alguns modelos são capazes de prever com boa precisão características importantes do material como a tensão de quebra do gel e os valores de equilíbrio para testes de taxa de cisalhamento controlada.

**Palavras-chave:** Tixotropia, Fluido de perfuração, Ajuste de modelos matemáticos.

## ABSTRACT

SANTOS, Tainan Gabardo Miranda dos Santos. Avaliação de modelos de tixotropia aplicados a fluidos de perfuração. 2013. 117 f. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Drilling fluids present a thixotropic behavior and they usually gel when at rest. The sol-gel transition is fundamental to prevent the deposit of rock fragments, generated by drilling the well, over the drill bit during eventual stops. Under those conditions, high pressures are then required in order to break-up the gel when circulation is resumed. Moreover, very high pressures can damage the rock formation at the bottom of the well. Thus, a better understanding of thixotropy and the behavior of thixotropic materials becomes increasingly important for process control. Thixotropy is defined as the continuous decrease of viscosity with time when flow is applied to a material that has been previously at rest and the subsequent recovery of viscosity in time when the flow is discontinued. The mechanisms that control thixotropy are not yet well defined and modeling is still a challenge. This work presents a review of thixotropy and of different mathematical models found in the literature that are used to predict such characteristic. Some of those models are then selected and fitted to the rheological data of a drilling fluid. The constants of the mathematical models are fitted to the results of controlled shear rate tests. After the calibration, the models are compared to data obtained from controlled shear stress tests. It is worth of note that some models are able to predict important characteristics of a thixotropic material with reasonable accuracy.

**Keywords:** Thixotropy, Drilling fluid, Fitting of mathematical models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Extração de petróleo da camada pré-sal.....	22
Figura 2 – Esquema de planta de perfuração de poços de petróleo. ....	23
Figura 3 – Curva de histerese para fluidos tixotrópicos.....	30
Figura 4 – Taxa de cisalhamento imposta para reinicializar um fluido tixotrópico. ....	31
Figura 5 – Resposta da tensão de um fluido tixotrópico à taxa de cisalhamento imposta para reinicialização. ....	31
Figura 6 – Fluxograma do programa. ....	49
Figura 7 – Fluxograma do subprograma “Simular”.....	51
Figura 8 – Fluxograma do subprograma “Modelar”.....	53
Figura 9 – Fluxograma do programa “Ajustar”.....	54
Figura 10 – Testes: (a) Tipo 1 (rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento) e (b) Tipo 3 (rampa de tensão).....	57
Figura 11 – Resultados dos Testes Tipo 1, a tensão em função do tempo para diversas taxas de cisalhamento. ....	59
Figura 12 – Curva de escoamento advinda de resultados experimentais. ....	60
Figura 13 – Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada para o modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980). ....	61
Figura 14 – Resultados do modelo Zitny <i>et al.</i> (1980) ao Teste Tipo 1. ....	63
Figura 15 – Resultados do modelo Zitny <i>et al.</i> (1980) ao Teste Tipo 1 para taxa de cisalhamento de $30\text{s}^{-1}$ . ....	63
Figura 16 – Ajuste em regime transiente do modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980) para Teste Tipo 1: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100\text{s}^{-1}$ .....	65
Figura 17 – Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada para o modelo de Dullaert e Mewis (2006). ....	67
Figura 18 – Comparação dos valores medidos com os resultados do modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustados para o Teste Tipo 1: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100\text{s}^{-1}$ .....	69

Figura 19 – Comparação dos resultados experimentais com o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustado para $\beta$ variável: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100 \text{ s}^{-1}$ .....	71
Figura 20 – $\beta$ em função da taxa de cisalhamento. ....	72
Figura 21 – Comparação dos resultados experimentais com o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustado para $\beta$ em função da taxa de cisalhamento: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100 \text{ s}^{-1}$ . ....	73
Figura 22 - Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada pelo modelo de Mendes e Thompson (2013). ....	75
Figura 23 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Mendes e Thompson (2013) ajustado em regime transiente utilizando apenas resultados da taxa de $50 \text{ s}^{-1}$ : (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100 \text{ s}^{-1}$ . ..	77
Figura 24 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Mendes e Thompson (2013) ajustado para as taxas de 5, 20, 40 e $100 \text{ s}^{-1}$ : (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) $100 \text{ s}^{-1}$ .....	79
Figura 25 – Resultados do Testes Tipo 3 para as variações de tensão com o tempo controlada 4 e $8 \text{ Pa/min}$ . ....	83
Figura 26 - Cruzamento das retas $R_1$ e $R_2$ como critério de quebra do material .....	85
Figura 27 – Cruzamento das retas $R_3$ e $R_4$ como critério de quebra do material. ....	85
Figura 28 – Resultados dos Testes Tipo 4 para as tensões de 2,5 e $5 \text{ Pa}$ . ....	87
Figura 29 – Resultado do modelo de Dullaert e Mewis (2006) ao Teste Tipo 1 para taxas de 30, 40, 50 e $100 \text{ s}^{-1}$ .....	88
Figura 30 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Dullaert e Mewis (2006) para o Teste Tipo 3.....	90
Figura 31 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 3 com conjunto de parâmetros $P_1$ . ....	93
Figura 32 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 3 com conjunto de parâmetros $P_2$ .....	95

Figura 33 – Comparação dos resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros $P_1$ .....	96
Figura 34 – Comparação dos resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros $P_2$ .....	97
Figura 35 – Resultado do modelo de Mendes e Thompson (2013) ao Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros $P_2$ para tensões de 0,1, 1, 10 e 100Pa. ....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações cinética, constitutiva e elástica para os modelos do Capítulo 3. .....	48
Tabela 2 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980). .....	60
Tabela 3 – Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980). .....	62
Tabela 4 – Comparação do tempo característico, tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980). .....	64
Tabela 5 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Dullaert e Mewis (2006). .....	66
Tabela 6 – Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Dullaert e Mewis (2006). .....	67
Tabela 7 – Parâmetros ajustados em regime transiente para todas as taxas de cisalhamento simultaneamente para o Teste Tipo 1 do modelo de Dullaert e Mewis (2006). .....	68
Tabela 8 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Dullaert e Mewis (2006) com todas as taxas de cisalhamento ajustadas simultaneamente. .....	68
Tabela 9 – Valores de $\beta$ em função da taxa de cisalhamento para o modelo de Dullaert e Mewis (2006). .....	70
Tabela 10 - Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Dullaert e Mewis (2006) com $\beta$ como função da taxa de cisalhamento. .....	74
Tabela 11 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Mendes e Thompson (2013). .....	75
Tabela 12 - Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Mendes e Thompson (2013). .....	76

Tabela 13 – Parâmetros ajustados em regime transiente para taxa de cisalhamento de $50 \text{ s}^{-1}$ para o Teste Tipo 1 do modelo de Thompson e Mendes (2013).....	76
Tabela 14 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Mendes e Thompson (2013) com taxa de cisalhamento de $50 \text{ s}^{-1}$ . .....	78
Tabela 15 – Parâmetros do modelo de Thompson e Mendes (2013) ajustados em regime transiente para múltiplas taxas de cisalhamento (5, 20, 40 e $100 \text{ s}^{-1}$ )....	78
Tabela 16 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Mendes e Thompson (2013) com taxas de cisalhamento (5, 20, 40 e $100 \text{ s}^{-1}$ ).....	80
Tabela 17 – Tensão de quebra experimental do material para cada variação da tensão com o tempo.....	86
Tabela 18 – Valores dos parâmetros de regime transiente para avaliação do modelo de Dullaert e Mewis (2006). .....	88
Tabela 19 – Comparação do pico de tensão para o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ao Teste Tipo 1.....	88
Tabela 20 - Comparação da tensão de quebra utilizando diferentes critérios para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).....	91
Tabela 21 – Conjunto de parâmetros ajustados para o modelo de Mendes e Thompson (2013).....	92
Tabela 22 – Comparação da tensão de quebra utilizando critério experimental e conservador para o modelo de Mendes e Thompson (2013) para conjunto de parâmetros $P_1$ . .....	94
Tabela 23 – Comparação da tensão de quebra utilizando critério experimental e conservador para o modelo de Mendes e Thompson (2013) para conjunto de parâmetros $P_2$ . .....	94
Tabela 24 – Funções “ode” com tipo de problema e ordem de precisão. ....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ENAHPE	Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
RP	Regime Permanente
RT	Regime Transiente
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos		
$a, b, c, d$	Expoentes da Equação (2.1)	[-]
$e, f, g, h$	Expoentes da Equação (2.2)	[-]
$C_1$	Constante dos termos da Equação (2.1)	[s <sup>b-1</sup> ]
$C_2$	Constante dos termos da Equação (2.1)	[s <sup>d-1</sup> ]
$C_3$	Constante dos termos da Equação (2.2)	[s <sup>f-1</sup> ]
$C_4$	Constante dos termos da Equação (2.2)	[s <sup>h-1</sup> ]
$d\tau_f / dt$	Variação da tensão com o tempo	[Pa.s <sup>-1</sup> ]
$n$	Número de ligações da estrutura virgem	[-]
$n_0$	Número de ligações ativas (não-quebradas)	[-]
$P_1$	Primeiro conjunto de parâmetros do modelo de Mendes e Thompson (2013)	[-]
$P_2$	Segundo conjunto de parâmetros do modelo de Mendes e Thompson (2013)	[-]
$S$	Função soma	[-]
$t$	Tempo	[s]
$t_{\max}$	Tempo inicial da simulação	[s]
$t_{\min}$	Tempo final da simulação	[s]
$t_{\text{rampa}}$	Tempo de rampa	[s]
$x_1, x_2, x_3, x_n$	Parâmetros de um modelo arbitrário	[-]

Símbolos Gregos		
$\Delta t$	Passo de tempo	[s]
$\xi$	Parâmetro adimensional de movimento	[-]
$\xi_i$	Parâmetro adimensional de movimento inicial	[-]
$\gamma$	Deformação	[-]

$\gamma_{el,i}$	Deformação elástica inicial	[-]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\gamma}_i$	Taxa de cisalhamento inicial	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\gamma}_f$	Taxa de cisalhamento final no teste de reinicialização e no teste de taxa de cisalhamento controlada	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\gamma}_{RP}$	Taxa de cisalhamento de equilíbrio ou regime permanente	[s <sup>-1</sup> ]
$\phi$	Variável genérica	
$\eta$	Viscosidade	[Pa.s]
$\lambda$	Parâmetro estrutural	[-]
$\lambda_i$	Parâmetro estrutural inicial	[-]
$\lambda_{RP}$	Parâmetro estrutural de equilíbrio ou regime permanente	[-]
$\tau, \sigma$	Tensão de cisalhamento	[Pa]
$\tau_i$	Tensão de cisalhamento inicial	[Pa]
$\tau_f$	Tensão de cisalhamento final	[Pa]
$\tau_P$	Tensão de cisalhamento de pico	[Pa]
$\tau_{RP}$	Tensão de equilíbrio ou de regime permanente	[Pa]
$\sigma_{el}$	Tensão elástica	[Pa]
$\sigma_{el,i}$	Tensão elástica inicial	[Pa]

### Símbolos Específicos dos Modelos Revisados:

$\eta_0$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula	Moore (1959)
$C_5$	Viscosidade dependente da tixotropia do material	
$C_3, C_4$	Constantes arbitrárias	
$\tau_{y0}$	Tensão limite de escoamento independente da tixotropia	Zitny <i>et al.</i> (1980)
$\tau_{y1}$	Tensão limite de escoamento dependente da tixotropia	
$K_0$	Consistência do material independente da tixotropia	
$K_1$	Consistência do material dependente da tixotropia	
$m$	Índice da Lei de Potências	
$C_3, C_4$	Constantes arbitrárias	

$e$	Expoente arbitrário	
$\eta_{\infty}$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita	Cousot (1993)
$G_0$	Módulo de elasticidade inicial	
$\eta_{st,0}$	Viscosidade hidrodinâmica inicial	
$n$	Expoente arbitrário	
$\sigma_{y,0}$	Tensão limite de escoamento	
$C_6, C_7$	Constantes arbitrárias	
$\eta_0$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula	Cousot <i>et al.</i> (2002)
$T_0$	Tempo característico	
$\alpha$	Constante arbitrária	
$\eta_0$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula	Roussel <i>et al.</i> (2004)
$p$	Expoente arbitrário	
$T_0$	Tempo característico	
$\alpha$	Constante arbitrária	
$\tau_{y,0}$	Tensão limite de escoamento	Roussel (2006)
$K_2, \alpha$	Constantes arbitrárias	
$r, q$	Expoentes arbitrários	
$T_0$	Tempo característico	
$\eta_{\infty}$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita	Dullaert e Mewis (2006)
$G_0$	Módulo de elasticidade inicial	
$\eta_{st,0}$	Viscosidade hidrodinâmica inicial	
$C_8, C_9,$ $C_{10}, C_{11}$	Constantes arbitrárias	
$\beta$	Expoente arbitrário	
$\gamma_c$	Deformação crítica	
$\tau_{y,RP}$	Tensão limite de escoamento de equilíbrio	
$G_0$	Módulo de elasticidade inicial	
$K_3$	Constante arbitrária	Beris <i>et al.</i> (2008)
$s$	Expoente arbitrário	

$c$	Tensor de conformação adimensional da estrutura	
$\delta$	Matriz identidade	
$t_{eff}$	Tempo de relaxação efetivo	
$\xi_{\infty}$	Parâmetro adimensional de movimento a taxa de cisalhamento infinita	
$\lambda_0$	Tempo de relaxação inicial	
$\tau_{y,0}$	Tensão limite de escoamento	
$\eta_{\infty}$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita	Ardakani <i>et al.</i> (2011)
$C_3, C_4,$ $C_{12}$	Constantes arbitrárias	
$G_0$	Módulo de elasticidade inicial	
$\eta_0$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula	Mendes (2011)
$\eta_{\infty}$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita	
$t_{eq}$	Tempo característico	
$\tau_0$	Tensão limite de escoamento estática	
$\tau_{0d}$	Tensão limite de escoamento dinâmica	
$\dot{\gamma}_{0d}$ $\tau_{0d}$	Taxa de cisalhamento que marca a transição entre $\tau_0$ e $\tau_{0d}$	
$K_4$	Constante arbitrária	
$u, v, x,$ $w, y$	Expoentes arbitrários	
$G_0$	Módulo de elasticidade inicial	Mendes e Thomson (2013)
$\eta_0$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula	
$\eta_{\infty}$	Viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita	
$t_{eq}$	Tempo característico	
$\tau_0$	Tensão limite de escoamento estática	
$\tau_{0d}$	Tensão limite de escoamento dinâmica	
$\dot{\gamma}_{0d}$ $\tau_{0d}$	Taxa de cisalhamento que marca a transição entre $\tau_0$ e $\tau_{0d}$	

$K_4, C_{13}$	Constantes arbitrárias	
$\nu, x, y$	Expoentes arbitrários	
$\lambda(t=0)$	Parâmetro estrutural inicial	
$\lambda_0$	Parâmetro estrutural completamente estruturado	
$\tau_{y,0}$	Tensão limite de escoamento	Alexandrou <i>et al.</i> (2013)
$\mu$	Viscosidade plástica	
$C_{13}, C_{14},$ $C_{15}, C_{16}$	Constantes arbitrárias	

**Subscritos:**

<i>el</i>	Elástico
<i>exp</i>	Experimental
<i>i</i>	Inicial
<i>j</i>	Denota a posição do dado
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>mod</i>	Modelo
<i>rampa</i>	Rampa

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1	Contexto	22
1.2	Processo de Perfuração	23
1.3	Tixotropia	24
1.4	Objetivos	25
1.5	Conteúdo do trabalho	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	Tixotropia	27
2.1.1	Histórico	27
2.1.2	Quantificação	29
2.1.3	Modelos matemáticos	31
	Síntese do Capítulo 2	39
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS MODELOS</b>	<b>41</b>
3.1	Modelo de Moore (1959)	41
3.2	Modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980)	42
3.3	Modelo de Dullaert e Mewis (2006)	43
3.4	Modelo de Mendes (2011)	45
3.5	Modelo de Mendes e Thompson (2013)	46
	Síntese do Capítulo 3	47
<b>4</b>	<b>AJUSTE DOS MODELOS</b>	<b>49</b>
4.1	Modelagem computacional	49
4.1.1	Simular	50
4.1.2	Modelo	51
4.1.3	Ajustar	53
4.2	Testes reológicos	56
4.2.1	Rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento – Teste Tipo 1	56
4.2.2	Patamar de taxa de cisalhamento – Teste Tipo 2	57
4.2.3	Rampa de tensão de cisalhamento – Teste Tipo 3	57
4.2.4	Patamar de tensão de cisalhamento – Teste Tipo 4	57
4.3	Resultados Experimentais	58
4.3.1	Resultados dos Testes Tipo 1	58
4.3.2	Curva de escoamento	59
4.4	Ajustes	60
4.4.1	Modelo de Zitny <i>et al.</i> (1980)	60
4.4.2	Modelo de Dullaert e Mewis (2006)	66
4.4.3	Modelo de Mendes e Thompson (2013)	74
	Síntese do Capítulo 4	80
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS MODELOS</b>	<b>82</b>
5.1	Resultados experimentais	82
5.1.1	Rampa de tensão – Teste 3	82

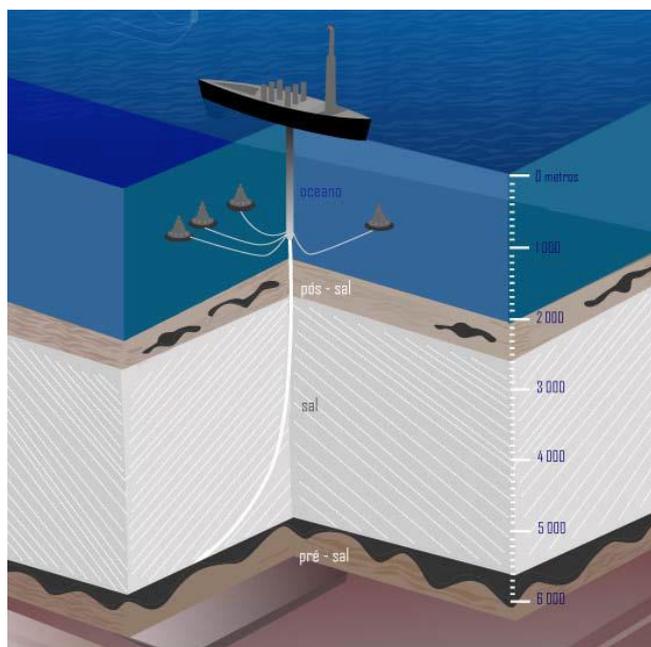
5.1.2	Patamar de tensão – Teste 4	86
5.2	Avaliação dos modelos	87
5.2.1	Modelo de Dullaert e Mewis (2006)	87
5.2.2	Mendes e Thompson (2013)	92
	Síntese do Capítulo 5	98
6	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS MODELOS	108
	APÊNDICE B – RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	115
	APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO	116

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

O petróleo é um recurso com grande demanda na sociedade. Além de se destacar como fonte energética, seus derivados podem ser usados em diversos produtos tais como, perfumes e plásticos, etc. (MACHADO, 2002). Por ser uma fonte de energia não renovável, a descoberta de grandes reservas na região do pré-sal no Brasil mantém boas perspectivas de utilização desse material ainda por algumas décadas.

Entretanto, os desafios tecnológicos provenientes dessa nova descoberta são muito grandes. A Figura 1 evidencia um dos principais desafios tecnológicos advindos da descoberta do petróleo em camadas pré-sal: a dificuldade de perfurar abaixo de colunas d'água de 2000m e camadas de sal de mais de 3000m de profundidade (PETROBRAS, 2013). A complexidade da perfuração se deve as elevadas pressões no fundo do poço, aos diferentes tipos de rocha, ao elevado custo do processo e aos diversos tipos de fluido de perfuração necessários em cada etapa.



**Figura 1 – Extração de petróleo da camada pré-sal.**

**Fonte: Petrobrás, 2007.**

## 1.2 Processo de Perfuração

Atualmente, utiliza-se um processo de perfuração de poços de petróleo com sonda de perfuração rotativa, no qual a rocha é perfurada devido ao movimento de rotação de uma broca e peso de uma coluna de perfuração. A Figura 2 ilustra de forma explicativa o processo de perfuração.



**Figura 2 – Esquema de planta de perfuração de poços de petróleo.**

**Adaptado de: Schlumberger, 2013.**

O movimento rotativo da broca (1) gera fragmentos de rocha, os quais são removidos pelo fluido de perfuração. Esse fluido se encontra em um tanque (3) e é injetado pelo interior da coluna de perfuração (2) através de bombas (4) e retorna à superfície pelo espaço anular formado pela parede do poço e pela coluna. O fluido de perfuração, em seguida, é separado dos fragmentos de rocha e outras impurezas (5) e fica apto a ser reutilizado (THOMAS *et al.*, 2004).

O fluido de perfuração é uma mistura de base líquida (água, óleo ou sintética) ou gasosa utilizado para remover os cascalhos e auxiliar durante a

perfuração de poços de petróleo. A escolha do fluido a ser empregado é fundamental para garantir a segurança durante a perfuração. Entre as principais funções de um fluido de perfuração, destacam-se (Lummus e Azar, 1986; Darley e Gray, 1988):

- a) Transportar os detritos da perfuração e permitir sua separação na superfície;
- b) Resfriar, limpar e lubrificar a broca;
- c) Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do poço;
- d) Manter a estabilidade do poço;
- e) Limpar o fundo do poço dos detritos;
- f) Prevenir o escoamento do fluido para as formações;
- g) Formar um filme de baixa permeabilidade nas paredes do poço;

### 1.3 Tixotropia

Além das funções citadas, outra característica a ser destacada é a gelificação desse material quando o escoamento é interrompido. Esse comportamento do material permite que, durante eventuais paradas do processo de perfuração, os cascalhos fiquem em suspensão ao longo do poço. Dessa forma, evita-se o retorno dos cascalhos ao fundo do poço, o que poderia causar uma obstrução da broca e o colapso do poço no reinício do processo.

A capacidade do fluido de perfuração de se transformar em um gel é devida à sua característica tixotrópica. O histórico e o conceito de tixotropia serão abordados no Capítulo 2, porém uma definição dada por Barnes (1997) diz que tixotropia proporciona o: “decaimento da viscosidade com o tempo quando o material é submetido à tensão ou taxa de cisalhamento constante, seguida de recuperação gradual da viscosidade quando a tensão ou taxa de cisalhamento é removida”.

O processo de quebra do gel do fluido em repouso é feito por um aumento da pressão da bomba durante a injeção do fluido de perfuração. Essa pressão deve ser controlada, pois se for muito baixa, não fará o fluido escoar; porém, se for muito elevada, poderá romper a parede do poço proporcionando um influxo de fluido para a formação, causando perda de circulação do fluido.

A compreensão do fenômeno de quebra de gel do fluido de perfuração é de grande importância para o melhor controle do processo de perfuração durante o reinício do escoamento do fluido. Os efeitos tixotrópicos e a quebra do gel podem ser estudados através da modelagem matemática, de aparatos experimentais que buscam reproduzir a situação real ou através de testes reológicos.

Os resultados reológicos são obtidos a partir de instrumentos capazes de determinar a resposta mecânica de materiais quando submetidos a solicitações externas. Através desses testes é possível obter diversas curvas e melhor entender o funcionamento da quebra do gel. É importante ressaltar que os próprios modelos matemáticos e os experimentos necessitam da caracterização reológica do material.

#### **1.4 Objetivos**

O objetivo do presente trabalho é avaliar a quebra de gel de fluidos de perfuração durante o reinício do escoamento e identificar o(s) modelo(s) que melhor representa(m) a quebra do gel de fluidos de perfuração.

#### **1.5 Conteúdo do trabalho**

O conteúdo do presente trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, expondo definições e conceitos para melhor compreender o presente trabalho. Em seguida são apresentados trabalhos publicados por diversos autores os quais propõem modelos matemáticos para equacionar e modelar o fenômeno de tixotropia.

No Capítulo 3 são descritas as formulações matemáticas para alguns dos modelos selecionados do Capítulo 2. As equações constitutivas e cinéticas são apresentadas, e são definidos os parâmetros relacionados a cada modelo.

No Capítulo 4 alguns modelos selecionados são ajustados a testes reológicos. Além da metodologia utilizada para ajuste das constantes dos modelos, são apresentados os resultados experimentais obtidos no laboratório de reologia do Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Por fim, as constantes obtidas após

a calibração e a comparação entre resultados experimentais e calculados são apresentadas.

No Capítulo 5 é realizada uma avaliação dos modelos matemáticos ajustados no Capítulo 4, através da comparação com resultados experimentais de outros testes reológicos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho, assim como possíveis trabalhos futuros.

O Apêndice A contém as formulações matemáticas dos modelos que não foram apresentados no Capítulo 3. No Apêndice B é apresentado o método utilizado para solução de equações diferenciais parciais. No Apêndice C é apresentado o artigo publicado no ENAHPE<sup>1</sup> 2013 e ganhador do 3º lugar no Concurso *Student Poster Contest* categoria graduação.

---

<sup>1</sup> ENAHPE 2013 – V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás. Congresso que ocorreu em Teresópolis, RJ, no período de 5 a 8 de agosto de 2013.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tixotropia

A alta complexidade das mudanças de microestrutura causadas pela tixotropia ainda não é bem compreendida. Porém, o seu efeito é muito comum na natureza e em sistemas industriais. Efeitos reológicos dependentes do tempo podem ser encontrados no processamento de metais, alimentos, minerais, produtos farmacêuticos e cerâmicos, também em géis, tintas, fluidos de perfuração, concretos (MEWIS E WAGNER, 2009).

Para compreender melhor tixotropia, este capítulo foi dividido em três partes: histórico, quantificação e modelos. A primeira parte tem o objetivo de mostrar a evolução da tixotropia e do conceito. Em seguida, a segunda parte aborda as formas usuais de analisar e quantificar o fenômeno. Finalmente, a terceira parte apresenta as abordagens matemáticas para modelar o comportamento tixotrópico assim como o trabalho de diversos autores nessa área.

#### 2.1.1 Histórico

As revisões de tixotropia presentes na literatura (Bauer e Collins, 1967; Mewis, 1979; Barnes, 1997; Mewis e Wagner, 2009) concordam que o estudo do fenômeno foi iniciado por Schalek e Szergvari (1923), quando reportaram a observação de que alguns géis, consistindo de dispersões de óxido de ferro, poderiam ser transformados em líquidos através de agitação. O gel era novamente desenvolvido quando as amostras eram deixadas em repouso e a transformação líquido-gel poderia ser repetida diversas vezes, ou seja, o processo era reversível. Assim, demonstraram que transições líquido-gel poderiam não apenas ser induzidas pela mudança da temperatura, mas também pelo mecanismo de agitação à temperatura constante.

O termo tixotropia foi cunhado por Peterfi (1927) *apud* Barnes (1997), o qual fez o primeiro trabalho a descrever efetivamente o fenômeno através da constatação de que o protoplasma se liquefaz por ação mecânica. O nome tixotropia é derivado das palavras gregas: *thixis* (agitação) e *trepo* (virar ou mudança).

Freundlich (1928) publicou o primeiro livro sobre o assunto com o título de “Tixotropia”. Embora o trabalho original enfatizasse a transição líquido-gel, o tempo necessário para resolidificar o material começava a ser utilizado para quantificar o efeito. Em seguida, foi descoberto que outros materiais apresentavam esse mesmo comportamento, tais como: gel de hidróxido de alumínio, gel de pentóxido de vanádio, pasta de amido, gelatina, látex e tintas-óleo.

Dessa forma, o termo tixotropia foi estendido para materiais que tivessem a consistência alterada pelo escoamento, contudo, não havia menção nem do estado gel ou da dependência temporal. Nesse contexto, Pryce-Jones (1941) *apud* Mewis e Wagner (2009), baseado em seu trabalho sobre tintas, propôs a seguinte definição para tixotropia: “um aumento da viscosidade no estado de repouso e uma diminuição da viscosidade quando submetido a uma tensão de cisalhamento constante”. Isso gerou uma confusão entre a dependência temporal e a dependência da taxa de cisalhamento como ilustrado pela definição de Goodeve (1939): “um decréscimo isotérmico reversível da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento”. Essa definição é, na verdade, o que hoje é conhecido como efeito *shear thinning* (materiais com comportamento pseudoplástico). Porém, é importante diferenciar um material tixotrópico e um fluido pseudoplástico, visto que o último utiliza escalas de tempo às quais podem ser ignoradas.

Bauer e Collins (1967) definiram: “o sistema é considerado tixotrópico quando ocorre uma redução reversível, isotérmica e dependente do tempo na magnitude das propriedades reológicas de um sistema, como: módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento e viscosidade, mediante a aplicação de uma tensão de cisalhamento”. Os autores também afirmaram que os termos utilizados por Freundlich (i.e., resolidificação, liquefação e solução) eram arcaicos, pois seus significados eram apenas qualitativos.

Desde então, diversos autores buscaram definir tixotropia. A seguir uma série de definições do fenômeno será mostrada para ilustrar a evolução histórica do conceito de tixotropia e do entendimento do fenômeno.

Mewis (1979) fez uma extensa revisão sobre tixotropia e afirma que, em seu tempo, a definição mais aceita, por autores como Bauer, Collins, Scott-Blair e Reiner, era: “o decréscimo contínuo da viscosidade aparente com o tempo quando

submetido a uma tensão e a subsequente recuperação da viscosidade quando o escoamento é descontinuado”.

Barnes *et al.* (1989) definem tixotropia como: “uma gradual diminuição da viscosidade quando o material é submetido a uma tensão de cisalhamento seguida de uma gradual recuperação da estrutura quando a tensão é removida”.

Barnes (1997) afirma que uma definição mais clara e abrangente de tixotropia é necessária e que essa deveria conter a ideia do efeito *shear thinning*, a dependência temporal e as considerações de que o material tixotrópico em estado estruturado pode ser considerado viscoelástico com efeitos temporais.

Mewis e Wanger (2009) propõem uma definição consistente com as terminologias da IUPAC<sup>2</sup>: “tixotropia é um decréscimo contínuo da viscosidade com o tempo quando uma amostra que tenha estado previamente em repouso é submetida ao escoamento e a subsequente recuperação da viscosidade no tempo quando o escoamento é descontinuado”. Ainda assim, elegem os elementos essenciais para uma definição de tixotropia:

- a) O conceito deve ser baseado na viscosidade;
- b) A viscosidade é dependente do tempo e decresce com o avanço temporal do escoamento;
- c) O processo é reversível.

Porém, os autores não mencionam a inclusão dos efeitos elásticos presentes em materiais tixotrópicos o que constitui um elemento essencial para a definição do conceito de tixotropia.

### 2.1.2 Quantificação

A relevância ou a magnitude dos efeitos tixotrópicos é algo extremamente necessário em diversas indústrias, por isso, desde o início dos estudos desse fenômeno ocorrem tentativas para quantificar a tixotropia. Freundlich (1928) utilizou o tempo requerido para a gelificação (resolidificação) do material para quantificar o grau de tixotropia. Porém, esse método é arbitrário e dependente do volume da amostra, o que impossibilita a definição do grau de tixotropia em dimensões absolutas.

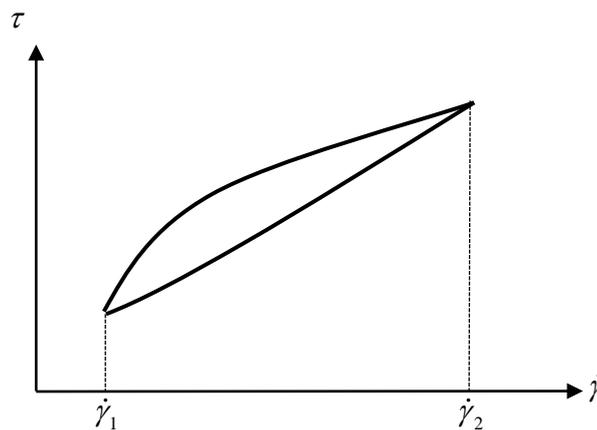
---

<sup>2</sup> International Union of Pure and Applied Chemistry

Para quantificar a tixotropia com repetibilidade, McMillen (1932), em seu estudo sobre tintas, mostra que a fluidez (inverso da viscosidade), poderia diminuir em até quatro ordens de magnitude, dependendo do tempo de repouso anterior ao teste. Esta dependência era quase quadrática em relação ao tempo de descanso.

Os trabalhos de diversos autores (Pryce-Jones, 1941; Cheng e Evans, 1965) evidenciam que a utilização da variação da viscosidade, sob uma taxa de cisalhamento constante, é a medida do grau de tixotropia mais utilizada. Contudo, outras formas da quantificação do fenômeno foram propostas. A técnica de histerese é uma delas e foi introduzida por Green e Weltmann (1946). Nesse experimento, primeiramente o fluido é submetido a um aumento da taxa de cisalhamento até um valor máximo e, em seguida, a uma redução da taxa de cisalhamento até zero. Essa variação (aumento/redução) pode ser realizada através de uma rampa linear contínua ou de uma série de pequenos degraus.

O resultado inicialmente esperado para um fluido newtoniano é que o caminho de ida e o de volta sejam idênticos. Porém, para um fluido tixotrópico isso não acontece, como mostra a Figura 3, na qual é possível perceber a histerese. A área entre as curvas de ida e volta determina a magnitude da tixotropia. Se as curvas forem coincidentes, o efeito de tixotropia é nulo.

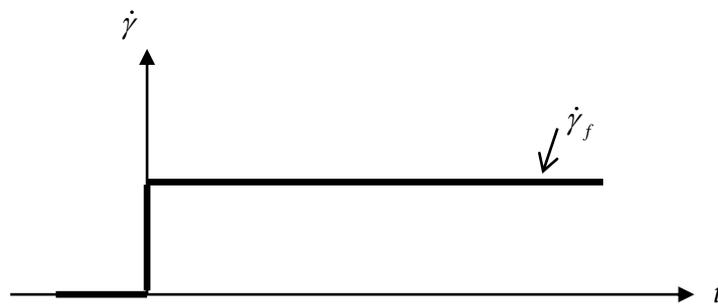


**Figura 3 – Curva de histerese para fluidos tixotrópicos.**

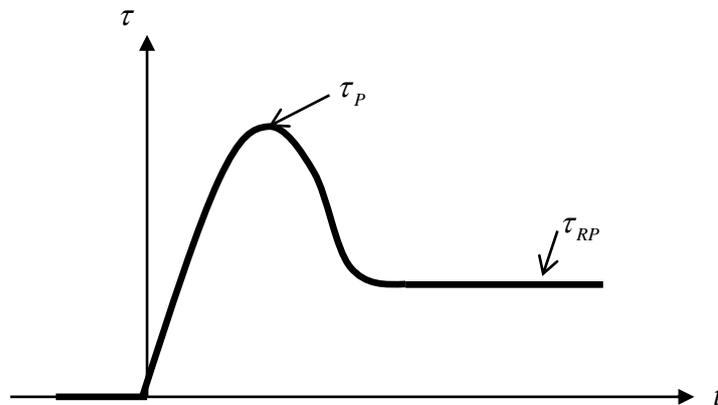
**Adaptado de: Machado, 2002.**

A histerese exemplifica o efeito memória da tixotropia, ou seja, as tensões e taxas de cisalhamento aplicadas anteriormente influem no comportamento do material.

Atualmente, um dos testes mais utilizados para quantificar a tixotropia é o reinício de escoamento no qual a amostra previamente em repouso é submetida a uma taxa de cisalhamento constante. A Figura 4 mostra o degrau de taxa de cisalhamento. Deve-se observar que o valor inicial é zero e a partir do início do teste acontece uma mudança abrupta para o valor final constante da taxa de cisalhamento,  $\dot{\gamma}_f$ . A resposta típica da tensão a esse estímulo é apresentada na Figura 5, na qual se vê um pico de tensão,  $\tau_p$ , seguido de um gradual decaimento até que o valor de regime permanente,  $\tau_{RP}$ , seja atingido.



**Figura 4 – Taxa de cisalhamento imposta para reinicializar um fluido tixotrópico.**



**Figura 5 – Resposta da tensão de um fluido tixotrópico à taxa de cisalhamento imposta para reinicialização.**

### 2.1.3 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos de materiais tixotrópicos podem ser divididos em três abordagens. A primeira consiste na abordagem fenomenológica, na qual é analisado o fenômeno através do ajuste direto da resposta do material ao cisalhamento.

Uma segunda abordagem é denominada de microestrutural direta, na qual o nível estrutural do material é associado ao número de ligações entre as partículas do

material. Para tanto, é necessário que diversas simplificações sejam feitas, pois existe uma alta complexidade ao descrever e contabilizar as ligações de um fluido em repouso ou em escoamento.

Uma terceira abordagem utiliza um parâmetro matemático para quantificar o nível estrutural do material. Essa abordagem recebe o nome de microestrutural indireta. Numericamente, o parâmetro estrutural é igual à unidade quando o material encontra-se totalmente estruturado e igual a zero quando está completamente desestruturado. Estes modelos normalmente utilizam uma equação temporal para a evolução do parâmetro estrutural.

A seguir, uma série de modelos matemáticos que tentam modelar o comportamento tixotrópico é discutida.

#### **2.1.3.1 Abordagem Fenomenológica**

A abordagem fenomenológica foi primeiramente utilizada para modelar o comportamento de tixotropia por Slibar e Paslay (1959), os quais utilizaram a equação de Bingham com uma tensão limite de escoamento não constante, que seria maior para reiniciar o escoamento (tensão limite de escoamento do material em repouso) do que para mantê-lo (tensão limite de escoamento dinâmica).

Em seguida, Slibar e Paslay (1964) estenderam seu estudo ao tornar a tensão limite de escoamento dinâmica função do tempo e da taxa de cisalhamento. Elliot e Ganz (1971) e Elliot e Green (1972) modificaram as equações de Silbar e Paslay (1964) ao introduzir um comportamento elástico hookeano antes de iniciar a deformação viscoplástica. Elliot e Ganz (1977) também alteraram essas equações ao inserir um termo com efeito de *shear thinning* para contabilizar a natureza pseudoplástica da maior parte dos produtos alimentícios.

Os primeiros autores a introduzirem uma expressão única para a tensão limite de escoamento de transição, a qual fosse aplicável para o fluido tanto em repouso quanto em escoamento, foram Suetsugu e White (1984). Os autores assumiram um comportamento elástico linear e um não linear para as partes, respectivamente, anterior e posterior ao escoamento.

Recentemente, Phan-Thien *et al.* (1997) propuseram um modelo para uma massa de farinha e água, consistindo de um termo hiperelástico (devido à rede elástica de polímeros conectados), um termo viscoelástico (devido à suspensão de glóbulos de amido) e um termo puramente viscoso (considerado para a água).

Embora os modelos de abordagem fenomenológica sejam úteis, não estão diretamente conectados ao processo responsável pelas mudanças na estrutura. O conhecimento do comportamento reológico que governa as mudanças em materiais tixotrópicos pode prover uma melhor compreensão do fenômeno e auxiliar na modelagem.

### 2.1.3.2 Abordagem Microestrutural Direta

Esse tipo de abordagem utiliza equações cinéticas para representar as mudanças estruturais e é baseado nas descrições das ligações entre as partículas ao longo do tempo. A densidade de ligações é controlada pelas condições de escoamento e também pelas constantes cinemáticas. As equações de balanço para as ligações são genericamente expressas pela Equação (2.1).

$$\frac{dn}{dt} = -C_1 n^a \dot{\gamma}^b + C_2 (n_0 - n)^c \dot{\gamma}^d \quad (2.1)$$

na qual  $n$  é o número de ligações da estrutura “virgem”,  $n_0$  é o número de ligações ativas (não-quebradas),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são os expoentes obtidos experimentalmente e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes arbitrárias. O primeiro termo à direita representa a parcela de quebra das ligações, já o segundo termo, a parcela de reestruturação. Equações desse tipo foram inicialmente formuladas por Goodeve (1939) e desde então tem sido utilizadas por diversos autores.

Fong *et al.* (1996) propuseram um modelo reológico para descrever o comportamento transiente e permanente da maionese e do iogurte. O modelo é baseado numa equação cinética que descreve a densidade de ligações estruturais pelos efeitos de *shear thinning*, *shear thickening* e comportamento tixotrópico. Para aumentar a precisão do modelo, a equação cinética é dependente de funções da taxa de cisalhamento que devem ser determinadas experimentalmente.

### 2.1.3.3 Abordagem Microestrutural Indireta

Na abordagem microestrutural indireta, um parâmetro estrutural é usado para quantificar o nível de estruturação do material. Essa abordagem é a mais utilizada em tixotropia, pois a estrutura é tratada de forma global, ou seja, não existe a necessidade de conhecer o funcionamento das ligações. O parâmetro estrutural ( $\lambda$ ) pode variar de zero quando o material está totalmente desestruturado ao valor unitário quando o gel está completamente estruturado.

Assim como na abordagem microestrutural direta, existe uma equação genérica de balanço para o parâmetro estrutural, a qual é denominada de equação cinética e representada pela Equação (2.2):

$$\frac{d\lambda}{dt} = -C_3 \lambda^e \dot{\gamma}^f + C_4 (1-\lambda)^g \dot{\gamma}^h \quad (2.2)$$

onde  $e$ ,  $f$ ,  $g$  e  $h$  são os expoentes obtidos experimentalmente e  $C_3$  e  $C_4$  constantes arbitrárias. A primeira parcela representa a desestruturação do material enquanto que a segunda parcela é responsável pela reestruturação.

O conceito de parâmetro estrutural foi introduzido por Moore (1959) *apud* Mujumdar *et al.* (2002) para explicar o comportamento do escoamento de pastas cerâmicas. Alguns anos depois, Cheng e Evans (1965) generalizaram o modelo proposto por Moore (1959) e desenvolveram condições para modelar tanto a tixotropia quanto a anti-tixotropia (reopexia).

Após ter sido realizada uma introdução e um breve histórico de modelos tixotrópicos que utilizam a abordagem microestrutural indireta, serão apresentadas revisões em ordem cronológica de mais modelos encontrados na literatura que se baseiam nessa abordagem.

### Modelos matemáticos

Zitny *et al.* (1980) propuseram um modelo para alimentos líquidos como: iogurte, sucos de fruta concentrados, maionese, gorduras emulsificadas concentradas, mostardas e leite condensado. Os autores modificaram o modelo reológico de Cheng e Evans (1965) para assumir uma forma útil e descrever diversos aspectos do comportamento tixotrópico. Por isso, assumiram que o material não pode se recuperar das deformações às quais é submetido. Dessa forma, o

comportamento elástico foi negligenciado. Os autores incluíram um termo de Lei de Potência e utilizaram uma equação diferencial que governa a evolução do parâmetro estrutural.

Coussot *et al.* (1993) apresentaram um modelo o qual foi comparado a dois sistemas de dispersão concentrados em matrizes de baixo peso molecular: graxa granular e uma mistura de plaquetas água-barro. Esse modelo é baseado em argumentos físicos e termodinâmicos para a microestrutura e considera o escoamento, as deformações elásticas, as rupturas e as recuperações dos flocos. Esse método foi desenvolvido para estudar o fenômeno tanto em regime permanente quanto em regime transiente. Um aspecto interessante desse modelo é que não são necessários critérios de limite de escoamento para descrever a transição líquido-gel. A equação constitutiva do modelo é composta de duas parcelas: elástica e viscosa. Já as evoluções temporais da tensão elástica e do parâmetro estrutural são representadas por equações diferenciais. Os autores afirmam ainda que foi observada uma boa concordância entre os resultados obtidos com o modelo teórico e aqueles advindos de experimentos.

Yziquiel *et al.* (1999) propuseram três modelos estruturais não lineares dependentes: da taxa de cisalhamento, da tensão e da energia. Cada um desses modelos utiliza um termo diferente para a parcela de destruição da equação de evolução do parâmetro estrutural. A comparação desses modelos com os resultados experimentais mostrou que o modelo com melhor resultado foi o dependente da energia.

Mujumdar *et al.* (2002) fizeram um levantamento dos diversos modelos de tixotropia presentes na literatura, tanto modelos fenomenológicos quanto microestruturais diretos e indiretos. Os autores também propuseram seu próprio modelo, baseado numa equação evolutiva, cuja parcela de destruição depende da taxa de cisalhamento  $\dot{\gamma}_+$ . Porém, o tratamento desse termo depende das direções da taxa de cisalhamento e da deformação elástica. Se tiverem o mesmo sentido, a parcela é considerada, caso contrário, é desprezada. A equação da tensão considera uma parte elástica e outra viscosa. A primeira possui uma equação diferencial para a deformação elástica, todavia mais simples que a equação de

Dullaert e Mewis (2006). Foram realizados testes experimentais para negro de fumo e os resultados representaram satisfatoriamente a região transiente.

Coussot *et al.* (2002) fizeram um estudo com o intuito de determinar as tensões limite de escoamento para sistemas com suspensões coloidais concentradas. Porém, observaram que, contrariamente aos fluidos ideais com tensão limite de escoamento, os sistemas analisados paravam de escoar abruptamente abaixo de uma tensão crítica e reinicializavam numa alta velocidade acima da tensão crítica, a qual aumentava com o tempo de repouso. Para elucidar as respostas obtidas, uma suspensão de bentonita foi submetida a uma série de testes reológicos. Os resultados mostraram que para tensão controlada, durante um tempo significativo de escoamento, ocorre um comportamento de bifurcação, ou seja, ou o escoamento é interrompido ou ocorre uma rápida quebra. Isso depende dos valores impostos e tensões críticas. Assim, os autores propuseram um modelo simples, com poucos parâmetros, o qual assume que a viscosidade do material é o resultado da concorrência entre envelhecimento e recuperação que são associados, respectivamente, à organização e desorganização da estrutura de interação de partículas. A equação de evolução do parâmetro estrutural é diferencial e depende do inverso do tempo característico, ou seja, representa a evolução espontânea da microestrutura. Por fim, os autores definem a viscosidade como função do parâmetro estrutural, porém não indicam qual é essa função.

Roussel *et al.* (2004) conduziram um estudo para testar uma suspensão de bentonita submetida a diversas condições, alegando que até aquele momento não havia na literatura um modelo tixotrópico, que tivesse sido testado em uma variedade de condições, capaz de avaliar propriedades tanto locais quanto macroscópicas. Para tanto, utilizam o modelo de Coussot *et al.* (2002), que é um modelo simples e capaz de descrever qualitativamente a bifurcação da viscosidade de pastas tixotrópicas. Os principais incrementos e resultados desse trabalho são: a definição de uma função para a viscosidade, a consistência global desse modelo em relação às características do escoamento e a dificuldade em prever detalhes do escoamento em condições ou tempos de observações muito diferentes.

Roussel (2006) se baseou em Coussot *et al.* (2002) e propôs um modelo mais genérico para fluido de concreto fresco. As principais diferenças são a adição de um

termo de Lei de Potência na equação constitutiva e a inserção do parâmetro estrutural multiplicando o tempo característico na equação de evolução do parâmetro estrutural. O autor afirmava que esse modelo mostrou concordância com as observações experimentais presentes na literatura e que as predições do modelo foram comparadas com sucesso com várias medições obtidas a partir de amostras de concreto em um reômetro.

O modelo de Dullaert e Mewis (2006) tem o objetivo de descrever o comportamento tixotrópico de sistemas baseados em suspensões de baixa elasticidade: sílica fumê e fuligem. A tensão de cisalhamento é dividida em parcelas elástica e viscosa que dependem da estrutura. A equação diferencial cinética do parâmetro estrutural considera os efeitos de quebra e recuperação da estrutura, além do efeito browniano na recuperação. A relaxação e deformação dos flocos também são incluídas através de uma equação diferencial. Ambas as equações diferenciais são dependentes do tempo e contém uma distribuição de constantes temporais. As predições do modelo são comparadas com os dados obtidos experimentalmente a partir de uma função objetivo na estimação dos parâmetros. As conclusões dos autores foram: o modelo é capaz de prever qualitativamente os valores de tensão em regime transiente para um teste com súbito aumento ou diminuição de taxa de cisalhamento, descreve com precisão os efeitos elásticos iniciais e concorda com os valores de regime permanente obtidos experimentalmente. Além disso, os autores sugerem que o modelo é fisicamente realístico e coerente.

Beris *et al.* (2008) apresentaram um modelo para sistemas que apresentam comportamento viscoplástico e tixotrópico. Os autores afirmam que um método consistente foi utilizado para desenvolver um modelo reológico com consideráveis vantagens em relação a modelos postulados anteriormente: a reologia básica é independente do tipo de escoamento, ao passo que os outros modelos normalmente são desenvolvidos apenas para escoamento por cisalhamento. Além do que, o modelo é baseado na equação constitutiva viscoelástica de Johnson-Segalman com um parâmetro adimensional de movimento. Esse parâmetro é considerado representativo da estrutura e das agregações entre as partículas do sistema. Quando a taxa de deformação aumenta, as agregações começam a ser destruídas

levando à descontinuidade na deformação viscoelástica uniforme. Isso é descrito fenomenologicamente no modelo pela variação do valor do parâmetro adimensional de movimento entre zero (para uma estrutura virgem) a um valor finito. A equação constitutiva é governada por uma parcela de contribuição viscoelástica e uma puramente viscosa, a qual é modelada pela Lei de Potência. Os resultados mostram concordância quantitativa com experimentos realizados para suspensões poliméricas, embora o modelo tenha apresentado oscilações para a predição da tensão de cisalhamento em regime transiente.

Jarny *et al.* (2008) repetiram o estudo realizado por Roussel *et al.* (2004), mas alteram o material em estudo para pastilha de cimento fresco. Os autores afirmaram que o modelo utilizado estava em concordância com os resultados experimentais.

Ardakani *et al.* (2011) observaram que o comportamento da pasta de dente apresenta tensão limite de escoamento e dependência temporal. Além de terem constatado um severo escorregamento na parede. Então, os autores propuseram um modelo que utiliza uma equação constitutiva com dois elementos. O primeiro termo representa a tensão limite de escoamento e o segundo inclui a parcela viscosa e é dependente do parâmetro estrutural. Portanto, esse modelo é viscoplástico e independe da parcela elástica, o que causou algumas discrepâncias do modelo em relação aos resultados experimentais. A equação de evolução do parâmetro estrutural é similar à de Moore (1959).

Mendes (2011) apresentou um modelo para fluidos estruturados com capacidade para prever os comportamentos tixotrópico, viscoelástico e o limite de escoamento. Esse é baseado num sistema com um amortecedor em paralelo a um conjunto mola-amortecedor em série. O modelo matemático é composto por duas equações diferenciais: uma para a tensão ou taxa de cisalhamento e outra para o parâmetro estrutural. A parcela de quebra da segunda equação é dependente do valor de regime permanente do parâmetro estrutural bem como da tensão e taxa de cisalhamento aplicadas ao fluido. Os tempos de relaxação e retardo são funções do parâmetro estrutural, assim como a viscosidade e o módulo elástico. O autor ainda realiza testes de taxa de cisalhamento constante, de tensão de cisalhamento constante e de oscilação, e a capacidade preditiva do modelo é muito boa em todos os casos.

Mendes e Thompson (2013) propuseram um modelo similar ao de Mendes (2011). A equação constitutiva para tensão ou taxa de cisalhamento é mantida. Porém, são realizadas algumas alterações significativas: a equação de evolução do parâmetro estrutural passa a depender apenas do parâmetro estrutural de equilíbrio e do completamente estruturado. As equações da viscosidade estrutural e do módulo elástico estrutural sofrem alterações e a influência do valor inicial do parâmetro estrutural sobre os resultados aumenta. Contudo, a principal mudança no modelo, que é diferente de todos os modelos desse tipo, é a variação do parâmetro estrutural de zero a um número positivo e normalmente grande. O limite inferior corresponde ao material totalmente desestruturado. Quando o limite superior é finito, o modelo apresenta um comportamento de *shear thinning*, tixotropia e viscoelasticidade que possui tensão limite de escoamento aparente. Quando esse limite tende a infinito, o comportamento de um material com tensão limite de escoamento verdadeira é alcançado. Esse modelo foi simulado para os testes de tensão controlada, taxa de cisalhamento controlado e LAOS (*Large Amplitude Oscillatory Shear*) e obteve uma grande concordância com o esperado por resultados experimentais.

Alexandrou *et al.* (2013) apresentaram um modelo viscoplástico estrutural para suspensões semi-sólidas. A equação constitutiva é baseada num fluido de Bingham com a tensão limite de escoamento sendo função do parâmetro estrutural. Através de uma equação diferencial obtém-se a evolução desse parâmetro.

## **Síntese do Capítulo 2**

Neste capítulo foram introduzidos conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, como a definição de tixotropia. Em seguida foi apresentado um histórico e métodos de quantificação do fenômeno de quebra de gel. Na sequência foram mostradas as diferentes abordagens para modelar um fluido tixotrópico. Por fim, foi apresentada uma revisão sobre os trabalhos publicados relacionados a modelos de tixotropia com abordagem microestrutural indireta, que posteriormente são utilizados para melhor compreensão do fenômeno e para ajuste aos dados experimentais.

No próximo capítulo são descritas as formulações matemáticas de alguns dos modelos apresentados neste capítulo juntamente com as respectivas equações de regime permanente.

### 3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Neste capítulo serão descritos alguns dos modelos com abordagem microestrutural indireta apresentados no capítulo anterior. Considera-se que existam três argumentos para justificar a escolha somente de modelos com esse tipo de abordagem: (a) a abordagem fenomenológica visa o ajuste direto da resposta do material; (b) a abordagem microestrutural direta faz muitas simplificações e existe a dificuldade de contabilizar as ligações; e (c) a existência de diversos modelos que utilizam a abordagem microestrutural indireta. As equações matemáticas que governam o fenômeno bem como os parâmetros necessários para descrever o comportamento de um fluido tixotrópico serão apresentadas para cada modelo.

Primeiramente, será apresentado o modelo de Moore (1959) que é base para diversos modelos microestruturais indiretos. Em seguida, os modelos de Zitny *et al.* (1980), Dullaert e Mewis (2006), Mendes (2011) e Mendes e Thompson (2013) serão descritos. Esses modelos foram selecionados, pois o primeiro é do tipo viscoplástico e tem como base a equação cinética do parâmetro estrutural de Moore (1959), o segundo é viscoelástico e possui equações diferenciais para representar a parcela elástica e o parâmetro estrutural, o terceiro é necessário para melhor compreender o quarto o qual apresenta maior potencial devido à variedade de testes que o autor afirma que o modelo pode simular. Além do que vários dos modelos são similares e os autores propõem apenas mudanças na equação constitutiva e na equação cinética. Maiores informações sobre o equacionamento dos outros modelos são encontradas no Apêndice A.

#### 3.1 Modelo de Moore (1959)

O modelo de Moore propõe a Equação (3.1) para a viscosidade.

$$\eta = \eta_0 + C_5 \lambda \quad (3.1)$$

onde  $\eta_0$  e  $C_5$  são, respectivamente, a viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula e uma constante arbitrária. Da definição de viscosidade aparente, tem-se:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.2)$$

Substituindo a Equação (3.1) na Equação (3.2):

$$\tau = (\eta_0 + C_5 \lambda) \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Portanto, a equação constitutiva tem duas parcelas, uma dependente e outra independente da estrutura. Isolando a taxa de cisalhamento na Equação (3.3):

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{(\eta_0 + C_5 \lambda)} \quad (3.4)$$

A equação de evolução temporal é um caso específico da Equação (2.2) na qual  $e = f = g = h = 1$  e pode ser representada por:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -C_3 \dot{\gamma} \lambda + C_4 (1 - \lambda) \quad (3.5)$$

onde  $C_3$  e  $C_4$  são constantes arbitrárias. Para obter o parâmetro estrutural em regime permanente,  $\lambda_{RP}$ , a partir dessa equação, basta fazer com que  $\frac{d\lambda}{dt} = 0$ , assim:

$$\lambda_{RP} = \frac{C_4}{C_3 \dot{\gamma}_{RP} + C_4} \quad (3.6)$$

Para obter a tensão em regime permanente,  $\tau_{RP}$ , é necessário substituir a Equação (3.6) na Equação (3.3), resultando em,

$$\tau_{RP} = \left( \eta_0 + C_5 \frac{C_4}{C_3 \dot{\gamma}_{RP} + C_4} \right) \dot{\gamma}_{RP} \quad (3.7)$$

Portanto, o modelo de Moore é representado por apenas quatro parâmetros:  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $\eta_0$  e  $C_5$ , que são obtidos na condição de equilíbrio.

### 3.2 Modelo de Zitny *et al.* (1980)

Esse modelo é composto de uma equação constitutiva (Equação (3.8)) na qual  $\tau_{y0}$ ,  $\tau_{y1}$ ,  $K_0$ ,  $K_1$  e  $m$  são, respectivamente, tensão limite de escoamento independente da tixotropia, tensão limite de escoamento dependente da tixotropia,

consistência do material dependente da tixotropia, consistência do material independente da tixotropia e índice da Lei de Potências.

$$\tau = \tau_{y0} + (\tau_{y1} + K_0 \dot{\gamma}^m) \lambda + K_1 \dot{\gamma}^m \quad (3.8)$$

Para obter a equação da taxa de cisalhamento como função da tensão e do parâmetro estrutural, basta isolá-la:

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{\tau - \tau_{y0} - \tau_{y1} \lambda}{K_0 \lambda + K_1} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.9)$$

A equação de evolução do parâmetro estrutural é representada pela Equação (3.10). Observa-se que essa é um caso específico da Equação (2.2) em que  $f = g = h = 1$ .

$$\frac{d\lambda}{dt} = -C_3 \dot{\gamma}^e \lambda + C_4 (1 - \lambda) \quad (3.10)$$

onde  $C_3$ ,  $C_4$  e  $e$  são constantes arbitrárias. Assim como para a Equação (2.2), a primeira parcela representa a destruição da estrutura do fluido e a segunda, a reestruturação. O valor do parâmetro estrutural em regime permanente é dado por:

$$\lambda_{RP} = \frac{C_4}{C_3 \dot{\gamma}_{RP}^e + C_4} \quad (3.11)$$

Quando esse valor é substituído na Equação (3.8), obtém-se o valor da tensão de regime permanente:

$$\tau_{RP} = \tau_{y0} + (\tau_{y1} + K_0 \dot{\gamma}_{RP}^m) \frac{C_4}{C_3 \dot{\gamma}_{RP}^e + C_4} + K_1 \dot{\gamma}_{RP}^m \quad (3.12)$$

Assim, o modelo de Zitny *et al.* (1980) possui oito parâmetros:  $\tau_{y0}$ ,  $\tau_{y1}$ ,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $m$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  e  $e$ , que dependem apenas da condição de equilíbrio.

### 3.3 Modelo de Dullaert e Mewis (2006)

A Equação (3.13) é a equação constitutiva do modelo na qual  $\gamma_e$ ,  $G_0$ ,  $\eta_{st,0}$  e  $\eta_\infty$  são, respectivamente, a deformação elástica do material, o módulo de elasticidade inicial, a viscosidade hidrodinâmica inicial e a viscosidade a uma taxa de

cisalhamento infinita. Os termos à direita da equação constitutiva representam, respectivamente, a parcela elástica, a parcela hidrodinâmica e a parcela viscosa.

$$\tau(\lambda, \dot{\gamma}) = \lambda G_0 \gamma_e(\lambda, \dot{\gamma}) + \lambda \eta_{st,0} \dot{\gamma} + \eta_\infty \dot{\gamma} \quad (3.13)$$

Isolando a taxa de cisalhamento, obtém-se:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau(\lambda, \dot{\gamma}) - \lambda G_0 \gamma_e(\lambda, \dot{\gamma})}{\lambda \eta_{st,0} + \eta_\infty} \quad (3.14)$$

A evolução temporal é representada através das equações diferenciais (3.15) e (3.16), as quais descrevem, respectivamente, o parâmetro estrutural e a deformação elástica em função do tempo.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \left( \frac{1}{t^\beta} \right) \left[ -C_8 \dot{\gamma} \lambda + C_9 \dot{\gamma}^{0.5} (1-\lambda) + C_{10} (1-\lambda) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{d\gamma_e}{dt} = \left( \frac{C_{11}}{t} \right)^\beta \left[ \tau(\lambda, \dot{\gamma}) \gamma_c - \tau_{RP}(\dot{\gamma}) \gamma_e \right] \quad (3.16)$$

onde  $C_8$ ,  $C_9$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  e  $\beta$  são constantes do modelo,  $\gamma_c$  é a deformação crítica e  $\tau_{RP}$  é a tensão de cisalhamento em regime permanente. O segundo e o terceiro termo em colchetes da Equação (3.15) representam a reestruturação, enquanto que o primeiro modela a destruição do fluido.

A Equação (3.16) pode ser reescrita sabendo que  $\gamma_e = \tau_y / G_0$  e  $\gamma_c = \tau_{y,RP} / G_0$ :

$$\frac{d\tau_y}{dt} = \left( \frac{C_{11}}{t} \right)^\beta \left[ \sigma(\lambda, \dot{\gamma}) \tau_{y,RP} - \sigma_{RP}(\dot{\gamma}) \tau_{y,el} \right] \quad (3.17)$$

onde  $\tau_{y,RP}$  é tensão limite de escoamento de equilíbrio. Para obter os valores em regime permanente, as derivadas temporais das Equações (3.15) e (3.17) são igualadas a zero. Assim:

$$\lambda_{RP} = \frac{C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}}{C_8 \dot{\gamma}_{RP} + C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}} \quad (3.18)$$

O valor da tensão de regime permanente é dado pela substituição do valor da Equação (3.18) na Equação (3.13):

$$\tau_{RP} = \frac{C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}}{C_8 \dot{\gamma}_{RP} + C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}} (\tau_{y,RP} + \eta_{st,0} \dot{\gamma}_{RP}) + \eta_{\infty} \dot{\gamma}_{RP} \quad (3.19)$$

Portanto, o modelo de Dullaert e Mewis (2006) possui oito parâmetros:  $\tau_{y,RP}$ ,  $\eta_{st,0}$ ,  $\eta_{\infty}$ ,  $C_8$ ,  $C_9$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  e  $\beta$ . Excluindo  $C_{11}$  e  $\beta$ , os demais parâmetros são todos obtidos na condição de equilíbrio.

### 3.4 Modelo de Mendes (2011)

A equação constitutiva do sistema (Equação (3.24)) é do tipo diferencial e pode ser resolvida tanto para a tensão quanto para a taxa de cisalhamento. Antes de resolvê-la é necessário resolver as Equações (3.20), (3.21), (3.22) e (3.23).

$$G_s(\lambda) = \frac{G_0}{\lambda^u} \quad (3.20)$$

$$\eta_v(\lambda) = \left( \frac{\eta_0}{\eta_{\infty}} \right)^{\lambda} \eta_{\infty} \quad (3.21)$$

$$\theta_1 = \left( 1 - \frac{\eta_{\infty}}{\eta_v} \right) \frac{\eta_v}{G_s} \quad (3.22)$$

$$\theta_2 = \left( 1 - \frac{\eta_{\infty}}{\eta_v} \right) \frac{\eta_{\infty}}{G_s} \quad (3.23)$$

$$\tau + \theta_1 \dot{\tau} = \eta_v (\dot{\gamma} + \theta_2 \ddot{\gamma}) \quad (3.24)$$

onde  $G_s$ ,  $\eta_v$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $G_0$ ,  $\eta_0$  e  $\eta_{\infty}$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade dependente da tixotropia, a viscosidade dependente da tixotropia, o tempo de relaxação, o tempo de retardo, o módulo de elasticidade inicial, a viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula e a viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita,  $u$  é uma constante arbitrária do sistema.

Para resolver a Equação (3.27) de evolução temporal do parâmetro estrutural é preciso resolver o conjunto de Equações (3.25) e (3.26). Nas quais  $t_{eq}$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_{0d}$  e  $\dot{\gamma}_{0d}$  são, respectivamente, o tempo de equilíbrio característico do material, a tensão limite de escoamento estática, a tensão limite de escoamento dinâmica e a taxa de

cisalhamento que marca a transição entre  $\tau_0$  e  $\tau_{0d}$ ;  $K_4$ ,  $\nu$ ,  $x$ ,  $w$  e  $y$  são constantes arbitrárias do sistema.

$$\eta_{RP} = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\tau_0}\right) \right] \left\{ \frac{\tau_0 - \tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}_{RP}}{\dot{\gamma}_{0d}}\right) + \frac{\tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} + K_4 \dot{\gamma}_{RP}^{y-1} \right\} + \eta_\infty \quad (3.25)$$

$$\lambda_{RP} = \left( \frac{\ln \eta_{RP} - \ln \eta_\infty}{\ln \eta_0 - \ln \eta_\infty} \right) \quad (3.26)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ (1-\lambda)^v - (1-\lambda_{RP})^v \left( \frac{\lambda}{\lambda_{RP}} \right)^x \left( \frac{\tau}{\eta_v \dot{\gamma}} \right)^w \right] \quad (3.27)$$

Substituindo a Equação (3.25) na Equação (3.2), obtém-se a Equação (3.28) para a tensão de regime permanente.

$$\tau_{RP} = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\tau_0}\right) \right] \left\{ \frac{\tau_0 - \tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}_{RP}}{\dot{\gamma}_{0d}}\right) + \frac{\tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} + K_4 \dot{\gamma}_{RP}^{y-1} \right\} \dot{\gamma}_{RP} + \eta_\infty \dot{\gamma}_{RP} \quad (3.28)$$

Portanto, o modelo de Mendes (2011) é mais complexo quando comparado aos outros e possui 13 parâmetros:  $G_0$ ,  $\eta_0$ ,  $\eta_\infty$ ,  $t_{eq}$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_{0d}$ ,  $\dot{\gamma}_{0d}$ ,  $K_4$ ,  $u$ ,  $\nu$ ,  $x$ ,  $w$  e  $y$ , dos quais  $t_{eq}$ ,  $u$ ,  $\nu$ ,  $x$ ,  $w$  e  $G_0$  dependem da condição de equilíbrio.

### 3.5 Modelo de Mendes e Thompson (2013)

Os autores propuseram um modelo similar ao de Mendes (2011), mas com pontuais diferenças que alteram de forma significativa o resultado. A equação constitutiva é a mesma (Equação (3.24)), assim como as equações para  $\theta_1$  e  $\theta_2$  (Equações (3.22) e (3.23)). Porém, o módulo de elasticidade estrutural e a viscosidade estrutural foram modificados para as seguintes expressões:

$$G_s(\lambda) = G_0 \exp \left[ C_{13} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \right] \quad (3.29)$$

$$\eta_v(\lambda) = \eta_\infty \exp(\lambda) \quad (3.30)$$

onde  $G_s$ ,  $\eta_v$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $G_0$ ,  $C_{13}$  e  $\lambda_0$ , são respectivamente, o módulo de elasticidade dependente da tixotropia, a viscosidade dependente da tixotropia, o tempo de

relaxação, o tempo de retardo, o módulo de elasticidade inicial, uma constante arbitrária do sistema e o parâmetro estrutural completamente estruturado, dado pela Equação (3.31).

$$\lambda_0 = \ln\left(\frac{\eta_0}{\eta_\infty}\right) \quad (3.31)$$

A equação para a viscosidade em regime permanente continua a mesma (Equação (3.25)), porém, o parâmetro estrutural em equilíbrio passa a ser governado por:

$$\lambda_{RP} = \ln\left(\frac{\eta_{RP}}{\eta_\infty}\right) \quad (3.32)$$

Além disso, a equação de evolução do parâmetro estrutural é modificada para:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^v - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{RP}} \right)^x \left( \frac{1}{\lambda_{RP}} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^v \right] \quad (3.33)$$

onde  $t_{eq}$  é o tempo característico e  $v$  e  $x$  são constantes arbitrárias do sistema iguais a do modelo de Mendes (2011).

A tensão em regime permanente é dada pela Equação (3.28).

Porém, nesse modelo o parâmetro estrutural varia de zero (material completamente desestruturado) até um valor fixo que pode ser superior à unidade (material totalmente estruturado). Assim, o valor inicial desse parâmetro também pode ser considerado como uma constante do sistema,  $\lambda(t=0)$ .

Dessa forma, o modelo de Mendes e Thompson (2013) possui 13 parâmetros:  $G_0$ ,  $\eta_0$ ,  $\eta_\infty$ ,  $t_{eq}$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_{0d}$ ,  $\dot{\gamma}_{0d}$ ,  $K_4$ ,  $C_{13}$ ,  $v$ ,  $x$ ,  $y$  e  $\lambda(t=0)$ , no qual  $C_{13}$ ,  $v$ ,  $x$ ,  $\lambda(t=0)$ ,  $t_{eq}$  e  $G_0$  são as constantes que não dependem do equilíbrio.

### Síntese do Capítulo 3

Neste capítulo foram apresentadas as equações constitutivas, cinéticas e de equilíbrio para os modelos de Moore (1959), Mendes (2011), Zitny *et al.* (1980),

Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013). As principais equações são expostas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Equações cinética, constitutiva e elástica para os modelos do Capítulo 3.**

Modelo	Tipo de Equação	Equação do modelo	Número da equação
Moore (1959)	Constitutiva	$\tau = (\eta_0 + C_5 \lambda) \dot{\gamma}$	(3.1)
	Cinética	$\frac{d\lambda}{dt} = -C_3 \dot{\gamma} \lambda + C_4 (1 - \lambda)$	(3.5)
Zitny <i>et al.</i> (1980)	Constitutiva	$\tau = \tau_{y0} + (\tau_{y1} + K_0 \dot{\gamma}^m) \lambda + K_1 \dot{\gamma}^m$	(3.8)
	Cinética	$\frac{d\lambda}{dt} = -C_3 \dot{\gamma}^e \lambda + C_4 (1 - \lambda)$	(3.10)
Dullaert e Mewis (2006)	Constitutiva	$\tau(\lambda, \dot{\gamma}) = \lambda G_0 \gamma_e(\lambda, \dot{\gamma}) + \lambda \eta_{st,0} \dot{\gamma} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	(3.13)
	Cinética	$\frac{d\lambda}{dt} = \left(\frac{1}{t^\beta}\right) [-C_8 \dot{\gamma} \lambda + C_9 \dot{\gamma}^{0.5} (1 - \lambda) + C_{10} (1 - \lambda)]$	(3.15)
	Elástica	$\frac{d\tau_y}{dt} = \left(\frac{C_{11}}{t}\right)^\beta [\sigma(\lambda, \dot{\gamma}) \tau_{y,RP} - \sigma_{RP}(\dot{\gamma}) \tau_{y,el}]$	(3.16)
Mendes (2011)	Constitutiva	$\tau + \theta_1 \dot{\tau} = \eta_v (\dot{\gamma} + \theta_2 \ddot{\gamma})$	(3.24)
	Cinética	$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ (1 - \lambda)^v - (1 - \lambda_{RP})^v \left(\frac{\lambda}{\lambda_{RP}}\right)^x \left(\frac{\tau}{\eta_v \dot{\gamma}}\right)^w \right]$	(3.27)
Mendes e Thompson (2013)	Constitutiva	$\tau + \theta_1 \dot{\tau} = \eta_v (\dot{\gamma} + \theta_2 \ddot{\gamma})$	(3.24)
	Cinética	$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)^v - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{RP}}\right)^x \left(\frac{1}{\lambda_{RP}} - \frac{1}{\lambda_0}\right)^v \right]$	(3.33)

No próximo capítulo é apresentada a modelagem computacional implementada para resolver o problema. Em seguida, são apresentados os testes reológicos utilizados no trabalho. Por fim, alguns modelos selecionados são ajustados e comparados aos resultados experimentais.

## 4 AJUSTE DOS MODELOS

Os modelos de Zitny *et al.* (1980), Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson(2013) foram apresentados nos capítulos anteriores. Este capítulo se ocupa em verificar se os resultados dos modelos são condizentes com o comportamento tixotrópico de um fluido de perfuração. O capítulo está dividido em quatro partes. A primeira tem por objetivo apresentar a lógica empregada para desenvolver os códigos de ajuste. Na segunda são apresentados os testes reológicos utilizados para analisar, ajustar e validar os modelos. A terceira mostra os resultados obtidos em laboratório para testes com controle de taxa de cisalhamento. A quarta tem por finalidade apresentar os resultados obtidos após os ajustes dos parâmetros aos dados experimentais.

### 4.1 Modelagem computacional

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software Matlab. Esta seção tem como objetivo explicar a lógica empregada através de fluxogramas, mostrar as diferentes formas de resolução de equações pelo programa, assim como indicar os critérios para a seleção ou não dessas funções.

A Figura 6 ilustra a divisão do programa. Pela existência de dois objetivos gerais nesse projeto: simulação e ajuste, dois subprogramas (simular e ajustar) são responsáveis por cada uma dessas partes. Esses subprogramas possuem sub-rotinas comuns que são os modelos dos diferentes autores. As sub-rotinas do tipo “Modelo” foram desenvolvidas para rodarem no modo de simulação ou de ajuste.

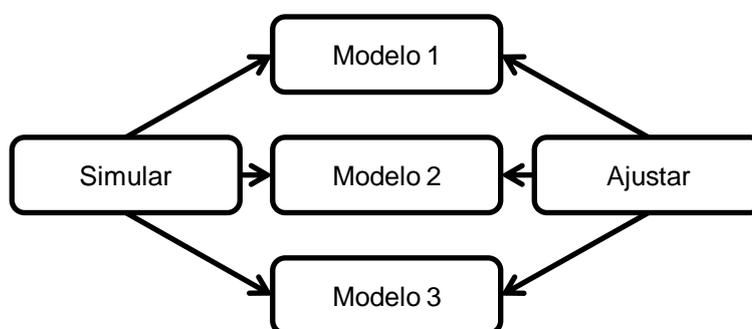


Figura 6 – Fluxograma do programa.

#### 4.1.1 Simular

O fluxograma da Figura 7 ilustra a forma como o código “Simular” foi desenvolvido. Primeiro, é selecionado o modelo, em seguida é escolhido o tipo de teste:

- 1) Rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento;
- 2) Patamar de taxa de cisalhamento;
- 3) Rampa de tensão de cisalhamento;
- 4) Patamar de tensão de cisalhamento.

Então, para os Testes de Tipo 1 e 2 é inserida a taxa de cisalhamento final, ao passo que os Testes do Tipo 3 e 4 são fixados, respectivamente, a taxa de tensão de cisalhamento e a tensão de cisalhamento final. Vale ressaltar que para todos os testes podem ser inseridos mais de um valor. Assim o número de valores representará a quantidade de curvas resultantes.

Em seguida, os valores para os parâmetros de entrada são inseridos:

- a)  $\Delta t$ , passo de tempo;
- b)  $\dot{\gamma}_i$  (Teste Tipo 1 e 2) ou  $\tau_i$  (Teste Tipo 3 e 4), valores iniciais para a taxa de cisalhamento ou tensão de cisalhamento, habitualmente assumem o valor zero;
- c)  $t_{rampa}$ , tempo de rampa somente para o Teste 1;
- d)  $t_{max}$ , tempo final da simulação;
- e)  $t_{min}$ , tempo inicial da simulação.

Posteriormente, os parâmetros para o modelo são fornecidos. Em seguida, a sub-rotina correspondente ao modelo é executada. Finalmente, os resultados são gerados em forma de gráfico e os valores numéricos obtidos são salvos em um arquivo de saída.

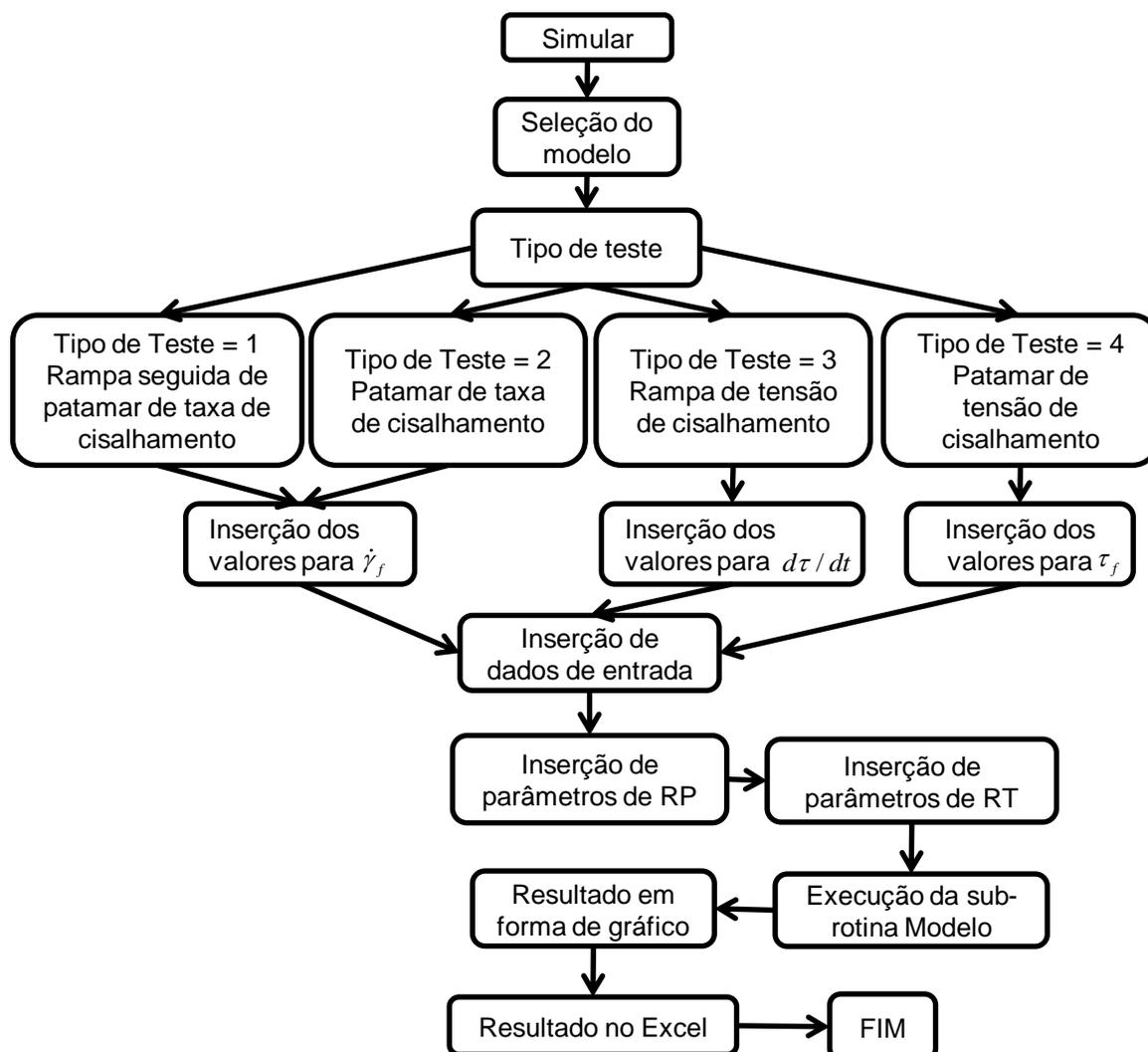


Figura 7 – Fluxograma do subprograma “Simular”.

#### 4.1.2 Modelo

A seguir será descrita a sub-rotina do programa “Modelo” que é comum a todos os modelos, a diferença está apenas nas equações empregadas que estão associadas ao modelo correspondente. Por estar na seção de simulação, parte-se da hipótese que o programa está com os dados de entrada para “Simular”.

A Figura 8 ilustra a lógica dos programas para cada modelo. Primeiramente, os dados de entrada são lidos:

- a) Tipo de teste;
- b)  $\dot{\gamma}_f$  (Teste Tipo 1 e 2),  $d\tau/dt$  (Teste Tipo 3) ou  $\tau_f$  (Teste Tipo 4), valores, respectivamente, para taxa de cisalhamento final, variação da tensão com o tempo ou tensão de cisalhamento final;

- c) Parâmetros do modelo;
- d)  $t_{rampa}$ , tempo de rampa somente para o Teste 1;
- e)  $t_{max}$ , tempo final da simulação;
- f)  $t_{min}$ , tempo inicial da simulação;
- g)  $\Delta t$ , passo de tempo.

Em seguida, a escala de tempo é criada a partir do passo de tempo e dos tempos inicial e final de simulação. Então as condições do teste são definidas, seja pela criação de um vetor de taxa de cisalhamento ou de tensão de cisalhamento. Depois, são lidas as informações de condição inicial que podem ser:

- a) Tensão de cisalhamento inicial nula ( $\tau_i = 0$ );
- b) Parâmetro estrutural igual à unidade ( $\lambda_i = 1$ ), exceto para os modelos Beris *et al.* (2008) e Mendes e Thompson (2013) cujos valores iniciais são, respectivamente,  $\xi_i = 0$  e  $\lambda_i = \lambda(t=0)$ ;
- c) Tensão elástica inicial nula ( $\sigma_{el,i} = 0$ );
- d) Taxa de cisalhamento inicial nula ( $\dot{\gamma}_i = 0$ );
- e) Deformação elástica inicial nula ( $\gamma_{el,i} = 0$ ).

Posteriormente, é chamada a função que resolve o conjunto de equações diferenciais. Devido à importância dessa resolução, um tópico adiante abordará essas funções. Finalmente, ocorre a solução numérica e resultados para as seguintes variáveis são obtidas:  $t$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_{el}$ ,  $\gamma$  e  $\dot{\gamma}$  sendo esses, respectivamente, o tempo, o parâmetro estrutural, a tensão de cisalhamento, a tensão elástica, a deformação e a taxa de cisalhamento. Informações sobre a resolução de equações diferenciais aparecem no Apêndice B.

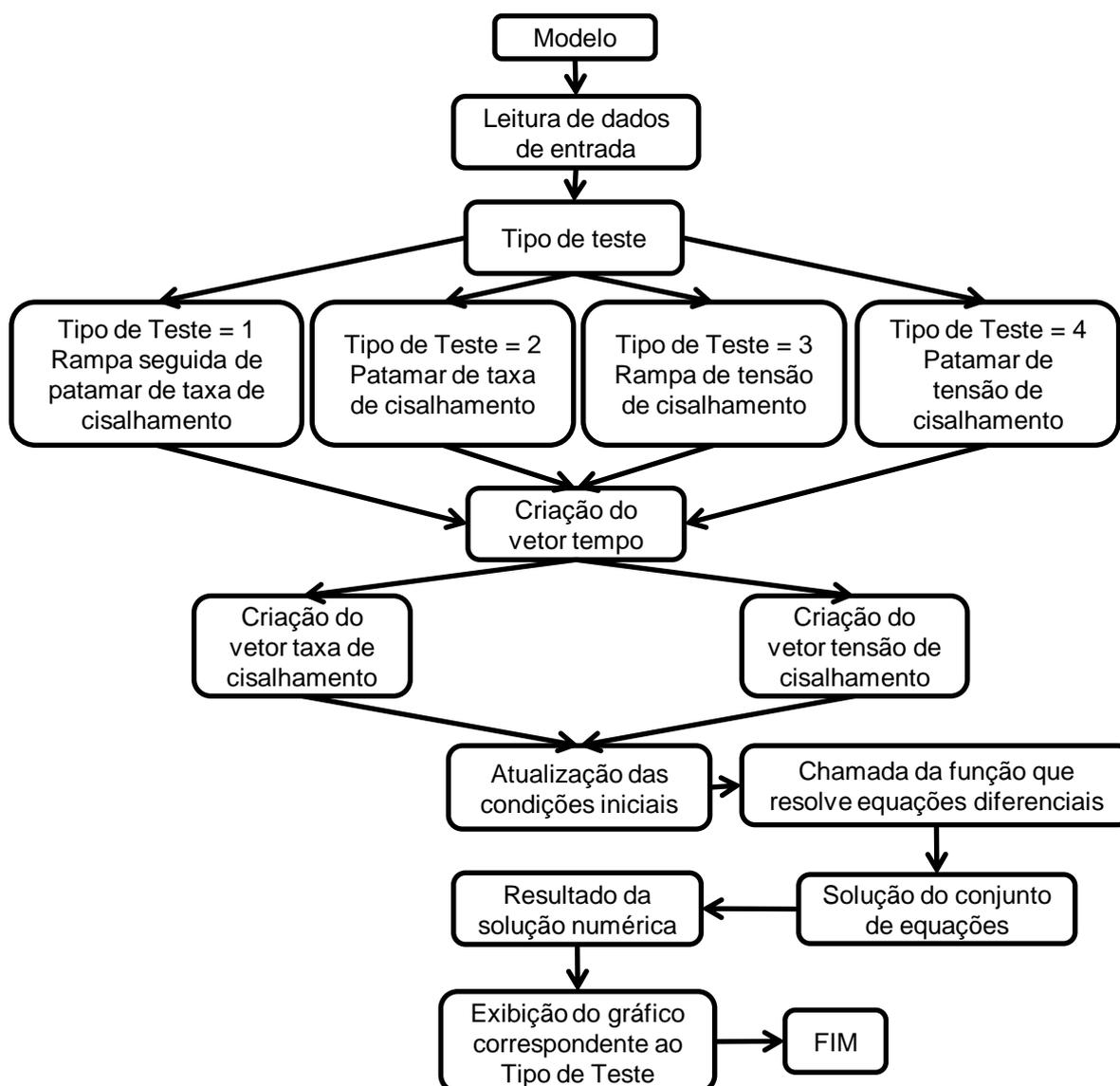


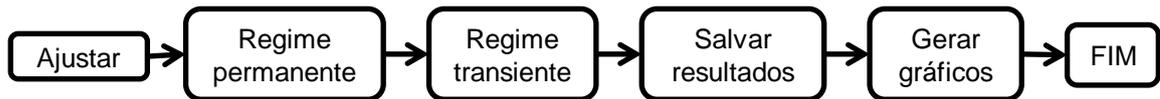
Figura 8 – Fluxograma do subprograma “Modelar”.

#### 4.1.3 Ajustar

O ajuste pode ser realizado de duas maneiras: testes em regime transiente e testes em regime permanente. A primeira forma consiste, basicamente, na utilização das curvas experimentais obtidas nos Testes Tipo 1, 3 e 4. Com qualquer um desses seria possível à obtenção dos parâmetros do modelo, porém o teste selecionado foi o Tipo 1, no qual é imposta uma rampa seguida de um patamar de taxa de cisalhamento. Para o ajuste em regime permanente, são necessários os valores em equilíbrio da tensão e da taxa de cisalhamento. A curva que mostra essas duas variáveis é conhecida como curva de escoamento. Os valores de tensão em função

da taxa de cisalhamento são provenientes da condição de equilíbrio obtidas de Testes do Tipo 1.

O programa ajustar segue a linha proposta pelo fluxograma da Figura 9. Porém, conforme for o caso, as etapas de regime permanente ou regime transiente podem ser ignoradas sem prejuízos ao programa.



**Figura 9 – Fluxograma do programa “Ajustar”.**

Os códigos para ajustar os regimes permanente e transiente, abordados na sequência são distintos e fica evidente a diferença entre a complexidade que as duas abordagens apresentam. O primeiro é um simples ajuste de uma única equação algébrica ao passo que o segundo envolve a resolução de sistemas de equações diferenciais.

Para um modelo existem duas possibilidades de ajuste:

- 1) Somente o regime permanente;
- 2) Regime permanente seguido de regime transiente.

O primeiro caso normalmente ocorre quando todos os parâmetros do modelo podem ser ajustados com o regime permanente. O que não é bom, pois uma calibração com dados de equilíbrio pode não representar bem o comportamento transiente do material. O segundo caso é o mais desejável, pois alguns dos parâmetros são calibrados em um ajuste mais simples (em regime permanente) enquanto que uma quantidade menor de constantes deve ser ajustada em regime transiente. Por isso, o custo computacional envolvido na calibração do modelo é reduzido.

#### **4.1.3.1 Regime permanente**

O ajuste em regime permanente consiste na resolução de uma equação da curva de escoamento como a Equação (4.1), na qual  $\tau_{RP}$ ,  $\dot{\gamma}_{RP}$ ,  $x_1$  até  $x_n$  são,

respectivamente, a tensão de regime permanente, a taxa de cisalhamento de regime permanente e os parâmetros do modelo em regime permanente.

$$\tau_{RP} = \tau_{RP}(\dot{\gamma}_{RP}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

Para ajustar os modelos aos dados experimentais, foi selecionado o método dos mínimos quadrados, representado pela Equação (4.2). Os parâmetros são ajustados de maneira a satisfazer o critério da mínima soma do quadrado da diferença entre os valores de tensão de cisalhamento medidos experimentalmente e os calculados pelo modelo:

$$S = \sum_{j=1}^M (\tau_{RP,exp,j} - \tau_{RP,mod,j})^2 \quad (4.2)$$

onde  $S$  é a função soma do método dos mínimos quadrados, os subscritos  $exp$  e  $mod$  representam o valor da grandeza experimental e do modelo. O índice  $j$  indica um valor medido, que varia de 1 a  $M$ .

A função é minimizada de forma a respeitar a Equação (4.3), ou seja, a derivada da função soma em relação à cada um dos parâmetros deve ser igual a zero.

$$\min \{S\} \longrightarrow \frac{\partial S}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial S}{\partial x_2} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial x_n} = 0 \quad (4.3)$$

Como a equação resultante para o ajuste é do tipo não linear, uma pluralidade de soluções pode ser possível e o mínimo encontrado pode ser local e não global. Várias estimativas iniciais para os parâmetros foram efetuados de forma a garantir o menor resíduo.

#### 4.1.3.2 Regime transiente

O ajuste em regime transiente é mais complexo que em regime permanente, pois consiste na resolução de um conjunto de equações diferenciais de forma a obter a tensão em função do tempo, conforme mostra a Equação (4.4). Essa equação ilustra a dependência da tensão em relação ao tempo ( $t$ ), à taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), ao parâmetro estrutural ( $\lambda$ ), à tensão elástica ( $\sigma_{el}$ ) e aos parâmetros do modelo ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ).

$$\tau = \tau(t, \dot{\gamma}(t), \lambda(t), \sigma_{el}(t), x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.4)$$

O parâmetro estrutural e a tensão elástica, quando presentes nos modelos são obtidos pela resolução de equações diferenciais.

Assim como para o regime permanente, o ajuste é realizado através do método dos mínimos quadrados, Equação (4.5) e respeitando os critérios da Equação (4.3). A grande diferença é que para cada iteração é necessário resolver um conjunto de equações diferenciais, ao passo que anteriormente resolvia-se um conjunto de equações algébricas. Isso aumenta o tempo computacional e a não linearidade do problema, o que acarreta uma maior dificuldade para encontrar o mínimo global.

$$S = \sum_{j=1}^M (\tau_{\text{exp},j} - \tau_{\text{mod},j})^2 \quad (4.5)$$

## 4.2 Testes reológicos

Os testes reológicos são importantes para compreender o fenômeno de tixotropia. Além do que, um modelo que se proponha a representar o fenômeno deve ser capaz de reproduzir diversos experimentos. A seguir, cada um dos quatro tipos de testes utilizados no trabalho é apresentado.

### 4.2.1 Rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento – Teste Tipo 1

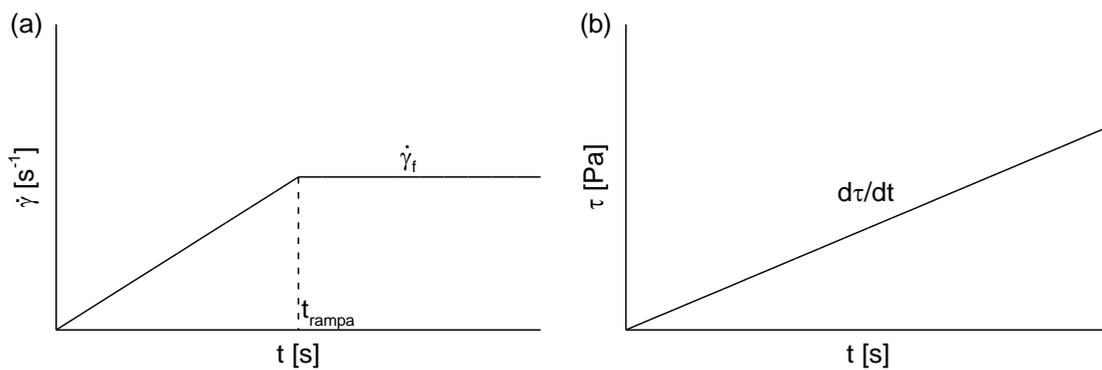
Esse teste é ilustrado pela Figura 10(a) e para referências futuras será nomeado Teste Tipo 1. Entre os instantes zero e  $t_{\text{rampa}}$ , pode-se observar a imposição de uma rampa crescente de taxa de cisalhamento cujo valor é dado pela Equação (4.6).

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{t}{t_{\text{rampa}}} \dot{\gamma}_f \quad (4.6)$$

onde  $t$  é o tempo instantâneo durante os testes reológicos.

O valor do tempo de rampa final deve ser escolhido para garantir que o pico da tensão de cisalhamento durante o reinício do escoamento seja capturado. Deve-se observar que após a rampa é realizado um patamar de taxa de cisalhamento,  $\dot{\gamma}_f$ ,

o qual perdura até o final do teste. Idealmente, o tempo de rampa deve ser de 0s para representar o teste de patamar de taxa de cisalhamento. Porém, na prática, com esse valor não é possível captar a quebra do gel, pois o controle do reômetro não é perfeito e por limitações físicas do aparelho. O tempo de rampa utilizado foi de 5s para garantir, em todos os casos, a visualização do pico de tensão.



**Figura 10 – Testes: (a) Tipo 1 (rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento) e (b) Tipo 3 (rampa de tensão).**

#### 4.2.2 Patamar de taxa de cisalhamento – Teste Tipo 2

O Teste de Tipo 2 é um caso particular do Teste de Tipo 1 no qual o tempo de rampa assume o valor nulo. Assim, observa-se a presença de um patamar de taxa de cisalhamento,  $\dot{\gamma}$ , a qual é constante durante todo o teste.

#### 4.2.3 Rampa de tensão de cisalhamento – Teste Tipo 3

Esse teste é ilustrado pela Figura 10(b) e é denominado Teste Tipo 3. Trata-se de um teste com tensão controlada no qual a tensão vai crescendo linearmente, a uma taxa de crescimento constante,  $d\tau/dt$ , durante a execução do teste. A tensão instantânea é dada pela Equação (4.7).

$$\tau(t) = \frac{d\tau}{dt} t \quad (4.7)$$

#### 4.2.4 Patamar de tensão de cisalhamento – Teste Tipo 4

Esse é o Teste Tipo 4 no qual um patamar de tensão de cisalhamento,  $\tau$ , que perdura a totalidade do teste é aplicado no fluido testado.

### 4.3 Resultados Experimentais

Foram realizados testes de rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento (Teste Tipo 1), patamar de tensão de cisalhamento (Teste Tipo 4) e rampa de tensão de cisalhamento (Teste Tipo 3) para o fluido de perfuração BRMUL117. Os testes foram realizados no laboratório de Reologia do LACIT na UTFPR, utilizando um reômetro HAAKE MARS III com um sensor placa de 35 mm de diâmetro, com superfície jateada e com *gap* de medição de 1 mm. Os testes foram realizados à pressão atmosférica e temperatura de 25°C.

Esta seção apresenta os resultados para Testes Tipo 1, os demais serão exibidos no Capítulo 5.

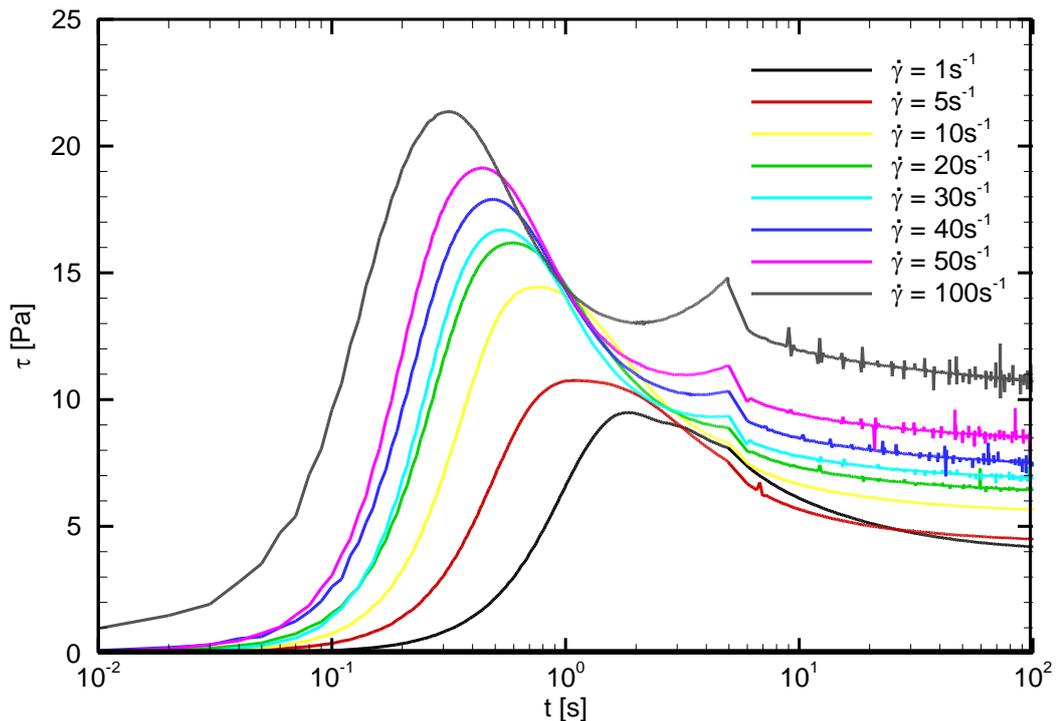
Como o fluido de perfuração BRMUL117 possui características tixotrópicas, antes de todos os testes foi realizado um procedimento com o objetivo de igualar o histórico de cisalhamento entre as amostras. O procedimento de pré-testes, desenvolvido pelo LACIT, segue as seguintes etapas:

- 1) Agitação do fluido de perfuração com um *mixer* por um minuto;
- 2) Repouso durante cinco minutos;
- 3) Deposição da amostra no reômetro com utilização de uma espátula;
- 4) Controle térmico por um período de cinco minutos;
- 5) Pré-cisalhamento a  $1000 \text{ s}^{-1}$  durante cinco minutos;
- 6) Controle térmico por cinco minutos.

#### 4.3.1 Resultados dos Testes Tipo 1

Conforme mostra a Figura 10(a), os testes experimentais foram realizados para as taxas de cisalhamento  $\dot{\gamma}_f = 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50$  e  $100 \text{ s}^{-1}$  e para um tempo de rampa  $t_{rampa} = 5\text{s}$ . Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 11. Nota-se que o eixo das abscissas apresenta o tempo em escala logarítmica, variando de 0,01 a 100s. Para todas as taxas de cisalhamento, é observado um aumento de tensão até um valor máximo. Esse pico de tensão indica que ocorreu a quebra do gel da estrutura e que a partir de então os efeitos viscosos passam a ser dominantes no escoamento. Um segundo pico de tensão ocorre devido às

características do teste, o instante desse pico coincide com o fim da rampa e o início do patamar. Como a taxa de cisalhamento imposta ao material passa a ter um valor constante, o material tende a uma condição de equilíbrio. Ao final do teste, a tensão fica constante, pois o estado de regime permanente foi alcançado. Ainda é possível notar que quanto maior a taxa de cisalhamento final, maior o pico e o valor de equilíbrio da tensão e mais rapidamente acontece a quebra (pico de tensão).



**Figura 11 – Resultados dos Testes Tipo 1, a tensão em função do tempo para diversas taxas de cisalhamento.**

#### 4.3.2 Curva de escoamento

A partir dos valores de tensão de equilíbrio obtidos no Teste Tipo 1 (Figura 11) foi traçada a curva de escoamento, conforme apresentado na Figura 12. Nota-se que a faixa de variação da taxa de cisalhamento de  $1$  a  $100\text{ s}^{-1}$  não é muito grande, o que diminui a precisão do ajuste em regime permanente, mas não impede que seja realizado.

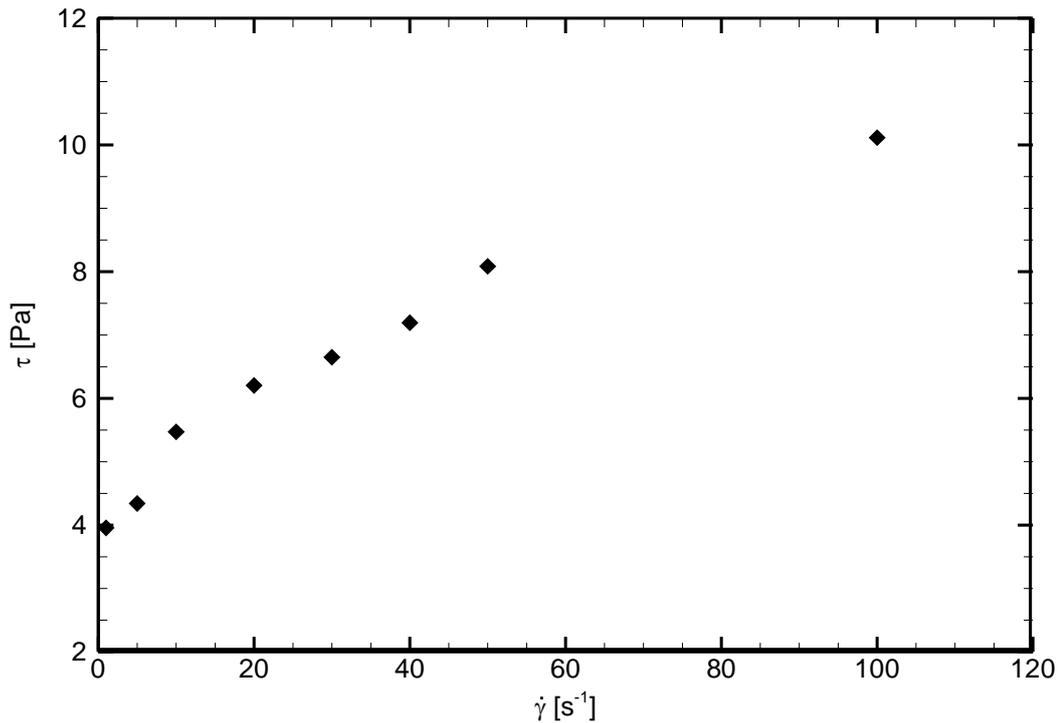


Figura 12 – Curva de escoamento advinda de resultados experimentais.

#### 4.4 Ajustes

Nessa seção os modelos Zitny *et al.* (1980), Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013) são ajustados com base nos resultados experimentais do Teste Tipo 1.

##### 4.4.1 Modelo de Zitny *et al.* (1980)

Esse modelo possui oito parâmetros que podem ser ajustados com a curva de escoamento (obtida a partir das tensões de equilíbrio) como evidencia a Equação (3.12), reescrita na presente seção para facilitar o entendimento do trabalho:

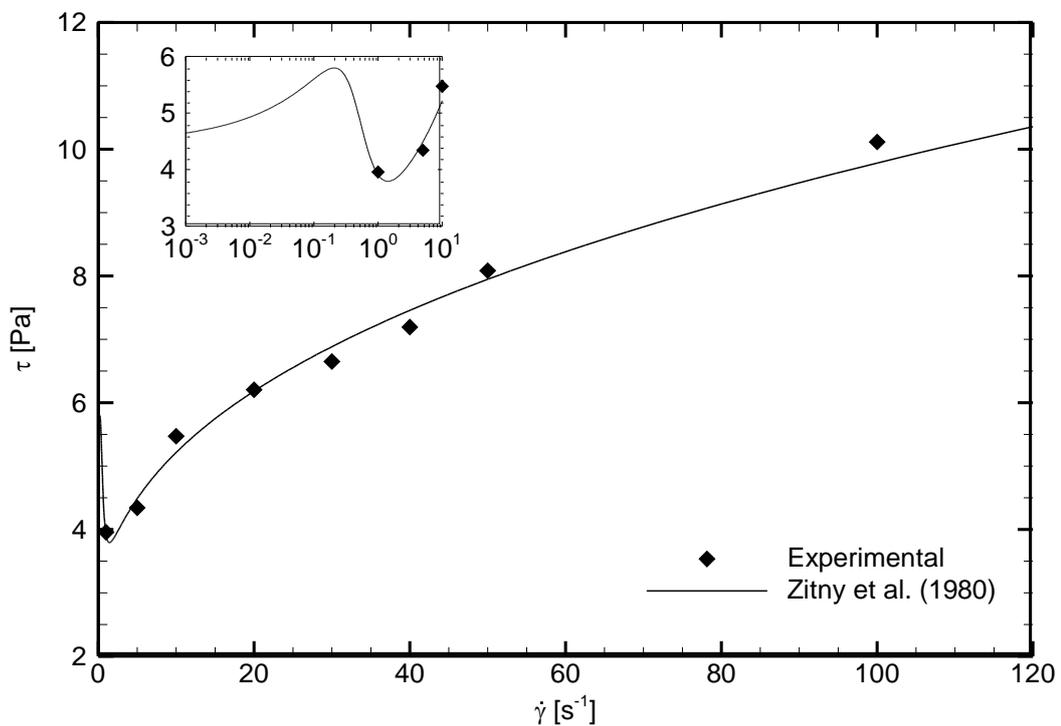
$$\tau_{RP} = \tau_{y0} + \left( \tau_{y1} + K_0 \dot{\gamma}_{RP}^m \right) \frac{C_4}{C_3 \dot{\gamma}_{RP}^e + C_4} + K_1 \dot{\gamma}_{RP}^m \quad (3.12)$$

Através da metodologia descrita anteriormente, o regime permanente foi ajustado e os parâmetros resultantes aparecem na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Zitny *et al.* (1980).

$\tau_{y0}$ [Pa]	$\tau_{y1}$ [Pa]	$K_0$ [Pa.s <sup>m</sup> ]	$K_1$ [Pa.s <sup>m</sup> ]	$m$ [-]	$C_3$ [s <sup>e-1</sup> ]	$C_4$ [s <sup>-1</sup> ]	$e$ [-]
2,16	2,30	1,10	1,22	0,40	3,98	0,603	2,84

A Figura 13 mostra a curva de escoamento calculada com os parâmetros do modelo e os pontos experimentais. Conforme apresentado na Tabela 3, a maior diferença obtida foi inferior a 5% para a taxa de cisalhamento de  $10\text{s}^{-1}$ , sendo que todas as diferenças do trabalho foram calculadas conforme a Equação (4.8). Porém, como mostra o detalhe da Figura 13, para baixas taxas de cisalhamento o modelo ajustado apresenta resultados não condizentes com o esperado. A tendência é que para taxas de cisalhamento menores que 1 a tensão de equilíbrio seja menor 4Pa e que haja um patamar devido a tensão limite de escoamento dinâmica.



**Figura 13 – Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada para o modelo de Zitny *et al.* (1980).**

$$diferença = \left( 1 - \frac{\phi_{calc}}{\phi_{exp}} \right) \times 100\% \quad (4.8)$$

onde  $\phi$  representa uma variável genérica e os subscritos *exp* e *calc* representam, respectivamente, os valores experimental e calculado.

**Tabela 3 – Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Zitny *et al.* (1980).**

Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Tensão Experimental [Pa]	Tensão Calculada [Pa]	Diferença [%]
1	3,96	3,91	1,2%
5	4,34	4,49	-3,4%
10	5,47	5,22	4,7%
20	6,20	6,18	0,4%
30	6,65	6,88	-3,5%
40	7,19	7,46	-3,7%
50	8,08	7,95	1,7%
100	10,11	9,78	3,3%

Como o modelo de Zitny *et al.* (1980) possui oito parâmetros e todos podem ser ajustados no regime permanente, não há necessidade de realizar o ajuste em regime transiente. Porém, isso representa uma grande incoerência do modelo, pois materiais diferentes (portanto com parâmetros distintos) que apresentem a mesma resposta em regime permanente podem não se comportar de maneira idêntica no transiente. Ou seja, não é possível conhecer o comportamento transiente apenas pelo ajuste dos parâmetros em regime permanente. Isso mostra como o modelo pode mascarar determinados efeitos como o pico de tensão e o instante de quebra de gel.

Para avaliar o comportamento transiente dos parâmetros ajustados, o modelo foi submetido ao Teste Tipo 1 para as mesmas taxas de cisalhamento utilizadas nos testes experimentais. Os resultados são apresentados na Figura 14. Nota-se que os valores da tensão de pico e de equilíbrio aumentam com o incremento da taxa de cisalhamento e que para as taxas de 30, 40, 50 e 100 s<sup>-1</sup> a tensão de quebra é inferior à de equilíbrio. Nenhuma curva, porém, se mostrou parecida à resposta experimental. Por outro lado, observa-se que os valores de regime permanente são similares aos experimentais, como exemplo, a Figura 15 apresenta a comparação entre os valores experimentais e calculados para um valor final de taxa de cisalhamento de 30s<sup>-1</sup>. Note que apesar do modelo não representar bem o comportamento transitório, em equilíbrios os resultados obtidos são bem próximos.

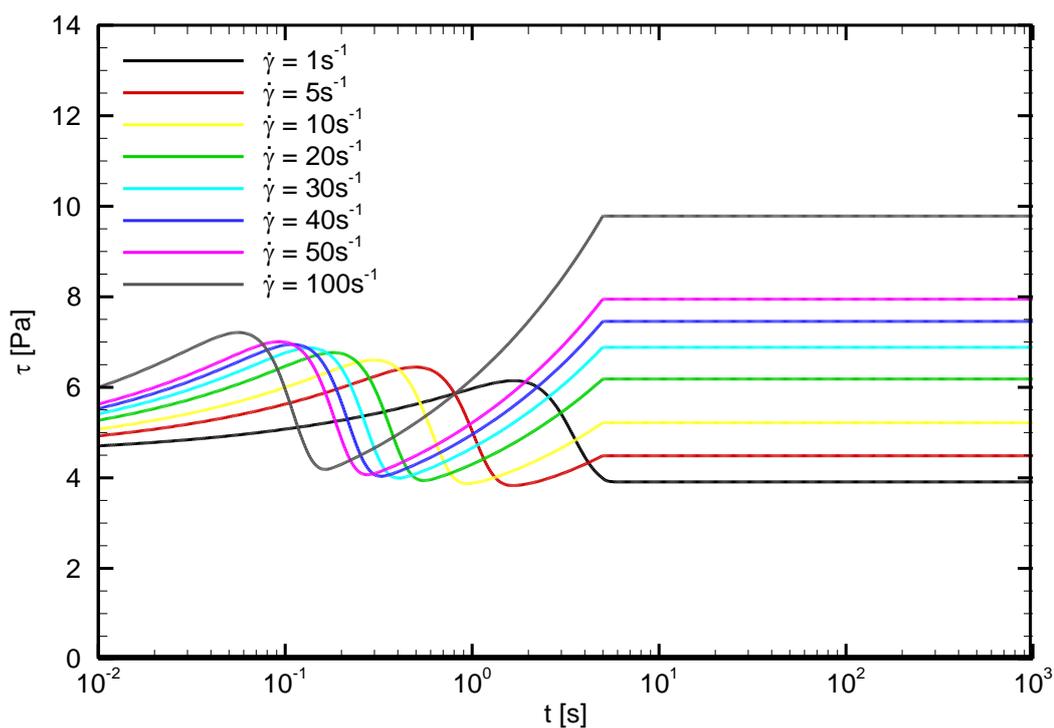


Figura 14 – Resultados do modelo Zitny *et al.* (1980) ao Teste Tipo 1.

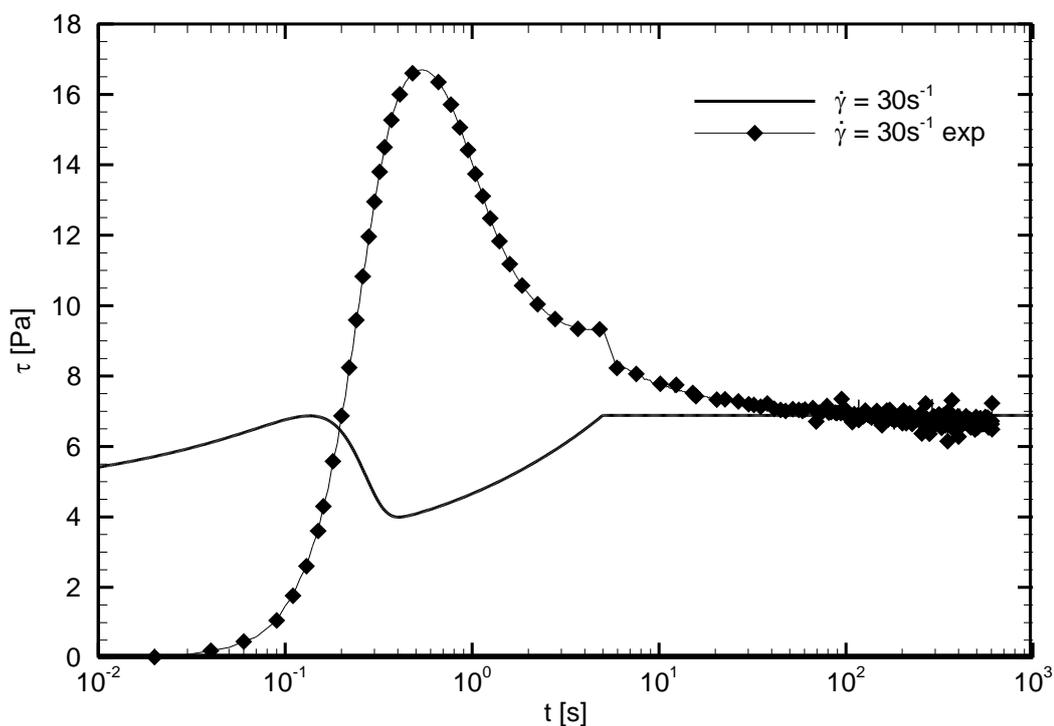


Figura 15 – Resultados do modelo Zitny *et al.* (1980) ao Teste Tipo 1 para taxa de cisalhamento de  $30\text{s}^{-1}$ .

Como os resultados do modelo não foram condizentes aos experimentais, propõe-se uma mudança no modelo: a adição de um tempo característico

adimensional ( $t_{eq}$ ) na equação cinética de evolução do parâmetro estrutural (Equação (3.10)), o que resulta em:

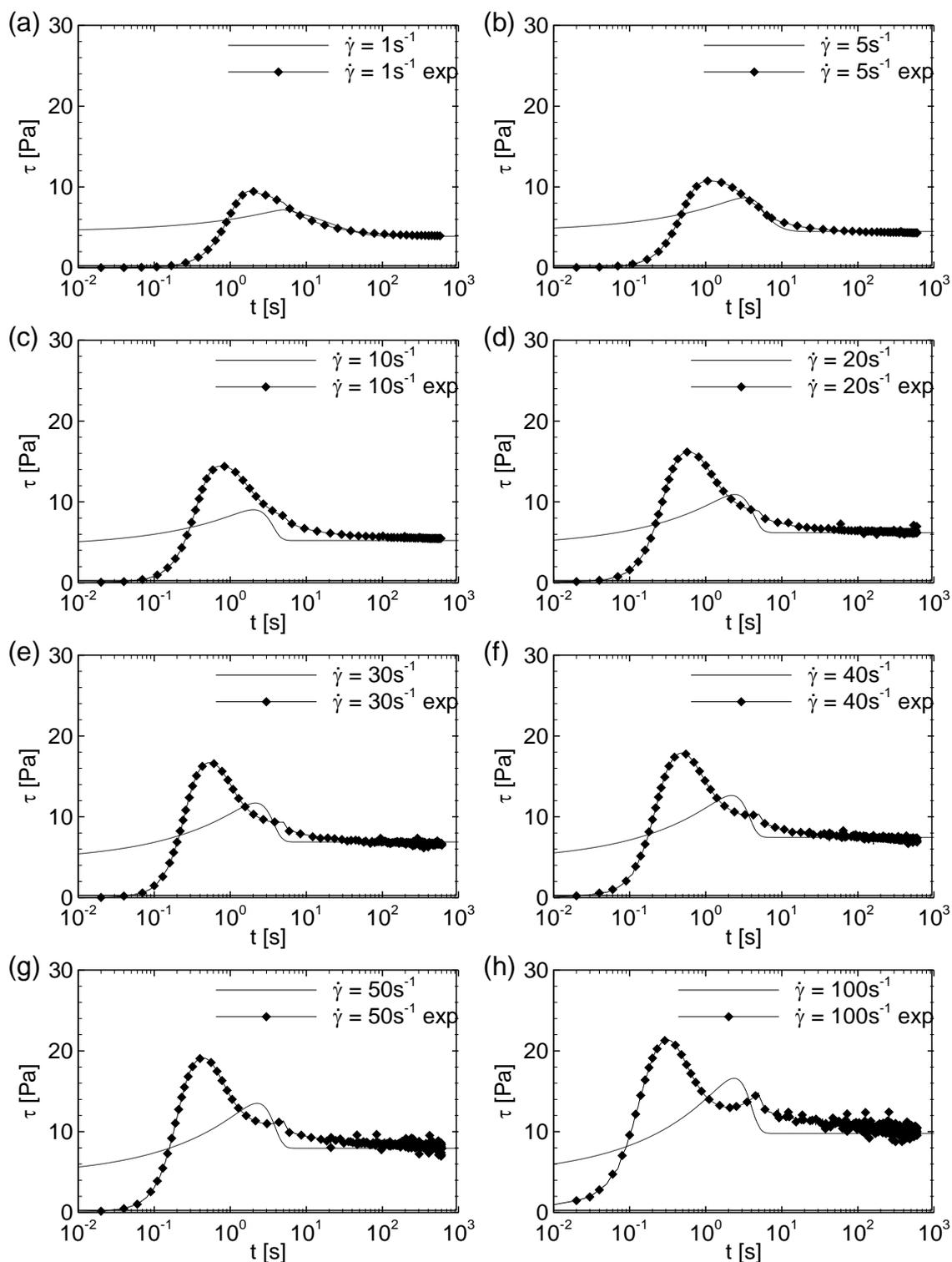
$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} \left[ -C_3 \dot{\gamma}^e \lambda + C_4 (1 - \lambda) \right] \quad (4.9)$$

Assim, o modelo modificado possui nove constantes, sendo o tempo característico ajustado em regime transiente.

O ajuste em regime transiente foi realizado para cada taxa de cisalhamento da Figura 11. Os gráficos da Figura 16 mostram o resultado do ajuste para cada uma das taxas de cisalhamento utilizadas no Teste Tipo 1, ao passo que a Tabela 4 mostra os valores de tempo característico obtidos para cada ajuste e a diferença entre os picos de tensão experimental e calculado. Assim como para o modelo não modificado, apenas a tensão de equilíbrio apresentou um bom resultado, porém com essa modificação a tensão de pico é superior à tensão de equilíbrio para a respectiva taxa de cisalhamento. A menor diferença entre o pico de tensão experimental e calculado é de 19,3%, além do que é possível perceber que o tempo característico aumentou com o crescimento da taxa de cisalhamento. Por fim, o instante de quebra do gel calculado é sempre maior que o encontrado experimentalmente.

**Tabela 4 – Comparação do tempo característico, tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Zitny *et al.* (1980).**

Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Tempo característico	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculada [Pa]	Diferença [%]
1	100,0	9,45	7,18	24,3%
5	1000,0	10,75	8,68	19,3%
10	1040,0	14,44	9,02	37,5%
20	12846,6	16,18	10,92	32,5%
30	25146,9	16,70	11,71	29,9%
40	58555,9	17,89	12,64	29,3%
50	120592,5	19,14	13,51	29,4%
100	956516,3	21,36	16,61	22,2%



**Figura 16 – Ajuste em regime transiente do modelo de Zitny *et al.* (1980) para Teste Tipo 1: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) 100 s<sup>-1</sup>.**

A Figura 16 deixa evidente que esse modelo é do tipo viscoplástico, pois para todos os testes a tensão inicial é significativamente maior do que zero o que indica a presença de uma tensão limite de escoamento. Outra característica desses gráficos

é a similaridade entre as curvas e o fato de que quanto maior a taxa de cisalhamento aplicada, mais rápida é a quebra do material.

Todos esses resultados mostram que com o conjunto de parâmetros ajustados em regime permanente e transiente, o modelo não é capaz de prever o pico de tensão ou instante em que essa ocorre. Os únicos resultados satisfatórios foram obtidos para os valores em equilíbrio da tensão e taxa de cisalhamento.

A falta de uma parcela elástica diminui os efeitos de memória do material e faz com que o modelo não possa reproduzir os efeitos da tixotropia do fluido de perfuração testado.

#### 4.4.2 Modelo de Dullaert e Mewis (2006)

Esse modelo possui oito parâmetros dos quais seis ( $\tau_{y,RP}$ ,  $\eta_{st,0}$ ,  $\eta_{\infty}$ ,  $C_8$ ,  $C_9$  e  $C_{10}$ ) são ajustados em regime permanente, conforme mostra a Equação (3.19) que é reescrita na presente seção por conveniência:

$$\tau_{RP} = \frac{C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}}{C_8 \dot{\gamma}_{RP} + C_9 \dot{\gamma}_{RP}^{0.5} + C_{10}} (\tau_{y,RP} + \eta_{st,0} \dot{\gamma}_{RP}) + \eta_{\infty} \dot{\gamma}_{RP} \quad (3.19)$$

Utilizando a metodologia para o ajuste em regime permanente, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).**

$\tau_{y,RP}$ [Pa]	$\eta_{st,0}$ [Pa.s]	$\eta_{\infty}$ [Pa.s]	$C_8$ [s <sup>-β</sup> ]	$C_9$ [s <sup>0,5-β</sup> ]	$C_{10}$ [s <sup>1-β</sup> ]
3,62	0,389	0,0329	5,03	3,03.10 <sup>-12</sup>	93,3

Através dos parâmetros da Tabela 5 é traçada a curva de escoamento comparativa entre os resultados experimentais e do modelo (Figura 17). Percebe-se que o ponto com taxa de cisalhamento igual a 10s<sup>-1</sup> é o mais deslocado da curva,. Isso é confirmado na Tabela 6, na qual se vê que esse ponto é o que apresenta a maior diferença (4,8%). Contudo, o ajuste em regime permanente é considerado bom, é possível observar na Figura 17 que para baixas taxas de cisalhamento o modelo é coerente apresentando um patamar de tensão.

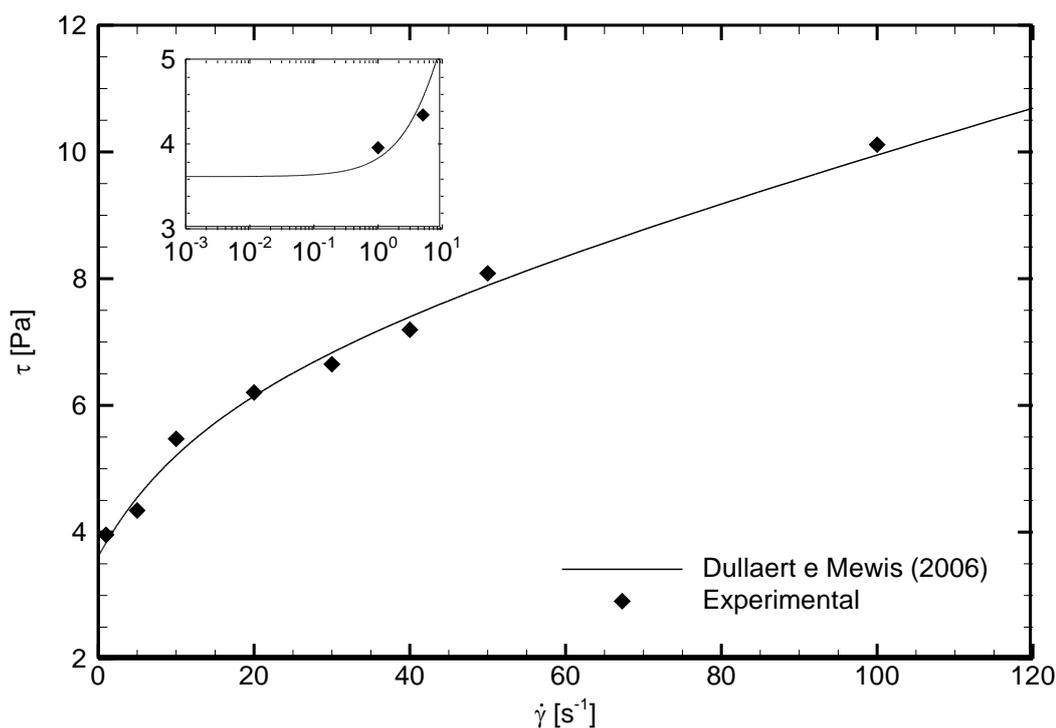


Figura 17 – Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).

Tabela 6 – Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).

Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Tensão Experimental [Pa]	Tensão Calculada [Pa]	Diferença [%]
1	3,96	3,83	3,1%
5	4,34	4,55	-4,7%
10	5,47	5,21	4,8%
20	6,20	6,15	0,9%
30	6,65	6,83	-2,7%
40	7,19	7,40	-2,8%
50	8,08	7,89	2,4%
100	10,11	9,95	1,6%

Para que o modelo possa ser plenamente caracterizado é necessário ajustar os parâmetros restantes ( $C_{11}$  e  $\beta$ ), o que é feito através do regime transiente experimental obtido dos Testes Tipo 1. Diversas tentativas de ajuste individual dessas curvas foram realizadas sem que o aspecto da curva fosse reproduzido. Então, os resultados para todas as taxas de cisalhamento foram utilizados para o ajuste. Os parâmetros de regime transiente resultantes são apresentados na Tabela 7.

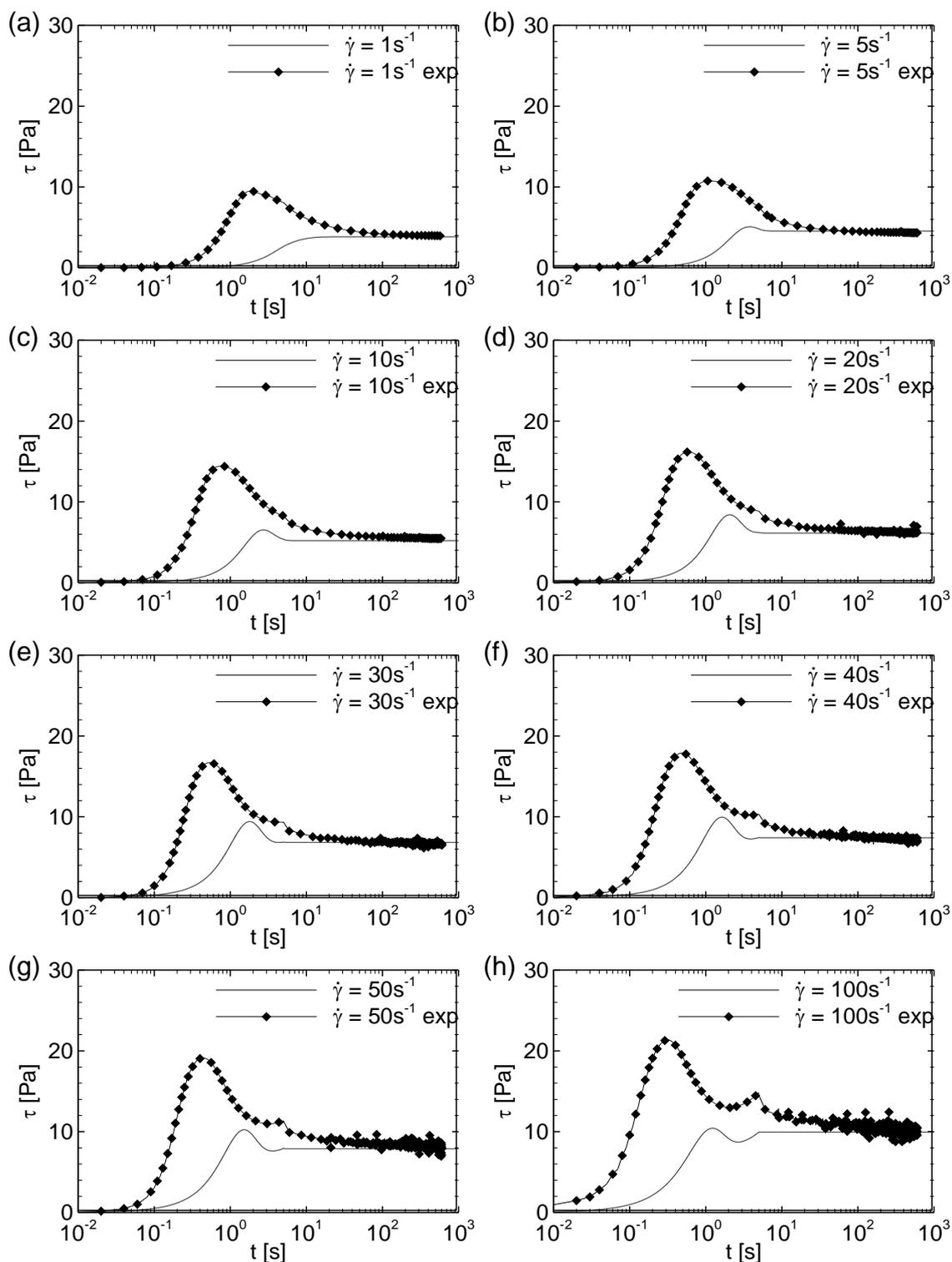
**Tabela 7 – Parâmetros ajustados em regime transiente para todas as taxas de cisalhamento simultaneamente para o Teste Tipo 1 do modelo de Dullaert e Mewis (2006).**

$\beta$ [-]	$C_{11}$ [ $\text{Pa}^{-1/\beta} \cdot \text{s}^{(\beta-1)/\beta}$ ]
0,101	1,47

A partir desses parâmetros o Teste Tipo 1 foi simulado e o resultado para cada taxa de cisalhamento é apresentado na Figura 18. Nota-se que a parte transiente não é bem representada e que não foi possível representar o instante de quebra. A Tabela 8 mostra que os valores de pico de tensão estão cerca de 50% abaixo dos verificados experimentalmente. Apesar disso, o comportamento em equilíbrio foi reproduzido. Portanto, não foi encontrado um conjunto de parâmetros de regime transiente capaz de representar todas as curvas, ou seja, o modelo não é capaz de representar o fluido de perfuração testado com parâmetros constantes.

**Tabela 8 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Dullaert e Mewis (2006) com todas as taxas de cisalhamento ajustadas simultaneamente.**

Taxa de cisalhamento [ $\text{s}^{-1}$ ]	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculado [Pa]	Diferença [%]
1	9,45	3,83	59,6%
5	10,75	5,08	52,7%
10	14,44	6,54	54,7%
20	16,18	8,41	48,1%
30	16,70	9,42	43,6%
40	17,89	9,96	44,3%
50	19,14	10,25	46,5%
100	21,36	10,43	51,2%



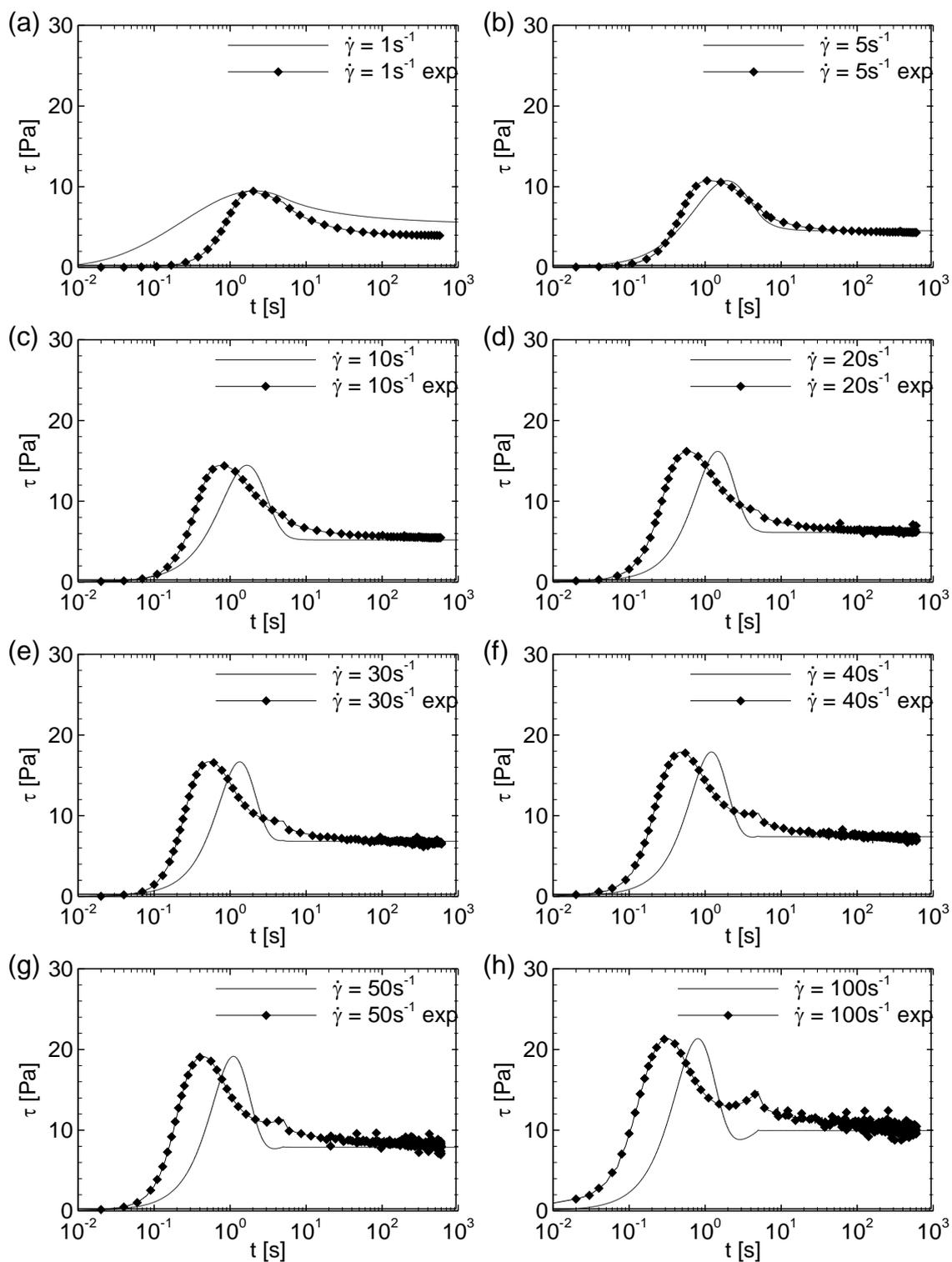
**Figura 18 – Comparação dos valores medidos com os resultados do modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustados para o Teste Tipo 1: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) 100  $s^{-1}$ .**

Rocha (2010) fez um estudo do modelo de Dullaert e Mewis (2006) no qual chegou à conclusão de que apesar do modelo apresentar uma resposta parecida

com a observada experimentalmente, é possível que as curvas não se aproximem apenas com o ajuste das constantes  $C_{11}$  e  $\beta$ . Assim, o autor propôs que o parâmetro  $\beta$  seja dependente da taxa de cisalhamento. Baseado em Rocha (2010), o valor de  $C_{11}$  foi fixado em um valor igual ao obtido no ajuste de todas as curvas do Teste Tipo 1 simultaneamente (Tabela 7). O modelo foi ajustado para cada taxa de cisalhamento de forma que o valor do pico de tensão fosse o mais preciso possível, independentemente do instante de quebra. Isso resultou nos valores de  $\beta$  da Tabela 9 e nas curvas de tensão em função de tempo que aparecem na Figura 19. Conforme era esperado, o instante de quebra não foi o mesmo que nos testes experimentais, porém os valores numéricos da tensão de pico e da tensão em equilíbrio se aproximam de forma adequada aos experimentais.

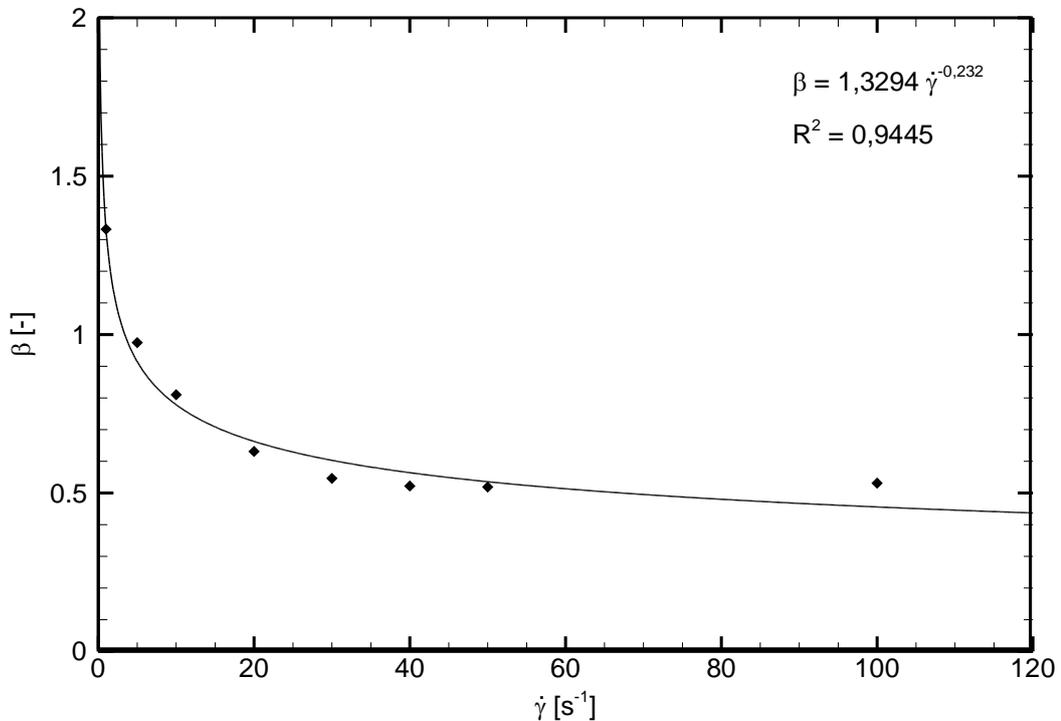
**Tabela 9 – Valores de  $\beta$  em função da taxa de cisalhamento para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).**

Taxa de cisalhamento [ $s^{-1}$ ]	$\beta$ [-]
1	1,33
5	0,975
10	0,810
20	0,631
30	0,546
40	0,522
50	0,519
100	0,531



**Figura 19 – Comparação dos resultados experimentais com o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustado para  $\beta$  variável: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) 100  $s^{-1}$ .**

Com o objetivo de descrever a variação de  $\beta$  em função da taxa de cisalhamento (Figura 20), foi proposta uma função de potenciação genérica, conforme a Equação (4.10).



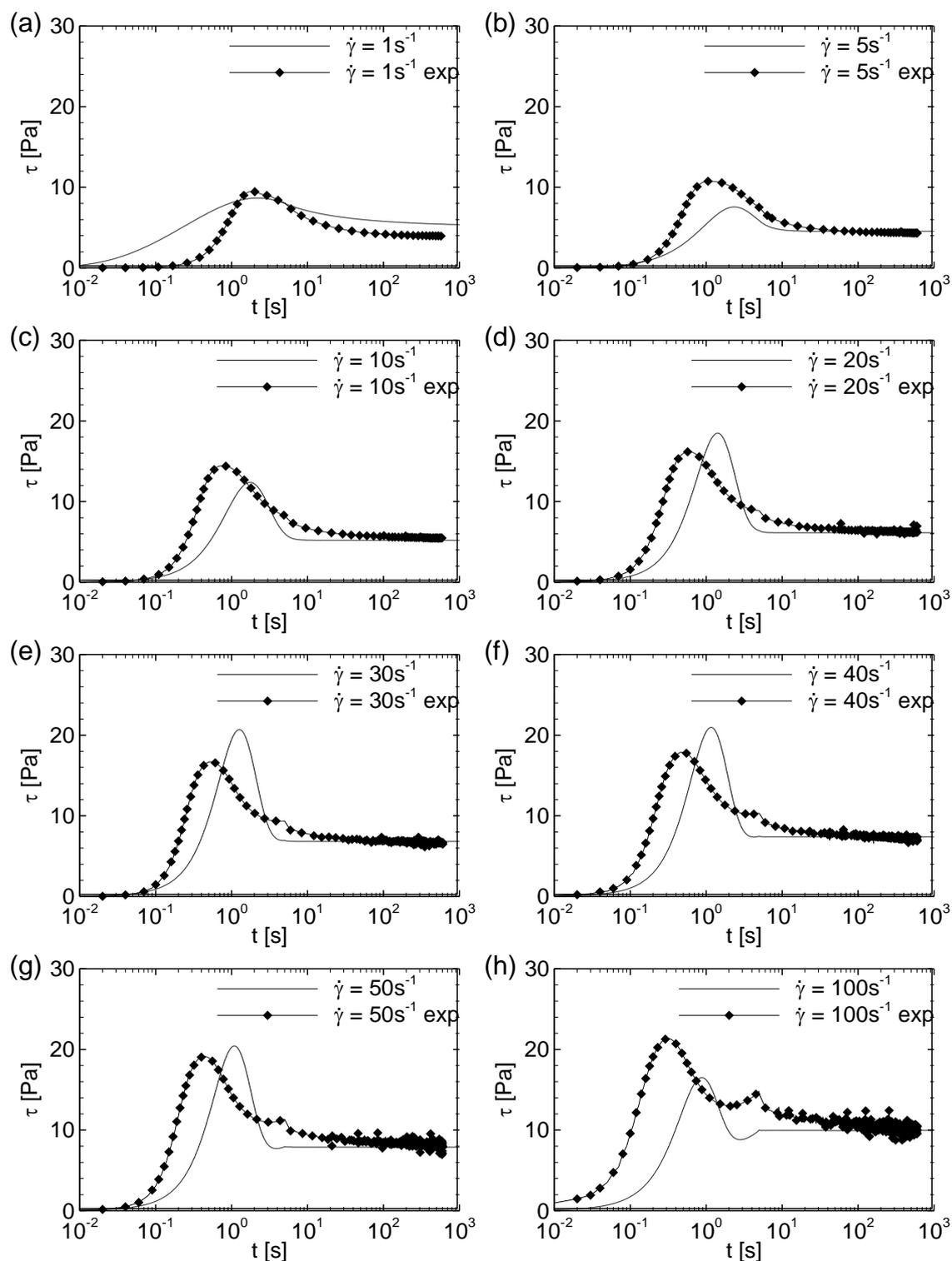
**Figura 20 –  $\beta$  em função da taxa de cisalhamento.**

$$\beta = \beta(\dot{\gamma}) = A\dot{\gamma}^{-B} \quad (4.10)$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes.

A calibração da Equação (4.10) com os valores da Tabela 9 resulta em valores de  $A$  e  $B$  iguais a, respectivamente, 1,3294 e -0,232, a qual possui um coeficiente de determinação muito próximo da unidade ( $R^2 = 0,9445$ ) e erro máximo de 14% para  $100\text{s}^{-1}$ . Os erros obtidos por Rocha (2010) utilizando esse mesmo método foram menores, porém o fluido de perfuração testado não era o mesmo e a faixa de taxa de cisalhamento utilizada por aquele autor era mais estreita, de 5 a  $40\text{s}^{-1}$ . As curvas para o Teste Tipo 1 utilizando  $\beta$  como função da taxa de cisalhamento são ilustradas na Figura 21. Nota-se que o equilíbrio consegue ser reproduzido, porém o comportamento transiente apresenta incoerências. Para as taxas de cisalhamento de 1, 5, 10 e  $100\text{s}^{-1}$ , a tensão de quebra calculada pelo modelo é menor que a experimental enquanto que para as taxas de 20, 30, 40 e 50

$s^{-1}$  o comportamento é inverso. Além disso, o instante de quebra só é próximo para o teste de  $1s^{-1}$ .



**Figura 21 – Comparação dos resultados experimentais com o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ajustado para  $\beta$  em função da taxa de cisalhamento: (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h)  $100 s^{-1}$ .**

As respectivas diferenças da tensão de pico experimental e calculada são mostradas na Tabela 10. Nota-se que a maior tensão de quebra ocorre em  $40 \text{ s}^{-1}$  e que para  $100 \text{ s}^{-1}$  o valor de pico é inferior ao de  $20 \text{ s}^{-1}$ , o que é incoerente em comparação aos resultados experimentais.

**Tabela 10 - Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Dullaert e Mewis (2006) com  $\beta$  como função da taxa de cisalhamento.**

Taxa de cisalhamento [ $\text{s}^{-1}$ ]	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculado [Pa]	Diferença [%]
1	9,45	8,67	8,7%
5	10,75	7,57	29,6%
10	14,44	12,38	14,3%
20	16,18	18,48	-14,2%
30	16,70	20,70	-24,0%
40	17,89	20,97	-17,2%
50	19,14	20,44	-6,8%
100	21,36	16,51	22,7%

Não é possível representar os efeitos de tixotropia do fluido de perfuração testado sem fixar o valor da constante  $C_{11}$  e variar o valor de  $\beta$ . Porém, o trabalho de Rocha (2010) mostra que tornando  $\beta$  uma função da taxa de cisalhamento, tanto o valor de pico quanto o de equilíbrio da tensão podem ser representados. No presente trabalho, a utilização desse método não apresentou resultados bons e foram observadas incoerências, como o pico de tensão para  $100 \text{ s}^{-1}$  ser menor que para as taxas de cisalhamento de 20 a  $50 \text{ s}^{-1}$ .

#### 4.4.3 Modelo de Mendes e Thompson (2013)

O modelo de Mendes e Thompson (2013) possui 13 parâmetros, dos quais sete ( $\eta_0$ ,  $\eta_\infty$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_{0d}$ ,  $\dot{\gamma}_{0d}$ ,  $K_4$  e  $y$ ) podem ser ajustados em regime permanente, conforme mostra a Equação (3.28), reescrita na presente seção por conveniência:

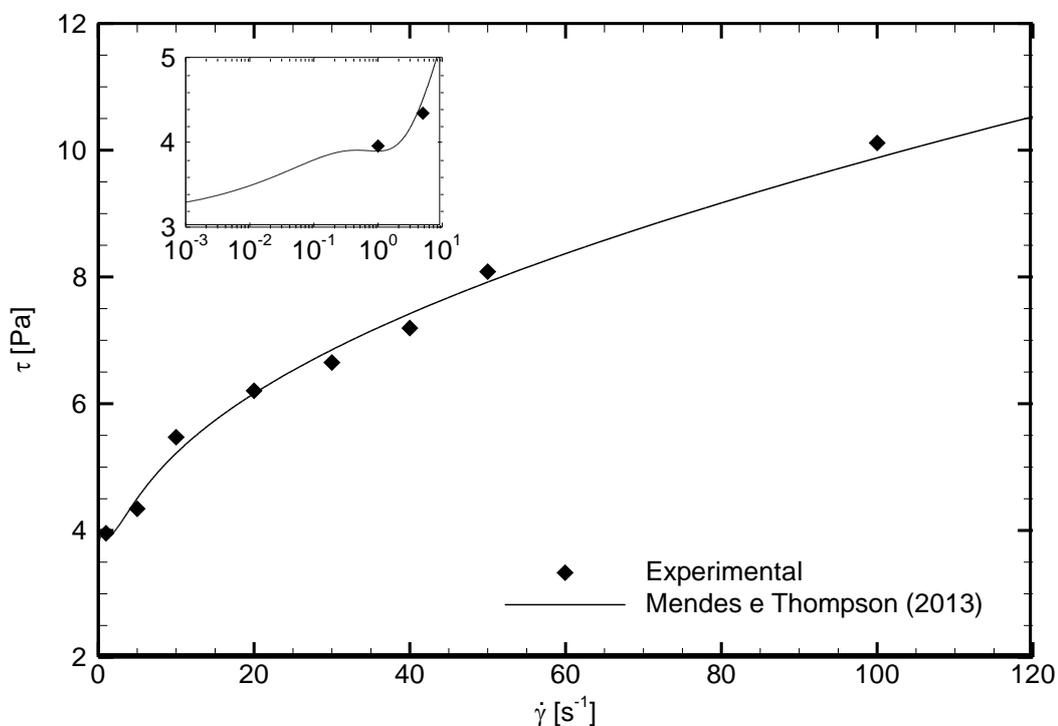
$$\tau_{RP} = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\tau_0}\right) \right] \left\{ \frac{\tau_0 - \tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}_{RP}}{\dot{\gamma}_{0d}}\right) + \frac{\tau_{0d}}{\dot{\gamma}_{RP}} + K_4 \dot{\gamma}_{RP}^{y-1} \right\} \dot{\gamma}_{RP} + \eta_\infty \dot{\gamma}_{RP} \quad (3.28)$$

Utilizando a metodologia proposta anteriormente, os parâmetros ajustados a partir da curva de escoamento aparecem na Tabela 11.

**Tabela 11 – Parâmetros de regime permanente ajustados para o modelo de Mendes e Thompson (2013).**

$\eta_0$ [Pa.s]	$\eta_\infty$ [Pa.s]	$\tau_0$ [Pa]	$\tau_{0d}$ [Pa]	$\dot{\gamma}_{0d}$ [s <sup>-1</sup> ]	$K_4$ [Pa.s <sup>y</sup> ]	$y$ [-]
$10^6$	0,0123	3,09	1,65	1,01	1,70	0,308

A Figura 22 ilustra a curva de escoamento calculada através dos parâmetros da Tabela 11 e os resultados experimentais. Analisando-a em conjunto com a Tabela 12, percebe-se que o ajuste apresenta erros inferiores a 5% e que os pontos experimentais são bem representados. Nota-se pelo detalhe da Figura 22 que para baixas taxas de cisalhamento existe o predomínio da parte elástica, o que está de acordo com o esperado para um fluido de perfuração.



**Figura 22 - Comparação de regime permanente entre pontos experimentais e curva de escoamento calculada pelo modelo de Mendes e Thompson (2013).**

**Tabela 12 - Comparação entre tensões experimentais e calculadas com erro percentual para o modelo de Mendes e Thompson (2013).**

Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Tensão Experimental [Pa]	Tensão Calculada [Pa]	Diferença [%]
1	3,96	3,90	1,5%
5	4,34	4,51	-3,8%
10	5,47	5,22	4,6%
20	6,20	6,16	0,7%
30	6,65	6,85	-3,0%
40	7,19	7,42	-3,2%
50	8,08	7,92	2,0%
100	10,11	9,88	2,3%

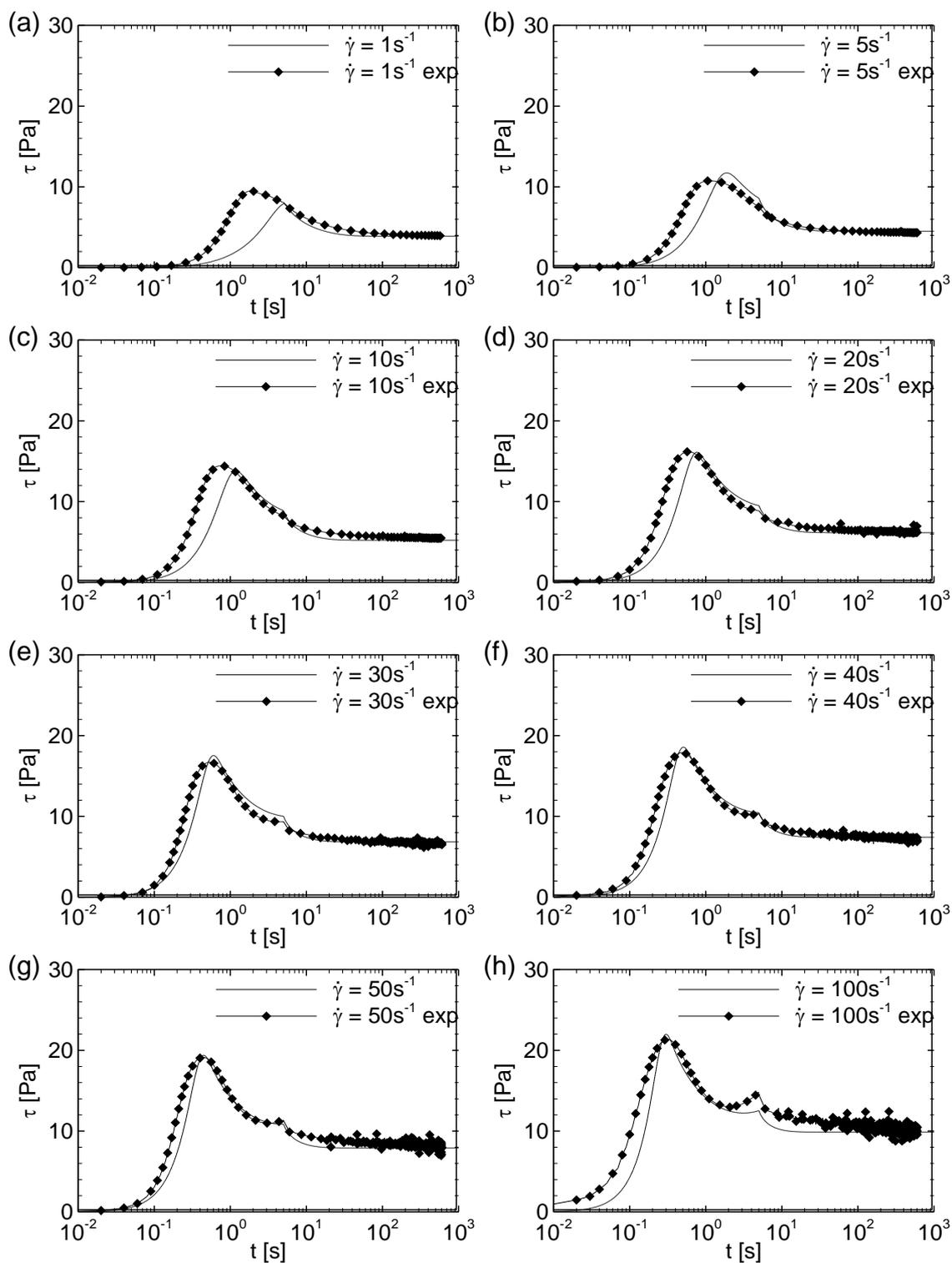
Porém, ainda é preciso ajustar seis parâmetros em regime transiente:  $G_0$ ,  $t_{eq}$ ,  $\nu$ ,  $x$ ,  $C_{13}$  e  $\lambda(t=0)$ .

Primeiramente, decidiu-se ajustar os parâmetros utilizando apenas a taxa de cisalhamento de 50 s<sup>-1</sup> para o Teste Tipo 1, pois essa taxa representa um valor intermediário das curvas obtidas experimentalmente. Os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 13 e nomeados de  $P_1$ .

**Tabela 13 – Parâmetros ajustados em regime transiente para taxa de cisalhamento de 50 s<sup>-1</sup> para o Teste Tipo 1 do modelo de Thompson e Mendes (2013).**

$\nu$ [-]	$x$ [-]	$t_{eq}$ [s]	$G_0$ [Pa]	$C_{13}$ [-]	$\lambda(t=0)$ [-]
0,254	15,7	20,2	1,17	39,5	6,67

A partir desses parâmetros, o Teste Tipo 1 foi simulado e as curvas correspondentes a cada taxa de cisalhamento são apresentadas na Figura 23. Nota-se que tanto o comportamento transiente quanto o permanente são bem representados. Mas, para as taxas de cisalhamento de 1, 5, 10, 20, 30 e 40 s<sup>-1</sup> o instante de quebra é diferente do obtido experimentalmente. Todavia, a Tabela 14 mostra que para uma ampla faixa de 5 a 100 s<sup>-1</sup> as diferenças entre as tensões experimentais e calculadas de pico são inferiores a 10%.



**Figura 23 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Mendes e Thompson (2013) ajustado em regime transiente utilizando apenas resultados da taxa de  $50 \text{ s}^{-1}$ : (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h) 100  $\text{s}^{-1}$ .**

**Tabela 14 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Mendes e Thompson (2013) com taxa de cisalhamento de 50 s<sup>-1</sup>.**

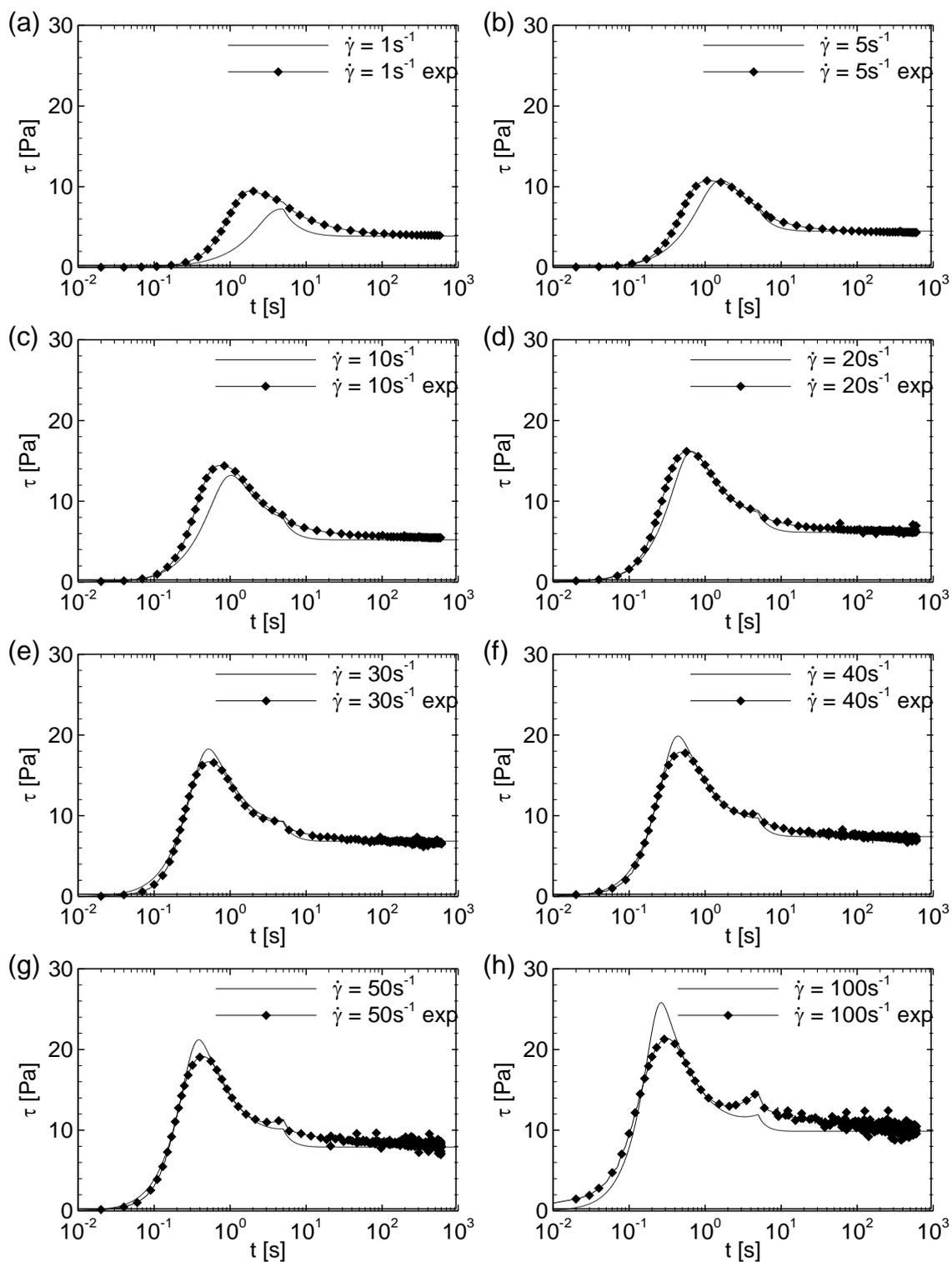
Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculado [Pa]	Diferença [%]
1	9,50	7,93	16,5%
5	10,75	11,74	-9,2%
10	14,44	13,81	4,4%
20	16,18	16,11	0,4%
30	16,70	17,53	-5,0%
40	17,89	18,57	-3,8%
50	19,14	19,38	-1,3%
100	21,36	21,98	-2,9%

Em seguida, foi realizado o ajuste para quatro taxas de cisalhamento: 5, 20, 40 e 100 s<sup>-1</sup> simultaneamente. Os parâmetros resultantes desse ajuste são apresentados na Tabela 15 e são nomeados  $P_2$ .

**Tabela 15 – Parâmetros do modelo de Thompson e Mendes (2013) ajustados em regime transiente para múltiplas taxas de cisalhamento (5, 20, 40 e 100 s<sup>-1</sup>).**

$\nu$ [-]	$x$ [-]	$t_{eq}$ [s]	$G_0$ [Pa]	$C_{13}$ [-]	$\lambda(t=0)$ [-]
0,0183	11,4	9,51	1,88	43,1	6,74

A partir dos parâmetros da Tabela 15, o Teste Tipo 1 foi simulado e o resultado para cada taxa de cisalhamento é apresentado na Figura 24. Nota-se que o instante de quebra é mais preciso que para o caso anterior, pois somente as taxas de 1, 5 e 10 s<sup>-1</sup> apresentam grande divergência se comparadas à quebra experimental. Novamente, o comportamento de equilíbrio é bem representado. Porém, como mostra a Tabela 16, as diferenças do pico de tensão são mais elevadas com valor máximo de 23,8% para 1 s<sup>-1</sup>.



**Figura 24 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Mendez e Thompson (2013) ajustado para as taxas de 5, 20, 40 e  $100 \text{ s}^{-1}$ : (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50 e (h)  $100 \text{ s}^{-1}$ .**

**Tabela 16 – Comparação da tensão de pico experimental e calculada para ajuste transiente do modelo de Mendes e Thompson (2013) com taxas de cisalhamento (5, 20, 40 e 100 s<sup>-1</sup>).**

Taxa de cisalhamento [s <sup>-1</sup> ]	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculado [Pa]	Diferença [%]
1	9,50	7,24	23,8%
5	10,75	10,83	-0,8%
10	14,44	13,20	8,6%
20	16,18	16,19	0,0%
30	16,70	18,26	-9,4%
40	17,89	19,88	-11,1%
50	19,14	21,21	-10,8%
100	21,36	25,80	-20,8%

Assim, diferente do obtido anteriormente para o ajuste com o conjunto de parâmetros  $P_1$ , os instantes de quebra do modelo são praticamente idênticos aos obtidos experimentalmente, porém o valor do pico de tensão apresenta erros maiores que 20%.

Portanto, para esse modelo nenhuma alteração foi necessária e os resultados obtidos ficaram muito próximos dos obtidos experimentalmente. Porém, percebe-se que a precisão no instante de quebra implica na perda de exatidão do valor do pico de tensão e que o contrário também acontece.

#### **Síntese do Capítulo 4**

No presente capítulo foi apresentada a modelagem computacional utilizada para resolver o conjunto de equações dos modelos. Em seguida os testes reológicos (rampa seguida de patamar de taxa de cisalhamento, patamar de taxa de cisalhamento, rampa de tensão e patamar de tensão) foram apresentados. Em sequência foi mostrado o resultado experimental para o primeiro teste. E a partir desse teste os modelos foram ajustados.

Os resultados dos ajustes permitiram concluir que o modelo de Zitny *et al.* (1980) é inadequado para representar o fluido de perfuração testado com as constantes obtidas. O modelo de Dullaert e Mewis (2006) apresentou incoerências em relação ao pico de tensão, porém trabalhos anteriores mostram que para outro fluido de perfuração foram obtidos bons resultados. O modelo de Mendes e

Thompson (2013) apresentou coerência nos resultados e representou bem o regime transiente e permanente.

No próximo capítulo são apresentados os resultados para os testes de tensão controlada. Em sequência os modelos de Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013) são avaliados através da comparação com resultados experimentais de tensão de cisalhamento controlada.

## 5 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Este capítulo tem por objetivo avaliar os modelos com base nos parâmetros ajustados anteriormente. Isso é realizado em duas etapas. Na primeira são apresentados os resultados experimentais para os testes de rampa de tensão (Tipo 3) e patamar de tensão (Tipo 4). Na segunda etapa, os modelos ajustados, que responderam de forma adequada ao teste com controle de taxa de cisalhamento (Tipo 1), são submetidos aos testes com controle de tensão de cisalhamento e, em seguida, comparados aos resultados experimentais.

O modelo de Zitny *et al.* (1980) não é avaliado, pois para todos os conjuntos de parâmetros utilizados não foi capaz de descrever o comportamento experimental observado no teste com controle de taxa de cisalhamento (Teste Tipo 1).

### 5.1 Resultados experimentais

Os procedimentos e condições dos testes expostos a seguir são os mesmos que os utilizados na seção 4.3.

#### 5.1.1 Rampa de tensão – Teste 3

Em laboratório, foram realizados dois experimentos para as seguintes variações de tensão com o tempo  $d\tau/dt = 4$  e  $8$  Pa/min, conforme mostra a Figura 10(b) e a Equação (4.7), reescrita na presente seção por conveniência:

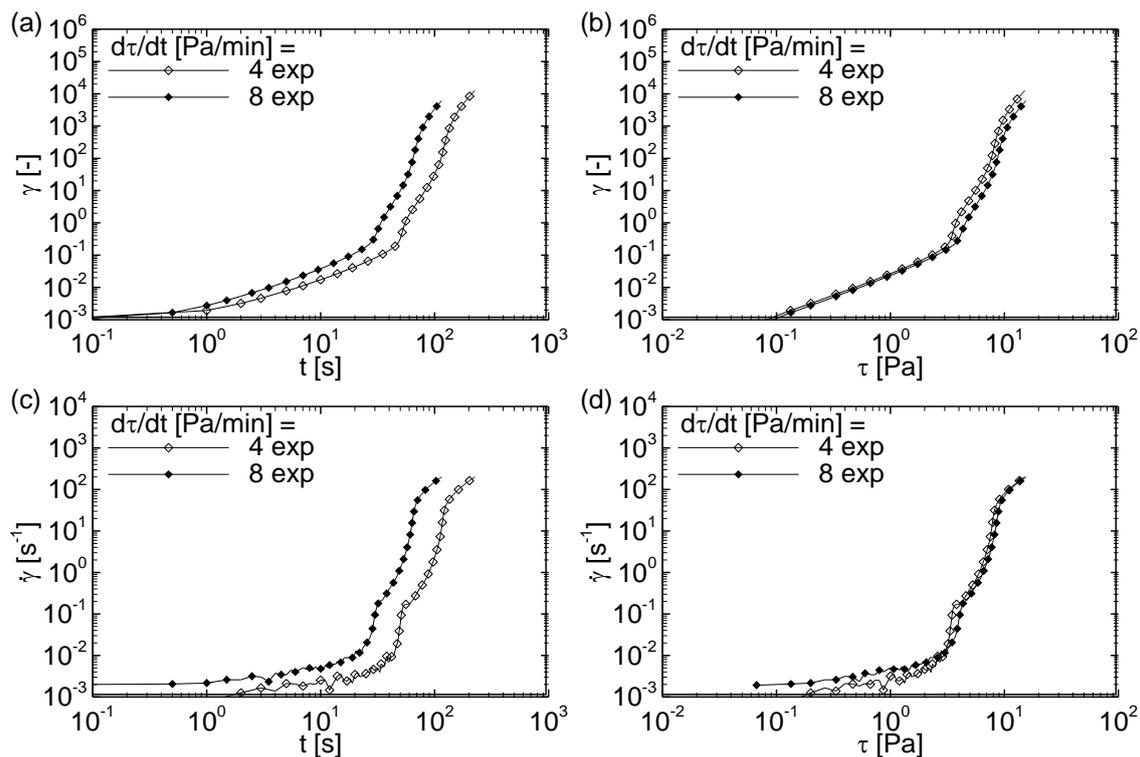
$$\tau(t) = \frac{d\tau}{dt} t \quad (4.7)$$

Como os resultados provenientes desses testes serão utilizados em várias análises, um formato padrão de apresentação de resultados para testes de rampa de tensão será empregado. Os resultados obtidos experimentalmente são apresentados, no formato padrão, na Figura 25. No formato de apresentação de resultados, os valores experimentais são descritos pelas linhas com pontos enquanto que os resultados referentes aos modelos utilizarão linhas contínuas e pontilhadas. Os gráficos estão em escala logarítmica e são correspondentes às seguintes variáveis:

- (a) Deformação pelo tempo;

- (b) Deformação pela tensão;
- (c) Taxa de cisalhamento pelo tempo;
- (d) Taxa de cisalhamento pela tensão.

Os gráficos correspondentes a estas variáveis são, respectivamente (a), (b), (c) e (d).



**Figura 25 – Resultados do Teste Tipo 3 para as variações de tensão com o tempo controlada 4 e 8 Pa/min.**

Na Figura 25(c) e na Figura 25(d) nota-se a presença de quatro rampas de taxa de cisalhamento distintas. Na primeira ocorre um gradual crescimento, até o ponto em que começa a segunda rampa, a qual possui inclinação mais elevada. Essa mudança de inclinação indica o início da quebra da estrutura de gel. A terceira rampa, representando a transição entre a região elástica e a viscosa, possui um gradiente um pouco menor o qual perdura até que a quarta inclinação seja alcançada. Sendo que a última rampa representa a condição na qual as forças viscosas preponderam sobre as forças elásticas.

A Figura 25(a) mostra o comportamento da deformação em função do tempo. É importante destacar que a primeira rampa representa a resposta

predominantemente elástica do material enquanto que a segunda representa a quebra da estrutura do material. A Figura 25(b) mostra que para as duas variações de tensão com o tempo o material passa do regime elástico para o predominantemente viscoso entre as deformações de 0,1 e 1000. Em testes realizados com fluidos de perfuração, notou-se que, independentemente das condições impostas ao material, a quebra do gel, ou ao menos o início da quebra da estrutura, sempre se inicia em deformações próximas a um ( $\gamma=1$ ). Portanto, como existe uma faixa de tensão em que o material está se desestruturando, para efeitos de comparação, três critérios distintos, criados pelo autor, são utilizados para avaliar a tensão de quebra do material. No primeiro critério assume-se que a tensão limite de escoamento,  $\tau_{quebra,1}$ , é o valor de tensão referente à deformação de um. O segundo critério considera a tensão limite de escoamento,  $\tau_{quebra,2}$ , como o ponto inicial de quebra do gel. Graficamente isso é representado pelo cruzamento das retas  $R_1$  e  $R_2$  ilustradas na Figura 26, as quais representam, respectivamente, o fim da região de predominância elástica e o início da região de transição. O terceiro critério, mais conservador, considera que o ponto de quebra e a tensão limite de escoamento correspondente,  $\tau_{quebra,3}$ , são representados pelo cruzamento das retas  $R_3$  e  $R_4$  ilustradas na Figura 27. Essas retas representam, respectivamente, a resposta predominantemente viscosa após a quebra e a região de transição elástica e viscosa.

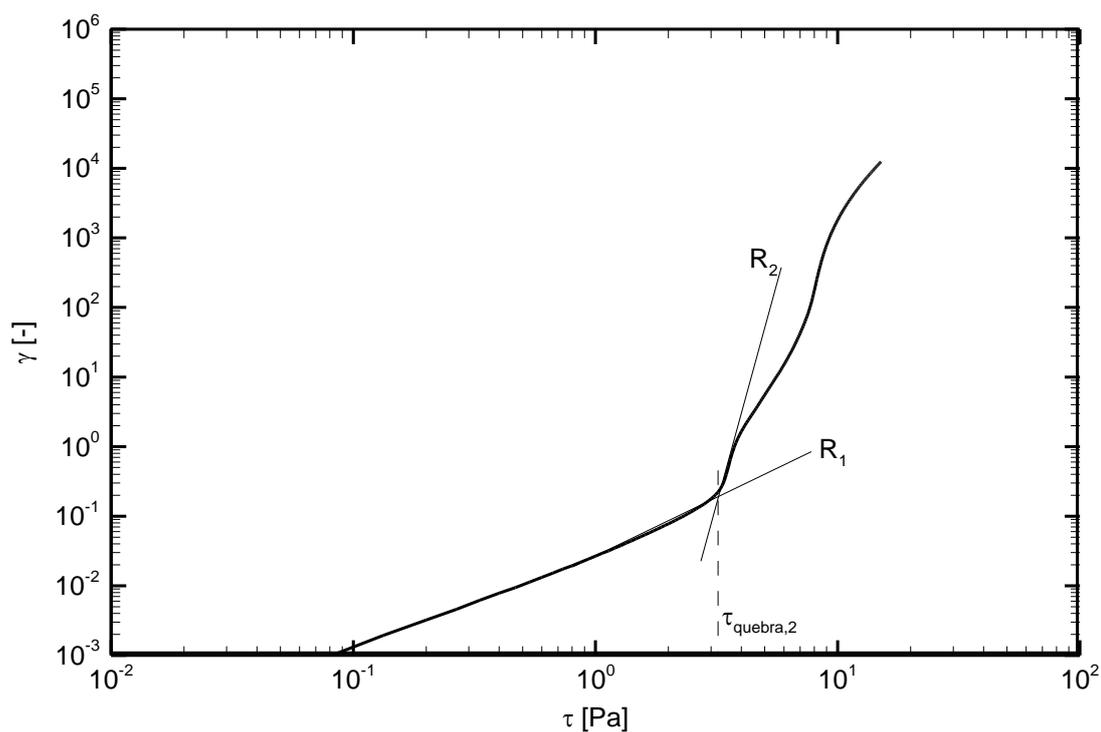


Figura 26 - Cruzamento das retas  $R_1$  e  $R_2$  como critério de quebra do material

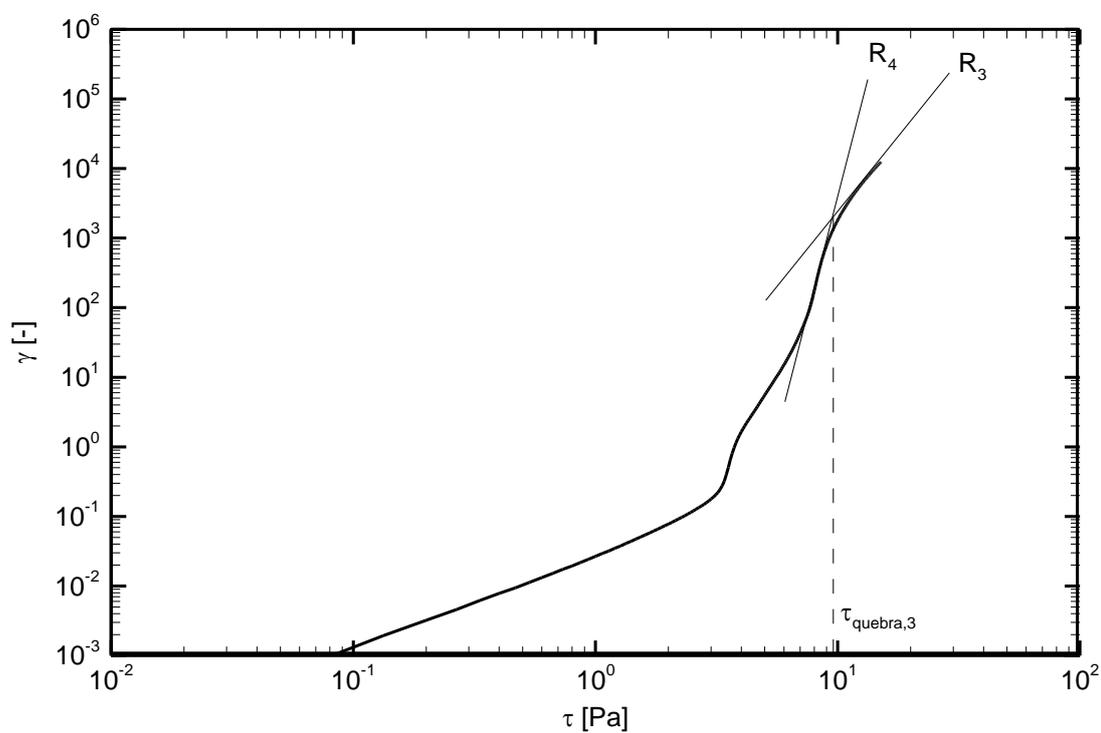


Figura 27 – Cruzamento das retas  $R_3$  e  $R_4$  como critério de quebra do material.

A Tabela 17 apresenta os valores para as tensões limite de escoamento experimentais utilizando os critérios citados acima. Deve-se observar que a menor

tensão de quebra é obtida utilizando o segundo critério, de fim da região de predominância elástica, enquanto que o maior valor é atingido com o critério conservador.

**Tabela 17 – Tensão de quebra experimental do material para cada variação da tensão com o tempo.**

$d\tau / dt$ [Pa/min]	Critério		
	$\tau_{quebra,1}$ [Pa] (Primeiro critério: deformação = 1)	$\tau_{quebra,2}$ [Pa] (Segundo critério: início da transição elástica/viscosa)	$\tau_{quebra,3}$ [Pa] (Terceiro critério: conservador)
4	3,75	3,40	9,41
8	4,57	3,53	10,41

Além disso, a amostra que foi submetida à maior variação de tensão com o tempo (i.e., 8 Pa/min) quebra num instante anterior. Porém, ao analisar a Figura 25(b) é possível perceber que a tensão de quebra é menor para a menor variação de tensão com o tempo.

#### 5.1.2 Patamar de tensão – Teste 4

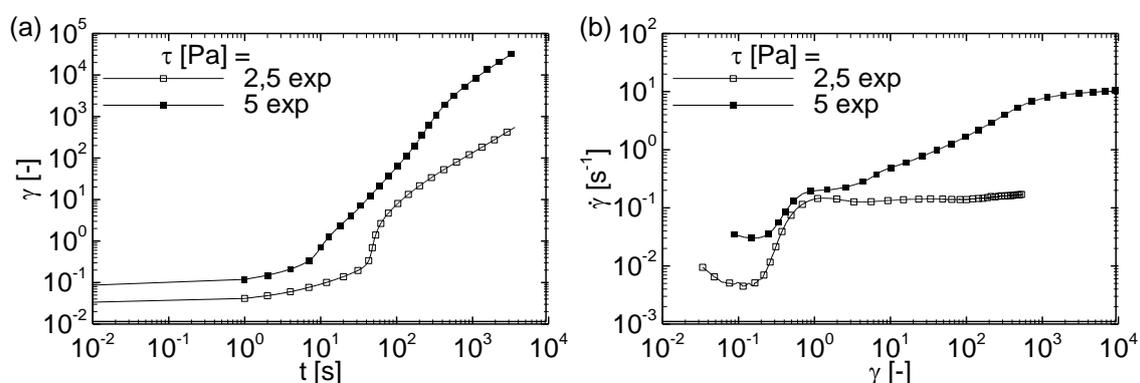
Os valores de patamar de tensão de cisalhamento selecionados para os testes experimentais foram  $\tau = 2,5$  e 5 Pa. Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 28 e representam o formato padrão dos gráficos para testes de patamar de tensão. Os valores dos eixos estão em escala logarítmica e cada gráfico apresenta as seguintes variáveis:

- (a) Deformação pelo tempo;
- (b) Taxa de cisalhamento pela deformação.

Na Figura 28 (b) nota-se a presença de dois patamares de taxa de cisalhamento. No primeiro a taxa de cisalhamento cai gradativamente até um ponto em que o gradiente muda de sentido e se intensifica, indicando a quebra do material. Depois de um tempo, o segundo patamar é atingido, representando o estado final de equilíbrio do fluido. Para a tensão de 5Pa observam-se duas rampas com inclinações diferentes entre os patamares de taxa de cisalhamento, enquanto que na tensão de 2,5Pa ocorre apenas uma rampa. É importante notar que a quebra ocorre mais rapidamente quanto maior a tensão de cisalhamento aplicada. Ressalta-se que,

para ambas as tensões, o início da quebra ocorre para deformação entre 0,1 e 1, e que o valor da deformação é próximo.

A Figura 28(a) mostra o comportamento da deformação em função do tempo para esse teste, o crescimento é praticamente linear até o ponto em que o alto gradiente de taxa de cisalhamento faz com que a deformação cresça mais rápido e o material quebre. A deformação de quebra de material tem valor numérico de aproximadamente um e o regime permanente pode ser observado pela segunda inclinação de crescimento constante da deformação. A primeira inclinação representa a deformação elástica do material.



**Figura 28 – Resultados dos Testes Tipo 4 para as tensões de 2,5 e 5 Pa.**

## 5.2 Avaliação dos modelos

A seguir os modelos de Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013) são avaliados e comparados aos resultados experimentais obtidos para os Testes Tipo 1, 3 e 4.

### 5.2.1 Modelo de Dullaert e Mewis (2006)

No capítulo anterior, o modelo de Dullaert e Mewis (2006) apresentou algumas incoerências e para os parâmetros utilizados não foi possível reproduzir todas as curvas de taxa de cisalhamento. Porém, duas evidências indicam que o modelo deve continuar sendo avaliado: o trabalho realizado por Rocha (2010), que utilizou outro fluido de perfuração, apresentou um bom resultado para esse modelo; e, a Figura 20 e a Tabela 9 evidenciam que os valores de  $\beta$  são próximos para a faixa de 30 a 100  $s^{-1}$ . Por isso, são utilizados os parâmetros em regime permanente da Tabela 5 e em

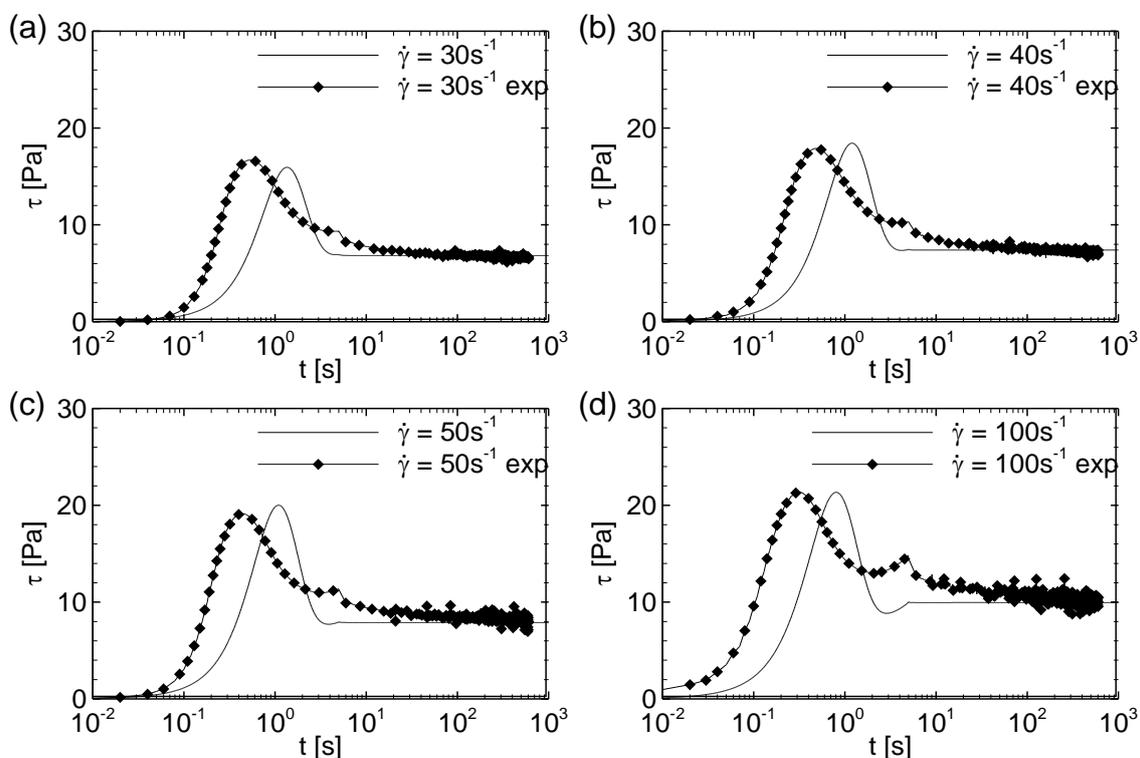
regime transiente da Tabela 18, sendo o  $\beta$  selecionado um valor intermediário aos ajustados nessa faixa no capítulo anterior.

**Tabela 18 – Valores dos parâmetros de regime transiente para avaliação do modelo de Dullaert e Mewis (2006).**

$\beta$ [-]	$C_{11}$ [ $\text{Pa}^{-1/\beta} \cdot \text{s}^{(\beta-1)/\beta}$ ]
0,531	1,47

### Teste Tipo 1

A partir dos parâmetros selecionados o modelo foi submetido ao teste da Figura 10(a) (respeitando a Equação (4.6)) com taxas de cisalhamento finais  $\dot{\gamma}_f = 30, 40, 50$  e  $100 \text{ s}^{-1}$ . Os resultados obtidos aparecem na Figura 29 e na Tabela 19.



**Figura 29 – Resultado do modelo de Dullaert e Mewis (2006) ao Teste Tipo 1 para taxas de 30, 40, 50 e  $100 \text{ s}^{-1}$ .**

**Tabela 19 – Comparação do pico de tensão para o modelo de Dullaert e Mewis (2006) ao Teste Tipo 1.**

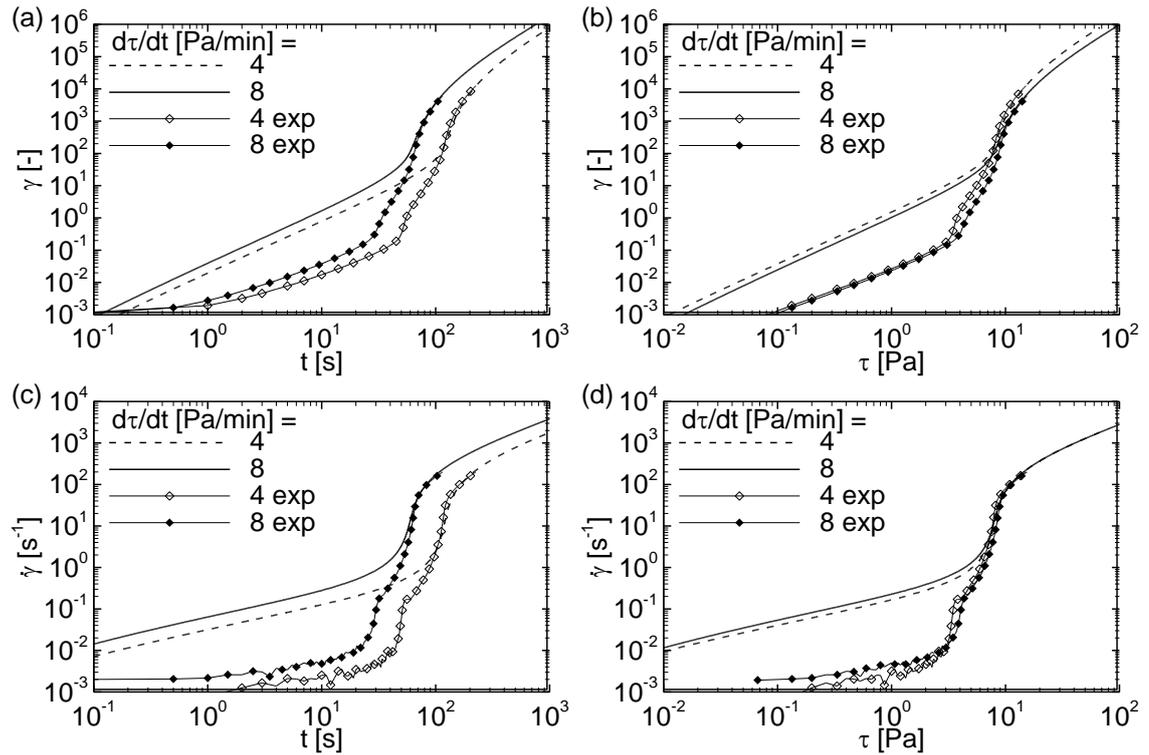
Taxa de cisalhamento [ $\text{s}^{-1}$ ]	Pico de Tensão Experimental [Pa]	Pico de Tensão Calculado [Pa]	Diferença [%]
30	16,70	15,94	4,5%
40	17,89	18,44	-3,1%

50	19,14	20,02	-4,6%
100	21,36	21,35	0,1%

A análise da tabela e do gráfico acima permite visualizar que o instante de quebra do modelo é sempre posterior ao experimental, porém o valor numérico do pico de tensão é similar cuja diferença máxima em relação aos resultados experimentais é inferior a 5%. Além do que, os valores de equilíbrio são próximos aos experimentais. Portanto, para a faixa avaliada, com o valor de  $\beta$  e  $C_{11}$  fixados, o modelo apresenta coerência com os resultados experimentais.

### Teste Tipo 3

A partir dos parâmetros selecionados anteriormente, o modelo foi submetido ao Teste Tipo 3 (i.e., rampa de tensão de cisalhamento). Os resultados calculados foram obtidos submetendo o modelo às mesmas condições dos testes experimentais. Inicialmente foi imposta ao modelo uma variação da tensão de cisalhamento de 4 Pa/min e em seguida de 8 Pa/min. Os resultados obtidos são analisados a partir da variação da deformação e da taxa de cisalhamento com a tensão de cisalhamento imposta. A Figura 30 mostra, no formato padrão já apresentado, os resultados para a variação de tensão com o tempo de 4 e 8 Pa/min e os respectivos resultados experimentais. Nota-se na Figura 30(a) e na Figura 30(b) que os valores de deformação elástica do modelo são superiores aos valores experimentais em quase duas ordens de grandeza. Quando a inclinação na curva experimental aumenta, a deformação experimental é de 0,1 e o modelo apresenta um valor de deformação igual a 10 e permanece na região de predominância elástica. O valor da deformação calculada de quebra da estrutura do material é cerca de 100 vezes maior que o experimental, considerando que a quebra deveria iniciar no instante em que a deformação é igual a um experimentalmente. Porém, na região em que a parcela viscosa é mais considerável que a elástica, os resultados calculados são muito próximos aos resultados experimentais tanto para a deformação quanto para a taxa de cisalhamento.



**Figura 30 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Dullaert e Mewis (2006) para o Teste Tipo 3.**

A Figura 30(c) e a Figura 30(d) apresentam o comportamento da taxa de cisalhamento em função, respectivamente, do tempo e da tensão. Nota-se que o valor da taxa de cisalhamento para a região elástica está deslocado em duas ordens de grandeza dos valores experimentais. O início da quebra do gel do material ocorre numa taxa quase quatro ordens de grandeza maiores para o modelo. Porém, a partir desse ponto as curvas se alinham e na região de predominância viscosa o comportamento é similar.

A Tabela 20 mostra uma comparação entre os diferentes critérios para determinar a tensão limite de escoamento. Deve-se observar que para o primeiro critério, deformação igual a um, o modelo apresenta uma tensão menor que a experimental e que a quebra do gel ainda não se iniciou. Sendo que essa começa em uma tensão cerca de duas vezes maior que a verificada experimentalmente. Porém, tanto na Tabela 20 quanto na Figura 30, é possível perceber que, utilizando o terceiro critério, conservador, a tensão de quebra do modelo e a experimental são as mesmas.

**Tabela 20 - Comparação da tensão de quebra utilizando diferentes critérios para o modelo de Dullaert e Mewis (2006).**

$d\tau/dt$ [Pa/min]	4			8		
Critério	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]
Primeiro (Deformação = 1)	3,75	1,01	73,2	4,57	1,02	77,7
Segundo (Início da transição elástica/viscosa)	3,40	6,96	-104,7	3,53	7,03	-99,2
Terceiro (Conservador)	9,41	9,39	0,2	10,41	10,44	-0,3

As principais diferenças dos resultados do modelo para os experimentais estão na região elástica e na deformação de quebra do gel, que é a mesma para ambas as taxas, mas são duas ordens de grandeza superior ao valor experimental.

Porém, conforme era esperado, a menor variação de tensão com o tempo proporcionou uma quebra num instante posterior e em uma tensão menos elevada.

Portanto, para a faixa de 30 a 100 s<sup>-1</sup>, o modelo apresentou coerência e resultados qualitativamente bons nos Testes Tipo 1 e 3, sendo especialmente preciso nos valores de predominância viscosa e na tensão de quebra do gel. Os pontos negativos são a falta de precisão no instante de quebra para o Teste Tipo 1 e a grande diferença da deformação de quebra, quando utilizado o primeiro critério para o teste de rampa de tensão.

#### Teste Tipo 4

A partir dos parâmetros selecionados anteriormente, o modelo foi submetido ao Teste Tipo 4 (i.e, patamar de tensão). Porém, o programa não foi capaz de convergir devido às inúmeras oscilações numéricas. Isso pode ser justificado pelas Equações (3.15) e (3.17), reescritas a seguir para facilitar o entendimento:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \left(\frac{1}{t^\beta}\right) \left[ -C_8 \dot{\gamma} \lambda + C_9 \dot{\gamma}^{0.5} (1-\lambda) + C_{10} (1-\lambda) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{d\tau_{y,el}}{dt} = \left(\frac{C_{11}}{t}\right)^\beta \left[ \sigma(\lambda, \dot{\gamma}) \tau_{y,RP} - \sigma_{RP}(\dot{\gamma}) \tau_{y,el} \right] \quad (3.17)$$

Essas equações mostram no lado direito a variável tempo no denominador, portanto é possível que para os parâmetros selecionados em tempos muito próximos de zero, as equações diferenciais não possam ser resolvidas.

### 5.2.2 Mendes e Thompson (2013)

No capítulo anterior o modelo de Mendes e Thompson (2013) foi ajustado e apresentou excelentes resultados. O valor de equilíbrio da tensão teve erros inferiores a 5% e os resultados para pico de tensão e instante de quebra foram bastante parecidos com aqueles observados experimentalmente. Porém, dois conjuntos distintos de ajuste em regime transiente foram obtidos no Capítulo 4, um deles ( $P_1$ ) favorece a previsão do pico de tensão enquanto o outro ( $P_2$ ) tem a capacidade de melhor representar os instantes de quebra do material. Na presente seção, ambos os conjuntos são avaliados. Os valores associados a cada um estão apresentados na Tabela 21.

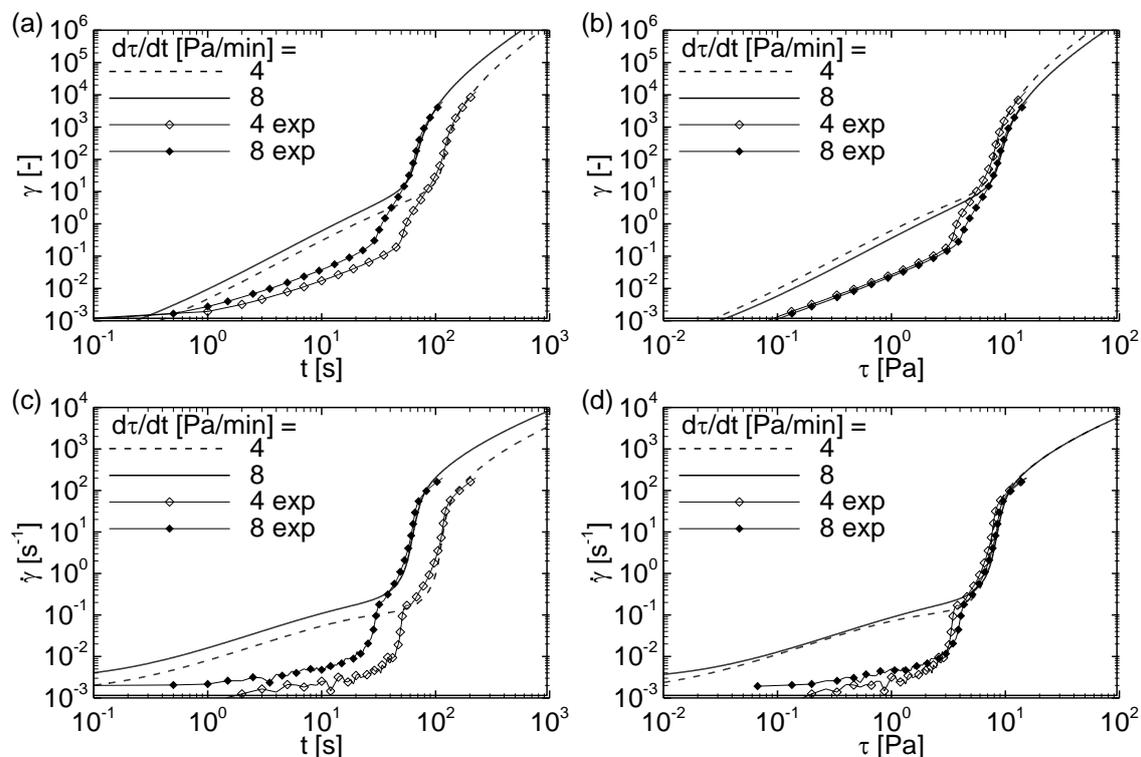
**Tabela 21 – Conjunto de parâmetros ajustados para o modelo de Mendes e Thompson (2013).**

Conjunto	$\nu$ [-]	$x$ [-]	$t_{eq}$ [s]	$G_0$ [Pa]	$C_{13}$ [-]	$\lambda(t=0)$ [-]
$P_1$	0,254	15,7	20,2	1,17	39,5	6,67
$P_2$	0,0183	11,4	9,51	1,88	43,1	6,74

### Teste Tipo 3

A partir do conjunto de parâmetros  $P_1$ , o modelo foi submetido ao teste de rampa de tensão de cisalhamento (Teste Tipo 3). Assim como realizado para o modelo anterior o comportamento do modelo é analisado a partir da resposta de deformação e da taxa de cisalhamento calculadas. Os resultados para as variações de tensão com o tempo de 4 e 8 Pa/min são apresentados na Figura 31. Na Figura 31(a) e na Figura 31(b) é possível verificar que a deformação elástica calculada pelo modelo é duas ordens de grandeza maior do que a obtida experimentalmente. Essa diferença começa a diminuir quando a curva experimental atinge a deformação de 0,1 e tem-se início a quebra do gel do material. O modelo, no entanto, inicia o processo de quebra para deformação de 10. Ainda assim, o resultado nos pontos de predominância viscosa é muito próximo. A Figura 31(c) e a Figura 31(d) permitem visualizar que a taxa de cisalhamento tanto na parte elástica quanto no instante em

que a quebra se inicia são menores experimentalmente. Porém, a partir da taxa de cisalhamento de  $0,1\text{s}^{-1}$  as curvas começam a ser coincidentes. Isso perdura até o fim do teste na região de predominância viscosa.



**Figura 31 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 3 com conjunto de parâmetros  $P_1$ .**

Ao comparar na Figura 31 os resultados experimentais e calculados, nota-se que o comportamento experimental é bem representado pelo modelo. Para a taxa de  $4\text{Pa/min}$ , a quebra ocorre depois, porém o valor nominal da tensão é maior. Ademais, a precisão na parte com predominância viscosa é evidente e percebe-se que a deformação de quebra é a mesma nas duas tensões. Novamente, ao utilizar o terceiro critério, mais conservador, para o cálculo da tensão de quebra, nota-se que os valores do modelo se aproximam dos valores experimentais, vide resultado e comparação de critérios na Tabela 22. Nota-se ainda, que utilizando o segundo critério, correspondente ao final da região de predominância elástica, as tensões limite de escoamento do modelo são cerca de duas vezes superiores às medidas experimentalmente.

**Tabela 22 – Comparação da tensão de quebra utilizando critério experimental e conservador para o modelo de Mendes e Thompson (2013) para conjunto de parâmetros  $P_1$ .**

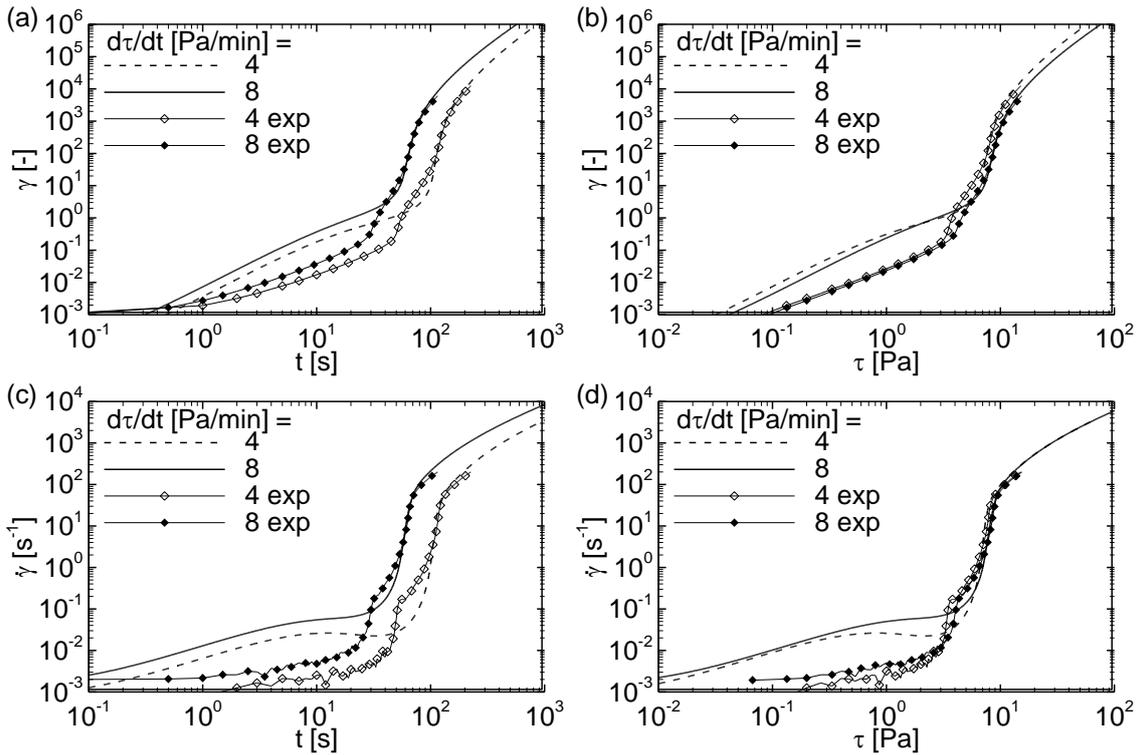
$d\tau/dt$ [Pa/min]	4			8		
Critério	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]
Primeiro (Deformação = 1)	3,75	1,33	64,5	4,57	1,77	61,3
Segundo (Início da transição elástica/viscosa)	3,40	7,13	-109,7	3,53	7,20	-104
Terceiro (Conservador)	9,41	9,39	-0,4	10,41	10,44	0,4

As mesmas simulações foram realizadas para o conjunto de parâmetros  $P_2$  e os resultados são apresentados na Figura 32. Pela análise dessas figuras, nota-se que os resultados foram muito similares àqueles obtidos para o conjunto de parâmetros  $P_1$ . Quanto maior a variação de tensão com o tempo mais rápida é a quebra e menor é a tensão em que essa ocorre. Além disso, a resposta de predominância viscosa é similar ao obtido experimentalmente. Porém, a deformação de quebra diminuiu, e está mais próxima do observado experimentalmente.

A Tabela 23 apresenta a comparação dos resultados das tensões limite de escoamento calculadas e experimentais. Nota-se que, assim como para o conjunto de parâmetros  $P_1$ , a única tensão próxima foi obtida utilizando o terceiro critério. Porém, a tensão de quebra utilizando o primeiro critério apresenta uma diferença menor com o conjunto  $P_2$ .

**Tabela 23 – Comparação da tensão de quebra utilizando critério experimental e conservador para o modelo de Mendes e Thompson (2013) para conjunto de parâmetros  $P_2$ .**

$d\tau/dt$ [Pa/min]	4			8		
Critério	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]	$\tau_{quebra,exp}$ [Pa]	$\tau_{quebra,mod}$ [Pa]	Diferença [%]
Primeiro (Deformação = 1)	3,75	2,96	21	4,57	2,77	39,4
Segundo (Início da transição elástica/viscosa)	3,40	5,73	-68,5	3,53	6,41	-81,6
Terceiro (Conservador)	9,41	9,39	-0,4	10,41	10,44	0,4



**Figura 32 – Comparação entre os resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 3 com conjunto de parâmetros  $P_2$ .**

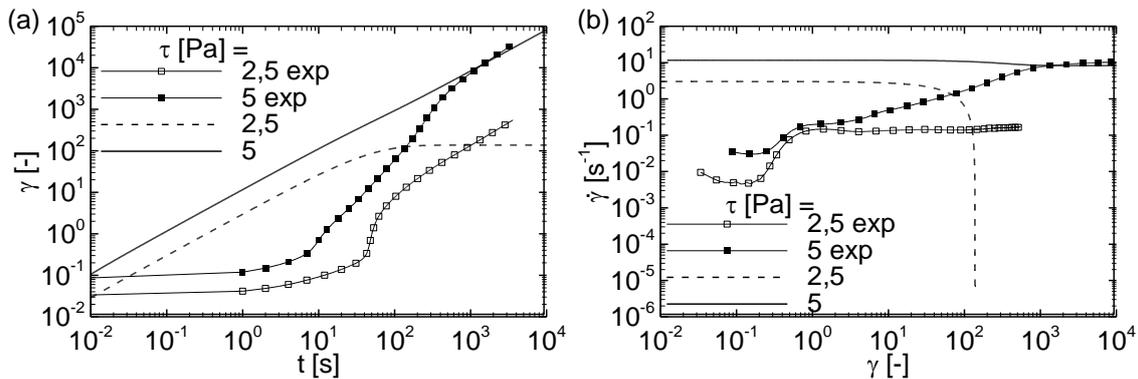
Assim, é possível concluir que para o Teste Tipo 3, o modelo apresentou concordância na região de predominância viscosa e o formato da curva é parecido com o experimental. Contudo, a deformação de quebra da estrutura do material é mais alta que a observada experimentalmente. Além disso, a tensão limite de escoamento não foi bem representada.

Embora ambos os conjunto de parâmetros tenham mostrado o mesmo comportamento, o conjunto  $P_2$  chega mais perto do valor de deformação e tensão de quebra experimental. Todavia, utilizando o terceiro critério, nota-se que os resultados experimentais e do modelo são iguais.

#### Teste Tipo 4

A partir do conjunto de parâmetros  $P_1$ , o modelo foi submetido ao Teste Tipo 4 para as tensões constantes  $\tau = 2,5$  e 5 Pa. As respostas obtidas são apresentadas na Figura 33. Nota-se na Figura 33(a), para a tensão de 2,5 Pa calculada pelo modelo, que a deformação cresce continuamente, com valores de até duas ordens de grandeza superiores aos experimentais, até o ponto na qual fica estável,

atingindo um patamar. Portanto, não ocorre a quebra do gel. A Figura 33(b) mostra que a taxa de cisalhamento até a deformação igual a 100 é superior à experimental, em seguida ocorre uma acentuada queda da taxa de cisalhamento que tende a um valor numericamente muito baixo e próximo a zero, isso indica que o material não superou a tensão limite de escoamento e, portanto, parou de escoar.

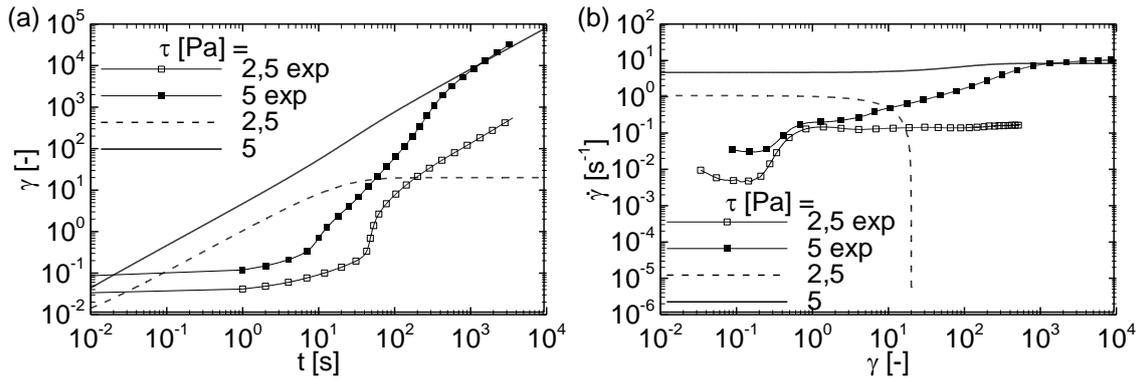


**Figura 33 – Comparação dos resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros  $P_1$ .**

Analisando o resultado da tensão de 5 Pa na Figura 33(a), observa-se um crescimento praticamente linear da deformação, porém, ao analisar a Figura 33(b), percebe-se que a taxa de cisalhamento tem uma pequena queda em valor, o que é contrário ao visto experimentalmente. Portanto, não existe um elevado gradiente de taxa de cisalhamento ou deformação que seria a indicação de que o gel quebrou. Nesse caso é possível interpretar que a tensão de 5 Pa é muito superior a tensão limite de escoamento e a estrutura do material quebra imediatamente após o início do teste.

Apesar disso, é possível verificar na Figura 33(a) e (b) que, apesar do modelo apresentar resultados incoerentes, para a tensão de 5 Pa os valores de deformação e taxa de cisalhamento de regime permanente são similares aos experimentais.

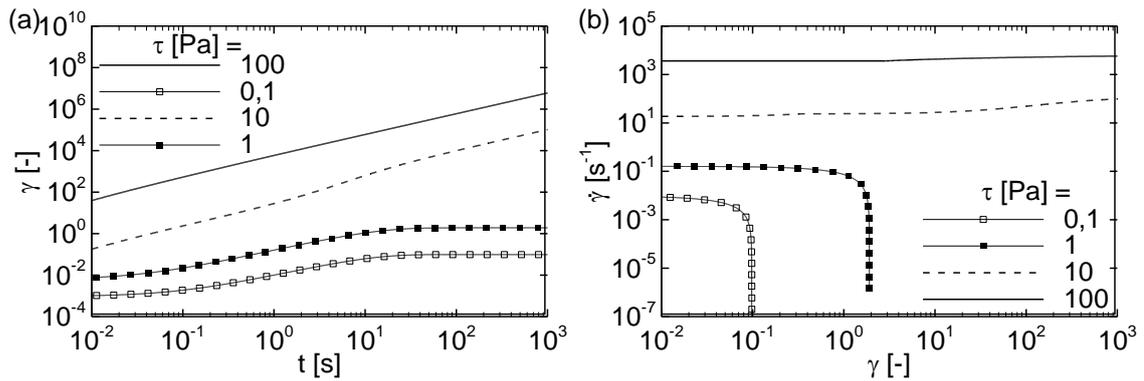
A comparação do modelo utilizando o conjunto de parâmetros  $P_2$  será repetida. Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 34 e são similares aos resultados obtidos com o conjunto de parâmetros  $P_1$ .



**Figura 34 – Comparação dos resultados experimentais e do modelo de Mendes e Thompson (2013) para o Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros  $P_2$ .**

Portanto, para a tensão de 2,5Pa ocorre a presença de uma tensão limite de escoamento, ao passo que para 5 Pa o valor de regime permanente é similar. Porém, contrariamente ao observado para  $P_1$ , a taxa de cisalhamento cresce de 5 para  $8 s^{-1}$  no instante de 10 s. Contudo, isso não significa que o material quebrou nesse ponto, pois na Figura 34(a) não é perceptível uma mudança brusca na deformação.

Como os resultados apresentados para os dois conjuntos de parâmetros são incoerentes, principalmente na região de quebra do gel, se comparados aos experimentais, mais uma análise será realizada com o conjunto de parâmetros  $P_2$ . Novamente, será simulado o Teste Tipo 4, porém com as tensões de  $\tau = 0,1; 1; 10$  e  $100$  Pa. Os resultados são apresentados na Figura 35, na qual nota-se que para as tensões de 0,1 e 1 Pa o material não supera a tensão limite de escoamento e, portanto, não escoam. Já para a tensão de 100 Pa, não há variação perceptível da taxa de cisalhamento, ou seja, é possível que a tensão aplicada ao material seja muito superior a tensão limite de escoamento e que a estrutura do gel seja quebrada imediatamente após o início do teste. Contudo, para a tensão de 10 Pa ocorre uma variação na taxa de cisalhamento de 20 a  $100 s^{-1}$ , entre os instantes de 1 e 10 s, o que seria um indício da quebra do gel.



**Figura 35 – Resultado do modelo de Mendes e Thompson (2013) ao Teste Tipo 4 com conjunto de parâmetros  $P_2$  para tensões de 0,1, 1, 10 e 100Pa.**

O modelo de Thompson apresentou bons resultados quantitativos para o Teste Tipo 1 (controle de taxa de cisalhamento) e bem próximos do experimental para o Teste Tipo 3 (rampa de tensão), contudo, com os conjuntos de parâmetros utilizados, não foi possível reproduzir o comportamento observado experimentalmente para os Testes Tipo 4 (tensão constante).

### Síntese do Capítulo 5

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais para testes de tensão controlada. Em seguida dois modelos foram avaliados. O modelo de Dullaert e Mewis (2006) apresenta coerência para a faixa testada e reproduz os resultados de forma qualitativa, porém são notadas diferenças no comportamento transiente e na representação da quebra de gel. A presença do tempo no denominador da equação cinética impossibilita a solução numérica do teste de patamar de tensão, pois esse termo causa oscilação numérica. O modelo de Mendes e Thompson (2013) apresenta bons resultados quantitativos para testes de taxa de cisalhamento controlada. Em testes de rampa de tensão, os resultados para a parte elástica diferem dos vistos experimentalmente, mas na região de predominância viscosa há uma similaridade na resposta. O último teste realizado, patamar de tensão, mostra que para os parâmetros calibrados o modelo não é capaz de representar a quebra de gel. Portanto, a quebra do gel não é bem representada quantitativamente por nenhum dos modelos, a tensão limite de escoamento representada pelo fim da região elástica é consideravelmente maior nos cálculos do que experimentalmente.

## 6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram realizadas avaliações da quebra de gel de fluidos de perfuração durante o reinício do escoamento através da simulação de testes reológicos a partir de modelos matemáticos encontrados na literatura aberta.

Dos diversos modelos matemáticos disponíveis na literatura, optou-se por aqueles que utilizam a abordagem microestrutural indireta que se propõe a descrever a física da quebra de gel e utiliza um parâmetro estrutural para contabilizar o nível da estrutura do material. A partir desses, foram selecionados três modelos para serem avaliados quanto a quebra de gel: Zitny *et al.* (1980), Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013). As formulações matemáticas desses modelos foram apresentadas e foram desenvolvidas as equações para cálculo em regime transiente e em equilíbrio.

Na sequência foi desenvolvido um algoritmo utilizando o *software* Matlab para solucionar o conjunto de equações diferenciais de cada modelo, simular testes reológicos e ajustar os parâmetros do modelo aos dados experimentais. Esse algoritmo permitiu o ajuste dos modelos matemáticos selecionados a testes reológicos com controle de taxa de cisalhamento.

Os resultados mostraram que o modelo de Zitny *et al.* (1980) é capaz de representar o comportamento de equilíbrio para a faixa em que foi calibrado. Porém, o comportamento transiente não é bem representado, o que acontece por esse ser determinado apenas com o ajuste dos parâmetros em regime permanente. Além disso, o modelo em análise não consegue prever o instante de quebra ou o valor de pico de tensão para nenhuma das taxas de cisalhamento testadas. Por isso, conclui-se que o modelo de Zitny *et al.* (1980) com os parâmetros calibrados para o fluido de perfuração testado não é capaz de representar a quebra de gel observada experimentalmente.

O modelo de Dullaert e Mewis (2006) apresenta um bom resultado para o ajuste de equilíbrio. Porém, novamente o comportamento transiente não é bem representado. Por isso, baseado no trabalho de Rocha (2010), é proposta a dependência da constante de potenciação  $\beta$  em função da taxa de cisalhamento e

resultados melhores são obtidos. Contudo, quando uma função de potenciação genérica é utilizada para representar essa dependência, os resultados transientes mais uma vez divergem. Entretanto, para uma faixa de taxas de cisalhamento de 30 a 100  $s^{-1}$ , o valor do pico de quebra foi bem representado e, portanto, o modelo de Dullaert e Mewis (2006) foi selecionado para a avaliação final.

O modelo de Mendes e Thompson (2013) apresenta bons resultados quando comparado com testes de taxa de cisalhamento controlada. Com esse modelo foram realizados dois ajustes: o primeiro com apenas a curva de 50  $s^{-1}$  e o segundo com múltiplas curvas (5, 20, 40 e 100  $s^{-1}$ ). Os resultados para o primeiro conjunto de parâmetros mostram diferenças quando comparados aos resultados experimentais inferiores a 10% no valor dos picos de tensão e boa previsão do instante de quebra nos testes com taxa de cisalhamento superior a 50  $s^{-1}$ . O segundo conjunto de parâmetros evidencia boa capacidade na previsão de instantes de quebra para uma faixa mais ampla que se inicia em 20  $s^{-1}$ . Porém, a quebra de gel representada pelo pico de tensão apresenta diferenças maiores que as obtidas com o primeiro conjunto de parâmetros. Portanto, devido aos bons resultados transientes, o modelo de Mendes e Thompson (2013) também foi selecionado para a avaliação final.

Em seguida os modelos de Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013) foram submetidos aos testes de rampa de tensão e patamar de tensão para serem avaliados quanto à quebra do gel do fluido de perfuração testado.

Para o teste de rampa de tensão, o modelo de Dullaert e Mewis (2006) apresentou incoerências na parcela de deformação elástica, as quais ficaram acima do resultado experimental. Ainda foi possível perceber que o valor de início de quebra de gel do modelo era 100 vezes maior que o considerado experimentalmente (deformação igual a um). A tensão de quebra só apresenta um valor coerente com o experimental quando é utilizado um critério conservador. A concordância do modelo com os resultados experimentais é bastante boa na região de predominância viscosa. O teste de patamar de tensão não foi realizado com sucesso devido às oscilações numéricas provavelmente causadas pela variável tempo no denominador das equações cinética e diferencial da tensão elástica. Conclui-se que o modelo de Dullaert e Mewis (2006) com os parâmetros calibrados para o fluido de perfuração testado não conseguiu reproduzir bem todos os testes reológicos de forma

quantitativa. Porém para os testes de taxa de cisalhamento controlada na faixa de 30 a 100 s<sup>-1</sup>, os resultados foram satisfatórios.

O modelo de Mendes e Thompson (2013), para o teste de rampa de tensão, apresentou resultados bons na região de predominância viscosa. Porém, o comportamento elástico do modelo superestima os valores iniciais de taxa de cisalhamento e deformação. O modelo só volta a apresentar coerência a partir da transição, contudo tanto a tensão limite de escoamento quanto a deformação de quebra do gel não exibem um bom resultado. O teste de patamar foi realizado e o resultado mostrado foi diferente do observado experimentalmente. A menor tensão de cisalhamento não apresentou escoamento. Ao passo que a maior tensão de cisalhamento apresentou um comportamento praticamente linear, como se a quebra do gel tivesse ocorrido imediatamente após o início do teste.

Conclui-se que o modelo de Mendes e Thompson (2013) apresentou os melhores resultados para o teste de taxa de cisalhamento controlada, pois foi capaz de representar todas as curvas e teve relativa precisão no instante de quebra.

Para os testes de tensão controlada, apesar da região de predominância viscosa ter sido bem representada pelos modelos de Dullaert e Mewis (2006) e Mendes e Thompson (2013), nenhum desses modelos conseguiu reproduzir bem a quebra do gel. Aparentemente, isso pode estar relacionado à:

- a) Deficiências inerentes aos modelos na modelagem da região elásticas e/ou transição entre as regiões elástica e viscosa;
- b) Calibração do modelo em taxas de cisalhamento superiores aquelas verificadas experimentalmente na quebra de gel para testes de tensão controlada.

### **Sugestões de Trabalhos Futuros**

Para continuação do trabalho seguem-se as seguintes sugestões:

- a) Ajuste dos modelos utilizando testes de tensão controlada;
- b) Ajuste dos modelos utilizando tanto testes de tensão controlada quanto de taxa de cisalhamento controlada;

- c) Obtenção de resultados em uma faixa maior de tensão e taxa de cisalhamento para melhorar as calibrações;
- d) Ajuste e avaliação de mais modelos encontrados na literatura e expostos nesse trabalho;
- e) Proposição de um novo modelo que atenda as observações obtidas de testes experimentais, como a quebra na deformação igual a um.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDROU, A.N.; FLORIDES, G.C.; GEORGIU, G.C., **Squeeze flow of semi-solid slurries**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 192, p. 103-115, 2013.

ARDAKANI, H.A.; MITSOULIS, E.; HATZIKIRIAKOS, S.G. **Thixotropic flow of toothpaste through extrusion dies**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 166, n. 21, p. 1262-1271, 2011.

BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Elsevier, 1989.

BARNES, H.A. **Thixotropy—a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 70, n. 1, p. 1-33, 1997.

BAUER, W.H.; COLLINS, E. A. **Rheology: Theory and Applications**. Academic Press, New York, v. 4, p. 423-459, 1967.

BERIS, A.N.; STIAKAKIS, E.; VLASSOPOULOS, D. **A thermodynamically consistent model for the thixotropic behavior of concentrated star polymer suspensions**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 152, n. 1, p. 76-85, 2008.

CHENG, D.C.H.; EVANS, F. **Phenomenological characterization of the rheological behaviour of inelastic reversible thixotropic and antithixotropic fluids**. British Journal of Applied Physics, v. 16, n. 11, p. 1599, 1965.

COUSSOT, P.; LEONOV, A.I.; PIAU, J.M. **Rheology of concentrated dispersed systems in a low molecular weight matrix**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 46, n. 2, p. 179-217, 1993.

COUSSOT, P.; NGUYEN, Q.D.; HUYNH, H.T.; BONN, D. **Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids**. Journal of rheology, v. 46, p. 573, 2002.

DARLEY, H.C.H. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. Access Online via Elsevier, 1988.

DULLAERT, K.; MEWIS, J. **A structural kinetics model for thixotropy**. Journal of non-newtonian fluid mechanics, v. 139, n. 1, p. 21-30, 2006.

ELLIOTT, J.H.; GANZ, A.J. **Modification of food characteristics with cellulose hydrocolloids I: Rheological Characterization of an Organoleptic Property (Unctuousness)\***. Journal of Texture Studies, v. 2, n. 2, p. 220-229, 1971.

ELLIOTT, J.H.; GREEN, C.E. **Modification of food characteristics with cellulose hydrocolloids II: The Modified Bingham Body-A Useful Rheological Model\***. Journal of Texture Studies, v. 3, n. 2, p. 194-205, 1972.

ELLIOTT, J.H.; GANZ, A.J. **Salad Dressings – Preliminary Rheological Characterization**. Journal of Texture Studies, v. 8, n. 3, p. 359-371, 1977.

FONG, C.F.; TURCOTTE, G.; DE KEE, D. **Modelling steady and transient rheological properties**. Journal of food engineering, v. 27, n. 1, p. 63-70, 1996.

FREUNDLICH, H. **Über Thixotropie**. Colloid & Polymer Science, v. 46, n. 4, p. 289-299, 1928.

GREEN, H.; WELTMANN, R.N. **Equations of thixotropic breakdown for rotational viscometer**. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, v. 18, n. 3, p. 167-172, 1946.

GOODEVE, C.F. **A general theory of thixotropy and viscosity**. Transactions of the Faraday Society, v. 35, p. 342-358, 1939.

JARNY, S.; ROUSSEL, N.; LE ROY, R.; COUSSOT, P. **Modelling thixotropic behavior of fresh cement pastes from MRI measurements**. Cement and Concrete Research, v. 38, n. 5, p. 616-623, 2008.

LUMMUS, J.L.; AZAR, J.J. **Drilling fluids optimization: a practical field approach**. 1986.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e escoamento dos fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. Interciência, 2002.

MCMILLEN, E.L. **Thixotropy and Plasticity. I—The Measurement of Thixotropy.** Journal of Rheology, v. 3, p. 75, 1932.

DE SOUZA MENDES, P.R. **Thixotropic elasto-viscoplastic model for structured fluids.** Soft Matter, v. 7, n. 6, p. 2471-2483, 2011.

DE SOUZA MENDES, P.R.; THOMPSON, R.L. **A unified approach to model elasto-viscoplastic thixotropic yield-stress materials and apparent yield-stress fluids.** Rheologica Acta, p. 1-22, 2013.

MEWIS, J. **Thixotropy-a general review.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 6, n. 1, p. 1-20, 1979.

MEWIS, J.; WAGNER, N.J. **Thixotropy.** Advances in Colloid and Interface Science, v. 147, p. 214-227, 2009.

MOORE, F. **The rheology of ceramic slips and bodies.** Trans. Br. Ceram. Soc, v. 58, p. 470-494, 1959.

MUJUMDAR, A.; BERIS, A.N.; METZNER, A.B. **Transient phenomena in thixotropic systems.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 102, n. 2, p. 157-178, 2002.

PETERFI, T. **Arch. Entwicklungmech.** Organ, v. 112, p. 680, 1927.

PETROBRAS. Relatório Anual de 2007. Disponível online, 2007.

PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S. A. Disponível em: <[www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)> Acesso em: 20 maio de 2013.

PHAN-THIEN, N.; SAFARI-ARDI, M.; MORALES-PATIÑO, A. **Oscillatory and simple shear flows of a flour-water dough: a constitutive model.** Rheologica Acta, v. 36, n. 1, p. 38-48, 1997.

PRYCE-JONES, J. **Experiments on thixotropic and other anomalous fluids with a new rotation viscometer.** Journal of Scientific Instruments, v. 18, n. 3, p. 39, 1941.

ROCHA, L.L.V. **Modelagem do reinício do escoamento em um fluido de perfuração tixotrópico**. Dissertação de mestrado, UTFPR, Curitiba, 176 p., 2010.

ROUSSEL, N.; LE ROY, R.; COUSSOT, P. **Thixotropy modelling at local and macroscopic scales**. Journal of Non-newtonian Fluid mechanics, v. 117, n. 2, p. 85-95, 2004.

ROUSSEL, N. **A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications**. Cement and Concrete Research, v. 36, n. 10, p. 1797-1806, 2006.

SCHALEK, F.E.; SZEGVARY, A. **Ueber Eisenoxydgallerten**. Colloid & Polymer Science, v. 32, n. 5, p. 318-319, 1923.

SCHLUMBERGER LIMITED. **Schlumberger Excellence in Educational Development**, 2013. Disponível em: <<http://www.seed.slb.com>> Acesso em: 20 de agosto de 2013.

SLIBAR, A., PASLAY, P.R. **Retarded flow of Bingham materials**. J Appl Mech, v. 26, p. 107-113, 1959.

SLIBAR, A.; PASLAY, P.R. **On the analytical description of the flow of thixotropic materials**. Second-order effects in elasticity, plasticity and fluid dynamics. Pergamon Press, Oxford, p. 314-330, 1964.

SUETSUGU, Y.; WHITE, J.L. **A theory of thixotropic plastic viscoelastic fluids with a time-dependent yield surface and its comparison to transient and steady state experiments on small particle filled polymer melts**. Journal of non-newtonian fluid mechanics, v. 14, p. 121-140, 1984.

THOMAS, J.E.; TRIGGIA, A.A.; CORREIA, C.A.; FILHO, C.L.; XAVIER, J.A.D.; MACHADO, J.C.V.; FILHO, J.E.S.; 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 ed. XVI, 271 p., Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004.

YZIQUEL, F.; CARREAU, P.J.; MOAN, M.; TANGUY, P.A. **Rheological modeling of concentrated colloidal suspensions**. Journal of non-newtonian fluid mechanics, v. 86, n. 1, p. 133-155, 1999.

ZITNY, R.; HOUSKA, M.; SESTAK, J., **Rheological description of thixotropic fluids with applications to process analysis**, Journal of Food Engineering, v.2, p. 35-49, 1980.

## APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Nesse apêndice são apresentadas as descrições dos modelos matemáticos de diversos trabalhos disponíveis na literatura aberta.

### Coussot *et al.* (1993)

A equação constitutiva para esse modelo é a Equação (A.1), na qual é possível observar a presença das parcelas elástica e viscosa. É interessante notar que a parcela viscosa independe do parâmetro estrutural.

$$\sigma(\dot{\gamma}, t) = \sigma_{el}(\dot{\gamma}, t) + \eta_{\infty} \dot{\gamma} \quad (\text{A.1})$$

Sendo  $\eta_{\infty}$  a viscosidade a uma taxa de cisalhamento infinita. A parcela elástica é representada pela tensão elástica, a qual possui uma equação diferencial (Equação (A.2)) governando a evolução temporal.

$$\frac{1}{G_0} \frac{d\sigma_{el}}{dt} + \frac{\lambda^{-n} - 1}{n} \frac{\sigma_{el}}{\eta_{st,0}} = \dot{\gamma} \quad (\text{A.2})$$

Na qual  $G_0$ ,  $\eta_{st,0}$  e  $n$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade inicial, viscosidade hidrodinâmica inicial e um expoente constante. A dependência da parcela elástica ao parâmetro estrutural é evidenciada pela presença de  $\lambda$  na Equação (A.2). A evolução do parâmetro estrutural é governada pela Equação (A.3):

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{\exp\left[\frac{C_6}{1 + C_7 \frac{\eta_{st,0}}{\sigma_{y,0}} \dot{\gamma} |\lambda - \lambda_{RP}|}\right]} \left[ -\frac{\eta_{st,0}}{\sigma_{y,0}} \dot{\gamma} \lambda + (1 - \lambda) \right] \quad (\text{A.3})$$

Sendo  $\sigma_{y,0}$  a tensão limite de escoamento e  $C_6$  e  $C_7$  constantes arbitrárias. O valor em regime permanente do parâmetro estrutural é dado pela Equação (A.4), já o valor para a tensão elástica de equilíbrio pela Equação (A.5).

$$\lambda_{RP} = \frac{\sigma_{y,0}}{\eta_{st,0} \dot{\gamma}_{RP} + \sigma_{y,0}} \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_{el,RP} = \frac{n\dot{\gamma}_{RP}\eta_{st,0}}{\lambda_{RP}^{-n} - 1} = \frac{n\dot{\gamma}_{RP}\eta_{st,0}}{\left(\frac{\sigma_{y,0}}{\eta_{st,0}\dot{\gamma}_{RP} + \sigma_{y,0}}\right)^{-n} - 1} \quad (A.5)$$

Substituindo a Equação (A.5) na Equação (A.1), obtém-se a tensão em regime permanente:

$$\sigma_{RP} = \frac{n\dot{\gamma}_{RP}\eta_{st,0}}{\left(\frac{\sigma_{y,0}}{\eta_{st,0}\dot{\gamma}_{RP} + \sigma_{y,0}}\right)^{-n} - 1} + n_{\infty}\dot{\gamma}_{RP} \quad (A.6)$$

Para obter a função para a taxa de cisalhamento basta isolá-la na Equação (A.1), o que resulta:

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma(\dot{\gamma}, t) - \sigma_{el}(\dot{\gamma}, t)}{n_{\infty}} \quad (A.7)$$

Portanto, o modelo de Coussot *et al.* (1993) possui sete parâmetros:  $\eta_{\infty}$ ,  $G_0$ ,  $\eta_{st,0}$ ,  $n$ ,  $\sigma_{y,0}$ ,  $C_6$  e  $C_7$ .

### **Coussot *et al.* (2002)**

Os autores consideram a viscosidade instantânea como função apenas do estado momentâneo do material. Assim, a equação é representada por:

$$\eta = \eta_0 f(\lambda) \quad (A.8)$$

Sendo  $\eta_0$  a viscosidade a uma taxa de cisalhamento nula. Substituindo a Equação (A.8) na Equação (3.2):

$$\tau = \eta_0 f(\lambda) \dot{\gamma} \quad (A.9)$$

Isolando a taxa de cisalhamento, obtém-se:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0 f(\lambda)} \quad (A.10)$$

A equação que governa a evolução do parâmetro estrutural é simples e dada por:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{T_0} - \alpha\lambda\dot{\gamma} \quad (\text{A.11})$$

Sendo  $T_0$  e  $\alpha$ , respectivamente, o tempo característico e uma constante dependente do sistema. A primeira parcela representa a evolução espontânea da microestrutura, enquanto que a segunda a desestruturação da mesma. O valor do parâmetro estrutural em regime permanente é dado por:

$$\lambda_{RP} = \alpha\dot{\gamma}_{RP}T_0 \quad (\text{A.12})$$

O valor da tensão em regime permanente é representado por:

$$\tau_{RP} = \eta_0 f(\lambda_{RP}) \dot{\gamma}_{RP} \quad (\text{A.13})$$

Consequentemente, o modelo de Coussot *et al.* (2002) possui apenas três parâmetros:  $\eta_0$ ,  $T_0$  e  $\alpha$ .

#### **Roussel *et al.* (2004)**

Os autores baseiam-se no modelo de Coussot *et al.* (2002) e utilizam a Equação (A.11) para governar a evolução do parâmetro estrutural, por isso o valor desse parâmetro em regime permanente é o mesmo da Equação (A.12). Mas uma equação para a viscosidade é proposta:

$$\eta = \eta_0 (1 + \lambda^p) \quad (\text{A.14})$$

Na qual  $p$  é uma constante arbitrária. Substituindo a Equação (A.14) na Equação (3.2), obtém-se a equação constitutiva do modelo:

$$\tau = \eta_0 (1 + \lambda^p) \dot{\gamma} \quad (\text{A.15})$$

Isolando a taxa de cisalhamento na equação anterior:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0 (1 + \lambda^p)} \quad (\text{A.16})$$

O valor da tensão em regime permanente, Equação (A.17), é dado pela substituição da Equação (A.12) na Equação (A.15).

$$\tau_{RP} = \eta_0 \left[ 1 + (\alpha\dot{\gamma}_{RP}T_0)^p \right] \dot{\gamma}_{RP} \quad (\text{A.17})$$

Portanto, o modelo de Roussel *et al.* (2004) possui quatro parâmetros:  $p$ ,  $\eta_0$ ,  $T_0$  e  $\alpha$ .

### Roussel (2006)

O autor baseia-se nos trabalhos de Coussot *et al.* (2002) e Roussel *et al.* (2004) para propor uma equação mais genérica à evolução do parâmetro estrutural, Equação (A.18), e adicionar um termo de Lei de Potência para a equação constitutiva, Equação (A.19).

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{T_0 \lambda^q} - \alpha \lambda \dot{\gamma} \quad (\text{A.18})$$

$$\tau = (1 + \lambda) \tau_{y,0} + K_2 \dot{\gamma}^r \quad (\text{A.19})$$

Nas quais  $T_0$  e  $\tau_{y,0}$  são, respectivamente, o tempo característico e a tensão limite de escoamento e  $\alpha$ ,  $q$ ,  $K_2$  e  $r$  são constantes arbitrárias dependentes do modelo.

Isolando a taxa de cisalhamento na Equação (A.19):

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{\tau - (1 + \lambda) \tau_{y,0}}{K_2} \right)^{\frac{1}{r}} \quad (\text{A.20})$$

Da Equação (A.18), considerando a derivada temporal como nula, resulta o valor de regime permanente para o parâmetro estrutural:

$$\lambda_{RP} = (\alpha \dot{\gamma}_{RP} T_0)^{\frac{1}{q}} \quad (\text{A.21})$$

Substituindo a expressão da Equação (A.21) na Equação (A.19):

$$\tau_{RP} = \left[ 1 + (\alpha \dot{\gamma}_{RP} T_0)^{\frac{1}{q}} \right] \tau_{y,0} + K_2 \dot{\gamma}_{RP}^r \quad (\text{A.22})$$

Dessa forma, o modelo de Roussel (2006) possui seis parâmetros:  $T_0$ ,  $\tau_{y,0}$ ,  $\alpha$ ,  $q$ ,  $K_2$  e  $r$ .

### Beris *et al.* (2008)

A equação constitutiva para esse modelo é dada pela Equação

$$\tau = \tau_{el} + \tau_v = G_0(1-\xi)(c-\delta) + \xi K_3 \dot{\gamma}^s \quad (\text{A.23})$$

Na qual  $G_0$  é o módulo de elasticidade inicial,  $K_3$  e  $s$  são constantes arbitrárias dependentes do modelo e  $c$ ,  $\delta$  e  $\xi$  são, respectivamente, tensor de conformação adimensional da estrutura, matriz identidade e parâmetro adimensional de movimento.

Isolando a taxa de cisalhamento na Equação (A.23):

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{\tau - G_0(1-\xi)(c-\delta)}{\xi K_3} \right)^{\frac{1}{s}} \quad (\text{A.24})$$

A equação para a evolução do parâmetro adimensional de movimento, o qual varia de zero (para uma estrutura virgem) até dois (para uma estrutura totalmente desestruturada), é:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{1}{t_{eff}} \left[ \left( 1 - \frac{\xi}{\xi_\infty} \right) \lambda_0 \dot{\gamma} - \xi \right] \quad (\text{A.25})$$

Sendo  $t_{eff}$ ,  $\xi_\infty$  e  $\lambda_0$ , respectivamente, o tempo de relaxação efetivo, o parâmetro adimensional de movimento a taxa de cisalhamento infinita e o tempo de relaxação inicial. O valor de regime permanente para o parâmetro adimensional de movimento é dado por:

$$\xi_{RP} = \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{1 + \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\xi_\infty}} \quad (\text{A.26})$$

Assim, a tensão de regime permanente poderá ser representada pela Equação (A.27):

$$\tau_{RP} = G_0 \left( 1 - \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{1 + \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\xi_\infty}} \right) (c_{RP} - \delta) + \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{1 + \frac{\lambda_0 \dot{\gamma}_{RP}}{\xi_\infty}} K_3 \dot{\gamma}_{RP}^s \quad (\text{A.27})$$

Logo, o modelo de Beris *et al.* (2008) possui seis parâmetros:  $G_0$ ,  $K_3$ ,  $s$ ,  $t_{eff}$ ,  $\xi_\infty$  e  $\lambda_0$ .

### Ardakani *et al.* (2011)

Os autores propõe uma equação constitutiva, Equação (A.28), com um termo para representar a tensão limite de escoamento que não está ligada ao parâmetro estrutural e outro para refletir a resposta viscosa dependente da estrutura.

$$\tau = \tau_{y,0} \left[ 1 - \exp(-C_{12}\dot{\gamma}) \right] + (1 + \lambda) \eta_{\infty} \dot{\gamma} \quad (\text{A.28})$$

Sendo  $\tau_{y,0}$  e  $\eta_{\infty}$ , respectivamente, a tensão limite de escoamento e a viscosidade para uma taxa de cisalhamento infinita e  $C_{12}$  uma constante arbitrária dependente do sistema.

A equação que representa a evolução temporal do parâmetro estrutural é igual à Equação (3.5) do modelo de Moore (na qual  $C_3$  e  $C_4$  são constantes arbitrárias). Assim, o valor em regime permanente para o parâmetro estrutural será dado pela Equação (3.6). Substituindo esse valor na Equação (A.28), obtém-se o valor de equilíbrio para a tensão:

$$\tau_{RP} = \tau_{y,0} \left[ 1 - \exp(-C_{12}\dot{\gamma}_{RP}) \right] + \left( 1 + \frac{C_4}{C_3\dot{\gamma}_{RP} + C_4} \right) \eta_{\infty} \dot{\gamma}_{RP} \quad (\text{A.29})$$

Dessa forma, o modelo de Ardakani *et al.* (2011) possui cinco parâmetros:  $\tau_{y,0}$ ,  $\eta_{\infty}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_3$  e  $C_4$ .

### Alexandrou *et al.* (2013)

Os autores propõe uma equação constitutiva (Equação (A.30)) baseada num fluido de Bingham. O primeiro fator é parecido com o termo esquerdo da Equação (A.28) de Ardakani *et al.* (2011) sendo a diferença representada pela dependência da tensão limite de escoamento ao parâmetro estrutural (Equação (A.31)).

$$\tau = \left\{ \frac{\tau_y \left[ 1 - \exp(-C_{13}\dot{\gamma}) \right]}{\dot{\gamma}} + \mu \right\} \dot{\gamma} \quad (\text{A.30})$$

$$\tau_y = \tau_{y,0} \lambda \quad (\text{A.31})$$

Sendo  $\tau_{y,0}$  e  $\mu$ , respectivamente, a tensão limite de escoamento e a viscosidade plástica e  $C_{13}$  uma constante arbitrária dependente do sistema.

A Equação (A.32) é a que governa a evolução do parâmetro estrutura. Sendo essa semelhante à Equação (3.5) de Moore (1959) com a adição de um termo exponencial, dependente da taxa de cisalhamento, no termo de desestruturação.

$$\frac{d\lambda}{dt} = -C_{14}\dot{\gamma}\lambda \exp(C_{15}\dot{\gamma}) + C_{16}(1-\lambda) \quad (\text{A.32})$$

Na qual  $C_{14}$ ,  $C_{15}$  e  $C_{16}$  são constantes arbitrárias dependentes do sistema.

O valor de equilíbrio do parâmetro estrutural é obtido ao fazer a derivada da Equação (A.32) igual à zero, assim obtém-se:

$$\lambda_{RP} = \frac{C_{16}}{C_{14}\dot{\gamma}_{RP} \exp(C_{15}\dot{\gamma}_{RP}) + C_{16}} \quad (\text{A.33})$$

Substituindo a expressão da Equação (A.33) nas Equações (A.30) e (A.31), resulta a tensão de regime permanente:

$$\tau_{RP} = \left\{ \frac{\tau_{y,0} \frac{C_{16}}{C_{14}\dot{\gamma}_{RP} \exp(C_{15}\dot{\gamma}_{RP}) + C_{16}} [1 - \exp(-C_{13}\dot{\gamma})]}{\dot{\gamma}_{RP}} + \mu \right\} \dot{\gamma}_{RP} \quad (\text{A.34})$$

Dessa forma, o modelo de Alexandrou *et al.* (2013) possui seis parâmetros:  $\tau_{y,0}$ ,  $\mu$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{15}$  e  $C_{16}$ .

## APÊNDICE B – RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

O programa Matlab possui funções prontas destinadas à resolução de conjuntos de equações diferenciais. Essas funções recebem o nome de ode (Ordinal Differential Equation). A Tabela 24 mostra todas as funções “ode”, o tipo de problema o qual são destinadas e a ordem de precisão.

**Tabela 24 – Funções “ode” com tipo de problema e ordem de precisão.**

Solver	Tipo de Problema	Ordem de Precisão
ode45	Não rígido	Média
ode23	Não rígido	Baixa
ode113	Não rígido	Baixa até alta
ode15s	Rígido	Baixa até média
ode23s	Rígido	Baixa
ode23t	Moderadamente rígido	Baixa
ode23tb	Rígido	Baixa

Devido à variedade de conjunto de equações diferenciais propostos por cada autor, é provável que uma mesma função não apresente resultados bons para todos os modelos. Por isso, para cada modelo será realizado um teste comparando a solução de cada uma das funções “ode” com o resultado obtido utilizando o método implícito para resolver esse conjunto de equações. Essa última resposta será considerada como a correta, porém não será utilizada devido à alta dependência que possui em relação à malha temporal. A solução utilizando as funções acima não é tão dependente do passo de tempo.

Os critérios para a seleção da função “ode” serão:

- a) Resultado mais próximo da solução implícita;
- b) Menor tempo para cálculo dos resultados.

## APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO

Nesse Apêndice é apresentado a primeira página do artigo publicado no ENAHPE 2013 e ganhador do 3º lugar no Concurso *Student Poster Contest* categoria graduação

ENAHPE 2013

V ENCONTRO NACIONAL DE HIDRÁULICA DE  
POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS

5 A 8 DE AGOSTO DE 2013, TERESÓPOLIS, RJ

## COMPARASION OF DIFFERENT THIXOTROPY MODELS APPLIED TO GEL BREAKING OF DRILLING FLUIDS

Tainan Gabardo Miranda dos Santos<sup>1</sup> (UTFPR), Diogo Elias da Vinha Andrade (UTFPR)<sup>1</sup>,  
Cezar O. R. Negrão<sup>1</sup> (UTFPR), Andre L. Martins<sup>2</sup> (PETROBRAS)

<sup>1</sup>Laboratório de Ciências Térmicas – LACIT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba-PR, Brasil, 80230-901, e-mail: tainangab@gmail.com, diogoandrade@utfpr.edu.br, negrao@utfpr.edu.br

<sup>2</sup>Interação Rocha-Fluido – IRF, Centro de Pesquisa da PETROBRAS – CENPES, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 21941-915, e-mail: aleibsohn@petrobras.com.br

### ABSTRACT

*Drilling fluids present a thixotropic behavior and they usually gel when at rest. High pressures, which can damage the rock formation at the bottom of the well, are then required in order to break-up the gel when circulation is resumed. Thixotropy is defined as a continuous decrease of viscosity when flow is applied to a sample that has been previously at rest and the subsequent recovery of thixotropy in time when the flow is discontinued. The mechanism which controls the thixotropy phenomenon is not yet well defined and modeling still a challenge. The current paper presents a review about different thixotropy models found in the literature. The models are then submitted to rheological tests of ramp followed of shear rate plateau and shear stress plateau. Finally the models are qualitatively analyzed to check the results coherence for a drilling fluid.*

### 1. Introduction

The drilling process is fundamental in oil exploration. The rotary movement and the weight of the drill inside the well being drilled generate rock fragments which are removed by fluid. In recurrent stops from the fluid, it's necessary that those rock fragments remain in suspension as a possible deposition of this material at the bottom of the well may hinder or even derail the restart of the flow of the fluid. In order to keep the rock fragments in suspension, the drilling fluid, when at rest, passes from the liquid to the gel state. This characteristic is known as thixotropy.

The concept of thixotropy is not fully consolidated, however Mewis and Wagner [1] state that “thixotropy should be defined as the continuous decrease of viscosity with time when flow is applied to a sample that has been previously at rest and the subsequent recovery of viscosity in time when the flow is discontinued”. According to these authors, the following elements are essential to any proposition of thixotropy: (a) the concept must be based on the viscosity; (b) the viscosity is time dependent and decreases with time advance of the flow; (c) the process is reversible. It's notable on the work

available in literature that there is still no model capable of fully describing all features of thixotropy.

In the open literature, there are several models that aim to describe the thixotropic behavior [2-13]. These models were developed to simulate the thixotropic behavior of various materials, such as: human blood, paints, drilling fluid and food. The purpose of this paper is to evaluate qualitatively different thixotropic models and to check their physical consistency.

### 2. Literature Review

Thixotropic models are mathematical representations that seek to describe the mechanical behavior of materials. These models can be divided in three approaches. The first is phenomenological, in which the phenomenon is analyzed by fitting a mathematical equation to the response of the material to shearing. Normally, there is no physical concept involved in this approach.

A second approach is called direct microstructural, in which the structural level of the material is associated with the number of bonds between the material particles. Therefore, it is necessary that various simplifications are made, as