

COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA E DE RELAXAÇÃO DO GEL REOLÓGICO MAGNETO À BASE DE ÁGUA DE FERRO CARBONÍLICO

Lucas Alves de Aguiar¹, Marcos Bressan Guimarães², Mário Vargas Ceron³, Daniele Kautz Monteiro⁴

¹ Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS / alves.aguiar@ufrgs.br

² Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS / marcos.bressan@ufrgs.br

³ Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS / mario.ceron@ufrgs.br

⁴ Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS / daniele.kautz@ufrgs.br

Resumo

Este estudo investiga o comportamento de fluência e relaxação de géis magneto-reológicos (MR) à base de água, compostos por ferro carbonílico, laponita como aditivo e ácido oleico como surfactante. O comportamento reversível e o controle rápido das propriedades reológicas por meio do campo magnético favorecem a aplicação dos fluidos MR em dispositivos de controle, como amortecedores e dispositivos de controle de vibração sísmica para proteger edifícios e pontes de cargas acidentais. Em particular, foram analisados dois tipos de géis: MRFL e MRFLO. Partindo de ensaios de fluência disponíveis na literatura, o modelo reológico de Burger foi utilizado para caracterizar o comportamento viscoelástico dos materiais quando submetidos a cargas e campos magnéticos constantes. Previsões do modelo viscoelástico foram comparadas com os resultados experimentais, demonstrando a sua capacidade em representar o comportamento diferido. Após a validação do modelo, o comportamento dos géis quando submetidos ao ensaio de relaxação é avaliado. O estudo sugere que novas investigações e ensaios adicionais são necessários para melhorar a caracterização dos fluidos e entender melhor seu comportamento viscoelástico não linear.

Palavras-chave

Fluência; relaxação; modelo de Burger; gel magneto-reológico; comportamento viscoelástico;

1. Introdução

Fluidos controláveis, também chamados de materiais inteligentes, são sensíveis a mudanças nas condições operacionais, permitindo a adaptação do comportamento requerido do sistema. Esses fluidos apresentam alterações reversíveis nas propriedades mecânicas em resposta a variações de grandeza física (temperatura, campo elétrico e pressão) (YANG et al., 2002).

Os fluídos magneto reológicos ("*Magnetorheological (MR) fluid*") são um tipo de fluido controlável, que apresentam comportamento não-newtoniano quando submetidos a campos magnéticos devido à agregação de partículas ao longo da direção do campo. Os fluídos MR são conhecidos por sua capacidade de alterar suas propriedades reológicas, ou seja, sua viscosidade e comportamento de fluxo, em resposta à aplicação de um campo magnético (LIMA, 2011).

Sob o campo magnético externo, as partículas formam uma estrutura semelhante a uma cadeia devido à interação dos polos das partículas magnéticas, e o fluido MR se transforma rapidamente do estado líquido para o estado "sólido" (Figura 1), i.e., há uma alteração na sua rigidez. Como resultado, a viscosidade do fluido MR, ou também chamado de gel MR, aumenta (GHAFFARI et al., 2015). Além disso, Maurya e Sarkar (2020) afirmam que o rearranjo das partículas magnéticas influencia as propriedades reológicas do fluido de RM.

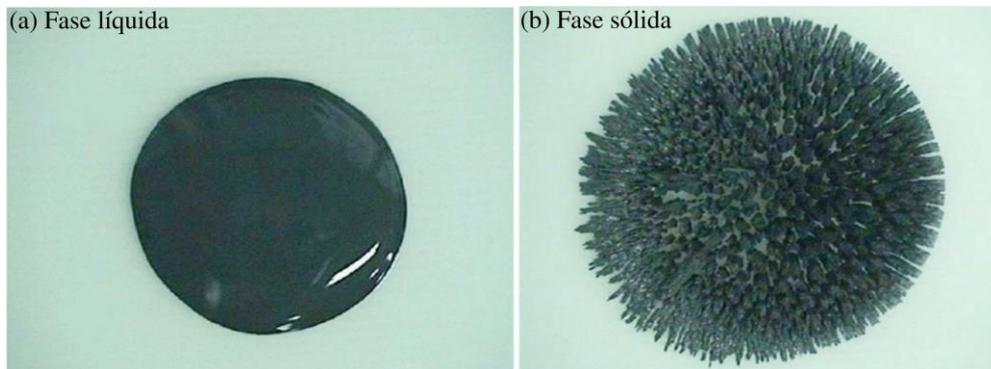


Figura 1 – Fluido MR (LEE; JANG, 2011)

O comportamento reversível e o controle rápido das propriedades reológicas por meio do campo magnético favorecem a aplicação dos fluidos MR em dispositivos de controle, em particular na área industrial. Também, pode-se citar a utilização em aplicações como amortecedores em ônibus e motocicletas, controle de vibração sísmica e amortecedores de rotor como grandes sistemas de amortecimento para proteger edifícios e pontes de choques ou impactos externos (CHOI et al., 2020).

Existem dois principais fluidos magneto reológicos (MR), cuja diferença consiste nos líquidos utilizados como meio dispersante para as partículas magnéticas, podendo ser composta à base de água ou à base de hidrocarbonetos. Fluidos MR à base de água têm ganhado destaque nos últimos anos devido à sua resposta rápida, facilidade de controle, eficiente dispersão de abrasivos finos, baixo custo, menor impacto ambiental e excelentes propriedades de resfriamento (DOROSTI et al., 2020). Neste trabalho, o foco é dado a dois fluidos MR à base de água estudados por Maurya e Sarkar (2022). O primeiro, denominado MRFL, contém 65% em massa de ferro carbonílico (FC) e 1% em massa de laponita dispersa em 35% de água. O segundo, MRFL0, possui uma composição similar, com 65% em massa de FC, 1% de laponita e 0,5% de ácido oleico, também disperso em 35% de água.

O objetivo do presente trabalho é utilizar o modelo reológico de Burger para caracterizar o comportamento diferido dos géis MRFL e MRFL0, quando submetidos a cargas e campos magnéticos constantes. Os resultados experimentais obtidos por Maurya e Sarkar (2022) foram utilizados para validar a resposta do modelo ao ensaio de fluência. Por fim, o comportamento dos géis quando submetidos ao ensaio de relaxação é avaliado.

Comportamento de carga e descarga do material do gel magneto reológico (MR)

O comportamento de fluência e relaxação de materiais é essencial para entender o mecanismo de deformação sob níveis constantes de tensão (σ_0) ao longo do tempo (t), fazendo com que se obtenham informações sobre o comportamento viscoelástico dos fluidos MR. A fluência é uma propriedade mecânica que depende do tempo, onde a deformação varia com níveis constantes de carga. Algumas deformações são reversíveis quando os níveis de tensão são removidos instantaneamente, definindo o comportamento de relaxação dos materiais. Experimentos de deformação e recuperação elucidam a microestrutura e o comportamento reológico dos fluidos MR sob aplicação de um campo magnético (XU et al., 2012).

Maurya e Sarkar (2022) realizaram experimentos de deformação e recuperação para analisar as informações sobre o comportamento viscoelástico dos fluidos MR. Um experimento de fluência foi realizado em níveis de tensões constantes (σ_0), mantendo um campo magnético (B) constante para entender melhor o comportamento durante as fases de fluência e relaxação. As combinações de carga (σ_0) e campo magnético (B) nos ensaios foram as seguintes: (1) $\sigma_0 = 1500$ Pa e $B = 0,53$ T; (2)

$\sigma_0 = 8500$ Pa e $B = 0,53$ T; e (3) $\sigma_0 = 1500$ Pa e $B = 0,18$ T. Quando a tensão constante aplicada foi menor do que a tensão de escoamento dinâmico em campos magnéticos, as curvas de deformação de fluência foram compostas por deformação instantânea, deformação retardada e deformação viscosa.

2. Comportamento viscoelástico linear

O comportamento viscoelástico linear é um tipo de comportamento mecânico que descreve a resposta de materiais viscoelásticos a carregamentos aplicados em pequenas deformações. Nesse comportamento, as respostas de fluência (deformação contínua sob carga constante) e relaxação (remoção da tensão aplicada em uma deformação constante) são analisadas.

Neste caso, é considerado como hipótese que os materiais seguem o princípio de superposição de Boltzmann, cujas funções de fluência $J(t_0, t, \sigma_0)$ e de relaxação $R(t_0, t, \varepsilon_0)$ não dependem dos níveis de sollicitações σ_0 e ε_0 , ou seja, $\varepsilon(t)$ é proporcional a σ_0 , qualquer que seja seu sinal (tração ou compressão) (SALENÇON, 2019). Portanto:

$$\begin{cases} \sigma(t) = \sigma_0 Y_{t_0}(t) \\ \varepsilon(t) = \sigma_0 J(t_0, t) \end{cases} \quad (1)$$

Igualmente ao $J_{t_0}(t)$, deduz-se que a função de relaxação em função do tempo inicial t_0 é independente da ε_0 :

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \varepsilon_0 Y_{t_0}(t) \\ \sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t) \end{cases} \quad (2)$$

onde $Y(t)$ é a função de Heaviside. Vale destacar ainda que dada a consideração de não-envelhecimento, assume-se arbitrariamente que o carregamento é iniciado sempre em $t = 0$, portanto $Y(t) = Y_{t_0}(t)$.

A consequência em termos das funções de fluência e de relaxação, dada a consideração de não-envelhecimento e seguindo o princípio de Boltzmann, é expressa da seguinte forma:

$$\begin{cases} J(t_0, t) = f(t) \\ R(t_0, t) = g(t) \end{cases} \quad (3)$$

As fórmulas de Boltzmann permitem identificar o operador integral \otimes de Boltzmann, conforme a seguinte expressão:

$$\varepsilon = J \otimes \sigma = f' * \sigma; \quad \sigma = R \otimes \varepsilon = g' * \varepsilon, \quad (4)$$

onde o símbolo $*$ representa o produto de convolução de funções.

Aplicando a transformada de Carson-Laplace (denotada por φ^*), pode-se relacionar as funções de fluência e relaxação da seguinte forma:

$$\begin{cases} \sigma^* = g^* \varepsilon^* \\ \varepsilon^* = f^* \sigma^* \\ f^* g^* = 1 \end{cases} \quad (5)$$

A transformada de Carson-Laplace de uma função arbitrária $t \rightarrow \varphi(t)$ pode ser obtida diretamente a partir da transformada pura de Laplace aplicada em sua derivada, conforme apresentado:

$$\varphi^* = \mathcal{L}\{\varphi'\} = p\mathcal{L}\{\varphi\}. \quad (6)$$

3. Modelo reológico de Burger

Para descrever o comportamento do material de forma adequada, é essencial estabelecer um modelo reológico adequado. De acordo com Salençon (2019), o uso de modelos reológicos é uma abordagem comumente empregada na formulação de modelos constitutivos unidimensionais, especialmente para materiais viscoelásticos lineares que não apresentam envelhecimento.

O processo de deformação de materiais viscoelásticos inclui a fluência e a relaxação de tensão ao longo do tempo. Na engenharia, elementos básicos viscoelásticos, como molas e amortecedores, são combinados em diversos modelos de comportamento mecânico viscoelástico a fim de descrever suas características de deformação por fluência (HUANG et al., 2023). Dessa maneira, o modelo reológico de burger foi escolhido para representar o comportamento dos fluidos, uma vez que Maurya e Sarkar (2022) observaram que as curvas de deformação de fluência são compostas por deformação instantânea, deformação retardada e deformação viscosa.

O modelo reológico de Burger é composto pela associação entre os modelos de Maxwell e Kelvin em série, como pode ser visto na Figura 2(a). Dessa maneira, pode-se definir a equação que descreve o comportamento de fluência dos materiais em um somatório das equações de fluência dos modelos de Maxwell e Kelvin, conforme a Equação 7.

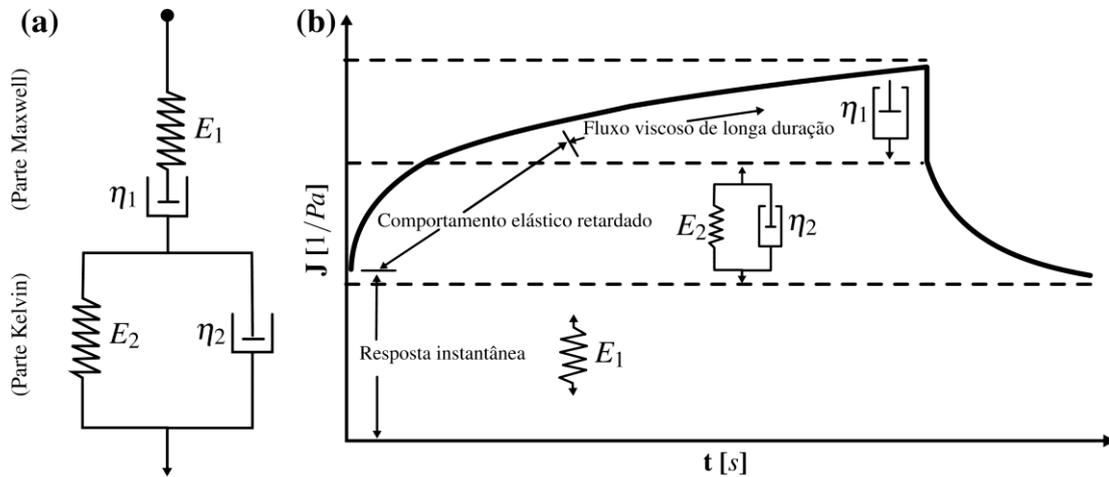


Figura 2 – Esquema do comportamento de carga-descarga através do modelo reológico de Burger (a) Modelo de Burger (Maxwell + Kelvin) em série e (b) J versus tempo para o modelo de Burger de quatro elementos em uma fase de fluência

$$f_{\text{Burger}}(t) = f_{\text{Maxwell}}(t) + f_{\text{Kelvin}}(t) \quad (7)$$

Sendo assim, pode-se determinar a função de fluência de Burger a partir da combinação dos quatro elementos montados:

$$f_{\text{Burger}}(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\tau t}) \right] Y(t), \quad (8)$$

onde $\tau = E_2 / \eta_2$.

A partir da função de fluência f_{Burger} , pode-se determinar a função de relaxação g_{Burger} através da relação dada pelas Equações 4 e 5:

$$g_{\text{Burger}} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{p^2 \mathcal{L} \{ f_{\text{Burger}} \}} \right\}. \quad (9)$$

4. Propriedades viscoelásticas

Nesta seção são determinados os parâmetros para as funções de fluência. Emprega-se o modelo reológico de Burger para a caracterização da fluência dos ensaios avaliados, de forma que os parâmetros E_1 e η_1 da parte correspondente a Maxwell foram obtidos diretamente dos gráficos do trabalho de Maurya e Sarkar (2022). Como esses gráficos estão apresentados no artigo em função do ε [%] versus t [s], utilizou-se as Equações 10 e 11 para a deformação instantânea ($t = 0$) e a Equação 12 para a parte do fluxo viscoso de longa duração da Figura 2.

$$f(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (10)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(0)} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\eta_1} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (12)$$

Para determinar os parâmetros ótimos de E_2 e η_2 da parte de Kelvin do modelo de Burger, foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Esse método permitiu obter uma solução adequada para o problema. No entanto, é fundamental destacar que a precisão dos resultados depende diretamente dos valores e da forma como foram extraídos dos gráficos experimentais. Assim, é necessário verificar se os resultados obtidos correspondem aos dados experimentais. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de fluência do modelo reológico de Burger para os seis ensaios analisados neste estudo.

Tabela 1 – Parâmetros das equações de fluência obtidos para cada ensaio.

Fluido	σ_0 [kPa]	B [T]	E_1 [kPa]	η_1 [kPa.s]	E_2 [kPa]	η_2 [kPa.s]
MRFLO	1,5	0,53	1092,30	4405188	7810,80	143858,44
	8,5	0,53	27,90	289848	38,06	428,80
	1,5	0,18	151,58	400411	327,73	16610,59
MRFL	1,5	0,53	1144,48	10228999	16847,10	1960689,29
	8,5	0,53	39,34	215673	36,33	411,92
	1,5	0,18	263,60	923283	633,25	5022,17

Devido à predominância da componente viscosa no modelo, a deformação cresce de forma linear com o aumento do tempo $t \rightarrow \infty$. Dessa forma, não há um limite horizontal assintótico, e conseqüentemente, não existe um tempo característico em fluência.

As Figuras 3 e 4 apresentam os gráficos de comparação do resultado experimental com as curvas de fluência do modelo de Burger utilizado para ambos os fluidos MRFLO e MFRL. No primeiro caso $\sigma_0 = 1500$ Pa e no segundo caso $\sigma_0 = 8500$ Pa, ambos submetidos ao mesmo campo magnético de

0,53 T. Já na Figura 5 a variação se concentra no campo magnético, cujo gráfico mostra os resultados dos fluidos submetidos a $\sigma_0 = 1500 \text{ Pa}$ e $B = 0,18 \text{ T}$.

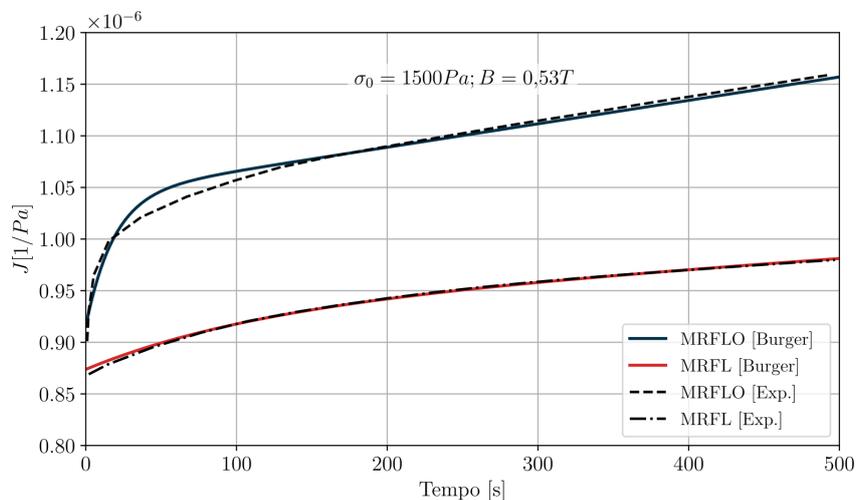


Figura 3 – Comportamento de fluência dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 1500 \text{ Pa}$; $B = 0,53 \text{ T}$)

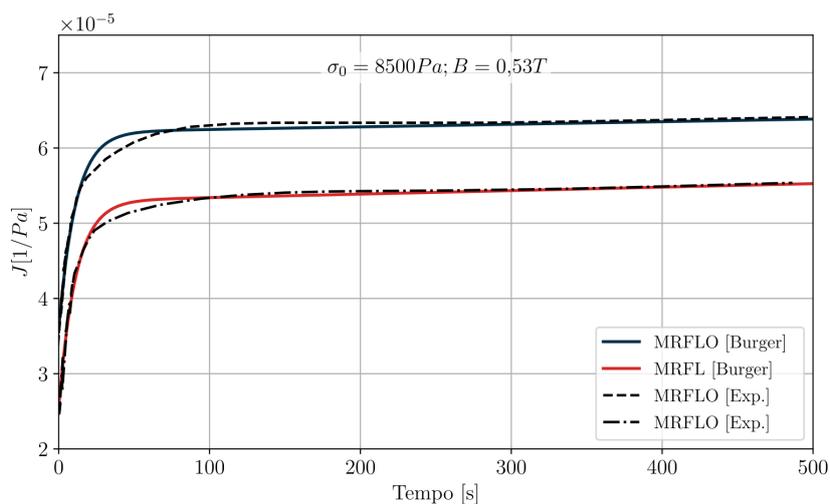


Figura 4 – Comportamento de fluência dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 8500 \text{ Pa}$; $B = 0,53 \text{ T}$).

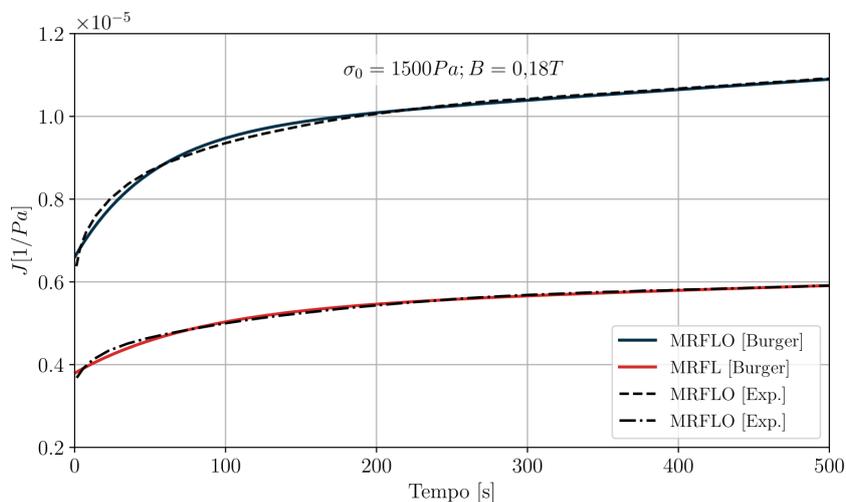


Figura 5 – Comportamento de fluência dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 1500 \text{ Pa}$; $B = 0,18 \text{ T}$).

Além disso, para efeito de comparação, a Figura 6 mostra em escala logarítmica o comportamento da fluência dos dois fluidos submetidos aos dois campos magnéticos diferentes, tanto para os resultados experimentais quanto para os resultados do modelo reológico de Burger.

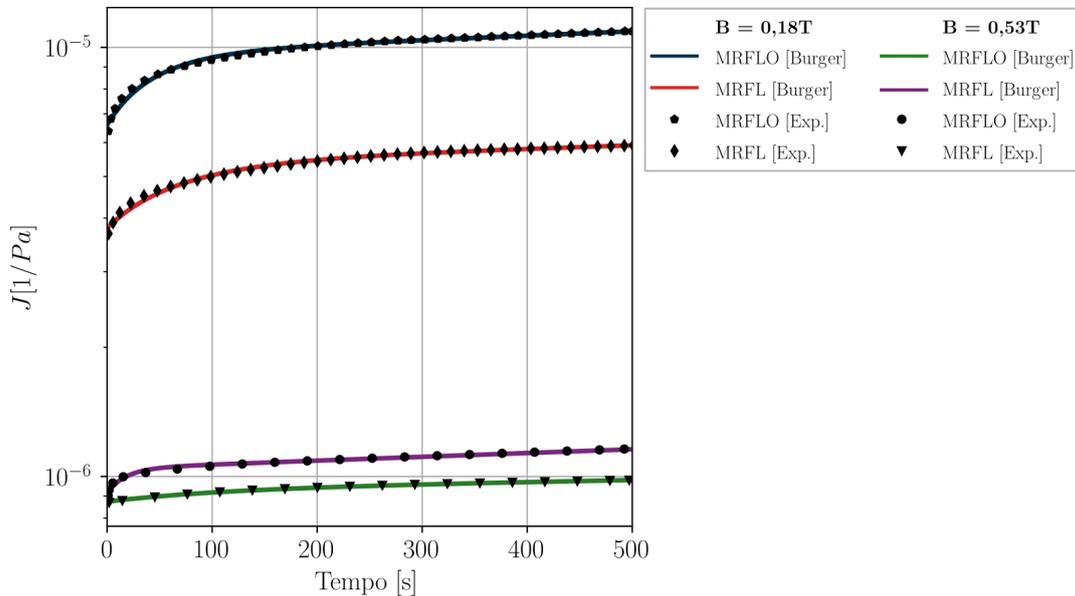


Figura 6 – Comportamento de fluência dos Gel MRFL e MRFLO em diferentes campos magnéticos e tensão constante.

A partir dos parâmetros da Figura 5 e da Equação 9 são determinadas as seis funções de relaxação. Dessa maneira, a Figura 7 exprime os resultados de relaxação obtidos quando $\sigma_0 = 1500$ Pa e $B = 0,53$ T. Já o gráfico da Figura 8 mostra as curvas de relaxação obtidos quando $\sigma_0 = 8500$ Pa e $B = 0,53$ T. Por fim, a Figura 9 apresenta as curvas de relaxação geradas quando $\sigma_0 = 1500$ Pa e $B = 0,18$ T, para ambos os fluidos.

Para o modelo de Burguer, o tempo característico de relaxação τ_g é definido da seguinte forma:

$$\tau_g = \frac{\lim_{t \rightarrow +\infty} g(t) - g(0)}{g'(0)} \rightarrow \tau_g = -\frac{g(0)}{g'(0)} \quad (13)$$

dado que a função de relaxação tende assintoticamente para zero.

Os valores dos tempos característicos são apresentados na Tabela 2. Além disso, a intersecção das retas e os tempos característicos para cada função de relaxação estão ilustrados nas Figuras 7 a 9. Para mostrar o comportamento de relaxação de um material viscoelástico em $t \rightarrow \infty$, a Figura 9 possui um gráfico com período maior do que o necessário para indicar os tempos característicos.

Tabela 2 – Tempos característicos para relaxação.

τ_i	Fluido	σ_0 [Pa]	B [T]	Tempo [s]
1	MRFLO	1500	0,53	127,54
2	MRFL	1500	0,53	1437,60
3	MRFLO	8500	0,53	15,28
4	MRFL	8500	0,53	10,39
5	MRFLO	1500	0,18	104,95
6	MRFL	1500	0,18	180,95

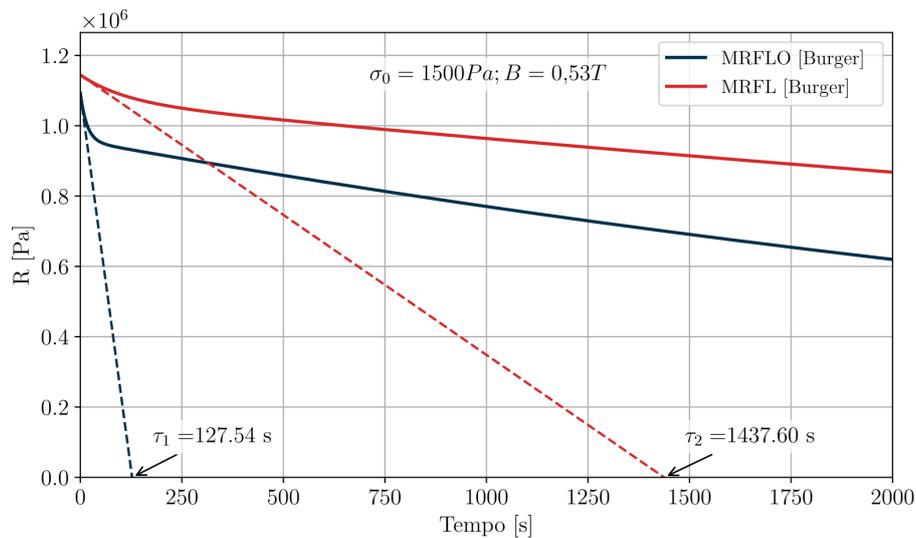


Figura 7 – Comportamento de relaxação dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 1500 \text{ Pa}$; $B = 0,53 T$).

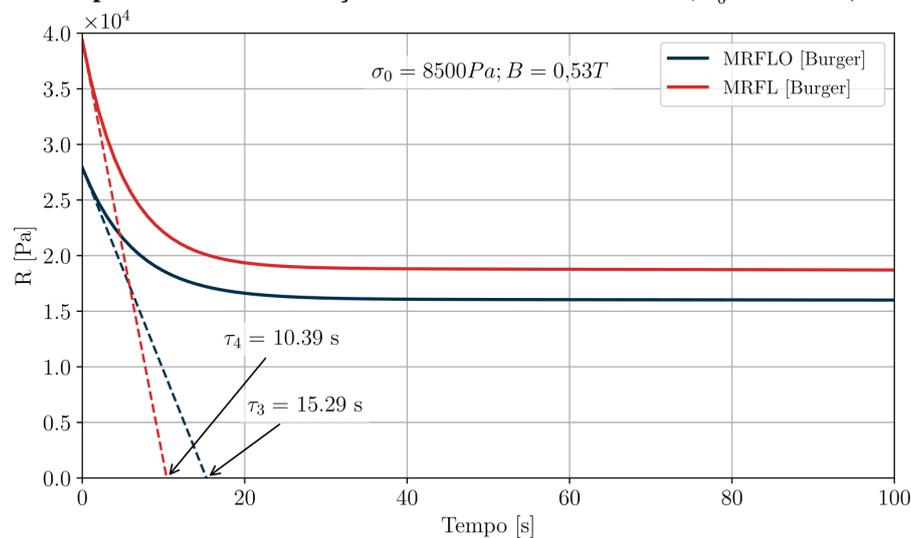


Figura 8 – Comportamento de relaxação dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 8500 \text{ Pa}$; $B = 0,53 T$).

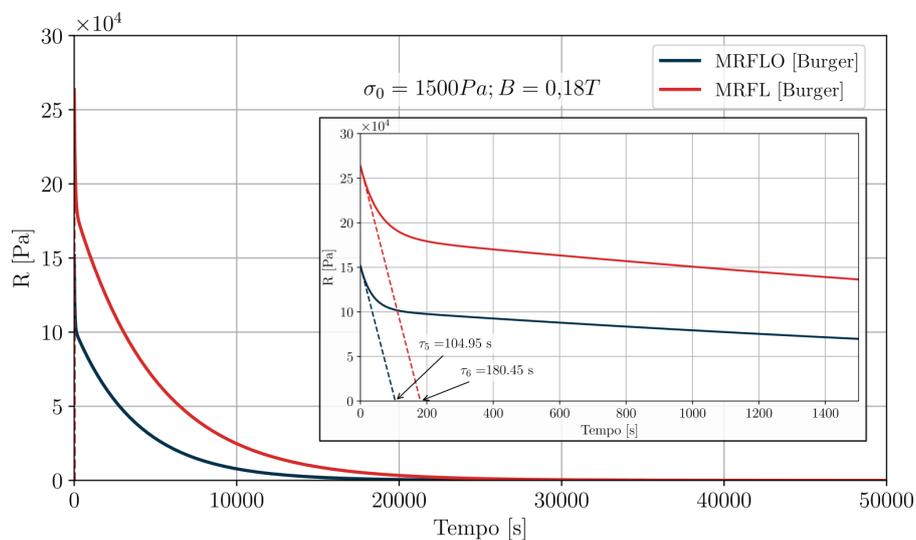


Figura 9 – Comportamento de relaxação dos Gel MRFL e MRFLO ($\sigma_0 = 1500 \text{ Pa}$; $B = 0,18 T$).

5. Conclusão

Ao observar os resultados obtidos, pode-se concluir que o Modelo reológico de Burger, sugerido para a caracterização do comportamento viscoelástico dos fluidos MR, possui uma boa concordância com os dados experimentais. Esse modelo também é recomendado por Xu et al. (2012) para representação das curvas de fluência e recuperação de gel magneto reológico.

Além disso, é perceptível que a deformação instantânea de fluência diminui drasticamente com o aumento do campo magnético. Como resultado, o fluido MR torna-se mais rígido com o aumento da densidade do fluxo magnético, e a capacidade de armazenamento de energia elástica do fluido MR aumenta. No caso do fluido MRFLO (esse com adição do ácido oleico) apresentou uma deformação de fluência instantânea maior em comparação com a suspensão MRFL para a mesma tensão constante e tempo de deformação.

Ao comparar os fluidos MR submetidos ao mesmo campo magnético ($B = 0, 53T$), percebe-se que à medida que o nível de tensão aumenta ($\sigma_0 = 1500 \text{ Pa} \rightarrow \sigma_0 = 8500 \text{ Pa}$), esses fluidos se comportam como um material viscoelástico não linear. Dessa forma, verifica-se que um aumento de tensão aplicada implica em uma maior resposta da função de fluência.

Por fim, para uma melhor caracterização dos fluidos magneto reológico, é necessário que sejam realizados novos ensaios e reproduções do modelo adotado. Com novos estudos, pode-se sugerir funções de fluência e de relaxação que permitam representar o estado viscoelástico não linear dos materiais analisados neste trabalho.

Referências

- CHOI, J.; HAN, S.; NAM, K. T.; SEO, Y. Hierarchically structured fe₃o₄ nanoparticles for high-performance magnetorheological fluids with long-term stability. *ACS Applied Nano Materials*, ACS Publications, v. 3, n. 11, p. 10931–10940, 2020.
- DOROSTI, A.; GHATEE, M.; NOROUZI, M. Preparation and characterization of water-based magnetorheological fluid using wormlike surfactant micelles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Elsevier, v. 498, p. 166193, 2020.
- GHAFFARI, A.; HASHEMABADI, S. H.; ASHTIANI, M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 26, n. 8, p. 881–904, 2015.
- HUANG, C.; GAO, D.; MENG, T.; YANG, C. Investigation into viscoelastic properties of fiber-reinforced asphalt composite concrete based on the burgers model. *Buildings*, MDPI, v. 13, n. 2, p. 449, 2023.
- LEE, C.; JANG, M.-G. Virtual surface characteristics of a tactile display using magneto-rheological fluids. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 11, p. 2845–56, 12 2011.
- LIMA, A. S. d. Identificação experimental de um sistema magneto-reológico. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/Rio de Janeiro, 2011.
- MAURYA, C. S.; SARKAR, C. Magnetic and transient temperature field simulation of plate–plate magnetorheometer using finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 56, n. 4, p. 1–9, 2020.
- MAURYA, C. S.; SARKAR, C. Rheological and creep and recovery behavior of carbonyl iron water-based magnetorheological gel using laponite as an additive and oleic acid as a surfactant. *Rheologica Acta*, Springer, v. 61, n. 2, p. 99–110, 2022.
- SALENÇON, J. *Viscoelastic modeling for structural analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.
- XU, Y.; GONG, X.; XUAN, S.; LI, X.; QIN, L.; JIANG, W. Creep and recovery behaviors of magnetorheological plastomer and its magnetic-dependent properties. *Soft Matter*, Royal Society of Chemistry, v. 8, n. 32, p. 8483–8492, 2012.
- YANG, G.; JR, B. S.; CARLSON, J.; SAIN, M. Large-scale mr fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 309–323, 2002.