Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação - RAA 2026

Estudo de Tensões Normais em Fluidos Elastoviscoplásticos

Paiva, Pedro. Henrique. [1]; Mendes, Paulo. Roberto. [2] ; Varges, Priscilla. Ribeiro. [3]; .[1]Bolsista do PRH 10/PUC-Rio, curso de Engenharia Mecânica, Cidade – RJ.
E-mail: pmendes@puc-rio.br [2]Docente do curso de Engenharia Mecânica da Universidade PUC-Rio, Cidade – RJ. E-mail: prvarges@puc-rio.br[3] E-mail: pedrohenriquesilvapaiva9@gmail.com

Introdução

Fluidos viscoplásticos, caracterizados pela presença da tensão limite de escoamento, se encontram em múltiplas indústrias, desde a cosmética e alimentícia à indústria de petróleo, presentes tanto em alguns tipos de petróleo e o fluido de perfuração, essencial no processo de furação de poços de petróleo por sua capacidade de carregar detritos para a superfície com o seu escoamento. Os estudos relacionados à seu comportamento durante o último século estão ligadas ao comportamento da sua viscosidade e tensão cisalhante, de forma que seu comportamento foi modelado em cima dessas propriedades. Contudo, também são encontradas tensões normais (N_1 e N_2) no escoamento, com amplitudes ainda maiores que as tensões cisalhantes. No caso de fluidos viscoelásticos, como polímeros fundidos, o estudo dessas tensões permitiu um grande crescimento nessa indústria. Dessa forma, este estudo busca compreender o funcionamento das tensões N_1 e N_2, formular novos equacionamentos para seu escoamento as considerando e avaliar se o critério de escoamento de Von Mises também se aplica para esses fluidos.

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0, \text{ se } \tau < \tau_y \\ \tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n, \text{ se } \tau \geq \tau_y \end{cases}$$

Contexto Teórico

A medição das tensões normais N_1 e N_2 requer testes com pelo menos duas geometrias para serem medidas, sendo elas as placas paralelas (PP) e a cone-placa (CP). A geometria PP é capaz de medir a tensão normal como N_1-N_2, mas não consegue manter uma taxa de cisalhamento constante, necessitando de uma equação (Weissenberg-Rabinowitsch) para corrigir seus resultados, enquanto a geometria CP consegue medir diretamente N_1 e consegue manter a taxa de cisalhamento constante, mas devido ao efeito de "wall-slip", que ocorre em fluidos viscoplásticos, onde a borda do escoamento é lubrificada, gerando resultados errôneos para viscosidade e tensão cisalhante nos testes. Esse tipo de problema é corrigido pela adição de ranhuras na geometria, mas não existem geometrias CP ranhuradas comercialmente. Assim, os testes foram realizados utilizando uma geometria PP ranhurada. Ademais, $N_1=\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ e $N_2= \sigma_{yy}-\sigma_{zz}$.

$$\tau(R) = \frac{M}{2\pi R^3}\left[3 + \frac{dln(M)}{dln(\dot{\gamma})}\right]$$

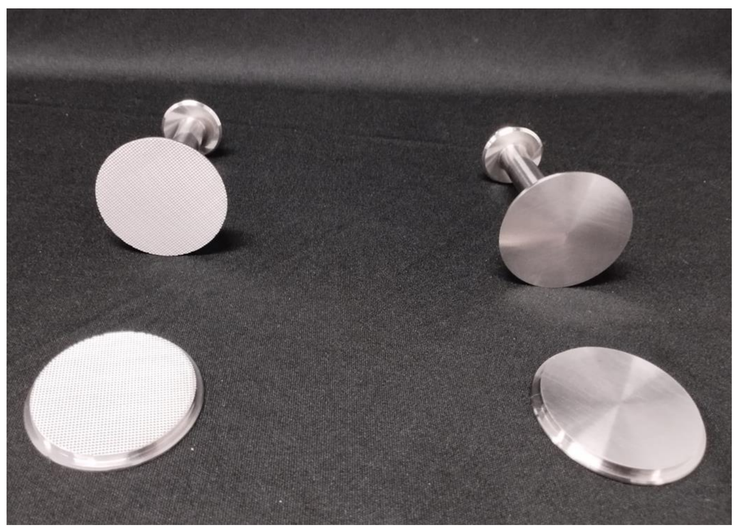


Figura 1: Geometrias Placa Paralela ranhurada e Cone Placa lisa

Metodologia

Foram avaliados dois géis de cabelo comerciais, ambos da marca Bozzano (Ação Prolongada e Proteção Solar). As medições foram realizadas em um reômetro de controle de deformação ARES-G2 (TA Instruments) (Fig. 2), selecionado por sua alta sensibilidade e pela capacidade de medir com precisão as tensões normais e cisalhantes de forma independente através dos transdutores TRT e FRT (validados com óleo padrão).

Foi utilizada a geometria placa paralela ranhurada com diâmetro 50 mm (Fig. 2), focada em mitigar o efeito de *wall slip*. Os géis foram preparados utilizando centrifugação por 5 minutos e remoção de bolhas de ar. O *gap* final de 1,00 mm foi estabelecido por meio de uma redução progressiva a partir do momento de encontro da placa superior com o fluido, sendo que excedentes são limpos e é medida a força normal máxima e estabilizada que é aplicada no mesmo a cada 1mm, até alcançar o gap final de limpeza de 1050μm e, por fim, se atinge o gap final de 1000μm, onde é adicionada água deionizada em um *solvente trap* para evitar a evaporação do fluido. Por fim, são aplicados duas etapas de pré-cisalhamento com uma fase de relaxamento entre essas, para quebrar a microestrutura do fluido e reduzir a força normal sentida para próximo de 0,0N. Essas taxas de cisalhamento são de 5 s^{-1} e 10 s^{-1} respectivamente, com o relaxamento durando 10 minutos.

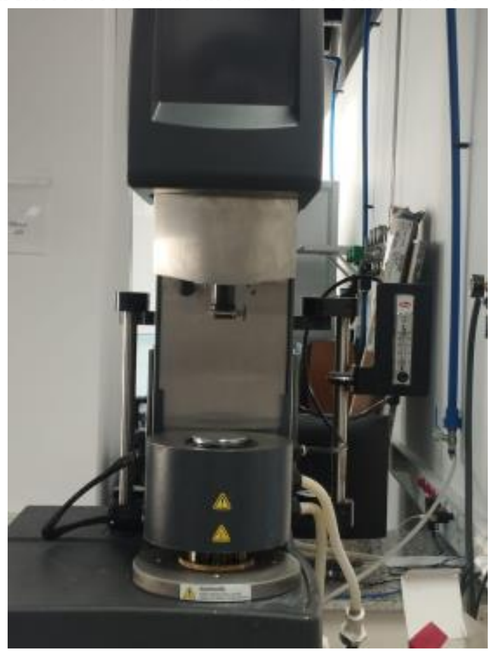


Figura 2: Reômetro ARES G2

Resultados

Tendo a metodologia desenvolvida, é possível realizar testes ambos em regime permanente e transiente. Os testes apresentados (Fig. 3, Fig. 4 e Fig. 5) foram realizados no Gel de Cabelo (Proteção Solar).

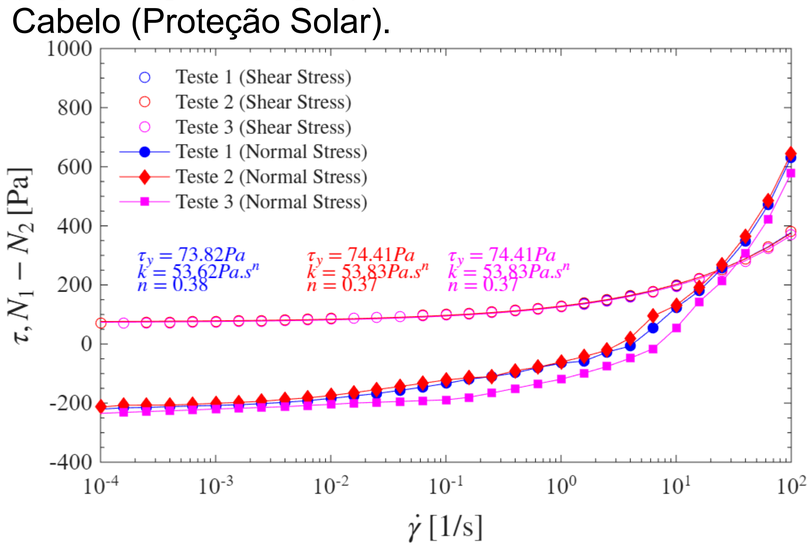


Figura 3: Tensão Cisalhante e Tensão Normal (N_1-N_2) [Pa] x taxa de cisalhamento [$\dot{\gamma}$]

Na Fig. 3, foi realizado um teste de Flow Curve, onde a taxa de cisalhamento aplicada varia e são medidos os resultados em regime permanente.

Nota-se que os testes as tensões N_1-N_2 possuem uma amplitude consideravelmente maior que as tensões cisalhantes. Também ressalta-se que os valores de N_1-N_2 atingem valores negativos entre $10s^{-1}$ e $1s^{-1}$, o que indica que a correção de Weissenberg-Rabinowitsch não é aplicada para a maior parte dos pontos medidos. Contudo, não é percebida uma grande descontinuidade no gráfico, indicando que o impacto não é muito grande.

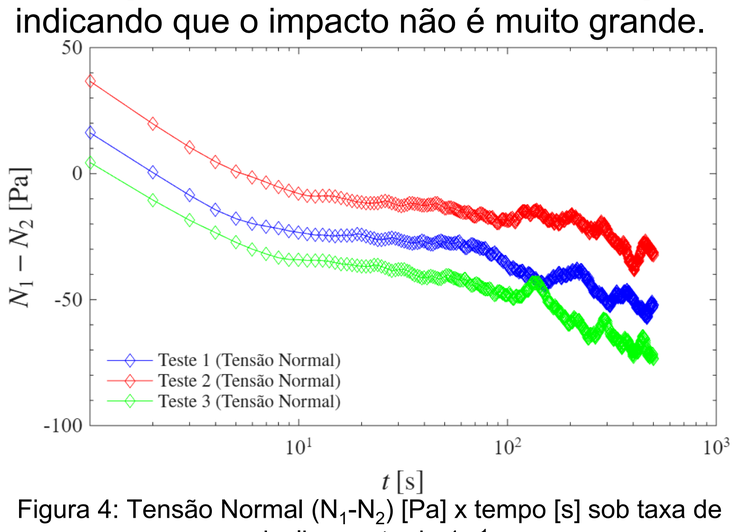


Figura 4: Tensão Normal (N_1-N_2) [Pa] x tempo [s] sob taxa de cisalhamento de $1s^{-1}$

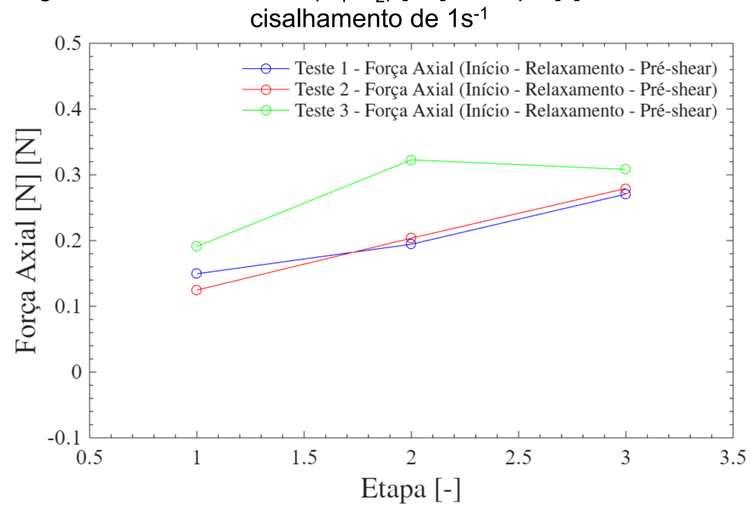


Figura 5: Força Axial medida antes do teste da Fig. 4 no: 1.Primeiro pré-cisalhamento, 2. Relaxamento 3. Segundo pré-cisalhamento

As Fig. 4 e Fig.5 apresentam os resultados de um teste de Peak Hold, medindo N_1-N_2 em função do tempo com uma taxa de cisalhamento fixa em $1s^{-1}$. Os resultados obtém caráter oscilatório a partir de 10^2s, se aproximando de um plateau. Percebe-se também que os resultados tem comportamento similar, aparentando estarem deslocados verticalmente. A Fig. 5 demonstra os valores de força normal medidos nas últimas etapas antes do teste. Nota-se que os maiores valores nessa imagem representam a curva com menores resultados no teste em si, indicando que o deslocamento vertical está ligado às condições iniciais do teste.

Conclusão

É possível notar que as tensões normais em um fluido elastoviscoplástico não só estão em função da taxa de cisalhamento, mas das condições iniciais do teste, influenciando no deslocamento vertical do resultado. Ainda se faz necessários testes com a geometria CP para avaliar se o critério de Von Mises é válido para esses fluidos.

Agradecimentos

Gestão:

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro