

1

Introdução

Os fluidos tixotrópicos estão presentes em diversos setores industriais. Lamas de perfuração, tintas, produtos cosméticos e farmacêuticos, alimentos, gels, recobrimentos, cimentos, óleo adesivo e sangue são fluidos não newtonianos que exibem um comportamento tixotrópico e viscoplástico [36]. Na indústria de petróleo, as lamas de perfuração têm como objetivos a lubrificação e esfriamento das brocas, carrear as rochas cortadas até a superfície e pressurizar o poço, entre outros. Para atingir esses objetivos, são colocados polímeros e partículas de argila no fluido base, o qual apresenta um comportamento reológico complexo, por suas propriedades viscoplásticas e tixotrópicas. As lamas de perfuração possuem baixas viscosidades a altas taxas de deformação, produzindo pequena perda de carga para bombeamento; e têm altas viscosidades a baixas taxas de deformação produzindo melhor carregamento de cascalhos e evitando assim sua deposição.

Nas outras indústrias, os fluidos tixotrópicos são constantemente transportados e manipulados em seus processos de fabricação baseados na reologia do fluido, por isso a compreensão destes materiais torna-se relevante para otimização de processos industriais.

Quando aplica-se uma tensão de cisalhamento menor que τ_o (tensão limite de escoamento) a um fluido viscoplásticos, o material comporta-se como um sólido, este material tem um alto nível de absorção de energia. Além se o material é tixotrópico, significa que é dependente do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. Portanto para estas matérias ficar desestruturado ao nível de um líquido deve-se aplicar uma tensão de cisalhamento maior a τ_o durante o tempo necessário para atingir dito valor. Quando aplica-se uma tensão de cisalhamento produto de um impacto, o tempo de aplicação é quase zero, por o qual o material não é desestruturado ao nível desejado. Esta característica de destes matérias ajudaram no desenvolvimento de novas tecnologias na área da proteção contra impactos, principalmente na indústria armamentista e do transporte. Embora ainda

não seja conhecido nenhum material capaz de atingir estas características para tensões muitas altas.

Neste capítulo primeiramente descreve-se a motivação para a realização do trabalho, para posteriormente fazer uma revisão bibliográfica com respeito à área de enfoque. A revisão bibliográfica começa com a explicação sobre o fenômeno de tixotropia no escoamento destes fluidos, depois menciona-se as técnicas de estudo do escoamento de fluidos, com suas respectivas limitações. Consecutivamente detalha-se a relação entres as propriedades de tensão limite de escoamento e tixotropia, para mostrar que a tensão limite de escoamento de suspensões de argila tixotrópicas depende do histórico de cisalhamento da mostra. Também serão abordadas técnicas para determinar a tensão limite de escoamento e os problemas que envolvem a repetitividade de valores de tensão limite obtidos por cada técnica. Finalmente, detalha-se os estudos feitos na área de escoamento de fluidos tixotrópicos para destacar os pontos ainda não estudados e descrever em que parte este trabalho entra no desenvolvimento das pesquisas, concluindo com os objetivos do trabalho.

1.1.

Motivação

Apesar de existir uma ampla literatura acerca de reologia de fluidos tixotrópicos, o estudo do escoamento dos fluidos tixotrópicos e sua hidrodinâmica ainda é uma área pouco desenvolvida, especialmente no escoamento que não seja em canal ou tubo. Estes fluidos nas diferentes indústrias são constantemente utilizados e principalmente transportados ao longo de sistemas de tubos. O fenômeno da expansão – contração é visível em alguns acessórios dos sistemas de tubos.

Na indústria do petróleo, devido ao fato de que a maior parte das lamas de perfuração têm características tixotropicas, é importante entender a física destes fluidos escoando através de tubos na perfuração de óleo e gás, já que a falta de entendimento de ditos fluidos produz algum problemas, tais como a má seleção de equipamentos, além de tamponamento de dutos e tuberias.

Uma melhor compreensão da expansão-contração abrupta envolvendo fluidos tixotrópicos ajudará no desenvolvimento dos projetos de engenharia,

tornando-se um tema de economia e eficácia, para diminuir custos por má utilização dos equipamentos. Quando um fluido tixotrópico repousa em um tubo longo depois de escoar, o campo de velocidade e pressão são muito complexos. A alta pressão envolvida para a restauração do escoamento também é um problema, além de cavitação na bomba. O desenvolvimento das indústrias antes mencionadas depende muito do entendimento da reologia dos fluidos.

Finalmente o estudo dos fluidos tixotrópicos escoando através de uma expansão seguida de uma contração, ambas abruptas e axissimétricas em um tubo, apresenta um grau de complexidade dos mais elevados por a falta de reprodutividade e repetitividade. Este trabalho contribui cientificamente na área do escoamento, ajudando no desenvolvimento de novos modelos do comportamento tixotrópico.

1.2.

Revisão Bibliográfica

Os fluidos tixotrópicos são fluidos estruturados que apresentam um comportamento mecânico não newtoniano. A microestrutura de um fluido estruturado normalmente adquire uma configuração estável, se é submetido por um longo período de tempo a uma tensão constante ou taxa de cisalhamento constante. Este estado permanente é o resultado do equilíbrio entre a taxa de estruturação da microestrutura e a taxa de desestruturação. Se o novo equilíbrio não é atingido instantaneamente após de uma mudança de tensão, então o fluido estruturado é dependente do tempo. Um fluido dependente do tempo pode ser dito tixotrópico, se sua viscosidade em regime permanente diminui com a taxa de cisalhamento, e se as mudanças microestruturais são reversíveis [47].

Como uma característica dos fluidos de perfuração é a tixotropia, isto se converteu em uma motivação para centenas de investigações de reologia destes fluidos [27]. Com respeito a sua hidrodinâmica o estudo é escasso, especialmente em relação a um fluxo que não seja um tubo simples ou em um canal [36]. Uma das razões da escassez de literatura da hidrodinâmica dos fluidos tixotrópicos é a dificuldade de trabalhar com este tipo de fluidos. Primeiro, são fluidos que contém

partículas sólidas, os quais são os responsáveis pelo seu comportamento tixotrópico. Na maior parte, estes fluidos são opacos, limitando severamente as técnicas experimentais. Algumas das técnicas com as que se pode estudar o escoamento de fluidos são: utilizando técnicas ultrassônicas, ressonâncias magnéticas ou utilizando técnicas óticas com a utilização de partículas para fluidos transparentes.

Para fluidos opacos é possível utilizar dispositivos ultrassônicos, mas faltam resolução espacial para medições precisas. Outra alternativa é a ressonância magnética nuclear mas ainda é um estudo caro [36]. Apesar de que existirem fluidos tixotrópicos transparentes que permitem utilizar técnicas óticas, no desenvolvimento do estudo existem complicações devido a suas propriedades reológicas, tais como o envelhecimento. A viscosidade muda com o tempo, o qual dificulta assegurar repetitividade dos resultados e propriedades do fluido, ou mesmo para selecionar as variáveis adequadas que serão usadas para normalizar os resultados [39].

Uma argila utilizada como aditivo em lamelas de perfuração e que tem a vantagem de ser transparente quando é suspensa em água é a laponita [39][37] [36] [18]. A laponita foi utilizada nas pesquisas da hidrodinâmica de fluidos tixotrópicos onde se utilizam técnicas óticas [18] [16] [17] [39] [36]. A laponita é uma argila transparente devido a sua alta pureza e pequeno tamanho das partículas, além de ter a vantagem de ser um fluido não tóxico, de baixo crescimento bacteriano [39] [43].

A viscosidade de um material tixotrópico resulta da relação entre a competição do envelhecimento e o rejuvenescimento por cisalhamento, e a estruturação ou desestruturação da rede de partículas. A obtenção da *flow curve* em regime permanente dos fluidos estruturados é fortemente influenciada por sua tixotropia[15].

Coussot [14] mostra que para um determinado número de fluidos, a tensão limite de escoamento e a tixotropia estão fortemente interconectados, isto é, o resultado da interferência e não interferência da microestrutura dos materiais, pelo qual a tensão limite de escoamento não pode ser estudada separadamente da tixotropia. Coussot afirmou isso porque, quando a microestrutura de um material tixotrópico desestrutura-se por efeito da aplicação de uma taxa de deformação, e

logo estrutura-se ao nível de τ_o (tensão limite de escoamento), o tempo para atingir o nível estrutural de τ_o depende do nível de desestruturação anterior.

Por outro lado Coussot [14] mostrou usando cristais coloidais, que a resposta para o escoamento de um fluido com tensão limite de escoamento e um sistema cristalino são similares, desde que eles possam experimentar envelhecimento e rejuvenescimento e seu comportamento mecânico seja dependente do histórico da amostra. A tensão limite de escoamento é uma das mais importantes características dos fluidos estruturados. A medida da tensão de cisalhamento para fluidos tixotrópicos é fundamentalmente dependente do histórico de fluxo do fluido e das forças de reconstrução [35].

De um ponto de vista geral a tixotropia e a tensão limite de escoamento são propriedades das matérias que estão intimamente relacionados. As suspensões em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento constante apresentam uma bifurcação de seu comportamento viscoso, determinando se há ou não escoamento permanente, o qual depende de seu histórico de cisalhamento e de seu atual estado estrutural [15]. Para tensões altas, as suspensões exibem características convencionais de um material tixotrópico, fluindo com uma viscosidade dependente do tempo que assintotiza para o regime permanente. Enquanto para baixas tensões, as suspensões inicialmente poderiam fluir por uma diminuição na viscosidade do material, mas gradualmente a viscosidade aumenta mostrando uma diminuição do fluxo que finalmente acaba com o escoamento, o que é causado por um aumento na viscosidade. Para a última situação não atinge-se um estado de equilíbrio ou regime permanente da viscosidade [15], como pode ser visto na Figura 1-1.

Uma maneira de interpretar a bifurcação antes mencionada é a existência de uma tensão crítica que determina se prolongados cisalhamentos constantes levam para condições de regime permanente ou não. Como tal, esta tensão é identificada como uma tensão limite de escoamento dependente do tempo, a qual é uma medida da resistência mecânica da estrutura de suspensão em determinado momento. Esta tensão limite de escoamento é dependente do tempo porque precisa de um tempo para mostrar se vai fluir por efeito da aplicação do cisalhamento constante ou não. Embora pode-se confundir um inicial escoamento leve que depois acaba.

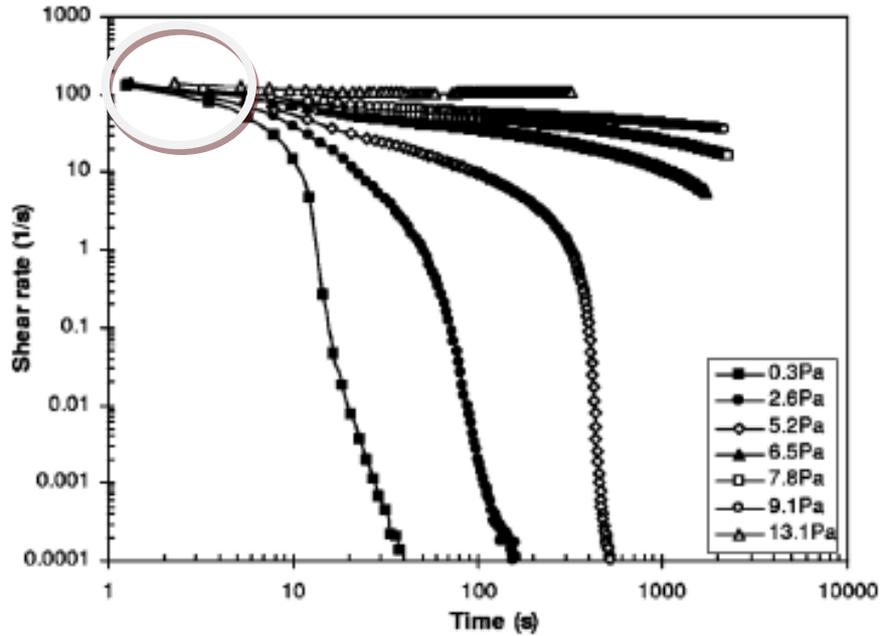


Figura 1-1: Demonstração da resposta da taxa de deformação pouco sensível ao início de uma aplicação de uma tensão constante em fluidos com alto nível de tixotropia, testadas suspensões de Bentonita imediatamente após de um pré-cisalhamento de 26 Pa durante 60 s [15].

Durante a aplicação de uma tensão constante qualquer, seja acima ou abaixo da tensão crítica antes mencionada, no início as variações na taxa de deformação são pequenas, como mostra a Figura 1-1, entretanto após um determinado tempo as variações incrementam dependendo do valor da tensão. Quanto maior seja o valor da tensão aplicada é possível atingir um equilíbrio, embora para valores baixos, depois de um tempo novamente começam a ter mudanças consideráveis em sua viscosidade como mostra a Figura 1-2. Por o qual é importante considerar esta dependência do tempo nas medições da caracterização reológica de suspensões, tais como a tensão limite de escoamento. Contudo um experimento de Coussot [15] mostrou claramente que para suspensões, a queda na taxa de cisalhamento produto da aplicação de uma tensão de cisalhamento baixa não chega em um estado de equilíbrio ou regime permanente, onde a taxa de desestruturação e estruturação da estrutura são iguais, como é o caso dos fluidos tixotrópicos. Para tensões altas, a taxa de deformação atinge um valor perfeitamente constante indicando que alcança o estado de regime permanente como na Figura 1-2.

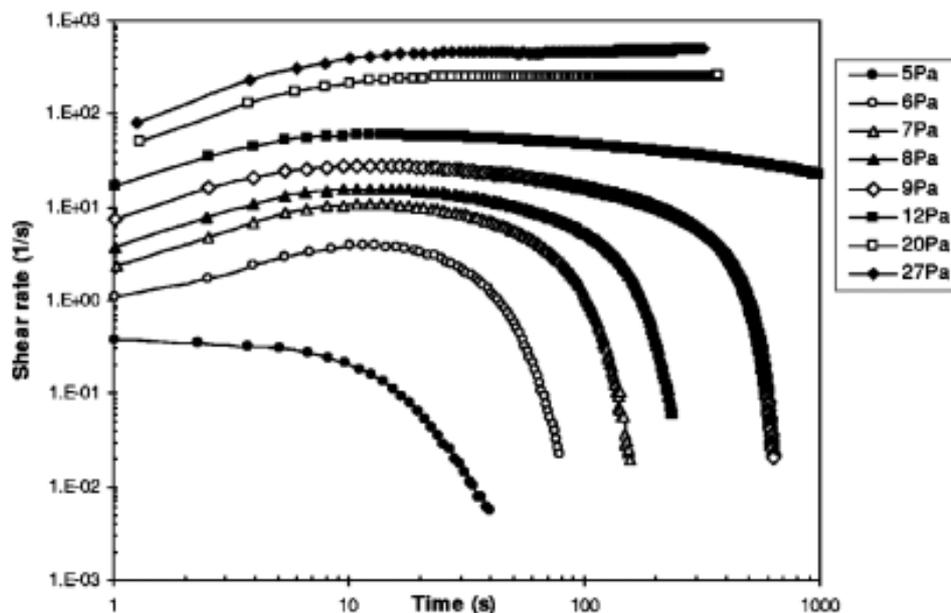


Figura 1-2: Para tensões altas de cisalhamento algumas suspensões atingem um equilíbrio próprio da tixotropia, mas para baixos valores não. Testando suspensões de Bentonita com pré-cisalhamento de 27 Pa por 60 s com um repouso seguinte de 20 s [15].

Consequentemente quando uma taxa de cisalhamento constante aplica-se às suspensões, o fluxo é homogêneo e estável só quando a taxa de cisalhamento aplicada é maior que a taxa crítica produto da tensão crítica antes mencionada. Se a taxa de cisalhamento fosse menor, o fluxo seria instável. Por isto, a obtenção de uma *flow curve* de suspensões estruturadas para tensões de cisalhamento menores que a chamada tensão crítica não pode ser determinada por métodos viscosimétricos convencionais [15].

A tensão limite de escoamento é geralmente conhecida como a força necessária para desestruturar a microestrutura. Bingham [7] introduziu um modelo utilizando o critério de tensão, o qual ajuda descrever este fenômeno. Este conceito foi ampliado considerando que o fluido comporta-se como um material elástico que obedece a lei de Hook antes da estrutura colapsar (deformação elástica) e em seguida há o início do escoamento. Este conceito na atualidade foi posto em dúvida, Barnes [5] reviveu o argumento da propriedade “tensão limite de escoamento” mostrando numerosos exemplos de medições em materiais reais,

onde o escoamento é observado mesmo quando o nível de tensão cai abaixo do chamado “tensão limite de escoamento aparente”. Barnes [5] e a maior parte da literatura mencionam “tensão limite de escoamento”, como a tensão abaixo da qual a deformação permanente não é observada.

Apesar da controvérsia do conceito de tensão limite de escoamento como propriedade real das matérias, existe uma aceitação nos critérios de desenhos e operação de engenharia, onde há manipulação e transporte de suspensões envolvidas. Numerosas técnicas têm sido desenvolvidas para determinar um valor desta propriedade. As técnicas podem ser diretas ou indiretas, em geral ambas baseadas na definição de tensão de escoamento como a tensão aplicada que limita entre o material escoar ou não.

Os métodos indiretos simplesmente envolvem a extrapolação para taxa de deformação zero dos dados de tensão e taxa de deformação, com ou sem ajuda de um modelo reológico.

As medições diretas geralmente dependem de avaliações independentes da definição de tensão limite de escoamento como a tensão que produz escoamento ou não. Isto é importante destacar porque é a maior fonte de discussão e discrepância entre muitos trabalhos, devido a real natureza do valor da tensão determinada pelas medições [32]. Por exemplo, segundo Howinks [21], há dois tipos de tensões limites de escoamento, uma tensão menor que corresponde ao final do comportamento elástico e o início da deformação plástica, o valor maior é a tensão de transição entre o comportamento plástico e o comportamento viscoso.

Outras distinções dos valores de tensão limite de escoamento dependem de como é o procedimento para determinar o valor. O valor obtido por extrapolação da *flow curve* é conhecido como tensão limite extrapolada ou aparente, ou tensão limite modelo. A tensão limite de escoamento medida diretamente geralmente sob condições quase estáticas é chamado tensão limite de escoamento estática ou verdadeira. O que conseqüentemente produz um problema de terminologia que depende do método de medição, para uma só definição

Adicionalmente ao problema da terminologia antes mencionada sobre a existência de uma tensão limite de escoamento aparente (extrapolado) ou verdadeira (estática); a maior parte dos fluidos viscoplásticos são materiais estruturados onde a reologia é fortemente dependente do passado do histórico de

cisalhamento, portanto encontrou-se que o valor medido da tensão limite de escoamento pode ser muito sensível ao tempo de duração da medição [11], sendo assim, dependendo do procedimento experimental obtém-se valores bastante diferentes de tensão limite de escoamento [5] [11][26][32]. A dificuldade na determinação da tensão limite de escoamento é maior para fluidos tixotrópicos, tais como as dispersões de laponita, devido ao efeito do histórico de cisalhamento [26] [37] [39].

Os métodos de medição direta da tensão de escoamento demoram ordem de minutos para ser realizada, e a medição da tensão de escoamento pode ter vários valores, se as mudanças estruturais dominarem durante o experimento [32]. Reconhecendo o problema envolvido nos experimentos de medição direta, estabeleceu-se que a técnica de medida e condições utilizadas para determinar a tensão de escoamento deve ser paralela ao processo modelado ou destinado à aplicação do parâmetro de fluência [2][11].

Como já mencionou-se os métodos de determinação de tensão limite indiretos são a extrapolação dos dados de tensão deformação, que pode ser feito gráfica ou numericamente ajustando ao modelo reológico disponível, onde a tensão limite de escoamento é um dos parâmetros do modelo.

Algumas técnicas têm sido formuladas para a medição direta da tensão de escoamento, independentemente dos dados de tensão e taxa de deformação. O específico critério empregado para definir a tensão pode variar entre cada técnica de medição, embora saiba-se que é a tensão limite que determina se o material escoou ou não. Além disso, cada técnica tem suas próprias limitações e sensibilidade de forma que cada uma pode ser considerada versátil ou suficientemente exato para cobrir toda a gama de tensão de escoamento.

Com respeito ao estudo da hidrodinâmica de fluidos tixotrópicos, Escudier e Presti [18] estudaram o escoamento destes fluidos utilizando laponita RD e demonstraram que o perfil de velocidades ajustou-se com precisão ao perfil calculado pelo modelo de Herschel-Bulkley para fluxo laminar considerando valores de Reynolds abaixo de 1500. Para fluxo transiente, o perfil tem uma inexplicável assimetria, embora para fluxo turbulento os níveis de intensidade turbulenta radial e tangente são similares ao da água. Também concluíram, que em todas as condições de fluxo esta longe de um equilíbrio estrutural, ou seja, um estado permanente.

Na mesma linha de pesquisa, Pinho e Pereira [39] estudaram o escoamento turbulento de fluidos tixotrópicos e confirmaram os resultados de Escudier e Presti [18]. A verdadeira viscosidade da parede em tubos é mais alta que a obtida através dos diagramas reológicos e além que o perfil de velocidade dos fluidos tixotrópicos em escoamento permanente é similar ao da água. Ambos autores mostraram uma redução de arrasto neste escoamento para suspensões de laponita RD pura.

Em outro trabalho de Pereira e Pinho [36], eles estudaram a recirculação de fluxo turbulento de fluido tixotrópico, utilizando também a laponita RD. Neste caso o escoamento ocorreu através de uma expansão abrupta e concluíram que os comportamentos do escoamento das suspensões de laponita, nesta geometria são similares à água. Para fluidos tixotrópicos o estudo do escoamento de recirculação em diferentes geometrias como expansão abrupta ou contração abrupta ainda é muito escassa, mas com respeito a fluidos viscoplásticos tem trabalho importantes como o de Souza Mendes, Naccache, Vargas [46] que estudaram o escoamento dos fluidos viscoplásticos através de uma expansão-contração abrupta utilizando Carbopol ao invés de Laponita.

Escudier e Smith [19] pesquisaram sobre o escoamento através de uma expansão abrupta de fluidos viscoplásticos e pseudoplásticos utilizando goma xantana.

Uma informação importante que é preciso mencionar é que nenhum trabalho, exceto o trabalho do Souza Mendes, Naccache, Vargas [46] visualiza-se a forma da “superfície de cedência” (superfície produto da interface entre um fluido que escoar dentro de um meio que contém o mesmo fluido em repouso).

Para melhorar o conhecimento e entendimento do comportamento do fluxo dos materiais tixotrópicos em uma tubulação ou outros canais, ainda precisa-se de uma pesquisa extensa nesta área. A avaliação dos efeitos da temperatura no comportamento reológico dos fluidos pseudoplásticos e viscoelásticos tem sido caracterizada por alguns trabalhos, mas para com comportamento tixotrópico é muito escasso. A redução do arraste desses fluidos também é um tópico não focado amplamente pelos pesquisadores. A análise do efeito na hidrodinâmica das diferentes geometrias e as características do comportamento da tensão limite de escoamento desses fluidos para diferentes escoamentos têm sido pouco estudada pela complexidade e falta de precisão dos equipamentos. A medida exata

da tensão de escoamento para fluidos tixotrópicos ainda é um dos problemas sem solução.

O programa de pesquisa antes mencionado é extenso e é importante que seja consistente com os trabalhos já existentes, devido à falta de repetitividade e reprodutibilidade encontrada nos trabalhos nesta área.

Este trabalho faz uma contribuição na pesquisa da análise do escoamento dos fluidos tixotrópicos em geometrias complexas que atualmente é muito escasso, e cujo desenvolvimento é sugerido por alguns autores [39] [46][36] [19], além de um estudo reológico da laponita em regime permanente; entregando a comunidade científica e industrial, uma noção clara desse fenômeno que ajude no desenvolvimento de modelos e processos industriais.

O estudo de materiais tixotrópicos escoando através de uma expansão seguida de uma contração, ambas abruptas e axissimétricas como mostra a Figura 1-3, apresenta um grau de complexidade dos mais elevados.

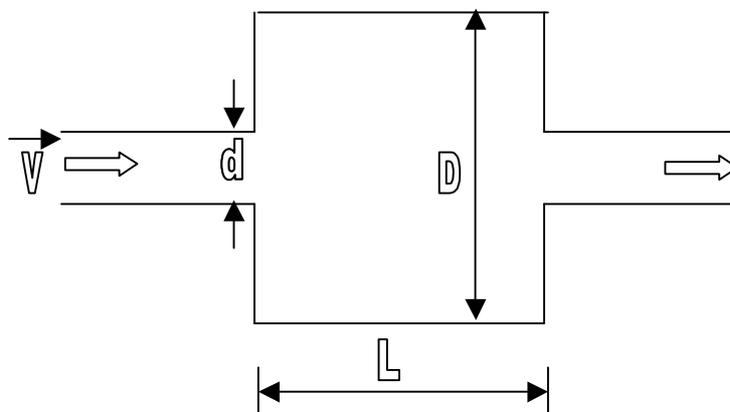


Figura 1-3: Esquema da expansão-contratação abrupta.

A existência de uma “superfície de cedência” que se pode visualizar na Figura 1-4, produto da interface entre um fluido que escoava dentro de um meio que contém o mesmo fluido em repouso, que estende-se da entrada da expansão até a saída da contração. Quando isso ocorre, a tensão de escoamento não é excedida pelo fluido, na região externa a superfície de cedência. O estudo numérico e

experimental da expansão-contracção abrupta para fluidos viscoplásticos já foi realizada por Souza Mendes, Naccache, Varges [46].

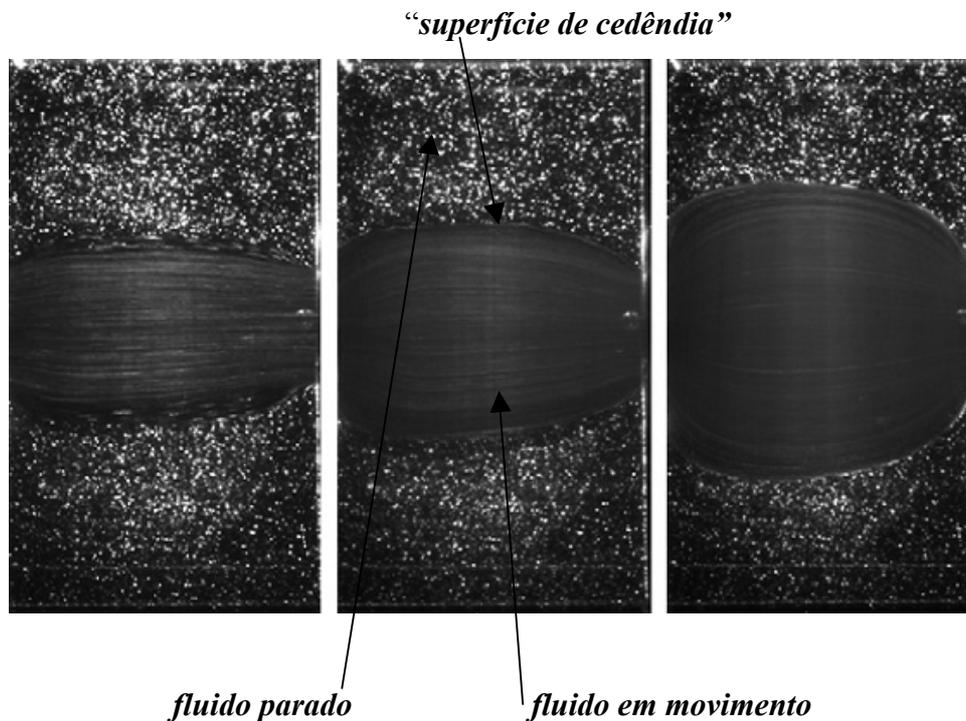


Figura 1-4: Fenômeno da superfície de cedência para três vazões distintas [46].

1.3.

Objetivos

Como já mencionou-se, apesar de ter uma ampla informação da reologia de fluidos tixotrópicos, o estudo do escoamento é muito escasso e ainda pior para o escoamento em geometrias complexas. Este problema é principalmente devido ao fato de que a maior parte de fluidos tixotrópicos são opacos limitando as técnicas de estudo. No entanto um fluido altamente tixotrópico e que é transparente é a Laponita que permite a utilização de técnicas óticas. Entretanto a laponita é uma argila altamente tixotropica que experimenta envelhecimento e é sensível ao processo de preparação, dificultando a obtenção de dados para baixas taxa de deformação, além de diferentes *flow curves* dependendo dos parâmetros de preparação e o tempo de estudo após a preparação. Nenhum dos trabalhos antes apresentados consegue visualizar o fenômeno de “superfície de cedência” para fluidos tixotrópicos. Portanto a presente dissertação pretende:

- Obter uma *flow curve* da laponita, que é um fluido tixotrópico, fixando a maior quantidade de parâmetros que influenciam na falta de reprodutividade e repetitividade.
- Verificar a existência, ou não, do fenômeno da “superfície de cedência” no escoamento de fluidos tixotrópicos em expansão-contração abrupta e assimétrica, através da visualização do escoamento.
- Estudar o efeito da variação da vazão em diferentes razões de aspecto da expansão sobre a “superfície de cedência”.

1.4.

Escopo

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo apresentam-se a introdução com revisão bibliográfica, motivação e objetivos da pesquisa. O segundo descreve a metodologia experimental da montagem da bancada. O terceiro capítulo envolve a abordagem experimental sobre a reologia do fluido tixotópico. No quarto capítulo, são apresentados os resultados do processo experimental. Finalmente as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros são discutidas no quinto capítulo.