

1 Introdução

1.1 Generalidades sobre Elastohidrodinâmica

Desde as últimas décadas a capacidade de fabricar e processar polímeros flexíveis tem aumentado consideravelmente. Hoje, por exemplo, somos capazes de produzir membranas artificiais que são uma ordem de grandeza mais resistentes que as naturais, criar dispositivos micro fluídicos capazes de direcionar micro escoamentos e confeccionar polímeros géis que deformam em resposta a certos estímulos como pH, temperatura, campo elétrico entre outros.

Recentes avanços nesta área têm feito surgir diferentes aplicações onde polímeros flexíveis necessitam estar em contato direto com um fluido que escoam. O desenvolvimento dessas novas tecnologias, bem como dos materiais nelas utilizados, dependem fortemente da compreensão de como o escoamento afeta o sólido flexível e vice e versa. A dinâmica de um escoamento sobre um sólido flexível difere qualitativamente daquela sobre um sólido dito rígido, por possuir uma forte interdependência com a dinâmica do sólido.

A área da ciência que estuda as iterações entre sólidos flexíveis e fluidos que sobre eles escoam é conhecida como elastohidrodinâmica. Os primeiros estudos nesta área foram realizados por Kramer (Kramer57) e (Kramer61), que especulou sobre a possibilidade da eficiência do nado dos golfinhos estar relacionada com um atraso na transição do escoamento laminar para turbulento devido a natureza resiliente de suas peles. Através de experimentos utilizando um cilindro revestido com material flexível, Kramer encontrou um substancial decréscimo na força de arraste quando comparado com corpos equivalentes de superfície rígida. Atualmente sabe-se que a presença de revestimentos flexíveis inibem o surgimento de instabilidades de Tollmien-Schlichting, (Benjamin60) e (Landahl62), (que é a instabilidade atuante em escoamento sobre sólidos rígidos), mas podem levar ao surgimento de outros modos de instabilidade.

Ainda que os mecanismos sugeridos por Kramer fossem duvidosos, seus resultados serviram de motivação para diversos trabalhos teóricos e experimentais, considerando escoamentos com números de Reynolds (razão entre forças

inerciais e viscosas) altos e moderados. Tais trabalhos focavam no aproveitamento do suposto atraso como ferramenta de redução do consumo de energia em aplicações marítimas e aeroespaciais.

1.2

Exposição do Problema

Com a publicação dos trabalhos de Kramer, não tardou até que as primeiras observações da existência de instabilidades subcríticas, *i.e.* devido a efeitos elastohidrodinâmicos, começassem a aparecer. O primeiro relato a se ter notícia foi feito por Krindel e Silberberg (Krindel79) que, ao estudarem a diferença de pressão necessária para fazer um fluido Newtoniano escoar por um tubo de paredes revestidas por um gel, observaram que o escoamento se tornava instável à um valor do número de Reynolds muito inferior a 2100 (normalmente o valor mínimo necessário), e que o gel tomava um perfil ondulado após os ensaios. Silberberg atribuiu o surgimento desta instabilidade a uma transição do escoamento, de laminar para turbulento, induzido pela presença do gel que revestia as paredes do tubo.

Como mencionado anteriormente, escoamentos sobre sólidos flexíveis são qualitativamente diferentes daqueles sobre sólidos rígidos. Enquanto neste último as tensões exercidas pelo fluido não são capazes de promover qualquer deformação no sólido, quando um líquido escoar sobre um sólido flexível as tensões exercidas pelo fluido sobre a interface líquido-sólido flexível podem vir a ser suficientes para deformar o sólido, o que por sua vez, altera a geometria e o padrão do escoamento. Isso mostra que há uma interação muito grande entre as duas dinâmicas, que pode levar o escoamento a se tornar instável mesmo a valores baixos do número de Reynolds.

Alguns anos se passaram, desde os estudos de Krindel e Silberberg, até que estudos focados na instabilidade subcrítica em escoamentos induzida por efeitos elastohidrodinâmicos começassem a se tornar comuns. O primeiro trabalho teórico sobre o assunto foi guiado por Kumaran, Fredrickson e Pincus, onde a estabilidade de um escoamento cisalhante de um fluido Newtoniano sobre um sólido viscoelástico linear foi analisada utilizando-se teoria linear. Os resultados obtidos mostraram que, mesmo na ausência de inércia do fluido, o escoamento sofria uma instabilidade quando a taxa de cisalhamento excedia um valor crítico, caso a espessura do sólido fosse maior que a do fluido. Esta conclusão é realmente surpreendente, pois, mostra que o mecanismo estabilizador de escoamentos sobre superfícies rígidas não possui qualquer relação com o mecanismo desestabilizador de escoamentos sobre paredes flexíveis.

O mecanismo físico responsável pela desestabilização de escoamentos sobre sólidos flexíveis é a transferência de energia do escoamento para flutuações na posição da interface devido ao trabalho de deformação exercido pelo fluido sobre a superfície elástica (Kumaran94), (Kumaran95), (Kumaran00) e (Shankar00). O valor da taxa de cisalhamento crítica varia de acordo com certas características do escoamento e depende principalmente da razão de espessura sólido-fluido e da relação entre forças viscosas e elásticas representada por Λ . A razão de espessuras sólido-fluido, que é a razão entre as espessuras da camada de sólido e a de fluido, é constante para um dado problema e não se altera ao longo do escoamento. Por outro lado a razão entre forças viscosas e forças elásticas Λ pode variar ao longo do tempo mediante a variação da velocidade característica ou tensão de cisalhamento imposta ao sistema. Na realidade, esta última grandeza é a responsável por desestabilizar um escoamento sobre paredes flexíveis. O surgimento da instabilidade ocorre quando Λ atinge um valor crítico Λ_{crit} no qual as forças elásticas exercidas pelo sólido em resposta a ação das forças viscosas exercidas pelo fluido não são mais capazes de suprimir deformações.

A figura 1.1 mostra, como exemplo, o perfil de velocidade de um escoamento de Couette entre placas paralelas rígidas. A distância entre as duas placas é H . A base é mantida fixa, enquanto o fluido no interior é cisalhado pela placa superior que se move a uma velocidade \mathbf{V} constante. Para que este escoamento se torne instável nesta configuração é necessário um número de Reynolds elevado o suficiente para que a inércia do fluido passe a dominar o sistema. A instabilidade levaria o escoamento a passar por uma transição em seu regime de laminar para turbulento.

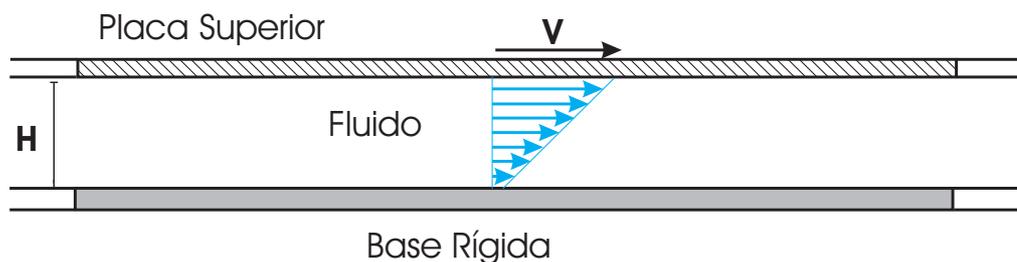


Figura 1.1: Escoamento de Couette de um fluido Newtoniano sobre um sólido rígido.

Ao se introduzir uma camada, de espessura H_R , de um material resiliente entre o líquido e a base rígida o comportamento do escoamento muda dramaticamente. No caso particular onde o número de Reynolds tende a zero, o parâmetro controlador do surgimento da instabilidade passa a ser a razão

entre forças viscosas e elásticas Λ . Caso o valor de Λ não ultrapasse seu valor crítico o escoamento mantém seu padrão laminar, semelhante a escoamentos sobre paredes rígidas, como mostrado na figura 1.2.

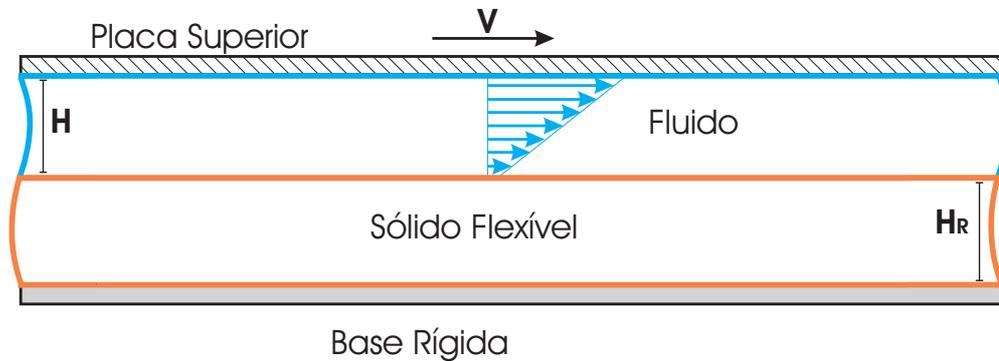


Figura 1.2: Linhas de corrente de um escoamento de Couette de um fluido Newtoniano sobre um sólido flexível $\Lambda < \Lambda_{critic}$.

Caso Λ seja elevado acima de seu valor crítico o escoamento torna-se instável, levando-o a perda de seu padrão original. Ao contrário do caso anterior onde a instabilidade altera o regime do escoamento de laminar para turbulento, a transição que aqui ocorre o mantém laminar, porém transiente, sendo impossível que um novo regime permanente seja atingido (Shankar00). A figura 1.3 ilustra esse comportamento.

É interessante notar que o parâmetro Λ não é completamente dependente de Re , sendo assim possível elevar seu valor a um patamar acima do crítico sem que seja necessário grandes alterações em Re . Algumas observações experimentais, que são melhor apresentadas na próxima seção mostram que a instabilidade pode vir a ocorrer mesmo em valores de Reynolds da ordem de 0,1, no caso particular de um escoamento de Couette.

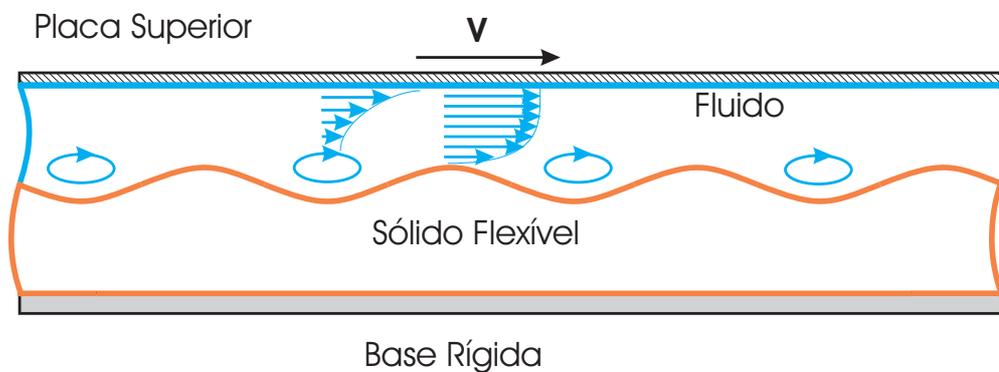


Figura 1.3: Linhas de corrente de um escoamento de Couette de um fluido Newtoniano sobre um sólido flexível após a instabilidade.

1.3

Evidências Experimentais

A primeira observação experimental da instabilidade num escoamento de Couette a baixos valores do número de Reynolds (i.e. com forças viscosas dominantes), foi relatada por Kumaran e Muralikrishnan (Kumaran99) alguns anos após o surgimento dos primeiros indícios teóricos. Neste experimento, uma camada fina de óleo de silicone foi posta sobre o topo de uma base feita de gel de poliacrilamida no interior de um reômetro de placas paralelas (Figura 1.4). O reômetro foi programado para aumentar a tensão de cisalhamento aparentemente linearmente ao longo do tempo, enquanto medidas da velocidade de rotação da placa superior eram tomadas. A partir desses dados os valores da taxa de cisalhamento e viscosidade aparentes foram calculados durante todo o ensaio. O número de Reynolds foi calculado por $Re = VR/\nu$, onde V é a velocidade da extremidade da placa superior, R é o raio da placa superior e ν é viscosidade cinemática do fluido.

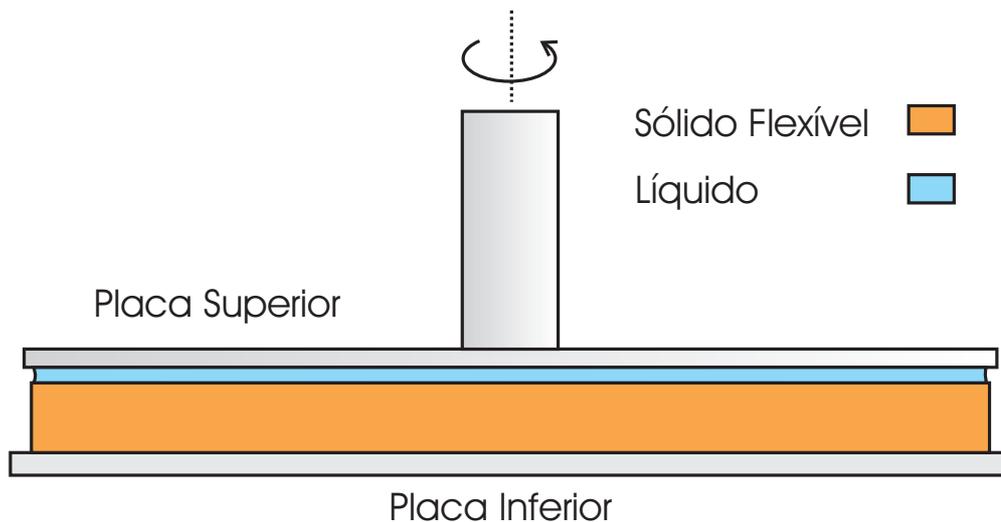


Figura 1.4: Configuração dos experimentos realizados por Kumaran e Muralikrishnan, e Eggert e Kumar, utilizando um reômetro de placas paralelas.

Os resultados encontrados mostram que no início a viscosidade aparente permanece constante, enquanto a taxa de cisalhamento aparente aumenta linearmente, como esperado. Quando um determinado valor da tensão é atingido, observa-se um aumento anômalo na viscosidade aparente, enquanto que a taxa de cisalhamento começa a decair. A figura 1.5 mostra este comportamento no resultado de um dos testes realizados.

Como ambos viscosidade e taxa de cisalhamento foram calculados considerando-se escoamento viscométrico, tal alteração só pode significar uma

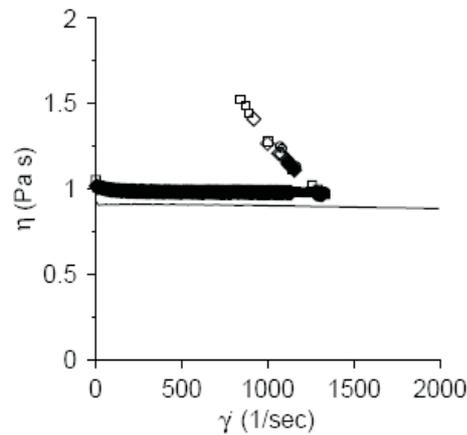


Figura 1.5: Variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento ambos aparentes resultantes em um dos testes realizados por Kumaran. A linha contínua mostra o resultado para um escoamento entre superfícies rígidas.

transição no padrão do escoamento. O número de Reynolds, entretanto, não ultrapassou o valor de 0,1, que é muito inferior ao necessário para que haja a transição de laminar para turbulento.

Este experimento comprovou o que já era previsto pela teoria, mas por motivos de danificação da superfície do gel, se limita a mostrar a existência da instabilidade.

O segundo trabalho experimental sobre este assunto foi guiado por Eggert e Kumar (Eggert04), utilizando um aparato muito semelhante ao de Kumaran e Muralicrishnan. Uma camada de óxido de polipropileno líquido (Voranol 415) foi colocado sobre uma base de gel de polidimetilsiloxano no interior de um reômetro de placas paralelas. O reômetro novamente foi ajustado para incrementar linearmente a tensão cisalhante aplicada no líquido, e calculou-se os valores da viscosidade e taxa de cisalhamento aparentes. Para se responder algumas perguntas sobre o comportamento pós transição do escoamento, Eggert e Kumar realizaram três procedimentos experimentais diferentes.

O primeiro foi direcionado a determinar se o escoamento pós-transição é oscilatório ou há um novo regime permanente. Para responder a esta pergunta, o reômetro foi programado para incrementar linearmente a tensão de cisalhamento aplicada no fluido até que a tensão crítica de transição fosse atingida, quando então seu valor foi mantido constante. A figura 1.6 mostra um gráfico da viscosidade aparente ao longo do tempo obtido em um dos testes.

Observa-se que no início do ensaio o valor calculado da viscosidade se mantém relativamente constante, quando então um aumento abrupto ocorre seguido de oscilações ao longo do tempo, mostrando estar em concordância com os resultados de Kumaran e Muralicrishnam (Kumaran99) e com a teoria de Shankar e Kumaran (Shankar00). Eggert e Kumar mostraram através de

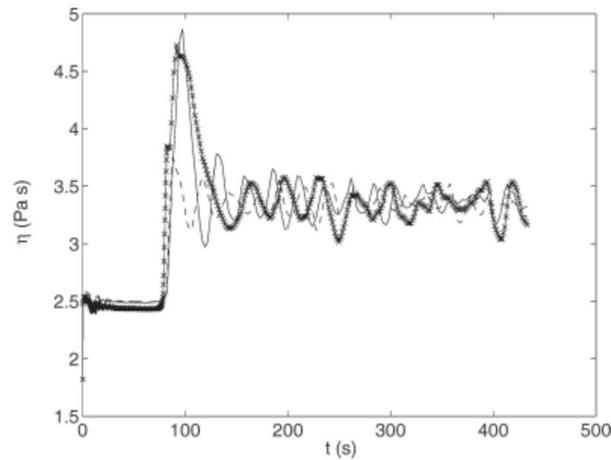


Figura 1.6: Variação da viscosidade aparente ao longo do tempo quando a tensão de cisalhamento aplicada é mantida a um valor constante acima da tensão crítica em três testes realizados por Eggert e Kumar.

um espectro de potências que as oscilações possuem frequências muito bem definidas.

O segundo procedimento foi direcionado à complexidade do escoamento. Assim, a tensão cisalhante aplicada foi elevada linearmente, partindo do repouso, a um valor acima da tensão de transição e então reduzida linearmente a zero. O gráfico mostrado na figura 1.7 mostra a variação da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento obtida em quatro testes. Os resultados mostram um comportamento com histerese, o que indica que o escoamento está longe de ser viscométrico.

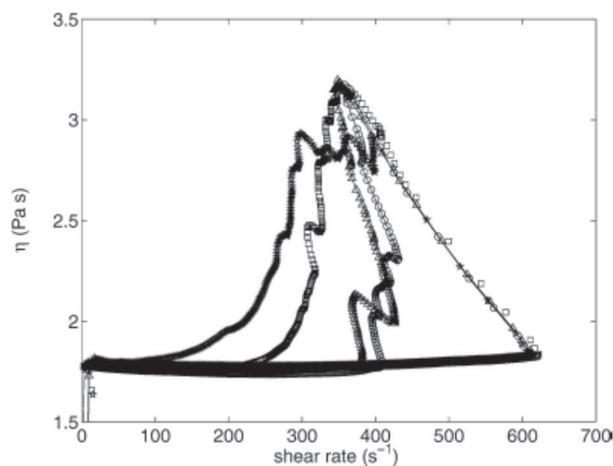


Figura 1.7: Variação da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento de quatro testes realizados por Eggert e Kumar.

O terceiro procedimento experimental, foi direcionado a entender a natureza subcrítica do escoamento, isto é, se para um dado conjunto de parâmetros do sistema existem duas ou mais possíveis soluções. Para tal,

incrementou-se linearmente a tensão cisalhante aplicada ao fluido até que esta atingisse um valor acima do seu valor de transição, quando então esta foi reduzida a valores inferiores à crítica. O resultado obtido em um dos testes pode ser visto na figura 1.8, onde o valor da viscosidade aparente é apresentada em função do tempo.

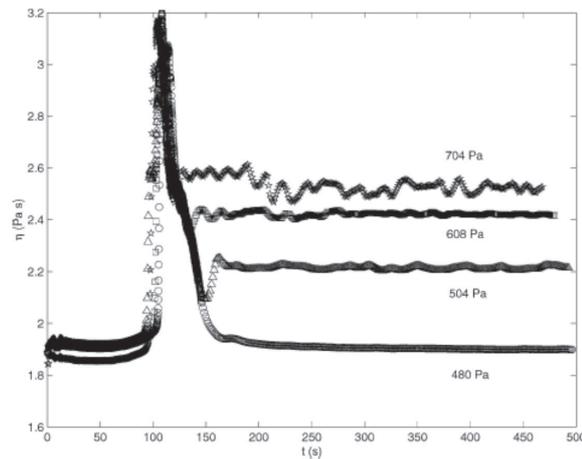


Figura 1.8: Variação da viscosidade ao longo do tempo quando a tensão de cisalhamento aplicada é elevada a um valor acima da crítica e então reduzida e mantida constante a um valor abaixo desta, em quatro testes realizados por Eggert e Kumar.

Conforme pode ser observado a viscosidade específica não retorna exatamente para seu valor inicial para todas as tensões subcríticas, *i.e.* existe um valor mínimo da tensão cisalhante para o qual o sistema reestabelece sua configuração inicial e o padrão original de escoamento é recuperado. Isto revela um comportamento não linear do escoamento, pois, não é possível retornar à configuração original do escoamento para todas as tensões de cisalhamento subcríticas.

Como resultado adicional deste experimento, Eggert e Kumar relataram a presença de ondulações na superfície do gel, o que indica que o perfil da interface muda durante o escoamento e que a instabilidade não se deve, apenas, a movimentos de extensão e contração da mesma.

1.4 Aplicações

A compreensão de como escoamentos viscométricos se comportam quando escoam sobre sólidos flexíveis possui aplicações em uma infinidade de campos. Este tipo de escoamento é, por exemplo, amplamente encontrado em processos biológicos como o escoamento de sangue e linfa em vasos, lubrificação de pálpebras e outras partes e no transporte de líquidos em geral pelo corpo.

O comportamento instável a baixos valores de Reynolds de escoamentos de Couette sobre sólidos flexíveis tem um forte potencial a ser explorado na indústria química e eletrônica. O comportamento oscilatório da interface durante o escoamento instável pode ser usado como ferramenta de desenvolvimento de certos dispositivos ópticos, micro e nano componente, entre outros.

O aumento das taxas de difusão no interior do escoamento podem ser aproveitadas como mecanismos de aumento de taxas de transferência de calor e de transporte de massa. Isso permitiria o desenvolvimento de novos trocadores de calor seletivos, e de novas tecnologias de transporte de material particulado em frestas.

Há ainda uma série de processos em que fluidos capazes de sofrer gelatinização podem ser encontrados. Estes fluidos muitas vezes provocam o surgimento de uma camada de gel flexível na superfície do canal por onde escoam. A compreensão de como as tensões resultantes do escoamento atuam no gel é de suma importância na determinação da velocidade máxima do escoamento, a qual ainda, não deve permitir a degradação do gel, que levaria a possíveis danificações e entupimento de equipamento.

1.5 Objetivo

O objetivo desta dissertação é possibilitar, através do uso de simulação numérica, um melhor entendimento de um escoamento (sem gradientes de pressão) sobre sólido flexível fixo. Esta análise permitirá uma melhor compreensão dos mecanismos de desestabilização e como os diversos parâmetros influenciam no comportamento pós-transição (*i.e.* devido a efeitos elasto-hidrodinâmicos).

Para isto, será considerado um escoamento de Couette bidimensional no interior do espaço anular formado por dois cilindros concêntricos. O cilindro interno é revestido com uma camada de espessura finita de um sólido elástico de Mooney-Rivlin, e o cilindro externo é rígido e se move a uma velocidade tangencial, V_{ext} , podendo esta ser constante ou não. A figura 1.9 apresenta a geometria considerada, onde a região alaranjada representa o sólido flexível e a de cor azul o fluido.

A simulação é complexa e exige a integração no tempo das equações diferenciais que governam o sólido e o fluido conjuntamente. O desconhecimento da localização exata da interface após a instabilidade caracteriza como um problema de fronteiras livres, representando um desafio adicional.

As equações que modelam o problema foram resolvidas expandindo o software de elementos finitos para fluidos do grupo da PUC-Rio, desenvolvido

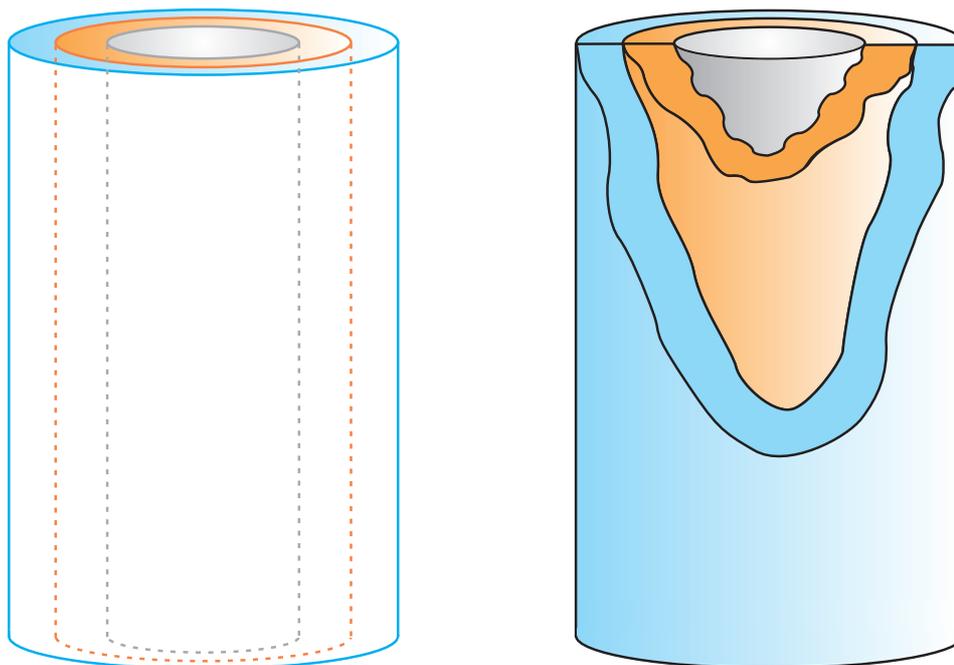


Figura 1.9: Cilindros concêntricos. O cilindro interno possui uma camada de um sólido flexível, enquanto o fluido permanece no espaço anular.

inicialmente por Carvalho (Carvalho96) para a solução exclusiva de problemas em regime permanente. A adição de novas rotinas capazes de viabilizar a solução transiente de problemas de escoamentos de fluidos e acoplamento fluido-estrutura constaram entre as tarefas realizadas.

1.6

Escopo e Roteiro da Dissertação

O conteúdo desta tese foi dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: Metodologia aplicada.

Capítulo 3: Formulação matemática do escoamento transiente sobre sólidos deformáveis.

Capítulo 4: Descrição dos métodos numéricos adotados para resolver o sistema de equações diferenciais em questão.

Capítulo 5: São apresentados os resultados para o escoamento de Couette sobre sólidos flexíveis.

Capítulo 6: Encerrando são apresentados os comentários finais e sugestões de investigações adicionais.