

8

Conclusões e Sugestões

A instabilidade existente em escoamentos de Couette à baixos valores de Reynolds é ainda um fenômeno pouco compreendido, e restrito à alguns poucos estudos. Nos últimos anos, com o desenvolvimento de tecnologias e processos onde fluidos escoam em contato direto com meio flexíveis, é que se despertou um maior interesse sobre o assunto promovendo um aumento nas pesquisas. Neste trabalho simulamos computacionalmente o processo de escoamento e as deformações provenientes deste ao longo do escoamento em regime estável até se atingir a transição para o instável, dando ênfase no comportamento dos meios.

O início da instabilidade é caracterizado pela deformação da interface (consequência da deformação dos domínios) formando ondas dinâmicas que se propagam na direção do fluxo do fluido. Estas ondas podem ou não afetar o padrão do escoamento, tendo um forte potencial na criação de componentes especiais que se deseja um perfil ondulado, ou no aumento de taxas de transferência de calor e de massa em micro sistemas.

Os testes de validação, os quais foram submetidos a rotina de solução de escoamento transiente e escoamento com interação fluido-estrutura sugerem resultados no mínimo coerentes, já que, para ambas as rotinas as soluções transientes sempre acabavam convergindo para soluções em regime permanente. É até possível que uma rotina computacional possuindo erros de modelagem ou programação forneça tal convergência. Contudo, as chances de que tal fato se dê são reduzidas. Infelizmente não foi possível comparar resultados gerados com a rotina de solução acoplada (interação sólido-líquido) devido a restrição de trabalhos disponíveis sobre o assunto. Mas acredita-se estar obtendo resultados satisfatoriamente próximos do correto.

Neste trabalho consideramos apenas duas razões de espessura: $\Pi = 1,0$ e $2,0$ e uma razão de massa específica $\Upsilon = 1$, onde foram estudados os comportamentos do sistema após o alcance do regime instável. A dificuldade em cobrir um número maior de casos se deve principalmente à problemas computacionais no pré-processador que limitam a distância entre o cilindro externo e a superfície do sólido flexível. Aumentar os diâmetros dos cilindros

possibilitaria contornar este problema, mas levaria à um aumento muito grande do número de elementos por domínio, passando a consumir um tempo computacional muito maior e impossibilitando a obtenção de resultados em tempo hábil.

Para a solução do problema foi assumido escoamento bidimensional em uma geometria cilíndrica de um fluido Newtoniano escoando sobre um sólido de Mooney-Rivlin. O sistema de equações diferenciais foi resolvido de maneira aproximada pelo método dos elementos finitos (método de Galerkin), enquanto que o conjunto de equações algébricas não-lineares resultantes, pelo método de Newton. A metodologia empregada para a determinação de Λ_{crit} é iterativa por tentativa e erro. Onde empregou-se uma busca binária para reduzir o número total de tentativas até sua determinação. Ainda assim, o tempo total necessário para a determinação do valor crítico de Λ para uma única razão de espessura foi de quase 1 mês.

Como resultado do trabalho desenvolvido, pode-se chegar às seguintes conclusões e sugestões para trabalhos posteriores:

8.1

Conclusões e Comentários

- O fenômeno de desestabilização pode ser controlado através da prescrição da tensão de cisalhamento média imposta ao sistema pela parede deslizante. Neste caso a velocidade desta última fica livre para variar, oscilando em uma faixa relativamente pequena. Quando tentamos controlar o fenômeno pela prescrição da velocidade da parede externa, a tensão de cisalhamento média resultante é quem passa a oscilar no tempo. O problema é que a oscilação desta grandeza não permite um controle adequado do fenômeno sendo, então, de uso desaconselhado.
- O mecanismo que deflagra o processo de desestabilização do escoamento na simulação numérica é um pouco diferente daquele que ocorre em escoamentos reais. Enquanto que em casos reais o sistema se torna instável devido a insuficiência de forças elásticas para suprimir as tensões de cisalhamento geradas, na simulação numérica do problema o simples acúmulo de erros computacionais podem desviar um ponto nodal de sua posição original na interface, causando um gradiente de pressões. Como o ponto está permanentemente fora de sua posição mesmo que as forças elásticas atuantes sejam fortes o suficiente para estabilizar o escoamento ($\Lambda < \Lambda_{crit}$), tal estabilização não será observada, e o escoamento entrará em regime instável. É claro que os módulos de elasticidade e cisalhamento do material continuarão a influenciar o surgimento da instabilidade,

porém o somatório de desvios devido erros de integração numérica tenderão a reduzir as tensões viscosas mínimas requeridas.

- Reduzindo-se a razão de espessura sólido-fluido a razão entre forças elásticas e viscosas Λ também é reduzida. Isto mostra que conforme se aumenta a razão de espessuras o sistema se torna mais suscetível ao surgimento de instabilidades interfaciais. Fato este comprovado em diversos artigos referenciados ((Kumaran94), (Kumaran95) e (Kumaran99)). Dessa maneira quanto menor a espessura da camada de fluido em relação a camada de sólido, mais facilmente o sistema é desestabilizado mediante a aplicação de perturbações.
- As ondas que se formam na interface são quasi-periódicas muito bem definidas. Cada uma dessas ondas se propagam à uma mesma velocidade (ou pelo menos à velocidades muito próximas).
- Os valores de pressão no fluido são mais baixos após o cume das cristas das ondas até cerca do ponto mínimo do cavado (no sentido do fluxo). Já pressões maiores são observadas a partir do cavado do vale até próximo o cume do pico (novamente no sentido do fluxo). Este perfil de gradiente permite que, enquanto houver o movimento da placa rígida, o escoamento e o deslocamento do sólido não serão capazes de atingir o equilíbrio (equalização das pressões). Logo, mantendo-se o sistema em instabilidade.
- A velocidade de propagação de ondas aparentemente atinge uma velocidade máxima durante a perda de estabilidade. É, contudo, difícil fazer tal afirmação observando apenas dois casos com um intervalo de amostragem relativamente pequeno do período instável do escoamento. De qualquer maneira, segundo o observado, a velocidade de propagação das ondas ao longo da interface são próximas da velocidade imposta ao fluido pela placa, mas não necessariamente iguais.
- Durante a propagação das ondas as regiões de cristas sofrem esforços compressivos, enquanto que as regiões de vales são tracionadas.
- A transição para o regime instável pode se dar sem alteração no padrão do escoamento do fluido. Isto é, o escoamento pode permanecer laminar e sem a formação de vórtices e mesmo assim o sistema pode ser instável. A formação de vórtices nas regiões de vales é possível para escoamentos com inércia maior, ou forças de resistência elásticas menores. Quando a as forças elásticas resistivas à deformação são menores, o sólido pode apresentar uma maior deformação resultando em vales mais profundos. Esta formação de vales mais profundos propicia a formação de vórtices.

- A tensão de cisalhamento média (e conseqüentemente da viscosidade aparente) possui uma freqüência de oscilação dominante, seguida por uma secundária ou faixa de freqüência de menor importância. A pequena quantidade de razões de espessura testados torna os resultados inconclusivos. Toda via, estes sugerem que, quanto menor for a razão de espessuras, maior será a freqüência dominante. Tal comportamento está de acordo com o esperado, já que, razões de espessura Π menores implica em velocidades maiores da placa deslizante para se atingir a instabilidade (considerando viscosidade, espessura da camada de fluido e modulo de cisalhamento constantes).

8.2

Sugestões

Com base nos conhecimentos e experiências adquiridas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, propõe-se as seguintes sugestões:

- Realizar testes com um número maior de razões de espessura, utilizando malhas com um maior número de elementos, para analisar melhor a influência desta razão sobre o sistema instável. Isto consumirá um tempo computacional muito grande, e por isto a simulação deve ser realizada em uma máquina de alta capacidade, preferencialmente com múltiplos processadores.
- Variar também grandezas como: razão de passa específica, viscosidade do fluido, modulo de elasticidade e cisalhamento, para se ter um completo entendimento da influência de cada um desses parâmetros no escoamento.
- Implementar no software **CFD** uma opção para a prescrição de tensão de cisalhamento (e possivelmente tensões normais) que possibilite compreender como o escoamento ocorre quando esta é a grandeza controlada. Realizando em seguida uma comparação entre resultados obtidos com controle de tensão e controle de velocidade.
- Implementar no software uma condição de contorno de não deslizamento mais adequada para problemas envolvendo superfícies deformáveis, onde a velocidade do fluido junto à parede flexível seja a própria velocidade da parede. Matematicamente falando $\mathbf{u}_{interface} = \frac{d\mathbf{x}_{interface}}{dt}$.
- Testar a validade da equação de aproximação da derivada segunda do espaço em função do tempo para passos de tempo variáveis. Isto é muito importante, sobretudo para adquirirmos uma confiança maior na rotina escrita, ou para verificarmos a necessidade de uma equação mais adequada.