6 Validação da Rotina de Solução Transiente Fluido-Sólido

O estudo de problemas elastohidrodinâmicos transientes é bastante complexo e ainda restrito a poucos casos. No campo experimental, não foram encontrados trabalhos de visualização onde o foco estivesse nas deformações sofridas por um sólido de Mooney-Rivlin (ou Neo-Hookeano) ao longo do tempo. No campo computacional o cenário não é muito diferente. Ainda que alguns poucos trabalhos estejam disponíveis, estes utilizam softwares comerciais do tipo "black box", nos quais os modelos e a metodologia de solução não é clara. Esses pacotes comerciais muitas vezes utilizam modelos simplificados que podem gerar discordâncias em relação a outros modelos. Mesmo que estas discordâncias sejam pequenas, torna-se difícil saber se estas se devem a erros na rotina ou à simplificação do modelo de referência. Isto faz com que a validação da rotina transiente de escoamento com iteração fluido-sólido por estes resultados seja inapropriada, pois, não há como garantir concordância dos modelos.

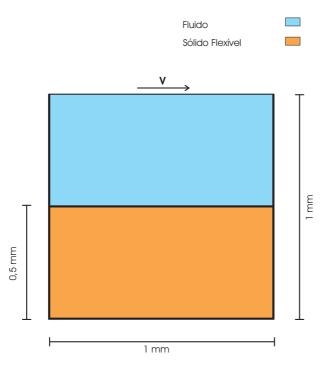


Figura 6.1: Cavidade reta (quadrada), utilizada para testar a rotina transiente com acoplamento sólido-fluido.

Na ausência de boas referências, optou-se por comparar as soluções de malha (i.e. a localização da interface e configuração deformada) geradas a partir da rotina transiente com as obtidas para o mesmo problema utilizando a rotina em regime permanente, observando-se se a primeira converge para esta última após transcorrido um tempo suficientemente longo. Para isto foi criado um caso de estudo baseado num escoamento no interior de uma cavidade bidimensional reta fechada, onde a parede inferior é revestida com um material flexível de Mooney-Rivlin (Fig. 6.2). A parede superior movese a uma determinada velocidade que pode ser constante ou variável. Desta forma pode-se acompanhar o desenvolvimento do escoamento e do campo de deformações, e observar se estes convergem para a solução em regime permanente. Este procedimento é análogo ao realizado anteriormente para validar a rotina de solução transiente de escoamento de fluidos. Porém, não serão tomadas uma série de soluções em regime permanente, pois a rotina de continuação por pseudo-comprimento de arco não foi desenvolvida para problemas elastohidrodinâmicos.

6.1 O Caso de Validação Estudado

A figura 6.2 mostra a configuração geométrica inicial do caso tratado. A rotina transiente é testada considerando inicialmente o sistema em repouso, quando uma componente horizontal de velocidade é aplicada à parede superior da cavidade. Esta componente de velocidade varia linearmente com o tempo até que um valor pré-estabelecido seja alcançado, quando então é mantida constante. O comportamento do sistema é observado até que se atinja o regime permanente (i.e. se existir). Os campos de deformação e velocidade obtidos são comparados aos resultados gerados pela rotina específica para soluções em regime permanente.

Poderia-se utilizar, ao invés de uma variação linear, uma variação abrupta na velocidade da parede superior. Entretanto a curva de estado do problema ($\|\vec{V}\|$ Vs. Re ou $\|\vec{V}\|$ Vs. Λ_{cav}) é desconhecida à priori, e perturbações de amplitudes finitas suficientemente grandes poderiam vir a excitar modos instáveis, ou mesmo levar o escoamento a atingir um estado em regime permanente diferente do desejado.

O alcance de um valor máximo da velocidade na parede da cavidade permite calcular o valor máximo para o número de Reynolds. Como o interesse aqui gira em torno da comparação de resultados em regime permanente, não faz sentido estudar profundamente o comportamento do escoamento durante o período transitório da velocidade da parede móvel da cavidade. Por este motivo

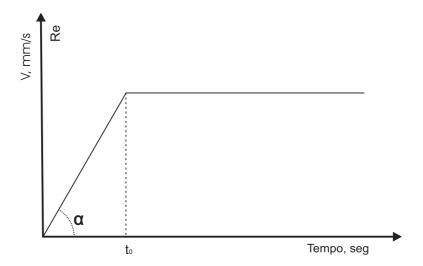


Figura 6.2: Relação Velocidade na parede superior Vs. tempo para cavidade revestida com sólido de Mooney-Rivlin.

daqui por diante nesta seção, a menos que mencionado o contrário, entende-se por número de Reynolds do escoamento o valor máximo que este adquire para aquele caso de estudo específico, e não o valor instantâneo.

Foram estudados 3 casos variando-se o número de Reynolds do escoamento nos valores máximos de Re=5, Re=10 e Re=20, calculados por: $Re=\rho VL/\mu$, onde L representa o comprimento da parede deslizante. Em todos os casos a viscosidade e as massas específicas do fluido e do sólido foram fixadas em $\mu=1$ $\rho_l=1$ e $\rho_s=1$ respectivamente. Os valores dos parâmetros β_0 e β_1 do sólido foram respectivamente fixados em $100g/mm \cdot s^2$ e $10g/mm \cdot s^2$, o que fornece aproximadamente um modulo de elasticidade de $360g/mm \cdot s^2$, e de cizalhamento de $120g/mm \cdot s^2$. O coeficiente angular da relação "Velocidade da parede versus Tempo" foi fixado em $10mm/s^2$, e o passo de tempo estabelecido em 0,01s. Foi utilizado em todos os casos uma malha composta por 20 colunas e 40 linhas de elementos, num total de 800 elementos.

6.1.1 Resultados

A figura 6.3 mostra a evolução no tempo da deformação do domínio sólido (e conseqüentemente do fluido) para um escoamento com Reynolds de 5 nos respectivos instantes 0, 1s, 0, 4s, 0, 5s e 2, 0s. A região branca corresponde ao domínio fluido enquanto que a alaranjada corresponde ao sólido flexível.

O processo de deformação se dá de forma suave e gradual, sem oscilações da posição da interface ao longo do tempo, até o instante de 0,5s. Para instantes de tempo superiores a 0,5s nenhuma alteração significativa na configuração dos domínios (e conseqüentemente na posição da interface) é observada. Isto mostra que há uma convergência do sistema para uma configuração

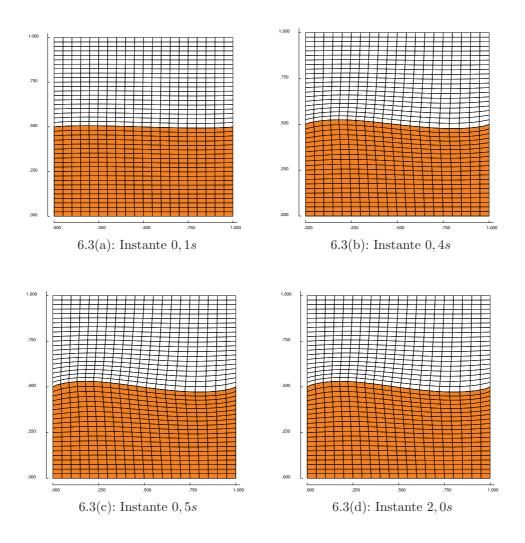


Figura 6.3: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido nos instantes 0, 1, 0, 4, 0, 5 e 2, 0 para Re = 5.

final para a qual os campos de velocidade, pressão e deformação passam a não variar mais no tempo, ou seja, que há um regime permanente. O verdadeiro alcance do regime permanente, entretanto, ocorre somente num instante de aproximadamente 2,0s (valor aproximado). Isto ocorre, pois, neste caso específico, apenas o campo de deformações atingiu sua configuração final em 0,5s, porém o escoamento continua a se desenvolver para aquela geometria até que este convirja para sua configuração final. De uma maneira geral, para o coeficiente angular utilizado na relação "Velocidade Vs. Tempo", em todos os casos a configuração geométrica final do sistema foi atingida praticamente junto com a velocidade máxima da parede superior da cavidade. Logicamente, coeficientes angulares maiores podem fornecer resultados diferentes, e até introduzir modos instáveis que se propaguem e cresçam ao longo do tempo, tornando o sistema intável e variante no tempo.

Como é conhecido previamente que o problema admite solução em regime

permanente, este resultado mostra-se coerente com a física do problema. Resta agora comparar o perfil de deformações obtidos com a solução gerada pela rotina considerando regime permanente (para o mesmo valor de Re). A figura 6.4 (6.4(a) e 6.4(b)) mostram o perfil de deformação do sólido para escoamento em regime permanente obtidos respectivamente pela rotina em regime transiente e permanente, para número de Reynolds de 5, utilizando os mesmos valores de parâmetros. A concordância é surpreendente, não é possível encontrar qualquer diferença entre um e outro perfil. Isso mostra que a rotina de solução transiente é capaz de reproduzir o comportamento do sistema guiando-o ao longo do tempo para o regime permanente com perfeição.

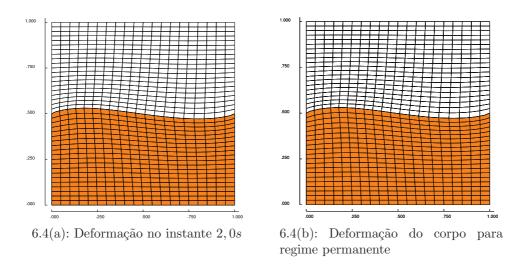


Figura 6.4: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido no instantes 2,0 e regime permanente para Re=5.

Tal reprodução seria muito difícil caso houvessem problemas na modelagem ou de ordem computacional, pois, o termo de derivada material segunda presente na equação de conservação de quantidade de movimento linear do sólido é muito sensível a erros. Problemas na modelagem desta resultariam em soluções impossíveis ou absurdas. Há a possibilidade de se obter uma falsa convergência para o regime permanente correto caso fosse permitido ao passo de tempo (Δt) variar livremente seu valor durante o processo de escoamento (sem limite de valor máximo). Caso isto ocorresse e o passo de tempo atingisse valores de altas magnitudes, tanto o termo de derivada primeira na equação de Navier-Stokes quanto o de derivada segunda na equação de conservação de quantidade de movimento linear do sólido tenderiam a zero, restando somente os termos espaciais, resultando num pseudo-regime permanente. Como o passo de tempo foi fixado não há riscos que tal mascaramento aconteça.

A figura 6.5(a) (6.5(a), 6.5(b), 6.5(c) e 6.5(d)) mostra respectivamente as

soluções obtidas para instantes de 0, 5s, 0, 8s, 1, 0s e 2, 6s considerando um Re de 10. Já considerando um Reynolds de 20 no interior da cavidade, os instantes 0, 6s, 1, 4s, 2, 0s e 3, 0s são mostrado pela fig 6.6.

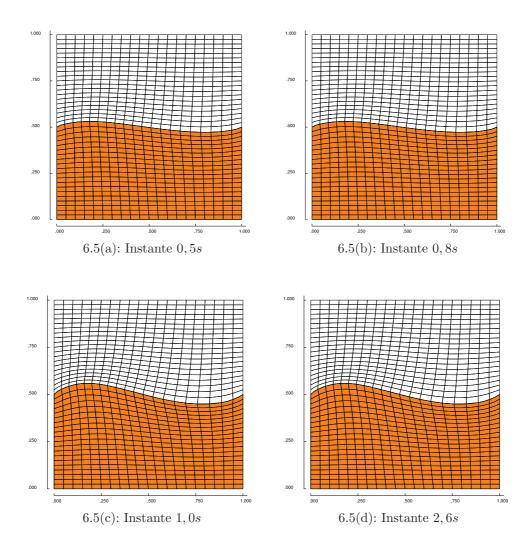


Figura 6.5: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido nos instantes 0, 5, 0, 8, 1, 0 e 2, 6 para Re = 10.

Em todos os casos o comportamento é semelhante ao observado com Re=5. O sólido se deforma suavemente ao longo do tempo, sem oscilações ou distorções. Além disso em todos os casos é observado o alcance de uma configuração final dos domínios, demonstrando que há uma convergência do escoamento para um regime estacionário.

Resultados do perfil de deformação final do sistema, obtidos respectivamente pelas rotinas de solução transiente e permanente, são observados na Fig 6.7 para Re = 10, e 6.8 para Re = 20.

Como pode ser observado, tanto para Re=10 quanto para Re=20, o comportamento é semelhante ao primeiro caso. Não se notam diferenças

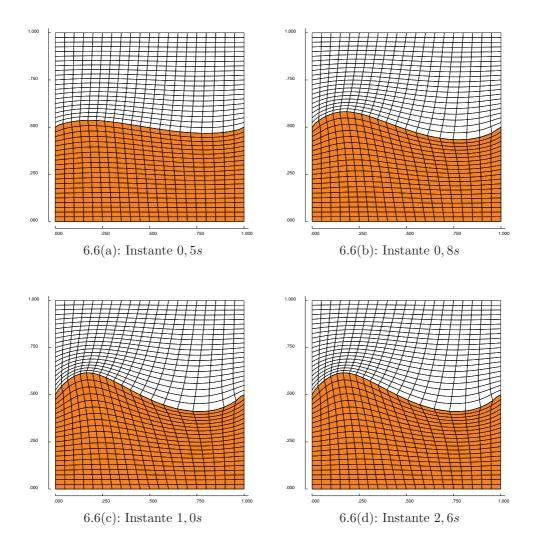


Figura 6.6: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido nos instantes 0,6,1,4,2,0 e 3,0 para Re=20.

entre as configurações obtidas por uma ou outra rotina, e de fato é impossível distinguir os dois resultados.

Estes dois últimos casos são particularmente importantes na comparação dos resultados, pois, devido à maior amplitude final do número de Reynolds, promovem uma maior deformação do sólido flexível em relação à configuração inicial. Pequenas deformações podem mascarar resultados ruins, entretanto, maiores amplitudes de deformação tendem a propagar maiores erros de modelagem ou computacionais, sendo mais indicadas para testes de validação.

Como nenhuma diferença foi encontrada entre os perfis de deformação do sólido obtidos pela rotina de solução em regime permanente e transiente (para escoamentos em regime permanente convergidos no tempo), será assumido daqui por diante que o problema foi corretamente modelado e a rotina corretamente escrita. Certamente esta não é a melhor técnica de validação, visto que não há garantia de que o comportamento entre o repouso e o regime

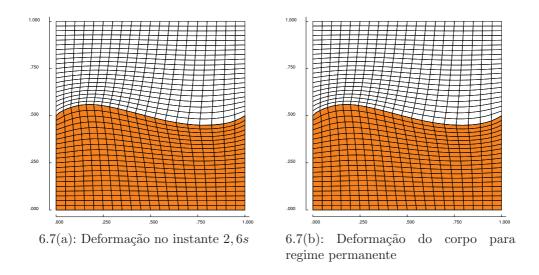


Figura 6.7: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido no instantes 2,6 e regime permanente para Re = 10.

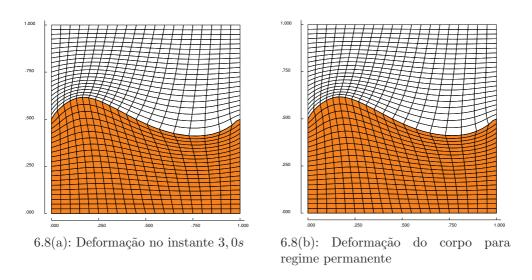


Figura 6.8: Perfil de deformação dos meios sólido e fluido no instantes 3,0 e regime permanente para Re=20.

permanente esteja correto. Contudo, a convergência temporal dos campos de velocidade, pressão e deformação para a solução em regime permanente é capaz de prover alguma confiança na utilização do programa.