

**Simulação computacional
adaptativa de escoamentos
bifásicos viscoelásticos**

Catalina Maria Rúa Alvarez

TESE APRESENTADA
AO
INSTITUTO DE MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE
DOUTOR EM CIÊNCIAS

Programa: Matemática Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Megiorin Roma

Co-orientador: Prof. Dr. Hector D. Ceniceros

Durante o desenvolvimento deste trabalho o autor recebeu
auxílio financeiro do CNPq e da Petrobras.

São Paulo, Julho de 2013.

Simulação computacional adaptativa de escoamentos bifásicos viscoelásticos

Esta tese contém as correções e alterações sugeridas pela Comissão Julgadora durante a defesa realizada por Catalina Maria Rúa Alvarez em 28/05/2013.

O original encontra-se disponível no Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo.

Comissão Julgadora:

- Prof. Dr. Alexandre Megiorin Roma (orientador) - IME-USP
- Prof. Dr. Luis Carlos Castro Santos - IME-USP
- Prof. Dr. Antonio Castelo Filho - ICMC-USP
- Prof. Dr. Rudimar Luiz Nós - UTFPE
- Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto - UFU-FEMEC

“Para los amores de mi vida que nunca dejaron de creer en mi...
A ustedes, John y Simon.”

Agradecimentos

Ao professor Alexandre, por toda sua ajuda, ensinamentos, orientação e paciência; é uma pessoa que admiro demasiado e a quem agradeço a conclusão desta tese e de minha parte espero receber inúmeras vezes a ele e à professora Angela no frio de Pasto para continuar esta e outras pesquisas. Ao professor Hector, por apresentar o problema, por toda sua disposição e por me receber junto com sua esposa Rosana na *University of California Santa Barbara*.

Ao Rudimar e à Millena, sem o trabalho de vocês eu não teria tido a oportunidade de trabalhar com estes grandes grupos de pesquisa FEMEC-UFU, ICMC-USP e IME-USP; toda sua ajuda e sugestões foi muito valiosa para mim. Aos membros da banca, pela paciência e leitura desta tese; suas correções enriqueceram este trabalho. Ao Cassio Oishi por compartilhar futuras aplicações e pesquisas que podem ser realizadas com este trabalho.

A toda minha família, ela é tão grande que tenho medo de esquecer de alguém, porque também considero meus grandes amigos como parte de minha família (mi mamá, mi papá, mis hermanos, mis sobrinos, mis suegros, mis cunhadas, mis tios y primos, mis amigos en Puerto Rico, para quienes estaban allí y ahora viven en otro lugar; para minha Pri Pri e o Alvaro, à Rita e o João, à Noely e o Pedro, os amigos do STAR, Eliza, Holguin y mis grandes amigos Aleja y Javi), em todo momento me acompanhando física ou emocionalmente, toda sua ajuda tem sido muito valiosa para mim.

Para as pessoas que completam minha alma, meu filho e meu esposo, agradeço sua espera e confiança, este trabalho é de vocês, não tenho palavras, “ustedes lo saben todo”.

Aos colegas do LabMAP, do IME-USP e de trabalho com o professor Alexandre (Fabio Fonseca, Felipe Nunes e Wellington), os administradores do LabMAP, especialmente ao Marcello Souza. Ao pessoal do MFLab da Universidade Federal de Uberlândia e aos professores do ICMC-USP; com eles aprendi muitas coisas novas nas reuniões do projeto. Um agradecimento especial para o Ricardo Serfaty e para o professor Aristeu Silvera Neto que permitiram minha participação no projeto e deram seu apoio em parte desta pesquisa.

Agradeço a todos os funcionários do IME-USP, audiovisuais, secretárias do departamento do MAP, da contabilidade e à CPG. Ao IME, pelo auxílio financeiro na participação de eventos. Ao CNPq e à Petrobras pelo suporte financeiro durante a realização deste trabalho.

Resumo

Rúa Alvarez, C.M. **Simulação computacional adaptativa de escoamentos bifásicos viscoelásticos**. 2013. Tese (Doutorado) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2013.

A simulação computacional de escoamentos incompressíveis multifásicos tem avançado continuamente e é uma área extremamente importante em Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) por suas várias aplicações na indústria, em medicina e em biologia, apenas para citar alguns exemplos. Apresentamos modelos matemáticos e métodos numéricos tendo em vista simulações computacionais de fluidos bifásicos newtonianos e viscoelásticos (não newtonianos), em seus regimes transiente e estacionário de escoamento. Os ingredientes principais requeridos são o Modelo de Um Fluido e o Método da Fronteira Imersa em malhas adaptativas, usados em conjunto com os métodos da Projeção de Chorin-Temam e de Uzawa.

Tais metodologias são obtidas a partir de equações a derivadas parciais simples as quais, naturalmente, são resolvidas em malhas adaptativas empregando métodos multinível-*multigrid*. Em certas ocasiões, entretanto, para escoamentos modelados pelas equações de Navier-Stokes (e.g. em problemas onde temos altos saltos de massa específica), tem-se problemas de convergência no escopo destes métodos. Além disso, no caso de escoamentos estacionários, resolver as equações de Stokes em sua forma discreta por tais métodos não é uma tarefa fácil. Verificamos que zeros na diagonal do sistema linear resultante impedem que métodos de relaxação usuais sejam empregados.

As dificuldades mencionadas acima motivaram-nos a pesquisar por, a propor e a desenvolver alternativas à metodologia multinível-*multigrid*. No presente trabalho, propomos métodos para obter explicitamente as matrizes que representam os sistemas lineares oriundos da discretização daquelas equações a derivadas parciais simples que são a base dos métodos de Projeção e de Uzawa. Ter em mãos estas representações matriciais é vantajoso pois com elas podemos caracterizar tais sistemas lineares em termos das propriedades de seus raios espectrais, suas definições e simetria. Muito pouco (ou nada) se sabe efetivamente sobre estes sistemas lineares associados a discretizações em malhas compostas bloco-estruturadas. É importante salientarmos que, além disso, ganhamos acesso ao uso de bibliotecas numéricas externas, como o PETSc, com seus pré-condicionadores e métodos numéricos, seriais e paralelos, para resolver sistemas lineares.

Infraestrutura para nossos desenvolvimentos foi propiciada pelo código denominado “AMR2D”, um código doméstico para problemas em DFC que vem sendo cuidado ao longo dos anos pelos grupos de pesquisa em DFC do IME-USP e da FEMEC-UFU. Estendemos este código, adicionando módulos para escoamentos viscoelásticos e para escoamentos estacionários modelados pelas equações de Stokes. Além disso, melhoramos de maneira notável as rotinas de cálculo de valores fantasmas. Tais melhorias permitiram a implementação do Método dos Gradientes Bi-Conjugados, baseada em visitas retalho-a-retalho e varreduras da estrutura hierárquica nível-a-nível, essencial à

implementação do Método de Uzawa.

Palavras-chave: Escoamentos bifásicos, Método de Uzawa, Método da Projeção, refinamento adaptativo de malhas, fluido não newtoniano, baixo número de Reynolds.

Abstract

Rúa Alvarez, C.M. **Adaptive computational simulation of two-phase viscoelastic flows.** 2013. Thesis (Ph.D.)- Institute of Mathematics and Statistics, University of São Paulo, 2013.

Numerical simulation of incompressible multiphase flows has continuously advanced and is an extremely important area in Computational Fluid Dynamics (CFD) because its several applications in industry, in medicine, and in biology, just to mention a few of them. We present mathematical models and numerical methods having in sight the computational simulation of two-phase Newtonian and viscoelastic fluids (non-Newtonian fluids), in the transient and stationary flow regimes. The main ingredients required are the One-fluid Model and the Immersed Boundary Method on dynamic, adaptive meshes, in concert with Chorin-Temam Projection and the Uzawa methods.

These methodologies are built from simple linear partial differential equations which, most naturally, are solved on adaptive grids employing multilevel-multigrid methods. On certain occasions, however, for transient flows modeled by the Navier-Stokes equations (e.g. in problems where we have high density jumps), one has convergence problems within the scope of these methods. Also, in the case of stationary flows, solving the discrete Stokes equations by those methods represents no straight forward task. It turns out that zeros in the diagonal of the resulting linear systems coming from the discrete equations prevent the usual relaxation methods from being used.

Those difficulties, mentioned above, motivated us to search for, to propose, and to develop alternatives to the multilevel-multigrid methodology. In the present work, we propose methods to explicitly obtain the matrices that represent the linear systems arising from the discretization of those simple linear partial differential equations which form the basis of the Projection and Uzawa methods. Possessing these matrix representations is on our advantage to perform a characterization of those linear systems in terms of their spectral, definition, and symmetry properties. Very little is known about those for adaptive mesh discretizations. We highlight also that we gain access to the use of external numerical libraries, such as PETSc, with their preconditioners and numerical methods, both in serial and parallel versions, to solve linear systems.

Infrastructure for our developments was offered by the code named “AMR2D” - an in-house CFD code, nurtured through the years by IME-USP and FEMEC-UFU CFD research groups. We were able to extend that code by adding a viscoelastic and a stationary Stokes solver modules, and improving remarkably the patchwise-based algorithm for computing ghost values. Those improvements proved to be essential to allow for the implementation of a patchwise Bi-Conjugate Gradient Method which “powers” Uzawa Method.

Keywords: Two-phase flows, Uzawa Method, Projection Method, adaptive mesh refinement, non-Newtonian fluid, low Reynolds number.

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

