Gladys Augusta Zevallos Nalvarte

Estabilidade do escoamento viscoelástico em processo de revestimento por rotação direta.

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós–graduação em Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Agosto de 2003

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Gladys Augusta Zevallos Nalvarte

Estabilidade do escoamento viscoelástico em processo de revestimento por rotação direta.

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós–graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio como parte dos requisitos parciais para obetnção Do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Márcio Carvalho
Co–Orientador: Prof. Matteo Pasquali

Rio de Janeiro
Agosto de 2003

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Gladys Augusta Zevallos Nalvarte

Estabilidade do escoamento viscoelástico em processo de revestimento por rotação direta.

Tese apresentada ao Programa de Pós–graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC–Rio como parte dos requisitos parciais para obetnção Do título de Doutor em Engenharia MecânicaAprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio Carvalho
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica — PUC–Rio

Prof. Matteo Pasquali
Co–Orientador
Department of Chemical Eng. — RICE University/USA

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes
Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Prof. Angela Ourivio Nieckele
Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Prof. Marcio Arab Murad
Departamento de Mecânica Computacional - LNCC

Prof. Felipe de Bastos Rachid
Departamento de Engenharia Mecânica - UFF

Prof. Nei Augusto Dumont
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC–Rio

Rio de Janeiro, 07 de Agosto de 2003

Gladys Augusta Zevallos Nalvarte

Graduou–se em Engenharia Mecânica na Universidade Nacional de Ingenieria - UNI (Lima, PERU). Mestrado em Engenharia Mecânica na PUC-Rio (Rio de Janeiro, BRASIL), usando o método de Volumes Finitos testou a resposta de três modelos de turbulência num tubo com obstrução curvilínea.

Ficha Catalográfica

Zevallos Nalvarte, Gladys Augusta

Estabilidade do escoamento viscoelástico em processo de revestimento por rotação direta./ Gladys Augusta Zevallos Nalvarte; orientador: Márcio Carvalho; co–orientador: Matteo Pasquali. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

148 f. : il. ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Processo de Revestimento por Rotação Direta. 3. Fluidos Viscoelásticos. 4. Tensor Conformação. 5. Análise de Estabilidade Linear. I. Carvalho, Márcio. II. Pasquali, Matteo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A Deus por ter me guiado até aqui e protegido no percurso.

Ao meu orientador Professor Márcio da Silveira Carvalho pela amizade, pela participação ativa na elaboração deste projeto, pelo esclarecimento de muitas das minhas dúvidas acadêmicas e por me lembrar que no doutorado se ”aprende a aprender”.

Ao meu co-orientador Professor Matteo Pasquali, pela nova oportunidade de vencer meus medos, pela hospitalidade e as boas idéias.

A Doris Vizcarra Fano, Luisa Flores, Daniel Zevallos Olivares e Eduardo Ingar Ventocilla *in memoriam* pelo exemplo de vida.

A minha familia de origem Carmen, Doris, Katty e Augusto por ser a motivação desta longa viagem.

A Carlos Eduardo pelo amor, apoio e por ser a meu principal incentivo para amadurecer.

A Johan e Bo Nygard pela oportunidade de um novo começo.

A minha irmã brasileira Ana Cristina, pelas brincadeiras, as conversas, e sobre tudo por ter me ajudado a entender que não é necessário ter uma casa para ter um lar.

A minha irmã chinesa Xueying que me mostrou como Deus distribui pessoas da mesma familia espiritual em familias muito diferentes na terra.

As minhas irmãs peruanas Ana Trujillo, Maria del Carmen Sáenz, Heidi Fayaque e Elizabet Vera grandes mestras, mulheres que resgatam a verdadeira identidade peruana.

As familias que formam parte da minha nova familia Joana, Presvitero, Ivone, Jô, Erika, Alejandro, Mattias, Karina, Katty, Abril, Eugenio, Roxana, Ivana, Raquel, Suzana, Sandra e o incomparável Presencia.

Aos meus amigos da UNI-PERU ”Los Jarros”pelo carinho, otimismo e esperança que tenho através deles no meu pais.

Aos meus amigos da PUC-Rio, Ricardo, Alberto Ildefonso, Marcia, Maria Helena, Marcelo Lavrador, Claudia Marcia, Andrea, as Julianas, Roney, Erick, Andre, Jesús, e tantos outros por terem alegrado minha passagem por aqui.

Aos meus amigos da Rice University Alberto e Rajat pela hospitalidade, amizade e pela troca de idéias, experiências e culturas.

Aos funcionários do departamento Carlucio, Flavia, Márcia, Christiano, Rosely, Nair e Carol pelas coisas simples do dia a dia.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Resumo

Zevallos Nalvarte, Gladys Augusta; Carvalho, Márcio; Pasquali, Matteo. **Estabilidade do escoamento viscoelástico em processo de revestimento por rotação direta.**. Rio de Janeiro, 2003. 148p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de revestimento por rotação é caracterizado pelo uso de cilindros girantes para controlar a espessura e aplicar uma fina camada de líquido em um substrato em movimento. O escoamento bi-dimensional na região de formação dos filmes sobre cada cilindro é instável, a não ser a baixas velocidades dos cilindros, e o padrão observado experimentalmente consiste num escoamento tri-dimensional e periódico na direção transversal ao substrato. Esta instabilidade pode limitar a velocidade máxima do processo devido a necessidade da camada líquida depositada sobre o substrato ser uniforme. Para líquidos Newtonianos, a estabilidade deste escoamento é determinada pela competição de forças viscosas e capilares: a instabilidade ocorre acima de um número de capilaridade máximo. Apesar da maioria dos líquidos utilizados em processos de revestimento serem não Newtonianos, as análises disponíveis deste escoamento se limitam a estudos de líquidos Newtonianos. O comportamento não Newtoniano do líquido pode alterar completamente a natureza do escoamento perto da superfície livre; quando pequenas quantidades de polímeros flexíveis de alto peso molecular estão presentes, a instabilidade na direção transversal ocorre a velocidades muito mais baixas, quando comparado ao caso Newtoniano. Os mecanismos responsáveis pela instabilidade a baixas velocidades ainda não são completamente compreendidos. Um escoamento viscoelástico com superfície livre é analisado neste trabalho através de duas equações constitutivas diferenciais, o modelo de Oldroyd-B e o modelo de FENE-P.

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear acopladas com os modelos constitutivos, e as equações não-lineares de mapeamento que transformam o problema de superfície livre em um problema de valor de contorno foram resolvidas pelo método de elementos finitos DEVSS-G/SUPG. O sistema de equações algébricas não lineares foi resolvido pelo método de Newton com continuação por pseudo-comprimento de arco. Os resultados mostram como o campo de tensão muda com o aumento do número de Weissenberg (elasticidade do líquido), levando a formação de uma camada limite de tensão elástica na superfície livre e tensões elásticas compressivas na direção transversal. Estes comportamentos podem explicar o aparecimento da instabilidade a baixas velocidades. Este trabalho também apresenta a formulação de estabilidade linear para escoamentos viscoelásticos com superfícies livres. O modelo dá origem a um problema de auto-valor generalizado, que foi resolvido pelo método de Arnoldi com o pacote (ARPACK). Os autovalores dominantes da matriz Jacobiana indicam a estabilidade do escoamento. Esta formulação foi testada em três escoamentos distintos: escoamento em uma cavidade de tampa móvel, piscina de líquido estática e um escoamento de Couette (simples de cisalhamento).

Palavras–chave

Processo de Revestimento por Rotação direta; Analise de estabilidade linear; Escoamento Viscoelástico; Tensor Conformação; método de Elementos Finitos.

Abstract

Zevallos Nalvarte, Gladys Augusta; Carvalho, Márcio; Pasquali, Matteo. **Stability of Viscoelastic Forward Roll Coating Flows**. Rio de Janeiro, 2003. 148p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Roll coating is distinguished by the use of one or more gaps between rotating cylinders to meter and apply a liquid layer to a substrate. Except at low speed, the film splitting flow that occurs in forward roll coating is three-dimensional and results in more or less regular stripes in the machine direction. This instability can limit the speed of the process if a smooth film is required as a final product. For Newtonian liquids, the stability of the film-split flow is determined by the competition of capillary forces and viscous forces: the onset of meniscus nonuniformity is marked by a critical value of the capillary number. Although most of the liquids coated industrially are polymeric solutions and dispersions, that are not Newtonian, most of previous theoretical analyses of film splitting flows dealt only with Newtonian liquids. Non-Newtonian behavior can drastically change the nature of the flow near the free surface; when minute amounts of flexible polymer are present, the onset of the three-dimensional instability occurs at much lower speeds than in the Newtonian case. The mechanisms responsible for the early onset of this flow instability is not well understood. This free surface coating flow is analyzed here with differential constitutive models, the Oldroyld-B and the FENE-P equations. The continuity, momentum equations coupled with the constitutive models, and the non-linear mapping equations that transform the free boundary problem into a fixed boundary problem are solved with the DEVSS-G/SUPG method with finite element basis functions. The resulting set of non linear equations is solved by Newton's method with pseudo-arc-length continuation. The results show how the stress field changes with Weisenberg number, leading to the formation of an elastic boundary layer near the free surface and compressive elastic stresses in the cross-flow direction that may explain the onset of the ribbing instability at smaller Capillary numbers when viscoelastic liquids are used. This work also presents the formulation for linear stability analysis of viscoelastic free surface flows. The model leads to a generalized eigenproblem that is solved here using the Arnoldi's method with the software (ARPACK). The leading eigenvalues of the Jacobian Matrix indicate the stability of the flow. The formulation is tested in three different flows: lid-driven cavity, static liquid pool and a couette flow.

Keywords

Fordward roll coating; Linear stability analysis; Viscoelastic Flow; Conformation Tensor; Finite-element method.

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas