



**Melisa Yvone Zambrano Becerra**

**Limites Operacionais do Processo de  
Revestimento por Cortina**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009



**Melisa Yvone Zambrano Becerra**

**Limites Operacionais do Processo de  
Revestimento por Cortina**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marcio da Silveira Carvalho**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo.**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes.**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Oldrich Joel Romero Gúzman.**

Departamento de Engenharia Petróleo - UFES

**Prof. Francisco Ricardo da Cunha.**

Departamento de Engenharia Mecânica - UNB

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Melisa Yvone Zambrano Becerra**

Graduou-se em Engenharia Química pela UNI (Perú) em 2002. Especializou-se em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio em 2005.

#### Ficha Catalográfica

Becerra, Melisa Yvone Zambrano

Limites Operacionais do Processo de Revestimento por Cortina / Melisa Yvone Zambrano Becerra; orientador: Marcio da Silveira Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

v., 96 f: il. (color) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Processo de Revestimento;. 3. Superfícies Livres;. 4. Elementos Finitos;. 5. Estabilidade da cortina;. 6. Fluido Viscoelástico..

I. Carvalho, Marcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Dedico este trabajo a mi Papá, Narcés,  
por todo el esfuerzo y sacrificio otorgado a, nosotros, sus hijos.

## Agradecimentos

Primeiro, agradeço a Deus pelo amparo e pelo maior presente que ele me deu, a vida.

Ao professor Marcio da Silveira Carvalho, pela sua constante orientação e dedicação, não só para o desenvolvimento deste trabalho, como também para meu aperfeiçoamento profissional.

Agradeço ao professor L.E. Scriven, pela oportunidade de realizar parte do trabalho no Laboratório de Processos de Revestimentos da Universidade de Minnesota. A Wieslaw Suszinsky pela ajuda concedida no trabalho experimental.

Aos membros da comissão examinadora por aceitar revisar o trabalho e pelas sugestões para a melhora deste.

A minha família em Perú, Narcés, Zare, Lissy e David pelo apoio incondicional.

Agradeço a este maravilhoso país, Brasil, que me acolheu da melhor maneira possível e me deu a oportunidade de crescer na vida profissional e pessoal.

Agradeço a meus amigos, aqueles que conheci bem no início de minha estadia aqui e não estão mais por perto, aqueles com quem continuamos compartilhando bons momentos e aqueles que conheci a pouco tempo, mas que parecem ser amigos de sempre.

Finalmente agradeço à CAPES, CNPq, FAPERJ e a PUC-Rio pelos auxílios concedidos.

## Resumo

Becerra, Melisa Yvone Zambrano; Carvalho, Marcio da Silveira. **Limites Operacionais do Processo de Revestimento por Cortina**. Rio de Janeiro, 2009. 96p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O revestimento por cortina é um dos processos preferidos para revestir o substrato de varias camadas de líquido à altas velocidades. Este tipo de processo pertence a classe de método de revestimento de vazão pre-fixada. O processo consiste num líquido de revestimento caindo livremente de uma altura considerável sob ação da gravidade sobre o substrato em movimento a ser revestido. Existem várias aplicações industriais deste processo, como filmes óticos, fitas adesivas e magnéticas, papéis especiais entre muitos outros. As mais importantes vantagens são revestimento à altas velocidades, adaptação a uma grande variedade de líquidos e flexibilidade na aplicação de finas camadas de líquidos em superfícies irregulares. Os limites operacionais do processo são determinados por diferentes instabilidades no escoamento perto da zona de encontro entre o líquido e o substrato como entrada de ar, formação de calcanhar e a cortina sendo puxada pelo substrato, e pela quebra da cortina de líquido. O objetivo principal deste trabalho é analisar teórico e experimentalmente esses limites operacionais, focando nos efeitos dos parâmetros operacionais, aditivos no líquido de revestimento no escoamento que ocorre na zona de encontro entre o líquido e o substrato, e na quebra da cortina. Para descrever o escoamento bidimensional que ocorre no processo de revestimento por cortina, na simulação numérica, foram utilizadas as equações de conservação de massa e de conservação de quantidade de movimento. O sistema de equações diferenciais foi resolvido utilizando o método de Galerkin e o sistema não linear foi resolvido com o método de Newton. Resultados teóricos, na zona de encontro entre líquido e o substrato, mostram a configuração do escoamento para líquidos Newtonianos, incluindo a formação de calcanhar e a cortina puxada pelo substrato como uma função da velocidade do substrato, da altura da cortina e da vazão. Estes resultados foram comparados com os resultados da visualização experimental encontrando assim a janela de operação do processo em função dos parâmetros operacionais. Na zona do escoamento da cortina, a condição crítica na qual cortina de líquido quebra foi determinada como uma função das propriedades reológicas dos líquidos de revestimento. Os resultados mostram que as propriedades viscoelásticas influenciam no balanço de forças no escoamento da cortina. Líquidos com alta viscosidade extensional podem reduzir notavelmente a vazão mínima necessária para formar e manter cortinas estáveis.

## Palavras-chave

Processo de Revestimento; Superfícies Livres; Elementos Finitos; Estabilidade da cortina; Fluido Viscoelástico.

## Abstract

Becerra, Melisa Yvone Zambrano; Carvalho, Marcio da Silveira (Advisor). **Operability Limits of the Curtain Coating Process**. Rio de Janeiro, 2009. 96p. DSc. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Curtain coating is one of the preferred methods for precision multi-layer coatings at high speeds. Curtain coating belongs to the class of pre-metered coating methods. Liquid falls as a sheet, or curtain, freely over a considerable height and under the action of gravity before it impinges onto the substrate being coated. Edge guides are needed to maintain at specific width of the falling curtain. Precision curtain coating was originally developed for multi-layer photographic film but its use has expanded to many different applications such as optical films and specialty papers. Some advantages of this process include very high coating speeds, adaptability to a wide range of liquids and flexibility to apply thin liquid layer to irregular surfaces. The operability limits of the process are set by different flow instabilities in the coating bead, such as air entrainment, low speed heels and curtain pulling, and by curtain breakup. The goal of this research is to analyze these operability limits by theory and experiments. The focus is to determine the effect of operating parameters; edge guides design and polymer additives on the coating solution on the bead configuration and liquid curtain breakup. The conservation mass and momentum equations with the boundary conditions were used to describe the flow. The equations were solved all together by Galerkin's method with finite element basis functions and non-linear system solved by Newton's method. Theoretical results show the bead configuration, including heel formation and curtain pulling as a function of web speed, curtain height and flow rate. Theoretical predictions will also be extended to include viscoelastic behavior of the coating liquid. This result was compared with experimental results to obtain the coating windows for fixed parameters. The visualization results show the critical condition at which a viscoelastic liquid curtain breaks was determined as a function of the rheological properties of the coating liquid. The results show that the viscoelastic properties can affect the force balance in the curtain flow. High extensional viscosity liquids can drastically reduce the minimal flow rate to create more stable curtains.

## Keywords

Coating Process; Free Surface; Finite Elements Method; Stability curtain; Viscoelastic Fluid.

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| Sumário das notações  | 14        |
| <b>1</b> Introdução   | <b>16</b> |
| 1.1 Processo de Revestimento  | 16        |
| 1.2 Método Revestimento por Cortina   | 18        |
| 1.2.1 Vantagens e Desvantagens do Revestimento por Cortina                    | 18        |
| 1.2.2 Revestimento de Multicamadas  | 20        |
| 1.2.3 Guias da Cortina  | 20        |
| 1.3 Revisão Bibliográfica: Escoamento no Processo de Revestimento por Cortina | 21        |
| 1.4 Janela de Operação  | 28        |
| 1.5 Líquido de Revestimento   | 29        |
| 1.6 Objetivos do Trabalho   | 30        |
| 1.7 Roteiro da Teses  | 30        |
| <b>2</b> Modelagem Numérica do Processo de Revestimento por Cortina           | <b>32</b> |
| 2.1 Descrição do Problema   | 32        |
| 2.2 Formulação Matemática   | 33        |
| 2.2.1 Equações de Conservação   | 33        |
| 2.2.2 Condições de Contorno   | 34        |
| 2.3 Problema com superfície livre: Geração de malha                           | 37        |
| 2.3.1 Condições de contorno para geração de malha                             | 39        |
| 2.4 Método de Solução do Sistema de Equações                                  | 40        |
| 2.4.1 Discretização Espacial  | 40        |
| 2.4.2 O Método de Galerkin/Elementos finitos                                  | 40        |
| 2.4.3 Solução do Sistema de Equações não Lineares pelo Método de Newton       | 44        |
| <b>3</b> Resultados Numéricos do Escoamento na Zona de Impacto                | <b>46</b> |
| 3.1 Topologia do mapeamento   | 47        |
| 3.2 Soluções preliminares   | 47        |
| 3.3 Teste de malha  | 48        |
| 3.4 Resultados  | 50        |
| 3.4.1 Ângulo de contato dinâmico  | 50        |
| 3.4.2 Configuração do escoamento na zona de impacto                           | 51        |
| 3.4.3 Altura da cortina   | 54        |
| 3.4.4 Efeito da Tensão Superficial  | 56        |
| 3.4.5 Janela de Operação  | 57        |
| <b>4</b> Visualização do Escoamento na Zona de Impacto                        | <b>59</b> |
| 4.1 Bancada Experimental  | 59        |
| 4.1.1 Seção de alimentação  | 61        |
| 4.1.2 Seção de teste  | 62        |
| 4.1.3 Seção de visualização   | 64        |
| 4.2 Líquidos de Revestimento  | 65        |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 4.3   | Procedimento Experimental                     | 66        |
| 4.4   | Resultados Experimentais                      | 67        |
| 4.4.1 | Velocidade de rotação do cilindro constante   | 68        |
| 4.4.2 | Vazão de alimentação constante                | 73        |
| 5     | Visualização da Zona de Escoamento da Cortina | <b>76</b> |
| 5.1   | Bancada Experimental                          | 76        |
| 5.1.1 | Seção de Alimentação                          | 76        |
| 5.1.2 | Seção de Teste                                | 77        |
| 5.1.3 | Seção de Visualização                         | 78        |
| 5.2   | Líquidos de Revestimento                      | 78        |
| 5.2.1 | Caracterização dos líquidos                   | 79        |
| 5.3   | Procedimento Experimental                     | 87        |
| 5.4   | Resultados Experimentais                      | 88        |
| 6     | Comentários Finais e Sugestões                | <b>91</b> |
| 6.1   | Comentarios Finais                            | 91        |
| 6.2   | Sugestões                                     | 92        |
|       | Referências Bibliográficas                    | <b>93</b> |

## Lista de figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Esquema simplificado do processo de revestimento  | 16 |
| 1.2  | Métodos de revestimento:(a) por cortina, (b) rotação reversa, (c) por extrusão e (d) por faca.                      | 17 |
| 1.3  | Revestimento por cortina.   | 19 |
| 1.4  | Revestimento por cortina de multicamadas  | 20 |
| 1.5  | Uso de guias no processo.   | 21 |
| 1.6  | Zonas de escoamento em um processo de revestimento por cortina  | 22 |
| 1.7  | Desviação hidrodinâmica da cortina a diferentes vazões, Klistler[1].  | 23 |
| 1.8  | Efeito “Teapot”, Kistler[1].  | 24 |
| 1.9  | Forças atuando do lado livre, resultado da ruptura da cortina.  | 25 |
| 1.10 | a) Perturbação da cortina. b) Cortina completamente desintegrada.   | 25 |
| 1.11 | Forma da zona de choque $Ca = 100$ (Kistler 1983) a) $U/V = 1$ b) $Re = 2,5$ .                                      | 27 |
| 1.12 | Janela de operação no processo de revestimento por cortina apresentada pelo Kistler[1].                             | 29 |
| 2.1  | Esquema do processo de revestimento por cortina com as principais variáveis de operação                             | 33 |
| 2.2  | Condições de contorno no domínio físico.  | 35 |
| 2.3  | Mapeamento do domínio físico para domínio de referência.  | 38 |
| 2.4  | Elemento bi-quadrático.   | 41 |
| 3.1  | Desenho esquemático do domínio do escoamento físico   | 46 |
| 3.2  | Domínios físico ( $\Omega$ ) e computacional ( $\Omega_o$ ) dividido em regiões.                                    | 47 |
| 3.3  | Problemas preliminares: a) Duas paredes deslizantes b) Uma parede deslizante e uma superfície livre.                | 48 |
| 3.4  | Linha de contato dinâmico, $X_{lcd}$ , na zona de impacto   | 49 |
| 3.5  | Posição da linha de contato dinâmica, $Ca = 1,5$ e $H_o = 45$ mm, para as diferentes malhas.                        | 49 |
| 3.6  | Influência do ângulo de contato dinâmico.   | 51 |
| 3.7  | Configurações da zona de impacto $Ca = 1,5$ e $H_o = 45$ mm: Formação de calcanhar e cortina puxada pelo substrato. | 53 |
| 3.8  | Posição da linha de contato dinâmico em função do número de Reynolds.   | 54 |
| 3.9  | Campo de pressão na zona de impacto para $Ca = 1,5$ e $Re = 7,5$ : a) $H_o = 45$ mm b) $H_o = 100$ mm.              | 55 |
| 3.10 | Posição da linha de contato dinâmico em função do número de Reynolds. Influência da altura da cortina.              | 55 |
| 3.11 | Influência da tensão superficial.   | 56 |
| 3.12 | Janela de Operação para uma altura de cortina fixa, $H_o = 45$ mm.  | 57 |
| 3.13 | Janela de Operação.   | 58 |
| 4.1  | Esquema tridimensional simplificado da bancada experimental.  | 60 |
| 4.2  | Fotografia da bancada experimental.   | 60 |
| 4.3  | Esquema da bancada experimental.  | 61 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.4  | Fotografia da bancada experimental: Seção de teste.   | 62 |
| 4.5  | Aplicador de revestimento usado no experimento.   | 63 |
| 4.6  | Concentração miscelar crítica.  | 65 |
| 4.7  | Zona de visualização.   | 67 |
| 4.8  | Sequência de imagens da variação da posição da linha de contato dinâmico com a variação da vazão. Velocidade do cilindro constante é igual a $U = 0,22$ m/s.  | 68 |
| 4.9  | Comportamento da linha de contato dinâmico, $X_{lcd}$ versus Número de Reynolds.  | 69 |
| 4.10 | Comparação qualitativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais.  | 71 |
| 4.11 | Comparação qualitativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais.  | 72 |
| 4.12 | Sequência de imagens da variação da posição da linha de contato dinâmico com a variação da velocidade do cilindro. Vazão constante e igual a $Q = 19,3$ gr/s.   | 73 |
| 4.13 | Comportamento da linha de contato dinâmico, $X_{lcd}$ versus Número de Reynolds.  | 74 |
| 4.14 | Histeresis na posição da linha de contato dinâmico.   | 75 |
| 5.1  | Esquema simplificado da bancada experimental para visualização da zona de escoamento.   | 77 |
| 5.2  | Picnômetro e balança utilizada para a medição de densidade. Foto tomada do tralhalho de Del Aguila [2](2008)  | 80 |
| 5.3  | Tensiômetro usado para medição de tensão superficial. Foto tomada do tralhalho de Del Aguila [2](2008)  | 81 |
| 5.4  | a) Reômetro rotacional b) Viscosímetro Cannon-Fenske.   | 81 |
| 5.5  | Viscosidade em função da taxa de cisalhamento.  | 82 |
| 5.6  | Viscosidade inerente em função da concentração de PEO na solução.   | 83 |
| 5.7  | Fotografia do reômetro extensional CABER: a) fechado b) aberto c) detalhe .   | 84 |
| 5.8  | Fotografia do reômetro extensional CABER: a) barras antes do afastamento b) durante o afastamento c) imediatamente depois do esticamento de líquido d) durante a ação das forças capilares no filamento e) quebra do filamento. | 85 |
| 5.9  | Evolução do diâmetro do filamento, formado pelas soluções no CABER, em função do tempo.   | 86 |
| 5.10 | Viscosidade extensional aparente em função da deformação.   | 86 |
| 5.11 | Sequência da evolução da quebra da cortina.   | 89 |
| 5.12 | Número de Weber Crítico em função da concentração de PEO.   | 90 |
| 5.13 | Número de Weber Crítico em função da inversa da viscosidade extensional.  | 90 |

## Lista de tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Refinamento de Malha.  | 49 |
| 5.1 | Propriedades das soluções para diferentes concentrações de PEO:<br>(1) Viscosidade medida no reometro, geometria Couette, (2) Viscosidade medida no viscosímetro Cannon-Feske. | 82 |
| 5.2 | Tempo de relaxação estimado da solução, diferentes concentrações de PEO.   | 83 |

*Cada uno da lo que recibe  
y luego recibe lo que da,  
nada es más simple,  
no hay otra norma:  
nada se pierde,  
todo se transforma.*

**Jorge Drexler, .**

## Sumário das notações

### Símbolos Romanos

|                    |  |
|--------------------|--|
| $x$                | Coordenada horizontal no domínio físico.   |
| $y$                | Coordenada vertical no domínio físico.   |
| $\mathbf{x}$       | Vetor posição no domínio físico.   |
| $V$                | Velocidade da cortina.   |
| $V_o$              | Velocidade inicial da cortina.   |
| $U$                | Velocidade do substrato.   |
| $\mathbf{v}$       | Vetor velocidade.  |
| $H$                | Espessura inicial do filme de líquido.   |
| $L$                | Comprimento inicial do filme de líquido.   |
| $H_o$              | Altura da cortina.   |
| $d$                | Espessura da cortina.  |
| $t$                | Espessura da camada de líquido depositado no substrato.                              |
| $h$                | Abertura da fenda do aplicador.  |
| $L_o$              | Comprimento do substrato revestido.  |
| $q$                | Vazão de alimentação por unidade de largura (volumétrica).                           |
| $Q$                | Vazão de alimentação massica.  |
| $p$                | Pressão.   |
| $p_a$              | Pressão do ambiente  |
| $g_x$              | Componente da gravidade na direção x.  |
| $g_y$              | Componente da gravidade na direção y.  |
| $\mathbf{g}$       | vetor gravidade.   |
| $T$                | Tensor das tensões.  |
| $\mathbf{I}$       | Tensor unitario.   |
| $J_T$              | Jacobiano de transformação.  |
| $D_\xi$            | Parâmetro de controle de espalhamento de malha.                                      |
| $D_\eta$           | Parâmetro de controle de espalhamento de malha.                                      |
| $\mathbf{t}$       | Vetor tangente ao escoamento.  |
| $\mathbf{R}_c$     | Vetor resíduo ponderado da equação de conservação de massa.                          |
| $\mathbf{R}_m$     | Vetor resíduo ponderado da equação de conservação de quantidade de movimento linear. |
| $\mathbf{R}_x$     | Vetor resíduo ponderado da equação de geração de malha.                              |
| $\hat{\mathbf{R}}$ | Vetor de residuos.   |
| $\mathbf{c}$       | Vetor solução.   |

**Símbolos Gregos**

|                |  |
|----------------|--|
| $\mu$          | Viscosidade do líquido.                                    |
| $\rho$         | Massa específica do líquido.                               |
| $\sigma$       | Tensão superficial.  |
| $\tau$         | Tensor das tensões associado com a viscosidade do líquido. |
| $\dot{\gamma}$ | Taxa de cisalhamento.                                      |
| $\beta$        | Coefficiente de deslocamento.                              |
| $\theta_d$     | Ângulo de contato dinâmico.                                |
| $\Omega$       | Domínio físico bidimensional.                              |
| $\Omega_o$     | Domínio de referencia bidimensional.                       |
| $\xi$          | Vetor posição no domínio de referência.                    |
| $\xi$          | Coordenada horizontal no domínio de referência.            |
| $\eta$         | Coordenada vertical no domínio de referência.              |
| $\Gamma$       | Contorno do domínio físico.                                |
| $\Gamma_o$     | Contorno do domínio de referência.                         |
| $\phi_i$       | Funções base.  |