



**Eduardo de Britto Perez**

**Processo de revestimento por extrusão: efeito da  
oscilação da fresta na uniformidade da espessura do filme**

**Tese de Doutorado**

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

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro  
Agosto de 2009



**Eduardo de Britto Perez**

**Processo de revestimento por extrusão: efeito da  
oscilação da fresta na uniformidade da espessura do filme**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Francisco A. M. Gomes Neto**

IMECC – UNICAMP

**Prof. Roney Leon Thompson**

Departamento de Eng. Mecânica – Universidade Federal Fluminense

**Prof. Luiz Fernando A. Azevedo**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Angela O. Nieckele**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Agosto de 2009

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

### **Eduardo de Britto Perez**

Graduou-se em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, em 1995 e obteve grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio em 2004. Trabalha na 3M do Brasil Ltda desde 1996, atuando como Engenheiro de Projetos nas áreas de revestimento, polimerização, secagem e corte de fitas adesivas diversas.

#### Ficha Catalográfica

Perez, Eduardo de Britto

Processo de revestimento por extrusão : efeito da oscilação da fresta na uniformidade da espessura do filme / Eduardo de Britto Perez ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. – 2009.

240 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Revestimento por extrusão. 3. Oscilação da fresta de revestimento. 4. Resposta em frequência. 5. Simulação numérica. 6. Otimização. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para minha esposa, Simoni,  
eterno amor da minha vida.

## Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador Professor Márcio da Silveira Carvalho pelo apoio e parceria na realização deste trabalho.

Ao CNPq e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À 3M do Brasil, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À minha querida esposa, Simoni, pelo amor, carinho e apoio em todas as horas.

Aos meus pais, Sr. João e D. Nadir, que sempre lutaram pelo meu sucesso e foram vencedores.

Aos professores que participaram da banca examinadora.

Aos meus irmãos, amigos e familiares que contribuíram e que de alguma forma me incentivaram.

## Resumo

Perez, Eduardo de Britto; Carvalho, Márcio da Silveira. **Processo de revestimento por extrusão: efeito da oscilação da fresta na uniformidade da espessura do filme.** Rio de Janeiro, 2009. 240p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de revestimento por extrusão (*slot coating*) é muito utilizado em produtos que requerem alta uniformidade de espessura. Sua janela de operação em regime permanente já foi plenamente estudada, mas o entendimento completo do processo requer a análise da sua sensibilidade a pequenas variações nos parâmetros operacionais. Neste trabalho é feita uma análise transiente (por simulação numérica) do efeito de uma variação periódica conhecida da fresta de revestimento na uniformidade da espessura do líquido revestido. Várias geometrias de barras de revestimento e parâmetros de processo são testados e os respectivos fatores de amplificação determinados em função da frequência de oscilação da fresta de revestimento. O ajuste inicial da fresta e o nível de vácuo aplicado a montante da barra de revestimento são duas variáveis básicas de processo, pois podem ser rapidamente ajustadas. Gráficos de contorno do fator de amplificação no espaço da fresta de revestimento contra o nível de vácuo são mostrados e surgem conclusões interessantes sobre a condição ótima de ajuste para minimização do fator de amplificação. Um algoritmo de otimização é utilizado com o objetivo de determinar pontos de mínimo no campo do fator de amplificação no espaço da fresta de revestimento contra o nível de vácuo. O líquido é considerado Newtoniano e as simulações são feitas a baixos números de capilaridade e Reynolds.

## Palavras-chave

Revestimento por extrusão; oscilação da fresta de revestimento; resposta em frequência; simulação numérica; otimização.

## Abstract

Perez, Eduardo de Britto; Carvalho, Márcio da Silveira. **Slot coating process: effect of gap oscillation on the coating thickness uniformity.** Rio de Janeiro, 2009. 240p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Slot coating is one of the preferred methods when high precision is required and several studies focusing on its steady state analysis were made to determine the operating window of the process. However, full understanding of coating flows requires not only the two-dimensional, steady state solution of the governing equations, but also the sensitivity of those flows to small upsets. An effort to understand the impact of the coating gap periodic oscillation on down web thickness variation is made using computer aided simulation. Different slot die lip geometries and process conditions are tested and the respective amplification factors as a function of gap oscillation frequencies are reported. Coating gap and the vacuum level are particularly important process variables because they are easily changed by the process engineer. Two dimensional contour plots of the amplification factor in the space of coating gap against vacuum level are reported for some geometries, and interesting results show up about their optimal adjustments. In the last chapter an optimization algorithm is used to find minimum values of the amplification factor of gap oscillation in the space of coating gap against vacuum level. The liquid is assumed Newtonian and computations are made at low capillary (up to 1.6) and Reynolds numbers. The transient free surface flow with appropriate boundary conditions is solved by the Galerkin/finite element methods, with time integration by a predictor-corrector algorithm. The set of non-linear algebraic equations for the finite element basis functions coefficients is solved by Newton's method.

## Keywords

Slot coating; gap oscillation; frequency response; computer-aided simulation; optimization.

## Sumário

1. Introdução	23
1.1. Escoamento com superfície livre	26
1.2. Escoamento de revestimento	28
1.3. Barras de revestimento	30
1.4. Importância da geometria dos lábios da barra de revestimento	35
1.5. Métodos numéricos de otimização	39
2. Modelo matemático do processo de revestimento por extrusão em regime transiente	41
2.1. Formulação de problemas de escoamento com superfície livre	46
2.2. Método para solução do escoamento transiente com superfície livre	49
2.3. Implementação das condições de contorno da equação da conservação da quantidade de movimento	64
2.4. Implementação das condições de contorno da equação de geração da malha	66
3. Simulação numérica do processo de revestimento por extrusão em regime transiente	70
3.1. Robustez do método numérico	71
3.2. Características da variação de espessura em decorrência da oscilação da fresta de revestimento	74
3.3. Resposta em frequência do fator de amplificação	87
3.3.1. Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de revestimento	91
3.3.2. Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta do lábio à montante	93
3.3.3. Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste do nível de vácuo à montante	98
3.3.4. Sensibilidade do fator de amplificação em relação ao comprimento do lábio à jusante	100



## Sumário (continuação)

3.3.5. Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de alimentação do líquido	103
3.3.6. Sensibilidade do fator de amplificação em relação ao ângulo de convergência do lábio à jusante	105
3.3.7. Sensibilidade do fator de amplificação à mudança no número de capilaridade	106
3.3.8. Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste de velocidade do substrato	107
4. Análise dimensional para determinação da frequência e fator de amplificação do pico máximo	110
4.1. Relação entre os parâmetros adimensionais	119
4.1.2. Relação entre os parâmetros adimensionais na frequência de pico máximo	119
4.1.3. Relação entre os parâmetros adimensionais e o fator de amplificação no pico máximo	125
5. Fator de amplificação em função das variáveis de processo: Determinação da condição ótima de operação	128
5.1. Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo	129
5.2. Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo para velocidade do substrato em 12 m/min	135
5.3. Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo para outras geometrias	139
6. Obtenção da condição ótima de operação utilizando o algoritmo de minimização com restrição tipo caixa	147
6.1. Teoria da otimização não linear com restrição tipo caixa	149
6.1.1. Validação do algoritmo de minimização de quadráticas	151
6.1.1.1. Matriz Hessiana definida positiva	152

## Sumário (continuação)

6.1.1.2. Matriz Hessiana definida negativa	160
6.1.1.3. Matriz Hessiana indefinida	162
6.1.1.4. Matriz Hessiana semi-definida positiva	163
6.1.2. Validação do algoritmo para minimização de uma função geral	165
6.2. Aplicação do algoritmo de minimização em caixa para otimização do processo de revestimento por extrusão	169
7. Considerações finais	174
Referências bibliográficas	176
Apêndice: Programa de minimização de funções com restrição tipo caixa	179

## Lista de figuras

Figura 1 – Barra de revestimento por extrusão	24
Figura 2 – Seção de uma barra de revestimento por extrusão Mostrando a nomenclatura e as regiões com escoamento sem superfície livre (A) e com escoamento com superfície livre (B)	27
Figura 3 – Método de revestimento com vazão pré-fixada ( <i>Coating fundamentals, University of Minnesota, Jun 2003</i> )	29
Figura 4 – Método de revestimento com vazão pós-fixada ( <i>Coating fundamentals, University of Minnesota, Jun 2003</i> )	29
Figura 5 – Método de revestimento por extrusão (Kistler, S., <i>Liquid film coating, 1997</i> )	31
Figura 6 – Método de revestimento por extrusão sobre substrato tensionado (Kistler, S., <i>Liquid film coating, 1997</i> )	32
Figura 7 – Método de revestimento por cascata (Kistler, S., <i>Liquid film coating, 1997</i> )	32
Figura 8 – Método de revestimento por cortina (Kistler, S., <i>Liquid film coating, 1997</i> )	33
Figura 9 – Visão lateral do método de revestimento por extrusão	35
Figura 10 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor, 1990)	36
Figura 11 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor, 1990)	36
Figura 12 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor, 1990)	37
Figura 13 – Patentes de barras de revestimento mostrando diferentes geometrias externas (Romero, 2003)	38
Figura 14 – Patentes de barras de revestimento mostrando diferentes geometrias externas (Park, 2005)	38
Figura 15 – Variáveis geométricas de uma barra de revestimento por extrusão	40

## Lista de figuras (continuação)

Figura 16 – Domínio físico do escoamento de revestimento por extrusão	41
Figura 17 – Mapeamento entre domínio físico e de referência (Carvalho, 1995) Romero & Carvalho (2005)	47
Figura 18 – Elemento quadrangular	60
Figura 19 – Mapeamento do contorno do domínio	67
Figura 20 – Distribuição de nós em contorno	68
Figura 21 – Distribuição de nós em contorno	69
Figura 22 – Malhas com 256, 328 e 384 elementos	72
Figura 23 – Geometria para validação do número de elementos da malha e do passo de tempo utilizado	72
Figura 24 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	75
Figura 25 – Campo de pressão e linhas de corrente na fresta de revestimento em alguns instantes durante um ciclo de oscilação	76
Figura 26 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	76
Figura 27 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	77
Figura 28 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	77
Figura 29 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	78
Figura 30 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	78
Figura 31 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	79
Figura 32 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	79

## Lista de figuras (continuação)

Figura 33 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	80
Figura 34 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	81
Figura 35 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	81
Figura 36 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	82
Figura 37 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	82
Figura 38 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	83
Figura 39 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	83
Figura 40 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	84
Figura 41 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	85
Figura 42 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	85
Figura 43 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	86
Figura 44 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	86
Figura 45 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente	87
Figura 46 – Geometria base para comparação da resposta em frequência do fator de amplificação	88

## Lista de figuras (continuação)

Figura 47 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (46), parâmetros de processo da tab. (9), amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 0,010 mm e espessura de revestimento de 0,050 mm	89
Figura 48 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (49), parâmetros de processo da tab. (10), amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 0,001 mm e espessura de revestimento de 0,050 mm	90
Figura 49 – Exemplo de geometria de um dos casos que não apresentou crescimento monotônico do fator de amplificação com a frequência	91
Figura 50 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de revestimento	92
Figura 51 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (50) e parâmetros de processo da tab. (9)	93
Figura 52 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta à montante	94
Figura 53 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (52) e parâmetros de processo da tab. (9)	95
Figura 54 – Geometria tipo “faca raspadora” utilizada para comparação com as geometrias <i>underbite</i> e <i>overbite</i>	95
Figura 55 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (54)	96
Figura 56 – Geometrias com menor característica de “faca raspadora” que a geometria da fig. (54)	97
Figura 57 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias das fig. (54) e (56)	98

## Lista de figuras (continuação)

Figura 58 – Diferentes posições da superfície livre à montante utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste do nível de vácuo à montante	99
Figura 59 – Resposta em frequência do fator de amplificação para diferentes níveis de vácuo à montante	100
Figura 60 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao comprimento do lábio à jusante	102
Figura 61 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (60) e parâmetros de processo da tab. (9)	102
Figura 62 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de alimentação do líquido	104
Figura 63 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (62) e parâmetros de processo da tab. (9)	104
Figura 64 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ângulo de convergência do lábio à jusante	105
Figura 65 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (64) e parâmetros de processo da tab. (9)	106
Figura 66 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (46) e parâmetros de processo da tab. (11)	107
Figura 67 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (46), viscosidade, densidade, tensão superficial da tab. (9) e velocidade do substrato conforme tab. (12)	108
Figura 68 – Geometria base para análise dimensional	112
Figura 69 – Pressão sob a fresta de alimentação para a frequência de oscilação da fresta de revestimento em 50 Hz, amplitude de 0,010 mm, geometria da fig. (68) e parâmetros de processo da tab. (14)	114

## Lista de figuras (continuação)

Figura 70 – Pressão sob a fresta de alimentação para a frequência de oscilação da fresta de revestimento em 3 Hz, amplitude de 0,010 mm, geometria da fig. (68) e parâmetros de processo da tab. (14)	115
Figura 71 – Pressão sob a fresta de alimentação para a frequência de oscilação da fresta de revestimento em 320 Hz, amplitude de 0,010 mm, geometria da fig. (68) e parâmetros de processo da tab. (14)	116
Figura 72 – Geometria base para determinação do campo do fator de amplificação	129
Figura 73 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz e 0,010 mm	130
Figura 74 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 10 Hz e 0,010 mm	131
Figura 75 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz e 0,010 mm	132
Figura 76 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 50 Hz e 0,010 mm	133
Figura 77 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz e 0,010 mm	134



## Lista de figuras (continuação)

Figura 78 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (25), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz e 0,010 mm	136
Figura 79 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (25), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 50 Hz, 100 Hz e 0,010 mm	137
Figura 80 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (25), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz e 0,010 mm	138
Figura 81 – Geometria para determinação do campo do fator de amplificação	139
Figura 82 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81), parâmetros de processo da tab. (28), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz, 10 Hz e 0,010 mm	140
Figura 83 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81), parâmetros de processo da tab. (28), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz, 50 Hz e 0,010 mm	141
Figura 84 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81), parâmetros de processo da tab. (28), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz e 0,010 mm	142
Figura 85 – Geometria para determinação do campo do fator de amplificação	143

## Lista de figuras (continuação)

Figura 86 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (85), parâmetros de processo da tab. (30), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 500 Hz e 0,010 mm	146
Figura 87 – Curvas de nível de $f$ e indicação do ponto ótimo em um domínio compacto	147
Figura 88 – Variáveis geométricas para otimização da função objetivo	149
Figura 89 – Hessiana definida positiva, caso 1	152
Figura 90 – Hessiana definida positiva, caso 2	153
Figura 91 – Hessiana definida positiva, caso 3	153
Figura 92 – Hessiana definida positiva, caso 4	154
Figura 93 – Hessiana definida positiva, caso 5	155
Figura 94 – Hessiana definida positiva, caso 6	155
Figura 95 – Hessiana definida positiva, caso 7	156
Figura 96 – Hessiana definida positiva, caso 8	156
Figura 97 – Hessiana definida positiva, caso 9	157
Figura 98 – Hessiana definida positiva, caso 10	157
Figura 99 – Hessiana definida positiva, caso 11	158
Figura 100 – Hessiana definida positiva, caso 12	159
Figura 101 – Hessiana definida positiva, caso 13	159
Figuras 102 – Hessiana definida negativa, caso 1	162
Figuras 103 – Hessiana definida negativa, caso 2	161
Figuras 104 – Hessiana definida negativa, caso 3	161
Figuras 105 – Hessiana indefinida, caso 1	162
Figuras 106 – Hessiana indefinida, caso 2	163
Figuras 107 – Hessiana semi-definida positiva, caso 1	164
Figuras 108 – Hessiana semi-definida positiva, caso 2	164
Figuras 109 – Função geral para validação do método Numérico, caso 1	165

## Lista de figuras (continuação)

Figuras 110 – Função geral para validação do método Numérico, caso 2	167
Figuras 111 – Função geral para validação do método Numérico, caso 3	168
Figura 112 – Esquema numérico para estimativa do gradiente e da hessiana no ponto $(x,y)$	169
Figura 113 – Iterações do algoritmo de minimização em caixa	171
Figura 114 – Iterações do algoritmo de minimização em caixa	172

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de processo para validação do número de elementos da malha e do passo de tempo utilizado	72
Tabela 2 – Fator de amplificação para cada frequência e malha. Diferença % entre 2 malhas para a mesma frequência	73
Tabela 3 – Tempo de execução da simulação numérica para quatro ciclos completos de oscilação da fresta de revestimento	73
Tabela 4 – Fator de amplificação para cada frequência e malha. Diferença % entre 2 malhas para a mesma frequência	74
Tabela 5 – Tempo de execução da simulação numérica para um ciclo completo de oscilação da fresta de revestimento e diferentes passos de tempo	74
Tabela 6 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	75
Tabela 7 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	80
Tabela 8 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura	84
Tabela 9 – Parâmetros de processo base para comparação da resposta em frequência do fator de amplificação	88
Tabela 10 – Parâmetros de processo relativos a resposta em frequência da fig. (53)	91
Tabela 11 – Números de capilaridade utilizados na simulação numérica	107
Tabela 12 – Velocidade do substrato utilizadas para simulação numérica e faixa de frequência onde se encontra o pico máximo do fator de amplificação	108
Tabela 13 – Convenção baseada na observação da curva do fator de amplificação da fig. (67)	109

## Lista de tabelas (continuação)

Tabela 14 – Parâmetros de processo para análise adimensional	112
Tabela 15 – Diferentes simulações numéricas com o valor da frequência do pico máximo e o fator de amplificação correspondente	120
Tabela 16 – Opções para os comprimentos característicos L e H	120
Tabela 17 – Parâmetros do problema calculados com as dimensões características $L=L_d$ e $H=H_d$	122
Tabela 18 – Resumo da análise estatística para $L=L_d$ e $H=H_d$	123
Tabela 19 – Resumo da qualidade do ajuste para todas as dimensões características testadas	123
Tabela 20 – Resumo da análise estatística para $L=L_d+X_{dcl}$ e $H=\min\{H_d, H_u\}$	125
Tabela 21 – Resumo da qualidade do ajuste para todas as dimensões características testadas	125
Tabela 22 – Resumo da análise estatística para $L=L_d$ e $H=H_u$	127
Tabela 23 – Parâmetros de processo do caso base seção 3.3.8	130
Tabela 24 – Sugestão de ajustes para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado	134
Tabela 25 – Parâmetros de processo para simulações da seção 5.2	135
Tabela 26 – Classificação das faixas de frequência, seção 3.3.8	135
Tabela 27 – Sugestão de ajuste para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado	138
Tabela 28 – Parâmetros de processo para determinação do campo do fator de amplificação	139
Tabela 29 – Sugestão de ajustes para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado	142
Tabela 30 – Parâmetros de processo para determinação do campo do fator de amplificação	143
Tabela 31 – Sugestão de ajustes para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado	146

## Lista de tabelas (continuação)

Tabela 32 – Resumo do desempenho do algoritmo de minimização para função da fig. (109)	166
Tabela 33 – Resumo do desempenho do algoritmo de minimização para função da fig. (110)	167
Tabela 34 – Resumo do desempenho do algoritmo de minimização para função da fig. (111)	168
Tabela 35 – Domínio das variáveis de projeto	170
Tabela 36 – Resumo das iterações do algoritmo de minimização em caixa aplicado ao campo da fig. (113). Parâmetro de redução aceitável para a função objetivo, $\rho = 0,3$	171
Tabela 37 – Resumo das iterações do algoritmo de minimização em caixa aplicado ao campo expandido da fig. (113). Parâmetro de redução aceitável para a função objetivo, $\rho = 0,3$	172
Tabela 38 – Resumo das iterações do algoritmo de minimização em caixa aplicado ao campo da fig. (114). Parâmetro de redução aceitável para a função objetivo, $\rho = 0,06$	173
Tabela 39 – Resumo das iterações do algoritmo de minimização em caixa aplicado ao campo expandido da fig. (114)	173