



Ulisses Rocha Gomes

**Otimização do Processo de Laminação a Frio através de
planejamentos de Experimentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Industrial do
Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Antonio Fernando de Castro Vieira

Rio de Janeiro

Abril de 2007



Ulisses Rocha Gomes

Otimização do Processo de Laminação a Frio através de planejamentos de Experimentos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Antonio Fernando de Castro Vieira

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Antonio Fernando Branco Costa

Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita - UNESP

Prof. Eugenio Kahn Epprecht

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2007

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

Ulisses Rocha Gomes

Graduou-se em Engenharia Industrial Metalúrgica pela Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense em 1993. Coursou pós-graduação, nível de especialização, em Gestão Empresarial na Universidade Federal Fluminense. Trabalhou como Engenheiro de processos na área de laminação a frio de uma indústria siderúrgica e atualmente atua como coordenador de projetos especiais na área de fabricação de folhas de Flandres desta empresa.

Ficha Catalográfica

Gomes, Ulisses Rocha

Otimização do processo de laminação a frio através de planejamentos de experimentos / Ulisses Rocha Gomes ; orientador: Antonio Fernando de Castro Vieira. – 2007.

76 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Espessura. 3. Planejamento de experimento. 4. Variáveis controláveis. 5. Tolerâncias. 6. Latas de duas peças. I. Vieira, Antonio Fernando de Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título

CDD: 658.5

À minha família pela motivação e compreensão durante todo curso. Ao meu pai Paulo Pereira Gomes que sempre estará presente.

Agradecimentos

A Deus todo poderoso que guia nossos passos.

Ao meu orientador, Antonio Fernando, pela orientação e compreensão durante todo este tempo.

Ao professor Eugenio Kahn Epprecht, pelo espírito cooperativo que bastante auxiliou neste trabalho.

Ao professor Leonardo Junqueira Lustosa que através de sua firmeza e sabedoria contribuiu muito para meu crescimento.

Ao amigo Danilo Gueli Gonçalves de Oliveira que sabe como poucos fortalecer e promover o crescimento do próximo.

Ao amigo Sidney Gomes Itaboray que muito apoiou neste projeto.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Industrial pela colaboração e cortesia em todas as ocasiões.

Resumo

Rocha Gomes, Ulisses; Vieira, Antonio Fernando de Castro (Orientador). **Otimização do Processo de Laminação a Frio através de planejamentos de Experimentos**. Rio de Janeiro, 2007. 76p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver um modelo através da técnica de planejamento de experimentos aplicado ao processo de laminação a frio para fabricação de aços especiais utilizados no segmento de mercado de bebidas carbonatadas. O processo consiste na transformação através da redução da espessura de uma bobina de aço laminada a quente e depois decapada para remoção do óxido, em uma bobina com espessura final desejada pelo cliente. Este processo envolve variáveis controláveis e não controláveis, que interagem umas com as outras afetando a variável resposta que é a espessura final do produto. As questões fundamentais são entender como as variáveis controláveis afetam a variável resposta? Quais são as mais influentes? Existem interações entre estas variáveis? É possível elaborar um modelo adequado para o problema? A técnica do planejamento fatorial fracionado não só torna possível encontrar tais respostas para as questões levantadas, mas também, abre novas perspectivas de aplicação desta poderosa ferramenta nos processos de produção, onde é bastante comum encontrar situações semelhantes ao estudo proposto por este trabalho. A realização deste projeto compreendeu, uma descrição do problema, uma revisão bibliográfica com as etapas necessárias para execução de um planejamento de experimentos, escolha das variáveis controláveis que integraram o experimento, a execução do experimento, a análise dos resultados, uma abordagem dos Modelos Lineares Generalizados e validação do modelo através de ajuste dos parâmetros do processo conforme indicado através da análise dos resultados. A aplicação desta metodologia e a implementação das alterações propostas proporcionaram robustez ao processo de forma que mesmo quando ocorrem as perturbações das variáveis não controláveis, ainda assim a espessura permanece dentro das tolerâncias especificadas. Proporcionou ainda uma redução na variação de $\pm 1.5\%$ para $\pm 1.0\%$, quando era de se esperar a necessidade de investimentos em tecnologia o que tornaria o produto mais caro e menos competitivo frente aos sucedâneos. Os resultados alcançados possibilitam a defesa de mercado através de uma maior competitividade obtida pelo menor custo dos produtos em aço.

Palavras-chave

Espessura, Planejamento de experimentos, variáveis controláveis, tolerâncias, Latas de duas peças

Abastract

Rocha Gomes, Ulisses; Vieira, Antonio Fernando de Castro (Advisor). **Cold-rolling process optimization by means experiment planning**. Rio de Janeiro, 2007. 76p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation aims to develop a model by using experiment planning techniques applied to cold-rolling process to manufacture special steels utilized in the carbonated beverage market segment. The process consists of downgauging hot-rolled coil, which is further pickled for oxide removal, into a coil with the final thickness required by customer. It involves controlled and uncontrolled variables, which interact with one another, thus affecting the response variable, i.e, product's final thickness. Some of the fundamental questions to be asked include: How do controlled variables affect response variable? What are the most influential ones? Are there interactions among such variables? Is it possible to work out an appropriate model to address this problem? The fragmented factor planning technique provides answers to the questions raised, by breaking new grounds in terms of using this powerful tool in manufacturing processes, where situations similar to those suggested by this study are fairly common. It includes a description of the problem, a bibliography review with the required steps to conduct the experiment planning, choice of controlled variables which make up the experiment as well as its execution, result analysis, an approach to Generalized Linear Models, and validation of model by adjusting process analysis as shown in the result analysis. Applying this methodology and implementing the proposed changes bolstered the process in such a way that even when disturbances of uncontrolled variables occur the thickness remains within the specified tolerances. Additionally, a further reduction in variation ranging from $\pm 1.5\%$ to $\pm 1.0\%$ was achieved, where technology investment would be required, thereby making steel products more expensive and less competitive against other competing products, thus ensuring competitiveness.

Keywords

Thickness, experiment planning, controlled variables, tolerance, two-piece beverage cans

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Descrição do Problema	14
1.2. Objetivos	16
1.3. Motivação	16
2. Processo de Laminação	18
2.1. Teoria Geral da Laminação	20
2.2. Variáveis Controláveis	27
2.2.1. Redução	28
2.2.2. Tensões entre Passes	29
2.2.3. Força de Laminação	29
2.2.4. Cilindros de Laminação	30
2.3. Sistema de Controle da Espessura	34
2.3.1. Função BISRA	35
2.3.2. Função Feedback 1	35
2.3.3. Função Feedforward	36
2.3.4. Função Feedback 2	36
2.3.5. Ganhos na Malha de Controle de Espessura (AGC)	37
3. Planejamento de Experimentos	38
3.1. Diretrizes para Planejamento de Experimentos	39
3.2. Experimento no Processo de Laminação	41
3.3. Escolha dos Fatores e dos Níveis	42
3.4. Seleção das Variáveis de Resposta	45
3.5. Escolha do Experimento	45
3.6. Realização do Experimento	47
3.7. Análise dos Resultados	48
3.7.1. Modelo para a Média da Espessura	48
3.7.2. Modelo para a Variância da Média da Espessura	50
3.7.3. Modelo para a Variância da Espessura	56
3.8. Recomendações	58
3.9. Validação do Modelo	60
4. Conclusões	63
5. Referências bibliográficas	66
6. Anexos	67
Anexo 1: Etapas de fabricação da lata de duas peças na “ <i>Bodymaker</i> ”	67
Anexo 2: Representação esquemática de uma laminador de tiras a frio	68
Anexo 3: Representação esquemática de defeitos de forma provocados pela força de laminação	69

Anexo 4: Representação esquemática da 1ª cadeira do laminador de tiras a frio	70
Anexo 5: Diagrama causa e efeito das variáveis do experimento	71
Anexo 6: Carta de Espessura Material DWI	72
Anexo 7: Carta de Espessura Material DWI (lote 15 de Agosto 2006)	73
Anexo 8: Carta de Espessura Material DWI (lote 09 de Setembro 2006)	74
Anexo 9: Carta de Espessura Material DWI (lote 12 de Março 2006)	75
Anexo 10: Softwares Utilizados	76

Lista de figuras

Figura 1.1 – Etapas do processo de fabricação de latas de duas peças	14
Figura 1.2 – Sequência de formação do corpo da lata	15
Figura 2.1 – Desenho Esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio	18
Figura 2.2 – Curva Tensão deformação para os aços	19
Figura 2.3 – Arco de contato na laminação	20
Figura 2.4 – Fluxo de massa na laminação	22
Figura 2.5 – Fluxo de massa constante na laminação	23
Figura 2.6 – Pressão no arco de contato	24
Figura 2.7 – Efeito das tensões no arco de contato	25
Figura 2.8 – Efeito da tensão a ré no arco de contato	26
Figura 2.9 – Efeito da tensão avante no arco de contato	26
Figura 2.10 – Variação da força x Variação da espessura	32
Figura 2.11 – Deformações Elásticas sobre o cilindro de trabalho	33
Figura 2.12 – Influência das deformações nas dimensões do raio do cilindro	33
Figura 3.1 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos	49
Figura 3.2 – Gráfico do Resíduo <i>versus</i> Valor Ajustado	50
Figura 3.3 – Gráfico de Probabilidade Normal	51
Figura 3.4 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos <i>Deviance</i>	52
Figura 3.5 – Gráfico do Resíduo <i>Deviance versus</i> Valor Ajustado	53
Figura 3.6 – Gráfico do Valor Absoluto do Resíduo <i>Deviance versus</i> Valor Ajustado	54
Figura 3.7 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos <i>Deviance</i>	55
Figura 3.8 – Gráfico dos Resíduos <i>versus</i> Valores Ajustados	56
Figura 3.9 – Gráfico de Probabilidade Normal	57
Figura 3.10 – Gráfico do Resíduo <i>versus</i> Valor Ajustado	58
Figura 3.11 – Gráfico do Valor Absoluto do Resíduo <i>Deviance versus</i> Valor Ajustado	58
Figura A1.1 – Etapas de fabricação da lata de duas peças na bodymaker	67
Figura A2.1 – Representação esquemática de um laminador de tiras a frio	68
Figura A2.2 – Representação esquemática de defeitos de forma provocados pela força de laminação	69
Figura A2.3 – Representação esquemática da 1ª cadeira do laminador de tiras a frio N.º 1	70
Figura A2.4 – Diagrama causa e efeito das variáveis do experimento	71
Figura A3.1 – Carta de Espessura Material DWI	72
Figura A4.1 – Carta de Espessura Material DWI (15 de Agosto 2006)	73
Figura A4.2 – Carta de Espessura Material DWI (09 de Setembro 2006)	74
Figura A4.3 – Carta de Espessura Material DWI (12 de Março 2007)	75

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Efeito da variação da força de laminação na espessura do material	31
Tabela 3.1 – Experimento 2 ⁵⁻¹	46
Tabela 3.2 – Resultados do Experimento	47
Tabela 3.3 – Ajuste do Modelo da Média	48
Tabela 3.4 – Ajuste do Modelo da Variância	57
Tabela 3.5 – Rodada extra para validação do modelo	60
Tabela 3.6 – Análise comparativa entre o valor calculado e rodada extra de validação	61
Tabela 3.7 – Variância da Espessura com redução da cadeira 5 em 31%	61
Tabela 3.8 – Variância da Espessura referente a 1ª rodada do experimento	61
Tabela 3.9 – Variância da tensão com redução da cadeira 5 em 31%	62
Tabela 3.10 – Variância da tensão referente a 1ª rodada do experimento	62