



**Izabel Cristina Corrêa Saldanha**

**Aleatorização em planejamento de experimentos: um estudo de caso**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Antonio Fernando Castro Vieira

Rio de Janeiro

Abril de 2008



**Izabel Cristina Corrêa Saldanha**

**Aleatorização em planejamento de experimentos: um estudo de caso**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão examinadora abaixo assinada.

**Prof. Antonio Fernando Castro Vieira**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Roberto Cintra Martins**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Flávia César Teixeira Mendes**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de abril de 2008

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

### **Izabel Cristina Corrêa Saldanha**

Graduou-se em Engenharia de Produção na UEPA (Universidade do Estado do Pará) em 2005. Atualmente presta consultoria na área de Risco de Mercado para empresa de Petróleo.

#### Ficha Catalográfica

Saldanha, Izabel Cristina Corrêa

Aleatorização em planejamento de experimentos : um estudo de caso / Izabel Cristina Corrêa Saldanha ; orientador: Antonio Fernando Castro Vieira. – 2008.

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

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Planejamento de experimentos. 3. Aleatorização. 4. Blocos de experimentos. I. Vieira, Antonio Fernando Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CDD: 658.5

Aos meus pais Tiana e José Paulo,  
pelo amor e dedicação.

## Agradecimentos

A Deus por guiar meus passos e por proteger aqueles que amo.

Ao meu orientador Professor Antonio Fernando Castro Vieira pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

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

À CSN pela parceria e contribuição neste trabalho e em especial ao amigo Ulisses Rocha Gomes sem o qual esta parceria não seria possível.

Aos meus pais, pela educação, orações, palavras de sabedoria, atenção e carinho de todas as horas.

Aos meus irmãos, Wlad, Flávia e Júnior, pelo elo feliz com o passado e certeza de apoio no futuro.

Ao meu amor, Wagner Tetsuya, pelo carinho e palavras certas nos momentos oportunos.

Aos meus amigos, Jaci, Júlio, Ana Paula e Nicole, por todo apoio direto ou indireto a este trabalho, conselhos, força e compreensão.

A todos os Professores, funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os familiares e amigos que uma forma ou de outra me estimularam ou ajudaram.

## Resumo

Saldanha, Izabel Cristina Corrêa; Vieira, Antonio Fernando de Castro (Orientador). **Aleatorização em planejamento de experimentos: um estudo de caso.** Rio de Janeiro, 2008. 99p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho teve como objetivo apresentar diretrizes para a execução de experimentos fatoriais com restrições na aleatorização, mostrando a importância em identificar tais restrições, com base na visão de alguns autores e da aplicação de um estudo de caso. Este estudo foi cedido pela Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, e exposto através da comparação entre dois modelos, cujas análises refletem as diferenças ao se considerar a restrição na aleatorização do experimento para obter uma resposta otimizada. Conforme identificado na literatura, poucos autores abordam a importância de reinicializar o nível dos fatores em um projeto de experimento industrial. Reinicializar o nível dos fatores, junto à necessidade de aleatorizar a ordem das corridas experimentais, torna válida a hipótese de que as observações obtidas no experimento serão variáveis aleatórias independentemente distribuídas. Quando a aleatorização completa do experimento não é possível de ser atingida, cabe ao experimentalista a decisão de projetar o experimento de tal forma que garanta a correta análise estatística e, conseqüentemente, a validação do modelo. Ao identificar se o experimento apresenta restrições em ser aleatorizado, classificando-o, identificando os fatores fáceis e difíceis de reinicializar, e analisando-se corretamente, evitam-se avaliações equivocadas ou incompletas, como se apresentou neste trabalho. Por fim, a análise, tendo em vista a existência da restrição em executar um experimento completamente aleatorizado e levando em consideração a presença de dois termos de erro no modelo permitiu a identificação das condições experimentais que garantem a minimização da resposta para o estudo de caso.

## Palavras-chave

Planejamento de experimentos, aleatorização, blocos de experimentos.

## Abstract

Saldanha, Izabel Cristina Corrêa; Vieira, Antonio Fernando de Castro (Advisor). **Randomization in design of experiments: a case study**. Rio de Janeiro, 2008. 99p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents some guidance for the execution of factorial experiments with restrictions in the randomization by showing the importance of restrictions identifying. The study is based on some author's points of view and on a case study application. The original research information comes from Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, in fact, the research is presented through two models comparisons. The analysis of these models reveals the differences in taking into account a restriction in the experiment randomization with the aim of getting an optimized response. As shown in the studied literature, just a few authors approach the importance of restarting the factors level in an experimental industrial project. Resetting the factor's level added to the necessity of randomizing the order of the experimental runs, valid the hypothesis that sustains that the experiment observations will be random variables independently distributed. When the complete randomization of the experiment results in an impossible chore, it is expected that the one who is in charge decides to project the experiment in a way that assures the correct statistic analysis, and consequently, the model's validation. By identifying if the experiment has restrictions to be randomized, classifying the experiment, identifying which ones are the easiest and hardest factors and doing a correct analyze; it is expected that incomplete or mistaken assessments, like those showed in this research, will be avoided. Finally, the analyses taking into account a restriction in the complete randomized experiment execution and the presence of two error terms in the model, allowed the identification of the experimental conditions that guarantee the case study's response minimization.

## Keywords

Design of experiments, randomization, experimental blocking.

*“A tarefa não é contemplar o que ninguém ainda contemplou, mas meditar, como ninguém ainda meditou, sobre o que todo mundo tem diante dos olhos”.*

Schopenhauer



# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.3. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	17
1.4. METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA.....	18
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2 ALEATORIZAÇÃO EM EXPERIMENTOS FATORIAIS .....</b>	<b>21</b>
2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS EM PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	21
2.2. BLOCOS .....	23
2.2.1. <i>Confundimento de um projeto fatorial <math>2^k</math> em dois blocos</i> .....	28
2.3. ALEATORIZAÇÃO DE UM EXPERIMENTO .....	30
2.3.1. <i>Classificação dos Experimentos Quanto à Aleatorização</i> .....	34
2.4. BLOCAGEM <i>SPLIT-PLOT</i> CLÁSSICA.....	35
2.4.1. <i>Projeto split-plot fatorial de dois níveis</i> .....	38
2.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
<b>3 EXPERIMENTO INDUSTRIAL.....</b>	<b>47</b>
3.1. EMPRESA ESTUDADA .....	47
3.2. ESTUDO DE CASO: PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO .....	48
3.3. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	50
3.3.1. <i>Tipos de Chatter</i> .....	51
3.3.2. <i>Metodologia utilizada (SKF/CSN)</i> .....	53
3.4. CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTAIS DO PROCESSO.....	54
3.4.1. <i>Possíveis causas para o surgimento das marcas</i> .....	54
3.4.2. <i>Definição das Variáveis</i> .....	57
3.4.3. <i>Matriz de planejamento: classificação do experimento</i> .....	48
3.4.4. <i>Análise dos resultados</i> .....	60
3.4.4.1. <i>Equação do modelo</i> .....	65
3.4.4.2. <i>Diagnóstico e influência dos resíduos</i> .....	66
3.4.4.3. <i>Otimização da resposta</i> .....	67
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>72</b>
4.1. CONCLUSÃO .....	72
4.2. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	73
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>77</b>
APÊNDICE A – ETAPAS DE EXECUÇÃO DE UM PROJETO <i>SPLIT-PLOT</i> PARA O EXEMPLO DE FORÇA DE TENSÃO DO PAPEL.....	77
APÊNDICE B – LISTA DOS EFEITOS <i>WHOLE-PLOT</i> PARA ANÁLISE DO GRÁFICO <i>HALF-NORMAL</i> .....	89

APÊNDICE C – LISTA DOS EFEITOS <i>WHOLE-PLOT</i> PARA ANÁLISE DO GRÁFICO <i>HALF-NORMAL</i> APÓS SELEÇÃO DOS EFEITOS SIGNIFICATIVOS. ....	90
APÊNDICE D - LISTA DOS EFEITOS <i>SUB-PLOT</i> PARA ANÁLISE DO GRÁFICO <i>HALF-NORMAL</i> .....	91
APÊNDICE E - LISTA DOS EFEITOS <i>SUB-PLOT</i> PARA ANÁLISE DO GRÁFICO <i>HALF-NORMAL</i> APÓS SELEÇÃO DOS EFEITOS SIGNIFICATIVOS. ....	92
<b>ANEXOS.</b> .....	<b>93</b>

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Experimento $2^2$ com quatro réplicas	23
Tabela 2.2 – Apresentação dos dados do Experimento com quatro blocos	24
Tabela 2.3 – Tabela de Análise de Variância para um experimento com blocos	27
Tabela 2.4 – Análise de variância para o exemplo das placas de circuito impresso	28
Tabela 2.5 – Experimento $2^3$ com dois blocos	30
Tabela 2.6 – Experimento $2^3$ com um fator <i>difícil de mudar</i>	33
Tabela 2.7 – Experimento da força de tensão do papel	36
Tabela 2.8 – Médias quadráticas esperadas para o modelo sugerido	37
Tabela 2.9 – ANOVA para o experimento da força de tensão do papel	38
Tabela 2.10 – Matriz de projeto e resposta para o experimento split-plot na produção de plasma	40
Tabela 2.11 – Efeitos estimados para o experimento do plasma e agrupados por variância de erro <i>whole plot</i> e <i>subplot</i>	40
Tabela 3.1 – Matriz de planejamento	59
Tabela 3.2 – Matriz de planejamento com as três respostas	61
Tabela 3.3 – ANOVA para o modelo de efeitos <i>whole-plot</i> .	62
Tabela 3.4 – ANOVA para o modelo de efeitos <i>sub-plot</i>	63
Tabela 3.5 – ANOVA para o modelo em que não se considera a restrição em aleatorizar o experimento	65
Tabela 3.6 – Solução do otimizador numérico para a resposta ótima	69
Tabela 3.7 – <i>Point prediction</i> para a minimização da vibração	69
Tabela 3.8 – Solução do otimizador numérico desconsiderando a restrição na análise	70
Tabela 3.9 – <i>Point prediction</i> para a minimização da vibração desconsiderando a restrição na análise	71
Tabela A.1 – Dados para o Modelo de Regressão Linear	95

## Lista de quadros

Quadro 2.1 – Experimento com quatro blocos	24
Quadro 3.1 – Valores dos níveis das variáveis de processo	59
Quadro 3.2 – <i>Point prediction</i> para a minimização da vibração	70

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Blocos e visão geométrica do experimento $2^3$	29
Figura 2.2 – Gráfico de probabilidade normal com todos os efeitos	41
Figura 2.3 – Gráfico de probabilidade normal para os efeitos <i>whole plot</i>	42
Figura 2.4 – Gráfico de probabilidade normal para os efeitos <i>subplot</i> .	43
Figura 3.1 – Desenho Esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio	49
Figura 3.2 – Trem de laminação de um laminador de tiras a frio Quádruo Contínuo	50
Figura 3.3 – Componentes envolvidos na ocorrência do <i>chatter</i> torcional	52
Figura 3.4 – Sistema de monitoramento on-line	53
Figura 3.5 – Sistema de monitoramento off-line	54
Figura 3.6 – Possíveis causas para o surgimento das marcas de vibração	55
Figura 3.7 – Espectro mostra excitação na frequência de 200 Hz, que corresponde na literatura ao <i>chatter</i> de 3ª oitava	56
Figura 3.8 – Gráfico <i>Half-normal</i> para os efeitos <i>whole-plot</i>	62
Figura 3.9 – Gráfico <i>Half-normal</i> para os efeitos <i>sub-plot</i>	63
Figura 3.10 – Gráfico <i>half-normal</i> para o modelo “todos os efeitos”	64
Figura 3.11 – Gráfico <i>half-normal</i> para o modelo em que não se considera a restrição em aleatorizar o experimento	64
Figura 3.12 – Gráfico Normal <i>versus</i> os resíduos para o modelo “todos os efeitos”	66
Figura 3.13 – Gráfico Resíduo <i>versus</i> valores previstos para o modelo “todos os efeitos”	67
Figura 3.14 – Otimizador numérico para a minimização da vibração	68
Figura A.1 – Seleção do tipo de projeto para a execução do experimento <i>split-plot</i>	77
Figura A.2 – Inserção do nome e das características do fator <i>A</i> (Bloco)	78
Figura A.3 – Inserção do nome e das características do fator <i>B</i> ( <i>whole plot</i> )	78
Figura A.4 – Inserção do nome e das características do fator <i>C</i> ( <i>Subplot</i> )	79
Figura A.5 – Definição das quatro respostas a serem analisadas	79
Figura A.6 – Re-organização dos dados com base no fator <i>B</i>	80
Figura A.7 – Re-organização dos dados com base nos blocos	80
Figura A.8 – Re-organização da ordem das corridas experimentais	81
Figura A.9 – Arranjo do projeto <i>spli-plot</i>	81
Figura A.10 – Lista de efeitos para o projeto <i>whole-plot</i> .	82
Figura A.11 – ANOVA para o projeto <i>whole plot</i>	83
Figura A.12 – Lista de efeitos para o projeto <i>subplot</i>	84
Figura A.13 – ANOVA para o projeto <i>subplot</i>	84

Figura A.14 – Lista de efeitos para o projeto de interação <i>whole plot</i> x <i>subplot</i>	85
Figura A.15 – ANOVA para a interação <i>whole-plot</i> x <i>sub-plot</i>	85
Figura A.16 – Lista de efeitos para o projeto completo	86
Figura A.17 – Gráfico de probabilidade normal para o experimento da polpa de papel	87
Figura A.18 – Gráfico dos resíduos <i>versus</i> os valores previstos	88
Figura A.19 – Gráfico da distância de <i>Cook</i> para o experimento <i>split-plot</i>	88
Figura B.1 – Lista dos efeitos <i>whole-plot</i> para análise do gráfico <i>half-normal</i>	89
Figura C.1 – Lista dos efeitos <i>whole-plot</i> para análise do gráfico <i>half-normal</i> após seleção dos efeitos significativos	90
Figura D.1 – Lista dos efeitos <i>subplot</i> para análise do gráfico <i>half-normal</i>	91
Figura E.1 – Lista dos efeitos <i>subplot</i> para análise do gráfico <i>half-normal</i> após seleção dos efeitos significativos	92