

RAFAEL CANALES ANTONIO

AUMENTO DA CAPACIDADE ESTATÍSTICA
DOS PROCESSOS EM UMA INDÚSTRIA PAPELEIRA

São Paulo
2008

RAFAEL CANALES ANTONIO

Aumento da capacidade estatística
dos processos em uma indústria papeleira

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro de Produção

Orientador: Prof. Dr. José Joaquim A. Ferreira

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Canales Antonio, Rafael

Aumento da capacidade estatística dos processos em uma indústria
papeleira/ R. Canales Antonio -- São Paulo, 2008. 126p.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Produção 2. Controle de Processos 3. Delineamento de
Experimentos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Produção II.t.

Aos meus pais, Frederico e Sonia, pelo apoio durante todos estes anos de estudo. Tenho certeza que estão muito felizes por mais essa conquista. Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria, antes de tudo, expressar minha gratidão ao Sr. Eric Cocchi, diretor de qualidade e melhoria contínua, pela a realização do meu trabalho de formatura.

Eu agradeço também a equipe do departamento Qualidade e Melhoria Contínua da Condat, composta por David Bouchet, Victor de Alcântara Cruz, Samir Zaouchi, Maxime Davoust, Emmanuel Brusquand, Mattia Testa e Jean-Paul Lavaud pela sua ajuda preciosa ao longo de todo o projeto.

Agradeço também o meu orientador neste trabalho, o professor José Joaquim A. Ferreira pelos conselhos, pela sua disponibilidade, e pela transmissão de seus conhecimentos e de sua experiência.

Minhas em considerações as equipes operacionais das linhas 4 e 8, sem as quais nada poderia ter sido feito.

”Os imprevistos e as dificuldades estão
evidentemente, sempre presentes
mas eles são bem vindos e superáveis”

(Eric COCCHI).

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar a capacidade estatística de uma máquina de fabricação de papel e as fontes de não - conformidade através do *Controle Estatístico do Processo*. Dentro do escopo da melhoria contínua, todas as diferentes etapas da definição e da resolução de problemas são apresentadas segundo a metodologia DMAIC – *Define, Mesure, Analyse, Improve, Control*.

Mais precisamente, o trabalho é voltado para as ações de melhoria sobre o controle do brilho do papel no processo da *calandra*. Este incluiu o estudo da variabilidade e da evolução do brilho, ainda que seus indicadores Cp e Cpk. O *delineamento de experimento* foi escolhido como ferramenta para o tratamento do problema. Foi realizado um fatorial completo com três fatores e dois níveis. (pressão, temperatura e velocidade).

Os resultados dos pontos centrais mostram uma reproduzibilidade suficiente do processo. Os resultados finais indicam que apenas os fatores principais (*temperatura, pressão e velocidade*) são importantes, enquanto que as suas interações não apresentam nenhuma importância significativa para o efeito brilho.

Palavras chave: Melhoria contínua, Melhores Práticas, *calandra*, capacidade estatística, CEP, controle estatístico da produção, papel, delineamento de experimentos, procedimentos.

ABSTRACT

The objective of this work is the study of paper machine's capability and its non quality sources through the use of Statistical Process Control (SPC). Following the continuous improvement standards, all the different stages of definition and problem solving are presented according to the DMAIC methodology.

More precisely, the study aims the improvement actions taken to increase control over the gloss paper fabrication. Those include the study of the variability and gloss evolution, as well as the Cp and Cpk indicators evolution. The Design of Experiment (DOE) Full Factorial was chosen as a tool to solve the problem, using a design with 3 factors, 2 levels each (pressure, temperature and machine speed).

The results of the central points show enough reproducibility of the process. The results indicate that only the main factors (pressure, temperature, and speed) are significant while its interactions are not.

Key-words: Continuous improvement, good practices, calandre, capability, SPC, paper, design of experiment, DOE, process

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Grupo Lecta.....	3
Figura 2: Ciclo DMAIC.....	21
Figura 3: esquema de blocos de um processo.....	23
Figura 4: diagrama d'Ishikawa	24
Figura 5: Organização dos controles	25
Figura 6: Variabilidade de um processo	29
Figura 7: Três casos de dispersão	30
Figura 8: Comportamento do Cp	31
Figura 9: Comportamento do Cpk	32
Figura 10: Efeito da dispersão do instrumento de medição.....	34
Figura 11: Modelo Geral de um processo ou sistema	37
Figura 12: Design fatorial com 2 fatores, 2 níveis cada	43
Figura 13: Design fatorial com 3 fatores, 2 níveis cada	43
Figura 14: análise dos resíduos.....	49
Figura 15 : A calandre da linha 8	51
Figura 16 : A calandre da linha 8	51
Figura 17: O scanner da <i>calandra</i>	52
Figura 18 : Comportamento do Cp e Cpk	59
Figura 19: Cascata de procedimentos	69
Figura 20: Conduta da calandra.....	70
Figura 21: Função de Perda de Taguchi	99
Figura 22: Ficha PDCA do projeto.....	119
Figura 23: Ficha PDCA do projeto, pag2	120
Figura 24: Ficha PDCA do projeto, pag3	121
Figura 25: Ficha PDCA do projeto.....	122
Figura 26: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 5.....	123
Figura 27: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 4.....	123
Figura 28: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 3.....	124
Figura 29: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 2.....	124
Figura 30: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 5.....	125
Figura 31: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 4.....	125
Figura 32: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 3.....	126
Figura 33: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 2.....	126

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Pareto das reclamações.....	12
Gráfico 2: Pareto dos rejeitos	13
Gráfico 3: Pareto das reclamações + rejeito	15
Gráfico 4: Pareto da produção	16
Gráfico 5: Não conformidades a cada 100 folhas Condat para os produtos 115 g/m ²	19
Gráfico 6: Impacto das causas comuns e especiais	28
Gráfico 7: Gráfico dos fatores principais	47
Gráfico 8: Com interação	47
Gráfico 9: Sem Interação	48
Gráfico 10 : Evolução (ST) e Peril sentido traversal (ST) do brilho.....	53
Gráfico 11: Cp e Cpk brilho tela	56
Gráfico 12: Cp e Cpk brilho feltro.....	56
Gráfico 13: Brilho Tela, Média e sigma	57
Gráfico 14: Brilho tela sigma	58
Gráfico 15: Brilho feltro, média e sigma.....	58
Gráfico 16: Brilho feltro, sigma	59
Gráfico 17: Variação do brilho sentido marcha (SM)	60
Gráfico 18: variação do brilho sentido traversal (ST); perfil do brilho.....	62
Gráfico 19: variação do brilho tela entre lotes e fabricações	63
Gráfico 20: Brilho Tela com transição	66
Gráfico 21: Brilho Feltro com transição.....	66
Gráfico 22: Brilho Tela sem transição.....	66
Gráfico 23: Brilho Feltro sem transição	66
Gráfico 24: Evolução do brilho, situação atual	73
Gráfico 25: Evolução do brilho, situação futura.....	74
Gráfico 26: Comparação dos dados scanner / laboratório.....	76
Gráfico 27: Brilho Tela – Série Histórica.....	85
Gráfico 28: Brilho Tela - Efeitos Principais	88
Gráfico 29: Brilho Tela - Efeitos das Interações	88
Gráfico 30: Brilho Tela - Gráfico Pareto dos efeitos.....	90
Gráfico 31: Brilho Tela - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos.....	91
Gráfico 32: Brilho Tela – Gráfico dos resíduos	94
Gráfico 33: Brilho Tela - Probabilidade normal dos resíduos.....	95
Gráfico 34: Brilho excessivo do papel	102
Gráfico 35: Exemplo de obtenção de dados	110
Gráfico 36: Brilho Feltro - Série Histórica.....	111
Gráfico 37: Brilho Feltro – Efeitos Principais.....	111
Gráfico 38: Brilho Feltro – Efeito das interações.....	112
Gráfico 39: Brilho Feltro – gráfico pareto dos efeitos	112
Gráfico 40: Brilho Feltro – Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos.....	113
Gráfico 41: Brilho Feltro – Gráfico dos Resíduos.....	116
Gráfico 42: Brilho Feltro – gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da lista de especificação	11
Tabela 2: Custo de reclamações	12
Tabela 3: Custo de rejeito	14
Tabela 4: Custo das reclamações + rejeito	15
Tabela 5: Ficha comercial.....	17
Tabela 6: Classificação Cmc	35
Tabela 7: Classificação R&R	36
Tabela 8: Tipos de interação.....	44
Tabela 9: Cp e Cpk brilho tela.....	55
Tabela 10: Cp e Cpk brilho feltro.....	55
Tabela 11: Brilho Tela - Desvio Padrão	65
Tabela 12: Brilho Feltro – Desvio Padrão	65
Tabela 13: Brilho Tela – Variância	65
Tabela 14: Brilho Feltro – Variância.....	65
Tabela 15: Resultados do Gage R&R.....	77
Tabela 16: Recapitulação dos fatores e dos níveis	79
Tabela 17: Recapitulação dos pontos centrais	80
Tabela 18: Resultados dos pontos centrais 90g/m ²	81
Tabela 19: Resultados dos pontos centrais 100g/m ²	81
Tabela 20: Resultados dos pontos centrais 115g/m ²	81
Tabela 21: Valores obtidos do DOE.....	84
Tabela 22: Pré-análise dos efeitos	86
Tabela 23 : Brilho Tela – Análise de Variância	89
Tabela 24 : Brilho Tela - Análise de Variância para fatores significativos.....	92
Tabela 25 : Brilho Tela - coeficientes do modelo	93
Tabela 26 : Brilho Tela - Análise dos resíduos	94
Tabela 27 : Teste do modelo.....	97
Tabela 28: Nível dos fatores teste.....	97
Tabela 29 : Coeficientes do modelo	98
Tabela 30: Coeficientes dos modelos	100
Tabela 31: Função de Perda de Taguchi.....	100
Tabela 32: valores pré-determinados para correção do brilho	101
Tabela 33: Brilho Feltro – Análise de Variância.....	114
Tabela 34: Brilho Feltro – Análise de Variância para os fatores significativos	115
Tabela 35: Brilho Feltro - Coeficientes	115
Tabela 36: Brilho Feltro – Análise dos Resíduos	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

8CASF115 – 8 (linha 8); C (couché; revestido); S (revestimento simples); F (papel em formato bloco); 115 gramatura

BV – Brillance Vierge (Brilho do papel)

CEP – Controle Estatístico de Processos

DOE – Design of Experiments (Delineamento de Experimentos)

MAP – Machine-à-papier (Máquina à papel)

MSA – Measurements System Analysis (Análise do sistema de medição)

SM – Sentido Marcha

ST – Sentido Traverso

WCM – World Class Manufacturing

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Grupo Lecta	3
1.2. Matéria-Prima	4
1.3. Linhas Produtivas	5
1.4. Os Produtos	7
1.5. O Estágio	8
2. SITUAÇÃO ATUAL	11
2.1. As reclamações	11
2.2. Os rejeitos por não conformidade	13
2.3. Os custos totais	15
2.4. Quais Produtos	16
2.5. Quais parâmetros	17
2.6. Escolha do parâmetro a ser detalhado	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Iniciativa de Melhoria Contínua	21
3.2. O Controle Estatístico de Processos (CEP)	23
3.2.1. Definições	23
3.2.2. Distribuição	28
3.2.3. Os indicadores	29
3.3. A Análise do Sistema de Medição (MSA)	34
3.3.1. O Método	35
3.4. Delineamento de Experimentos	37
3.4.1. Introdução a Experimentação	37
3.4.2. Princípios Básicos	38
3.4.3. Diretrizes	39
3.4.4. Design Fatorial	42
3.4.5. Design Fatorial 2^k	45
4. ANÁLISE DO PROBLEMA	51
4.1. A Calandra	51
4.2. O Scanner	52
4.2.1. Seu funcionamento	52
4.3. Cpk e Cp do Brilho do 8CASF115	55
4.4. Estudo da Variabilidade do Brilho	60
4.4.1. Variabilidade do Brilho no Sentido Marcha	60

4.4.2. Variabilidade do Brilho no Sentido Traverso	61
4.4.3. Variabilidade do Brilho entre bobinas e entre lotes.....	63
4.4.4. Decomposição da variabilidade	65
4.5. Projetos Existentes	68
4.6. Meu projeto: Cascata de procedimentos	68
4.6.1. Iniciativa Participativa com os operadores	69
4.6.2. A falta de dados existentes	72
5. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	73
5.1. Delineamento de Experiência na <i>Calandra</i>	73
5.2. Reconhecimento e indicação do problema.....	74
5.3. Seleção da variável de resposta.....	75
5.3.1. Validação do sistema de Medição	75
5.4. Escolha dos fatores e seus níveis	78
5.4.1. Fatores.....	78
5.4.1. Níveis.....	79
5.5. Escolha do delineamento experimental.....	79
5.6. Realizando o experimento.....	80
5.6.1. Pontos Centrais	80
5.6.2. Dados DOE	84
5.7. Análise estatística dos dados – Lado Tela	84
5.7.1. Verificação dos dados coletados.....	84
5.7.2. Estimar os efeitos dos fatores	86
5.7.3. Formar o modelo inicial.....	89
5.7.4. Refinar o modelo	92
5.7.5. Análise dos resíduos	94
5.8. Análise estatística dos dados – Lado Feltro	96
5.9. Conclusões do DOE	97
5.9.1. Teste do modelo.....	97
5.9.2. Aplicação prática do modelo	98
6. CONCLUSÃO	103
6.1. Conclusão Geral	103
6.2. Conclusão pessoal	104
6.3. Autocríticas e próximos passos	105
LISTA DE REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A: Modo de Operação DOE	109
APÊNDICE B: Análise estatística dos dados – Lado Feltro	111
ANEXO I: FICHA PDCA DO PROJETO	119
ANEXO II: PONTOS DOE.....	123

1. INTRODUÇÃO

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido na empresa Condat S.A, localizada em Dordogne na França, instalada em 1907.

No início, sua atividade se limitava a produção de extratos de madeira. Foi apenas a partir de 1962 que a empresa se tornaria uma fabricante de papéis revestidos. Hoje em dia, ela conta com 850 empregados e um parque industrial composto por três linhas produtivas. Em 2005, o faturamento foi da ordem de 360 milhões de euros para uma capacidade produtiva de 560 mil toneladas de papel por ano.

O projeto de melhoria da capacidade estatística tem dois objetivos correlacionados, a médio e a longo prazo.

O primeiro objetivo, a médio prazo, é de estabelecer um indicador comum, baseado na estatística, que possa demonstrar o nível de estabilidade dos processos. Desta forma será possível o acompanhamento do processo com mais facilidade e consequentemente, a correção dos eventuais problemas.

O segundo objetivo, a longo prazo, é a utilização destes indicadores como forma de propaganda e publicidade da empresa. Uma vez estabelecido, ele poderá ser publicado e utilizado como um ponto forte de qualidade junto aos clientes.

Pretende-se no presente trabalho abordar o tema da capacidade estatística das máquinas e propor soluções para aumento do controle dos processos e redução da variabilidade na fabricação do papel, para obtenção de um papel de melhor qualidade

O trabalho está organizado da seguinte forma

Capítulo 1 – Introdução: Apresentação da empresa, descrição dos processos produtivos, descrição dos produtos fabricados, descrição do estágio.

Capítulo 2 – Situação atual: as reclamações, seleção dos produtos e dos parâmetros a serem estudados.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica: Apresentação de um resumo teórico dos conceitos e modelos aplicados na resolução dos problemas propostos neste trabalho.

Capítulo 4 – Análise do problema: Detalhamento do processo de calandragem, estudo do indicador cp e cpk, estudo da variabilidade, descrição do problema

Capítulo 5 – Solução do problema: Apresentação da solução com a aplicação dos conceitos e dos modelos apresentados e discutidos no capítulo da revisão bibliográfica.

Capítulo 6 – Conclusão: Discussão dos resultados.

Capítulo 7 – Referências bibliográficas: Bibliografia utilizada como base para este estudo.

1.1. Grupo Lecta

Em 1997 o grupo de investimentos anglo-saxônico CVC Capital Partners se juntou a sociedade CARTIERE DEL GARDA (Itália), pois o grupo LECTA foi criado. Em 1998 ele se torna o proprietário da papelaria CONDAT (França). O grupo foi completado em 1999 com a chegada da sociedade TORRAS PAPEL (Espanha). Esta última compra permitiu ao grupo LECTA de passar do sexto ao quarto maior produtor mundial de papéis revestidos.

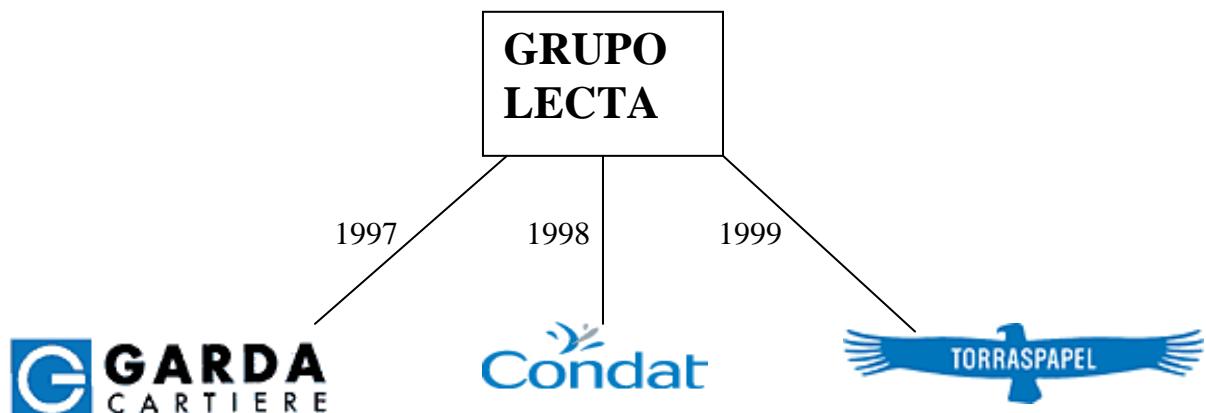


Figura 1: Grupo Lecta

Fonte: Site da empresa <<http://www.condat-pap.com/fr/index.html>> Acesso 02 de Junho de 2006

Cartiere Del garda: criado em 1956, a sociedade tem base na Itália, situada ao norte do lago de Garda, emprega 570 pessoas e teve em 2003 um faturamento de 245 milhões de euros.

Torras Papel: Fundada em 1854, esta sociedade opera 11 sites produtivos. Emprega 3420 pessoas e em 2003 faturou 722 milhões de euros.

1.2. Matéria-Prima

A matéria-prima da indústria francesa de papéis e papelões é a “massa de papel” (*pâte à papier*), obtido a partir da transformação da madeira.

A madeira é constituída entre outros, de fibras de celulose de comprimento variável, religadas entre elas por uma substância chamada “lignina” (*lignine*). A operação de “trituração” consiste em dividir a madeira em fibras primárias, evitando o degradamento dessas fibras.

Podemos distinguir dois grandes processos de fabricação da “massa de papel”:

O procedimento mecânico: que desfibrira a madeira por meio de moedores. Obtêm-se também as massas mecânicas e termomecânicas

O procedimento químico: as fibras de celulose são isoladas da lignina por meio de produtos químicos, como o bisulfito e o sulfato. Obtêm-se também as massas químicas: massa de sulfito, massa de sulfato.

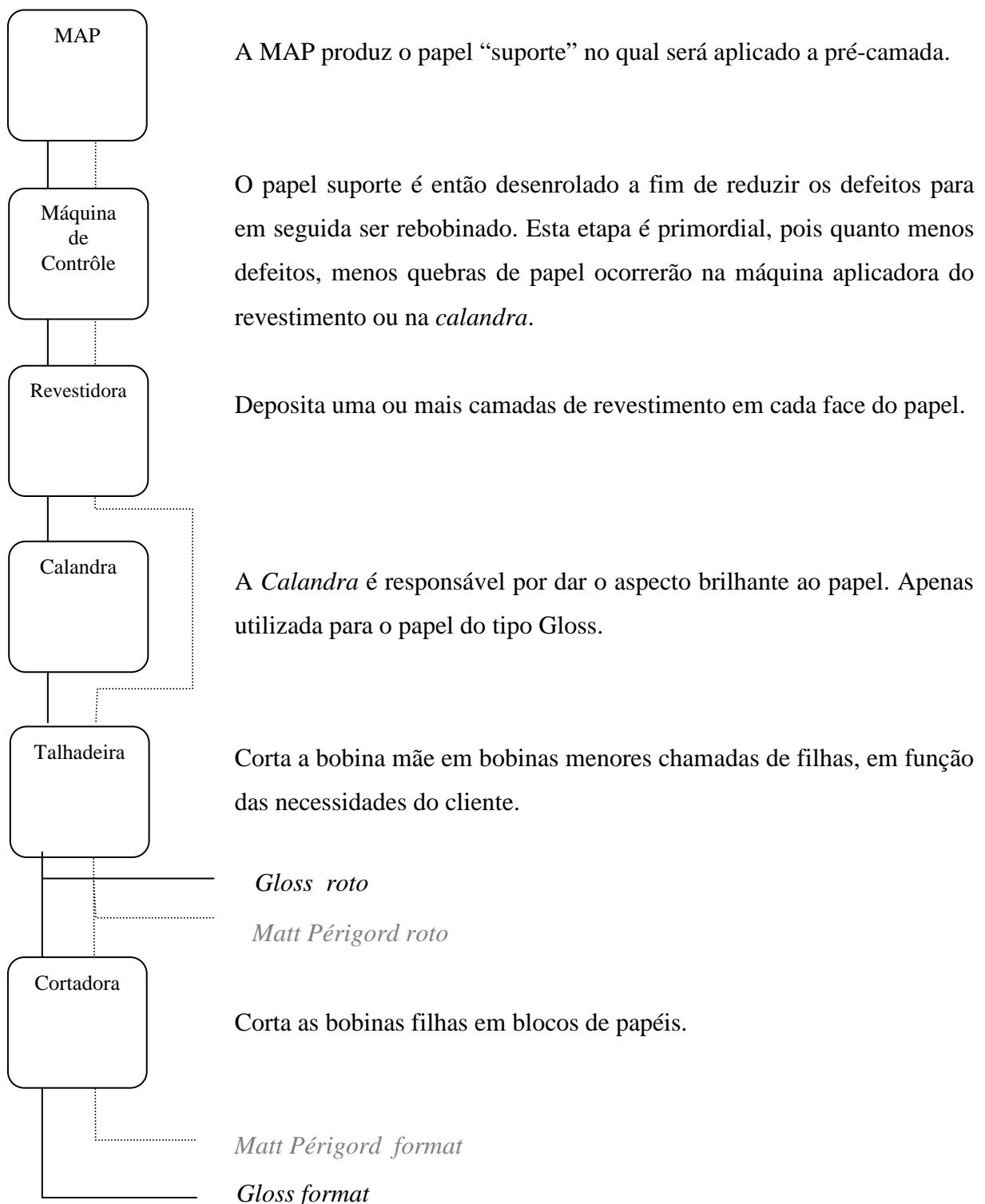
O procedimento meio-químico é uma combinação entre os dois métodos

Estes dois tipos de massa oferecem diferentes características, que são destinadas a usos específicos: as massas mecânicas são mais usadas em papéis como o jornal e revistas enquanto que as massas químicas são mais destinadas a papéis de impressão e certos tipos de embalagem,etc.

Na Condat utiliza-se uma mistura dessas duas massas. A proporção varia segundo a gama de produtos fabricados.

1.3. Linhas Produtivas

Condat possui três linhas produtivas para transformar a “massa de papel” em papel revestido. As três linhas produtivas são organizadas basicamente da mesma maneira, a única diferença vem do fato que a máquina a papel (MAP) mais recente possui uma máquina de aplicação do revestimento diretamente em linha (online), e não em uma máquina separada (off-line).



LINHA 4

- 1 MAP Beloit de 4,60 m, gramaturas médias de 120-200 g/m², velocidade de 860 m / min.
- 1 revestidora Valmet de 4,40m; com 4 cabeças de revestimento
- 1 *calandra* NIPC0
- 1 talhadeira

LINHA 6

- 1 MAP Voith de 3,60 m, gramaturas pesadas de 200–380 g/m², velocidade de 460 m/min.
- 2 revestidora Beloit de 3,48 m; cada uma com 2 cabeças de revestimento
- 1 *calandra*
- 1 talhadeira

LINHA 8

- 1 MAP Tampella-Valmet de 5,20m, gramaturas leves (90-135 g/m²), velocidade 1020 m/min.
- 1 revestidora em linha Voith com duas cabeças de revestimento
- 1 *calandra*
- 2 talhadeiras

1.4. Os Produtos

Matt Périgord

- Revestido moderno sem madeira: bom volume específico aparente.
- Boa opacidade, brancura elevada
- Adaptado aos trabalhos que necessitam uma espessura específica: livros, enciclopédias, livros para crianças

Silk

- Revestido moderno sem madeira: lisura de excelente imprimibilidade
- Brancura elevada, bom compromisso entre lisura e espessura
- Ideal para todos os tipos de impressão de prestígio: brochures institucionais, relatórios anuais, convites

Gloss

- Revestido moderno sem madeira: brilhante de brancura elevada e boa lisura
- Compromisso ideal entre brilho e a rigidez
- Recomendado para numerosos trabalhos: anúncios publicitários, encartes, capas de revista...

1.5. O Estágio

O meu estágio se desenrolou sob a supervisão da direção do departamento de Qualidade e Melhoria Contínua da Condat. Cada projeto se estrutura da mesma forma, em torno de um grupo de trabalho constituído de um *sponsor*, *chefe de projeto*, *fiador da metodologia* e da *equipe técnica*.

A análise da situação atual, que é um estudo sobre as reclamações recebidas, foi realizada pelos engenheiros do departamento de Qualidade e Melhoria Contínua. Para cada tipo de reclamação foi criado um projeto de melhoria. Cada projeto possui um grupo de trabalho composto por membros dos mais diversos departamentos da usina, como engenheiros de processos, chefes de linha, chefes de equipes de trabalho...

Foi determinado pelo departamento de Qualidade e Melhoria Contínua, que eu seria responsável pelo **projeto de melhoria do brilho do papel**.

Meu papel neste projeto foi de *garantir a metodologia*, que consiste em fazer avançar o projeto segundo a metodologia usada pelo departamento. Coube a mim o estudo sobre o processo, a análise do problema, a organização de reuniões com o grupo de trabalho, e a aplicação do método de resolução decidido. Como integrante do grupo de trabalho, eu apresentei e defendi minhas idéias de melhorias.

Meu trabalho mais especificamente dentro do grupo teve como prioridade a implementação das “boas práticas” nos diversos processos produtivos (plano de reação rápida). Neste relatório será apresentado o projeto para reduzir a variabilidade e a diferença entre a média e a especificação do produto no processo de calandragem do papel.

O grau de avançamento do projeto é acompanhado através da ficha PDCA (DMAIC), regularmente atualizada e apresentada ao chefe do projeto para avaliação, que no caso era o diretor do departamento de qualidade da Condat. (*ANEXO I: FICHA PDCA DO PROJETO*).

Segundo a metodologia DMAIC, o projeto está dividido da seguinte maneira:

(D) DEFINIÇÃO: Capítulo 2 – Situação atual: as reclamações, seleção do produto e do parâmetro a ser estudados.

(M) MEDIÇÃO, (A) ANÁLISE: Capítulo 4 – Análise do problema: Detalhamento do processo de calandragem, estudo do indicador cpk , estudo da variabilidade, descrição do problema

(I) MELHORIA, (C) CONTROLE: Capítulo 5 – Solução do problema: Apresentação da solução com a aplicação dos conceitos e modelos apresentados e discutidos no capítulo da revisão bibliográfica e Capítulo 6 – Conclusões: Discussão dos resultados.

2. SITUAÇÃO ATUAL

A variabilidade dos produtos é um dos maiores problemas e especialmente na indústria papeleira devido ao fato de que as fontes de variabilidade são muito diversas. Elas provém da matéria-prima ou da maneira de conduzir o processo, é evidentemente necessário reduzir-las ao máximo.

- Satisfazer o cliente e por consequência reduzir o número das reclamações, fidelizar a clientela, aumentar o market-share... este é um pilar do World Class Manufacturing.
- Aumentar a produtividade, no entanto sem investir em novos equipamentos, diminuindo diretamente os defeitos por não-conformidade.

2.1. As reclamações

As reclamações podem ser de diversos tipos: por faltas, por defeitos de nivelamento, por atraso de entrega e também por não conformidade com as especificações.

No nosso caso, nos interessam apenas as reclamações por não conformidade com as especificações do produto.

Os parâmetros que entram em consideração na lista de especificações dos produtos são oito, e englobam características tanto óticas como físicas.

Tabela 1: Parâmetros da lista de especificação

Fonte: Especificação comercial dos produtos Condat

Óticas	Físicas
Brancura WCIE	Espessura
Brilho	Gramatura
Tonalidade b	Rigidez
Opacidade	Lisura (altas gramaturas) Rugosidade (baixas gramaturas)

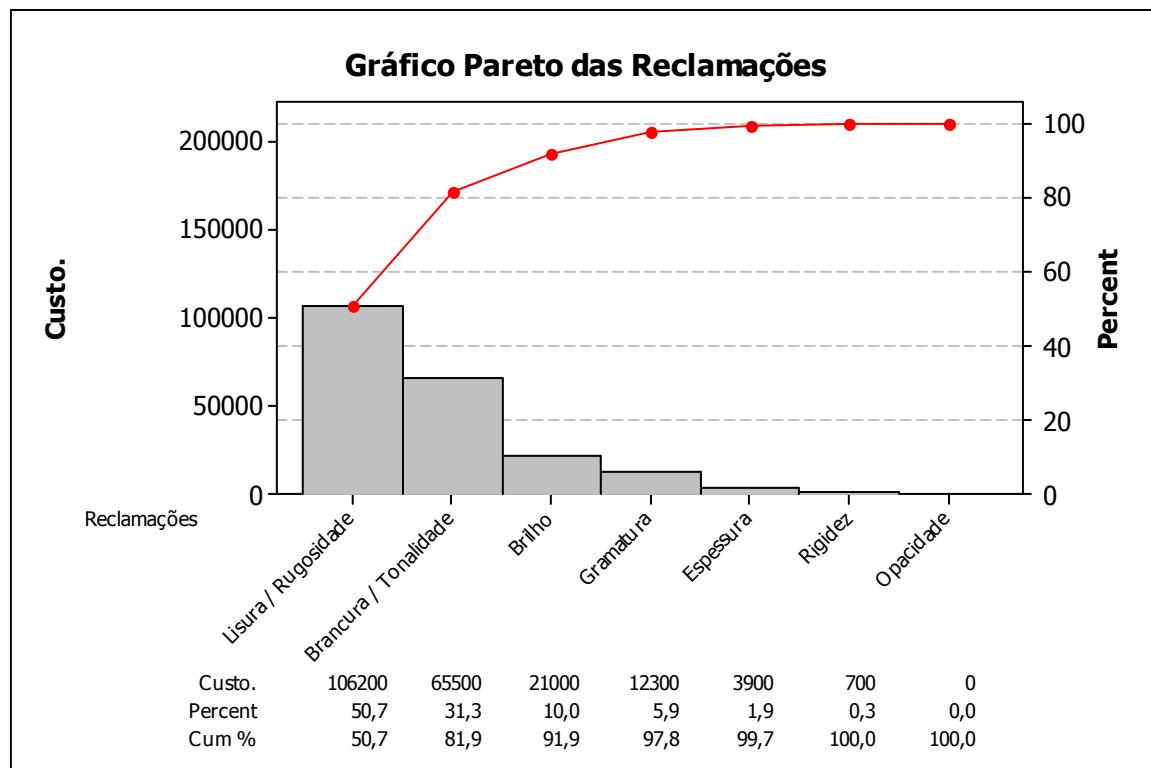


Gráfico 1: Pareto das reclamações

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005

Tabela 2: Custo de reclamações

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005

Reclamações	Custo
Lisura / Rugosidade	106200
Brancura / Tonalidade	65500
Brilho	21000
Gramagem	12300
Espessura	3900
Rigidz	700
Opacidade	0
Total	209600

O centro de reclamações dos clientes fica dentro do departamento de qualidade. As reclamações representam uma soma de 210 mil euros de 2003 a 2005.

Podemos constatar classicamente que a lei de PARETO dos “80 / 20” é verificada, pois que 28% das causas representadas pela *lisura* e pela *brancura / tonalidade*¹ representam 80 % do custo das reclamações. Seria prudente especificar que as reclamações não podem ser consideradas como o único fator de satisfação do cliente. Na realidade, elas refletem apenas a opinião dos clientes

¹Em razão do modo de classificação das reclamações dos clientes, não é possível separar o grupo *brancura / tonalidade*.

que fazem questão de serem ouvidos, mas existem ainda aqueles que não estão satisfeitos com o produto, mas não fazem uma reclamação formal. Ou seja, nem todos os defeitos do papel, ou as diferenças em relação às especificações do produto, se transformarão em uma reclamação formal no serviço de atendimento ao consumidor.

2.2. Os rejeitos por não conformidade

As reclamações não são as únicas perdas que nós podemos identificar. Certamente o rejeito por não qualidade compõem uma parte não negligenciável que deve ser levada em consideração, mesmo se esta perda se efetua internamente e não é visível pelo cliente.

Estas sucatas privam o site de uma produção suplementar e afetam diretamente a taxa de rendimento sintético (indicador de eficácia da capacidade de produtos).

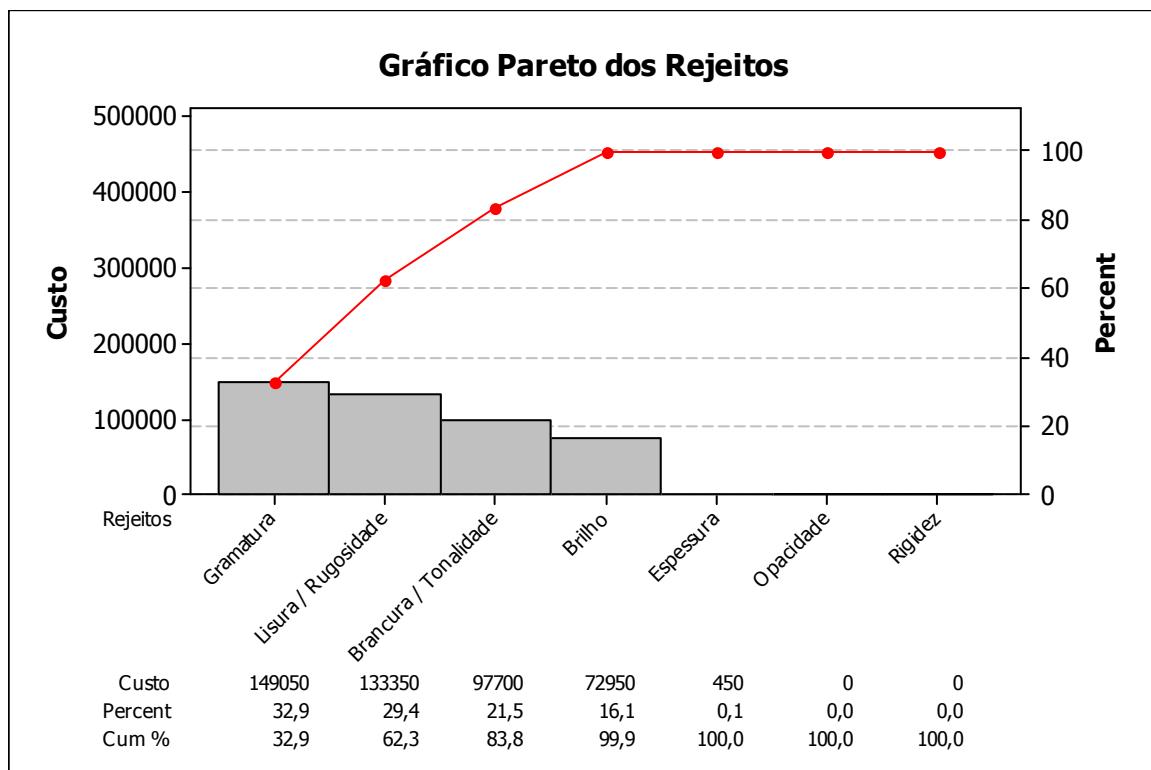


Gráfico 2: Pareto dos rejeitos

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005

Tabela 3: Custo de rejeito²**Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005**

Rejeitos	Custo	
Gramagem	149050	
Lisura / Rugosidade	133350	
Brancura / Tonalidade	97700	
Brilho	72950	
Espessura	450	
Rigidez	0	
Opacidade	0	
Total	453500	

Podemos constatar que os rejeitos por não qualidade representam mais que o dobro do custo de reclamações no período entre 2003 e 2005.

² O custo dos rejeitos é estimado pela diferença entre o rejeito comercializável e o custo de compra de papel reutilizável que se deve comprar externamente, seja 250 euros / tonelada.

2.3. Os custos totais

Fazendo a soma dos custos de reclamações mais custos dos rejeitos, chegamos a um valor de mais de meio milhão de euros no período de 3 anos, desde 2003 até o final de 2005.

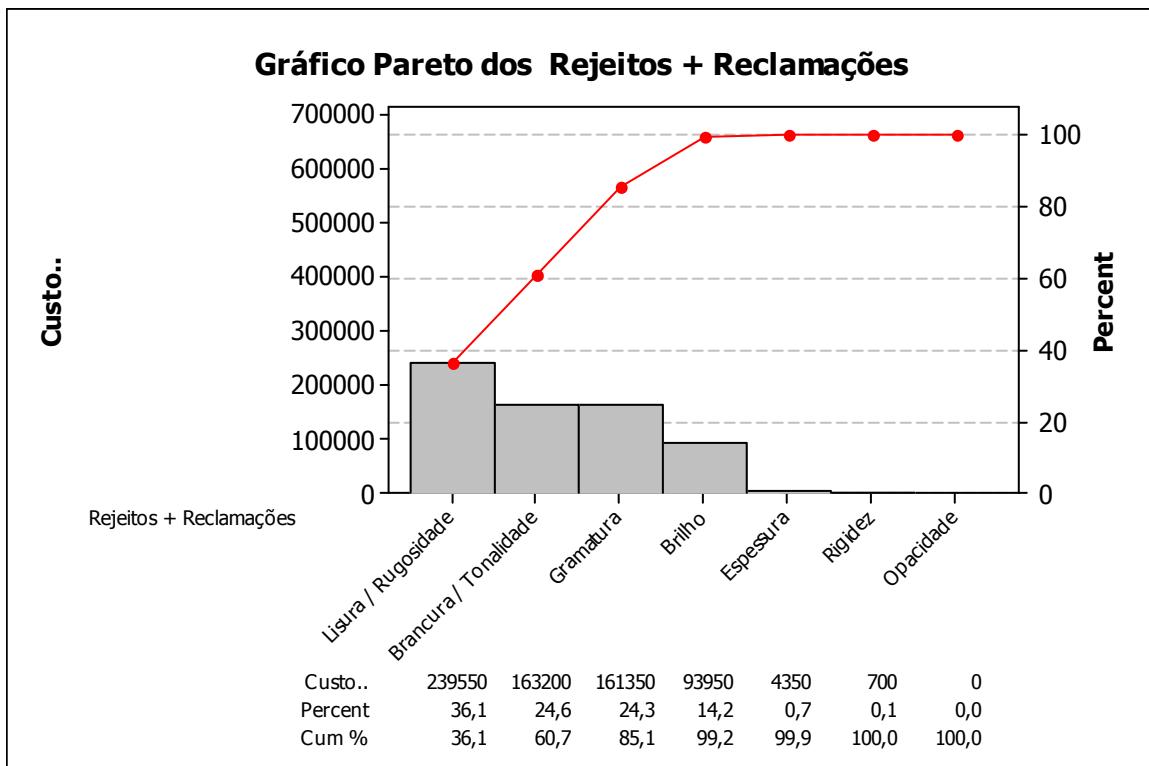


Gráfico 3: Pareto das reclamações + rejeito

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005

Tabela 4: Custo das reclamações + rejeito

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2003 a 2005

Rejeitos + Reclamações	Custo
Lisura / Rugosidade	239550
Brancura / Tonalidade	163200
Gramagem	161350
Brilho	93950
Espessura	4350
Rigidz	700
Opacidade	0
Total	663100

A CONDAT possui três linhas produtivas produzindo 3 tipos diferentes de papel, com gramaturas de 90 g/m² a 380 g/m². Logo, a produção é muito diversificada. Em consequência, foi necessário determinar quais eram os produtos e parâmetros julgados críticos que precisavam ser seguidos estatisticamente.

2.4. Quais Produtos

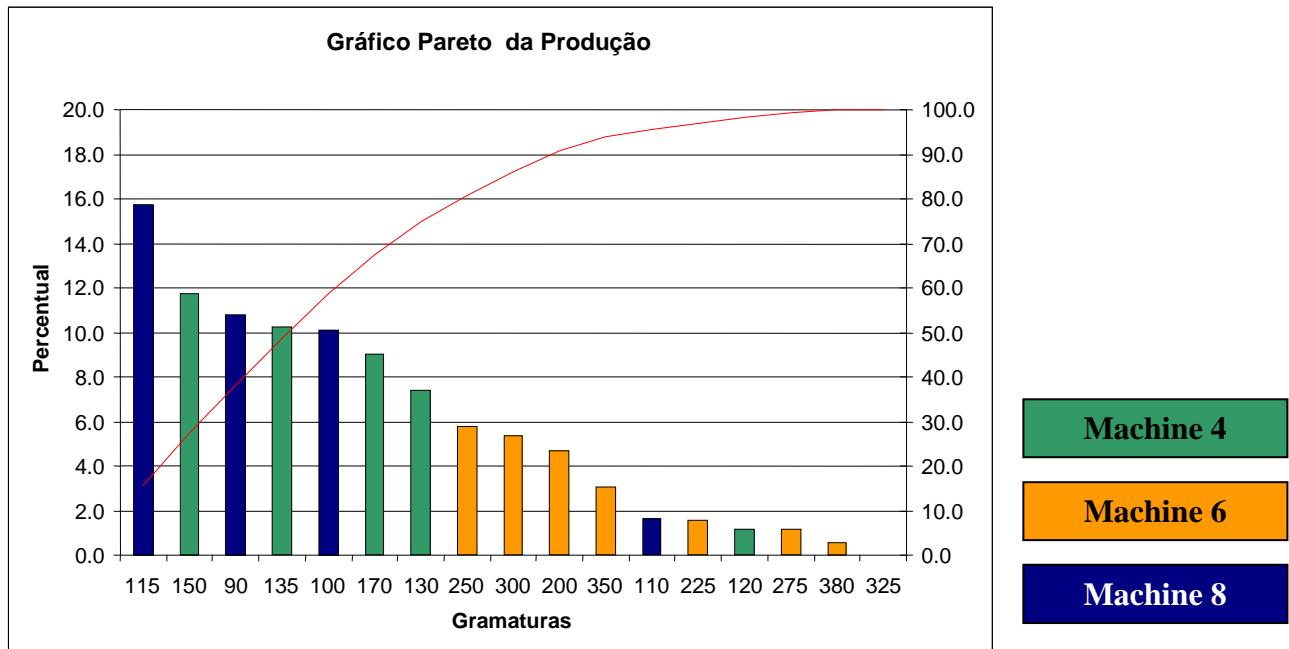


Gráfico 4: Pareto da produção

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor, de 2005

A escolha dos produtos é simples: na realidade, para efetuar um estudo estatístico, a restrição maior é o número de dados a disposição. Logo, os produtos designados são os produtos mais fabricados no site produtivo. Portanto:

- O 115 g/m² fabricado pela linha 8;
- O 150 g/m² fabricado pela linha 4;
- O 250 g/m² fabricado pela linha 6.

Esta escolha se justifica também pelo fato que as fabricações acima são as mais representativas da produção global da CONDAT.

2.5. Quais parâmetros

O projeto de controle das capacidades é essencialmente centrado no cliente. O projeto da empresa na verdade é, uma vez os indicadores Cpk controlados (superiores a 1,33), será interessante difundir esses dados para os clientes e de utilizá-los como uma garantia de qualidade. A escolha das características a serem seguidas, foi de acordo com o plano da empresa.

As fichas comerciais (especificações técnicas dos produtos) contam com todas as características físicas e óticas que são “vendidas” ao cliente. Elas fornecem então as informações necessárias, em termos de medidas alvo e especificações, para o cálculo dos indicadores de capacidade. Cada produto (tipo + gramatura) fabricado à Condat possui uma ficha comercial. A seguir segue o exemplo da ficha comercial para o produto *Gloss*.

Version 12 - 04 / 2005		COMMERCIAL SPECIFICATIONS CONDAT MATT PERIGORD SHEET																	
WEIGHT	90	100	110	115	120	130	135	150	170	200	225	250	275	300	350	380			
THICKNESS	96	108	120	125	131	142	147	162	184	202	234	265	297	327	399	430			
BULK	1.07	1.08	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.08	1.08	1.01	1.04	1.06	1.08	1.09	1.14	1.13			
WHITENESS	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120			
OPACITY	93.0	94.5	95.5	96.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
PAPER GLOSS	20	20	20	20	20	20	20	22	22	22	22	22	22	22	22	22			
SMOOTHNESS	-	-	-	-	-	-	-	100	100	230	230	230	210	210	200	200			
ROUGHNESS	100	100	100	100	90	90	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
REL. HUMIDITY 23°C	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%			

Property	Standard	Units	Tolerance	Those specifications are subject to change without prior notice	
Weight	ISO 536	g/m ²	+ / - 4%		
Thickness	ISO 534	microns	+ / - 7%		
Bulk	ISO 534	cm ³ /g	-		
Whiteness CIE D65	ISO 11475	Index	+ / - 3 pts		
Opacity	ISO 2471	%	+ / - 2 pts		
Paper Gloss	TAPPI T-480	%	+ / - 5 pts		
Smoothness	ISO 5627	sec	+ / - 50%		
Roughness	ISO 8791-2	ml/min	+ / - 50%		
Relative Humidity	TAPPI T-502	%	+ / - 10 pts		



Tabela 5: Ficha comercial³

Fonte: Depto. Comercial Condat, versão 12/04/2005

³ As características em verde correspondem as características que foram designadas como críticas, a serem seguidas pela metodologia de controle estatístico dos processos

Essas especificações comerciais podem ser traduzidas em parâmetros dos processos produtivos. A seguir, o resumo dos produtos e parâmetros que foram incluídos no estudo estatístico Cpk

- *Gramaturas*

- O 115 g/m² fabricado pela linha 8;
- O 150 g/m² fabricado pela linha 4;
- O 250 g/m² fabricado pela linha 6.

- *Produtos:*

- Matt
- Silk
- Gloss

Parâmetros produtivos:

- Brancura
- Brilho
- Espessura
- Lisura / Rugosidade
- Opacidade
- Rigidez
- Tonalidade
- Gramatura

2.6. Escolha do parâmetro a ser detalhado

O gráfico a seguir mostra o numero de não conformidades encontradas em 100 folhas retiradas aleatoriamente de produtos 115 g/m².

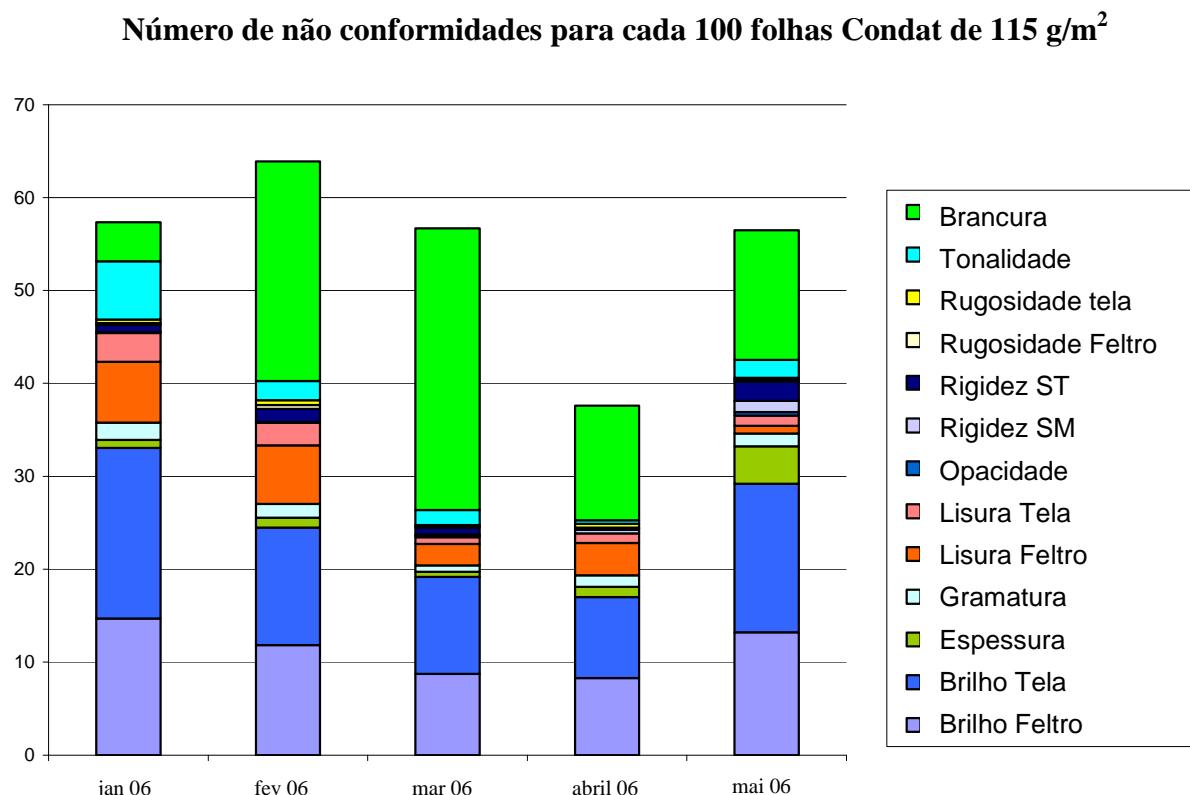


Gráfico 5: Não conformidades a cada 100 folhas Condat para os produtos 115 g/m²

Fonte: Depto. Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor

Mesmo que as propriedades geradoras de um maior número de reclamações e defeitos (ver Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3) sejam a *gramatura*, a *lisura* e a *brancura / tonalidade*, meu projeto se organizou em volta do brilho (brillance vierge BV) do papel Gloss 115 g/m² (8CASF115).

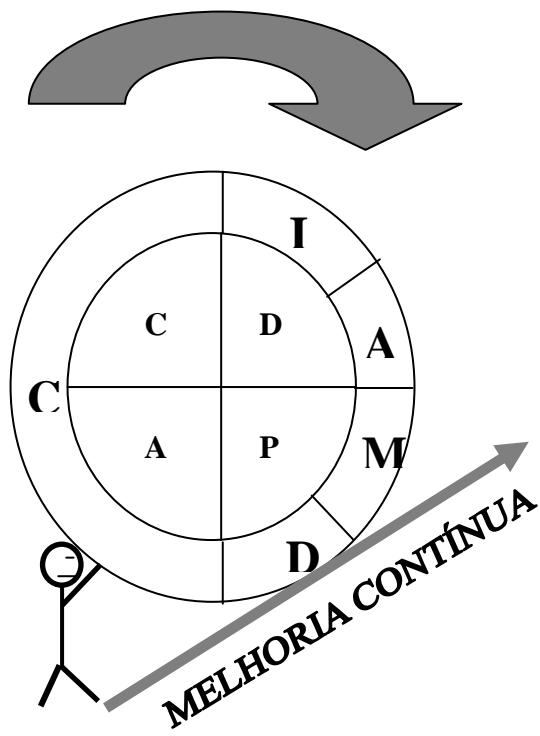
Esta é a característica que possui um maior número de não-conformidade depois da brancura, característica na qual o *Dept. de engenharia de processos* possui projetos de melhoria. A linha 8 foi escolhida linha piloto para o projeto por possuir um maior volume de produção, logo, maior número de dados disponíveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Iniciativa de Melhoria Contínua

Ao longo dos últimos anos, as empresas precisaram enfrentar uma concorrência cada vez mais acirrada. A mundialização da competição e a corrida para o desenvolvimento foram fatores determinantes na decisão das empresas de pesquisarem novos meios que lhes proporcionassem condições de participação. A qualidade tornou-se então uma das peças chaves da competitividade das empresas. É a partir desse momento que as noções “de melhoria contínua” e “World Class Manufacturing” tornaram-se importantes.

Desde 2004, a Condat se comprometeu em um programa ambicioso de qualidade. A Condat pretende ser considerada pelos seus clientes como sendo o seu melhor fornecedor de modo durável. Esta iniciativa é suportada pelo projeto chamado de Condat 600.20.15 no qual os outros projetos de melhoria contínua são estruturados segundo uma iniciativa rigorosa DMAIC (6 sigmas) que decorre da abordagem de DEMING e do ciclo PDCA



D: Define

Qual é o problema?

Definir as necessidades dos clientes e especificar os objetivos e enquadrar o projeto. "Define" é a primeira etapa da metodologia. Ela permite a definição do perímetro do projeto, as expectativas, os recursos e os prazos necessários.

M: Measure performance

Qual é a capacidade do processo considerada? Coletar os dados representativos, medir a performance, identificar as zonas de progresso. Avaliação da performance atual e as suas variações (tendências, ciclos...).

Figura 2: Ciclo DMAIC

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

A: Analyse

Quando, onde e como os defeitos são produzidos

Utilização das ferramentas analíticas e estatísticas para identificar as causas dos problemas.

Nesta etapa do desenrolar da metodologia, deve-se compreender os problemas para poder formular em seguida as soluções susceptíveis de perceber a diferença entre a situação presente e os objetivos.

I: Improve performance

Quais são as soluções de melhoria e como implementá-las para atingir os objetivos de performance fixados?

Identificação e implementação das soluções para evitar os problemas acima citados. Esta fase particularmente importante deve tomar o tempo necessário para testar e validar as soluções da maneira mais adequada.

C: Control performance

Como pilotar as variáveis chaves para suportar e manter a vantagem?

Acompanhamento das soluções implementadas. Por outro lado, os resultados não são sempre imediatamente visíveis. Trata-se da fase mais delicada da iniciativa de progresso contínuo. A retrocedência é uma ameaça à todos os instantes. Suportar o esforço passa necessariamente pela adoção de uma cultura generalizada da medida.

É uma metodologia de colocar perpetuamente em questão o que deve ser feito para atingir a excelência industrial, o “World Class Manufacturing” (WCM). O WCM se compõe em diversos pontos que vão da determinação das necessidades do cliente até o controle da matéria-prima, passando pela gestão do estoque, manutenção preventiva, domínio dos processos industriais, etc. Todos estes pontos possuem como objetivo: a satisfação do cliente e a garantia da competitividade entre os seus concorrentes.

Foi dentro deste escopo que eu fiz parte da equipe de Qualidade e Melhoria Contínua dirigida por Eric COCCHI.

3.2. O Controle Estatístico de Processos (CEP)

O controle estatístico dos processos (CEP) é um conjunto de técnicas e de ferramentas estatísticas, organizadas de maneira a conservar e/ou melhorar o nível de qualidade de um processo. O CEP pode ser considerado como uma ferramenta ou uma estratégia de qualidade entre tantas outras. Ele é um caminho para atingir o World Class Manufacturing.

Dentro do contexto do DMAIC e do 6 Sigma, podemos classificar o CEP, como sendo a parte de *MEDIÇÃO (Mesure)* e também o início do *ANÁLISE (Analyse)*.

As ferramentas do CEP são resultados do trabalho de Shewhart, nos laboratórios de BELL na década de 20. A indústria militar e a indústria automobilística americana adotaram esta abordagem e graças às suas experiências, foi provada a eficácia no controle de problemas. Posteriormente, elas foram utilizadas com sucesso nas empresas manufatureiras japonesas, no período pós-guerra.

Os objetivos do CEP são: dar aos operadores uma ferramenta de pilotagem das máquinas, formalizar a noção de capacidade estatística de um meio produtivo, fazer a separação entre situações ordinárias e as situações extraordinárias que requerem uma ação.

3.2.1. Definições

Para melhor compreender os objetivos do Controle Estatístico de Processos (CEP ou em inglês SPC, Statistical Process Control), se deve inicialmente entender corretamente o significado de cada termo.

➤ **Processos (Process)**

É o conjunto de atividades correlacionadas ou interativas que transformam os elementos de entradas em elementos de saída.

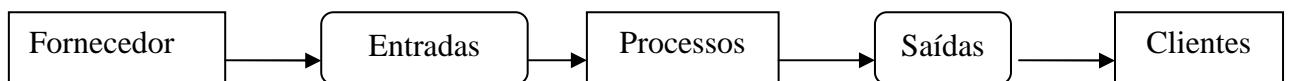


Figura 3: esquema de blocos de um processo

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

A partir da figura 3, nos podemos nos perguntar alguns pontos fundamentais em relação à qualidade.

- Quem são nossos clientes?
- Quais são as suas necessidades?
- Como eu posso satisfazê-las?
- Como eu posso mantê-los constantemente satisfeitos?

Todos os processos, qualquer que seja, são incapazes de produzir exatamente sempre o mesmo produto. Qualquer que seja a máquina estudada ou a característica observada existirá sempre uma variação ou dispersão desta característica. Esta dispersão é natural e corresponde a uma distribuição normal da população (curva da Gauss).

Nós podemos reagrupar todas as fontes de variação em 6 categorias, os 6 Ms.

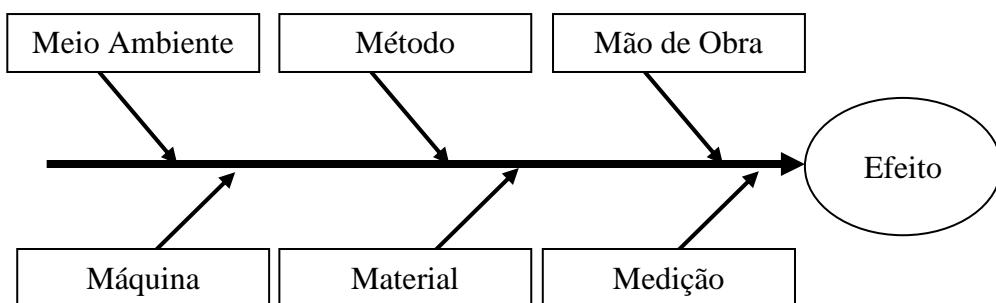


Figura 4: diagrama d'Ishikawa

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

➤ Controle (Control)

O Controle significa o plano de ação para resolver um problema. Pode haver dois tipos muito distintos de planos de ação, um plano de ação sobre o processo ou um plano de ação sobre o produto. Esse plano pode então ser corretivo ou preventivo.

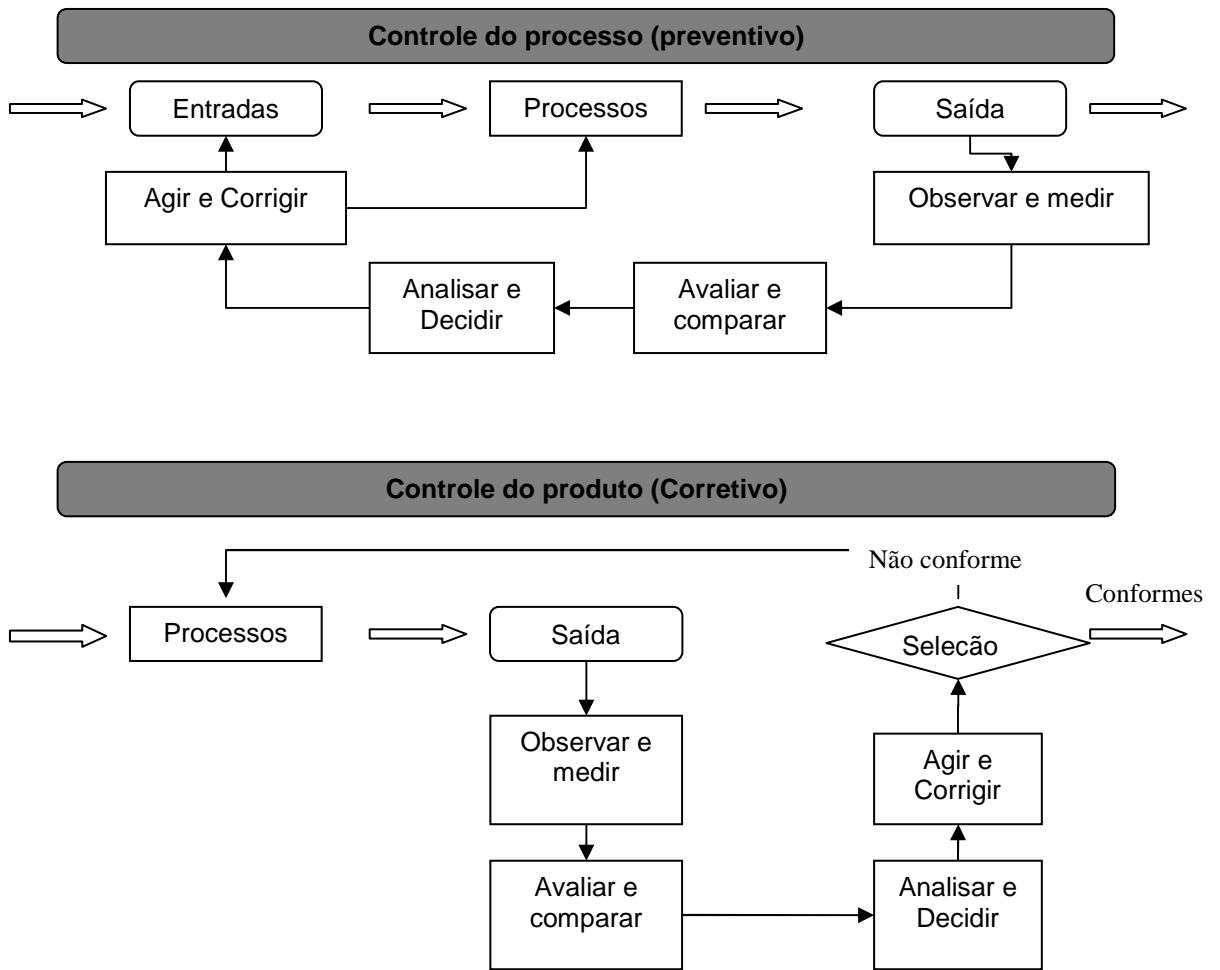


Figura 5: Organização dos controles

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

O CEP é considerado como um controle preventivo dos processos.

➤ Estatístico (Statistical)

A estatística é um conjunto de técnicas de interpretação matemática aplicadas aos fenômenos, sobre os quais um estudo exaustivo de todos os fatores é impossível. Ela nos ajuda a encontrar as fontes de variação permitindo uma tomada de decisão baseada sobre fatos e não sobre opiniões.

Em uma produção, duas peças ou produtos não são jamais perfeitamente idênticos. As dimensões ou composições precisas de uma peça produzida em uma máquina dependem de

vários fatores. E as fontes dessas variações podem ser classificadas como **causas comuns** ou **causas especiais**.

Causas Comuns

É uma causa definida como uma fonte de variação que toca todos os valores individuais do processo. Essa variação aleatória tem diversas origens e nenhuma tem predominância sobre a outra. Graças à estatística, é possível modelizar esse comportamento aleatório e, por consequência, prever a performance de um processo que é apenas sujeito a essas causas comuns de dispersão. O processo será sob controle.

O conjunto destas causas comuns de dispersão forma a variabilidade intrínseca do processo.

Exemplos: Compra sistemática e regular de matéria prima de baixa qualidade, falta de formação dos operadores, falta de padronização dos procedimentos.

Causas Especiais

As causas especiais são os fatores geradores de variação que afetam o comportamento do processo de maneira imprevisível. É impossível determinar uma norma para tais causas. Em contrapartida, elas são identificáveis, pois elas produzem resultados totalmente discordantes. A aparição de uma causa especial necessita uma intervenção do operador sobre o processo.

Exemplo: desregulagem ocasional da máquina, lote de matéria prima ruim, quebra de ferramentas, problemas de lubrificação...

Na realidade, essas causas também podem ser classificadas em duas categorias:

- Aquelas que agem sobre a centragem do processo (diferença da média em relação à medida alvo), desregulagem de uma ferramenta, por exemplo;
- Aquelas que agem sobre o aumento da dispersão e logo sobre a capacidade estatística da máquina.

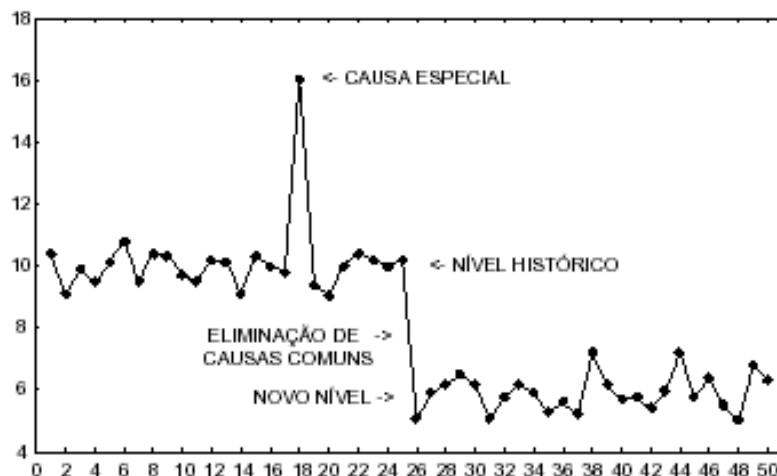
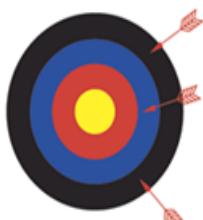


Gráfico 6: Impacto das causas comuns e especiais

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

3.2.2. Distribuição

Os quatro casos de distribuição



Descentralizado e variável

A média está longe da medida especificada e cada produto é muito diferente dos outros. Todos os produtos estão fora da especificação.



Descentralizado e não variável

A média ainda está longe da medida especificada, mas cada produto é muito similar ao outro. Os produtos ainda estão fora de especificação, mas suas características são controladas



Centrado e variável

A média está bem centrada mas a variabilidade é grande demais. Existirão produtos conformes e alguns outros não conformes.



Centrado e não variável

A média está bem centrada e a variação é muito baixa. Todos os produtos estão dentro da especificação.

3.2.3. Os indicadores

Noção de dispersão

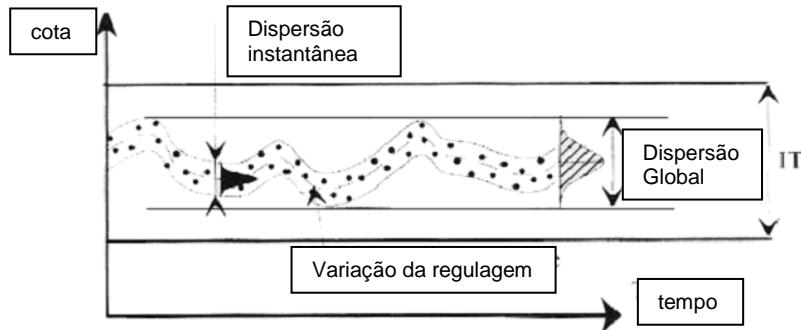


Figura 6: Variabilidade de um processo

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

Quando observamos um processo de fabricação (Figura 6) podemos constatar que este não está sempre centrado sobre o mesmo valor. Ao longo de um período de produção (relativamente longo) podemos distinguir dois tipos de dispersão: a dispersão instantânea e a dispersão global

A dispersão global inclui as flutuações de entrega, ou seja, traduz a qualidade dos produtos entregues aos clientes.

A dispersão instantânea depende principalmente da máquina e das condições da gama retida, mas mais alguns outros “M” (meio ambiente, mão de obra). Esta dispersão será igual à dispersão global se o processo fosse perfeitamente estável.

Noções de capacidade estatística:

Os indicadores do CEP permitem comparar se a média da produção é adaptada as exigências do produto que se pretende a produzir. Fala-se de **capabilidade** (do inglês, capability), mas ao longo do trabalho utilizaremos o termo “capacidade estatística”

A *capacidade estatística* se mede através da razão entre a performance demanda e a performance real do processo. Ela permite a medição da capacidade de uma máquina ou de um processo de fabricação de produtos em um intervalo de tolerâncias fixadas nas especificações do produto.

➤ Cp

Este indicador é calculado da seguinte maneira:

$$Cp = \frac{\text{Intervalo de tolerância}}{\text{Dispersão global}} = \frac{IT}{6\sigma}$$

Com σ = desvio padrão da população: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$

Em um primeiro momento, o processo pode ser considerado como capaz se o intervalo de tolerância é maior que a dispersão global⁴ do processo.

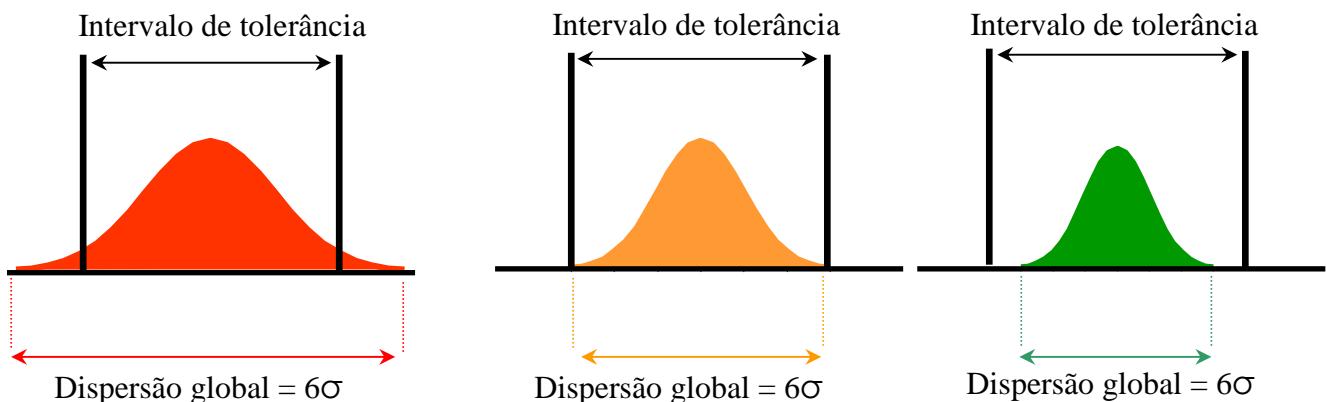


Figura 7: Três casos de dispersão

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

⁴ A dispersão global é considerada como sendo 6σ da dispersão verdadeira do processo, ou seja, o intervalo que contém 99.73 % dos produtos fabricados.

A Figura 7 mostra três tipos de situações típicas. A primeira (à esquerda) corresponde a de um processo não capaz, dado que a dispersão é maior que o intervalo de tolerância. Na segunda figura, a dispersão é igual a da tolerância: o processo é capaz, mas de modo justo. Por fim, a terceira situação é ideal porque a dispersão é menor em comparação ao intervalo de tolerância e permite inclusive uma margem de erro (no caso, de 1 sigma) em direção ao limite superior como inferior.

Um processo se diz capaz se:

$$Cp = 1,33 = \frac{8\sigma}{6\sigma}$$

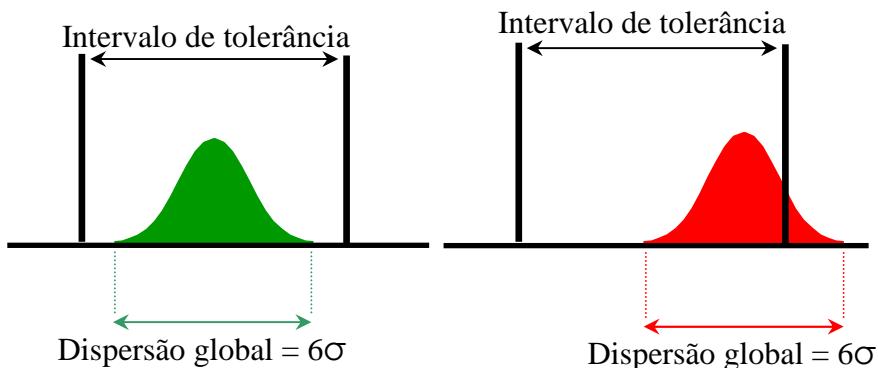


Figura 8: Comportamento do Cp

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

Esta condição é suficiente?

Na Figura 8, as duas situações possuem um Cp superior a 1.33. Ora que a repartição “vermelha” vai produzir produtos fora de especificação. É então imperativo a introdução da noção de descentragem do valor da média.

➤ **Cpk**

$$Cpk = \frac{\text{Distância} \left(\frac{\text{Média}}{\text{Limite mais próximo}} \right)}{\frac{1}{2} \text{Dispersão global}} = \text{Min} \left(\frac{\text{Limite} - \text{Média}}{3\sigma}; \frac{\text{Média} - \text{Limite}}{3\sigma} \right)$$

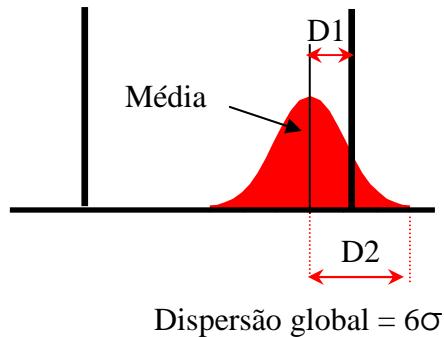


Figura 9: Comportamento do Cpk

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

No caso da Figura 9, o processo está fora da especificação do lado superior do limite de tolerância. Neste caso, notamos que o processo não é capaz se a distância D1 (tolerância superior – média) for maior que a distância D2 (metade da dispersão)

Da mesma maneira que para o Cp, o valor limite do Cpk é de 1,33.

➤ Cpi:

Este indicador é calculado da seguinte maneira:

$$Cpi = \frac{\text{Número de Cpk} > 1,33}{\text{Número total de Cpk calculados}} \cdot 100$$

Representa o número de características para as quais podemos considerar que o processo é capaz ($Cpk > 1,33$) em relação a todas as características estudadas.

É utilizado como indicador “global” da empresa, mostrando performances de modo bem geral e sintetizado dos processos de fabricação.

3.3. A Análise do Sistema de Medição (MSA)

Definição MSA: Measurement System Analysis

O controle estatístico dos processos é baseado nas medidas obtidas a partir de todos os tipos de aparelhos, instrumentos e medidores. É então indispensável a verificação de que todos os dados fornecidos por estes aparelhos são bem representativos da realidade e que eles não tragam dispersões suplementares. Dentro da Metodologia DMAIC, o MSA se enquadra na **MEDIÇÃO (measure)**.

Os aparelhos de medição podem ter diversos defeitos:

- Falta de resolução: a resolução é a menor diferencial de medição que o instrumento é capaz de detectar.
- Erro de precisão: o erro de precisão é a diferença sistemática entre o valor real e o valor dado pelo instrumento.
- Defeito de repetibilidade: este erro é a dispersão de medida de um produto, repetida nas mesmas condições em um curto período de tempo.
- Defeito de reproduzibilidade: este erro traduz a capacidade do instrumento dar a mesma média de medidas quando diversas pessoas medem a mesma peça sob as mesmas condições.

A MSA permite validar o sistema de medição verificando que os defeitos do instrumento são compatíveis com a medição a ser realizada.

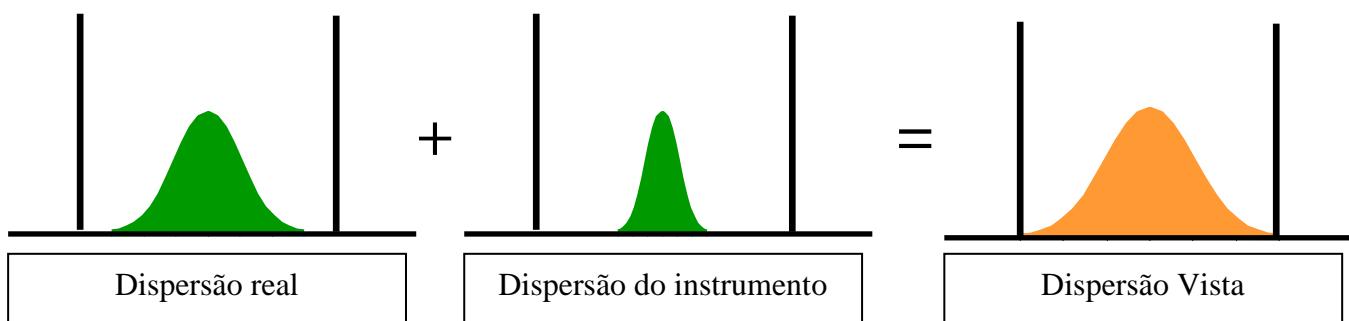


Figura 10: Efeito da dispersão do instrumento de medição

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

3.3.1. O Método

O método apresentado a seguir é baseado nas publicações de Charbonneau, Harvey e Gordon – Industrial Quality Control, 1978. O princípio consiste em avaliar a dispersão do instrumento de medição e compará-la ao intervalo de tolerância da especificação do produto. (tudo como uma capacidade).

Dois indicadores são utilizados para representar a capacidade do aparelho de medição:

➤ O Cmc: capacidade dos meios de controle

Gage R&R: Gage de repetibilidade e reprodutibilidade

$$Cmc = \frac{IT}{6\sigma_{INSTRUMENT}}$$

Nós admitimos que um aparelho seja capaz quando seu Cmc é superior a 4. Quando o Cmc é inferior a 2,5, ele não é aceitável para trabalhar com aquele instrumento.

	Situação	Ação
Cmc < 2,5	O aparelho não é adaptado	Rejeitar o aparelho de medição
2,5 < Cmc < 3	O aparelho não é adaptado, mas pode ser utilizado se não existir outra solução.	Melhorar o Cmc através: - Fixando os procedimentos de medição - Formando operadores
3 < Cmc < 4	O meio de medição é adaptado para as tolerâncias apertadas.	Em caso de tolerâncias muito largas, procurar outro aparelho.
Cmc > 4	O meio de medição é capaz para qualquer tolerância.	

Tabela 6: Classificação Cmc

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

$$\triangleright GageR \& R = \frac{5,15 \cdot \sigma_{INSTRUMENT}}{IT} \cdot 100$$

	Situação
R&R > 30 %	Aparelho não capaz
R&R < 30 %	Aparelho justamente capaz
R&R < 10 %	Aparelho não capaz

Tabela 7: Classificação R&R

Fonte: PILLET (2003), traduzido e adaptado pelo autor

É importante notar que segundo (M. PILLET 2003), a variabilidade do instrumento é calculado a partir de $5,15 \sigma$, este que corresponde a 99 % da população de uma repartição Gaussiana. Seria mais coerente conservar o mesmo coeficiente 6σ (99,73% da população) para o calculo do Gage R&R como no cálculo dos indicadores do CEP.

Neste caso, o Gage R&R se torna:

$$GageR \& R = \frac{1}{Cmc} \cdot 100$$

Em todos os casos, o cálculo é baseado sobre o $\sigma_{instrument}$. Nós veremos como ele pode ser evidenciado.

A variância do aparelho de medição é constituída da variância de repetibilidade e da variância de reprodutibilidade.

$$\sigma_{instrument}^2 = \sigma_{repetibilidade}^2 + \sigma_{reprodutibilidade}^2$$

3.4. Delineamento de Experimentos

O livro *Design of Experiments, 6th Edition* de Douglas Montgomery serviu como fonte principal de informações sobre o assunto. Dentro da metodologia DMAIC, a aplicação do *delineamento de experimentos* se enquadra em MELHORIA e CONTROLE.

3.4.1. Introdução a Experimentação

Experimentos são realizados em praticamente todos os campos da ciência, normalmente feitos quando se pretende descobrir algo sobre um processo em particular ou até mesmo um sistema. Pode-se definir um experimento como uma série de testes nos quais, voluntariamente, as mudanças são feitas nas variáveis de entrada de um processo para que se possa observar e identificar as razões para as mudanças que são observadas na variável de resposta.

A experimentação é uma parte feita de um método científico. É possível também, dependendo do fenômeno científico estudado, que se possa formular um modelo matemático, ou seja, uma equação matemática. No entanto, é necessário um experimento muito bem determinado para que os resultados sejam significativos o bastante para que se possa formular esses modelos, chamados de modelos empíricos.

Um processo pode ser representado da seguinte maneira:

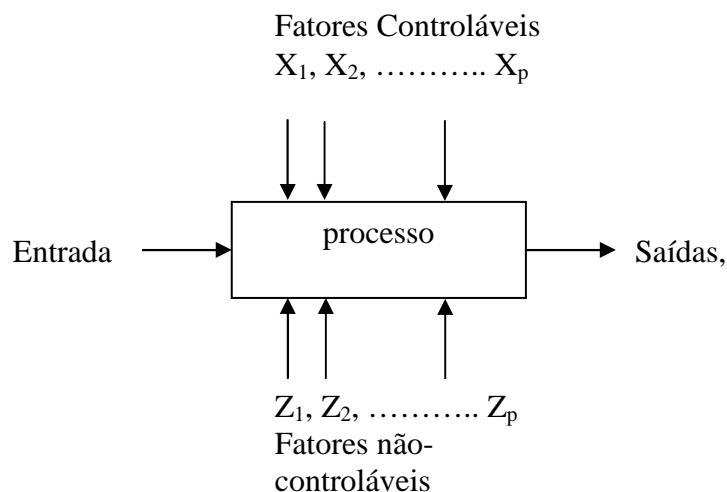


Figura 11: Modelo Geral de um processo ou sistema

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

Podemos considerar um processo como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam entradas (normalmente material) em saídas. Algumas variáveis do processo e propriedades de materiais X_1, X_2, \dots, X_p são controláveis, enquanto que outras variáveis, Z_1, Z_2, \dots, Z_p são incontroláveis.

Segundo Montgomery (2005), os objetivos dos experimentos podem incluir o seguinte:

1. Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta y
2. Determinar qual a configuração do conjunto de x 's tal que y é perto do valor nominal desejado
3. Determinar qual a configuração do conjunto de x 's que reduz a variabilidade de y é baixa
4. Determinar qual a configuração do conjunto de x 's de maneira que os efeitos das variáveis sejam minimizados.

3.4.2. Princípios Básicos

Segundo Montgomery (2005), uma abordagem científica deve ser implementada para que os experimentos sejam realizados da forma mais eficiente possível. O design estatístico de experimentos se refere ao planejamento de um experimento de modo que os resultados possam ser analisados estatisticamente, resultando desta maneira em conclusões válidas e objetivas.

Existem dois aspectos importantes que são fortemente correlatos, o delineamento do experimento e a análise estatística dos dados. Isto porque o método de análise dependerá diretamente da escolha do delineamento.

Existem três princípios básicos para o delineamento de experimentos: aleatorização, repetição e blocking.

Aleatorização significa que tanto os materiais como a ordem da realização dos experimentos devem ser aleatórios uma vez que métodos estatísticos requerem que observações, e logo erros, sejam distribuídos de forma aleatória. Na prática, ocorre que os fatores estranhos são

distribuídos de forma igual pelos testes. Existem alguns experimentos em que não é possível realizar uma aleatorização completa por razões de custos e tempo. Existem diversos tipos de aleatorização dos experimentos considerando as restrições do processo.

Repetição significa a repetição independente de cada combinação de fatores. A repetição permite a estimativa do erro experimental, que acaba se tornando uma unidade básica de medição na determinação se uma diferença observada é ou não estatisticamente diferente. A repetição pode também servir para melhor estimar a variável de resposta, ou seja, podemos considerar a média de duas repetições como a verdadeira variável de resposta. A replicação ajuda a identificar fontes de variabilidades entre testes como potenciais variações dentro do mesmo teste.

Blocking é uma técnica de delineamento usada para reduzir ou eliminar a variabilidade causada por fatores de ruído, aumentando então a precisão da comparação entre fatores. Por exemplo, em um processo às vezes é necessária a utilização de dois lotes de produção; a diferença existe entre um lote e outro pode ser uma fonte de variabilidade. No entanto, a variabilidade dos experimentos realizados dentro do mesmo lote tende a ser menores, logo podemos formar um bloco de experimentos para cada lote diferente, separando melhor esses fatores de ruído. É uma técnica de redução de ruídos.

3.4.3. Diretrizes

Segundo Coleman e Montgomery (2003), existem sete passos principais para a realização de um delineamento de experimentos com sucesso. Estes passos são desde a fase de planejamento pré-experimental, coleta de dados, análises estatísticas e por fim a conclusão.

1. Reconhecimento e indicação do problema

Normalmente não é fácil a identificação de que certo problema necessite a realização de experimentos. É necessário o desenvolvimento de idéias sobre os objetivos do experimento, principalmente das pessoas mais ligadas ao processo, como por exemplo, o operador do processo que normalmente tem uma melhor visão dos detalhes.

Os objetivos da realização do experimento podem ser diversos: otimização, busca pela estabilidade, comparação de performance com o passado, e logo o seu planejamento será diferente dependendo do objetivo buscado.

2. Seleção da variável de resposta

O realizador do experimento deve ter certeza de que a variável de resposta escolhida fornecerá informações úteis sobre o processo. Normalmente, a média e/ou o desvio padrão são as variáveis de resposta escolhidas. Nesta etapa, é importante considerar se o sistema de medição disponível é capaz de medir a variável escolhida antes do início da experimentação. Existem métodos para validação do sistema de medição. (*MSA – measurement system analysis*).

3. Escolha dos fatores e níveis

Os fatores que podem influenciar a performance de um processo são chamados de *fatores potenciais de delineamento*. Estes são os fatores que o realizador dos testes gostaria que fossem. Como muitas vezes pode haver tantos fatores, uma seguinte segregação pode ser interessante, como *design factors*, que são os fatores selecionados para o estudo, *held-constant factor*, fatores mantidos constantes, pois não interessam ao experimento e *allowed-to-vary factors*, fatores cuja variação é permitida e que não são controláveis, eles em geral são pequenos e, portanto são contornáveis devido à aleatorização do experimento.

Por outro lado, os *nuisance factors* (fatores de incomodo) podem ter grandes efeitos que precisam ser considerados. Podem ser controláveis, incontroláveis ou mesmo os fatores de ruído e estas situações podem ser contornáveis através do *blocking*, análise de covariância.

A seleção dos fatores e dos níveis a serem testados normalmente requer um **conhecimento sobre o processo**, que de maneira geral é obtida através da prática ou compreensão teórica. Quando se busca uma caracterização dos processos, normalmente se mantém o número de níveis baixo, usualmente dois níveis já são suficientes.

A utilização dos conhecimentos das pessoas envolvidas no processo normalmente ajuda a determinação dos fatores e dos níveis, utilizando-se do diagrama de causa e efeito, por exemplo.

4. Escolha do delineamento experimental

A escolha do tipo de experimento envolve a consideração das amostras, da quantidade de experimentos permitidos a serem feitos e qual será a forma de aleatorização e *blocking*. Atualmente existem softwares próprios para análise de dados de experimentos DOE, e para esta fase especificamente, o software sugere o melhor tipo de experimento segundo quantos fatores, níveis, etc., que se pretende realizar. Esse tipo de programa ainda sugere um *worksheet* com as ordens aleatorizadas dos testes.

5. Realizando o experimento

Nesta etapa, é vital o monitoramento do processo para certificar-se que tudo está ocorrendo de acordo com o plano. Erros de procedimentos podem acabar com a validade do experimento. Coleman e Montgomery (2003) sugerem que alguns testes piloto deveriam ser realizados para que se obtenha algumas informações iniciais sobre a consistência do material experimental, do sistema de medição e dos erros.

6. Análise estatística dos dados

Métodos estatísticos devem ser utilizados para a análise dos dados para que os resultados e conclusões sejam objetivos invés de subjetivos. Métodos simples de análise e interpretação como as análises gráficas normalmente se revelam muito úteis. Um modelo empírico, ou seja, uma equação derivada dos dados que expresse a relação entre os fatores e a variável de resposta também pode ser interessante. Existem também muitas outras análises que podem ser feitas e os software normalmente realizam toda a parte de cálculos matemáticos, mas cabe ao realizador dos testes escolher quais análises devem ser feitas.

O método estatístico não pode provar que um fator tem um efeito particular mas garante que os resultados obtidos são válidos e coerentes. A vantagem principal da utilização de métodos estatísticos é que eles adicionam objetividade ao processo de tomada de decisão. Técnicas estatísticas combinadas com um bom conhecimento do processo e bom senso resultam em boas conclusões.

7. Conclusões e recomendações

Uma vez que os resultados foram analisados, é necessário chegar às conclusões práticas sobre os resultados para que então as mudanças desejadas sejam realizadas. Métodos gráficos são muito úteis para a apresentação dos resultados a outras pessoas. Testes de confirmação também devem ser realizados para validar as conclusões do experimento.

É importante ressaltar que a experimentação é um processo interativo, ou seja, se aprende muito sobre o processo ao longo da realização do experimento. Logo, é natural que algumas mudanças ocorram, como por exemplo, variáveis de entrada sejam substituídas como também variáveis de resposta. Conseqüentemente, normalmente os testes são realizados de forma seqüencial, ou seja, não devem ser utilizados todos os recursos no primeiro teste, para que seja possível futuramente a realização de testes de confirmação e outros testes para que o objetivo final seja alcançado.

3.4.4. *Design Fatorial*

Segundo Montgomery (2005), de maneira geral, os delineamento fatorial é o design mais eficiente para estudar os efeitos de dois ou mais fatores. Por design fatorial, se entende que para cada realização completa do testes, todas as possíveis combinações de fatores e níveis são investigados.

O efeito de um fator é definido como a mudança na variável de resposta produzida pela mudança no nível do fator. São chamados de “fatores principais” pois referem aos fatores primários do experimento. A figura 12 representa um design fatorial de dois fatores com dois níveis. Chamamos os níveis de “altos” e “baixos”, respectivamente de “+” e “-“. O efeito principal do fator A neste design pode ser determinado como a diferença entre a resposta média quando o fator A está no nível baixo e a resposta média quando o fator A está no nível alto. Ou seja, aumentando o fator A do nível baixo para o nível alto, a variável de resposta aumenta em média esta diferença.

Em alguns experimentos, pode ser que a diferença na variável de resposta entre os níveis de um fator não é a mesma para todos os níveis dos outros fatores. Quando isto ocorre, dizemos que existe uma interação entre os fatores. Ou seja, o efeito de A depende em que nível o fator B se encontra. Dizemos que os fatores não são aditivos, mas multiplicativos.

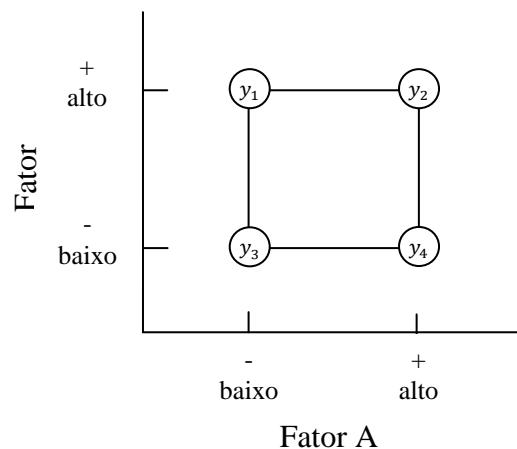


Figura 12: Design factorial com 2 fatores, 2 níveis cada

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

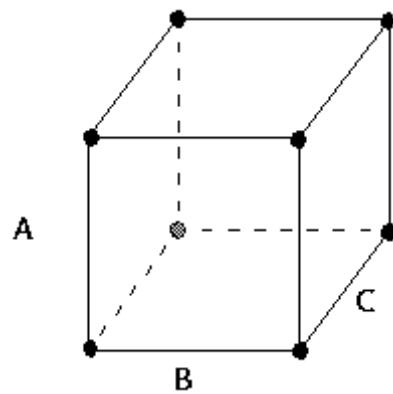


Figura 13: Design factorial com 3 fatores, 2 níveis cada

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

Interação	Tipo	Significado
AB	Dupla	Interação entre os fatores A e B
AC	Dupla	Interação entre os fatores A e C
BC	Dupla	Interação entre os fatores B e C
ABC	Tripla	Interação entre os fatores A, B e C

Tabela 8: Tipos de interação

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

Modelos Matemáticos

Existem outras maneiras de ilustrar esse conceito, como por exemplo um modelo matemático.

Existem diversos modelos, como o modelo de efeitos, o modelo da média, mas o modelo mais comum para experimentos quantitativos é o modelo de regressão que pode ser descrito da seguinte maneira para o caso de um design com dois fatores:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

As variáveis x_1 e x_2 são codificadas, em -1 para o nível baixo e +1 para o nível alto. A valor constante é representado pelo β_0 , os efeitos principais por $\beta_1 x_1$ e $\beta_2 x_2$, enquanto que a interação é representada por $\beta_{12} x_1 x_2$.

De maneira geral, quando uma interação é muito grande, os fatores principais correspondentes possuem pouco significado prático, ou seja, o conhecimento da interação AB normalmente é mais importante que o conhecimento do fator principal. No caso, o efeito do fator principal seria mascarado pelo fator de interação.

Segundo Montgomery (2005), o design fatorial é mais eficiente que o método “tradicional” um fator por vez pois considera as interações que podem estar presente. O design fatorial também permite que os efeitos de um fator sejam estimados nos diversos níveis dos outros fatores, levando a conclusões que são válidas em uma maior escala de condições.

3.4.5. Design Fatorial 2^k

Existem casos especial do modelo geral do design fatorial que são importantes porque eles são largamente usados em trabalhos de pesquisa e também porque eles formam a base para outros design de considerável valor prático.

Segundo Montgomery (2005), o caso especial mais importante é o design com k fatores, cada um com dois níveis. Este tipo de experimento requer 2^k observações, por isso o nome **2^k factorial design**. Este design é particularmente útil nas primeiras etapas do trabalho experimental, quando muitos fatores devem ser investigados. Conseqüentemente, estes designs são largamente usados para **factor screening experiments**, ou seja, *experimentos para seleção de fatores*. Para este design, se assume que (1) os fatores são fixos, (2) os designs são completamente aleatorizados e (3) as premissas usuais de normalidade são satisfeitas.

Como existem apenas dois níveis para cada fator, se assume que a resposta é aproximadamente linear dentro da variação dos níveis para os fatores. Em *experimentos de seleção de fatores*, quando o estudo do processo é apenas iniciado, essas premissas são razoáveis.

A seguir, apresentamos uma tabela de procedimentos (procedimento 2 ao 8), segundo Montgomery (2005) para a análise dos dados obtidos na realização de um design fatorial 2^k , este na realidade seria um detalhamento da etapa número 6 das diretrizes gerais. (*ver item 3.4.3 Diretrizes*).

Existe ainda um passo inicial não especificado por Montgomery, mas que deve ser levado em consideração, que é a verificação da estabilidade do processo durante o experimento.

1) Verificação dos dados coletados

Fazendo gráficos do tipo, série histórica, se comprehende melhor o comportamento do experimento ao longo da sua realização e indica possíveis distúrbios ou erros de medida.

2) Estimar os efeitos dos fatores

Neste passo se estima os valores dos efeitos dos fatores e se examina os seus sinais e magnitudes. Este passo fornece uma informação preliminar em relação a quais fatores e quais interações podem ser importantes, e portanto, para quais direções estes fatores devem ser ajustados para melhorar a variável de resposta.

Efeitos Principais

O efeito principal é presente quando diferentes níveis de um fator afetam a variável de resposta de maneira diferente. O gráfico do efeito principal é composto pela resposta média para cada nível de cada fator conectado.

De maneira geral:

- Quando a linha é horizontal (paralelo ao eixo x), então não existe o efeito principal. Cada nível do fator afeta a variável de resposta da mesma maneira e a média da resposta em todos os níveis do fator é a mesma.
- Quando a linha não é horizontal, então o efeito principal está presente. Diferentes níveis do fator afetam a variável de resposta de maneira diferente. Quanto mais inclinada a reta, maior o efeito principal.

O gráfico a seguir nos indica que tanto o fator A quanto o fator B são significativos. Com análises estatísticas mais profundas podemos formalmente testar estas hipóteses.

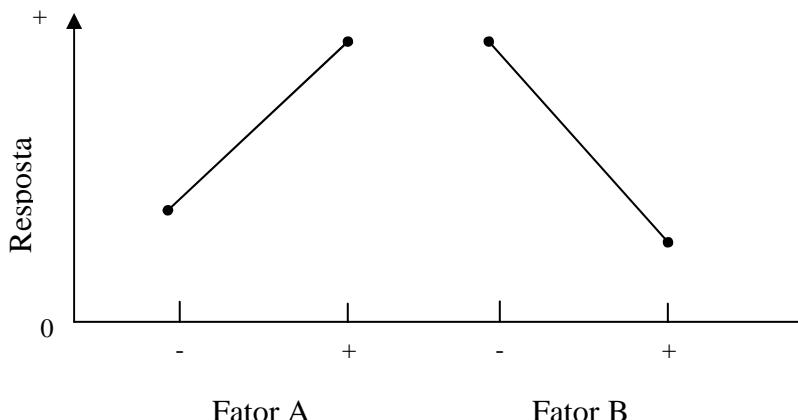


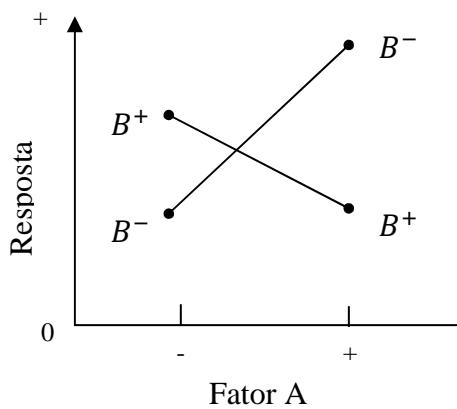
Gráfico 7: Gráfico dos fatores principais

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

Interação

Quando o efeito de um fator depende do nível de outro fator, dizemos que existe uma *interação* entre esses fatores.

O Gráfico 8 representa a diferença de um experimento com interação e outro sem interação.

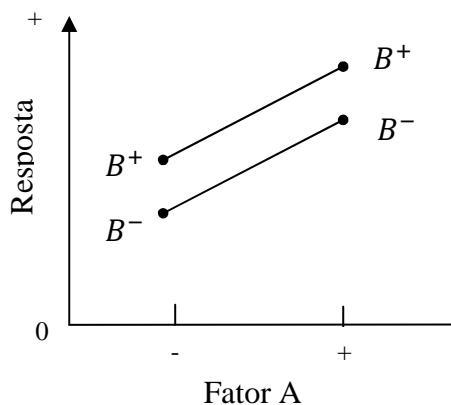


Linhas não paralelas indicam que existe interação. Quanto maior for a diferença de inclinação entre as retas, maior o grau de interação

As linhas não precisam necessariamente se cruzar. No entanto, este Gráfico não diz se existe interação estatisticamente significativa.

Gráfico 8: Com interação

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor



Linhos paralelos indicam que não existe interação.

Ou seja, as diferenças nas respostas entre B^+ e B^- não dependem do valor do fator A.

Gráfico 9: Sem Interação

Fonte: Montgomery (2005), traduzido e adaptado pelo autor

No caso de um experimento com interação tripla, estaríamos lidando com um gráfico com três dimensões, ou seja, uma espécie de cubo. Já no caso de interações de maiores ordem, essas não são representadas graficamente.

3) Formar o modelo inicial

- Se o design é com repetição, fazer o *full model*
- Se o design não tem replicação, formar o modelo usando o Gráfico de probabilidade normal dos efeitos

Na formação do modelo inicial, normalmente se usa o modelo completo (*full model*), ou seja, incluem-se todos os fatores principais e as interações, considerando que a repetição é feita. Os passos três na realidade são realizados ao mesmo tempo.

4) Realizar os testes estatísticos

Normalmente se utiliza da **análise de variância** para formalmente testar a significância dos efeitos principais e das interações. Na realidade, a análise da variância é usada para investigar e modelar a relação entre uma variável de resposta e um ou mais variáveis

controláveis. Basicamente, através da análise de variância das diferentes populações, é possível dizer se a média de uma população é diferente da média de outra população. Desta maneira que identificamos se os efeitos são significativos ou não.

5) Refinar o modelo

A refinação do modelo consiste em retirar as variáveis não significativas no modelo e repetir os passos três e quatro.

6) Análise dos resíduos

Este passo é a análise dos resíduos para verificar a adequação do modelo e verificar as premissas prévias.

A análise de resíduos serve para analisar qualidade de uma regressão e da análise de variância. Examinando os resíduos ajuda a determinar se as premissas ordinárias dos quadrados mínimos são satisfeitas. Se essas premissas são satisfeitas, então a regressão pelos quadrados mínimos irá produzir uma estimativa imparcial dos coeficientes com o mínimo de variação. Os gráficos são os seguintes:

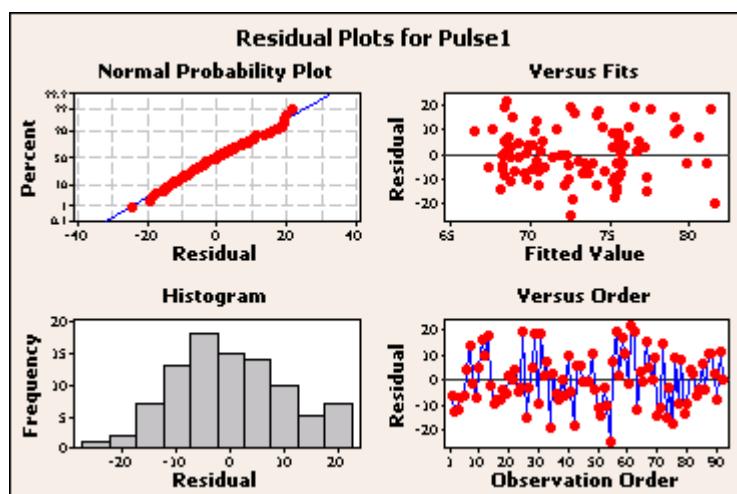


Figura 14: análise dos resíduos

Fonte: Minitab 15

Histograma dos Resíduos. O histograma mostra as características gerais dos resíduos incluindo os valores típicos, o formato e a propagação. Uma cauda longa em um lado pode indicar uma distribuição comprometida. Se um ou duas barras estiverem longe das demais, esses pontos podem indicar outliers.

Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos. Os pontos neste gráfico deveriam formar uma linha reta se os resíduos estão distribuídos de maneira normal. Se os pontos não formarem uma linha reta, as premissas de normalidade podem ser inválidas.

Resíduos Versus os Valores Estimados. Este gráfico deve mostrar uma distribuição aleatória em dos resíduos nos dois lados em torno do zero. Se um ponto cair longe da maioria dos outros pontos, este pode indicar um *outlier*. Não deve haver nenhum padrão reconhecível neste Gráfico. Por exemplo, se uma distribuição de resíduos tende a crescer quando os valores estimados crescem, este pode indicar uma violação da premissa da variância constante.

Resíduos Versus Ordem dos Dados. Este gráfico mostra todos os resíduos na ordem que foram coletados, e pode ser usado para achar erros não aleatórios, especialmente erros relacionados com o fator tempo. Este gráfico ajuda a verificar a premissa que os resíduos não são correlacionados entre eles.

7) Interpretação dos resultados

Esta etapa final consiste nas análises gráficas dos efeitos principais e das interações.

4. ANÁLISE DO PROBLEMA

Primeiramente, será realizado um estudo mais aprofundado sobre o processo de calandragem do papel, sobre os dados disponíveis atualmente (indicadores Cpk) e sobre a base de dados do processo de fabricação.

4.1. A Calandra



Figura 16 : A calandre da linha 8

Fonte: foto tirada pelo autor



Figura 15 : A calandre da linha 8

Fonte: foto tirada pelo autor

Os produtos do tipo *gloss*, obtêm o seu brilho final depois da passagem pela *calandra*. Esta máquina funciona da seguinte maneira. Após a passagem do papel pela máquina que lhe aplica o revestimento, as bobinas são levadas para a *calandra*. O papel é desenrolado, fazendo-se passar por cilindros de aço e cilindros de aço revestido de papelão, para ser novamente enrolada e depois levada para a máquina de corte. A aplicação de *pressão* e *temperatura* enquanto o papel passa entre os cilindros é o que lhe confere o brilho desejado.

4.2. O Scanner

O máquina que dá o brilho ao papel, a *Calandra*, possui um scanner logo após os rolos compressores e faz a medição de diversas características do papel, incluindo o brilho e a espessura entre outras.

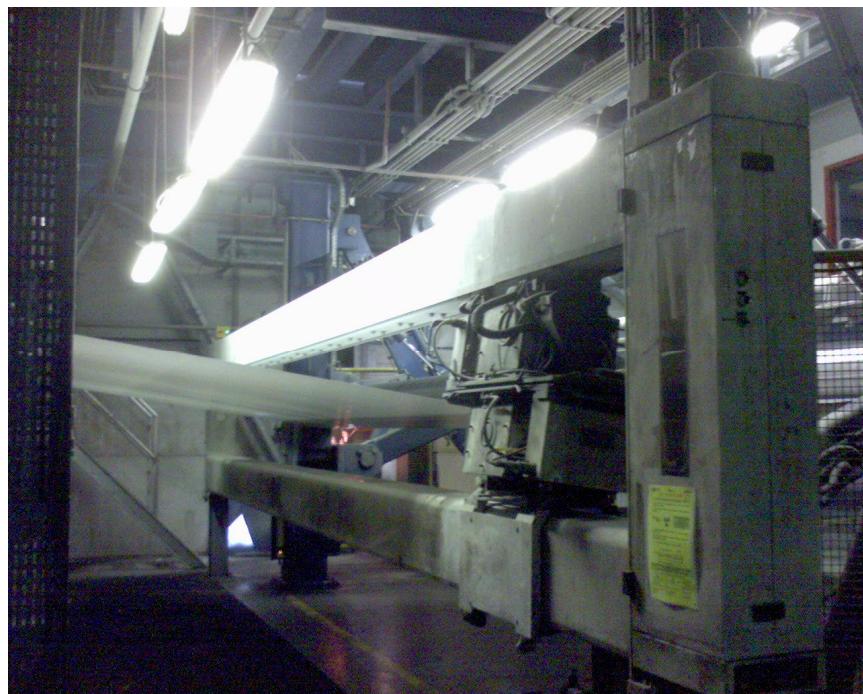


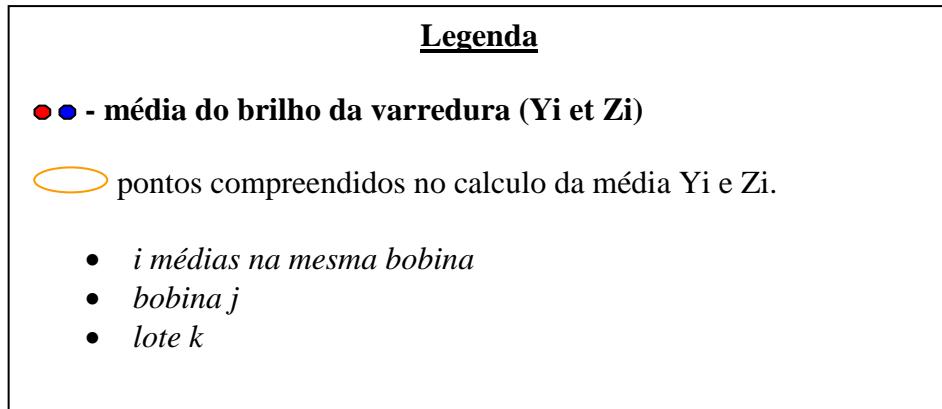
Figura 17: O scanner da *calandra*

Fonte: foto tirada pelo autor

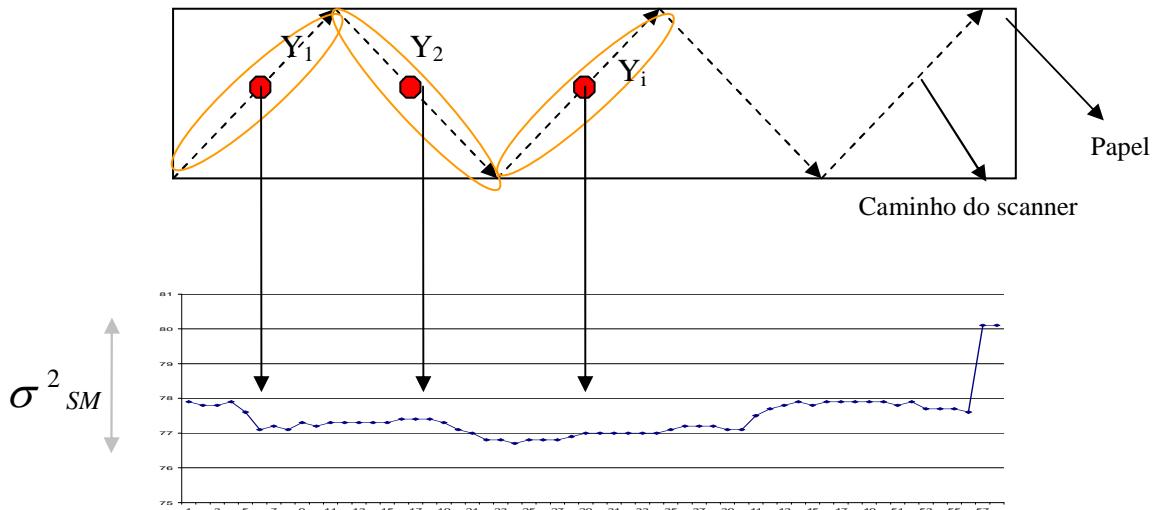
4.2.1. Seu funcionamento

Antes de tudo, é necessário explicar como o scanner realiza as medidas do brilho para entender como os dados obtidos podem ser usados e trabalhados. Enquanto a *calandra* funciona e dá o brilho ao papel até uma velocidade de 700m/min., um scanner varre a largura do papel. O brilho é medido através do scanner de modo contínuo que emite um feixe luminoso na superfície do papel e um receptor recebe o feixe luminoso refletido pela superfície do papel e mede a sua intensidade. Este então resulta na medida do brilho do papel. Maior a intensidade de recepção, maior será o valor do brilho medido.

Os seguintes gráficos mostram qual o caminho que o scanner passa pelo papel e quais pontos são medidos:



Sentido Marcha (SM)



Sentido Traverso (ST)

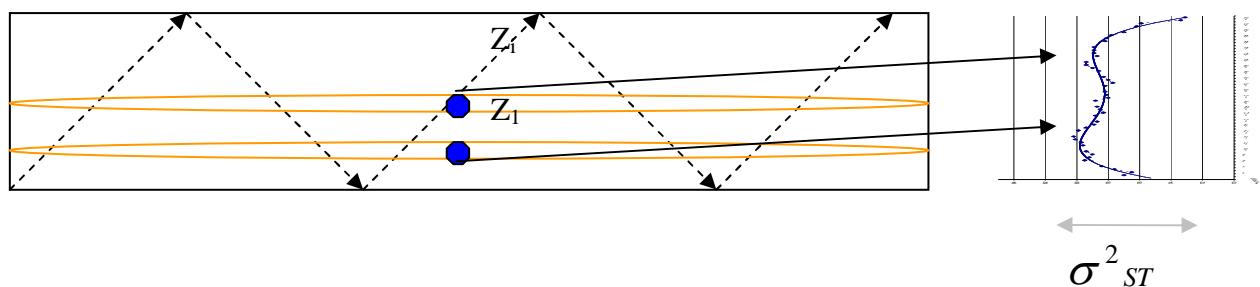


Gráfico 10 : Evolução (ST) e Peril sentido traverso (ST) do brilho

Fonte: elaborado pelo autor

Tomando a média de cada varredura (Y_i ou Z_i), nós temos acesso aos gráficos da *evolução do brilho* (Sentido Marcha) e do *perfil do brilho* (senso transverso) e também das suas variâncias.

$$\sigma^2_{ST} = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1} \text{ e } \sigma^2_{SM} = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}$$

A média da média de cada varredura, medida em uma bobina inteira de papel, representa o brilho médio do rolo, logo: $\frac{\sum Z_i}{n} = \bar{Z} = \bar{Y} = \bar{X}_{jk}$; ou seja \bar{X}_{jk} , “brilho médio da bobina j do lote k ”.

4.3. Cpk e Cp do Brilho do 8CASF115

As especificações para o *Brilho* dos produtos *Gloss* da linha 8 são as mesma para todas as gramaturas, e também para os lados do papel. O *Brilho*: 75 +/- 5. Essa medida segue a norma TAPPI T-480 e é medido em porcentagem.

Na tabela a seguir, as medidas Cpk e Cp para o produto gloss da linha 8 (8CASF115), de janeiro até maio de 2006.

8CASF115 - Brilho Tela							
Mês	Média.	sigma	LI	Obj.	LS	Cp	Cpk
jan 06	77,4	2,2	70	75	80	0,77	0,41
fev 06	77,1	2,0	70	75	80	0,82	0,47
mar-06	77,2	2,1	70	75	80	0,78	0,44
abril 06	77,7	2,2	70	75	80	0,76	0,35
maio 06	77,9	2,3	70	75	80	0,72	0,30

Tabela 9: Cp e Cpk brilho tela

Fonte: Relatório Mensal de Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor

8CASF115 - Brilho Feltro							
Mês	Média	Sigma	LI	Obj.	LS	Cp	Cpk
jan 06	76,0	2,0	70	75	80	0,83	0,67
fev 06	75,9	2,0	70	75	80	0,82	0,67
mar-06	76,2	2,3	70	75	80	0,72	0,54
abril 06	76,3	2,3	70	75	80	0,74	0,55
maio 06	76,4	2,2	70	75	80	0,74	0,54

Tabela 10: Cp e Cpk brilho feltro

Fonte: Relatório Mensal de Qualidade Condat, traduzido e adaptado pelo autor

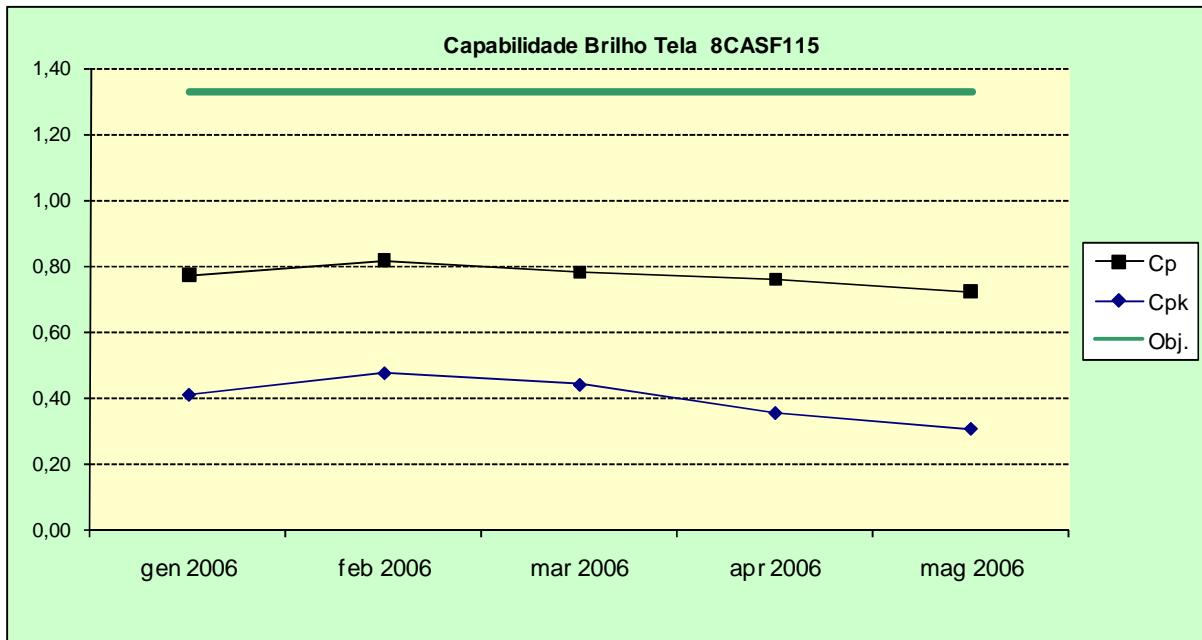


Gráfico 11: Cp e Cpk brilho tela

Fonte: elaborado pelo autor

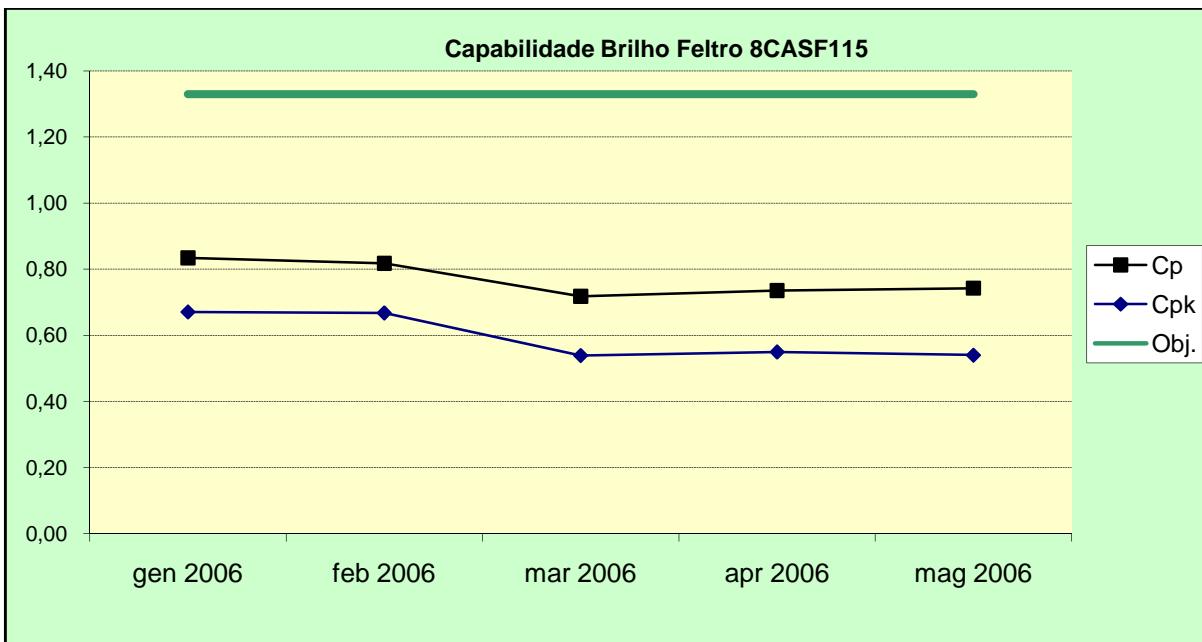


Gráfico 12: Cp e Cpk brilho filtro

Fonte: elaborado pelo autor

Logo de início vemos que o produto não está no nível desejado de Cpk de 1,33 para nenhum dos lados. Os Cps apresentam valores muito parecidos, indicando que a variabilidade é da

mesma ordem de grandeza. Os indicadores Cpk, sendo menores que os Cps, indicam que o lado *Tela* se encontra mais descentrado que o lado *Feltro*. Logo, além da descentragem, existe uma diferença de brilho entre os lados.

Analizando em termos de média, limites de tolerância e desvio-padrão, obtemos os seguintes gráficos:

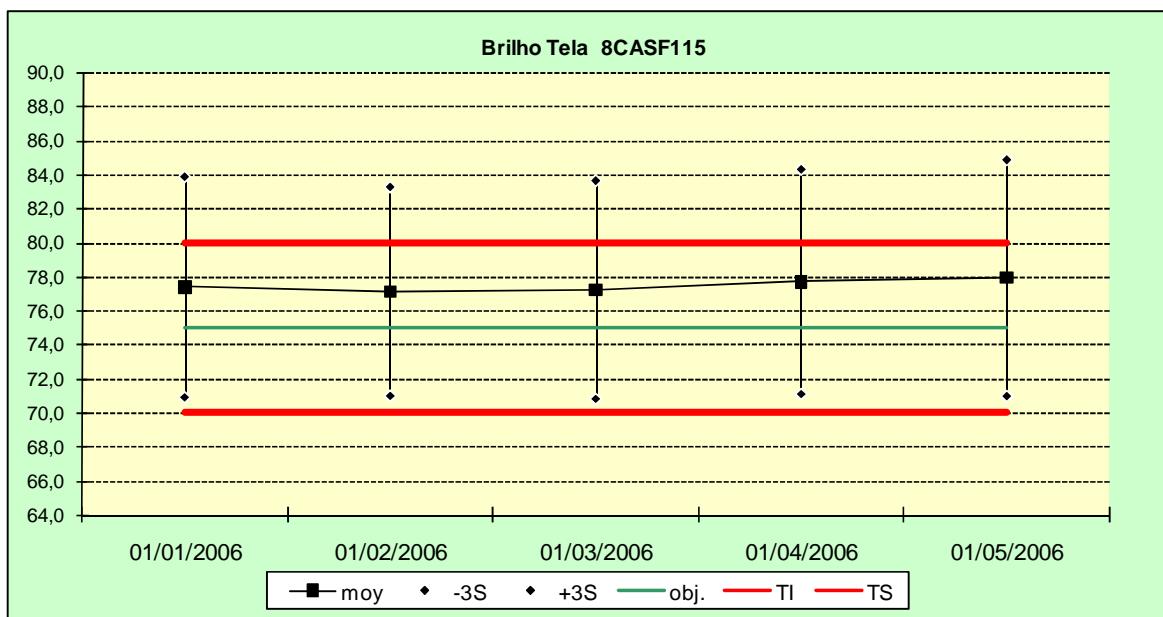


Gráfico 13: Brilho Tela, Média e sigma

Fonte: elaborado pelo autor

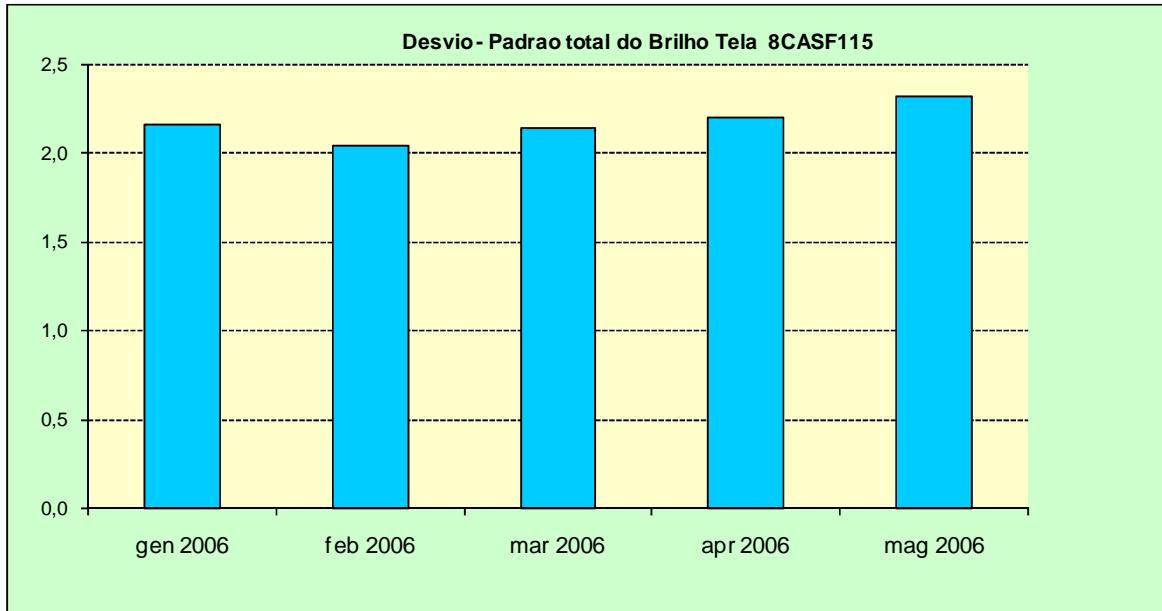


Gráfico 14: Brilho tela sigma

Fonte: elaborado pelo autor

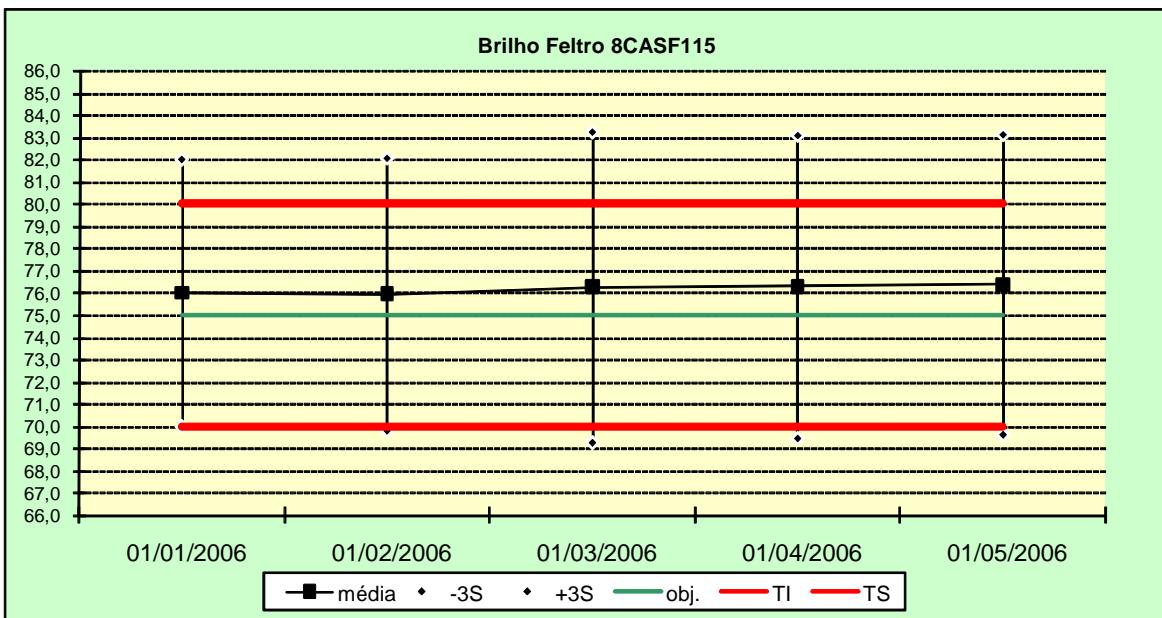


Gráfico 15: Brilho filtro, média e sigma

Fonte: elaborado pelo autor

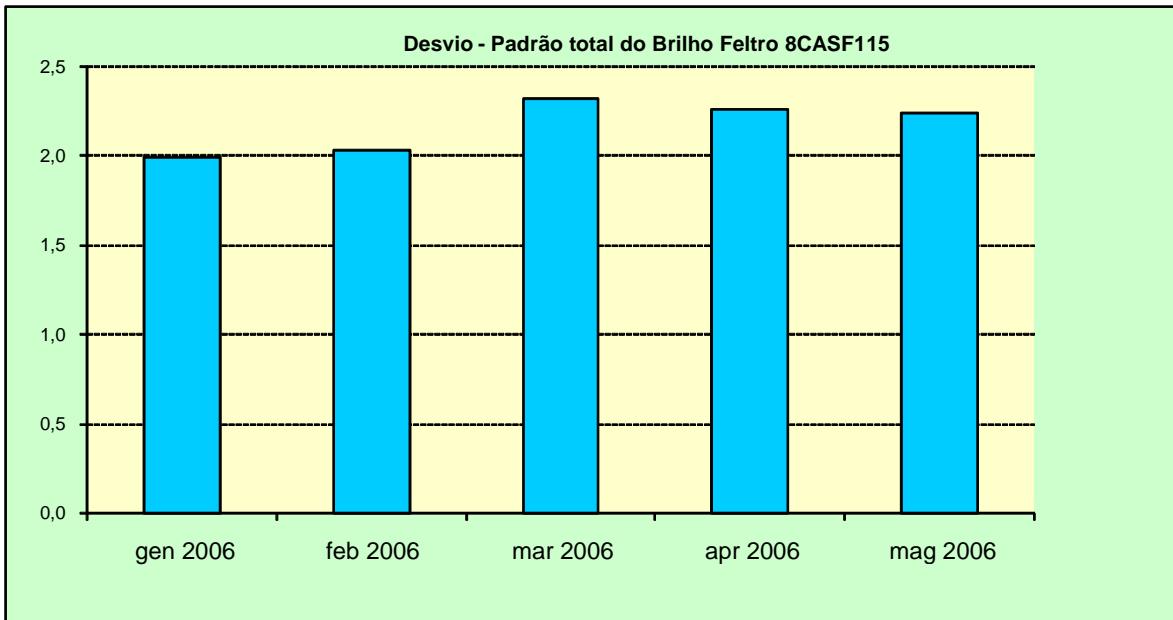


Gráfico 16: Brilho feltro, sigma

Fonte: elaborado pelo autor

Vemos através dos gráficos que a variabilidade do brilho do papel é realmente muito grande, fazendo com que $+\/- 3$ sigmas resultem em um intervalo maior que o intervalo de tolerância. Além do mais, vemos que o brilho do papel está excessivo para os dois lados. Em média 76 para o *lado feltro* e 78 para o *lado tela*.

O gráfico a seguir representa muito bem o comportamento do brilho:

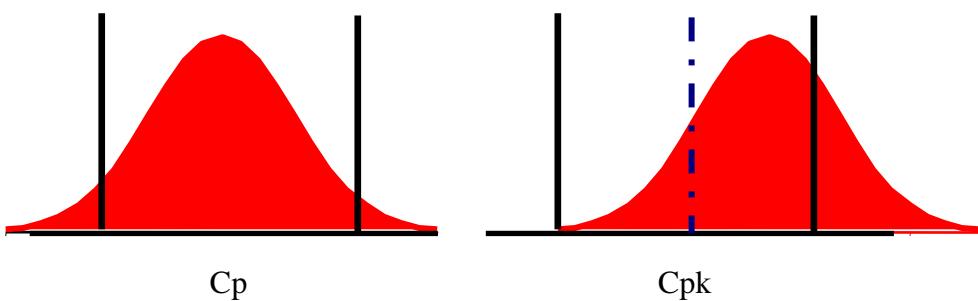


Figura 18 : Comportamento do Cp e Cpk

Fonte: PILLET (2003). Traduzido e adaptado pelo autor

Ou seja, a variabilidade do brilho é tão grande que a variação é maior do que o intervalo de tolerância. E para piorar a situação, o processo se encontra descentralizado.

4.4. Estudo da Variabilidade do Brilho

Graças ao scanner instalado na *calandra* e ao banco de dados da CONDAT, foi possível seguir o comportamento do brilho do papel em diversas fabricações e lotes.

4.4.1. Variabilidade do Brilho no Sentido Marcha

Traçando o gráfico da evolução de *Brilho* (Sentido marcha) das bobinas mais significantes fabricadas entre o mês de janeiro e maio de 2006, obtemos o Gráfico 17.

Analizando com cuidado os dados registrados, constatamos que existem diferentes fenômenos que ocorrem entre as diferentes bobinas:

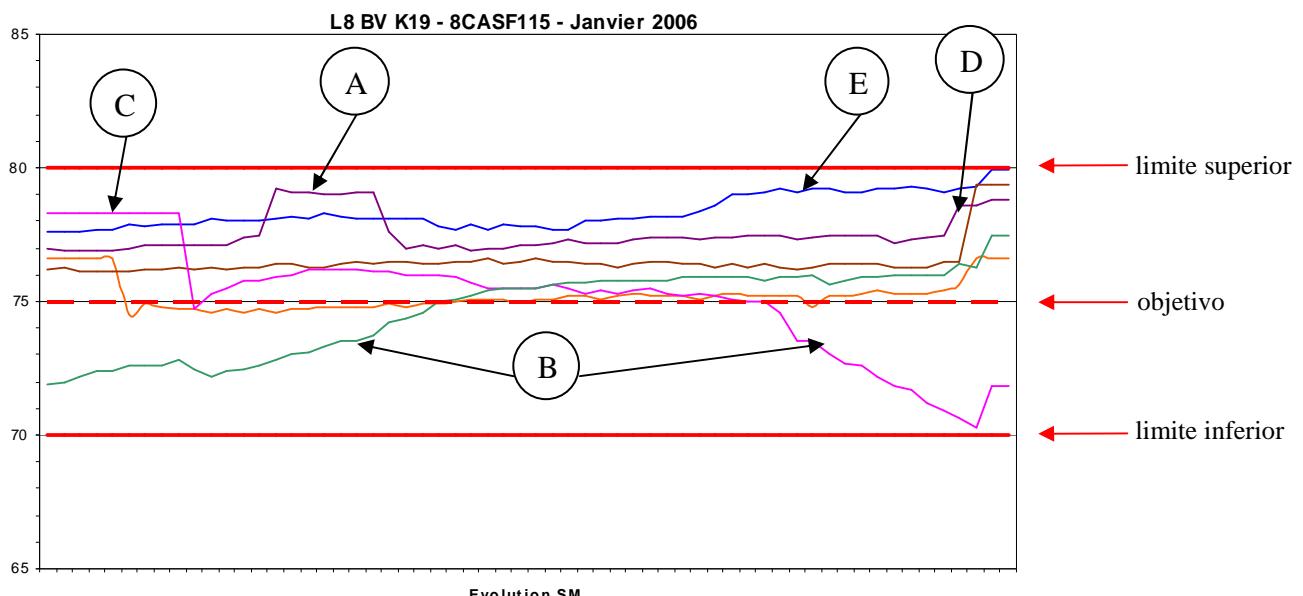


Gráfico 17: Variação do brilho sentido marcha (SM)

Fonte: elaborado pelo autor

A: redução da velocidade por defeito: a *calandra* deve diminuir a velocidade para facilitar a passagem de uma colagem ou uma brecha. A mudança do brilho é devido à mudança de velocidade.

B: fase de transição : A tecnologia de suprimento do revestimento não é totalmente adequada, o que significa que a cada mudança de produto, ocorre uma poluição deste revestimento. A primeira e última bobina da fabricação são afetadas por esta poluição.

C: arranque da *calandra* : O aumento da velocidade necessita um certo tempo. Observamos que o brilho diminui gradualmente conforme a velocidade aumenta.

D : parada da *calandra* : paralelamente, observamos o fenômeno inverso quando a *calandra* diminui sua velocidade até parar. (diminuição da velocidade, aumento do brilho)

E : regime estável

4.4.2. *Variabilidade do Brilho no Sentido Traverso*

No gráfico a seguir, está representado o perfil do papel para o 8CASF115 sob condições normais de fabricação. Notamos que existe muita variabilidade, principalmente devido à queda de brilho nas bordas do papel, formando assim um “W” invertido.

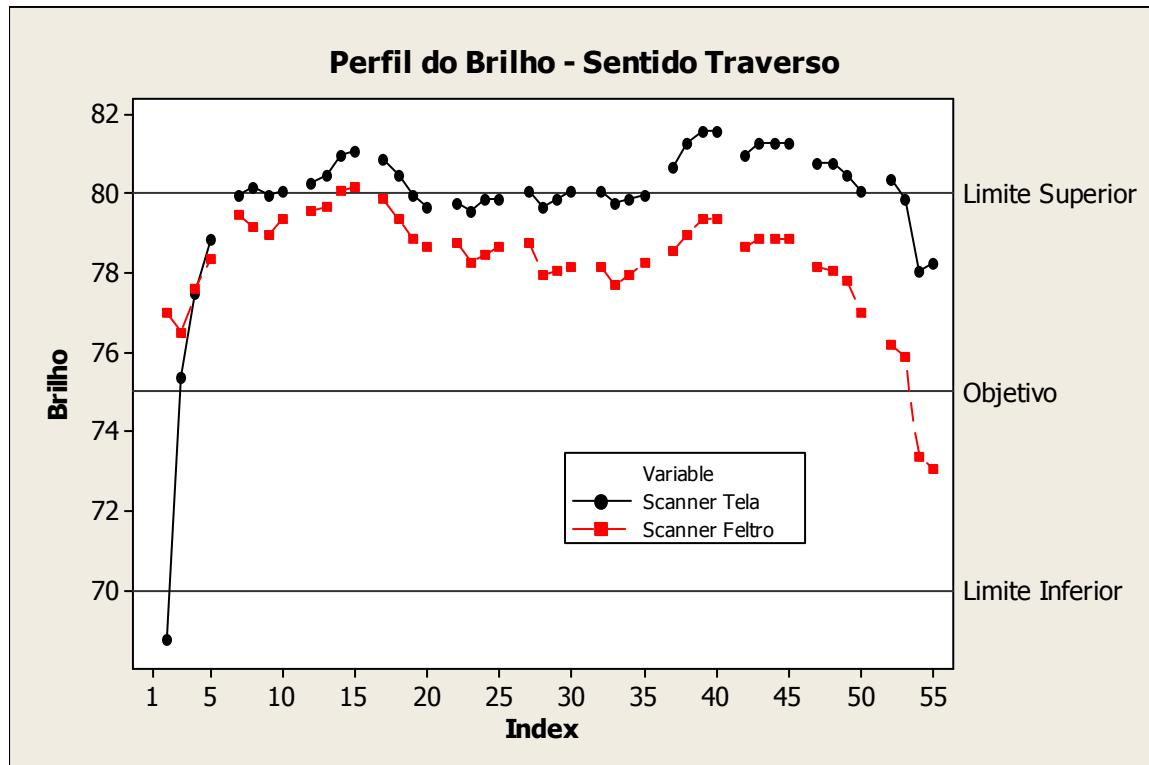


Gráfico 18: variação do brilho sentido traverso (ST); perfil do brilho

Fonte: elaborado pelo autor

4.4.3. Variabilidade do Brilho entre bobinas e entre lotes

No gráfico a seguir, cada ponto representa o brilho médio de uma bobina fabricada do mês de janeiro de 2006. Cada conjunto de pontos representa um lote diferente. Os círculos vermelhos representam as bobinas de transição, ou seja, as primeiras bobinas de cada lote. As bobinas não chegam necessariamente na ordem de fabricação na *calandra*, pois existe um pequeno estoque intermediário precedente e posterior ao processo de calandragem.

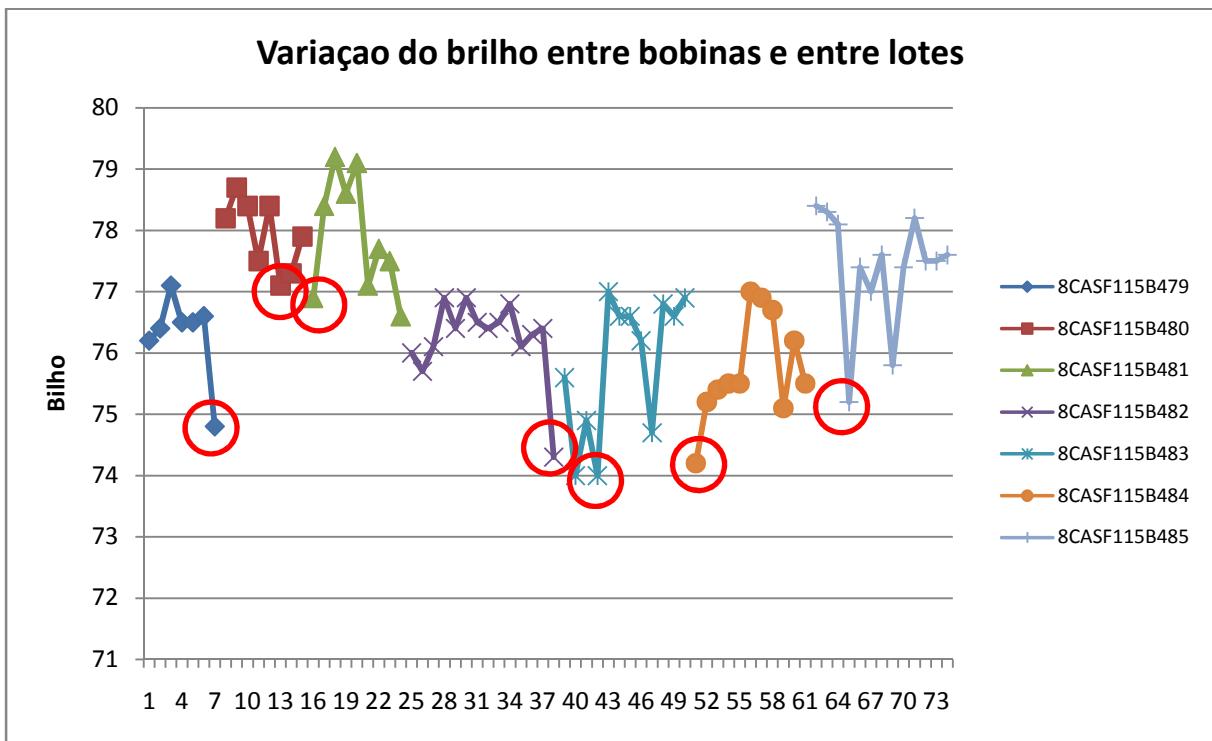


Gráfico 19: variação do brilho tela entre lotes e fabricações

Fonte: elaborado pelo autor

Podemos notar que existe uma variabilidade grande entre as bobinas do mesmo lote e também uma grande diferença de brilho entre lotes diferentes. As bobinas de transição também trazem grande variabilidade do processo, sendo sempre menos brilhantes que o resto do lote.

Uma análise ainda mais profunda me permitiu constatar que a *variabilidade total* do papel recebida pelo cliente possui quatro componentes diferentes:

Variabilidade total do papel (σ^2_{tot}):

- Variabilidade no sentido transverso do papel (σ^2_{ST});
- Variabilidade sentido marcha do papel (σ^2_{SM});
- Variabilidade entre bobinas diferentes (σ^2_{bob});
- Variabilidade entre diferentes lotes (fabricações) (σ^2_{fab}).

4.4.4. Decomposição da variabilidade

Utilizando as informações do banco de dados da Condat desde outubro de 2005 até maio de 2006, reuniu-se informações sobre 534 bobinas do papel tipo 8CASF115.

Com a ajuda de Jean-Paul Lavaud, responsável pela publicação dos indicadores Cpk e de toda a base estatística de Condat, foi possível decompor a variabilidade total do papel nos seus quatro componentes distintos, nós podemos estimar o peso de cada fonte de variabilidade no produto final. O mesmo cálculo foi realizado retirando-se as bobinas de transição (*primeira bobina do lote*) para podermos estimar o peso dessas bobinas na variabilidade total.

Brilho Tela - Desvio Padrão		
	Com Transição	Sem Transição
SM	0,66	0,56
ST	1,78	1,77
	1,89	1,86
Bob	0,88	0,68
FAB	0,92	0,97
	1,27	1,19
Total	2,28	2,21

Tabela 11: Brilho Tela - Desvio Padrão

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

Brilho Feltro - Desvio Padrão		
	Com Transição	Sem Transição
SM	0,71	0,61
ST	1,58	1,58
	1,74	1,70
Bob	0,96	0,75
FAB	1,01	1,09
	1,39	1,32
Total	2,23	2,15

Tabela 12: Brilho Feltro – Desvio Padrão

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

Brilho Tela - Variância		
	Com Transição	Sem Transição
SM	0,43 (8%)	0,31 (6%)
ST	3,16 (61%)	3,15 (65%)
	3,59 (69%)	3,46 (71%)
Bob	0,77 (15%)	0,47 (10%)
FAB	0,85 (16%)	0,94 (19%)
	1,62 (31%)	1,41 (29%)
Total	5,21 (100%)	4,9 (100%)

Tabela 13: Brilho Tela – Variância

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

Brilho Feltro - Variância		
	Com Transição	Sem Transição
SM	0,51 (10%)	0,37 (8%)
ST	2,51 (51%)	2,51 (54%)
	3,02 (61%)	2,88 (62%)
Bob	0,91 (18%)	0,56 (12%)
FAB	1,03 (21%)	1,19 (26%)
	1,94 (39%)	1,75 (38%)
Total	4,96 (100%)	4,6 (100%)

Tabela 14: Brilho Feltro – Variância

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

$$Transição = \frac{(4,9 - 4,96)}{4,96} = -6\%$$

$$Transição = \frac{(4,6 - 4,96)}{4,96} = -7\%$$

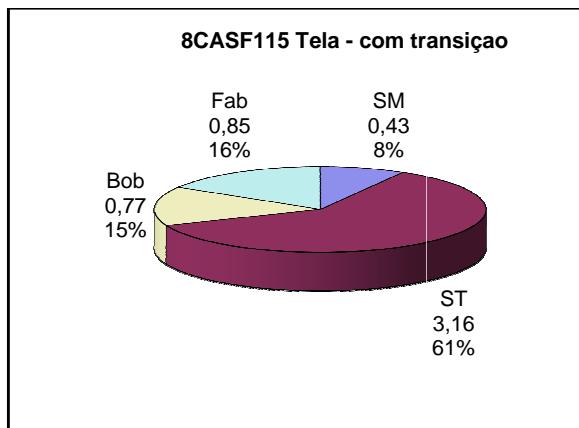


Gráfico 20: Brilho Tela com transição

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

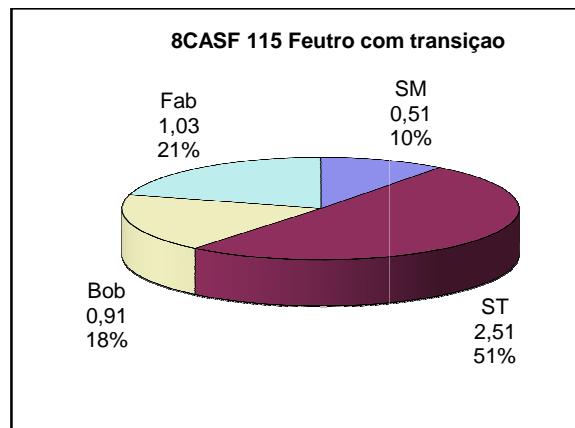


Gráfico 21: Brilho Feltro com transição

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

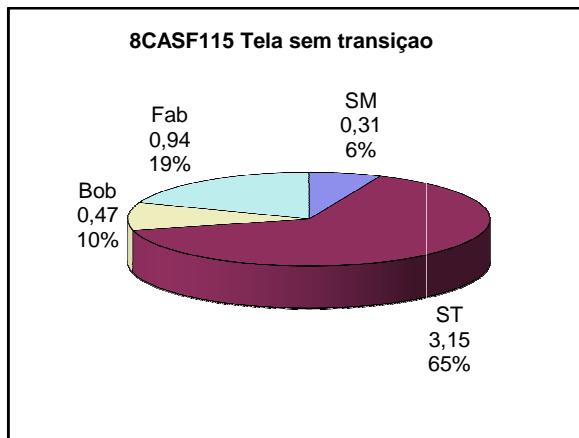


Gráfico 22: Brilho Tela sem transição

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

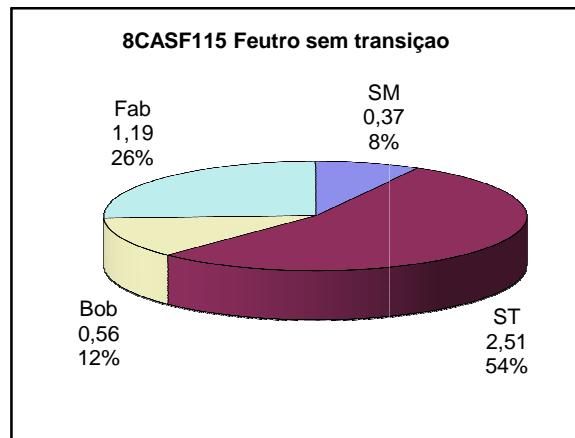


Gráfico 23: Brilho Feltro sem transição

Fonte: Elaborado pelo autor e Lavaud

Análise dos resultados

- *ST* - A variabilidade provinda do sentido transverso (*perfil*) representa mais da metade da variabilidade total;
- *SM* - A variabilidade sentido marcha é menos significativa (10 %);
- *BOB e FAB* - A variância entre bobinas e entre fabricações (lotes) representam 30% tela e 40% feltro da variabilidade total. Elas provêm do modo de condução da *calandra*, mas também da variabilidade da matéria prima e também da variabilidade criada pelas máquinas anteriores ao processo.

As bobinas de transição afetam notavelmente a variabilidade *SM* como também a variabilidade entre as bobinas *BOB*.

4.5. Projetos Existentes

Existem alguns projetos já em curso na Condat que visam a redução da variabilidade. Uma vez realizada essa análise de variabilidade, podemos correlacionar os projetos existentes com os diferentes tipos de variabilidade:

- (σ^2_{ST}) O projeto « *NIPCO* » busca uma melhor gestão do perfil de pressão aplicado a *calandra*, permitindo a diminuição da variabilidade do brilho ao longo do perfil do papel;
- (σ^2_{SM}) , (σ^2_{bob}) e (σ^2_{fab}) O projeto « *variabilidade matérias primas* » tem como objetivo repassar a mesma filosofia do CEP e dos indicadores Cpk aos fornecedores de matéria prima.
- (σ^2_{SM}) , (σ^2_{bob}) e (σ^2_{fab}) O projeto « *troca de revestimento* » visa limitar a poluição no líquido de revestimento do papel durante a fase de transição entre um produto e outro.
- (σ^2_{SM}) , (σ^2_{bob}) e (σ^2_{fab}) O projeto « *cascata de procedimentos* » busca padronizar o modo operatório dos condutores da *calandra*.

4.6. Meu projeto: Cascata de procedimentos

À CONDAT, existem cinco turnos diferentes que trabalham de modo alternado permitindo a fabricação do papel de modo contínuo (24 h por dia, sete dias por semana).

Analizando o enorme banco de dados gerados e registrados pelos scanners, as fontes de variações do brilho foram determinadas. Em seguida, realizando entrevistas com os operadores das máquinas de todos os turnos, e também procedimento de condução, criou-se uma lista de ações de operação durante o funcionamento normal e transitório, para cada equipe, para melhor entender os motivos dessas variações.

Uma vez o problema resolvido, uma etapa de continuidade assegurará que “as boas práticas” são bem seguidas pelos operadores

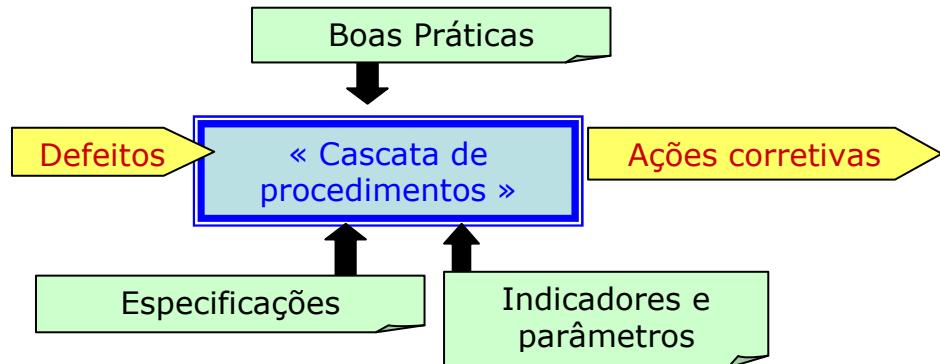


Figura 19: Cascata de procedimentos

Fonte: documento interno Condat

4.6.1. Iniciativa Participativa com os operadores

O operador é a peça chave de um projeto como tal, é indispensável a plena integração a fim de conhecer a sua opinião e o seu modo de conduzir a máquina. Além disso, sua experiência do ofício constitui sempre uma fonte preciosa de informação.

Nesta fase preliminar, foi necessária minha presença constante no chão de fábrica, interrogando os diversos operadores das diversas equipes para poder estudarmos juntos, os seus modos de condução:

- as suas alavancas a disposição
- os seus limites de atuação
- o impacto sobre o brilho (quantitativamente)
- impacto sobre outras características do papel (espessura, lisura, umidade).

Esta etapa não é das mais simples, e requer muita paciência e tempo para acompanhar o dia a dia dos operadores. Na realidade, para que a iniciativa participativa se desenrole nas melhores condições é preciso criar uma relação de confiança com os operadores, ainda mais que no início do trabalho, somos vistos como “desconhecidos”. Por isso é indispensável uma apresentação pessoal, do projeto e o objetivo. Apesar disso, nem sempre encontramos as respostas para todas as nossas perguntas.

Devemos começar freqüentemente pelas questões mais insignificantes, até as mais determinantes como, por exemplo: o “modus operandi” dos trabalhadores, que na maioria das vezes é diferente da “ficha de operação padrão”.

Criadas as condições de comprometimento com o projeto, os operadores darão o retorno necessário para um resultado positivo.

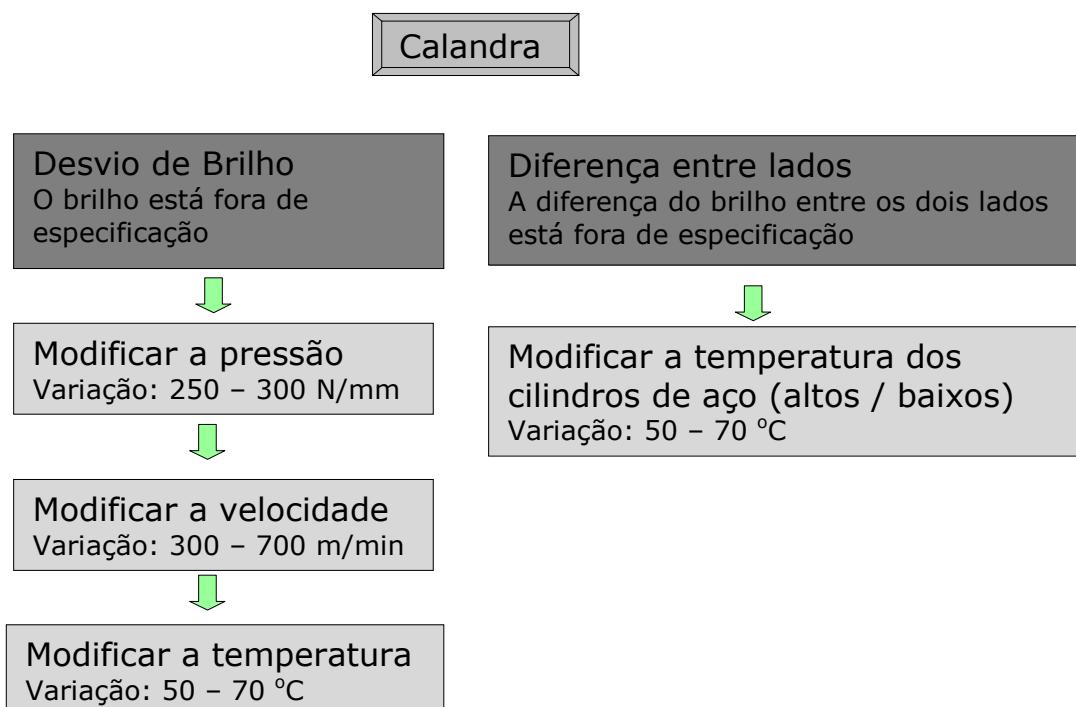


Figura 20: Conduta da calandra

Fonte: elaborado pelo autor

Depois de interrogar a totalidade das equipes e operadores, foi possível juntar a informação seguinte na “Figura 20: Conduta da calandra”. Importante notar que a figura a seguir é um

“resumo” do modo de operação, e o detalhe mais importante, é que os operadores não seguem a “ficha de operação padrão” e que nenhum deles sabe responder a seguinte questão: “Qual a influência de cada fator (velocidade, pressão...) sobre o brilho BV de modo qualitativo?”. Os operadores não dominam completamente o impacto de cada fator sobre o nível de brilho BV, e segundo a minha opinião e do grupo de trabalho, este é o *ponto chave* para toda padronização de boas práticas para a condução de uma máquina.

A condução da *calandra* é atualmente “aproximada” e os operadores têm como objetivo permanecer dentro da faixa de especificação esquecendo completamente o aspecto da centragem sobre o valor objetivo do brilho. Mesmo porque, a mudança de um fator como velocidade e pressão leva um tempo considerável e ainda mais a mudança de temperatura. Logo, uma correção de um operador demora minutos para ser concretizada. Se essa correção não for feita corretamente da primeira vez, pode gerar muita variabilidade na fabricação daquela bobina.

Este modo de operação deve ser melhorado para responder as exigências de um World Class Manufacturing.

4.6.2. *A falta de dados existentes*

Para permitir que todos os operadores trabalhem com uma mesma base comum, é necessário primeiramente estabelecer um modelo estatístico para entender como varia o brilho da máquina em função da pressão, velocidade, etc... com a ajuda do software “statgraphics”. Esta pista havia sido sugerida pelo responsável pela linha de produção 8, ao longo de uma das numerosas reuniões do grupo de trabalho do projeto “melhoria das capacidades”.

Após um estudo da base de dados disponível, foi verificado que as informações presentes eram insuficientes para essa abordagem estatística. O problema é que a temperatura e a pressão da *calandra* não são registradas sistematicamente no banco de dados, logo não existem dados suficientes para a determinação de um modelo.

5. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

5.1. Delineamento de Experiência na *Calandra*

Como visto na parte “4.4 Estudo da Variabilidade do Brilho”, 40 % do problema da variação provém de uma falta de regularidade entre as diferentes bobinas (inter e intra fabricação). Isto porque a condução da máquina não é feita de maneira a buscar o brilho objetivo, mas, sobretudo buscando permanecer no interior das especificações, logo uma grande variabilidade. Nenhuma pessoa na verdade conhece de maneira quantitativa o impacto real de cada parâmetro (pressão, velocidade, temperatura) sobre o brilho. Além disto, o tempo de estabilização do brilho depois de uma mudança de velocidade é significativo. É por esta razão que a condução buscando o brilho objetivo não é feita, pois consome muito tempo.

É possível remediar esta situação graças a um modelo matemático preditivo que permitirá saber como regular os parâmetros em função do nível de brilho BV necessário. Vejamos de maneira simplificada o impacto de tal projeto.

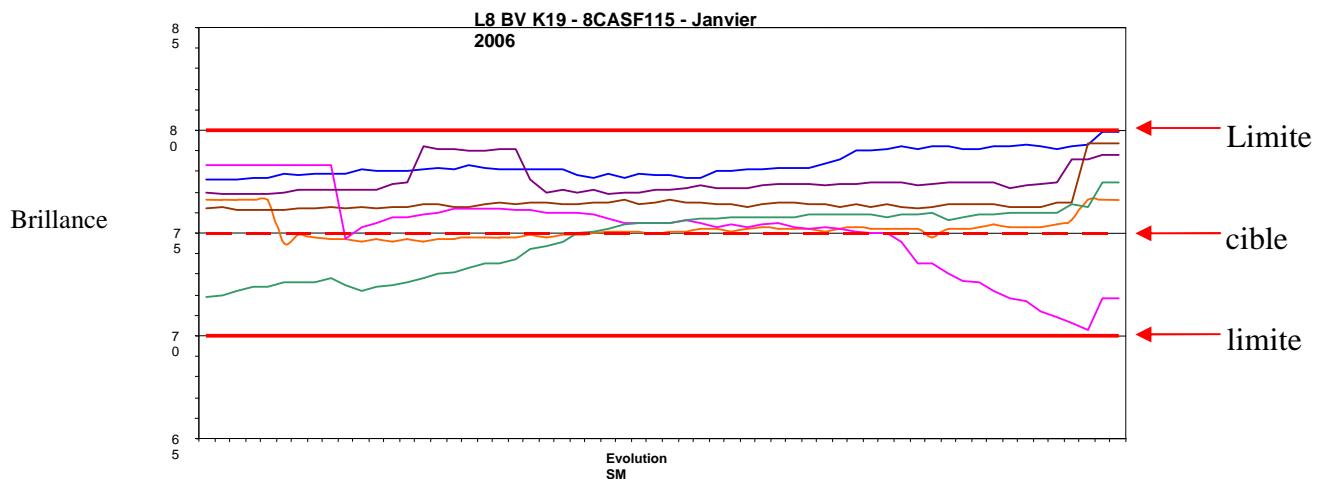


Gráfico 24: Evolução do brilho, situação atual

Fonte: elaborado pelo autor

A variabilidade é importante, 5 a 6 pontos de diferença de brilho entre o mínimo e o máximo.

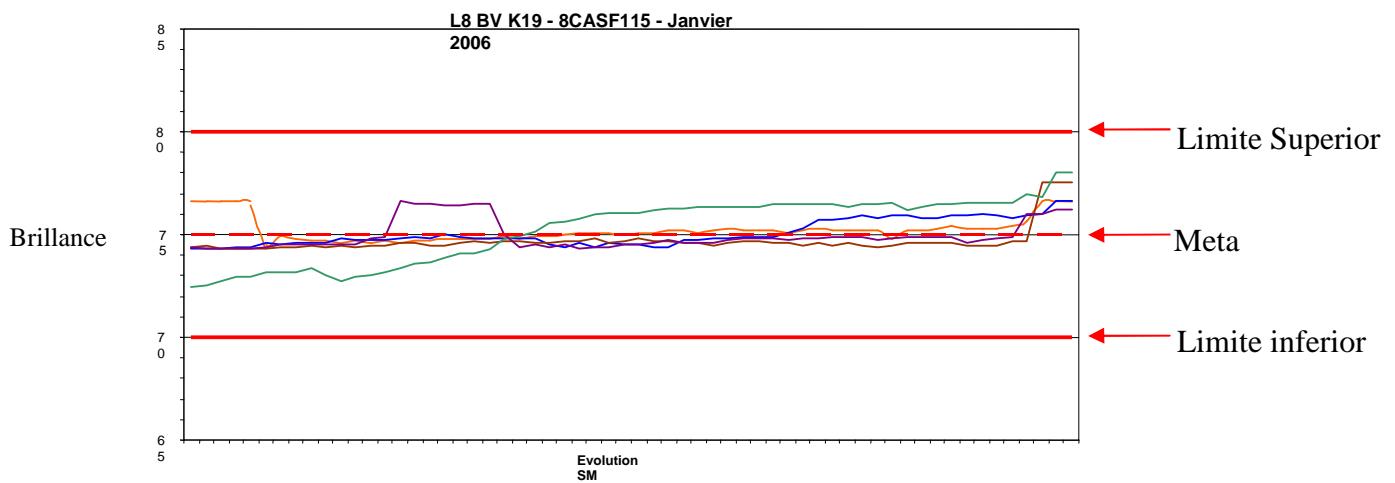


Gráfico 25: Evolução do brilho, situação futura

Fonte: elaborado pelo autor

A variabilidade é atenuada e não existe mais do que um ponto de diferença de brilho entre os extremos.

Segundo as diretrizes apresentadas no capítulo da *Revisão Bibliográfica*, foi realizado um *Delineamento de Experimentos*. A seguir é apresentado passo-a-passo a aplicação desta metodologia.

5.2. Reconhecimento e indicação do problema

Esta etapa já foi realizada na *Análise da Situação atual*, mais especificamente no item “4.6 *Meu projeto: Cascata de procedimentos*”. Os operadores precisam de uma ferramenta capaz de fornecer-lhes informações sobre os efeitos da mudança nos fatores *pressão*, *velocidade* e *temperatura*.

5.3. Seleção da variável de resposta

Conforme o item “2.6 *Escolha do parâmetro a ser detalhado*”, o objeto de estudo é o Brilho do papel logo a variável de resposta a ser estudada é o brilho do papel (*Brillance Vierge BV*).

5.3.1. *Validação do sistema de Medição*

O Delineamento de Experimentos é baseado na condução da *calandra*, logo nas ferramentas de controle que os condutores possuem na cabine de condução, ou seja, as medidas fornecidas pelo scanner contínuo.

Havia um boato de que o perfil do brilho do papel obtido pelo scanner não era realidade, porque a folha de papel rolando 700 m/min. vibra nas bordas, e acreditava-se que o scanner não media corretamente o brilho do papel nas partes mais externas, logo foi decidido que esse perfil deveria ser verificado que representa bem a realidade. Para isso, foi necessário proceder da seguinte maneira.

- Tomada de amostras da *calandra*;
- Análise dos resultados, comparando os valores do Scanner e do laboratório;
- Validação dos resultados;

A amostragem foi realizada da seguinte maneira:

- Ao longo da calandragem, uma vez que o regime estava estável, a marcação de várias espiras foi efetuada na borda do papel;
- Quando a bobina passava pela *refendeuse* (máquina de cortar a bobina mãe em bobinas menores), a fabricação era parada, a amostra devidamente marcada foi recuperada e o papel recolado para a continuação do processo de produção.
- Uma série de medidas (perfil do brilho, espessura e lisura) foram medidas no laboratório usam um aparelho manual devidamente calibrado e outro automático.
- Paralelamente, o perfil médio dada pelo scanner no momento da marcação foi recuperado para a comparação com os dados do laboratório.

Os resultados são os seguintes:

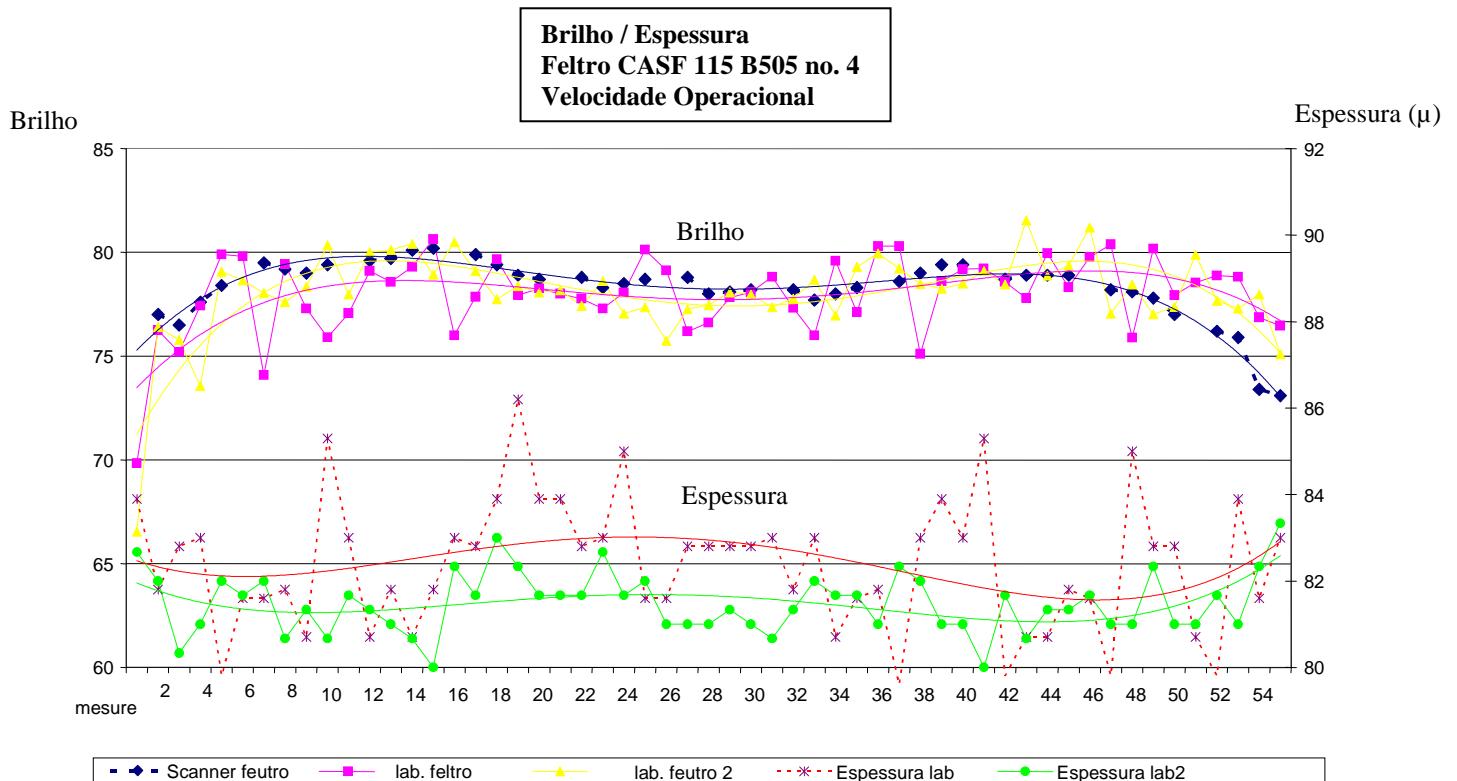


Gráfico 26: Comparação dos dados scanner / laboratório

Fonte: elaborado pelo autor

Constatamos no gráfico acima que o perfil do scanner (*jauge*) e os dois do laboratório (*paperlab*) seguem a mesma tendência e que a queda de brilho nas bordas percebida pelo scanner também é percebida pelo laboratório. A curva azul representa o scanner, enquanto que a curva amarela e a rosa representam o laboratório.

No processo da calandragem, para tornar o papel brilhando, este é submetido à pressão e à temperatura, logo ocorre um esmagamento do papel quando esse passa pelos cilindros feitos de aço e de papelão. Quanto ao perfil de espessura, este confirma que as medidas do brilho são coerentes uma vez que apresenta um perfil inverso, ou seja, as bordas e o centro mais espessos, logo menos brilhantes.

Sua reproduzibilidade: Gage R&R

É indispensável conhecer o nível de Gage R&R. Elas foram testadas preliminarmente para conhecer as suas reproduzibilidades ainda que as suas repetibilidades.

Gage R&R:

	Desvio-Padrão Reprodutibilidade	Tolerâncias Comerciais	Gage R&R
Brilho Tela	0,60	± 5	0,31
Brilho Feltro	0,65	± 5	0,33

Tabela 15: Resultados do Gage R&R

Fonte: Documento interno, Jean-Paul Lavaud do departamento de qualidade da Condat(2005), traduzido e adaptado pelo autor

Os resultados do teste Gage R&R apontam que os scanners estão no limite da capacidade permitida, mas por razões de facilidade de utilização e número de medidas, o grupo de trabalho decidiu validar a utilização deste aparelho como fonte de dados para a análise.

Variabilidade Relativa

Um indicador análogo ao Gage R&R que pode ser utilizado, é a razão da variabilidade do scanner em relação à variabilidade total do processo. O sistema de medição não deve apresentar uma variação grande demais, pois ele esconderia os efeitos dos fatores reais (velocidade, pressão, temperatura)

$$\% \text{ confiabilidade} = \frac{\sigma_{MS}}{\sigma_{Total}} \times 100$$

σ_{MS} = desvio padrão do sistema de medição

σ_{Total} = desvio padrão total do processo

Consideramos que se a% confiabilidade é inferior a 30%, o scanner é suficientemente confiável para a utilização da experiência.

A estimativa do % confiabilidade sobre um período de um ano é igual a 27 % no lado feltro, e 30% no lado da tela.

Conclusão, os dados obtidos pelo scanner são validos.

5.4. Escolha dos fatores e seus níveis

5.4.1. Fatores

Para melhor entender o processo de calandragem, entrei em contato com o professor M. Didier CHAUSSY professor da *Ecole Française de Papeterie et des industries Graphiques (EFPG)*, (Escola Francesa de Papelaria e Indústria Gráfica) e um membro do *Centre Technique du Papier* (Centro Técnico do Papel), Sr. David GUERRIN (especialista na máquina de calandragem).

Segundo eles, em relação aos procedimentos de calandragem, os fatores principais que influenciam no brilho na calandragem é naturalmente *a pressão, a velocidade, temperatura e a gramatura*, ou melhor, da quantidade de revestimento depositado no papel.

Das informações recolhidas ao longo da iniciativa participativa com os operadores, os fatores que segundo eles influenciam no brilho eram novamente *a pressão, velocidade, temperatura e a gramatura*.

Reunindo o grupo de trabalho decidiu-se a realização de um experimento com três fatores (*pressão, velocidade, temperatura*), pois um experimento deste tipo nunca havia sido feito na fábrica, logo não era conhecida a quantidade de recursos que seriam necessários para realização do estudo com quatro fatores. Caso esse plano de experimentos fosse bem sucedido, o plano de experiência poderia ser futuramente expandido para quatro fatores, acrescentando-se o fator *gramatura*, com adição de mais alguns experimentos. A gramatura deste primeiro experimento seria a de 115 g/m², que é mais produzida na linha 8, enquanto que a gramatura de 90 g/m² poderia ser estudada futuramente expandindo o delineamento de experimentos.

5.4.1. Níveis

Recordando o item “4.6.1 Iniciativa Participativa com os operadores” e a Figura 20: Conduta da *calandra*, que retrata os máximos e mínimos globais dos níveis dos parâmetros utilizados nas diferentes equipes para todas as diversas gramaturas, determinou-se os níveis a serem experimentados no delineamento de experimentos.

Fatores	Nível Baixo (-)	Nível Alto (+)	Unidades
Gramatura	90 (futuro)	115	g/m ²
Temperatura	50	70	°C
Pressão	250	300	kN/m
Velocidade	300	700	M/min.

Tabela 16: Recapitulação dos fatores e dos níveis

Fonte: elaborado pelo autor

Logo, o experimento será realizado utilizando-se a gramatura 115 g/m², variando a *temperatura* entre 50 °C e 70 °C, *pressão* entre 250 kN/m e 300 kN/m e a *velocidade* entre 300 m/min. e 700 m/min.

Importante lembrar que para a gramatura 115 g/m², os operadores não necessariamente utilizam esta faixa de variação para os três parâmetros. Esta é a faixa de operação global para todas as gramaturas para todas as equipes. Foi determinada a utilização desta maneira para que os dados pudessem ser utilizados futuramente no estudo com o 4º. Fator, a *gramatura*.

5.5. Escolha do delineamento experimental

Existe uma enorme quantidade de delineamentos de experiência diversos, cada um com o seu propósito. Decidi juntar as informações obtidas na revisão bibliográfica com informações de especialistas da área. Eu entrei em contato com o Prof. Patrick OZIL (especialista em

estatística de procedimentos) e o prof. Alberto W. RAMOS (especialista em controle estatístico de processo) para que eles me aconselhassem sobre este aspecto.

Um delineamento fatorial completo a 4 fatores e 2 níveis parecia ser o mais interessante para estudar o fenômeno sem que existisse um número proibitivo de testes a fazer. No entanto, dada a restrição de tempo e da preocupação quanto ao sucesso do experimento, foi decidido a realização de um delineamento de experimentos completo a 3 fatores, 2 níveis e com repetição, ou seja, $2 \times 2^3 = 16$. O experimento realizado com repetição permite um estudo de variância e ainda melhor validação dos dados, visto que serão necessários pelo menos 2 lotes. O *blocking* ocorreria nos diferentes lotes produtivos. Com a realização dos pontos centrais, se verificará o tempo necessário para mudança nos fatores.

5.6. Realizando o experimento

5.6.1. Pontos Centrais

Preliminarmente, o grupo de trabalho decidiu que teriam que ser realizados “pontos centrais” para estudar o comportamento geral do experimento para 3 regulagens idênticas em diferentes gramaturas, ou seja, repetidas vezes a máquina seria colocada em uma temperatura, pressão e velocidade fixa para se ter uma idéia dos valores obtidos.

Fator	Pontos Centrais	Unidades
Gramatura	90, 100, 115	g/m ²
Temperatura	60	°C
Pressão	275	kN/m
Velocidade	500	M/min.

Tabela 17: Recapitulação dos pontos centrais

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação aos pontos centrais, obtemos a seguinte tabela de resultados

- ver anexo II: modo operatório

Valor Scanner									
Brilho Tela					Brilho Feltro				
Bobina	x-barra	σ	x-barra2	σ	Bobina	x-barra	σ	x-barra2	σ
3	77,01	0,04	77,03	0,14	3	74,72	0,05	74,73	0,02
	76,86	0,02				74,72	0,04		
	77,20	0,08				74,72	0,04		
	77,07	0,03				74,75	0,02		
5	77,74	0,02	77,91	0,17	5	74,57	0,02	74,91	0,60
	77,91	0,15				74,55	0,21		
	78,08	0,08				75,61	0,05		
			x-barre3	σ		x-barre3	σ		
BV Toile			77,47	0,62	BV Feutre			74,82	0,13

Tabela 18: Resultados dos pontos centrais 90g/m2.

Fonte: elaborado pelo autor

Valor Scanner									
Brilho Tela					Brilho Feltro				
Bobina	x-barra	σ	x-barra2	σ	Bobina	x-barra	σ	x-barra2	σ
2	77,65	0,03	77,73	0,11	2	75,57	0,05	75,65	0,11
	77,80	0,03				75,73	0,03		
3	77,34	0,03	77,43	0,13	5	75,28	0,05	75,37	0,13
	77,52	0,07				75,46	0,06		
			x-barra3	σ		x-barra3	σ		
Brilho Tela	77,58	0,21			Brilho Feltro			75,51	0,19

Tabela 19: Resultados dos pontos centrais 100g/m2.

Fonte: elaborado pelo autor

Valor Scanner									
Brilho Tela					Brilho Feltro				
Bobina	x-barra	σ	Bobina	x-barra	σ	Bobina	x-barra	σ	x-barra2
4	80,52	0,04	4	78,56	0,03				
6	80,58	0,02	6	79,79	0,02				
8	80,46	0,02	8	79,09	0,04				
	x-barra2	σ		x-barra2	σ	x-barra2			x-barra2
Brilho Tela	80,52	0,06	Brilho Feltro			79,15			0,62

Tabela 20: Resultados dos pontos centrais 115g/m2

Fonte: elaborado pelo autor

Reprodutibilidade

Vendo esses resultados, podemos considerar que a reproducibilidade é suficiente para continuar com o plano de experimentos; os *coeficientes de variação*⁵ são os seguintes:

90g/m²: 0.8 % para o lado tela e 0.17% para o lado feltro.

100g/m²: 0.27 % para o lado tela e 0.25% para o lado feltro.

150g/m²: 0.07 % para o lado tela e 0.7% para o lado feltro.

Estimativa do tempo

Além de poder validar a reproducibilidade dos dados, foi possível estimar o tempo necessário para coletar todos os dados ainda que definir a quantidade de bobinas necessárias para efetuar a totalidade dos testes.

Uma bobina de 17 toneladas com aproximadamente 28 quilômetros de papel é processada em apenas 40 minutos aproximadamente, logo é possível a realização de apenas três testes por bobina, principalmente devido a demora na mudança dos fatores *pressão*, *temperatura* e *velocidade*, e da demora da estabilização do brilho uma vez mudado algum fator e da alta velocidade de rotação da bobina. Uma mudança de fator demora até 10 minutos.

Sabendo que são necessários 16 testes, sendo oito em uma fabricação e oito em outra fabricação para levar em consideração a variação inter e intra fabricação, será necessário escolher fabricações de pelo menos três bobinas. Sabendo que a bobina número 1 do lote é sempre de transição, que neste caso não será utilizada pela enorme variabilidade que ela traz, mais uma “bobina de segurança” para caso alguma outra bobina tenha algum problema na obtenção dos dados, foi necessário proceder com os testes em fabricações com o número mínimo de cinco bobinas.

⁵ Coeficiente de variação é a razão do desvio padrão pela média

É importante precisar que uma vez que começamos este tipo de experimento, ficamos dependentes do funcionamento da máquina, do programa de produção escolhido pela empresa, da quantidade e da qualidade dos dados disponíveis. É por esta razão que às vezes era difícil avançar e manter os prazos determinados.

Especificação do produto

Confrontando a especificação do produto de **75 +/- 5 pontos de brilho** com a “*Tabela 20: Resultados dos pontos centrais 115g/m²*”, vemos que já nos pontos centrais o produto já saiu das especificações para o brilho.

Valor Scanner					
Brilho tela			Brilho feltro		
Bobina	x-barra	σ	Bobina	x-barra	σ
4	80,52	0,04	4	78,56	0,03
6	80,58	0,02	6	79,79	0,02
8	80,46	0,02	8	79,09	0,04
x-barra2 σ x2			x-barra2 σ x2		
Brilho tela	80,52	0,06	Brilho feltro	79,15	0,62

“**Tabela 20: Resultados dos pontos centrais 115g/m²**”

Isto significa que existirão combinações de fatores e níveis que farão que o produto saia de especificação. Este ponto foi discutido com o grupo de trabalho e decidiu-se continuar com o delineamento como planejado com os mesmos níveis de fatores decididos anteriormente.

Desta forma os efeitos dos fatores seriam estudados o mais profundamente possível, considerando os máximos e os mínimos globais que são utilizados para conduzir a máquina em todas as gramaturas.

Ficou apenas determinado que as partes da bobina que ficarem fora de especificação seriam retiradas e enviadas para reprocesso.

5.6.2. Dados DOE

O plano de experiência a três fatores, dois níveis com repetição, com *blocking* nos lotes foi completado e os dados obtidos são os seguintes:

- ver anexo I, modo operatório
- ver anexo II, pontos doe

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Velocidade	Pressão	Temperatura	Brilho Tela	Brilho Feutro
1	8	1	1	300	250	50	77,73	77,46
2	5	1	1	700	250	50	74,59	75,13
3	1	1	1	300	300	50	80,27	80,39
4	4	1	1	700	300	50	77,32	77,38
5	7	1	1	300	250	70	79,96	79,59
6	6	1	1	700	250	70	76,27	75,81
7	2	1	1	300	300	70	81,92	81,47
8	3	1	1	700	300	70	78,6	78,30
9	13	1	2	300	250	50	78,69	78,35
10	16	1	2	700	250	50	76,71	75,49
11	15	1	2	300	300	50	81,18	81,32
12	12	1	2	700	300	50	78,79	78,08
13	11	1	2	300	250	70	80,02	80,20
14	10	1	2	700	250	70	77,53	76,94
15	14	1	2	300	300	70	81,86	81,71
16	9	1	2	700	300	70	79,37	78,55

Tabela 21: Valores obtidos do DOE

Fonte: elaborado pelo autor

Estes valores estão ordenados em *StdOrder*, mas o experimento foi realizado de modo aleatório com *blocking* nos lotes.

5.7. Análise estatística dos dados – Lado Tela

5.7.1. Verificação dos dados coletados

Utilizando-se do software *MiniTAB versão 14*, faremos algumas análises dos dados obtidos com o delineamento de experimentos.

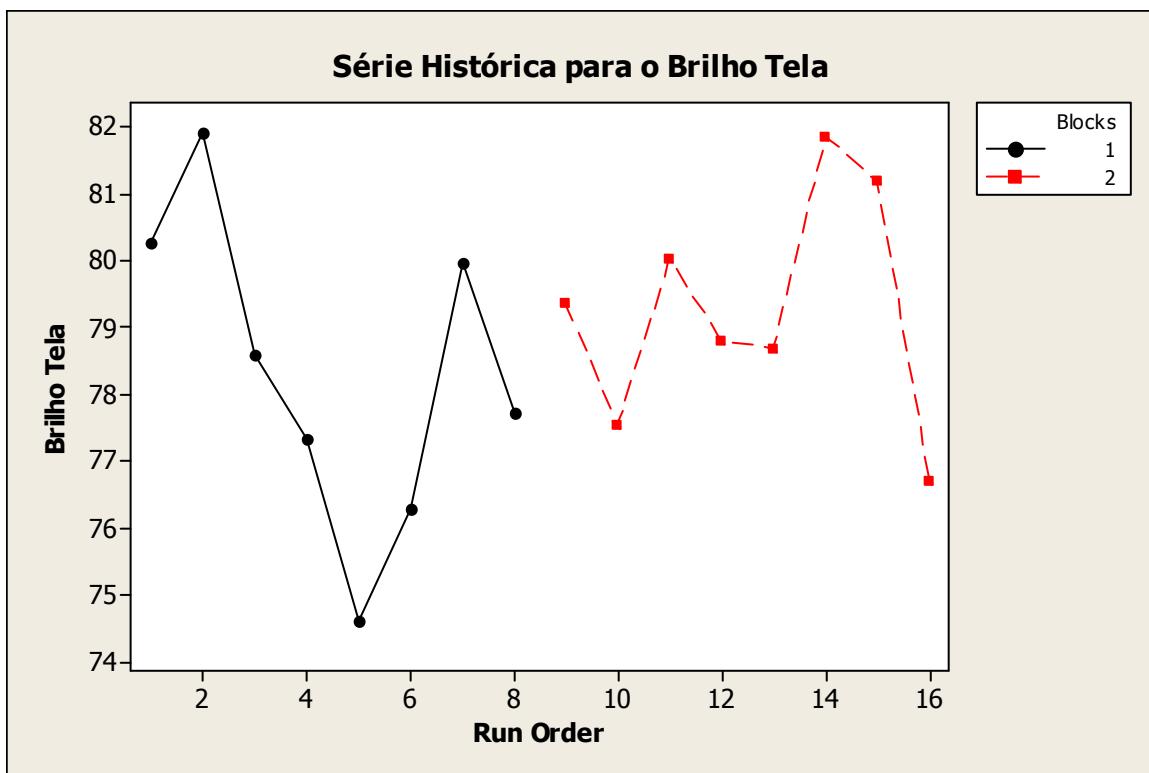


Gráfico 27: Brilho Tela – Série Histórica

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação ao máximo e mínimo de cada bloco, o gráfico nos indica que houve uma diferença de brilho entre as duas repetições. Na análise de variância, ficará mais claro se existe diferença estatística entre os dois lotes.

5.7.2. Estimar os efeitos dos fatores

Como pré-análise, podemos estimar a influência de cada fator e sua interação calculando as médias dos níveis baixos e a dos níveis altos, em seguida calculando a diferença:

	Fatores				Interações				Média	
	Vel. (V)		Pressão (P)	Temp (T)	PV	PT	VT	PVT	BV Tela	BV Feltro
	300	(-)	250	(-)	50	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)
	700	(+)	250	(-)	50	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)
	300	(-)	300	(+)	50	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)
	700	(+)	300	(+)	50	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)
	300	(-)	250	(-)	70	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)
	700	(+)	250	(-)	70	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)
	300	(-)	300	(+)	70	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
	700	(+)	300	(+)	70	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	300	(-)	250	(-)	50	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)
	700	(+)	250	(-)	50	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)
	300	(-)	300	(+)	50	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)
	700	(+)	300	(+)	50	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)
	300	(-)	250	(-)	70	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)
	700	(+)	250	(-)	70	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)
	300	(-)	300	(+)	70	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)
	700	(+)	300	(+)	70	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)
	300	(-)	250	(-)	70	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)
	700	(+)	250	(-)	70	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)
	300	(-)	300	(+)	70	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
	700	(+)	300	(+)	70	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Tela										
$\Sigma^- / 4$	80,20	77,69	78,16	78,79	78,92	78,89	78,47			
$\Sigma^+ / 4$	77,40	79,91	79,44	78,81	78,68	78,71	79,13			
Efeito	-2,81	2,23	1,28	0,02	-0,24	-0,19	0,66			
Feltro										
$\Sigma^- / 4$	80,06	77,37	77,95	78,53	78,71	78,63	78,22			
$\Sigma^+ / 4$	76,96	79,65	79,07	78,49	78,31	78,39	78,81			
Efeito	-3,10	2,28	1,12	-0,05	-0,41	-0,24	0,59			

Tabela 22: Pré-análise dos efeitos

Fonte: elaborado pelo autor

➤ Velocidade

Em média, quando o fator *Velocidade* muda do nível baixo (300 m/min.) para o nível alto (700 m/min.) , o brilho diminui de 2,81 pontos para o lado tela, e 3,10 pontos para o lado feltro

➤ **Pressão**

Em média, quando o fator *Pressão* muda de nível baixo (250 KN / m) para o nível alto (300 KN / m), o brilho aumenta de 2,23 pontos para o lado tela, e 2,28 pontos para o lado feltro

➤ **Temperatura**

Em média, quando o fator *Temperatura* muda de nível baixo (50 °C) para o nível alto (70 °C), o brilho aumenta de 1,28 pontos para o lado tela, e 1,12 pontos para o lado feltro

Esta pré-análise nos indica que somente os **fatores principais** (velocidade, pressão, temperatura) possuem um efeito significativo sobre o brilho do papel e que aparentemente nenhuma **interação** possui um efeito importante, visto os valores muito baixos. É possível que esses valores das interações tenham aparecidos porque houve uma variação da amostragem. De qualquer modo, através da *análise de variância*, ou seja, um estudo mais aprofundado, poderemos determinar estatisticamente se essas interações são significantes. Para tal, utilizaremos o software *MiniTAB v.14*.

Visualização dos efeitos principais e suas interações

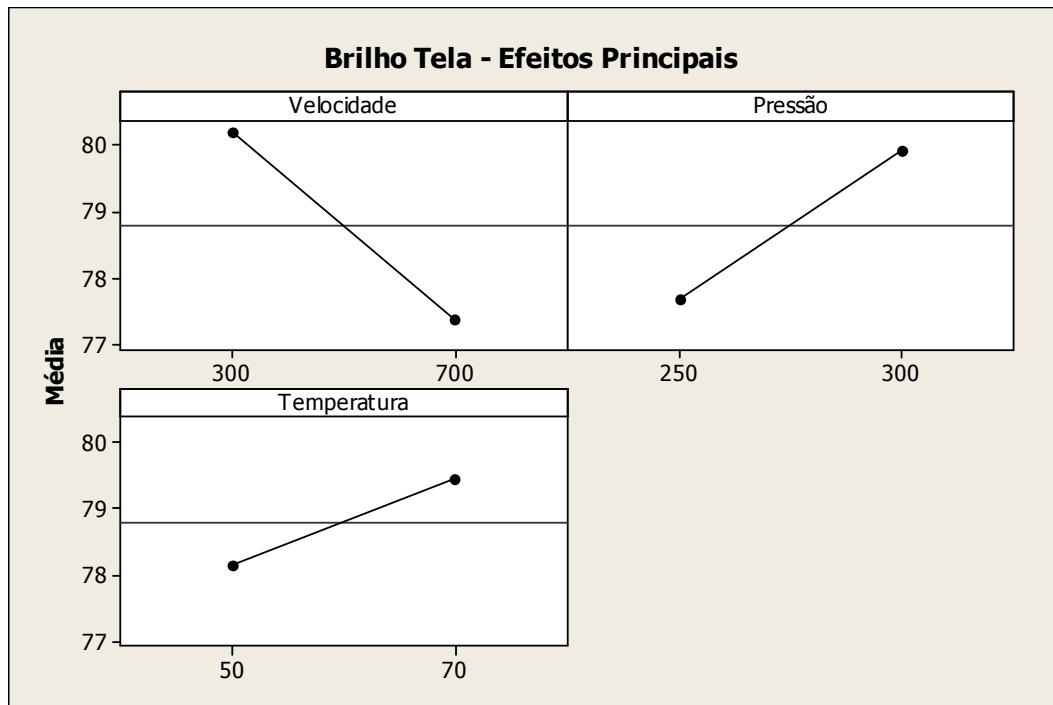


Gráfico 28: Brilho Tela - Efeitos Principais

Fonte: elaborado pelo autor

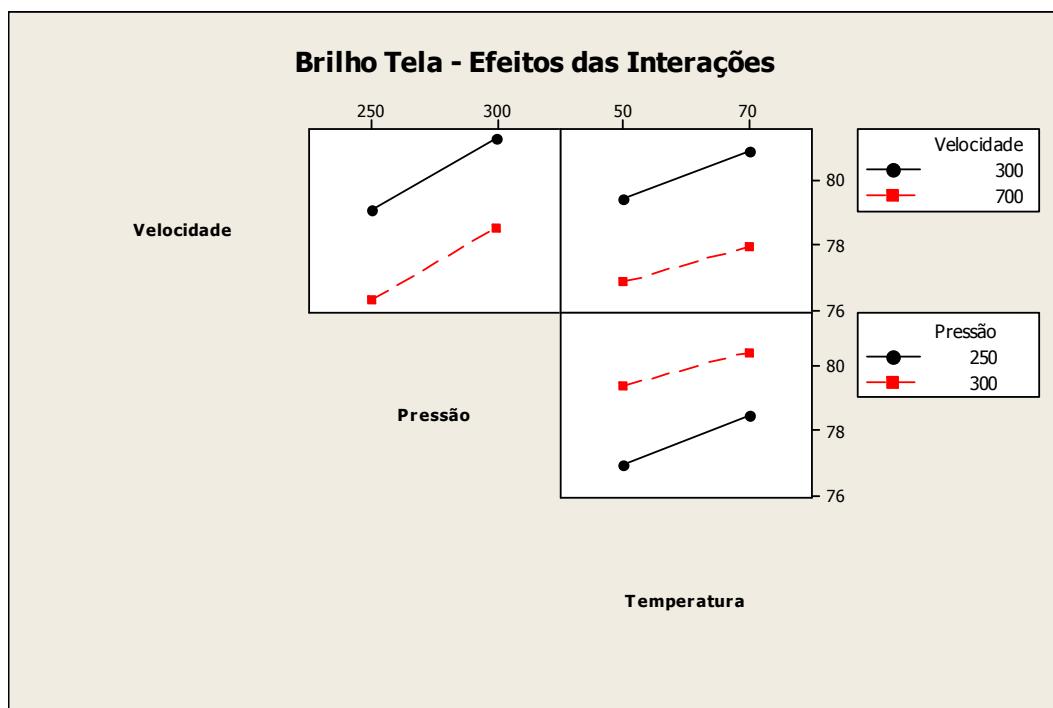


Gráfico 29: Brilho Tela - Efeitos das Interações

Fonte: elaborado pelo autor

Através do Gráfico 28 vemos que os efeitos principais são significativos (forte inclinação das curvas) enquanto que não existem interações (linhas paralelas para o Gráfico 29)

5.7.3. Formar o modelo inicial

Através da regressão múltipla, nós já podemos formular um modelo a partir dos pontos obtidos. Os efeitos de cada fator, como seus coeficientes, são indicados na tabela a seguir. A próxima etapa é a simplificação e ajuste do modelo, eliminando os fatores e interações não significativas.

Factorial Fit: BV Toile versus Block; Vitesse; Pression; Temperature

Estimated Effects and Coefficients for BV Toile (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		78,801	0,1264	623,31	0,000	
Block		-0,468	0,1264	-3,70	0,008	
Vitesse		-2,806	-1,403	0,1264	-11,10	0,000
Pression		2,226	1,113	0,1264	8,80	0,000
Temperature		1,281	0,641	0,1264	5,07	0,001
Vitesse*Pression		0,019	0,009	0,1264	0,07	0,943
Vitesse*Temperature		-0,191	-0,096	0,1264	-0,76	0,474
Pression*Temperature		-0,234	-0,117	0,1264	-0,92	0,386
Vitesse*Pression*Temperature		0,074	0,037	0,1264	0,29	0,779

Analysis of Variance for BV Toile (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	3,5063	3,5063	3,5063	13,71	0,008
Main Effects	3	57,8913	57,8913	19,2971	75,46	0,000
2-Way Interactions	3	0,3663	0,3663	0,1221	0,48	0,708
3-Way Interactions	1	0,0218	0,0218	0,0218	0,09	0,779
Residual Error	7	1,7901	1,7901	0,2557		
Total	15	63,5757				

Tabela 23 : Brilho Tela – Análise de Variância

Fonte: elaborado pelo autor

Os valores P⁶ da análise de variância indicam que existe efeito de bloco, ou seja, os diferentes lotes são estatisticamente uma fonte de variação e que somente os fatores principais são significativos, e as interações não.

⁶ Definição do Valor - P

Gráfico Pareto / Normalidade

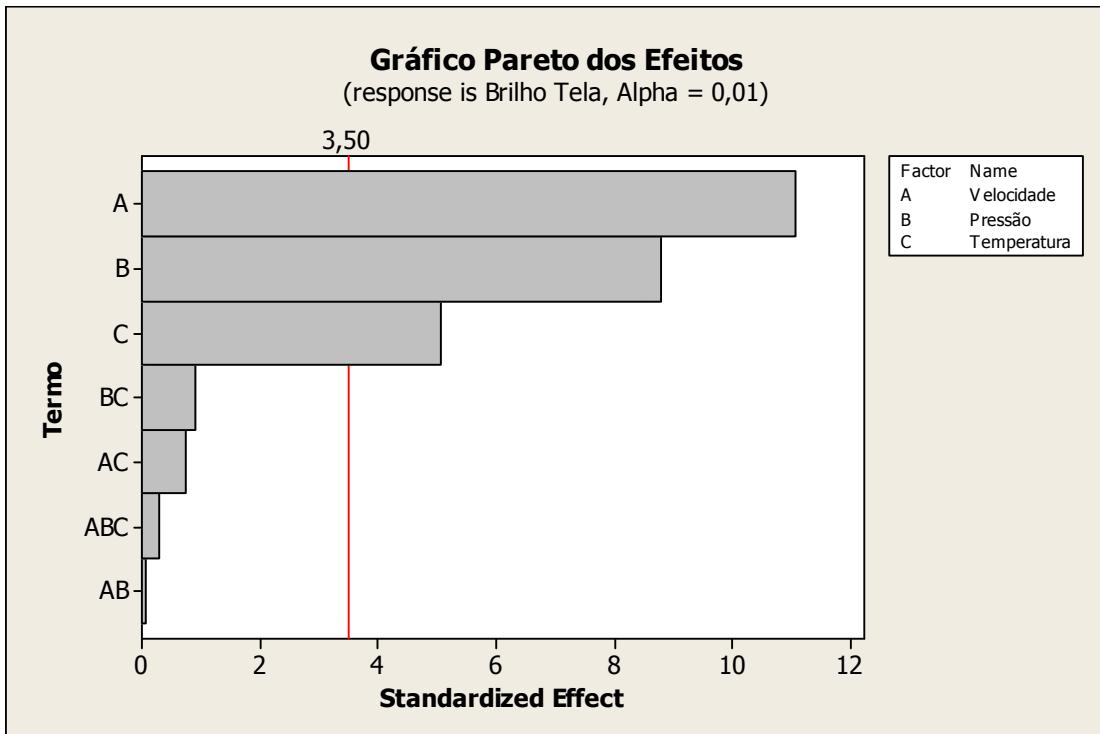


Gráfico 30: Brilho Tela - Gráfico Pareto dos efeitos

Fonte: elaborado pelo autor

Usado em teste de hipóteses para ajudar a decisão de ou rejeitar ou não uma hipótese nula. Um valor normalmente usado para o corte de uma variável é 0,05; ou seja, se o valor calculado para a importância de um fator ou interação for menor que 0,05, deve-se considerar que aquele fator é significativo.

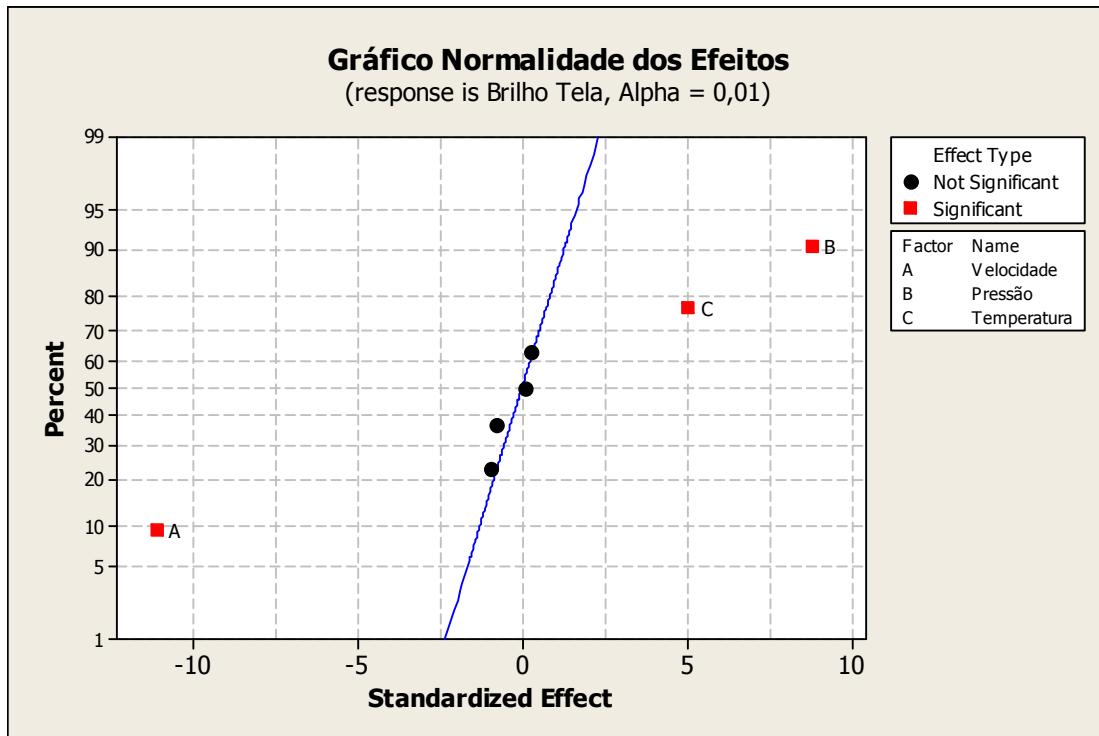


Gráfico 31: Brilho Tela - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos

Fonte: elaborado pelo autor

Os Gráficos de Pareto e de probabilidade normal nos mostram que são significativos apenas os efeitos principais com uma confiança de 99% (alpha = 0,01).

5.7.4. Refinar o modelo

Sabendo quais são os fatores significativos, refazemos a análise de variância para estimar os coeficientes dos fatores. Deste modo, a análise da variância também nos fornece um outro resultado, o teste “*lack of fit*”.

Factorial Fit: BV Toile versus Vitesse; Pression; Temperature

Estimated Effects and Coefficients for BV Toile (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		78,801	0,1721	457,97	0,000
Vitesse	-2,806	-1,403	0,1721	-8,15	0,000
Pression	2,226	1,113	0,1721	6,47	0,000
Temperature	1,281	0,641	0,1721	3,72	0,003

$S = 0,688257$ $R-Sq = 91,06\%$

$R-Sq(adj) = 88,82\%$

Analysis of Variance for BV Toile (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	57,8913	57,8913	19,2971	40,74	0,000
Residual Error	12	5,6844	5,6844	0,4737		
Lack of Fit	4	0,3880	0,3880	0,0970	0,15	0,959
Pure Error	8	5,2964	5,2964	0,6620		
Total	15	63,5757				

Tabela 24 : Brilho Tela - Análise de Variância para fatores significativos

Fonte: elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação $R-Sq$ (adj)^{7 e 8} nos indica a adequação do modelo aos pontos.

Um $R-Sq$ maior que 75% geralmente já nos indica uma boa adequação.

⁷ **R^2 (R-squared):** O coeficiente de determinação ou múltipla determinação (em regressões múltiplas). O R^2 é a porcentagem do total da variação na variável de resposta que é explicada pelos fatores no modelo. De maneira geral, quanto maior o R^2 , melhor o modelo se ajusta aos dados. O R^2 é sempre entre 0 e 1.

⁸ **R^2 adjusted:** Leva em consideração o numero de fatores no modelo. O R^2 é útil na comparação de modelos com diferentes numero de fatores. Por exemplo, o R^2 adjusted pode diminuir quando outro fator é adicionado ao modelo, porque qualquer diminuição no erro sum of squares pode estar fora por causa da perda de um grau de liberdade.

A coluna « *Effect* » mostra como o brilho varia quando mudamos do nível baixo para o nível alto, valores iguais a “Tabela 22: Pré-análise dos efeitos” já nos indicava.

O valor $p > 0,05$ para o teste “*lack of fit*” nos indica novamente uma boa adequação do modelo.

➤ O modelo

Os coeficientes de cada fator do modelo são apresentados a seguir:

Estimated Coefficients for BV Toile using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	66,2203
Vitesse	-0,00701562
Pression	0,0445250
Temperature	0,0640625

$$BV(p, v, t) = 66,2203 + -0,00701562 * (Vitesse) + 0,0445250 * (Pression) + 0,0640625 * (Temperature)$$

Tabela 25 : Brilho Tela - coeficientes do modelo

Fonte: elaborado pelo autor

5.7.5. Análise dos resíduos

Na tabela a seguir, os valores « brilho tela » são os 16 pontos obtidos na experiência. Os valores “FIT” são os 16 pontos obtidos utilizando o modelo de regressão da Tabela 25. Os valores “Residual” é a diferença entre esses dois valores.

Obs	StdOrder	Brilho Tela	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	1	77,7300	78,4500	0,3441	-0,7200	-1,21
2	2	74,5900	75,6438	0,3441	-1,0537	-1,77
3	3	80,2700	80,6763	0,3441	-0,4063	-0,68
4	4	77,3200	77,8700	0,3441	-0,5500	-0,92
5	5	79,9600	79,7313	0,3441	0,2288	0,38
6	6	76,2700	76,9250	0,3441	-0,6550	-1,10
7	7	81,9200	81,9575	0,3441	-0,0375	-0,06
8	8	78,6000	79,1513	0,3441	-0,5513	-0,92
9	9	78,6900	78,4500	0,3441	0,2400	0,40
10	10	76,7100	75,6438	0,3441	1,0662	1,79
11	11	81,1800	80,6763	0,3441	0,5038	0,85
12	12	78,7900	77,8700	0,3441	0,9200	1,54
13	13	80,0200	79,7313	0,3441	0,2888	0,48
14	14	77,5300	76,9250	0,3441	0,6050	1,02
15	15	81,8600	81,9575	0,3441	-0,0975	-0,16
16	16	79,3700	79,1513	0,3441	0,2188	0,37

Tabela 26 : Brilho Tela - Análise dos resíduos

Fonte: elaborado pelo autor

A média dos valores dos resíduos é de 0,50 pontos de brilho.

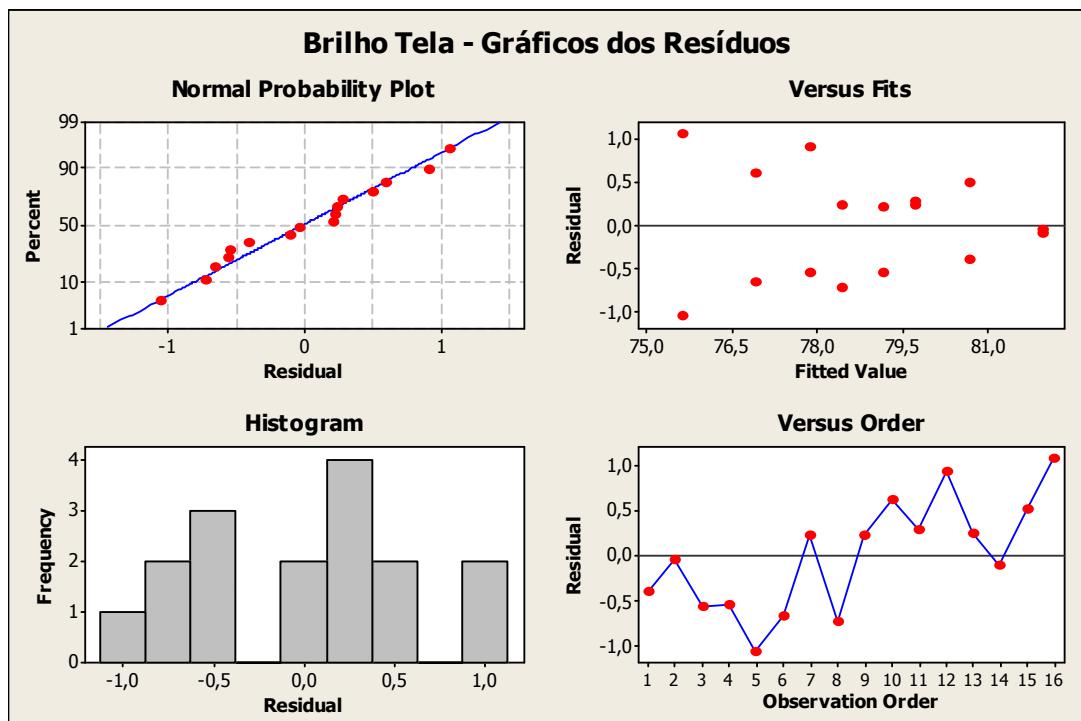


Gráfico 32: Brilho Tela – Gráfico dos resíduos

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação ao “Gráfico 32: Brilho Tela – Gráfico dos resíduos”, os resíduos aparentam estarem normais.

Normalidade: os pontos seguem uma linha reta

Histograma: o gráfico não apresenta simetria das caudas, um teste de normalidade mais detalhado será necessário.

Resíduos versus os valores estimados: os pontos se apresentam de forma aleatória

Resíduos versus ordem dos dados: Os resíduos indicam que o segundo lote apresentam um brilho maior que o primeiro lote.

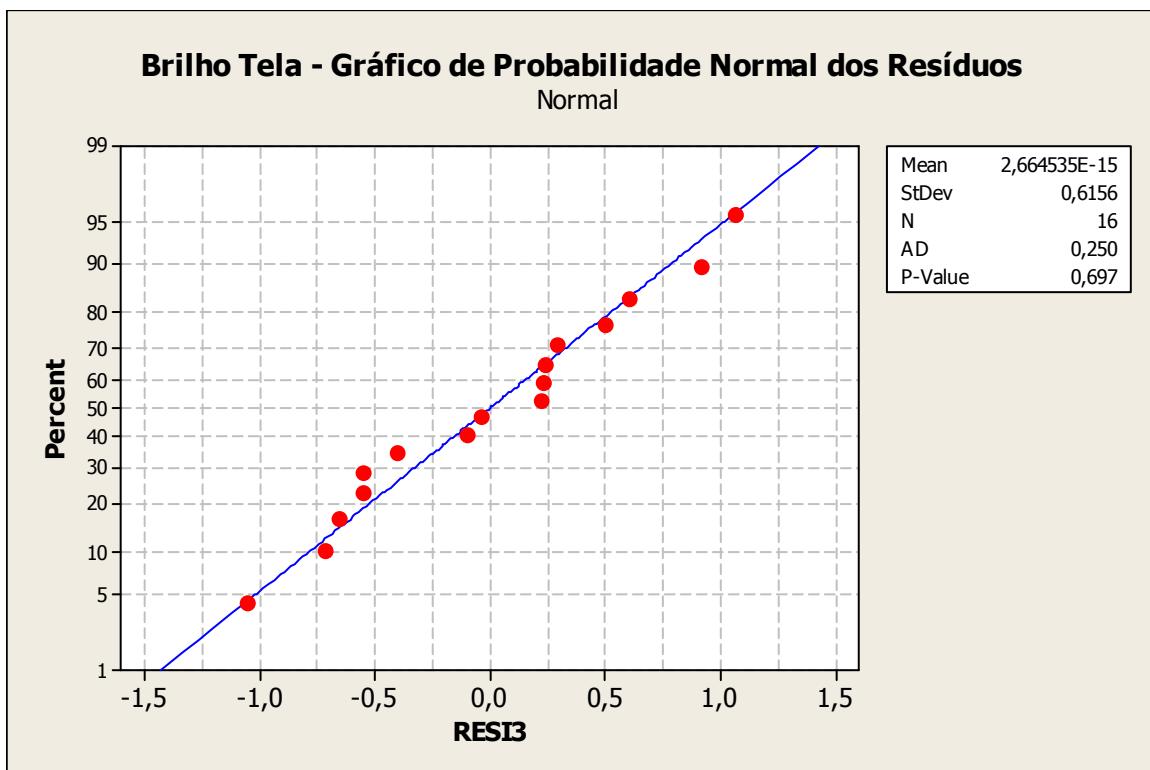


Gráfico 33: Brilho Tela - Probabilidade normal dos resíduos.

Fonte: elaborado pelo autor

O « Gráfico 33: Brilho Tela - Probabilidade normal dos resíduos. » é o teste de normalidade dos resíduos. Este nos indica que os resíduos seguem uma distribuição normal ($AD < P\text{-value}$), logo, não existem pontos extremos nos resíduos.

5.8. Análise estatística dos dados – Lado Feltro

As análises do lado feltro são similares as análises feitas para o lado tela e, portanto se encontram anexas.

5.9. Conclusões do DOE

Com os pontos obtidos pelo DOE, podemos formular as seguintes equações para estimar o brilho do papel segundo os fatores *pressão*, *temperatura* e *velocidade*.

Para o lado tela:

$$\text{Brilho Tela } (p, v, t) = 66,2203 + -0,00701563 * (\text{velocidade}) + 0,0445250 * (\text{pressão}) + 0,0640625 * (\text{temperatura})$$

Para o lado feltro :

$$\text{Brilho Feltro}(p, v, t) = 66,4819 + -0,0077562 * (\text{velocidade}) + 0,0456000 * (\text{pressão}) + 0,0561250 * (\text{temperatura})$$

5.9.1. Teste do modelo

Durante um processo de fabricação normal, foi anotado o valor do brilho dado pelos scanners e o valor de cada fator. Esses valores de cada fator foram atribuídos as variáveis da equação. Os valores dados pela equação foram então comparados com os valores obtidos pelos scanners. Seguem na tabela a seguir os resultados

Teste do modelo (8CASF115B527)				
	BV prevista		BV medida	
Tela	76,58		76,54	75,76
		diferença	-0,04	-0,82
		erro	-0,1%	-1,1%
Feltro	76,3		77,02	76,24
		diferença	0,72	-0,06
		erro	0,9%	-0,1%

Tabela 27 : Teste do modelo

Fonte: elaborado pelo autor

Fatores	
Velocidade	603
Temperatura	47
Pressão	260

Tabela 28: Nível dos fatores teste

Fonte: elaborado pelo autor

Podemos ver que o valor do brilho previsto pelo modelo matemático é muito parecido com o valor lido pelos scanners.

5.9.2. Aplicação prática do modelo

O propósito do *delineamento de experimentos* era estudar o processo para melhor compreender o impacto de cada fator. Os problemas iniciais do brilho do papel para o produto *Gloss* da linha 8 eram principalmente excesso de variabilidade e descentragem para cima da média do brilho, ou seja, papel brilhante demais.

Alta variabilidade

O motivo da existência da alta variabilidade era devido a dois fatores principais:

- Cada uma das cinco equipes conduz a máquina a própria maneira, não existe uma padronização.
- As equipes sabem apenas de forma qualitativa os efeitos da variação dos fatores *velocidade, pressão, temperatura*, mas não quantitativamente.

O problema principal do modelo é que os coeficientes dos fatores são diferentes para cada equação, ou seja, um ajuste provoca uma alteração desigual do brilho para os lados do papel.

	Constante	Velocidade	Pressão	Temperatura
tela	66,2203	-0,00701562	0,044525	0,0640625
feltro	66,4819	-0,00775625	0,0456	0,056125

Tabela 29 : Coeficientes do modelo

Fonte: elaborado pelo autor

Para resolver este problema, utilizaremos o conceito de “*Função de Perda de Qualidade*”, desenvolvida por Taguchi. Taguchi afirma que, mesmo que um produto esteja dentro dos limites de especificação, há um custo se a característica não está exatamente no seu valor nominal, ou seja, quanto mais longe do valor nominal, maior o custo.

A função de perda de Taguchi é uma expressão matemática quadrática e possui a seguinte forma:

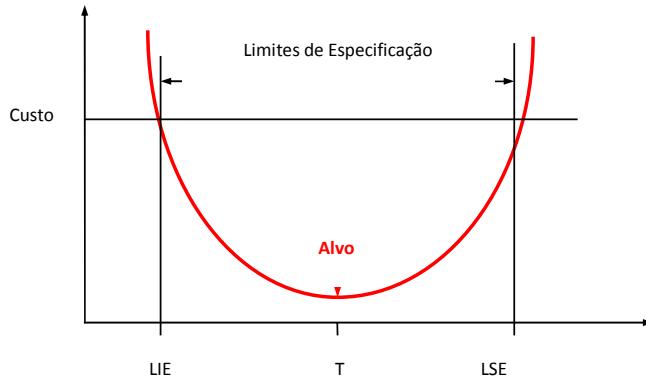


Figura 21: Função de Perda de Taguchi

Fonte: Kackar (1986), traduzido e adaptado pelo autor

$$L = k (y - T)^2$$

Onde:

L = perda devido ao desvio da característica

k = coeficiente de perda

y = valor da característica de qualidade

T = valor nominal

Existem 3 possíveis utilizações do modelo:

1. Ajustar o brilho em *função do lado tela*, deixando o lado feltro um pouco afastado do valor nominal
2. Ajustar o brilho em *função do lado feltro*, deixando o lado tela um pouco afastado do valor nominal
3. Ajustar o brilho em *função da média dos lados*, através da média dos coeficientes, deixando um lado um pouco acima do valor nominal e o outro um pouco abaixo do valor nominal.

Utilizaremos a função de perda para justificar a escolha da utilização do modelo. Como a função de perda é apenas utilizada para efeito de comparação, utilizo um valor arbitrário de $k = 100$. Com a simulação de alguns valores dos fatores pressão, temperatura e velocidade, se constrói a seguinte tabela:

Coeficientes:

	Constante	Velocidade	Pressão	Temperatura
Tela	66,2203	-0,00701562	0,044525	0,0640625
Feltro	66,4819	-0,00775625	0,0456	0,056125
Média	66,3511	-0,00738594	0,045063	0,06009375

Tabela 30: Coeficientes dos modelos

Fonte: elaborado pelo autor

Fatores			Brilho Tela			Função de Perda		
Velocidade	Pressão	Temperatura	Tela	Feltro	Média	L Tela	L Feltro	Soma
792	250	50	75,00	74,55	74,77	0,00	20,51	20,51
700	236	50		74,60	74,80			
700	250	40		74,69	74,85			
733	250	50	75,41	75,00	75,20	16,78	0,00	16,78
700	244	50	75,39	75,00	75,20	15,29	0,00	15,29
700	250	45	75,35	75,00	75,17	12,14	0,00	12,14
761	250	50	75,21	74,78	75,00	4,62	4,63	9,25
700	240	50	75,20	74,80	75,00	3,91	3,92	7,83
700	250	42	75,16	74,84	75,00	2,64	2,65	5,29

Tabela 31: Função de Perda de Taguchi

Fonte: elaborado pelo autor

Sendo a função de perda de Taguchi um modelo quadrático, a perda cresce exponencialmente conforme se afasta do valor nominal, logo **ajustando o brilho em função da média, consegue-se reduzir a perda, conforme se observa no caso 3.**

A partir do modelo com a média dos coeficientes, pode-se montar uma tabela com *valores de referência pré-determinados* para correção do brilho

Calculando por exemplo $\frac{+1\text{ BV}}{-0,00738594\text{ m/min}} = 135$, calculamos variação necessária da *velocidade* para mudar *um ponto de brilho*. Analogamente, para os outros fatores se monta a seguinte tabela.

	Pressão	Velocidade	Temperatura
+ 1 BV	+ 22	-135	+ 17
+ 0,5 BV	+ 11	-68	+ 8
+ 0,1 BV	+ 2	-14	+ 2

Tabela 32: valores pré-determinados para correção do brilho

Fonte: elaborado pelo autor

Logo, para uma correção necessária de 1 ponto de *brilho*, primeiro se ajusta a nova *pressão*, se necessário a *velocidade* e por último a *temperatura*.

Brilho Excessivo do Papel

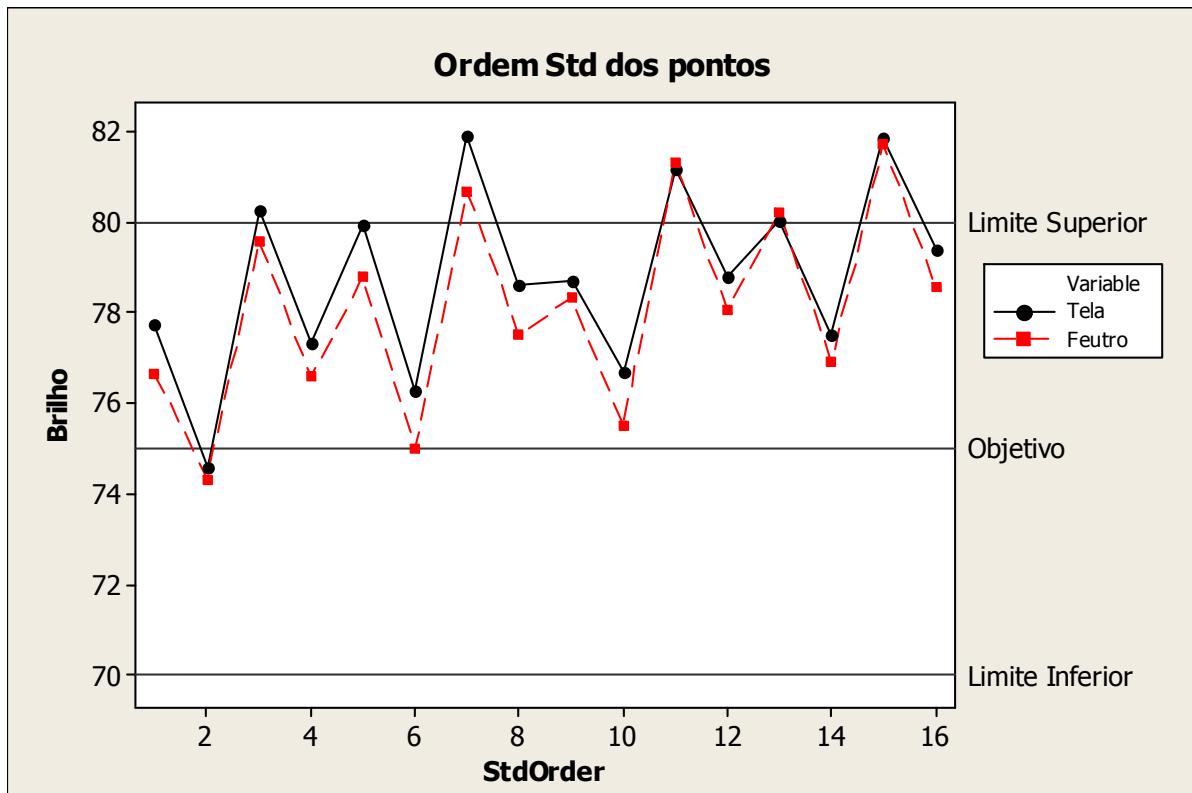


Gráfico 34: Brilho excessivo do papel

Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com o modo operacional das diferentes equipes, ao utilizarem todas as possíveis combinações de fatores, obtivemos o gráfico acima. Comparando com o gráfico da evolução Cpk do Brilho, podemos concluir que a média está deslocada para cima porque a faixa de operação do operador não permite fazer ajustes suficientes para reduzir o brilho quando necessário.

Toda faixa de operação está compreendida entre 74 e 82 pontos de brilho. Seria necessário um estudo sobre uma possível mudança no modo operatório para este produto, permitindo que o operador atinja brilhos mais baixos para essa gramatura quando for necessário algum ajuste, uma mudança dos procedimentos nos processos anteriores ou até mesmo uma mudança na composição do papel.

6. CONCLUSÃO

6.1. Conclusão Geral

Ainda que este trabalho de formatura tenha sido fundamentado na teoria do *Controle Estatístico de Processos* e também sobre a *Análise do Sistema de Medição*, vale ressaltar que ambas não puderam ser rigorosamente aplicadas, por razões peculiares ao meio industrial, como incapacidade de medir a característica desejada, falta de tempo para realização de mais testes...

Esta observação se refere particularmente a *MSA* dos scanners em linha, com os quais não foi possível a realização dos estudos de repetibilidade, uma vez que uma mesma amostra não poderia ser repetida pelos scanners.

Além disto, o projeto é baseado no cálculo dos indicadores *Cp* e *Cpk*. Foi visto que estes indicadores são teoricamente baseados em uma variabilidade de curto prazo. Considerando que na CONDAT, esses indicadores são calculados a partir da variabilidade global e representam por consequência a capacidade do processo a longo prazo termo. Esta discrepância penaliza os resultados, comparativamente com outras indústrias automotivas ou químicas, porque a variabilidade de longo prazo tende a ser maior do que aquela de curto prazo.

A transferência de uma teoria aplicada na indústria papeleira, não é tão simples e nem pode ser feita integralmente. Os ofícios são diferentes e as bases precisam ser reavaliadas e reajustadas em conformidade com a realidade geral da indústria papeleira.

Por fim, também estou convencido que, particularmente, o cálculo do indicador *Cpi* como todos os *Cpks* maiores que 1,33 são sem dúvida elevados demais para os padrões atuais de fornecimento de uma indústria papeleira. Um limite de 1 seria mais do que apropriado. De qualquer forma, uma inovação na abordagem sempre implicará em questionamentos que criarião as oportunidades de mudanças, para que a empresa possa atender às novas demandas do mercado com mais rapidez, eficácia e responsabilidade

6.2. Conclusão pessoal

Graças ao Eric COCCHI – diretor do departamento de qualidade e melhoria contínua, eu pude fazer a gestão de um projeto com total autonomia, desde a análise de dados até a escolha dos meios a serem implementados, passando pela organização das reuniões com o grupo de trabalho. Sendo responsável pela metodologia, eu pude defender o projeto frente à diretoria de CONDAT, como também em uma outra usina do grupo LECTA, Torras papel na Espanha. Mais especificamente na usina de Zaragoza.

Todas as ações tomadas me permitiram realmente aprender e compreender de que como será feito meu próximo trabalho como engenheiro. Além do mais, a experiência em melhoria contínua foi benéfica do ponto de vista de uma metodologia de trabalho. Os projetos são enquadrados e estruturados em torno da metodologia DMAIC, que assegura um desenrolar organizado dos estudos e das ações, trazendo uma continuidade real ao projeto.

Eu tenho certeza que este projeto de fim de estudos me permitiu adquirir competências indispensáveis para a minha futura carreira de engenheiro.

6.3. Autocríticas e próximos passos

Acredito que a crítica principal ao trabalho seja em relação ao cálculo dos custos adicionais gerados e a estimativa dos benefícios contábeis que o experimento poderá trazer no futuro, que não foram calculados no trabalho.

Não foi calculado o custo de todos esses experimentos, tanto em relação a atrasos na produção como os custos das amostras retiradas. A redução da velocidade de operação para marcação dos pontos certamente atrasou a produção em alguns minutos; como também na retirada das amostras. Já as verificações dos dados no laboratório *paperlab* só foram realizadas quando ele estava ocioso, entre um teste e outro.

O papel gerado fora de especificação também gerou rejeitos. Mesmo que esse papel fora de especificação possa ser reaproveitado, ocorreu uma geração de custos.

Os benefícios que serão gerados pelo experimento também não foram calculados, mesmo porque é muito difícil calcular a satisfação do cliente em termos contábeis. Apenas a redução do número de reclamações não seria suficiente, uma vez que muitos clientes insatisfeitos não reclamam no serviço pós-venda.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- CHARBONNEAU, H, e G. WEBSTER. *Industrial Quality Control*. Englewood Cliffs, 1978.
- GEORGE, M, B KASTLE, e D. ROWLANDS. *Qu'est-ce que le Lean Six Sigma*. Maxima Laurent du Mesnil, 2005.
- INC, MINITAB. «MINITAB Statistical Software. Release 14 for Windows.» Pennsylvania, 2003.
- KACKAR, R. N. *Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary*. 1986.
- MONTGOMERY, D. C. *Introduction to statistical quality control, 4th Edition*. Nova Iorque: Ed. John Wiley & Sons, 2001.
- OZIL, P. «Cours des MSP/SPC.» Grenoble, 2004.
- PILLET, M, e D. DURET. *Qualité en production, de l'ISO 9000 à six sigma*. Éditions d'organisation, 2005.
- PILLET, Maurice. *Appliquer la maîtrise statistique des procédés MSP/SPC*. Éditions d'organisation, 2003.
- RAMOS, A. W. *Estatística II*. Apostila para disciplina de graduação do Departamento de Engenharia de Produção, PRO-2711 – Estatística II, São Paulo: Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- WERKEMA, M. C. C. *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.

APÊNDICE A: Modo de Operação DOE

I. Verificação da fabricação / lote: verificar que as fabricações a ser testadas não apresentam nenhum dado estranho. Portanto, na saída da máquina precedente a calandra, alguns parâmetros (média e desvio padrão) são verificados se estão dentro das especificações:

- *Gramatura* do papel deve estar dentro da especificação
- *Deposito* da pré-camada no sizer está correta, evitando que o papel não perca espessura demais durante o processo de calandragem.
- *Deposito* das cabeças de revestimento feltro e tela deve estar conforme a especificação.
- *Umidade* do papel na saída da máquina revestidora, o brilho será tanto mais úmido quanto o papel é úmido.
- *A taxa de material seco* do líquido utilizado para o revestimento.
- *Número de defeitos* na bobina mãe, quanto mais defeitos existem, mais fases de desaceleração para evitar a quebra do papel existirão, logo, menos tempo para realização dos testes.
- *As bobinas que tiveram quebras* nas máquinas precedentes, apresentarão mais fases transitórias.

II Ajustamento dos parâmetros

Ajuste dos três parâmetros em função do delineamento de experimento, segundo a ordem aleatória gerada pelo *software Minitab*.

- Marcar na borda do papel da bobina o início da medição
- Ajuste da temperatura
- Ajuste da pressão
- Ajuste da velocidade

III Medição da variável de resposta

- Registrar os valores do Brilho (Tela e feltro) que são dados pelos scanners.

- As medidas dos scanners são atualizadas a cada 30 segundos, registrar cada ponto e traçar em tempo real a evolução dos Gráficos.
- Calcular a média móvel dos sobre os últimos cinco pontos.
- Consideramos que o regime seja estável quando a medida correspondente a média móvel é 0,03 ou menor
- Registrar 15 pontos consecutivos a partir da estabilidade do processo.
- Anotar na matriz de experiência, a média desses 15 pontos consecutivos.

IV Visualização dos Resultados

Exemplo da gravação de dados

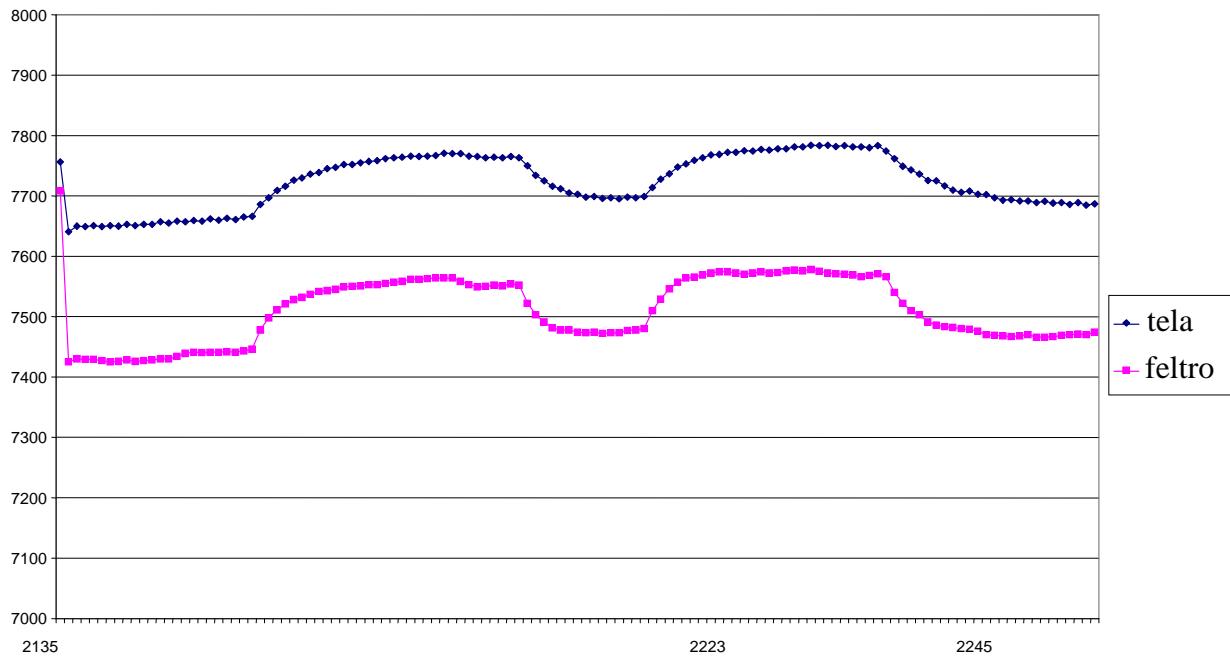


Gráfico 35: Exemplo de obtenção de dados

Fonte: elaborado pelo autor

V Tratamento dos resultados

A partir dos resultados estabilizados (ao menos 15 pontos), calculamos a médio do brilho. Este é o valor utilizado na matriz de experimentos do DOE

APÊNDICE B: Análise estatística dos dados – Lado Feltro

1.) Verificação dos dados coletados

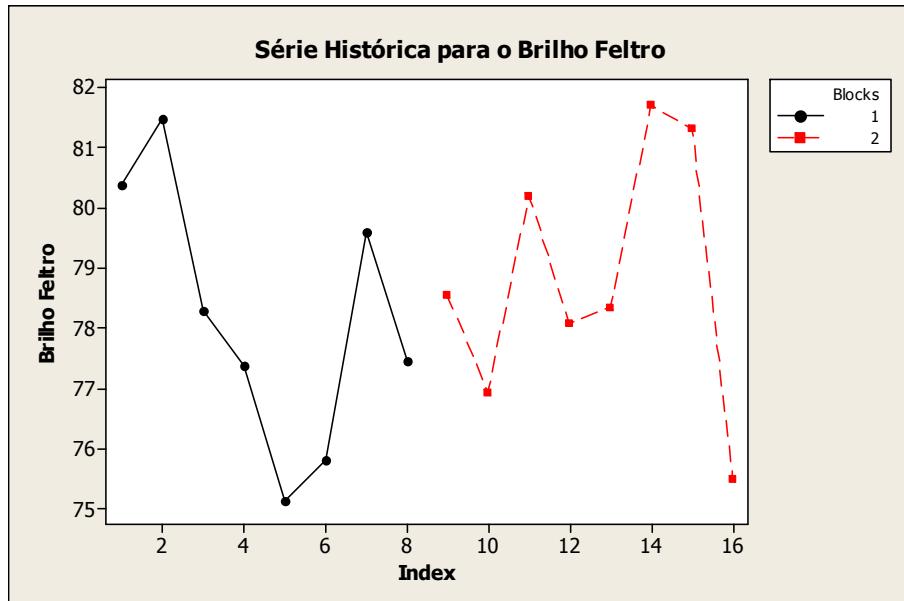


Gráfico 36: Brilho Feltro - Série Histórica

Fonte: elaborado pelo autor

2.) Estimar os efeitos dos fatores

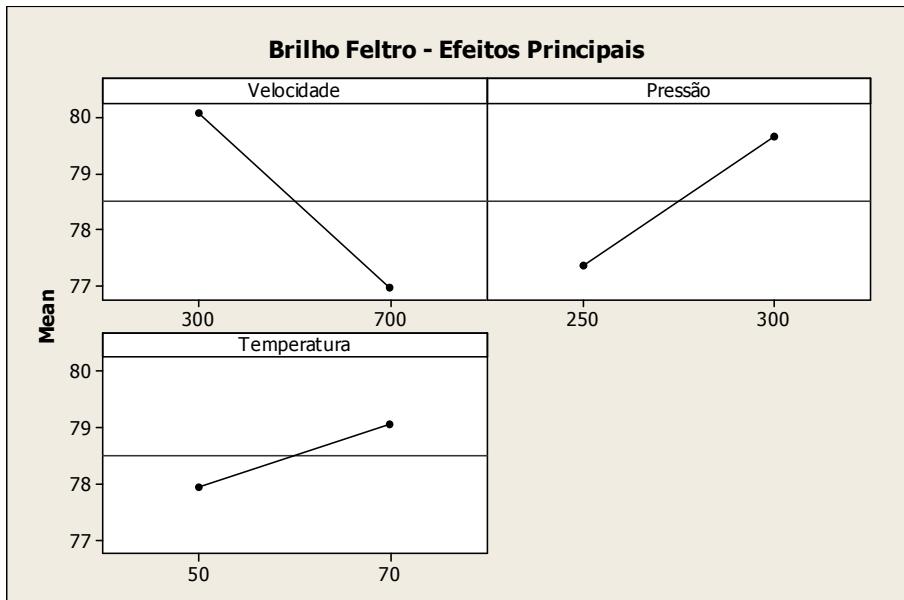


Gráfico 37: Brilho Feltro – Efeitos Principais

Fonte: elaborado pelo autor

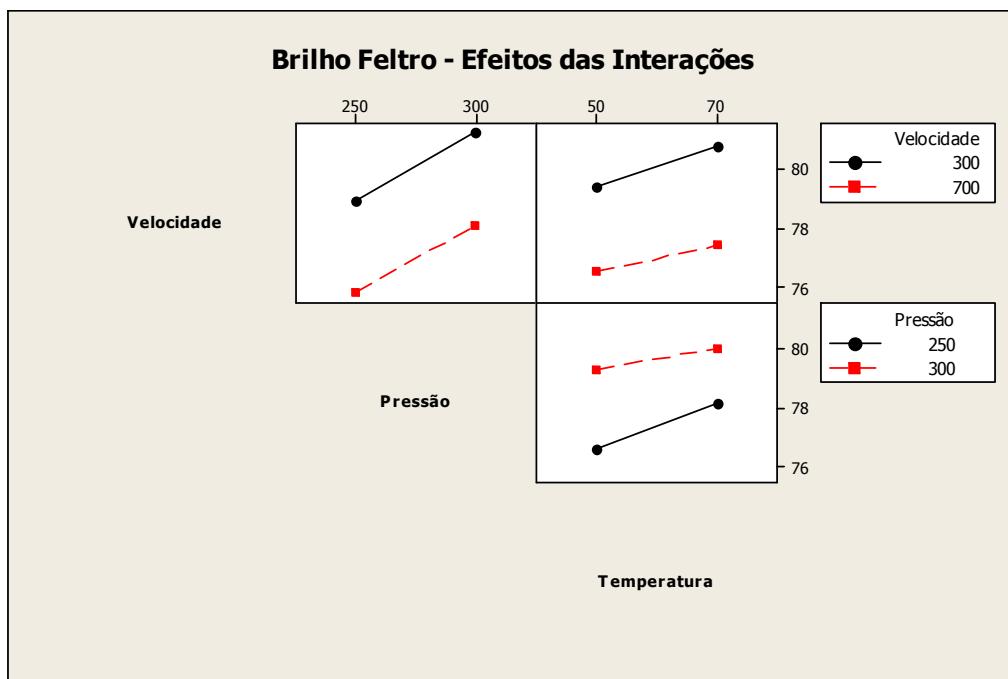


Gráfico 38: Brilho Feltro – Efeito das interações

Fonte: elaborado pelo autor

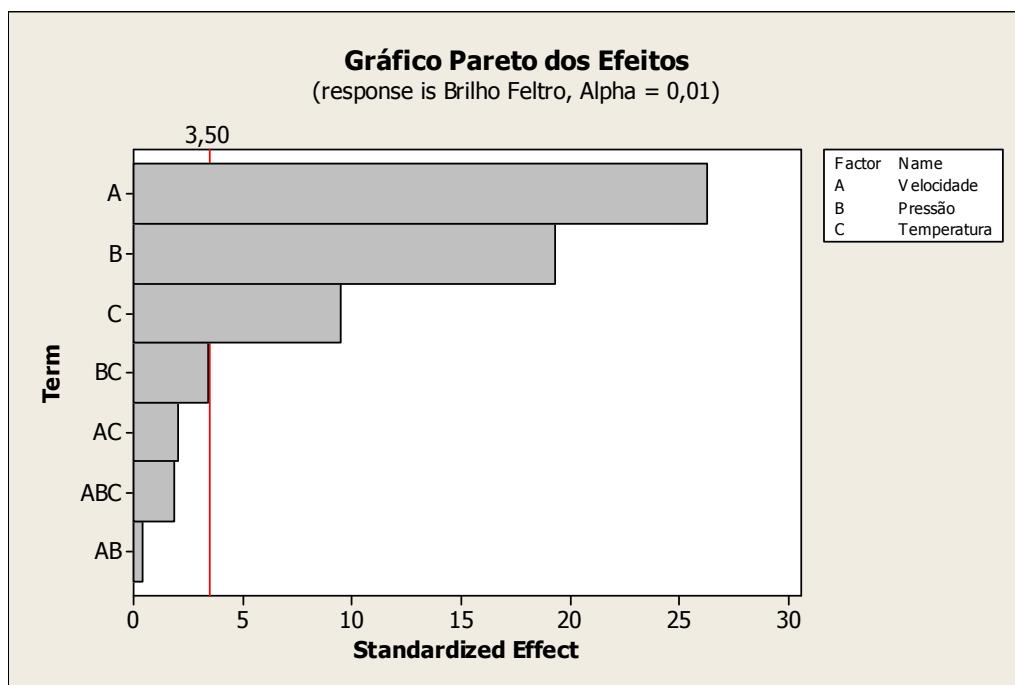


Gráfico 39: Brilho Feltro – gráfico pareto dos efeitos

Fonte: elaborado pelo autor

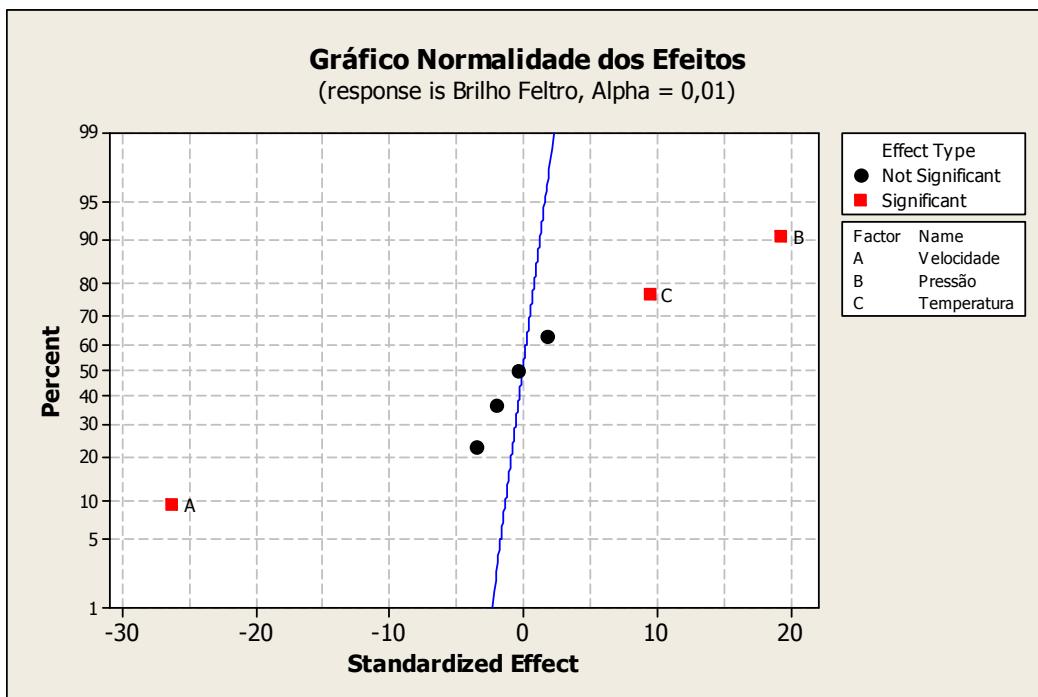


Gráfico 40: Brilho Feltro – Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos

Fonte: elaborado pelo autor

3.) Formar o modelo inicial

Factorial Fit: BV Feutre versus Block; Vitesse; Pression; Temperature

Estimated Effects and Coefficients for BV Feutre (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		78,511	0,05877	1335,80	0,000	
Block		-0,320	0,05877	-5,44	0,001	
Vitesse		-3,102	-1,551	0,05877	-26,39	0,000
Pression		2,280	1,140	0,05877	19,40	0,000
Temperature		1,123	0,561	0,05877	9,55	0,000
Vitesse*Pression		-0,045	-0,023	0,05877	-0,38	0,713
Vitesse*Temperature		-0,243	-0,121	0,05877	-2,06	0,078
Pression*Temperature		-0,405	-0,203	0,05877	-3,45	0,011
Vitesse*Pression*Temperature		0,220	0,110	0,05877	1,87	0,103

S = 0,235099 R-Sq = 99,43% R-Sq(adj) = 98,77%

Analysis of Variance for BV Feutre (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	1,6384	1,6384	1,6384	29,64	0,001
Main Effects	3	64,3357	64,3357	21,4452	388,00	0,000
2-Way Interactions	3	0,8994	0,8994	0,2998	5,42	0,030
3-Way Interactions	1	0,1936	0,1936	0,1936	3,50	0,103
Residual Error	7	0,3869	0,3869	0,0553		
Total	15	67,4540				

Tabela 33: Brilho Feltro – Análise de Variância

Fonte: elaborado pelo autor

4.) Refinar o modelo

Factorial Fit: BV Feutre versus Block; Vitesse; Pression; Temperature

Estimated Effects and Coefficients for BV Feutre (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		78,511	0,09170	856,19	0,000
Block		-0,320	0,09170	-3,49	0,005
Vitesse		-3,102	0,09170	-16,92	0,000
Pression		2,280	0,09170	12,43	0,000
Temperature		1,123	0,09170	6,12	0,000

S = 0,366795 R-Sq = 97,81% R-Sq(adj) = 97,01%

Analysis of Variance for BV Feutre (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	1,638	1,638	1,6384	12,18	0,005
Main Effects	3	64,336	64,336	21,4452	159,40	0,000
Residual Error	11	1,480	1,480	0,1345		
Total	15	67,454				

Tabela 34: Brilho Feltro – Análise de Variância para os fatores significativos

Fonte: elaborado pelo autor

Estimated Coefficients for BV Feutre using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	66,4819
Block	-0,320000
Vitesse	-0,00775625
Pression	0,0456000
Temperature	0,0561250

$$BV(p,v,t) = 66,4819 + -0,0077562 * (Vitesse) + 0,0456000 * (Pression) + 0,0561250 * (Temperature)$$

Tabela 35: Brilho Feltro - Coeficientes

Fonte: elaborado pelo autor

5.) Análise dos resíduos

Unusual Observations for BV Feutre

Obs	StdOrder	BV Feutre	Fit	SE Fit	Residual	St	Resid
1	1	77,4600	78,3613	0,2549	-0,9012	-2,04R	
2	2	75,1300	75,2588	0,2549	-0,1287	-0,29	
3	3	80,3900	80,6413	0,2549	-0,2512	-0,57	
4	4	77,3800	77,5388	0,2549	-0,1587	-0,36	
5	5	79,5900	79,4838	0,2549	0,1063	0,24	

6	75,8100	76,3813	0,2549	-0,5713	-1,29
7	81,4700	81,7638	0,2549	-0,2938	-0,67
8	78,3000	78,6613	0,2549	-0,3613	-0,82
9	78,3500	78,3613	0,2549	-0,0112	-0,03
10	75,4900	75,2588	0,2549	0,2313	0,52
11	81,3200	80,6413	0,2549	0,6788	1,54
12	78,0800	77,5388	0,2549	0,5413	1,23
13	80,2000	79,4838	0,2549	0,7163	1,62
14	76,9400	76,3813	0,2549	0,5587	1,27
15	81,7200	81,7638	0,2549	-0,0438	-0,10
16	78,5500	78,6613	0,2549	-0,1113	-0,25

R denotes an observation with a large standardized residual.

Tabela 36: Brilho Feltro – Análise dos Resíduos

Fonte: elaborado pelo autor

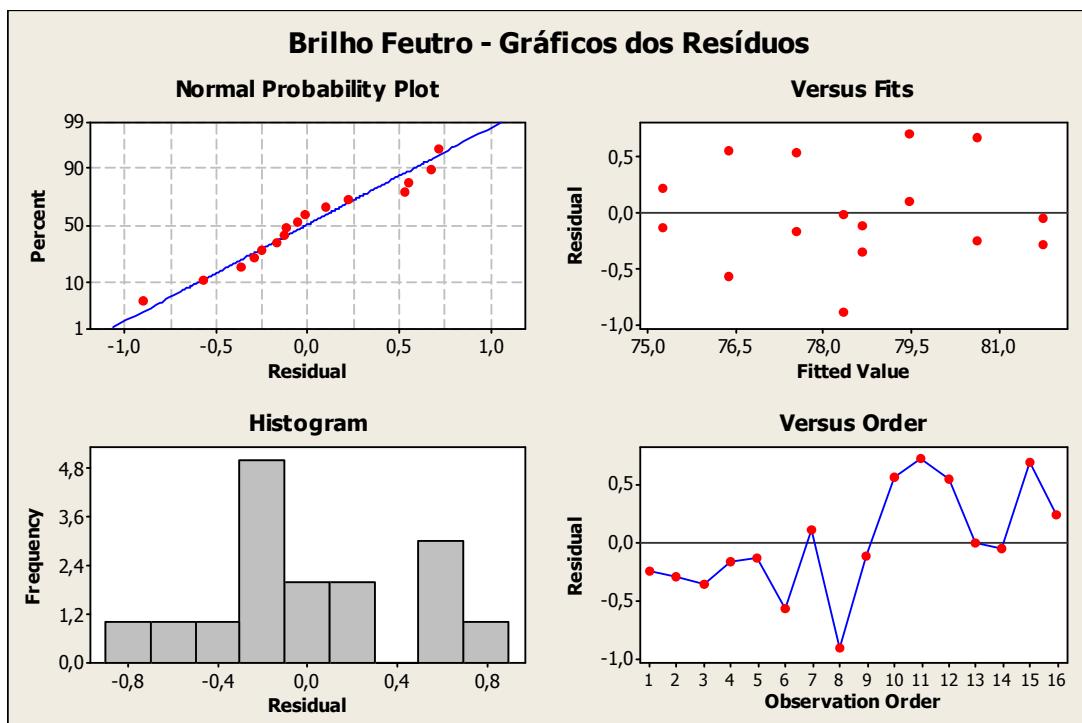


Gráfico 41: Brilho Feltro – Gráfico dos Resíduos

Fonte: elaborado pelo autor

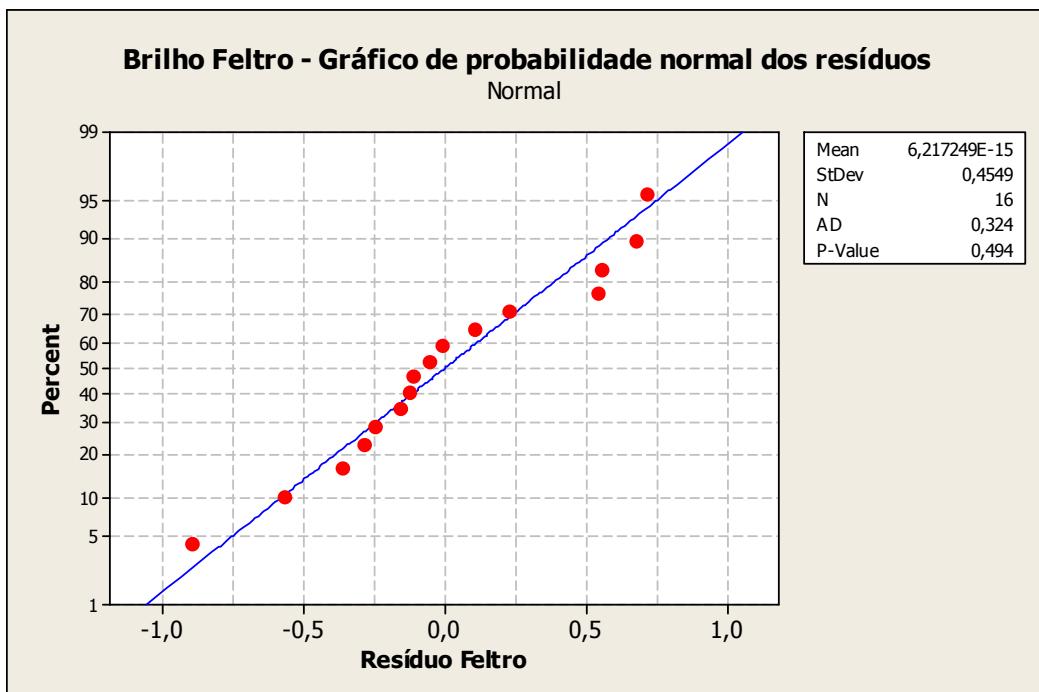


Gráfico 42: Brilho Filtro – gráfico de probabilidade normal dos resíduos

Fonte: elaborado pelo autor

ANEXO I: FICHA PDCA DO PROJETO

DEFINIR	Amélioration des capacités : Cpk		météo projet :
Site : CONDAT Usine Le Lardin			
Sponsor : F. DE AGOSTINI			phases : Agir
Chef projet : E. COCCHI			Durée du projet : 12 mois (année 2005)
Méthode : M.TESTA, R. CANALES			Coût du projet : Groupe de travail
Groupe de travail : F. DE AGOSTINI, P. VALLAT, E. COCCHI, J. DEMAISON, JM. SCHMIDT, C. SEGUI, JP LAVAUD			
Objectifs : Améliorer la capacité des lignes de fabrication		Indicateurs & cibles : Cpk / Cpi	
Gain estimé : Meilleur maîtrise du procédé		<ul style="list-style-type: none"> ✓ fin 2005 \Rightarrow Cpi = 0,3 ✓ fin 2006 \Rightarrow Cpi = 0,5 ✓ fin 2007 \Rightarrow Cpi = 0,7 	
MESURER : ÉVOLUTION & OBJECTIF		ANALYSER :	

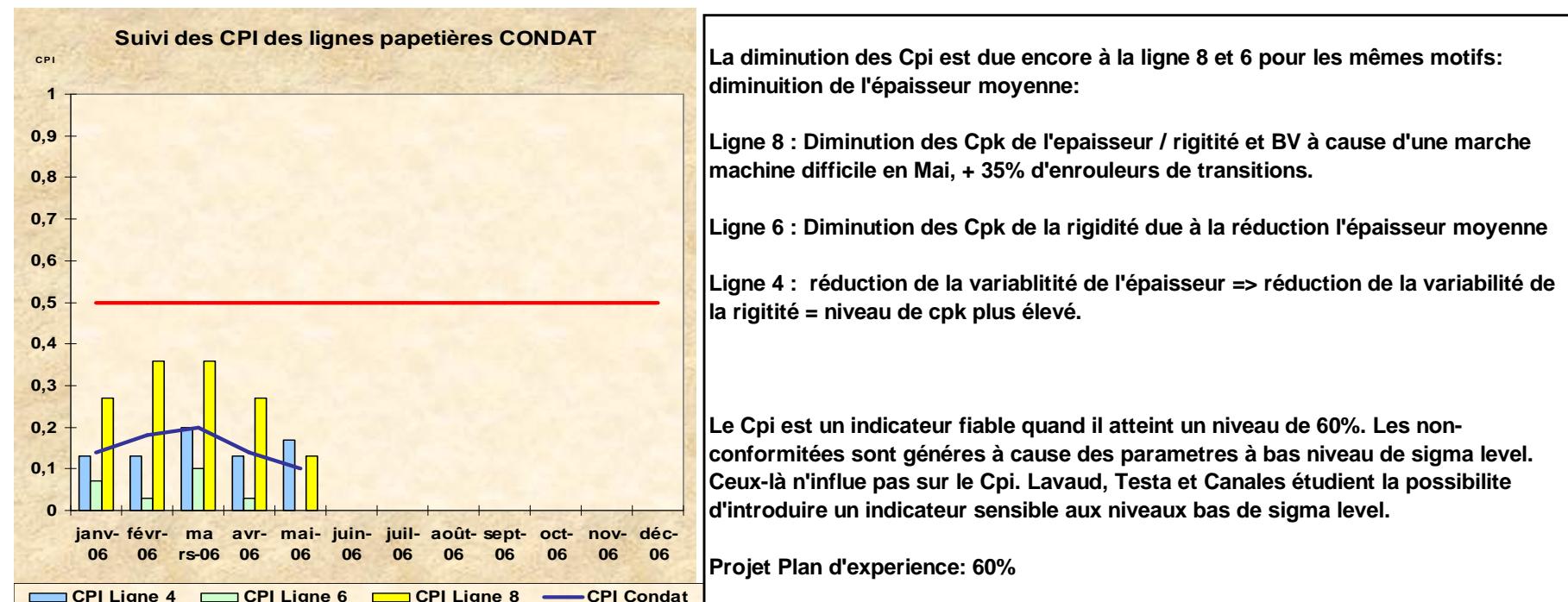


Figura 22: Ficha PDCA do projeto

Fonte: elaborado pelo autor

AMELIORER : PLAN D'ACTIONS						
Titre	Plan d'action	Type d'améliorations	Leader	% de réalisation à la date	Date de début d'action	Date de clôture
Valider la représentativité de l'échantillonnage au format 5	On veut une incertitude sur le Cpk de 10 % à nombre de feuilles requises (200)	Conduite du process	JPL	100%	17-mars-05	8-avr.-05
Calcul de l'aptitude des méthodes analytiques selon la référence MSA	Plan d'actions du fournisseur PAPERLAB et solutions alternatives si appareil non capable sur certaines déterminations	Conduite du process	CS	100%	17-mars-05	31-août-05
Détermination des Cpk sur 8 produits choisis	Détermination du mode de calcul ↳ Détermination du type de limite : Unilatérale / Bilatérale ↳ Détermination de la taille de l'unité : Feuille / Bobine / Fabrication Calcul des CPk sur 8 produits choisis, tous les mois, par détermination	Standardisation du mode de calcul	JPL / DB	100%	2-déc.-05	2-déc.-05
Amélioration des Cpk	A définir en fonction des valeurs de CPk et des infos clients / marchés (qu'est-il important d'améliorer ?)	Conduite du process	JMS / FDA	100%	17-janv.-06	En continu
	Analyse des process de fabrication - Méthode cascade des procédés (Grammage L4, Epaisseur L4, BV L8)	Conduite du process	MT/RCA	25%	17-janv.-06	
	Analyse des process de fabrication - Etude de la régulation MAP 4	Conduite du process	MT	30%	1-avr.-06	
	Analyse des process de fabrication - Projet Transition de sauce C9	Conduite du process	MT	60%	2004	
Logiciel statistique STATGRAPHICS	✓ Achat du logiciel ✓ Formation des utilisateurs (JPL ; MD ; DB ; VA)	Conduite du process	DB / VA	100%	1-juin-05	1-janv.-06
	✓ Démultiplication de la formation aux services Process & R&D ✓ Utilisation du logiciel	Conduite du process	DB / VA	0%	1-juin-05	En continu
Publication des Cpk aux clients	Présentation des Cpk aux clients	Conduite du process	JMS / JJD	0%	Début 2007	En continue, trimestriellement

Figura 23: Ficha PDCA do projeto, pag2

Fonte: elaborado pelo autor

AMELIORER : Plan d'actions

Site : CONDAT Usine Le Lardin

Sponsor : F. DE AGOSTINI

Chef projet : R. POULLAIN

Méthode : R. CANALES

Groupe de travail : R. POULLAIN, R. BREUIL, R. DESCATOIRE, R. CANALES

Cascades de procédés : BV L8

Projet principal : "Amélioration des capacités"

Phases : Analyser, Act

Durée du projet : 01/01/06 ⇨ 31/06/06

Coût du projet : 0,5 stagiaire sur 5 mois

Objectifs : Améliorer la capacité de la détermination "BV" sur la ligne 8

Gain estimé

Meilleur maîtrise de la BV au niveau du process de fabrication
Réduction des rebuts qualité et des réclamations pour BV hors normes

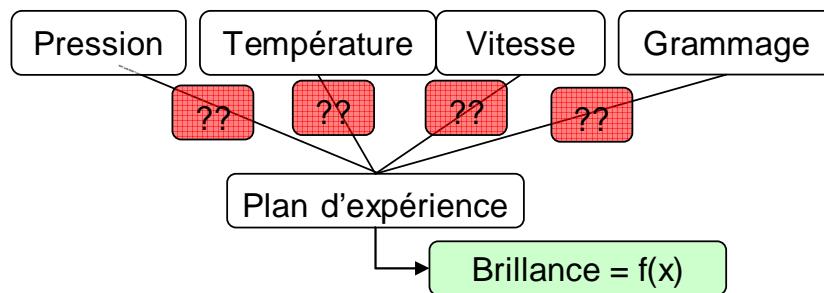
Indicateurs & cibles

Cp_k BV L8 > 1,33

Mesurer :

Analiser :

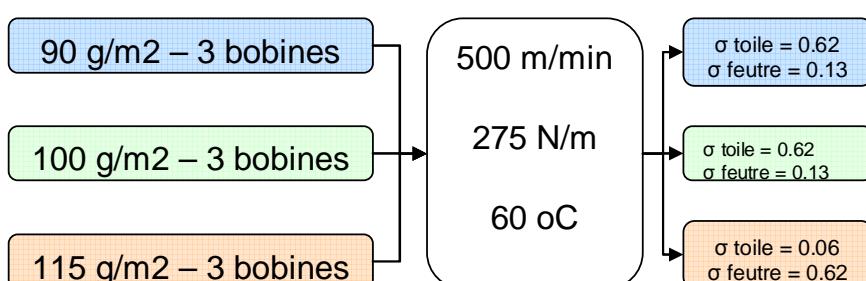
PLAN D'EXPERIENCE sur K19



Analyse

Le coefficient de variation sont de :
 90g/m² : 0.8 % toile ; 0.17% feutre
 100g/m² : 0.27 % toile ; 0.25% feutre
 150g/m² : 0.07 % toile et 0.7% feutre

Essai de Faisabilité



Suite: réalisation du plan

Figura 24: Ficha PDCA do projeto, pag3

Fonte: elaborado pelo autor

Titre	Plan d'action	Type d'améliorations	Leader	% de réalisation à la date	Date de début d'action	Date de clôture
Mesure de la maîtrise des procédés	Calcul des capacités Choix des paramètres et des produits étudiés	Contrôle d'efficacité	JPL Groupe de travail	100%	07/09/2005	En continu
Etude préliminaire Analyse	✓ Recenser et regrouper l'existant ✓ Analyse des Cpk de la BV : par enrouleur, par campagne et par produit ✓ Variabilité selon les grammages	Cibler les actions	CyS	100%	17/01/2006	20/02/2006
Analysé	✓ Analyse de l'effet des transitions et des changements de grammage sur les Cpk	Cibler les actions	CyS	100%	17/01/2006	20/02/2006
Améliorer les transitions	Projet "Changement de sauce" ✓ Rédaction du dossier (cahier des charges) ✓ Validation	Diminuer la variabilité due aux transitions	RP PL MT	100%	2004	12/04/2006
	Projet "Changement de sauce" ✓ Rentabilité ✓ Validation ✓ Mise en place	Diminuer la variabilité due aux transitions	RP PL RCA	0%	16/05/2006	En attente
Gestion des transitions	✓ Mise à jour de la procédure "Ligne 8 : règles de fabrication" ✓ Validation ✓ Mise en place	Eviter les transitions induisant de fortes variations de BV	RP MT	100%	06/02/2006	12/06/2006
Cascades de procédés calandre	Démarche participative auprès des opérateurs	Conduite du process	MT RCA	100%	13/02/2006	05/05/2006
	Plan d'expérience Calandre 19	Conduite du process	MT RCA	60%	07/04/2006	
	✓ acceptation de l'expérience			100%	07/04/2006	01-juin
	✓ étude du process			100%	07/04/2006	15-avr
	✓ étude bibliographique			100%	07/04/2006	30-avr
	✓ analyse et validation du système de mesure			100%	15/04/2006	19-mai
	✓ planification			100%	15/04/2006	30-mai
	✓ réalisation			50%	01/06/2006	
	✓ analyse des résultats			10%	01/06/2006	
	✓ formalisation du modèle + vérification			0%		
Finalisation	✓ mise en place du modèle sur machine			0%		
	✓ Elaboration des boucles de réaction rapide ✓ Mise en place dans ODIL	Conduite du process	RCA	0%		

Figura 25: Ficha PDCA do projeto

Fonte: elaborado pelo autor

ANEXO II: PONTOS DOE

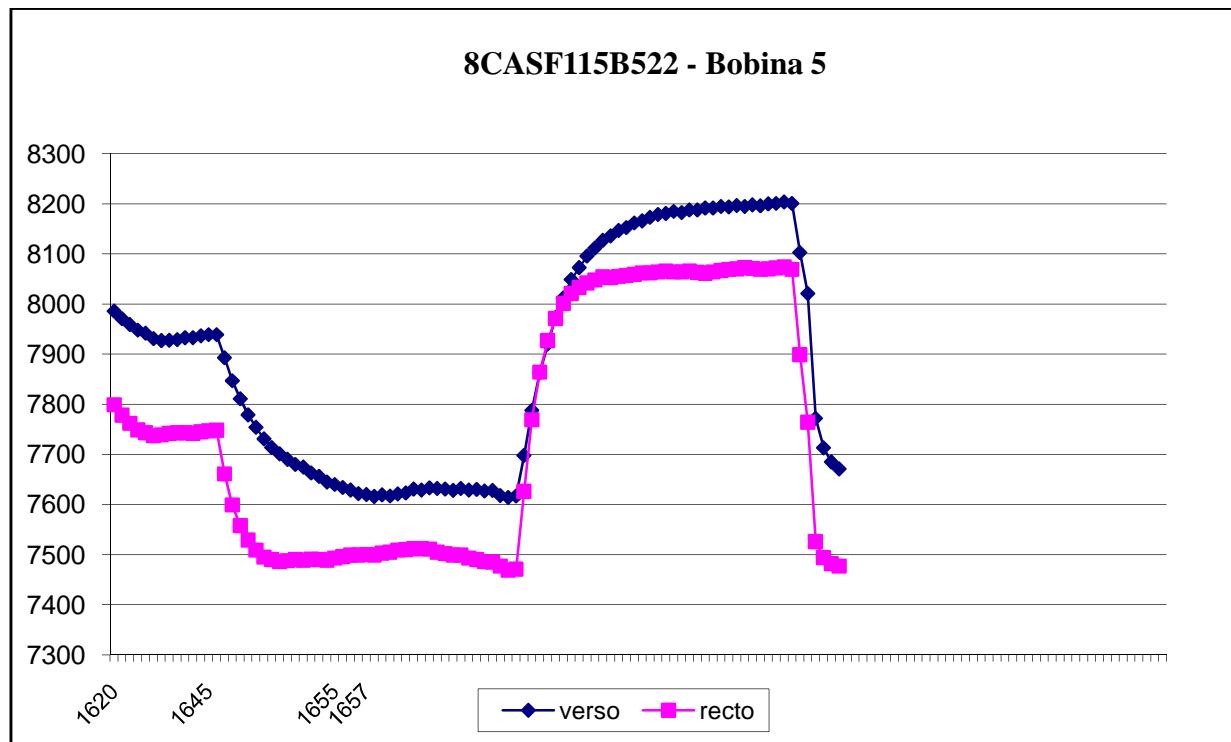


Figura 26: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 5

Fonte: elaborado pelo autor

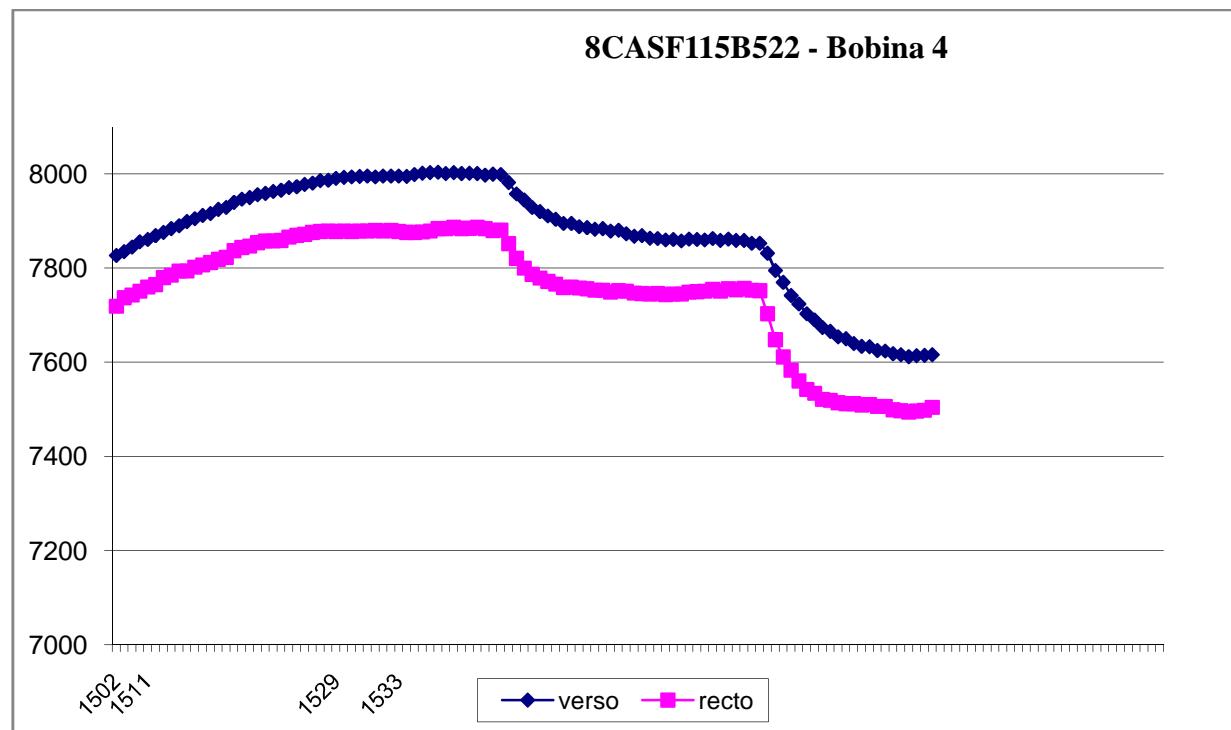


Figura 27: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 4

Fonte: elaborado pelo autor

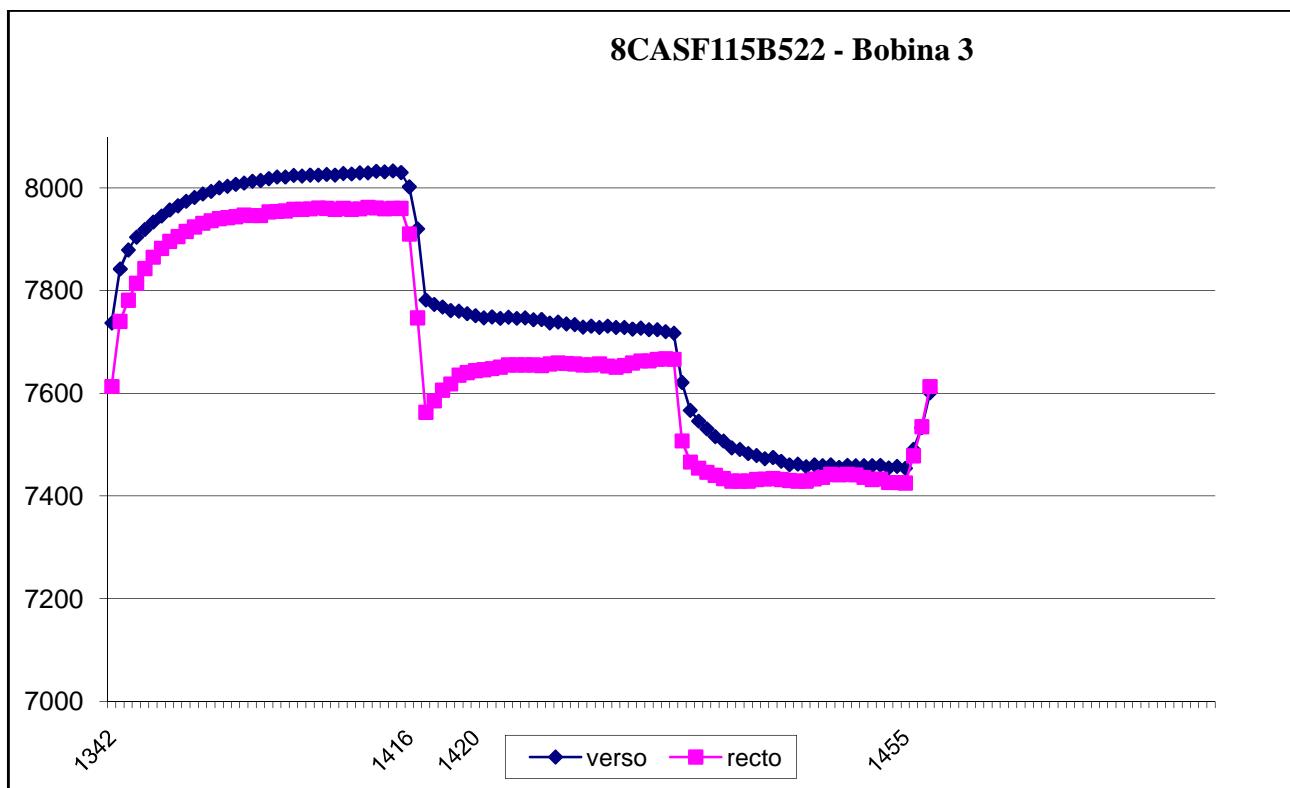


Figura 28: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 3

Fonte: elaborado pelo autor

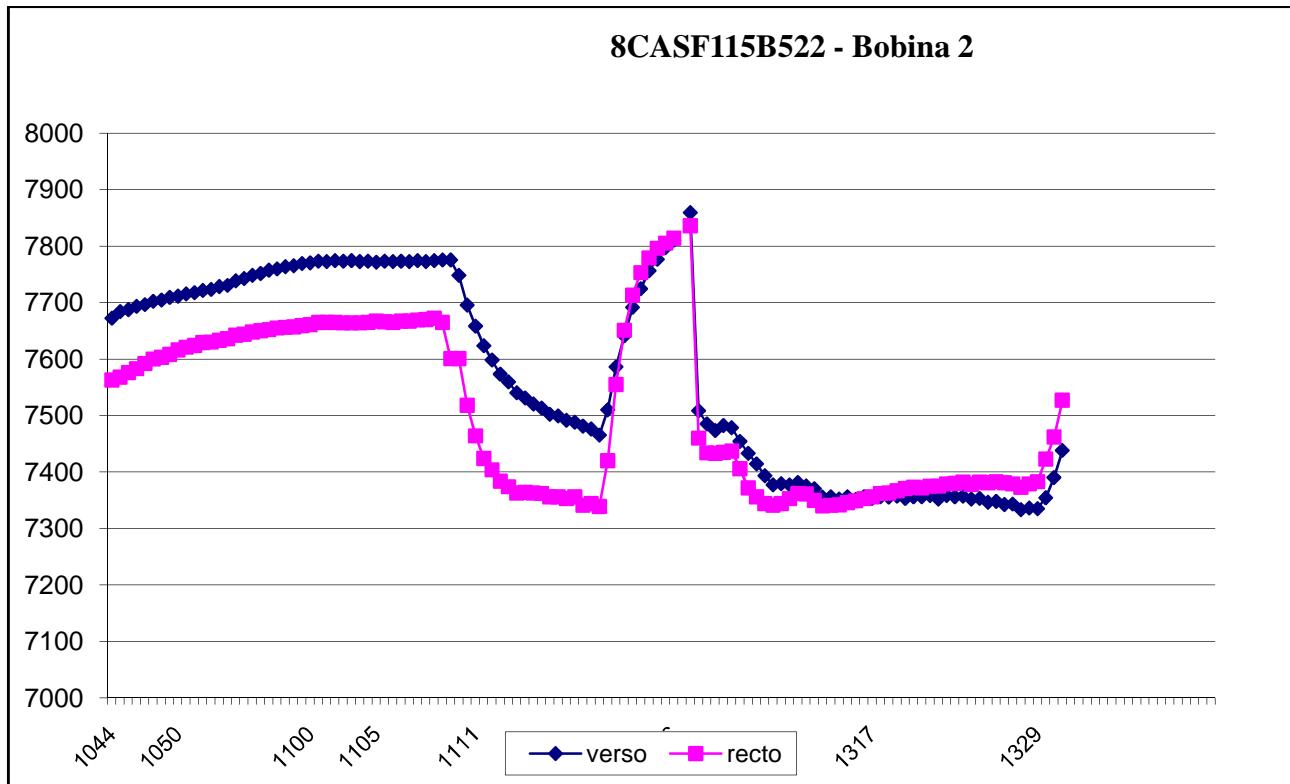


Figura 29: pontos doe – 8CASF115B22, bobina 2

Fonte: elaborado pelo autor

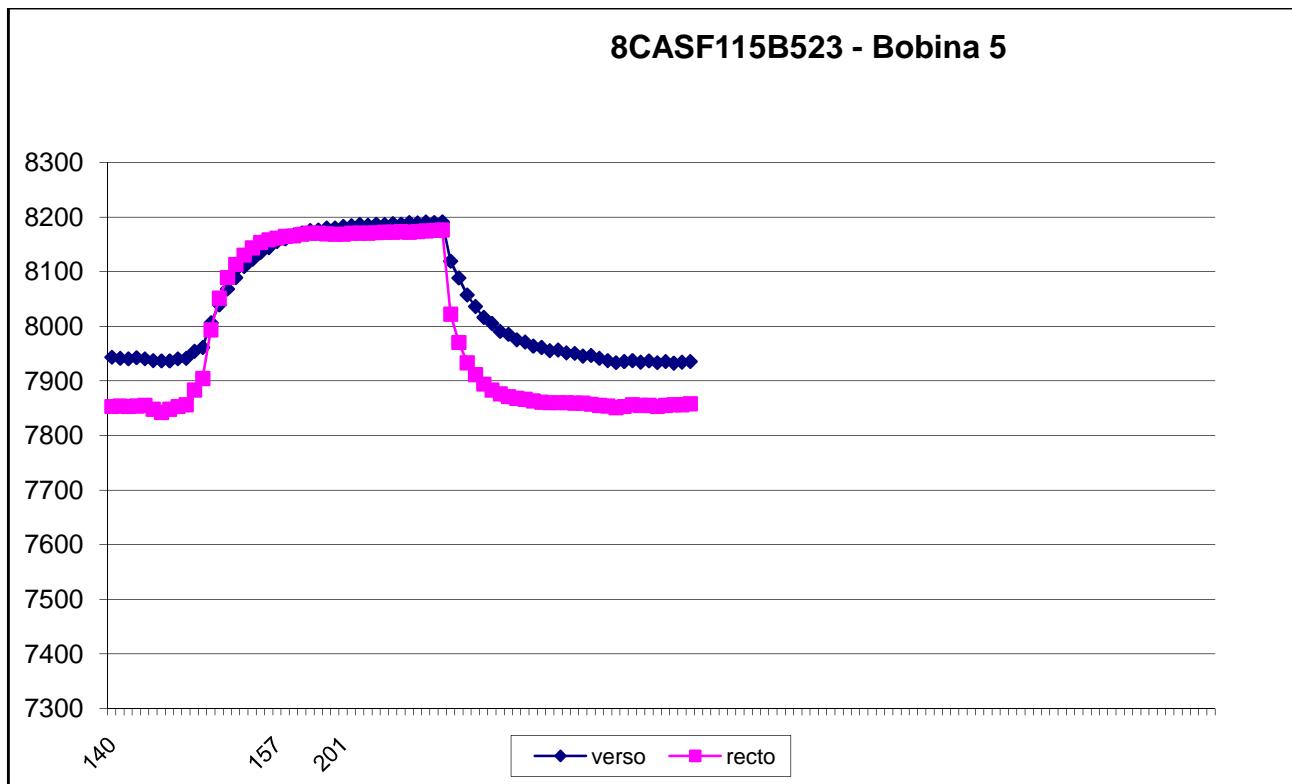


Figura 30: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 5

Fonte: elaborado pelo autor

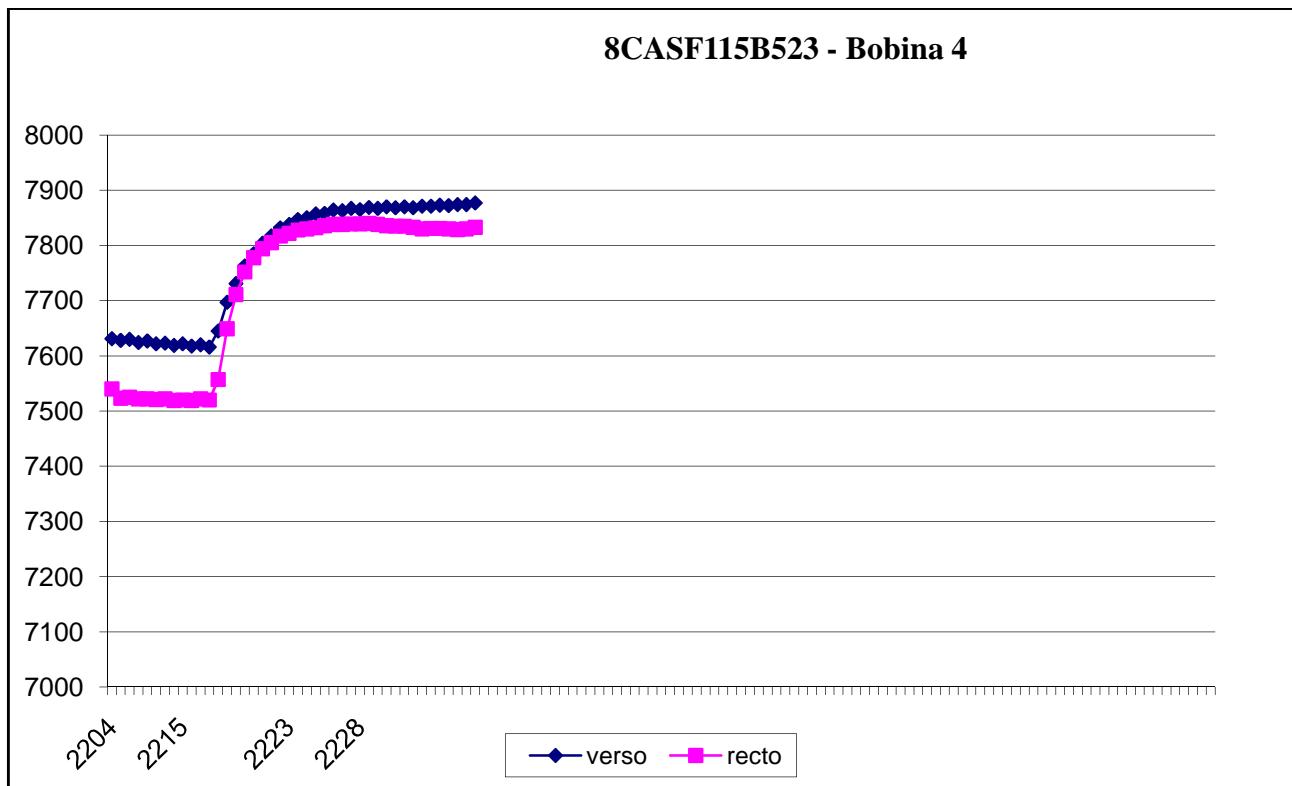


Figura 31: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 4

Fonte: elaborado pelo autor

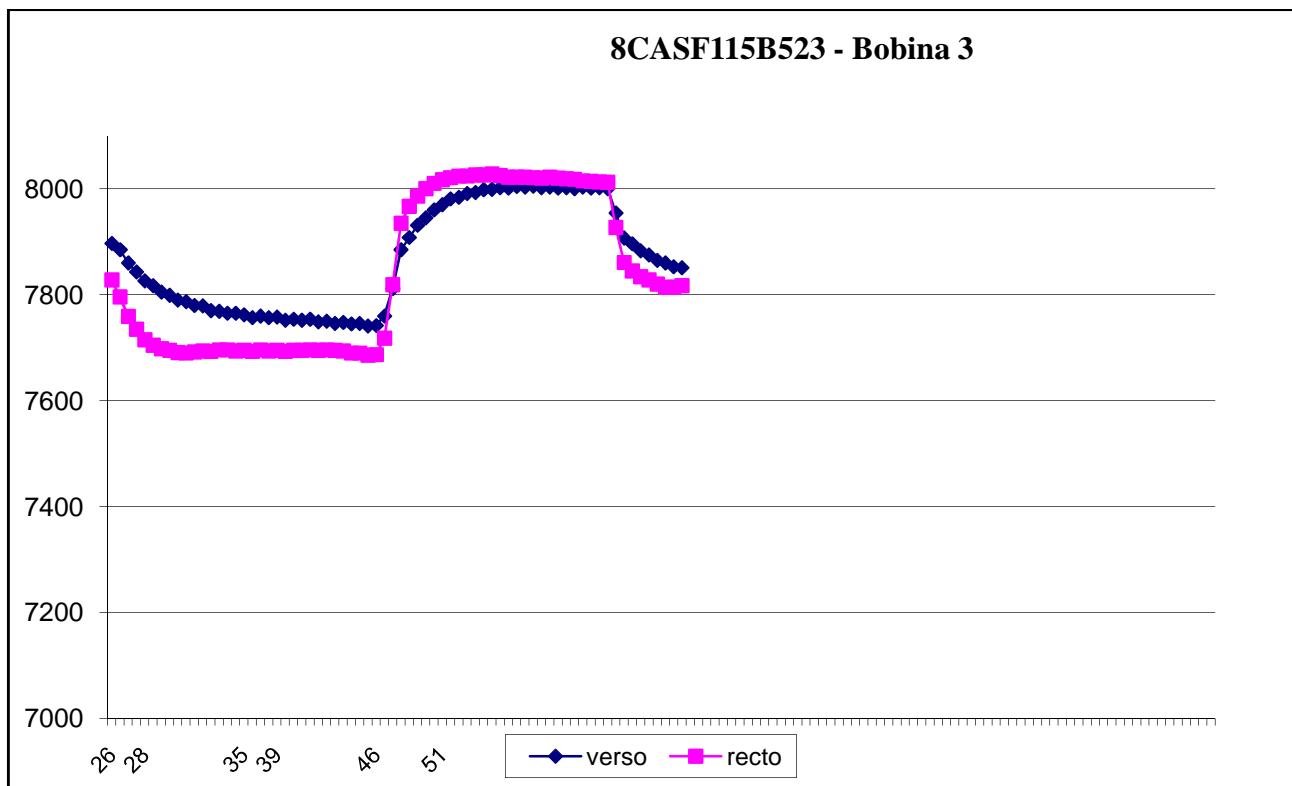


Figura 32: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 3

Fonte: elaborado pelo autor

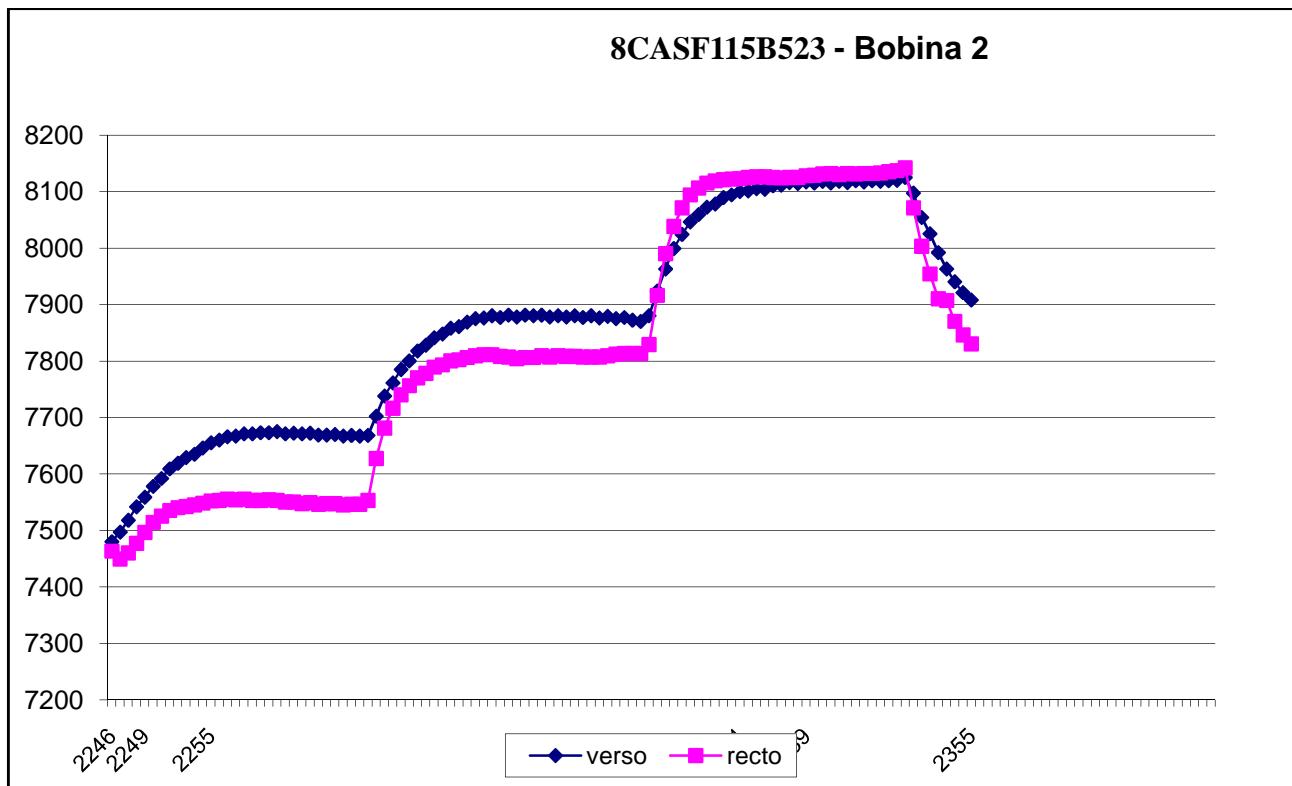


Figura 33: pontos doe – 8CASF115B23, bobina 2