ALINE BASSO DE OLIVEIRA

MELHORIA DO PROCESSO HATSCHEK, POR MEIO DE TRATAMENTO DE DADOS HISTÓRICOS, PARA FABRICAÇÃO DE TELHAS ONDULADAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2010

ALINE BASSO DE OLIVEIRA

MELHORIA DO PROCESSO HATSCHEK, POR MEIO DE TRATAMENTO DE DADOS HISTÓRICOS, PARA FABRICAÇÃO DE TELHAS ONDULADAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientadora: Prof. Dr.
Maria Elena Santos Taqueda

São Paulo
2010

DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho aos meus pais Reginaldo e Arlete,
aos meus irmãos Anderson e Fábio e
ao meu noivo Paulo Ricardo”.

AGRADECIMENTOS

Sem uma ótima orientação, toda minha dedicação não seria suficiente para o sucesso dessa dissertação. Portanto, agradeço a professora Dra. Maria Elena Santos Taqueda, pela orientação que contribuiu para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos colegas de projeto, Luiz Fernando Marchi Júnior, Dr. Holmer Savastano Jr., Dr. Vanderley Moacyr John, Dr. Sérgio Francisco dos Santos e Paulo Doniseti da Silva, pelas contribuições técnicas, apoio e confiança, proporcionando a consolidação deste trabalho.

A empresa Infibra Ltda., pela ajuda financeira proporcionando uma maior satisfação na elaboração deste trabalho.

A empresa Projectus e aos meus colegas de trabalho, pela compreensão e apoio durante estes anos de dedicação.

Ao Dr. Tah Wun Song, pela indicação deste mestrado e os conselhos desde a graduação até hoje.

À Dra. Jeanne Aparecida Giroto e amiga, pela importantíssima contribuição para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais que me conduziram até aqui e sempre me incentivaram a estudar.

Aos meus irmãos que serviram de orgulho e de exemplo para a escolha da minha profissão.

Ao meu noivo Paulo e eterno companheiro, por sua paciência, compreensão e por não me deixar desistir dos meus objetivos.

A todos aqueles que participaram diretamente ou indiretamente neste trabalho e na minha vida.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela infra-estrutura e oportunidade de desenvolvimento.

RESUMO

As telhas de cimento-amianto são utilizadas mundialmente nas construções comerciais, residenciais e industriais. O amianto foi a primeira aplicação de fibra natural em escala industrial. Esta fibra foi incorporada na forma do mineral (asbesto) como reforço de matrizes à base do cimento. O processo de fabricação de telhas de cimento-amianto mais utilizado mundialmente foi patenteado em 1900 por Ludwig Hatschek, recebendo o mesmo nome. O objetivo deste trabalho foi a melhoria do processo industrial (Hatschek) de fabricação de telha de cimento-amianto, com o uso de métodos estatísticos. Inicialmente as variáveis mais influentes no processo foram identificadas empregando-se o teste de correlação de Pearson e o Cp de Mallows que permitiu a escolha do melhor subconjunto da regressão (R^2, R^2ajustado, Cp de Mallows e o desvio padrão do modelo). A seleção dessas variáveis permitiu a construção de modelos de regressão para o processo, para as respostas resistência mecânica e densidade da telha. Devido à análise de duas respostas, foi realizada uma otimização numérica por meio da função desejabilidade (“desirability function”), que é baseada na idéia de que a qualidade de um produto ou processo que tem múltiplas respostas depende de encontrar as variações do processo que atendem a todas as restrições impostas, sejam elas econômicas ou normas aplicáveis ao produto final. Com o resultado da otimização estabeleceram-se faixas de variação das variáveis mais influentes, que permitissem a operação do processo sob controle. Também, pode ser concluído que para a densidade de ambas as telhas (5 mm e 6 mm) encontraram-se modelos coerentes para serem usados mesmo após alguma modificação na máquina, enquanto que para a resistência os parâmetros dos modelos devem ser reajustados sempre que houver alguma modificação durante a parada da máquina.

Palavras-chave: Processo Hatschek. Cimento-amianto. Correlação de Pearson. Cp de Mallows. Regressão. Otimização.

ABSTRACT

Roofing tiles of the asbestos cement composites are used world-wide in the commercial, residential and industrial constructions. Asbestos was the first natural fiber application in industrial scale. This fiber was incorporated into the cimentitious matrices to overcome this weakness. The manufacturing process of asbestos-cement tiles most commonly used worldwide was patented in 1900 by Ludwig Hatschek, which gave his own name to this procedure. Considering that, this study aimed to improve the manufacturing process of roofing tiles of the asbestos cement composites, using several statistical methods. Firstly, the most influent variables were identified using the Pearson Correlation test and the Mallows' Cp test, which provided the choice of the best subsets regression (R^2, R^2 adjusted, Mallows' Cp and the standard deviation of this empirical model). The selection of these variables allowed the construction of regression models for the mechanical resistance and tile density responses. In order to fulfill the requirement of an appropriate analysis for two responses, a numerical optimization by means of desirability function was applied. This optimization is based on the premise that a product quality or process having multiple responses depends on finding all the variations that fulfill the imposed constraints. Even if these constraints were economic or norms applied to the final product. The optimization results established ranges of variation including the most influents variables, i.e., the ones that allow the process to run under control. Also, we conclude that for the density of both tiles (5 mm and 6 mm) were found consistent models to be used even after some eventual change in machine. For the resistance, however, the parameters of the models must be readjusted whenever it has some modification during the shutdown of the machine.

Keywords: Hatschek process. Asbestos cement. Pearson's correlation. Cp of Mallows. Regression. Optimization.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do efeito das fibras no desempenho da tração dos compósitos cimentícios.....17
Figura 2 – Crisotila obtida nas minas de Blevedere Moutain, Vermont.....21
Figura 3 – Tremolita encontrada em El Dorado, Califórnia.....22
Figura 4 – Esquema do processo Hatschek para a produção de telhas de fibrocimento.....24
Figura 5 – Processo de fabricação da telha (Processo Hatschek).....36
Figura 6 – Dispositivo de ensaio de flexão (NBR-15210-2, 2005).....43
Figura 7 – Representação esquemática da sequência de etapas a serem realizadas para a análise estatística.....44
Figura 8 – Carta dos Valores Individuais para eliminação de “outliers” da variável resistência para a telha com espessura de 5 mm.....48
Figura 9 – Modelo da matriz de correlação de Pearson da resposta resistência para telha de 5 mm.....53
Figura 10 – Resíduos dos modelos ajustados para a resistência com e sem a influência das matérias-primas para espessura da telha de 5 mm.....84
Figura 11 – Resíduos dos modelos ajustados para a densidade com e sem a influência das matérias-primas para espessura da telha de 5 mm.....86
Figura 12 – Resíduos dos modelos ajustados para a resistência com e sem a influência das matérias-primas para espessura da telha de 6 mm.....88
Figura 13 – Resíduos dos modelos ajustados para a densidade com e sem a influência das matérias-primas para espessura da telha de 6 mm.....90
Figura 14 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global de 0,922.....92
Figura 15 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global 0,876.....93

Figura 16 - Condições para as variáveis x_1, x_2 e x_3, para obtenção da Desirability global 0,860.....94
Figura 17 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global de 0,847.....95
Figura 18 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global 0,828.....96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e do polipropileno.....18
Tabela 2 – Compostos principais do cimento Portland.....19
Tabela 3 – Limites usuais de composição de cimento Portland.....20
Tabela 4 – Produção Mundial do Amianto em 2006.....23
Tabela 5 – Seis variedades de asbestos regulamentadas nos Estados Unidos.....23
Tabela 6 – Exemplo de planilha organizada de dados históricos.....49
Tabela 7 – Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.....55
Tabela 8 – Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.....56
Tabela 9 – Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.....57
Tabela 10 – Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.....58
Tabela 11 – Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.....60
Tabela 12 – Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.....61
Tabela 13 – Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.....62
Tabela 14 – Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.....63
Tabela 15 – Codificação das Variáveis Independentes.....64
Tabela 16 – Exemplo da planilha com variáveis independentes codificadas.....67
Tabela 17 – Variáveis mais importantes para resposta resistência com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.....68
Tabela 18 – Variáveis mais importantes para resposta resistência sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.....69
Tabela 19 – Variáveis mais importantes para resposta densidade com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.....70

Tabela 20 – Variáveis mais importantes para resposta densidade sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.....71
Tabela 21 – Variáveis mais importantes para resposta resistência com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.....72
Tabela 22 – Variáveis mais importantes para resposta resistência sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.....73
Tabela 23 – Variáveis mais importantes para resposta densidade com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.....74
Tabela 24 – Variáveis mais importantes para resposta densidade sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.....75
Tabela 25 – Dados da resistência e densidade sem a influência das matérias-primas para espessura 5,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos.....77
Tabela 26 – Dados da resistência e densidade com a influência das matérias-primas para espessura 5,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos.....78
Tabela 27 – Dados da resistência e densidade sem a influência das matérias-primas para espessura 6,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos.....80
Tabela 28 – Dados da resistência e densidade com a influência das matérias (peso da prensa de 2560 kg) para espessura de 6 mm (novembro de 2008) 3 comparação entre os valores medidos e preditos.....81
Tabela 29 – Dados da resistência e densidade com a influência das matérias-primas (peso da prensa de 3500 kg) para espessura 6,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos.....82
Tabela 30 – Valores para a função “desirability” (D), para a otimização da resistência e da densidade para a espessura de 5,0 mm.....92
Tabela 31 – Valores para a função “desirability” (D), para a otimização da resistência e da densidade (com a nova restrição de 1,45<dens.<1,51) para a espessura de 6,0 mm.....94
Tabela 32 – Valores para a função “desirability” (D), para a otimização da resistência e da densidade para a espessura de 6,0 mm.....95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m_{ss}	Massa de sólido seco
m_{pf}	Massa do papel de feltro
Dapar, Dens. Apar. Manta	Densidade aparente da manta
UM, Umid. Manta	Umidade da manta
UP, Umid. Película	Umidade da película
PU	Peso úmido
PI	Peso imerso em água
PS	Peso seco
Plinear	Pressão linear
VelFeltro, Veloc. Feltro	Velocidade do feltro
DAT	Densidade aparente da telha
Psat	Peso saturado
LimpSec., Limp. Feltro	Limpeza e secagem do feltro
SecPel.	Secagem da película
Antiespum.	Antiespumante
Resist.	Resistência
Monopel.	Monopelícula
Gram., Gramat.	Gramatura
Resíduo MP.	Resíduo da matéria-prima
Perm.	Permeabilidade
Cod	Variável codificada
Pred.	Predita
Obs.	Observada
Rc	Resistência com influência das matérias-primas
Rs	Resistência sem influência das matérias-primas
Dc	Densidade com influência das matérias-primas
Ds	Densidade sem influência das matérias-primas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 15
3 REVISÃO DE LITERATURA 16
3.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS E FIBROCIMENTO 16
3.1.1 Cimento 19
3.1.2 Amianto 21
3.1.3 Processo de fabricação da telha de fibrocimento 24
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA 25
3.2.1 Coleta de Dados 25
3.2.2 Codificação das Variáveis 26
3.2.3 Teste de Correlação de Pearson 27
3.2.4 Determinação do Melhor Subconjunto de Regressão 28
3.2.5 Regressão Linear 29
3.2.6 Otimização de um Processo considerando respostas múltiplas 32
4 MATERIAIS E MÉTODOS 34
4.1 DESCRIÇÃO GERAL DA UNIDADE PRODUTIVA 34
4.2 VARIÁVEIS USUAIS DE CONTROLE 37
4.2.1 Variáveis medidas em linha 37
4.2.2 Variáveis cujas medidas são realizadas no laboratório 38
4.3 ANÁLISE LABORATORIAL DAS VARIÁVEIS 38
4.3.1 Determinação da concentração de sólidos 39
4.3.2 Determinação da densidade aparente da manta (Dapar) e das umidades da manta e da película (UM e UP) 40
4.3.3 Variáveis cujos valores são obtidos a partir dos valores de outras variáveis 41
4.3.4 Determinação das variáveis resposta: densidade (D) e resistência (R) da telha 42
4.4 LEVANTAMENTO DOS DADOS HISTÓRICOS 43
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA 44
4.5.1 Codificação das variáveis independentes 44
4.5.2 Teste de correlação de Pearson 45
4.5.3 Estabelecimento dos Melhores Subconjuntos para Obtenção do Modelo da Regressão 45

4.5.4 Otimização **46**
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **47**
5.1 DADOS HISTÓRICOS **47**
5.2 TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON **52**
5.3 ESCOLHA DO MELHOR SUBCONJUNTO DA REGRESSÃO **54**
5.4 CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTE **64**
5.5 PREDIÇÃO DOS MODELOS PARA O PROCESSO **68**
5.5.1 Espessura da telha de 5 mm. **68**
5.5.2 Espessura da telha de 6 mm. **72**
5.6 VALIDAÇÃO DOS MODELOS **76**
5.6.1 Análise dos modelos da resistência com e sem influência da matéria-prima para telhas de 5 mm **83**
5.6.2 Análise dos modelos da densidade com e sem influência da matéria-prima para telhas de 5 mm **85**
5.6.3 Análise dos modelos da resistência com e sem influência da matéria-prima para telhas de 6 mm **87**
5.6.4 Análise dos modelos da densidade com e sem influência da matéria-prima para telhas de 6 mm **89**
5.7 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO **91**
5.7.1 Telha com espessura de 5 mm. **91**
5.7.2 Telha com espessura de 6 mm. **93**
6 CONCLUSÕES **97**
6.1 CONCLUSÕES **97**
6.2 SUGESTÕES **97**
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **98**

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações do homem é com seu bem estar, conforto e segurança. Estas preocupações não são de hoje, visto que o homem utilizava o fogo e as cavernas para se proteger dos ataques de animais e das mudanças climáticas.

O risco de ataques de animais já não existe mais, porém continuamos sujeitos às alterações climáticas (frio, calor, chuva, seca, etc.), gerando assim a necessidade de construções que atendam aos anseios do homem.

Com o passar dos anos as formas das construções e materiais utilizados foram sendo aprimorados. Há uma grande diversidade de materiais, como: isolantes térmicos, isolantes acústicos, impermeabilizantes, etc., que proporcionam a segurança do homem.

A utilização das telhas é a forma mais comum de proteção contra chuva, radiação solar e até mesmo na proteção de outros materiais utilizados na construção como da pintura, de madeiras, etc. As telhas podem ser principalmente de cerâmica ou de fibrocimento, sendo que as de fibrocimento oferecem facilidade de manuseio e armazenamento, gerando economia no transporte, além de ser resistente e ter baixo custo.

Para a produção de telhas de fibrocimento, as principais matérias-primas utilizadas são o cimento, a água, minerais e uma pequena porcentagem de fibras.

Os compósitos de cimento são tipicamente caracterizados por serem quebradiços, com baixa resistência e capacidade de deformação. Fibras são incorporadas nas matrizes cimentícias, tornando-as mais resistentes, dúcteis, tenaz e aumentando sua durabilidade (Kuder, Shah, 2009). Estas fibras podem ser naturais (amianto, celulose,etc.) ou artificiais (fibra de vidro, etc.). (Negro et al., 2005)

A utilização de materiais alternativos (sem adição de amianto) apresenta dificuldades no processo, por gerar uma distribuição desordenada das fibras (como a polpa de celulose) no interior da matriz (fibrocimento) e consequentemente necessita aumentar a relação de água e cimento. (Couts, Ridikas, 1982)

As telhas de cimento-amianto são utilizadas mundialmente nas construções comerciais, residenciais e industriais. Devido a esta utilização, em mais de cem

países, são produzidos cerca de 30 milhões de toneladas anuais de telhas onduladas.

O amianto foi a primeira aplicação de fibra natural em escala industrial. Esta fibra foi incorporada na forma do mineral (asbesto) como reforço de matrizes à base do cimento. O processo de fabricação de telhas de cimento-amianto foi patenteado em 1900 por Ludwig Hatschek, recebendo o mesmo nome. (Couts, Ridikas, 1982)

Apesar de ser um processo relativamente simples e antigo, não é encontrado facilmente na literatura o detalhamento deste processo, como cada etapa, quais são as variáveis envolvidas ao longo do mesmo, etc. Portanto o objetivo deste trabalho é observar o processo Hatschek de fabricação de telhas, detalhar e conhecer o comportamento de cada variável do processo, possibilitando controlar o mesmo.

Visando melhorar o controle do processo de fabricação de telhas, este trabalho identifica as variáveis que exercem maior influência ao processo, a partir do tratamento de dados históricos. Estes dados permitiram relações lineares das variáveis de processo nas variáveis que conferem qualidade a telha como resistência e densidade. Os métodos estatísticos foram empregados de modo a obedecer restrições impostas ao processo por razões econômicas e obedecendo as normas aplicáveis ao produto final.

Montgomery (2004), menciona 8 etapas para a resolução de problemas de interesse da sociedade pela aplicação de princípios científicos, são eles:

1. Desenvolver uma descrição clara e concisa do problema;
2. Identificar, no mínimo tentar, os fatores importantes que afetam esse problema ou que possam desempenhar um papel em sua solução;
3. Propor um modelo para o problema, usando conhecimento científico ou de engenharia do fenômeno em estudo. Esclarecer quaisquer limitações ou suposições ao modelo;
4. Conduzir experimentos apropriados e coletar dados para testar e validar o modelo-tentativa ou conclusões feitas nas etapas 2 e 3;
5. Refinar o modelo com base nos dados observados;
6. Manipular o modelo de modo a ajudar o desenvolvimento da solução do problema;
7. Conduzir um experimento para confirmar que a solução proposta para o problema é efetiva e eficiente;
8. Tirar conclusões ou fazer recomendações baseadas na solução do problema.

Existem três categorias principais do estado de conhecimento sobre um fenômeno que se quer estudar. Em um dos extremos, existem aqueles já bem conhecidos e estudados, cujos modelos que descrevem seu mecanismo físico são conhecidos e chamados de modelos mecanísticos. Em uma situação intermediária estão os fenômenos que, embora seus mecanismos físicos sejam conhecidos, os modelos que os descrevem são muito complexos para permitir uma solução analítica sem muitas simplificações. E, por fim, existe o extremo em que não se conhece ainda nada sobre o mecanismo físico que descreve o fenômeno. Neste caso, para fenômenos complexos ou desconhecidos, os modelos aproximados por métodos analíticos são denominados de modelos empíricos. Um bom modelo empírico pode ser manipulado por um técnico ou um cientista da mesma forma que um modelo mecanístico. (Taqueda, 2009)

Para conhecer melhor o fenômeno a ser estudado, o capítulo 2, apresentará a revisão de literatura, abordando a utilização, os componentes e produção das telhas de fibrocimento.

Os materiais e métodos são descritos no capítulo 3, para conhecimento detalhado do processo, da coleta e seleção das variáveis, além das análises estatísticas.

Na seqüência são apresentados os resultados (capítulo 4), que são discutidos no capítulo 5, e finalizando com as conclusões obtidas no capítulo 6.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é observar o processo Hatschek de fabricação de telhas, detalhar e conhecer o comportamento de cada variável do processo, possibilitando controlar o mesmo.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para alcançar o objetivo geral é necessário identificar as variáveis mais influentes ao processo. Aplicando métodos estatísticos sobre estas variáveis, com base nas restrições impostas por razões econômicas e obedecendo as normas aplicáveis ao produto final, serão obtidas melhores condições operacionais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordadas as matérias-primas utilizadas na produção da telha, bem como seu processo. Na sequência a esta explanação, são detalhados os métodos analíticos aplicados ao conjunto de dados observados durante todo o processo de fabricação de telhas.

3.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS E FIBROCIMENTO

Compósitos cimentícios são tipicamente caracterizados por serem quebradiços, com baixa resistência à tração e capacidade de deformação. Para agregar características como resistência, tenacidade, ductibilidade e durabilidade, os compósitos cimentícios são reforçados com fibras, denominando-se de fibrocimento. (Kuder, Shah, 2009)

Uma matriz de materiais cimentícios, sem reforço de fibras (“plain unreinforced cementitious”), possui uma leve resposta à tensão, com baixa resistência à tração e ductibilidade. Os compósitos reforçados convencionalmente com fibras (“fiber-reinforced composites” - FRC), possuem um baixo volume de fibras (entre 0,5 e 2,0%), também têm uma leve resposta à tensão, mas apresentam um aumento na ductibilidade. Já para os compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (“high performance fiber-reinforced composites” - HPFRCC), há um aumento no limite elástico, entende-se como limite elástico o ponto onde aparece a primeira macro fissuras. Antes disso, as trincas impõem o comportamento seguido por uma rigidez causada pela formação de múltiplas rachaduras não extensas. Finalmente uma deformação branda causada por fissuras extensas. Este tipo de compósito é reforçado com fibras em aproximadamente 30 a 35% do seu volume. (Kuder, Shah, 2009)

Esquematicamente, o comportamento da tração dos compósitos cimentícios esta apresentado na Figura 1.

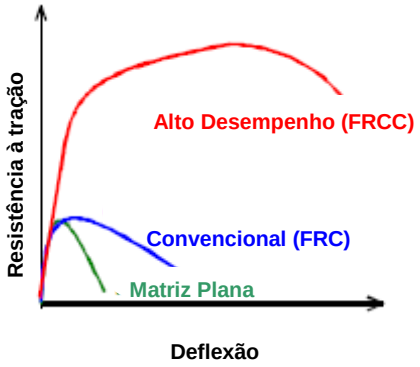


Figura 1 – Representação esquemática do efeito das fibras no desempenho da tração dos compósitos cimentícios. (Adaptado a partir de Kuder, Shah, 2009)

Observando-se a Figura 1, é possível verificar um grande aumento na resistência à tração com o aumento da quantidade de fibras adicionadas, principalmente quando são aplicadas deflexões maiores, devido ao aumento do limite elástico.

As fibras utilizadas no reforço dos compósitos cimentícios (fibrocimento) podem ser orgânicas e inorgânicas, e ambas são divididas em naturais ou artificiais.

As fibras naturais são obtidas de vegetais e não sofreram nenhum processo industrial, antes de serem utilizadas como reforço.

Como exemplos de fibras inorgânicas naturais podem ser citadas as de amianto e a sepiolita, e de fibras inorgânicas artificiais óxido de alumínio e fibra de vidro. Para as fibras orgânicas naturais encontram-se a celulose e lã, e para as artificiais os poliésteres. (Silva, 2002)

Há também a divisão das fibras devido a sua elasticidade (ver Tabela 1), que podem ser de alto (amianto) ou baixo módulo (polipropileno), definindo suas aplicações.

As fibras de alto módulo de elasticidade aumentam a resistência à tração nos compósitos cimentícios. Por outro lado, as de baixo módulo de elasticidade são mais resistentes ao impacto e aumentam consideravelmente a tenacidade dos compósitos (é possível trabalhar no estágio pós fissurado). (Silva, 2002)

A eficiência da fibra no reforço do cimento depende de muitos fatores, inclusive das propriedades das fibras, assim como da sua geometria, dimensões, tipo e dispersão. (Kuder et. Al., 2007)

A má distribuição das fibras no interior da matriz prejudica a sua função de reforço. Já o aumento da relação de água/cimento causado pela adição de água, diminui a

resistência, além da durabilidade do produto. A adição de água é necessária devido a alta absorção das fibras (a mistura torna-se muito consistente). (Silva, 2002)

Uma alternativa para a retirada de excesso de água é a drenagem na rede das fibras (possível devido à abertura natural da rede), porém neste caso a mistura com baixa concentração perde partículas da matriz resultando também em perdas na resistência do produto. Estas perdas podem ser minimizadas com a redução da taxa de drenagem da mistura, que pode ser feito de duas maneiras; redução de água na mistura (impraticável no processo Hatschek) e redução natural da taxa drenagem na polpa da fibra (pode ter desvantagem). (Couts, Ridikas, 1982)

Na Tabela 1, são apresentadas as características físicas e mecânicas de algumas fibras.

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e do polipropileno. (Adaptado a partir de Silva, 2002)

Fibras	**Propriedades**				
	Massa específica (kg/m^3)	**Absorção Máxima (%)**	**Alongamento na ruptura (%)**	**Resist. à tração (MPa)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**
Coco	1177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Sisal	1370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Amianto	2200 a 2600	-	2,0	560 a 750	164
Polipro-pileno	913	-	22,3 a 26,0	250	2,0
Polpa de celulose (eucalipto)	1609	643,0	-	700	10 a 40

Estas características é que fazem com que o amianto ainda seja a fibra mais utilizada em produtos de fibrocimento.

No Brasil são produzidos mais de dois milhões de toneladas de produtos de fibrocimento, destinados principalmente ao mercado de telhas onduladas e caixa d' água. (Silva, 2002 apud Savastano, 2000)

Nos itens 3.1.1 e 3.1.2 serão detalhadas as matérias-prima principais para a fabricação das telhas de fibrocimento.

3.1.1 Cimento

Cimento é o nome dado a materiais ligantes usados com pedras, areia, etc. Sendo constituído principalmente por silicatos e aluminatos.

Como propriedades do cimento destacam-se a de endurecer mesmo dentro d'água e endurecimento rápido, pequena velocidade de desprendimento de calor ou resistência aos sulfatos.(Neville, 1997)

A classificação geral do cimento é feita a partir destas características, podendo ser cimento natural, Portland ou aluminoso.

Para a fabricação de telhas é comum a utilização de cimento Portland. Os principais constituintes desse cimento estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Compostos principais do cimento Portland (Neville, 1997)

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

A Tabela 3 mostra as faixas dos teores dos óxidos usuais no cimento Portland. (Neville,1997)

Tabela 3 – Limites usuais de composição de cimento Portland.

Óxidos	**Teor, %**
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0,5-0,6
MgO	0,5-4,0
Álcalis (equivalente em Na_2O)	0,3-1,2
SO_3	2,0-3,5

Os silicatos e aluminatos, em presença de água, originam uma massa firme e resistente, que nada mais é do que uma pasta de cimento endurecida. As maneiras pelas quais estes compostos reagem com a água podem ser pela incorporação direta de algumas moléculas de água (hidratação) ou por hidrólise.

O aluminato de cálcio hidratado forma um material prismático intersticial, muitas vezes na forma de placas achatadas rodeadas pelos silicatos de cálcio hidratados. Esta reação é muito rápida, resultando em um enrijecimento imediato da pasta, chamado de pega instantânea. (Neville,1997)

A velocidade de hidratação depende da granulometria das partículas de cimento, e para uma evolução rápida da resistência, é necessária uma grande superfície. Portanto as propriedades mecânicas do cimento hidratado dependem mais da estrutura física do que da composição química.

É provável que a resistência deste cimento hidratado seja devida a dois tipos de forças de coesão. Primeiro pela atração física entre as superfícies (forças de Van der Waals) e segundo por ligações químicas. (Neville, 1997)

3.1.2 Amianto

Durante os últimos 120 anos, tem ocorrido uma grande demanda de amianto ou asbestos (nomes genéricos de um mineral natural) algo em torno de dois milhões de toneladas por ano.

Asbestos naturalmente são apresentados como um silicato fibroso. O tamanho de suas fibras juntamente com sua estrutura química, torna os asbestos muito compatíveis com o cimento. (Negro et al., 2009)

Este mineral raramente ocorre em abundância suficiente para toda a necessidade comercial. Apenas seis tipos são encontrados em tal abundância, um do grupo das serpentinas e cinco do grupo dos anfibólios. Estes dois grupos possuem propriedades fisico-químicas semelhantes, porém apresentam composição e estrutura diferente. (Ross et al., 2008)

As serpentinas são minerais de silicatos hidratados de magnésio. A única variedade deste asbesto é crisotila, que cristaliza em forma de folhas onduladas, de estrutura única na natureza, já as outras cinco variedades de anfibólios caracterizam-se por estruturas de fios duplos. (Ross et al., 2008)

A crisotila está representada na Figura 2 e a tremolita (um dos tipos de anfibólio) é representada na Figura 3.

Figura 2 – Crisotila obtida nas minas de Belvedere Moutain, Vermont. As setas indicam a crisotila em uma rocha dilatada. (Fonte: Ross et al., 2008)

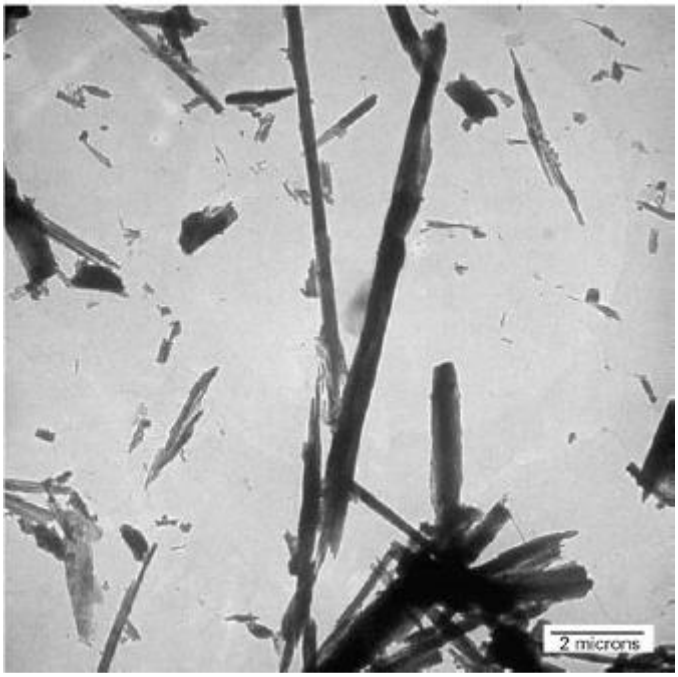


Figura 3 – Tremolita encontrada em El Dorado, Califórnia. (Fonte: Ross et al., 2008)

A única característica mineralógica em comum entre todos os tipos é a forma morfológica de feixe de polifilamentos de fibras que geralmente assumem quando cristalizados. (Ross et al., 2008)

Os asbestos possuem as seguintes propriedades fisico-químicas:

- Fibras longas;
- Alta resistência à tração e flexibilidade;
- Baixa condutividade térmica e elétrica;
- Alta absorbância;
- Alta estabilidade térmica e mecânica;
- Resistência a ácidos e bases.

Devido a estas propriedades os asbestos são muito importantes na indústria, sendo explorados a partir das últimas décadas do Século XIX. Desde então, mais de 95% das jazidas de minério de amianto foram exploradas para o comércio da crisotila (mais abundante). Atualmente estas jazidas se encontram na Rússia, China, Cazaquistão, Canadá e Brasil, como indicado na Tabela 4. (Ross et al., 2008)

Tabela 4 – Produção Mundial do Amianto em 2006 (DNPM, 2007)

País	Produção 10^3 (t)	(%)
Rússia	925	39,7
China	400	17,2
Cazaquistão	350	15,0
Canadá	240	10,3
Brasil	227	9,7
Zimbábue	110	4,7
Outros	80	3,4
Total	2332	100

O Brasil é o quinto produtor mundial de amianto (ou asbesto), uma vez que produz uma grande porcentagem de telhados de cimento-amianto, por ser uma alternativa prática e barata para as construções.

A única mina amiantífera em operação no Brasil é a Mina de Cana Brava. Esta mina é alto-suficiente e produz somente amianto do tipo crisotila.

As reservas de asbestos, grandes o suficiente para uso comercial são raras e somente cinco grupos do tipo anfibólio e um da serpentina são regulamentados, como indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Seis variedades de asbestos regulamentadas nos Estados Unidos. (Ross et al., 2008)

Nomenclatura Padrão Federal dos Asbestos (Nomenclatura Mineralógica)	Grupo de Cristal	Fórmula Química
Actinolita (Asbestos Actinolita)	Anfibólio	$Ca_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$
Amosita (Asbestos Grunerita)	Anfibólio	$Fe_7Si_8O_{22}(OH)_2$
Antofilita (Asbestos Antofilita)	Anfibólio	$Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$
Crisotila (Crisotila)	Serpentina	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Crocidolita (Asbestos Riebequita)	Anfibólio	$Na_2(Fe_3^{2+}Fe_2^{2+})Si_8O_{22}(OH)_2$
Tremolita (Asbestos Tremolita)	Anfibólio	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$

A crisotila se distingue quimicamente dos demais asbestos por possuir menor quantidade de sílica, oxigênio e maior quantidade do grupo hidroxila.

No próximo item será detalhado o processo de fabricação de telhas utilizando o cimento e o amianto como matérias-prima básicas.

3.1.3 Processo de fabricação da telha de fibrocimento

O processo original, chamado de processo úmido, foi desenvolvido para produção de uma grande variedade de placas planas. Posteriormente foi desenvolvido um processo chamado de seco para competir com o processo úmido. Atualmente o processo mais utilizado é o processo úmido mecânico, um dos mais conhecidos é o processo Hatschek. (Rosato, 1959)

O processo Hatschek é empregado na fabricação de papel e de telhas onduladas. Neste processo, uma suspensão de água, cimento, alguns minerais e fibras são misturados (1) e introduzidos em uma cuba, contendo cilindros envolvidos por uma tela. Estes cilindros recolhem uma quantia desta mistura e o excesso de água fica retido no interior do cilindro. As finas camadas formadas nestes cilindros são agrupadas em um feltro (2) que passa ao longo de caixas de vácuo (3), para retirar o restante da água. As camadas acumuladas seguem para um cilindro (4), que prensa, uniformizando o produto (5). (Negro et al., 2005)

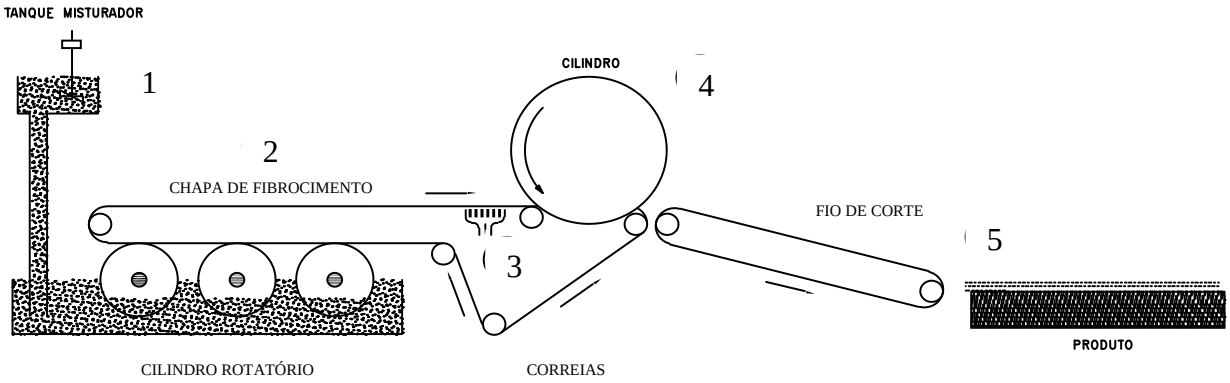


Figura 4 – Esquema do processo Hatschek para a produção de telhas de fibrocimento

No item 4.1, este processo é detalhado, destacando-se em cada etapa de operação as variáveis analisadas e no item 4.2 a forma de coleta destas variáveis.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística é utilizada no planejamento de novos produtos e sistemas, melhorando os projetos existentes e planejando, desenvolvendo e melhorando os processos de produção. Para possibilitar a análise estatística é necessário conhecer um conjunto de dados do processo.

3.2.1 Coleta de Dados

Os dados são quase sempre uma amostra que foi selecionada a partir de alguma população. Geralmente estes dados são coletados de duas maneiras.

A primeira maneira é a partir de estudo observacional. Nessa situação o processo ou sistema que está sendo estudado é observado e os dados são obtidos à medida que se tornam disponíveis. Freqüentemente em um estudo observacional, o engenheiro está interessado em usar os dados para construir um modelo empírico do sistema ou processo.

Os dados tratados neste trabalho, denominados de dados históricos, foram obtidos a partir do estudo observacional. Se questões aparecem, relativas a mudanças no processo, a história dos dados permite o discernimento sobre quais variáveis são responsáveis pela mudança. Estes estudos envolvem um conjunto muito grande de dados. (Montgomery, Runger, Hubele, 2004)

A segunda maneira pela qual os dados são obtidos é através de um planejamento de experimentos. Em um planejamento de experimentos, o engenheiro faz variações propositais nas variáveis controláveis (variáveis independentes) do processo ou sistema, observa os dados de saída resultantes (variáveis dependentes ou resposta), para conhecer como o processo ou sistema reage. Posteriormente, faz-se interferências nas variáveis que são responsáveis pelas mudanças observadas, a fim de obter o valor desejado da variável resposta. (Montgomery, Runger, Hubele, 2004)

Há dois tipos de variáveis, as quantitativas e as qualitativas.
As variáveis quantitativas consistem em números que representam contagens ou medidas.
As variáveis qualitativas podem ser separadas em diferentes categorias que se distinguem por alguma característica não-numérica. (Triola, 2008)
De posse dos dados de processo é feita a organização e tratamento dos mesmos.

3.2.2 Codificação das Variáveis

A codificação é um método utilizado para facilitar a construção de modelos experimentais, utilizando variáveis codificadas no lugar das variáveis coletadas. A codificação remove as unidades das variáveis coletadas, deixando as variáveis adimensionais, chamadas de variáveis codificadas.
A fórmula utilizada para codificação de uma variável, x_i, é:

$$x_i = \frac{2 * X_i - (X_{iL} + X_{iH})}{X_{iH} - X_{iL}} \quad (1)$$

Onde X_{iL} e X_{iH} são os valores mínimo e máximo da variável X_i, respectivamente.
A região definida, especificando os níveis codificados como ±1 para k fatores é uma região cuboidal no espaço k-dimensional.
Quando um fator tem três níveis quantitativos e o nível médio é a metade entre os níveis inferior e superior, a equação (1) produz os níveis codificados x_i = -1, 0, +1 associado com os valores baixo, médio e alto de X_i, respectivamente.
Há muitas vantagens no uso de variáveis codificadas no lugar das variáveis originais para obtenção de modelos polinomiais. As principais são:

- Facilidade computacional e maior precisão na estimativa dos coeficientes do modelo;
- Boa interpretação dos coeficientes estimados para o modelo.

As duas vantagens devem-se ao fato de que a matriz X'X nas variáveis codificadas é normalmente uma forma simplificada da matriz X'X das variáveis originais, pois na forma simplificada todos os valores C_{ij} com $i \neq j$ são iguais a zero, tornando X'X uma

matriz diagonal. No geral, a simplificação mais fácil é inverter a matriz X'X, e, como resultado, será obtida maior precisão na estimativa dos parâmetros do modelo computacional e redução do tempo de computação.

Qualquer equação polinomial linear nos valores de x_i equivale a uma equação de mesmo grau nos valores de X_i. (Khuri, Cornell, 1987)

3.2.3 Teste de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é utilizado para medir o grau de relação linear entre duas variáveis. O coeficiente de correlação assume um valor entre -1 e 1. Se uma variável tende a aumentar à medida que diminui a outra, o coeficiente de correlação é negativo. Inversamente se as duas variáveis tendem a aumentar, o coeficiente de correlação é positivo. Para um teste de correlação bicaudal:

H0: r = 0 versus H1: r ≠ 0 onde r é o coeficiente de correlação entre um par de variáveis.

Para as duas variáveis X e Y:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{Xi} - \overline{X}) \times (\mathrm{Yi} - \overline{Y})}{(N-1) \times \mathrm{Sx} \times \mathrm{Sy}} \tag{2}$$

Onde:

r= Coeficiente de correlação entre um par de variáveis;

$\overline{X}$ = Média da amostra para a primeira variável;

Sx = Desvio padrão para a primeira variável;

$\overline{Y}$ = Média da amostra para a segunda variável;

Sy = Desvio padrão para a segunda variável;

N = Número de observações.

O p-valor é utilizado em testes de hipóteses, onde se quer rejeitar ou deixar de rejeitar uma hipótese nula. O valor-p representa a probabilidade de fazer um erro do tipo I, que é a probabilidade de rejeição da hipótese nula quando ela é verdadeira.
Quanto menor o valor-p, menor é a probabilidade de que estaria cometendo um erro ao rejeitar a hipótese nula.
Um pequeno valor-p é uma indicação de que a hipótese nula é falsa. Conclui-se que o coeficiente de correlação é diferente de zero e que existe uma relação linear. (Montgomery, 2005)

Uma forma orientativa de interpretar o valor de p é:

Correlação fraca → $0{,}05 < p \leq 0{,}1$
Correlação forte → $0{,}01 < p \leq 0{,}05$
Correlação fortíssima → $p \leq 0{,}01$

3.2.4 Determinação do Melhor Subconjunto de Regressão

O melhor subconjunto da regressão identifica o melhor ajuste para o modelo da regressão que pode ser construído com a predição de variáveis especificadas. Todas as possibilidades de subconjuntos são avaliadas, começando por um modelo com um preditor, posteriormente com dois preditores, assim por diante.
Os modelos são avaliados baseados no R^2, no $R^2_{ajustado}$, no Cp de Mallows e no s(quadrado da média dos desvios quadráticos).
Para conhecer quanto a variação da resposta é explicada pelo modelo utiliza-se o coeficiente de determinação (R^2). Quanto maior o R^2, melhor o modelo se ajusta aos dados coletados. A equação utilizada para o cálculo do R^2 é:

$$R^2 = 1 - \frac{\mathrm{SSE}}{\mathrm{SST}} \tag{3}$$

Onde SSE é a soma dos quadrados do erro e SST é a soma dos quadrados total.
O coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajustado}$) é útil para comparar modelos com diferentes números de preditores e pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \frac{\text{MSE}}{\text{SST}/\text{DF}_{\text{total}}} \tag{4}$$

Onde MSE é a média dos desvios quadráticos dos erros e DF_{total} é o número de grau de liberdade total. (Montgomery, 2005)

A intenção de Colin Mallows ao criar o Cp de Mallows (Cp), era uma forma de facilitar a comparação entre muitas alternativas dos subconjuntos da regressão, para medir a qualidade da predição do modelo.

Quando o valor de Cp é pequeno, significa que a predição do modelo apresenta pequenas variações para estimar os verdadeiros coeficientes da regressão e predizer futuras respostas.

O Cp é dado pela equação:

$$\text{Cp} = \frac{\text{SSE}_p}{\text{MSE}_m} - (n - 2\text{p}) \tag{5}$$

Onde SSE_p é a soma dos quadrados dos erros (SSE) para o melhor modelo para p parâmetros (incluindo a interseção, se esta estiver na equação), e MSE_m é a média dos desvios quadráticos dos erros para o modelo com todos os m preditores. (MINITAB, 2000)

Para se obter o melhor subconjunto, deve-se ter um $R^2_{ajustado}$ próximo ao R^2, um Cp próximo ao número de variáveis do subconjunto estudado e o s menor possível.

3.2.5 Regressão Linear

Existem muitas situações em que duas ou mais variáveis de interesse estão relacionadas, cujo modelo mecanístico relacionando estas variáveis não é conhecido. Nesses casos é necessário construir um modelo relacionando as variáveis baseadas nos dados observados. Este tipo de modelo é chamado de modelo empírico.

Um modelo empírico pode ser manipulado e analisado da mesma forma que um modelo mecanístico.

No modelo de regressão linear simples a variável dependente ou de resposta está relacionada a uma variável independente ou regressor como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \tag{6}$$

Sendo ε o termo de erro aleatório. Os parâmetros β_0 e β_1 são chamados de coeficiente de regressão.

Para conhecer melhor o modelo, deve-se fixar o valor de X o observar o valor da variável aleatória Y. Neste cenário o componente ε é aleatório, a média será zero e a variância de ε será σ^2. Então:

$$E(Y|X) = E \times (\beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon) = \beta_0 + \beta_1 X + E(\varepsilon) = \beta_0 + \beta_1 X \tag{7}$$

A variância de Y, dado X, é:

$$V(Y|X) = V \times (\beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon) = V \times (\beta_0 + \beta_1 X) + V(\varepsilon) = 0 + \sigma^2 = \sigma^2 \tag{8}$$

Logo, o modelo verdadeiro da regressão, $\mu_{Y|X} = \beta_0 + \beta_1 X$, é uma linha de valores médios, ou seja, a altura da linha de regressão em qualquer valor de X é apenas o valor esperado de Y para aquele X. A inclinação β_1 pode ser interpretada como a mudança na média de Y para uma mudança unitária de X. Além disso, a variabilidade de Y, em um valor em particular de X, é determinada pela variação do erro de σ^2. Isso implica que há uma distribuição de valores de Y em cada X e que a variância dessa distribuição é a mesma em cada X. (Montgomery, Runger, Hubele, 2004)

Há muitas situações de construção de modelos empíricos em que existe mais de um regressor (variável independente). Um modelo de regressão que contenha mais de um regressor é chamado de regressão linear múltipla.

Em geral, a variável dependente ou de resposta pode estar relacionada à n variáveis independentes ou regressores. O modelo a seguir é chamado de regressão linear múltipla com n regressores:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n + \varepsilon \qquad (9)$$

Os parâmetros β_j , j=0, 1,..., n, são chamados de coeficientes de regressão. Esse modelo descreve um hiperplano no espaço n-dimensional dos regressores $\{X_j\}$. O parâmetro β_i representa a variação esperada na resposta Y por unidade de variação unitária em X_j, quando todos os outros regressores X_i ($i \neq j$) forem mantidos constantes.

Os modelos que incluem efeitos de interação podem ser analisados pelos métodos da regressão linear múltipla. Uma interação entre duas variáveis pode ser representada por um termo cruzado no modelo, tal como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \qquad (10)$$

Se substituir por X_3, sendo $X_3 = X_1 X_2$ e $\beta_3 = \beta_{12}$ a equação acima pode ser escrita:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \qquad (11)$$

Embora esse seja um modelo de regressão linear, a forma da superfície gerada pelo modelo não é linear. Em geral, qualquer modelo de regressão que seja linear nos parâmetros é um modelo de regressão linear, independente da forma da superfície que ele gere. (Montgomery, Runger, Hubele, 2004)

A análise de regressão múltipla é muito útil quando se quer controlar as variáveis independentes. (Neter, Wasserman, Kutner, 1983)

3.2.6 Otimização de um Processo considerando respostas múltiplas

A função desejabilidade (“desirability”) é um dos métodos mais utilizados na indústria para a otimização dos processos de respostas múltiplas. É baseada na idéia de que a qualidade de um produto ou processo que tem múltiplas respostas depende de encontrar as variações de processo que atendem a todas as restrições impostas. O método verifica as condições operacionais que fornecem o valor da resposta mais desejável.

Para cada resposta $Y_i(X)$, a função desejabilidade $d_i(Y_i)$ assume valores entre 0 e 1, quando $d_i(Y_i)=0$ significa que os valores assumidos para Y_i estão completamente fora da desejabilidade e quando $d_i(Y_i)=1$ significa que os valores assumidos para Y_i estão completamente dentro do desejável ou próximo do valor real.

As desejabilidades individuais são combinadas utilizando a média geométrica, que resulta na desejabilidade total D:

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \ldots \times d_k(Y_k))^{1/k} \qquad (12)$$

Onde k denota o número de respostas. (Derringer, Suich, 1980)

Caso todas as respostas Y_i sejam totalmente indesejáveis (d_i (Y_i) = 0) a desejabilidade é zero. Na prática, um valor ajustado ($\tilde{Y}_i$) substitui o valor de Y_i. (Engineering Statistics Handbook, 2008)

Dependendo de uma resposta Y_i a ser maximizada, minimizada, ou atribuído um valor-alvo, as diferentes funções objetivo de (Y_i) podem ser utilizadas. Uma classe útil da função desejabilidade foi proposta por Derringer e Suich (1980).

Considerando L_i, U_i e T_i o valor inferior, superior, e os valores-alvo, respectivamente, que são desejados por respostas Y_i, com $L_i \leq T_i \leq U_i$

Se a resposta desejada é o valor-alvo, então a função desejabilidade individual é:

$$d_i(\tilde{Y}_i)=\begin{cases} 0 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\dfrac{\tilde{Y}_i(x)-L_i}{T_i-L_i}\right)^s & \text{se } L_i \le \tilde{Y}_i(x) \le T_i \\ \left(\dfrac{\tilde{Y}_i(x)-U_i}{T_i-U_i}\right)^t & \text{se } T_i \le \tilde{Y}_i(x) \le U_i \\ 0 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) > U_i \end{cases}$$

Os expoentes s e t determinam qual a importância do valor-alvo. Para s=t=1, a função desejabilidade aumenta linearmente na direção de Ti; para s<1, t<1, a função é convexa, e para s>1, t>1, a função é côncava.

Se a resposta desejada é a máxima, então a função desejabilidade é definida como:

$$d_i(\tilde{Y}_i)=\begin{cases} 0 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\dfrac{\tilde{Y}_i(x)-L_i}{T_i-L_i}\right)^s & \text{se } L_i \le \tilde{Y}_i(x) \le T_i \\ 1 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) > T_i \end{cases}$$

Neste caso T_i significa o valor máximo para a resposta.

Finalmente, se a resposta desejada é mínima, pode ser usado:

$$d_i(\tilde{Y}_i)=\begin{cases} 0 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) < T_i \\ \left(\dfrac{\tilde{Y}_i(x)-U_i}{T_i-U_i}\right)^s & \text{se } T_i \le \tilde{Y}_i(x) \le U_i \\ 0 & \text{se } \tilde{Y}_i(x) > U_i \end{cases}$$

Onde T_i significa o menor valor para a resposta. (Engineering Statistics Handbook, 2008)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentadas a descrição geral do processo, os métodos analíticos empregados na fábrica para as amostras coletadas nos diversos pontos do processo, todas as variáveis incluídas (dependentes e independentes) e etapas do tratamento dos dados históricos por meio de métodos estatísticos, para cumprir os objetivos do trabalho.

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DA UNIDADE PRODUTIVA

A unidade industrial Infibra na qual se realizou o trabalho é localizada em Leme (estado de São Paulo) e produz telhas onduladas de fibrocimento, pelo processo Hatschek.

O processo Hatschek para a fabricação de placas de fibrocimento já foi descrito em linhas gerais no item 3.1.3 do capítulo 3. Especificamente o equipamento para a produção das telhas objeto de estudo está esquematizada na Figura 4. Na figura as letras encabeçam as partes do sistema e os números indicam os pontos onde são coletadas as amostras, as variáveis coletadas em linha estão destacadas com a cor amarela e as variáveis medidas em laboratório estão destacadas em azul.

A parte (a) do esquema é constituída de quatro silos onde são armazenadas as seguintes matérias-primas: cimento, amianto, celulose e calcário, cada uma em um silo.

Uma balança (b) para cada matéria-prima pesa as quantidades de material que compõem a formulação desejada. Os componentes sólidos são então adicionados à masseira (c) que recebe água do cone de decantação 2 (d). A água do cone de decantação 2 vem do cone decantador 1 (e) que recebe água suja das caixas de massa (f), a água retirada da película por meio de vácuo (g) e eventualmente água de reposição. Após a decantação dos sólidos, o sobrenadante clarificado alimenta o

cone decantador 2 (já mencionado), o mixer (h) e a retalheira(i). A massa assim obtida segue para o tanque pulmão (j). Na seqüência a massa proveniente do tanque pulmão (j) e a água com o lodo decantado proveniente do cone decantador 1 seguem para o mixer (h) e são controladas através da medição da espessura (1), via sensores a laser. Caso a espessura da placa esteja acima do valor nominal, a vazão de massa diminui automaticamente enquanto a vazão de água aumenta para o ajuste necessário. Caso a espessura indicada em (1) seja menor do que a espessura nominal o ajuste é contrário. A mistura com a consistência ajustada é distribuída nas caixas de massa (f) e impulsionada pelos agitadores (l) para aderir nos cilindros (m) que depositam a massa no feltro (n), formando assim uma monopelícula (o). Após a formação da monopelícula, os cilindros são lavados por esguicho que utilizam água potável (p).

Em cada caixa de massa é formada uma monopelícula e ao final da última caixa é obtida uma película, ou seja, no caso específico do esquema representado, uma película possui quatro monopelículas.

O excesso de água da película formada, após a saída das caixas de massa, é retirado por meio de vácuo (g). As Películas (q) são unidas por um cilindro prensa (r) formando assim uma manta, que segue por uma esteira onde é cortada no tamanho da telha. A manta cortada segue para a onduladeira (s) onde em um mecanismo acionado por meio de vácuo ela se torna ondulada, adquirindo as características do produto final (t).

As rebarbas retiradas da chapa são encaminhadas à retalheira (i) e posteriormente retornam ao processo, no tanque pulmão (j).

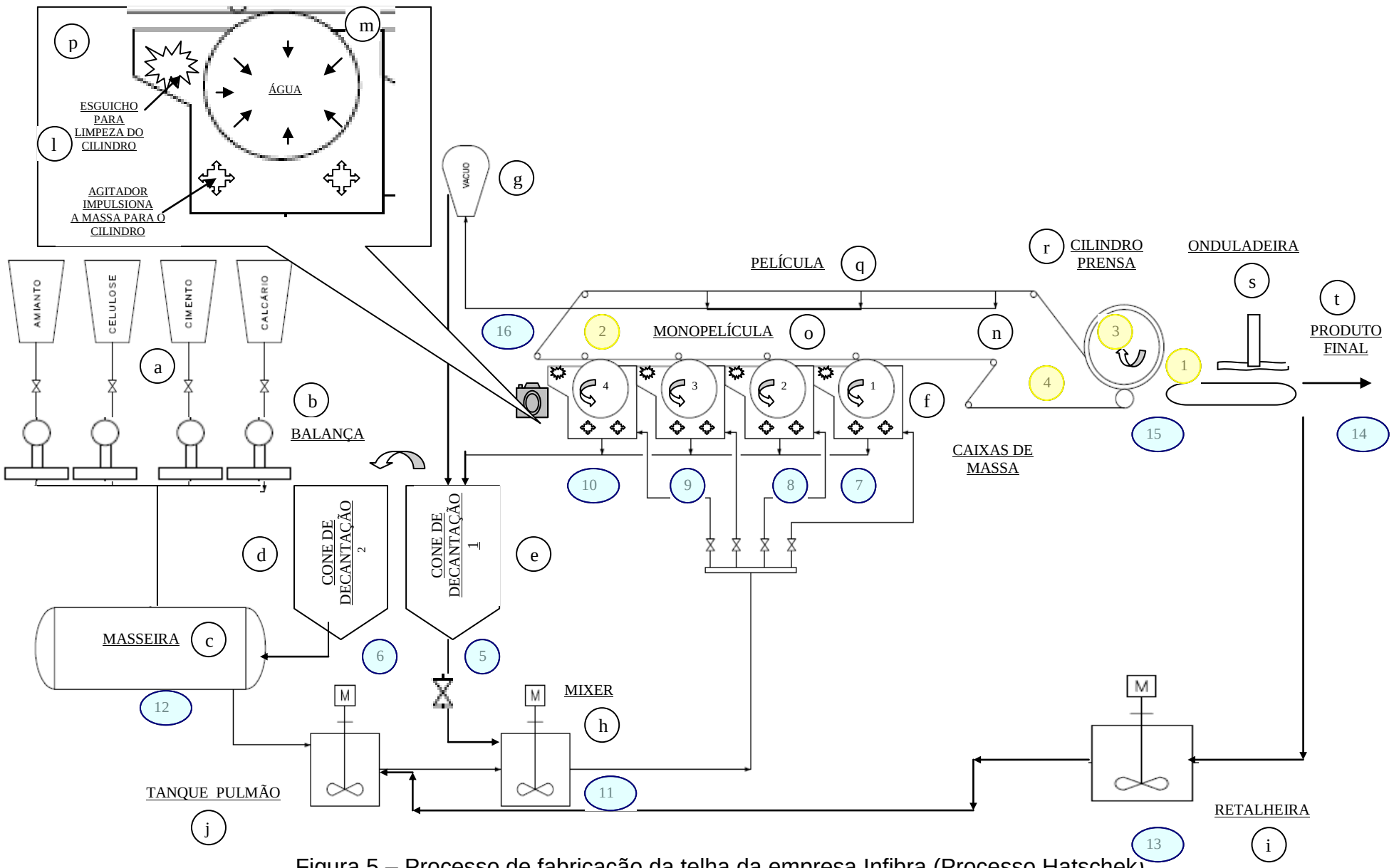


Figura 5 – Processo de fabricação da telha da empresa Infibra (Processo Hatschek)

4.2 VARIÁVEIS USUAIS DE CONTROLE

Atualmente, o processo descrito sucintamente no item anterior é controlado pelo monitoramento individual de diversas variáveis indicadas na Figura 5 por meio de números contornados por uma circunferência. Algumas das variáveis são medidas em linha no processo e as outras são determinadas por meio de análises laboratoriais em amostras coletadas nos pontos indicados na figura. O detalhamento das variáveis de entrada (variáveis independentes ou controláveis) está no próximo subitem. Como variáveis de resposta ou variáveis que sofrem os efeitos das variáveis de controle serão estudadas a densidade e a resistência da telha.

4.2.1 Variáveis medidas em linha

i. Espessura da manta (mm), medida por meio de laser (ponto 1) e indicada no painel de controle;

ii. Pressão na secagem 1 e 2 (inHg), Pressão na fixação 1/2/3 (inHg) e Pressão da película (inHg), medidas (ponto 2) com um vacuômetro inserido na mangueira que liga a bomba de vácuo à caixa de secagem, fixação e película e as medições são indicadas no painel de controle;

iii. Peso da prensa (kg), depende da prensa que está sendo utilizada (ponto 3);

iv. Gramatura do feltro (g/m²), depende do feltro que está sendo utilizado (ponto 4).

4.2.2 Variáveis cujas medidas são realizadas no laboratório

Para estas variáveis são coletadas amostras nos pontos indicados na Figura 5. As amostras são então levadas ao laboratório, onde são analisadas de acordo com a metodologia usual da Infibra, como descrito no item 4.3.

As amostras são coletadas nos pontos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

i. Concentração no cone decantador 1 e 2 (g/L), coletada no ponto 5 e 6 respectivamente;

ii. Concentração das caixas de massa 1/2/3/4 (g/L), coletadas no ponto 7, 8, 9 e 10 respectivamente;

iii. Concentração no mixer (g/L), coletada no ponto 11;

iv. Concentração na masseira (g/L), coletada no ponto 12;

v. Concentração na retalheira (g/L), coletada no ponto 13;

vi. Concentração no resíduo (g/L), coletada no ponto 14 (local externo a planta);

vii. Umidade da manta (%), coletada amostra no ponto 15;

viii. Umidade da película (%), coletada amostra no ponto 16;

ix. Densidade aparente da manta (g/cm^3), coletada amostra no ponto 15.

4.3 ANÁLISE LABORATORIAL DAS VARIÁVEIS

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório da empresa Infibra por técnicos especializados em controle de qualidade do produto.

Os métodos analíticos serão apresentados neste item, colocando sempre que possível à técnica de amostragem, os equipamentos e materiais necessários à análise.

4.3.1 Determinação da concentração de sólidos

Os procedimentos de amostragem e de análise e a determinação da concentração de sólidos estão apresentados a seguir:

i. Abrir as válvulas, localizadas na parte inferior dos equipamentos, por 30 segundos antes de coletar 1 litro de amostra, para evitar que a amostra coletada para análise contenha vestígios da amostra coletada anteriormente. Sob agitação constante, retirar 200 mL da amostra coletada para análise;

ii. Filtrar a amostra utilizando vácuo em funil de buchner usando papel de filtro com massa conhecida, a gramatura do papel filtro é de 80 g, e o diâmetro do papel é maior que do funil para que forme uma parede de papel no funil, impedindo assim que os sólidos escapem por baixo do papel;

iii. Levar o papel de filtro com os sólidos úmidos ao forno de microondas por 10 minutos;

iv. Após a secagem da amostra, pesar e retornar ao forno por mais 1 minuto;

v. Repetir esta última etapa até obter massa constante. A massa do produto seco é a diferença entre esta última e a massa do papel de filtro, ou seja:

$$m_{ss} = m_{total} - m_{pf} \tag{13}$$

Em que: m_{ss} é a massa de sólido seco, m_{total} é a massa total e m_{pf} é a massa do papel de filtro.

Como o ensaio foi realizado com 200 mL de amostra, a concentração em massa/L, será o valor da massa multiplicado por 5.

4.3.2 Determinação da densidade aparente da manta (Dapar) e das umidades da manta e da película (UM e UP)

Os procedimentos de amostragem e de análise para a determinação das variáveis densidade aparente da manta, umidade da manta e da película estão apresentados a seguir:

i. Recortar 2 amostras da manta e 1 da película;

ii. Pesar imediatamente as amostras ainda úmidas, conhecido como peso úmido (*PU*);

iii. Levar as amostras ainda úmidas para o forno de microondas por 10 minutos;

iv. Enquanto secam as amostras no forno de microondas, pesar a outra amostra da manta (PU) e também imersa em água (peso imerso, PI);

v. Pesar a amostra, retornar ao forno de microondas por mais 1 minuto e pesar novamente. Este procedimento é repetido até que a massa seja constante. Obtem-se a massa da amostra seca (*PS*).

Os valores das variáveis são determinados pelas equações 14, 15 e 16

$$D_{apar} = \frac{PU}{PU - PI} \times \rho_{água} \tag{14}$$

$$UM = \frac{PU - PS}{PU} \tag{15}$$

$$UP = \frac{PU - PS}{PU} \tag{16}$$

4.3.3 Variáveis cujos valores são obtidos a partir dos valores de outras variáveis

As variáveis retenção, monopelícula, pressão linear e velocidade do feltro são calculadas a partir das variáveis descritas anteriormente:

a. Retenção:

A variável retenção indica a porcentagem de massa que ficou retida no mixer e nas caixas de massa. Ela é obtida utilizando a equação (17).

$$\mathrm{Re}\,tenção = \left(\frac{Mixer - MediaCaixas}{Mixer} \right) \times 100 \tag{17}$$

b. Monopelícula:

A obtenção da espessura da monopelícula (mm) depende da espessura da telha desejada. Quanto maior a espessura da telha, mais será concentrada a massa nas caixas de massa ou maior a quantidade de voltas do cilindro prensa. Para o cálculo da espessura da monopelícula utiliza-se a seguinte equação:

$$Monopelícula = \frac{EspessuraManta}{N^{o}Voltas \times N^{o}Caixas} \tag{18}$$

c. Pressão Linear:

A pressão linear (kg/cm) é a pressão exercida pelo cilindro prensa em toda a extensão da manta, calcula-se utilizando a equação (19).

$$Plinear = \frac{Peso\,\mathrm{Pr}ensa + (2 \times \mathrm{Pr}essão\,\mathrm{Pr}ensa \times Comprimento\,oBraço)}{L\mathrm{arg}uraManta} \tag{19}$$

d. Velocidade do Feltro:

A velocidade do feltro (m/min) está diretamente relacionada ao diâmetro da prensa e com o número de voltas da mesma, como pode ser observado na equação (20).

$$VelFeltro: \frac{Diâmetro\ \mathrm{Pr}ensa \times \pi \times N^{o}Voltas \times 60}{CicloFormação} \tag{20}$$

4.3.4 Determinação das variáveis resposta: densidade (D) e resistência (R) da telha

a. Densidade Aparente da Telha (DAT):

Quando a telha é separada para ensaio, é retirado um corpo de prova triangular com aproximadamente 6 cm de lado. O mesmo é identificado e guardado em local aberto e arejado. Quando a telha é ensaiada o corpo de prova é imerso em água de torneira, pesado imerso (PI) e saturado (PSat) após 24 horas. Em seguida o corpo de prova é colocado em estufa a 105º C (±5) por 24 horas, então o mesmo é resfriado em dessecador por 10 minutos e pesado (PS).

$$DAT = \frac{PS}{PSat - PI} \times \rho_{água} \tag{21}$$

b. Resistência da Telha:

A resistência da telha (N/m) é obtida por meio de ensaio mecânico de acordo com a norma NBR-15210-2. Este ensaio consiste em medir o esforço necessário para atingir a ruptura de uma telha. Conforme ilustrado na Figura 6, a força é aplicada sobre a telha colocada sobre um aparato equipado com células de carga, e a força máxima exercida mecanicamente é conhecida através de um mostrador digital de balança eletrônica.

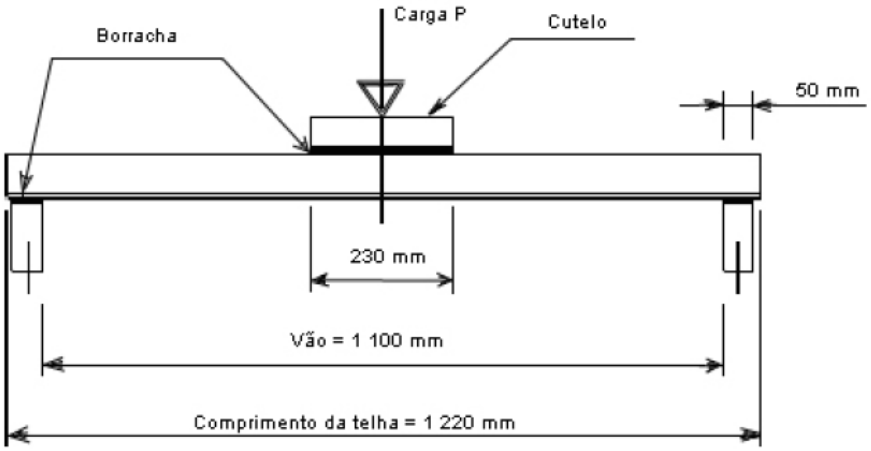


Figura 6 – Dispositivo de ensaio de flexão (NBR-15210-2, 2005)

4.4 LEVANTAMENTO DOS DADOS HISTÓRICOS

Atualmente, o processo descrito no item anterior é controlado pelo monitoramento individual de diversas variáveis, por meio de visualização nos painéis de controle. Os dados coletados para estas variáveis eram recebidos na forma de planilha do Excel.

Além da boa qualidade dos dados disponíveis, é necessário saber organizá-los para se obter uma análise com sucesso, sendo primordial o conhecimento da unidade em estudo, evitando-se confundir dados gerados com características de processo diferentes, tornando a interpretação dos resultados difícil, e conseqüentemente invalidando qualquer predição. A análise feita sobre um universo constituído de um número expressivamente menor de dados, mas com características operacionais selecionadas é melhor do que uma análise com um universo de números expressivamente maior de dados, porém com características operacionais misturadas.

É necessário realizar uma análise prévia, descartando dados com erros observáveis (de medida ou compilação) ou mesmo por estarem incompletos. Este descarte de dados é possível, pois os parâmetros são de fácil disponibilidade e geralmente em considerável quantidade, uma vez que são obtidos em operação normal.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

É importante determinar os valores, a partir dos métodos descritos anteriormente, sobre todos os parâmetros de controle de cada amostra, constituindo um conjunto de dados. Cada universo analisado constitui-se, portanto, de todos os conjuntos de dados obtidos no espaço de tempo ao qual a análise estatística se refere.

As etapas a serem realizadas para a análise estatística estão esquematizadas na Figura 7.

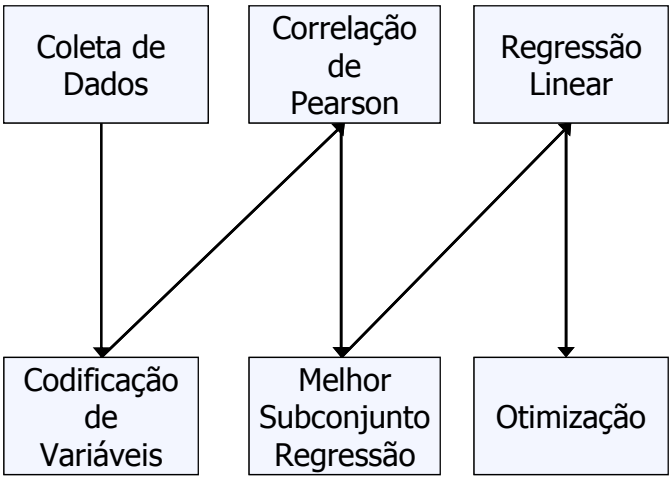


Figura 7 – Representação esquemática da sequência de etapas a serem realizadas para a análise estatística

4.5.1 Codificação das variáveis independentes

As variáveis identificadas como independentes são de natureza distinta, ou utilizam diferentes unidades ou faixas de variação diferentes, portanto é necessário codificar as variáveis, normalizando os valores entre -1 e +1, o que facilita a comparação dos coeficientes da regressão, porque todas as variáveis terão o mesmo intervalo de variação.

No desenvolvimento da análise estatística realizada neste estudo, a codificação foi realizada pela utilização da equação 1, aplicada a todas as variáveis independentes dos conjuntos de dados históricos, utilizando planilhas do Excel.

4.5.2 Teste de correlação de Pearson

A análise do Teste de Correlação de Pearson é efetuada nos dados obtidos e organizados como descritos no item 4.4, utilizando o software estatístico MINITAB, que fornece uma matriz com todos os testes entre os pares de variáveis, indicando na primeira linha o coeficiente de Pearson e, na segunda linha o valor de p, para o teste de significância da correlação entre as variáveis, conforme ilustrado no item 5.2.

4.5.3 Estabelecimento dos Melhores Subconjuntos para Obtenção do Modelo da Regressão

É importante estabelecer o conjunto adequado de variáveis independentes a serem considerados no modelo, para fazer uma análise por regressão, estabelecendo um modelo que descreva e faça predições sobre o processo.

O critério utilizado para a seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes é o mesmo que foi descrito no item 3.2.4. A determinação dos coeficientes R^2, $R^2_{ajustado}$, Cp e determinação da raiz quadrada da variância da amostra (s), foram realizadas por meio do software MINITAB.

Com o estabelecimento do melhor subconjunto de variáveis independentes, realiza-se o ajuste do modelo de regressão múltipla, inicialmente para todas as variáveis deste subconjunto e posteriormente eliminando os pontos que estão fora do ajuste (outliers). A variável que apresenta um erro maior do que três vezes o desvio padrão médio, é excluída na próxima análise.

Realiza-se uma nova análise, repetindo a verificação inicial até a obtenção de todos os parâmetros dentro dos critérios citados no item 3.2.4.

Concluindo-se que o modelo de regressão múltipla está adequadamente definido, é necessário validá-lo na unidade industrial em estudo. Para a validação do modelo,

são estabelecidos os pontos que as variáveis independentes podem ficar ajustando-os de forma a se obter os melhores resultados.

Para a espessura de telha de 6 mm, é necessário fazer uma otimização do processo, devido a influência de mais de uma variável independente nas variáveis de resposta.

4.5.4 Otimização

A otimização é realizada para obter a melhor condição das variáveis respostas por meio das variáveis de entrada em comum.

Para a telha com espessura de 5 mm inicialmente não foi realizada a otimização, pois as variáveis resposta apresentaram apenas uma variável de entrada em comum.

Após a retirada das matérias-primas da análise, o modelo da densidade e resistência apresentaram duas variáveis em comum (umidade da manta e densidade aparente da manta), sendo necessária a realização da otimização

Para a espessura de telha de 6 mm, desde o início foi necessário fazer uma otimização do processo, devido à influência de mais de uma variável independente nas variáveis de resposta. Nos casos as variáveis em comum para a resistência e densidade foram: umidade da película, densidade aparente da manta e velocidade do feltro. Após a retirada da influência das matérias-primas, as variáveis em comum foram: umidade da manta e densidade aparente da manta.

Foi utilizada a função “desirability” para a otimização das múltiplas respostas do processo (resistência e densidade). Esta função permite determinar qual a melhor combinação entre as variáveis de entrada, para gerar as variáveis respostas desejadas.

Para isso calculam-se os valores preditos das variáveis resposta densidade e resistência, utilizando os valores reais das variáveis em comum e mantendo as demais variáveis em valores neutros. Assim, a função desejabilidade é calculada de acordo com o item 3.2.6.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são mostrados e discutidos os resultados obtidos por meio da análise estatística empregada na melhoria do processo Hatschek para a fabricação de telhas de fibrocimento.

5.1 DADOS HISTÓRICOS

Os dados históricos fornecidos pela Empresa Infibra foram organizados em planilhas. A empresa fabrica telhas com as seguintes espessuras nominais: 5 mm, 6 mm e 8 mm, porém neste estudo foram consideradas apenas as telhas com 5 mm e 6 mm de espessura porque estas possuíam conjunto de dados suficientes para a análise estatística.

O trabalho inicial de organização dos dados históricos foi feito no programa Excel. Estes dados foram levantados entre os meses de dezembro de 2006 e maio de 2007 e organizados cronologicamente.

Uma análise inicial foi realizada com estes dados organizados, originando os primeiros modelos empíricos para as variáveis independentes resistência e densidade para espessura da telha de 5 mm e 6 mm.

Após esta primeira análise a empresa informava os dados a cada dois meses aproximadamente, entre junho de 2007 e dezembro de 2008, período em que os dados foram considerados estáveis. Desta forma os dados coletados agregavam melhoria aos modelos estatísticos determinados.

As planilhas originais foram tratadas da seguinte maneira:

1. Separadas em diferentes planilhas de acordo com a espessura da telha a ser estudada;
2. Retirada de variáveis categóricas, ou seja, variáveis que não apresentavam valores numéricos;
3. Eliminação de linhas em que pelo menos o valor de uma das variáveis numéricas levantado fosse nulo;
4. Construção as Cartas de Valores Individuais para eliminação de “outliers”. Um exemplo está ilustrado na Figura 8.

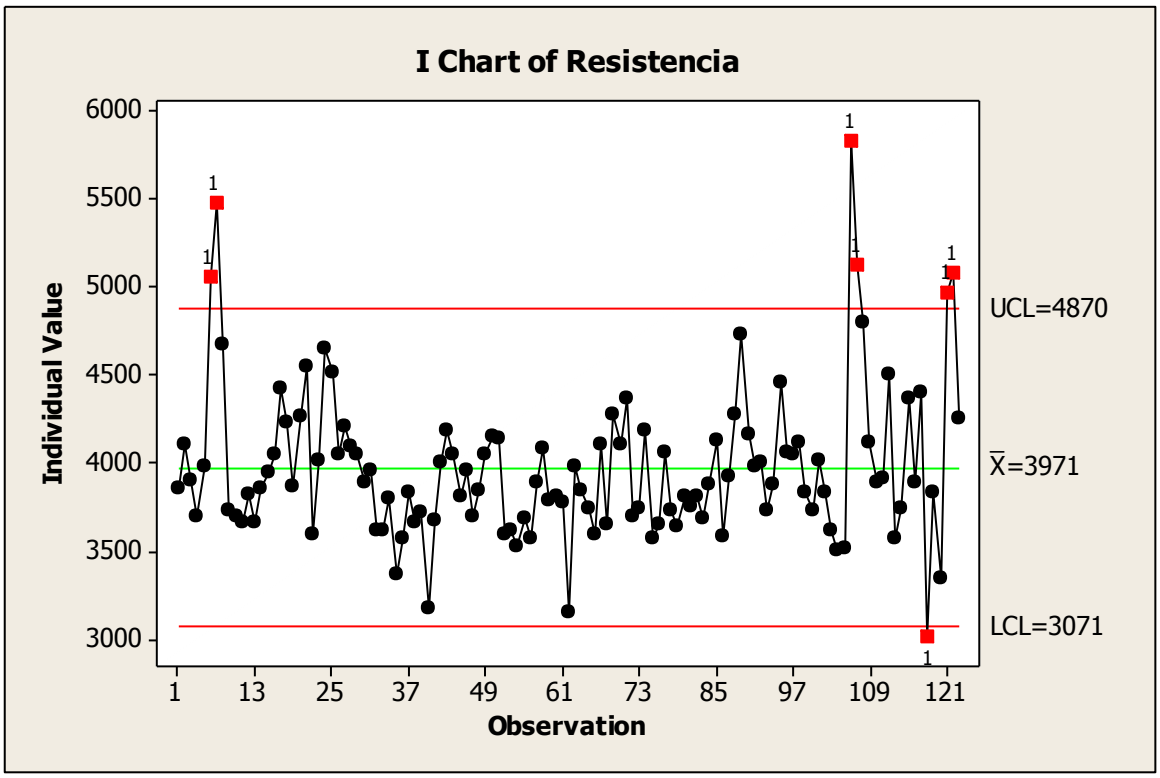


Figura 8 – Carta dos Valores Individuais para eliminação de “outliers” da variável resistência para a telha com espessura de 5 mm.

Após esta limpeza a planilha foi considerada organizada e possuía a característica ilustrada como exemplo na Tabela 6. A partir desta planilha procedeu-se a construção dos modelos e a otimização das condições de operação. As ferramentas empregadas no tratamento destes dados foram descritas no capítulo de metodologia e os resultados do tratamento estão apresentados ao longo do capítulo 5.

Tabela 6 – Exemplo de planilha organizada de dados históricos

Data	Ø Prensa (m)	Peso da Prensa (kg)	Perm. (CFM)	Gramat. (g/m²)	Cimento (%mássica)	Calcário (%mássica)	Amianto (%mássica)	Resíduo (%mássica)	Celulose (%mássica)	Umidade da Película (%mássica)	Umidade da Manta (%mássica)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)
4/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	33,90	23,50	1,85
4/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,71	22,74	1,86
4/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,15	23,65	1,88
5/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,94	24,84	1,86
5/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,10	24,49	1,83
5/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,57	24,59	1,87
5/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,76	25,10	1,91
6/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,27	23,87	1,86
6/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,65	24,86	1,85
6/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,00	23,98	1,87
6/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,33	25,31	1,87
7/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,92	25,38	1,83
7/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,07	24,34	1,83
7/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,38	25,96	1,83
7/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,95	25,81	1,85
8/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	37,45	26,39	1,85
8/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,66	25,57	1,86
9/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	37,87	27,09	1,84
9/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,65	25,98	1,85
9/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,54	25,76	1,86
9/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,18	25,46	1,85
10/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	35,43	23,27	1,89
10/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,72	23,01	1,87
10/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	34,59	24,39	1,90
11/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,01	25,60	1,87
11/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,57	24,81	1,88
11/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,92	24,30	1,87
11/12/2006	1,68	3500,00	104,00	1950,00	68,97	17,24	9,91	2,16	1,72	36,63	23,86	1,89

Continua

Continuação

Data	Monopelícula (mm)	Veloc. do feltro (m/min)	Pressão Linear (Kg/cm)	Masseira (g/L)	Mixer (g/L)	Cone 1 (g/L)	Resíduo (g/L)	Celulose (g/L)	Retalheira (g/L)	Saída das caixas (g/L)
4/12/2006	0,29	79,57	64,86	247,50	138,30	49,00	192,80	47,00		16,13
4/12/2006	0,29	79,57	63,23	260,35	122,65	56,80	176,00	46,55	141,10	18,15
4/12/2006	0,29	79,57	63,23	249,90	125,40	53,75	180,90			17,55
5/12/2006	0,29	79,57	59,98	251,15	135,95	52,80	110,55	44,90	135,85	16,25
5/12/2006	0,29	79,57	59,98	250,40	149,65	64,50	122,50	45,80		18,33
5/12/2006	0,29	79,57	59,98	253,25	153,40	54,85	127,60	43,45	138,10	18,25
5/12/2006	0,29	79,57	59,98	250,95	146,85	56,35	142,25			18,01
6/12/2006	0,30	79,67	64,86	248,40	136,00	51,05	156,85	46,25	131,25	16,66
6/12/2006	0,30	79,67	64,86	247,75	145,15	50,20	150,70	47,15		18,80
6/12/2006	0,30	79,67	63,23	258,65	138,25	50,35	186,75	46,90	141,10	18,06
6/12/2006	0,30	79,17	61,60	257,20	140,90	50,95	188,75			18,29
7/12/2006	0,30	79,17	59,98	257,70	147,25	54,30	98,40	47,95	155,60	17,55
7/12/2006	0,24	79,97	59,98	251,45	126,85	53,15	116,40	47,60		17,89
7/12/2006	0,30	79,17	59,98	252,90	158,55	53,75	150,40	43,30	112,95	17,36
7/12/2006	0,24	79,57	59,98	253,90	123,35	49,05	158,30			16,86
8/12/2006	0,32	79,57	64,86	252,55	146,20	50,40	176,80	46,80	127,00	17,28
8/12/2006	0,30	79,67	64,86	253,90	149,55	51,80	200,00			17,55
9/12/2006	0,30	79,67	63,23	251,15	145,30	59,20	120,60	47,35	145,95	16,21
9/12/2006	0,30	79,67	63,23	250,35	143,70	48,40	133,40	45,95		14,66
9/12/2006	0,30	79,67	63,23	250,65	141,55	51,35	183,05	48,20	148,65	15,65
9/12/2006	0,30	79,67	63,23	250,15	134,80	50,50	183,65			15,79
10/12/2006	0,30	79,67	64,86	248,00	138,70	49,85	183,45	47,50	138,80	16,63
10/12/2006	0,30	80,17	64,86	248,30	151,00	53,60	183,50	48,00		18,39
10/12/2006	0,30	79,67	59,98	249,00	147,05	55,70	231,55	47,95	125,25	16,45
11/12/2006	0,29	78,38	64,86	250,05	150,55	60,05	214,50	46,45	133,35	19,39
11/12/2006	0,29	78,38	66,49	247,40	150,15	50,40	194,65	46,85		17,10
11/12/2006	0,29	78,38	73,01	247,15	150,55	51,35	188,10	46,50	135,10	17,01
11/12/2006	0,29	78,38	73,01	248,65	152,35	49,20	188,65			16,43

Continua

Continuação

Data	Retenção (%mássica)	Limpeza/sec. feltro 1 (inHg)	Limpeza/sec. feltro 2 (inHg)	Fixação 1 (inHg)	Fixação 2 (inHg)	Fixação 3 (inHg)	Secagem película 1 (inHg)	Secagem película 2 (inHg)	Secagem película 3 (inHg)	Antiespumante (l/min)	Resist. (N/m)	Espes. (mm)	Dens. (g/cm³)
4/12/2006	88,34	7,00	6,00	12,00	17,00	13,00	15,00	11,00	17,00	5,86	5173,00	6,00	1,54
4/12/2006	85,20	6,00	4,00	8,00	18,00	16,00	16,00	9,00	15,00	5,86	5719,00	6,00	1,53
4/12/2006	86,00	6,00	4,00	10,00	18,00	15,00	15,00	10,00	15,00	5,86	5348,00	6,00	1,53
5/12/2006	88,05	6,00	4,00	7,00	19,00	19,00	14,00	8,00	15,00	5,86	5564,00	5,80	1,54
5/12/2006	87,75	6,00	5,00	10,00	19,00	19,00	15,00	9,00	16,00	5,86	5568,00	6,50	1,52
5/12/2006	88,10	6,00	6,00	10,00	19,00	18,00	17,00	10,00	17,00	7,42	5334,00	5,60	1,50
5/12/2006	87,73	7,00	6,00	12,00	19,00	18,00	16,00	10,00	16,00	7,42	4802,00	5,80	4,52
6/12/2006	87,75	6,00	6,00	13,00	18,00	17,00	15,00	11,00	16,00	5,86	3859,00	5,30	1,50
6/12/2006	87,05	7,00	6,00	14,00	17,00	16,00	16,00	12,00	15,00	5,86	4101,00	5,20	1,49
6/12/2006	86,93	7,00	6,00	10,00	18,00	17,00	18,00	10,00	17,00	5,86	3900,00	5,30	1,49
6/12/2006	87,02	7,00	6,00	10,00	15,00	17,00	18,00	12,00	17,00	5,86	3691,00	5,00	1,48
7/12/2006	88,08	6,00	5,00	10,00	19,00	19,00	15,00	10,00	13,00	5,86	3973,00	5,00	1,48
7/12/2006	85,90	7,00	6,00	10,00	18,00	19,00	16,00	10,00	19,00	5,86	5053,00	5,50	1,47
7/12/2006	89,05	6,00	5,00	10,00	19,00	17,00	18,00	12,00	15,00	7,42	5477,00	5,80	1,47
7/12/2006	86,33	6,00	5,00	9,00	17,00	17,00	16,00	10,00	15,00	7,42	4675,00	5,20	1,48
8/12/2006	88,18	7,00	6,00	11,00	16,00	14,00	15,00	10,00	12,00	7,42	3733,00	4,90	1,50
8/12/2006	88,26	6,00	6,00	11,00	15,00	15,00	15,00	10,00	12,00	7,42	3695,00	5,00	1,48
9/12/2006	88,84	4,00	6,00	10,00	16,00	16,00	15,00	10,00	15,00	4,99	3664,00	5,00	1,50
9/12/2006	89,80	9,00	7,00	11,00	19,00	19,00	15,00	10,00	15,00	4,99	3814,00	5,00	1,54
9/12/2006	88,94	8,00	7,00	12,00	18,00	17,00	15,00	10,00	16,00	4,28	3655,00	5,00	1,51
9/12/2006	88,29	8,00	7,00	12,00	17,00	17,00	16,00	10,00	16,00	4,28	3973,00	5,10	5,00
10/12/2006	88,01	5,00	6,00	11,00	16,00	17,00	16,00	10,00	15,00	5,86	3855,00	5,00	1,55
10/12/2006	87,82	6,00	6,00	12,00	15,00	16,00	14,00	10,00	15,00	5,86	3943,00	5,00	1,49
10/12/2006	88,81	7,00	7,00	12,00	18,00	17,00	15,00	11,00	17,00	5,86	4043,00	5,10	1,47
11/12/2006	87,12	10,00	6,00	11,00	19,00	15,00	10,00	10,00	15,00	5,86	4780,00	6,00	1,51
11/12/2006	88,61	10,00	7,00	14,00	19,00	18,00	15,00	10,00	15,00	5,86	4902,00	6,00	1,50
11/12/2006	88,70	8,00	7,00	12,00	18,00	18,00	15,00	14,00	17,00	7,42	4902,00	6,00	1,50
11/12/2006	89,22	8,00	7,00	13,00	19,00	18,00	15,00	13,00	16,00	7,42	5048,00	6,10	1,53

5.2 TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Este teste possibilita a observação de como as variáveis se correlacionam, duas a duas, facilitando a escolha das variáveis mais influentes e evitando a introdução, no modelo, de variáveis independentes que são altamente correlacionadas.

No teste de correlação, o programa MINITAB só aceita 20 variáveis por vez, portanto, inicialmente foram inseridas aproximadamente 20 variáveis, analisando-se como elas se correlacionam e substituindo as variáveis que não exerciam influência na variável resposta, pelas variáveis que ainda não foram avaliadas.

O teste de correlação foi realizado para as duas espessuras de telha (5 mm e 6 mm) e para as variáveis resposta resistência e densidade.

A Figura 9 representa um modelo da matriz simétrica do teste de correlação da variável resposta resistência, para a espessura da telha de 5 mm.

	Pres_Lin	Masseira	Mixer	Cone_1	Resíduo_1	Saí_caixas	Retenção	Limp_sec_	Limp_sec_	Fixa_1	Fix_2	Fix_3	Sec_pel	Sec pel	Sec_pe	Antesp
Masseira	0,071															
	0,273															
Mixer	0,315	0,014														
	0,000	0,835														
Cone_1	-0,012	0,124	0,159													
	0,848	0,057	0,014													
Resíduo_1	0,033	0,052	-0,044	-0,298												
	0,616	0,421	0,490	0,000												
Saí_caixas	-0,128	0,169	-0,090	0,571	-0,102											
	0,048	0,009	0,168	0,000	0,118											
Retenção	0,299	-0,132	0,652	-0,329	0,035	-0,805										
	0,000	0,041	0,000	0,000	0,595	0,000										
Limp_sec_	0,363	-0,017	0,307	-0,343	0,203	-0,212	0,322									
	0,000	0,794	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000									
Limp_sec_	0,380	-0,003	0,312	-0,299	0,197	-0,199	0,318	0,950								
	0,000	0,964	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000								
Fixação_1	0,319	-0,174	0,093	-0,453	0,240	-0,305	0,291	0,634	0,625							
	0,000	0,007	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000							
Fixação_2	-0,010	0,022	0,131	-0,153	0,213	-0,061	0,103	0,335	0,313	0,328						
	0,882	0,739	0,043	0,018	0,001	0,345	0,115	0,000	0,000	0,000						
Fixação_3	0,108	-0,023	0,143	-0,153	0,150	-0,135	0,172	0,322	0,346	0,329	0,618					
	0,095	0,718	0,027	0,018	0,021	0,038	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000					
Seca_pelí	0,100	-0,187	0,282	-0,258	0,209	-0,173	0,283	0,345	0,310	0,409	0,491	0,485				
	0,126	0,004	0,000	0,000	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
Sec_pelí	0,249	-0,121	0,208	-0,108	0,031	0,065	0,067	0,286	0,269	0,273	0,126	0,231	0,184			
	0,000	0,062	0,001	0,095	0,634	0,321	0,304	0,000	0,000	0,000	0,051	0,000	0,004			
Sec_pelí	0,132	-0,154	0,274	-0,137	0,091	-0,166	0,275	0,396	0,377	0,367	0,290	0,365	0,486	0,247		
	0,041	0,018	0,000	0,035	0,162	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Antiespuma	-0,021	0,002	-0,113	0,509	-0,210	0,288	-0,268	-0,405	-0,371	-0,382	-0,287	-0,207	-0,274	-0,164	-0,246	
Resist	0,001	0,951	0,005	0,961	0,726	0,902	0,076	0,285	0,257	0,252	0,903	0,936	0,555	0,055	0,476	0,003

Figura 9 - Modelo da matriz de correlação de Pearson da resposta resistência para telha de 5 mm

5.3 ESCOLHA DO MELHOR SUBCONJUNTO DA REGRESSÃO

Com os dados originais organizados, o passo seguinte foi transportar estes dados do programa Excel para o programa MINITAB, para empregar a estatística Cp de Mallows para a escolha do melhor subconjunto de regressão.

Inicialmente foi realizada uma análise completa considerando todas as variáveis que apresentavam qualquer variação no seu valor, incluindo até as variações nas matérias-primas (cimento, amianto, celulose e resíduo da matéria-prima).

Após alguns esclarecimentos com a empresa verificou-se que as variações na matéria-prima eram apenas em decorrência das análises laboratoriais. Então, toda a análise foi refeita desconsiderando o efeito das matérias-primas (formulação constante) o que resultou em substituição de algumas variáveis no ajuste dos modelos e conseqüentemente nas variáveis independentes simultâneas empregadas na otimização.

a. Espessura da telha de 5 mm.

As Tabelas 7 e 8 apresentam a estatística Cp de Mallows da resposta resistência com e sem influência das matérias-primas respectivamente, para a espessura da telha de 5 mm.

Nas tabelas foram utilizadas as seguintes abreviações das variáveis: umid. da manta que significa umidade da manta, dens. apar. da manta que significa densidade aparente da manta, veloc. do feltro que significa velocidade do feltro, limp. feltro que significa pressão na limpeza e secagem do feltro, séc. pel. que significa pressão na secagem da, antiespum. que significa vazão de antiespumante.

Os melhores subconjuntos foram sublinhados, destacando as variáveis que mais influenciam nas respostas. O critério empregado nesta escolha está descrito no item 3.2.4.

Tabela 7 - Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Umid. da Manta	Dens. Apar. da Manta	Mono-pel.	Veloc. do Feltro	Resíduo	Retenção	Limp. do Feltro 1	Fixação da Caixa 1	Fixação da Caixa 3	Sec. Pel. 1	Anti-espum.
1	17,9	16,9	51,9	749,5	X										
1	7,2	6,1	69,5	796,9				X							
2	26,7	25,0	39,3	712,1	X		X								
2	23,1	21,2	45,4	729,8	X				X						
3	34,2	31,9	29,0	678,7	X		X		X						
3	33,9	31,5	29,6	680,6	X		X			X					
4	39,2	36,3	22,8	656,3	X		X		X	X					
4	37,0	34,0	26,4	668,1	X		X		X		X				
5	43,3	39,8	18,1	637,7	X		X	X	X	X					
5	41,2	37,6	21,5	649,4	X		X		X	X	X	X			
6	45,4	41,3	16,8	630,2	X		X		X	X	X	X			
6	45,1	41,0	17,1	631,5	X		X	X	X	X					X
7	47,0	42,3	16,1	624,5	X		X		X	X	X	X			X
7	46,9	42,2	16,3	625,3	X		X	X	X	X	X	X			
8	49,1	43,9	14,6	616,1	X		X	X	X	X	X	X			X
8	48,8	43,6	15,1	617,7	X	X	X	X	X	X	X	X			
9	51,3	45,6	12,9	606,2	X	X	X	X	X	X	X	X			X
9	50,1	44,3	14,9	613,5	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
10	52,2	45,9	13,6	605,0	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
10	52,1	45,8	13,7	605,4	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
11	54,2	47,6	12,0	594,9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 8 - Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Peso da Prensa	Umid. da Película	Dens. Apar. da Manta	Mono-pel.	Veloc. do Feltro	Cone 1	Saída de Caixas	Limp. do Feltro 1	Limp. do Feltro 2	Sec. Pel. 1
1	24,6	23,7	18,8	312,0				X						
1	22,5	21,5	21,6	316,4								X		
2	38,4	36,8	3,3	283,9				X				X		
2	34,7	33,0	8,1	292,4				X					X	
3	40,6	38,3	2,5	280,5			X	X				X		
3	40,4	38,0	2,8	281,1	X			X				X		
4	42,6	39,5	2,0	277,7			X	X		X		X		
4	42,6	39,5	2,0	277,7				X	X		X	X		
5	45,4	41,8	0,4	272,5		X		X	X		X	X		
5	44,9	41,2	1,1	273,8		X		X	X	X		X		
6	47,1	42,8	0,3	270,1		X		X	X	X		X		X
6	46,9	42,6	0,6	270,7			X	X	X	X		X		

Como pode ser observado na Tabela 7, o melhor subconjunto da regressão para a resposta resistência com a influência das matérias-primas abrange 11 variáveis a serem analisadas, uma vez que o R^2 está mais próximo do $R^2_{ajustado}$, o valor do Cp de Mallows está próximo do número de variáveis e o s é o menor se comparado com os demais subconjuntos.

Já para a resposta resistência sem a influência das matérias-primas, observado na Tabela 8, o melhor subconjunto abrange 4 variáveis a serem analisadas, utilizando o mesmo critério de seleção.

Estes subconjuntos são orientativos para o início da regressão, podendo ser retiradas variáveis ou acrescentadas outras de acordo com o andamento da análise.

As Tabelas 9 e 10 apresentam a estatística Cp de Mallows da resposta densidade com e sem influência das matérias-primas respectivamente, para a espessura da telha de 5 mm.

Tabela 9 - Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Gram.	Celulose	Umid. da Película	Umid. da Manta	Dens. Apar. da Manta	Masseira	Cone 1	Saída de Caixas	Retenção	Fixação da Caixa 3
1	31,2	30,9	129,2	0,038					X					
1	31,1	30,8	129,9	0,038				X						
2	42,6	42,2	71,0	0,035				X			X			
2	40,7	40,2	81,3	0,035					X					
3	49,1	48,5	39,0	0,033		X			X		X			
3	48,5	47,9	42,0	0,033		X		X			X			
4	53,5	52,7	18,0	0,032	X	X			X		X			
4	52,4	51,6	23,8	0,032	X	X			X			X		
5	55,1	54,1	11,4	0,031	X	X			X		X		X	
5	55,0	54,0	11,9	0,031	X	X		X	X		X			
6	56,5	55,4	6,1	0,031	X	X		X	X		X		X	
6	56,3	55,1	7,3	0,031	X	X	X	X	X		X			
7	57,6	56,3	2,1	0,030	X	X	X	X	X		X		X	
7	57,4	56,1	3,5	0,030	X	X	X	X	X		X	X		
8	58,1	56,6	1,6	0,030	X	X	X	X	X		X		X	X
8	58,0	56,6	2,0	0,030	X	X	X	X	X		X		X	

Tabela 10 - Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 5 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Peso da Prensa	Umid. da Manta	Dens. Apar. da Manta	Pressão Linear	Mixer	Cone 1	Resíduo	Fixação da Caixa 2	Sec. Pel. 3
1	31,0	30,1	62,0	0,029			X						
1	23,9	22,9	76,2	0,030						X			
2	44,6	43,2	36,5	0,026			X			X			
2	44,3	42,8	37,2	0,026			X						
3	53,6	51,8	20,4	0,024			X		X	X			
3	52,0	50,1	23,6	0,024			X				X		
4	57,8	55,5	14,1	0,023			X		X	X			X
4	56,8	54,6	15,9	0,023		X			X	X			X
5	59,7	57,0	12,2	0,023			X		X	X	X		X
5	59,5	56,8	12,5	0,023		X	X		X	X			X
6	62,1	59,1	9,2	0,022	X		X	X	X	X	X		
6	61,8	58,7	9,9	0,022			X	X	X	X	X		X
7	63,7	60,2	8,2	0,022	X		X	X		X	X		X
7	63,2	59,7	9,1	0,022			X	X	X	X	X		X
8	65,2	61,3	7,1	0,022	X		X	X	X	X	X		X
8	64,6	60,7	8,2	0,022	X		X	X	X	X	X	X	X
9	66,1	61,8	7,3	0,022	X	X	X	X	X	X	X		X
9	65,7	61,4	8,0	0,022	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10	66,7	62,0	8,0	0,021	X	X	X	X	X	X	X		X
10	66,7	62,0	8,0	0,021	X	X	X	X	X	X	X		X

Como pode ser observado na Tabela 9, o melhor subconjunto da regressão para a resposta densidade com a influência das matérias-primas abrange 8 variáveis a serem analisadas, uma vez que o R^2 está mais próximo do $R^2_{ajustado}$, o valor do Cp de Mallows está próximo do número de variáveis e o s é o menor se comparado com os demais subconjuntos.

Já para a resposta densidade sem a influência das matérias-primas, observado na Tabela 10, o melhor subconjunto abrange 9 variáveis a serem analisadas, utilizando o mesmo critério de seleção.

Estes subconjuntos são orientativos para o início da regressão, podendo ser retiradas variáveis ou acrescentadas outras de acordo com o andamento da análise.

b. Espessura da telha de 6 mm.

As Tabelas 11 e 12 apresentam a estatística Cp de Mallows da resposta resistência com e sem influência das matérias-primas respectivamente, para a espessura da telha de 6 mm.

Nas tabelas foram utilizadas as seguintes abreviações das variáveis: resíduo MP que significa porcentagem de resíduo na matéria-prima, umid. da película que significa umidade da película, umid. da manta que significa umidade da manta, dens. apar. da manta que significa densidade aparente da manta, veloc. do feltro que significa velocidade do feltro, limp. feltro que significa pressão na limpeza e secagem do feltro, séc. pel. que significa pressão na secagem da e antiespum. que significa vazão de antiespumante.

Os melhores subconjuntos foram sublinhados, destacando as variáveis que mais influenciam nas respostas.

Tabela 11 - Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Peso da Prensa	Calcário	Resíduo MP	Umid. da Película	Umid. da Manta	Dens. Apar. da Manta	Veloc. do Feltro	Cone 1	Saída de Caixas	Fixação da Caixa 2
1	7,9	7,4	19,7	375,8								X		
1	6,0	5,4	24,0	379,8									X	
2	12,5	11,5	11,9	367,4	X							X		
2	12,5	11,5	11,9	367,4	X								X	
3	15,1	13,7	8,3	362,9	X								X	X
3	14,6	13,2	9,3	363,9	X							X		X
4	16,0	14,1	8,3	361,9	X							X	X	X
4	15,9	14,0	8,5	362,2	X			X					X	X
5	17,7	15,4	6,6	359,3	X				X	X			X	X
5	17,6	15,3	6,8	359,5	X				X	X		X		X
6	18,6	15,9	6,5	358,2	X				X	X		X	X	X
6	18,4	15,7	6,9	358,6	X				X	X		X		X
7	19,8	16,6	6,1	356,7	X	X	X	X		X	X	X		
7	19,7	16,5	6,1	356,8	X	X	X	X			X	X	X	
8	21,1	17,5	5,1	354,7	X	X	X	X		X	X	X	X	
8	20,6	17,0	6,2	355,8	X	X	X	X		X	X	X		
9	21,8	17,8	5,6	354,1	X	X	X	X		X	X	X	X	X
9	21,8	17,8	5,6	354,1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
10	22,5	18,0	6,2	353,7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 12 - Melhores subconjuntos para a variável resposta resistência sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Umid. da Manta	Cone 1	Limp. do Feltro 2	Fixação da Caixa 2	Anti-espum.
1	17,3	16,3	13,0	353,1				X	
1	13,2	12,2	17,8	361,7			X		
2	29,7	28,0	0,5	327,6		X		X	
2	26,7	24,9	4,0	334,5				X	X
3	33,2	30,8	-1,6	321,2		X		X	X
3	32,5	30,1	-0,8	322,8	X	X		X	
4	36,2	33,1	-3,2	315,7	X	X		X	X
4	34,6	31,5	-1,3	319,6		X	X	X	X
5	37,5	33,7	-2,6	314,5	X	X	X	X	X
5	37,2	33,4	-2,3	315,1	X	X		X	X

Como pode ser observado na Tabela 11, o melhor subconjunto da regressão para a resposta resistência com a influência das matérias-primas abrange 8 ou 9 variáveis a serem analisadas, uma vez que o R^2 está mais próximo do $R^2_{ajustado}$, o valor do Cp de Mallows está próximo do número de variáveis e o s é o menor se comparado com os demais subconjuntos.

Já para a resposta resistência sem a influência das matérias-primas, observado na Tabela 12, o melhor subconjunto abrange 4 variáveis a serem analisadas, utilizando o mesmo critério de seleção.

As Tabelas 13 e 14 apresentam a estatística Cp de Mallows da resposta densidade com e sem influência das matérias-primas respectivamente, para a espessura da telha de 6 mm.

Tabela 13 - Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade com influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Perm.	Gram.	Calcário	Resíduo MP	Umid. da Película	Dens. Apar. da Manta	Veloc. do Feltro	Pressão Linear	Masseira	Resíduo	Limp. do Feltro 1
1	29,0	28,6	79,4	0,033				X							
1	27,7	27,3	84,1	0,033			X								
2	37,8	37,1	49,1	0,031				X		X					
2	37,0	36,3	52,1	0,031			X			X					
3	40,9	39,9	39,7	0,030				X		X					
3	40,7	39,7	40,3	0,030				X		X					X
4	43,7	42,5	31,2	0,030				X		X		X			X
4	43,6	42,4	31,5	0,030			X			X		X			X
5	45,7	44,2	25,8	0,029				X		X		X	X		X
5	45,6	44,1	26,2	0,029			X			X		X	X		X
6	47,1	45,4	22,6	0,029				X		X	X	X	X		X
6	47,1	45,3	22,7	0,029			X			X	X	X	X		X
7	48,7	46,7	18,9	0,028			X			X	X	X	X	X	X
7	48,7	46,7	18,9	0,028				X		X	X	X	X	X	X
8	50,1	47,9	15,7	0,028				X	X	X	X	X	X	X	X
8	50,1	47,8	15,8	0,028			X		X	X	X	X	X	X	X
9	51,3	48,9	13,2	0,028	X	X		X	X	X	X	X	X		X
9	51,2	48,7	13,6	0,028	X	X	X		X	X	X	X	X		X
10	52,6	49,9	10,4	0,028	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
10	52,6	49,9	10,6	0,028	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
11	53,2	50,2	10,5	0,028	X			X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 14 - Melhores subconjuntos para a variável resposta densidade sem influência das matérias-primas, para a espessura da telha de 6 mm.

Número de Variáveis	R^2	R^2_{adj}	Cp de Mallows	s	Umid. da Película	Dens. Apar. da Manta	Pressão Linear	Masseira	Mixer	Cone 1	Resíduo	Fixação da Caixa 1	Sec. Pel. 1	Sec. Pel. 2
1	19,7	18,6	30,1	0,028	X									
1	15,4	14,3	35,7	0,029		X								
2	30,6	28,9	17,4	0,027	X					X				
2	27,9	26,0	21,1	0,027	X			X						
3	35,8	33,3	12,5	0,026	X			X		X				
3	35,3	32,8	13,2	0,026	X		X			X				
4	41,1	38,0	7,4	0,025	X	X		X					X	
4	40,1	36,9	8,8	0,025	X	X		X		X				
5	43,9	40,2	5,7	0,024	X	X		X		X			X	
5	42,8	39,0	7,2	0,025	X		X	X		X	X			
6	46,1	41,7	4,8	0,024	X	X	X	X		X			X	
6	45,9	41,5	5,1	0,024	X	X		X		X			X	
7	47,9	42,9	4,4	0,024	X	X	X	X	X	X			X	
7	47,5	42,4	5,0	0,024	X	X	X	X		X			X	
8	49,4	43,8	4,4	0,024	X	X	X	X	X	X	X		X	
8	49,1	43,5	4,8	0,024	X	X	X	X	X	X			X	
9	50,5	44,2	5,0	0,024	X	X	X	X	X	X	X		X	
9	50,3	44,1	5,2	0,024	X	X		X		X	X	X	X	X
10	51,8	45,0	5,2	0,023	X	X	X	X	X	X	X		X	
10	51,8	44,9	5,3	0,023	X	X	X	X	X	X	X		X	
11	52,8	45,2	5,9	0,023	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Como pode ser observado na Tabela 13, o melhor subconjunto da regressão para a resposta densidade com a influência das matérias-primas abrange 10 variáveis a serem analisadas, uma vez que o R^2 está mais próximo do $R^2_{ajustado}$, o valor do Cp de Mallows está próximo do número de variáveis e o s é o menor se comparado com os demais subconjuntos.

Já para a resposta densidade sem a influência das matérias-primas, observado na Tabela 14, o melhor subconjunto abrange 9 variáveis a serem analisadas, utilizando o mesmo critério de seleção.

5.4 CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTE

Para uma melhor visualização dos modelos, com vantagens de interpretação, as variáveis tomadas como independentes foram codificadas (utilizando a equação 1), todas entre -1 e +1, assim os coeficientes podem ser comparados em valor absoluto. As variáveis consideradas independentes e suas unidades são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Unidade das Variáveis Independentes do processo estudado.

Variáveis Independentes	**Valor Mínimo para 5 mm**	**Valor Máximo para 5 mm**	**Valor Mínimo para 6 mm**	**Valor Máximo para 6 mm**	**Unidade**
Diâmetro da Prensa	1,3	1,7	1,3	1,7	m
Peso da Prensa	2560	3500	2560	3500	kg
Permeabilidade do Feltro	159,0	206,2	138,6	206,2	m³/h
Gramatura do Feltro	1804,0	1975,0	1669,0	1975,0	g/m²
Cimento	68,9	69,0	68,9	69,0	% mássica
Amianto	9,9	10,0	9,9	10,0	% mássica
Calcário	17,2	18,5	17,2	18,5	% mássica

Continua

Continuação

Variáveis Independentes	Valor Mínimo para 5 mm	Valor Máximo para 5 mm	Valor Mínimo para 6 mm	Valor Máximo para 6 mm	Unidade
Resíduo da Matéria-prima	1,0	2,2	1,0	2,2	% mássica
Celulose	1,7	1,7	1,7	1,7	% mássica
Umidade da Película	31,2	37,1	31,1	38,1	%
Umidade da Manta	21,9	26,0	22,1	25,9	%
Densidade Aparente da Manta	1,8	1,9	1,8	2,0	g/cm³
Espessura da Monopelícula	0,2	0,3	0,2	0,3	mm
Velocidade do Feltro	74,0	80,7	72,8	80,4	m/min
Pressão linear	50,2	73,0	50,2	73,0	kg/cm²
Concentração na Masseira	239,9	267,5	222,6	266,6	g/L
Concentração no Mixer	105,2	160,8	113,6	167,3	g/L
Concentração no Cone 1	33,2	74,7	42,7	72,4	g/L
Concentração de Resíduos	93,6	231,6	124,7	231,0	g/L
Concentração na Saída das Caixas	14,1	27,1	14,5	22,5	g/L
Retenção	78,1	89,8	82,9	89,5	% mássica

Continua

Continuação

Variáveis Independentes	Valor Mínimo para 5 mm	Valor Máximo para 5 mm	Valor Mínimo para 6 mm	Valor Máximo para 6 mm	Unidade
Pressão na Limpeza e Secagem do Feltro 1	4,0	14,0	4,0	13,0	inHg
Pressão na Limpeza e Secagem do Feltro 2	3,0	13,0	3,0	13,0	inHg
Pressão na Fixação 1	4,0	15,0	5,0	15,0	inHg
Pressão na Fixação 2	13,0	19,0	9,0	19,0	inHg
Pressão na Fixação 3	12,0	19,0	5,0	18,0	inHg
Pressão na Secagem da Película 1	8,0	18,0	6,0	18,0	inHg
Pressão na Secagem da Película 2	4,0	17,0	5,0	18,0	inHg
Pressão na Secagem da Película 3	7,0	19,0	10,0	19,0	inHg
Vazão de Antiespumante	4,3	8,9	4,3	7,4	L/min

As variáveis de resposta foram chamadas de R (resistência) e D (densidade).

Na Tabela 16 é mostrado um exemplo de uma planilha com as variáveis codificadas.

Tabela 16 – Exemplo de Planilha com variáveis independentes codificada

Data	Cod_ Umidade Película	Umidade Película	Cod_ Umidade Manta	Umidade Manta	Cod_ Densidade Aparente Manta	Densidade Aparente Manta	Cod_ Monopelícula	Monopelícula
04/12/06	-1,00	20,50	-0,13	23,50	-0,34	1,85	0,28	0,29
04/12/06	-0,87	25,61	-0,21	22,74	-0,30	1,86	0,28	0,29
04/12/06	-0,73	31,33	-0,11	23,65	-0,07	1,88	0,28	0,29
05/12/06	-0,72	31,38	0,01	24,84	-0,26	1,86	0,28	0,29
05/12/06	-0,72	31,39	-0,02	24,49	-0,50	1,83	0,28	0,29
05/12/06	-0,72	31,50	-0,01	24,59	-0,13	1,87	0,28	0,29
05/12/06	-0,72	31,53	0,04	25,10	0,21	1,91	0,28	0,29
06/12/06	-0,72	31,53	-0,09	23,87	-0,26	1,86	0,50	0,30
06/12/06	-0,72	31,57	0,01	24,86	-0,31	1,85	0,50	0,30
06/12/06	-0,72	31,58	-0,08	23,98	-0,14	1,87	0,50	0,30
06/12/06	-0,72	31,59	0,06	25,31	-0,12	1,87	0,50	0,30
07/12/06	-0,72	31,68	0,07	25,38	-0,58	1,83	0,50	0,30
07/12/06	-0,72	31,69	-0,04	24,34	-0,53	1,83	-0,85	0,24
07/12/06	-0,71	31,78	0,13	25,96	-0,51	1,83	0,50	0,30
07/12/06	-0,71	31,84	0,11	25,81	-0,40	1,85	-0,85	0,24
08/12/06	-0,71	31,88	0,17	26,39	-0,36	1,85	0,95	0,32
08/12/06	-0,71	31,91	0,09	25,57	-0,30	1,86	0,50	0,30
09/12/06	-0,71	31,96	0,25	27,09	-0,45	1,84	0,50	0,30

5.5 PREDIÇÃO DOS MODELOS PARA O PROCESSO

Após codificação de todas as variáveis e a seleção dos melhores subconjuntos da regressão, os dados das variáveis selecionadas foram inseridos na função regressão do programa MINITAB.

A seguir será apresentado um resumo das variáveis de processo mais importantes que influenciam as respostas Resistência e Densidade, para as espessuras nominais 5,0 e 6,0 mm.

5.5.1 Espessura da telha de 5 mm.

- Resistência

Para a resistência foram analisados aproximadamente 70 conjuntos de dados.

As Tabelas 17 e 18 mostram as variáveis mais influentes para a resposta resistência com e sem influência das matérias-primas.

Tabela 17 – Variáveis mais importantes para resposta resistência com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.

	Coef	t	p
Constante	3985,74	86,35	0,000
Umid. da Manta	-177,30	-2,13	0,034
Monopelícula	-329,55	-7,74	0,000
Saída de Caixas	-381,55	-4,37	0,000
Antiespumante	149,74	2,83	0,005
Cimento	1688,70	1,71	0,088

R^2=26%

Por meio dos coeficientes das variáveis observa-se que o aumento das variáveis, umidade da manta, espessura da monopelícula e concentração nas saídas das caixas diminuem a resistência, enquanto que o aumento da vazão de antiespumante

e da porcentagem de cimento aumentam a resistência. Embora a variação do teor de cimento seja pequena o ajuste matemático indicou um elevado coeficiente para esta variável.

Tabela 18 – Variáveis mais importantes para resposta resistência sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.

	Coef	t	p
Constante	3927,45	101,97	0,000
Umid. Manta	113,77	1,59	0,117
Dens. Apar. da Manta	-103,54	-1,53	0,130
Monopelícula	-370,44	-6,48	0,000
Veloc. do Feltro	204,49	2,14	0,036
Saída de Caixas	-143,45	-2,33	0,023

R^2=65%

Para o modelo sem a influência das matérias-primas o aumento da densidade aparente da manta, espessura da monopelícula, concentração nas saídas das caixas diminuem a resistência, enquanto que o aumento da velocidade do feltro e da umidade da manta aumentam a resistência. Este aumento na resistência devido à umidade da manta não possui uma explicação física, porém esta variável pode ser desconsiderada do modelo, assim como a densidade aparente da manta uma vez que o valor de p é maior que 10%.

As variáveis destacadas em cinza são aquelas que permaneceram no modelo, com ou sem as matérias-primas.

Os modelos lineares para resistência com (Rc) e sem (Rs) a influência das matérias-primas estão apresentados nas equações 22 e 23, respectivamente, para a telha de 5 mm:

$$Rc = 3986 - 177 \times \text{Umid. Manta} - 330 \times \text{Monopelícula} - 382 \times \text{SaídaCaixa} + 150 \times \text{Antiespumante} + 1689 \times \text{Cimento} \quad (22)$$

$$Rs = 3927 + 114 \times \text{Umid. Manta} - 370 \times \text{Monopelícula} - 143 \times \text{SaídaCaixa} - 104 \times \text{DensAparManta} + 204 \times \text{Veloc.Feltro} \quad (23)$$

É possível observar que a ordem de grandeza dos coeficientes das variáveis independentes e da variável resposta resistência foram mantidas.

O modelo predito para a resistência sem a influência das matérias-primas apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,65, isto é, 65% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo, enquanto que considerando a influência das matérias-primas o modelo apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,26, isto é, 26% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo.
A regressão foi feita empregando o programa MINITAB versão 15

- Densidade

Para a densidade foram analisados aproximadamente 76 conjuntos de dados.
As Tabelas 19 e 20 mostram as variáveis mais importantes para a resposta densidade com e sem influência das matérias-primas, respectivamente.

Tabela 19 – Variáveis mais importantes para resposta densidade com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.

	Coef	**t**	**p**
Constante	1,5024	329,39	0,000
Gramat.	0,0075	3,64	0,000
Celulose	-0,0209	-7,61	0,000
Umid. Película	0,03229	3,54	0,000
Umid. Manta	-0,03239	-3,85	0,000
Dens. Apar. Manta	0,03599	5,29	0,000
Cone 1	0,02630	5,07	0,000
Retenção	-0,02171	-4,06	0,000

R^2=63%

Por meio dos coeficientes das variáveis observa-se que o aumento das variáveis umidade da manta, porcentagem de celulose e porcentagem de retenção diminuem a resistência, enquanto que o aumento da gramatura, da umidade da película, da densidade aparente da manta e da concentração no cone 1 aumentam a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois o valor de p é muito baixo.

Tabela 20 – Variáveis mais importantes para resposta densidade sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 5 mm.

	Coef	t	p
Constante	1,52	483,16	0,000
Umid. Manta	-0,019	-2,39	0,019
Dens. Apar. da Manta	0,021	2,81	0,006
Pressão Linear	0,015	3,16	0,002
Mixer	-0,030	-5,32	0,000
Cone 1	0,032	5,50	0,000
Resíduo	-0,021	-3,51	0,001

Para o modelo sem a influência das matérias-primas o aumento da umidade da manta, da concentração no mixer e porcentagem de resíduo diminuem a resistência, enquanto que o aumento da densidade aparente da manta, da pressão linear e da concentração no cone 1 aumentam a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois os valores de p são muito baixos.

As variáveis destacadas em cinza são aquelas que permaneceram no modelo, mesmo sendo retiradas as matérias-primas.

Foram obtidos os modelos lineares para densidade com (Dc) e sem (Ds) a influência das matérias-primas de acordo com as equações 24 e 25 , respectivamente para a telha de 5 mm:

$Dc = 1{,}50 + 0{,}075 \times Gramat - 0{,}021 \times Celulose + 0{,}032 \times UmidPelícu\ la - 0{,}032 \times UmidManta + 0{,}036 \times DensAparManta + 0{,}026 \times Cone1 - 0{,}022 \times Retenção$	(24)
$Ds = 1{,}52 - 0{,}019 \times UmidManta + 0{,}021 \times DensAparManta + 0{,}015 \times Pressão\ Linear - 0{,}030 \times Mixer + 0{,}032 \times Cone1 - 0{,}021 \times Resíduo$	(25)

Assim como para a resistência, é possível observar que a ordem de grandeza das variáveis independentes e da variável resposta resistência foram mantidas.

O modelo predito para a densidade sem a influência das matérias-primas apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,73, isto é, 73% da variabilidade

do processo é explicado pelo modelo, enquanto que considerando a influência das matérias-primas o modelo apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,63, isto é, 63% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo.

5.5.2 Espessura da telha de 6 mm.

- Resistência

Para a resistência foram analisados aproximadamente 81 conjuntos de dados.
As Tabelas 21 e 22 mostram as variáveis mais importantes para a resposta resistência com e sem influência das matérias-primas, respectivamente.

Tabela 21 – Variáveis mais importantes para resposta resistência com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.

	Coef	t	p
Constante	4887,00	139,84	0,000
Um da Película	-283,00	-3,42	0,001
Dens. Apar. da Manta	-203,00	-3,51	0,001
Veloc. do Feltro	464,00	3,56	0,000
Saída das Caixas	-251,00	-4,22	0,000
Peso da Prensa	-361,00	-5,69	0,000
Calcário	-1618,00	-3,90	0,000
Resíduo (MP)	-1457,00	-3,71	0,000

R^2=33%

Por meio dos coeficientes das variáveis observa-se que o aumento das variáveis umidade da película, densidade aparente da manta, concentração nas saídas das caixas, peso da prensa, porcentagem de calcário e porcentagem de resíduo da matéria-prima diminuem a resistência, enquanto que o aumento da velocidade do feltro aumenta a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois o valor de p é muito baixo.

Tabela 22 – Variáveis mais importantes para resposta resistência sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.

	Coef	t	p
Constante	4907,24	133,94	0,000
Gramat.	269,66	4,39	0,000
Umid. Manta	-236,54	-3,55	0,001
Cone 1	-297,89	-5,21	0,000
Fixação da Caixa 1	-370,63	-6,55	0,000

R^2=47%

Para o modelo sem a influência das matérias-primas o aumento da umidade da manta, da concentração no cone 1 e pressão na fixação da caixa 1 diminuem a resistência, enquanto que o aumento da gramatura aumenta a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois o valor de p é muito baixo

Foram obtidos os modelos lineares para resistência com (Rc) a influência das matérias-primas e peso da prensa entre 3500 (cód. +1) e 2560 (cód. -1) de acordo com as equações 26 e 27 respectivamente, e o modelo linear para resistência sem (Rs) a influência das matérias-primas de acordo com a equação 28, para a telha de 6 mm:

$$Rc_{+1} = 4526 - 283 \times UmPel - 203 \times DAManta + 464 \times VelFel - 251 \times SaidaCx - 1618 \times Calcário - 1457 Residuo(MP) \quad (26)$$

$$Rc_{-1} = 5248 - 283 \times UmPel - 203 \times DAManta + 464 \times VelFel - 251 \times SaidaCx - 1618 \times Calcário - 1457 Residuo(MP) \quad (27)$$

$$Rs = 4907 + 269 \times Gramat - 237 \times UmidManta - 298 \times Cone1 - 371 \times FixaçãoCaixa1 \quad (28)$$

Para a resistência é possível observar que a ordem de grandeza dos coeficientes das variáveis independentes e da variável resposta resistência foram mantidas, porém as variáveis não foram as mesmas.

O modelo predito para a resistência sem a influência das matérias-primas apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,47 , isto é, 47% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo, enquanto que considerando a influência das

matérias-primas o modelo apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,33, isto é, 33% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo.

- Densidade

Para a densidade foram analisados aproximadamente 81 conjuntos de dados.
As Tabelas 23 e 24 mostram as variáveis mais importantes para a resposta densidade com e sem influência das matérias-primas, respectivamente.

Tabela 23 – Variáveis mais importantes para resposta densidade com influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.

	Coef	**t**	**p**
Constante	1,54	625,73	0,000
Umid. Pelicula	-0,034	-7,03	0,000
Dens. Apar. Manta	0,023	5,27	0,000
Veloc. do Feltro	-0,013	-2,80	0,006
Pressão Linear	0,023	4,69	0,000
Masseira	0,017	3,13	0,002
Cone1	0,021	4,13	0,000
Limp. Feltro 1	-0,022	-5,04	0,000

R^2=62%

Por meio dos coeficientes das variáveis observa-se que o aumento das variáveis umidade da película, velocidade do feltro e pressão na limpeza e secagem do feltro 1 diminuem a resistência, enquanto que o aumento da densidade aparente da manta, pressão linear, concentração na masseira e concentração no cone 1 aumentam a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois o valor de p é muito baixo.

Tabela 24 – Variáveis mais importantes para resposta densidade sem influência das matérias-primas, para telha com espessura de 6 mm.

	Coef	t	p
Constante	1,54	267,54	0,000
Gramat.	0,027	4,86	0,000
Umid. Película	-0,033	-5,22	0,000
Dens. Apar. da Manta	0,029	3,35	0,001
Veloc. do Feltro	-0,013	-2,31	0,024
Pressão Linear	0,017	3,18	0,002
Masseira	0,020	2,50	0,015
Cone 1	0,020	3,00	0,004
Saída de Caixas	-0,025	-3,30	0,002
Séc. Pel. 1	-0,018	-3,77	0,000

R^2=65%

Para o modelo sem a influência das matérias-primas o aumento da umidade da película, velocidade do feltro, concentração na saída das caixas e pressão na secagem da película 1 diminuem a resistência, enquanto que o aumento da gramatura, densidade aparente da manta, pressão linear, concentração na masseira e concentração no cone 1 aumentam a resistência. Neste modelo todas as variáveis apresentadas exercem uma grande influência na resistência, pois o valor de p é muito baixo.

Foram obtidos os modelos lineares para densidade com (Dc) e sem (Ds) a influência das matérias-primas de acordo com as equações 29 e 30, respectivamente para a telha de 5 mm:

$$Dc = 1{,}54 - 0{,}034 \times UmidPelícu\,la + 0{,}023 \times Dens.Apar.Manta - 0{,}013 \times Veloc.Feltro + 0{,}023 \times Plinear + 0{,}017 \times Masseira + 0{,}021 \times Cone1 - 0{,}022 \times LimpFeltro1 \quad (29)$$

$$Ds = 1{,}54 + 0{,}027 \times Gramat - 0{,}033 \times UmidPelícu\,la + 0{,}029 \times DensAparManta - 0{,}013 \times VelocFeltro + 0{,}017 \times PressãoLinear + 0{,}020 \times Masseira + 0{,}020 \times Cone1 - 0{,}025 \times SaídaCaixas - 0{,}018SecPel1 \quad (30)$$

Para a densidade observa-se que a ordem de grandeza das variáveis independentes e da variável resposta resistência foram mantidas, e quase todas as variáveis foram as mesmas nos dois modelos.

O modelo predito para a densidade sem a influência das matérias-primas apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,65, isto é, 65% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo, enquanto que considerando a influência das matérias-primas o modelo apresenta um coeficiente de determinação para o ajuste de 0,62, isto é, 62% da variabilidade do processo é explicado pelo modelo.

Como os modelos da densidade e resistência para a espessura da telha de 5 mm e 6 mm, apresentaram variáveis em comum, é necessário realizar a otimização do processo.

5.6 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Nos subitens a seguir os modelos ajustados foram confrontados com dados posteriores, nos quais os referidos modelos foram empregados para predizer valores para a resistência e densidade, com o objetivo de verificar qual é o afastamento entre os valores observados e os valores preditos. Este afastamento é definido como resíduos (desvios) aqui estimados como: valor observado menos valor predito. Os resíduos apresentados nas Tabelas 25 e 26 (comparação entre os valores medidos versus preditos para a espessura de 5 mm) e Tabelas 27, 28 e 29 (comparação entre os valores medidos versus preditos para a espessura de 6 mm) foram plotados em gráficos em função do número do conjunto de dados. Os modelos foram discutidos em relação à linha de referência no resíduo zero (não há desvio), lembrando que em um modelo que representa bem o conjunto de dados, os resíduos devem se distribuir aleatoriamente em torno de zero.

Tabela 25 – Dados da Resistência e Densidade sem a influência das matérias-primas para espessura 5,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos

Data	Umidade da Manta (%)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)	Monopelícula (mm)	Veloc. do feltro (m/min)	Pressão Linear (kg/cm²)	Mixer (g/L)	Cone 1 (g/L)	Resíduo (g/L)	Saída das caixas (g/L)	Resist. Obs. (N/m)	Resist. Pred. (N/m)	Residuo R_Obs - R_Pred.	Densidade. Obs. (g/cm³)	Densidade Pred. (g/cm³)	Residuo D_Obs-D_Pred.
02/11/08	24,8	1,88	0,24	86,2	55,1	118,2	43,7	343,2	23,1	3.902	4810	-908	1,53	1,45	0,08
02/11/08	25,6	1,84	0,24	86,2	55,1	106,4	47,4	272,4	22,1	4.111	4972	-861	1,50	1,47	0,03
03/11/08	24,5	1,86	0,24	86,2	50,2	113,9	51,9	186,4	17,9	4.536	4946	-410	1,49	1,51	-0,02
04/11/08	23,1	1,89	0,24	86,2	50,2	112,9	53,4	189,4	19,5	4.408	4763	-355	1,50	1,54	-0,04
04/11/08	22,8	1,87	0,24	86,2	50,2	137,9	45,9	329,4	18,9	4.758	4809	-51	1,48	1,45	0,03
04/11/08	25,2	1,88	0,24	86,2	51,9	109,9	47,9	210,9	20,3	3.983	4883	-900	1,51	1,50	0,01
06/11/08	25,0	1,89	0,30	89,8	60,0	130,4	56,9	207,4	19,9	4.054	4352	-298	1,50	1,51	-0,01
06/11/08	22,6	1,87	0,30	89,8	60,0	130,9	55,9	191,9	18,7	3.790	4299	-509	1,51	1,52	-0,01
07/11/08	25,2	1,86	0,30	89,8	58,3	131,4	50,4	215,9	19,8	4.640	4426	214	1,50	1,48	0,02
07/11/08	25,0	1,87	0,30	89,8	58,3	126,4	55,4	190,9	19,4	4.492	4412	80	1,51	1,51	0,00
07/11/08	26,3	1,83	0,30	90,5	58,3	129,9	49,9	272,9	17,5	4.166	4651	-485	1,51	1,44	0,07
08/11/08	24,1	1,88	0,30	89,8	58,3	154,9	61,4	254,9	20,9	3.923	4307	-384	1,49	1,48	0,01
08/11/08	24,4	1,90	0,30	89,8	56,7	155,9	74,9	352,4	21,2	3.812	4264	-452	1,49	1,47	0,02
08/11/08	25,6	1,92	0,30	89,8	58,3	140,4	48,4	247,4	17,5	4.182	4381	-199	1,47	1,48	-0,01
11/11/08	22,7	1,88	0,30	90,5	63,2	160,1	66,1	349,6	22,7	3.831	4230	-399	1,53	1,47	0,06
11/11/08	25,5	1,84	0,30	90,5	58,3	169,1	63,1	227,6	19,7	3.252	4541	-1289	1,52	1,44	0,08
12/11/08	25,2	1,86	0,30	90,5	63,2	153,6	67,6	233,6	19,9	3.592	4476	-884	1,53	1,48	0,05
12/11/08	25,1	1,86	0,30	90,5	63,2	154,1	65,6	289,6	20,7	3.534	4452	-918	1,51	1,46	0,05
12/11/08	24,8	1,83	0,30	90,5	64,9	153,7	63,2	186,7	18,1	3.364	4551	-1187	1,53	1,48	0,05
13/11/08	23,9	1,86	0,24	94,9	55,8	127,2	57,7	213,2	27,1	3.634	5243	-1609	1,48	1,51	-0,03
14/11/08	25,1	1,89	0,24	98,3	55,8	132,2	65,2	235,7	23,8	3.774	5527	-1753	1,50	1,51	-0,01
14/11/08	25,9	1,83	0,24	99,0	55,8	124,2	57,2	213,7	24,8	3.821	5727	-1906	1,47	1,48	-0,01
15/11/08	25,9	1,83	0,24	97,6	57,7	120,7	55,7	156,7	21,5	3.058	5725	-2667	1,49	1,49	0,00
16/11/08	25,6	1,87	0,24	97,6	57,5	130,2	62,7	203,2	23,1	3.792	5572	-1780	1,48	1,50	-0,02
20/11/08	24,4	1,91	0,24	86,2	55,1	157,4	57,9	277,9	19,5	4.069	4808	-739	1,52	1,47	0,05
23/11/08	24,4	1,88	0,30	90,5	61,6	144,2	60,7	197,7	22,1	3.299	4337	-1038	1,53	1,51	0,02

Tabela 26 – Dados da Resistência e Densidade com a influência das matérias-primas para espessura 5,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos

Data	Umidade da Manta (%)	Monopelícula (mm)	Saída das caixas (g/L)	Antiespumante (L/min)	Celulose (% mássica)	Umidade da Película (%)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)	Cone 1 (g/L)	Retenção (% mássica)	Resíduo da MP(% mássica)	Resist. Obs. (N/m)	Resist. Pred. (N/m)	Residuo R_Obs - R_Pred.	Densidade. Obs. (g/cm^3)	Densidade Pred. (g/cm^3)	Residuo D_Obs-D_Pred.
02/11/08	24,8	0,24	23,1	6,6	1,7	35,7	1,88	43,7	80,5	2,2	3.902	4093	-190,7	1,53	1,51	0,02
02/11/08	25,6	0,24	22,1	6,6	1,7	34,1	1,84	47,4	79,2	2,2	4.111	4098	12,7	1,50	1,50	0,00
03/11/08	24,5	0,24	17,9	6,6	2,0	36,1	1,86	51,9	84,3	2,2	4.536	4382	154,2	1,49	1,47	0,02
04/11/08	23,1	0,24	19,5	6,6	1,7	33,3	1,89	53,4	82,7	2,2	4.408	4375	32,8	1,50	1,55	-0,05
04/11/08	22,8	0,24	18,9	6,6	1,7	32,5	1,87	45,9	86,3	2,2	4.758	4422	336,1	1,48	1,53	-0,05
04/11/08	25,2	0,24	20,3	6,6	1,7	34,2	1,88	47,9	81,6	2,2	3.983	4219	-236,3	1,51	1,52	-0,01
06/11/08	25,0	0,30	19,9	7,4	1,7	33,5	1,89	56,9	84,7	2,2	4.054	3862	191,7	1,50	1,53	-0,03
06/11/08	22,6	0,30	18,7	7,4	1,7	32,6	1,87	55,9	85,8	2,2	3.790	4060	-270,4	1,51	1,54	-0,03
07/11/08	25,2	0,30	19,8	7,4	1,7	33,3	1,86	50,4	85,0	2,2	4.640	3859	781,3	1,50	1,51	-0,01
07/11/08	25,0	0,30	19,4	7,4	1,7	33,1	1,87	55,4	84,7	2,2	4.492	3889	603,5	1,51	1,52	-0,01
07/11/08	26,3	0,30	17,5	7,4	1,7	34,3	1,83	49,9	86,5	2,2	4.166	3914	251,6	1,51	1,46	0,05
08/11/08	24,1	0,30	20,9	7,4	1,7	32,1	1,88	61,4	86,5	2,2	3.923	3862	61,4	1,49	1,54	-0,05
08/11/08	24,4	0,30	21,2	7,4	1,7	31,6	1,90	74,9	86,4	2,2	3.812	3831	-19,3	1,49	1,57	-0,08
08/11/08	25,6	0,30	17,5	7,4	1,7	32,4	1,92	48,4	87,5	2,2	4.182	3954	227,9	1,47	1,52	-0,05
11/11/08	22,7	0,30	22,7	6,6	1,7	31,0	1,88	66,1	85,8	2,2	3.831	3792	39,1	1,53	1,57	-0,04
11/11/08	25,5	0,30	19,7	6,6	1,7	32,8	1,84	63,1	88,4	2,2	3.252	3790	-538,3	1,52	1,50	0,02
12/11/08	25,2	0,30	19,9	6,6	1,7	33,5	1,86	67,6	87,0	2,2	3.592	3799	-206,5	1,53	1,51	0,02
12/11/08	25,1	0,30	20,7	6,6	1,7	33,7	1,86	65,6	86,6	2,2	3.534	3764	-229,9	1,51	1,51	0,00
12/11/08	24,8	0,30	18,1	6,6	1,7	32,7	1,83	63,2	88,2	2,2	3.364	3915	-551,3	1,53	1,50	0,03
13/11/08	23,9	0,24	27,1	6,6	1,7	36,5	1,86	57,7	78,7	2,2	3.634	3933	-299,0	1,48	1,53	-0,05
14/11/08	25,1	0,24	23,8	6,6	1,7	35,5	1,89	65,2	82,0	2,2	3.774	4038	-263,7	1,50	1,53	-0,04
14/11/08	25,9	0,24	24,8	6,6	1,7	36,4	1,83	57,2	80,0	2,2	3.821	3942	-121,5	1,47	1,48	-0,01
15/11/08	25,9	0,24	21,5	7,4	1,7	34,3	1,83	55,7	82,2	2,2	3.058	4199	-1110,9	1,49	1,49	0,00
16/11/08	25,6	0,24	23,1	7,4	1,7	33,9	1,87	62,7	82,3	2,2	3.792	4169	-312,4	1,48	1,52	-0,04
20/11/08	24,4	0,24	19,5	7,4	1,7	31,2	1,91	57,9	87,6	2,2	4.069	4104	-291,8	1,52	1,55	-0,04
23/11/08	24,4	0,30	22,1	6,6	1,7	32,0	1,88	60,7	84,7	2,2	3.299	4030	-429,0	1,53	1,54	-0,01

Na Tabela 25 observa-se que os valores residuais para a resistência, ou seja, valor real menos o valor predito, são menores do que os da Tabela 26. Portanto o modelo da equação 22 (com a influência das matérias-primas) está mais próximo do real do que o modelo da equação 23 (sem a influência das matérias-primas)

Para a densidade os valores residuais das análises com e sem a influência das matérias-primas foram próximos e baixos, o que indica que o modelo estatístico está muito próximo do real.

Tabela 27 – Dados da Resistência e Densidade sem a influência das matérias-primas para espessura 6,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos

Data	Gramatura (g/m²)	Umidade da Película (%)	Umidade da Manta (%)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)	Veloc. do feltro (m/min)	Pressão Linear (Kg/cm)	Masseira (g/L)	Cone 1 (g/L)	Saída das caixas (g/L)	Fix Cx 1(inHg)	Sec Pel 1(inHg)	Resist. Obs. (N/m)	Resist. Pred. (N/m)	Residuo R_Obs - R_Pred.	Densidade. Obs. (g/cm^3)	Densidade Pred. (g/cm^3)	Residuo D_Obs- D_Pred.
01/11/08	2.051	36,1	25,4	1,86	86,2	50,2	252,7	45,2	16,6	11,0	16,0	3.902	5305	-1403	1,53	1,49	0,04
01/11/08	2.051	34,2	24,6	1,86	86,2	55,1	260,2	41,2	17,5	12,0	20,0	4.111	5417	-1306	1,50	1,50	0,00
01/11/08	2.051	35,1	25,1	1,85	85,6	55,1	234,2	41,7	14,8	10,0	19,0	4.536	5487	-951	1,49	1,48	0,01
03/11/08	2.051	34,7	25,2	1,88	86,2	61,6	263,4	46,4	18,0	13,0	16,0	4.408	5159	-751	1,50	1,53	-0,03
03/11/08	2.051	34,7	24,5	1,87	86,2	63,3	259,9	54,4	17,0	13,0	17,0	4.758	5089	-331	1,48	1,54	-0,06
05/11/08	2.051	32,5	23,7	1,90	86,2	50,2	260,4	47,4	16,0	13,0	16,0	3.983	5325	-1342	1,51	1,55	-0,04
05/11/08	2.051	34,2	25,2	1,87	85,6	50,2	245,9	56,9	21,4	12,0	20,0	4.054	5019	-965	1,50	1,48	0,02
09/11/08	2.051	33,8	25,3	1,86	90,5	58,3	254,4	50,9	15,6	15,0	16,0	3.790	4911	-1121	1,51	1,52	-0,01
09/11/08	2.051	33,2	24,9	1,85	90,5	60,0	278,4	55,9	20,7	15,0	20,0	4.640	4862	-222	1,50	1,51	-0,01
10/11/08	2.051	32,4	25,3	1,89	90,5	58,3	252,4	74,4	23,1	13,0	18,0	4.492	4585	-93	1,51	1,52	-0,01
10/11/08	2.051	31,8	24,8	1,86	90,5	61,6	251,6	57,6	20,7	15,0	20,0	4.166	4838	-672	1,51	1,51	0,00
11/11/08	2.051	32,8	25,4	1,86	90,5	61,6	255,6	60,1	20,9	15,0	17,0	3.923	4715	-792	1,49	1,51	-0,02
17/11/08	2.006	34,0	25,5	1,90	86,2	55,1	253,7	50,2	17,5	12,0	16,0	3.812	5039	-1227	1,49	1,52	-0,03
17/11/08	2.006	33,2	24,6	1,87	86,2	55,1	247,0	54,0	19,5	12,0	20,0	4.182	5077	-895	1,47	1,49	-0,02
17/11/08	2.006	34,0	24,6	1,86	86,2	55,1	252,5	54,0	16,9	11,0	19,0	3.831	5152	-1321	1,53	1,51	0,02
18/11/08	2.006	31,5	24,5	1,91	86,2	55,1	257,5	55,0	19,1	12,0	16,0	3.252	5066	-1814	1,52	1,55	-0,03
18/11/08	2.006	31,8	23,3	1,90	86,2	55,1	244,5	65,0	25,5	12,0	19,0	3.592	5015	-1423	1,53	1,50	0,03
18/11/08	2.006	30,8	23,7	1,87	86,2	55,1	249,0	55,0	17,9	11,0	20,0	3.534	5245	-1711	1,51	1,53	-0,02
19/11/08	2.006	31,0	23,3	1,91	86,2	55,1	252,5	54,0	17,9	10,0	19,0	3.364	5387	-2023	1,53	1,55	-0,02
19/11/08	2.006	31,6	24,4	1,90	86,2	55,1	299,4	59,4	20,2	12,0	20,0	3.634	4998	-1364	1,48	1,57	-0,09
19/11/08	2.006	33,3	24,7	1,89	86,2	55,1	282,9	56,4	19,1	10,0	19,0	3.774	5168	-1394	1,50	1,54	-0,05
20/11/08	2.006	31,4	23,8	1,90	86,2	55,1	290,9	58,4	19,9	12,0	20,0	3.821	5089	-1268	1,47	1,56	-0,09
20/11/08	2.006	31,9	23,7	1,90	86,2	55,1	288,4	56,9	20,5	12,0	22,0	3.929	5138	-1209	1,48	1,55	-0,07
21/11/08	2.006	33,1	24,9	1,86	88,0	56,7	256,1	49,1	19,8	10,0	18,0	3.058	5284	-2226	1,49	1,49	0,00
22/11/08	2.006	30,9	25,2	1,88	90,5	61,6	251,6	55,1	18,6	11,0	18,0	3.792	5052	-1260	1,48	1,53	-0,05
22/11/08	2.006	30,1	25,7	1,87	90,0	61,6	253,1	48,6	18,9	12,0	21,0	3.233	5052	-1819	1,48	1,52	-0,04
22/11/08	2.006	33,2	25,2	1,87	90,0	61,6	249,6	68,1	22,8	13,0	21,0	4.069	4649	-580	1,52	1,49	0,03

Tabela 28 – Dados da Resistência e Densidade com a influência das matérias-primas (peso da prensa de 2560 kg) para espessura 6,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos

Data	Umidade da Película (%)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)	Veloc. do feltro (m/min)	Saída das caixas (g/L)	Calcário (% mássica)	Resíduo da MP(% mássica)	Pressão Linear (Kg/cm)	Masseira (g/L)	Cone 1 (g/L)	Limp. Feltro 1(inHg)	Resist. Obs. (N/m)	Resist. Pred. (N/m)	Residuo R_Obs - R_Pred.	Densidade. Obs. (g/cm^3)	Densidade Pred. (g/cm^3)	Residuo D_Obs- D_Pred.
01/11/08	36,1	1,86	86,2	16,6	17,5	2,2	50,2	252,7	45,2	5,0	4.863	7576	-2712,8	1,51	1,33	0,18
01/11/08	34,2	1,86	86,2	17,5	17,5	2,2	55,1	260,2	41,2	6,0	5.172	7917	-2745,2	1,50	1,37	0,13
01/11/08	35,1	1,85	85,6	14,8	17,5	2,2	55,1	234,2	41,7	5,0	4.795	7337	-2541,7	1,50	1,35	0,15
03/11/08	34,7	1,88	86,2	18,0	17,4	2,2	61,6	263,4	46,4	7,0	4.557	7733	-3175,7	1,48	1,37	0,11
03/11/08	34,7	1,87	86,2	17,0	17,4	2,2	63,3	259,9	54,4	6,0	4.925	7777	-2852,4	1,47	1,36	0,11
05/11/08	32,5	1,90	86,2	16,0	17,5	2,2	50,2	260,4	47,4	8,0	4.883	7983	-3100,0	1,49	1,43	0,06
05/11/08	34,2	1,87	85,6	21,4	17,5	2,2	50,2	245,9	56,9	8,0	4.440	7356	-2915,9	1,50	1,39	0,11
17/11/08	34,0	1,90	86,2	17,5	17,5	2,2	55,1	253,7	50,2	3,0	4.474	7741	-3266,9	1,53	1,40	0,13
17/11/08	33,2	1,87	86,2	19,5	17,5	2,2	55,1	247,0	54,0	7,0	4.381	8027	-3646,1	1,49	1,40	0,09
17/11/08	34,0	1,86	86,2	16,9	17,5	2,2	55,1	252,5	54,0	5,0	4.362	7940	-3578,1	1,50	1,37	0,13
18/11/08	31,5	1,91	86,2	19,1	17,5	2,2	55,1	257,5	55,0	5,0	4.373	8086	-3713,1	1,53	1,45	0,07
18/11/08	31,8	1,90	86,2	25,5	17,5	2,2	55,1	244,5	65,0	8,0	4.452	8080	-3628,7	1,58	1,45	0,13
18/11/08	30,8	1,87	86,2	17,9	17,5	2,2	55,1	249,0	55,0	6,0	4.339	8418	-4079,2	1,54	1,45	0,09
19/11/08	31,0	1,91	86,2	17,9	17,5	2,2	55,1	252,5	54,0	6,0	4.545	8183	-3637,8	1,53	1,46	0,07
19/11/08	31,6	1,90	86,2	20,2	17,5	2,2	55,1	299,4	59,4	8,0	4.356	8137	-3781,1	1,50	1,45	0,05
19/11/08	33,3	1,89	86,2	19,1	17,5	2,2	55,1	282,9	56,4	6,0	4.653	7932	-3278,4	1,52	1,40	0,11
20/11/08	31,4	1,90	86,2	19,9	17,5	2,2	55,1	290,9	58,4	6,0	4.655	8169	-3514,0	1,55	1,45	0,10
20/11/08	31,9	1,90	86,2	20,5	17,5	2,2	55,1	288,4	56,9	9,0	4.512	8053	-3540,9	1,53	1,44	0,09

Tabela 29 – Dados da Resistência e Densidade com a influência das matérias-primas (peso da prensa de 3500 kg) para espessura 6,0 mm (novembro de 2008) e comparação entre os valores medidos e preditos

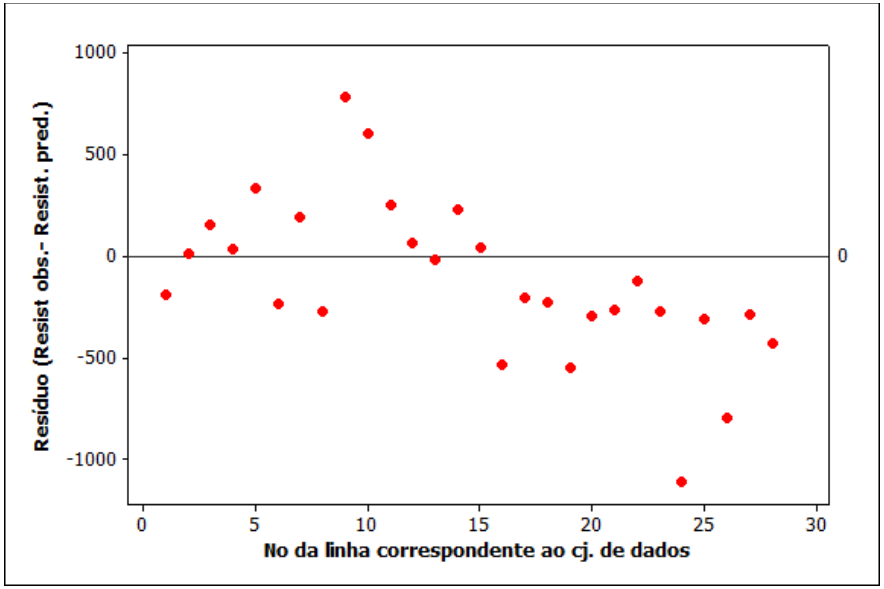
Data	Umidade da Película (%)	Dens. Apar. Manta (g/cm³)	Veloc. do feltro (m/min)	Saída das caixas (g/L)	Calcário (% mássica)	Resíduo da MP(% mássica)	Pressão Linear (Kg/cm)	Masseira (g/L)	Cone 1 (g/L)	Limp. Feltro 1(inHg)	Resist. Obs. (N/m)	Resist. Pred. (N/m)	Residuo R_Obs - R_Pred.	Densidade. Obs. (g/cm³)	Densidade Pred. (g/cm³)	Residuo D_Obs- D_Pred.
09/11/08	33,8	1,86	90,5	15,6	17,5	2,2	58,3	254,4	50,9	10,0	4.883	6211	-1328,1	1,44	1,48	-0,04
09/11/08	33,2	1,85	90,5	20,7	17,5	2,2	60,0	278,4	55,9	10,0	4.684	6295	-1611,2	1,52	1,48	0,04
10/11/08	32,4	1,89	90,5	23,1	17,5	2,2	58,3	252,4	74,4	12,0	4.573	6204	-1630,9	1,53	1,51	0,02
10/11/08	31,8	1,86	90,5	20,7	17,5	2,2	61,6	251,6	57,6	12,0	4.094	6366	-2271,6	1,46	1,50	-0,04
11/11/08	32,8	1,86	90,5	20,9	17,5	2,2	61,6	255,6	60,1	10,0	3.722	6270	-2547,9	1,46	1,50	-0,04
21/11/08	33,1	1,86	88,0	19,8	17,5	2,2	56,7	256,1	49,1	6,0	4.479	5978	-1498,6	1,53	1,50	0,03
22/11/08	30,9	1,88	90,5	18,6	17,5	2,2	61,6	251,6	55,1	5,0	5.252	6350	-1098,3	1,52	1,52	-0,01
22/11/08	30,1	1,87	90,0	18,9	17,5	2,2	61,6	253,1	48,6	6,0	4.943	6416	-1473,3	1,51	1,53	-0,02
22/11/08	33,2	1,87	90,0	22,8	17,5	2,2	61,6	249,6	68,1	6,0	4.049	6165	-2115,9	1,54	1,49	0,05

Para a telha com espessura de 6 mm, os resíduos da resistência calculados por meio da diferença entre o valor real e o valor predito para a análise sem matérias-primas (equação 28), são muito menores do que os residuais calculados por meio da diferença entre o valor real e o valor predito para a análise com matérias-primas (equações 26 e 27)

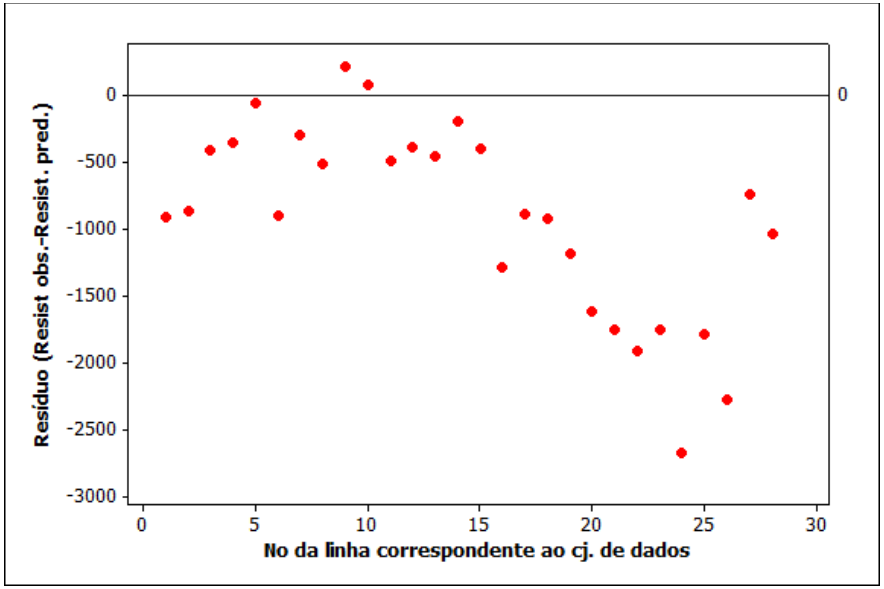
Para a densidade os valores residuais das análises com e sem a influência das matérias-primas foram próximos e baixos, o que indica que o modelo estatístico está muito próximo do real.

5.6.1 Análise dos modelos da resistência com e sem influência da matéria-prima para telhas de 5 mm

A Figura 10 ilustra o comportamento da resistência frente a dados levantados posteriormente à definição dos modelos. Nota-se que o modelo com influência das matérias-primas, Figura 10 (a), apresenta os resíduos mais bem distribuídos que o modelo sem a influência das matérias-primas, Figura 10 (b) na qual apenas dois resíduos apresentam valores positivos. Isso demonstra uma tendência clara que a grande maioria dos valores de resistência observada é menor do que a resistência predita pelo modelo quando se desconsidera a influência da matéria-prima. Do ponto de vista prático, o modelo com a influência da matéria-prima representou melhor o conjunto de dados posteriores para a resistência em telhas de 5 mm.



(a) Resistência com influência da matéria-prima



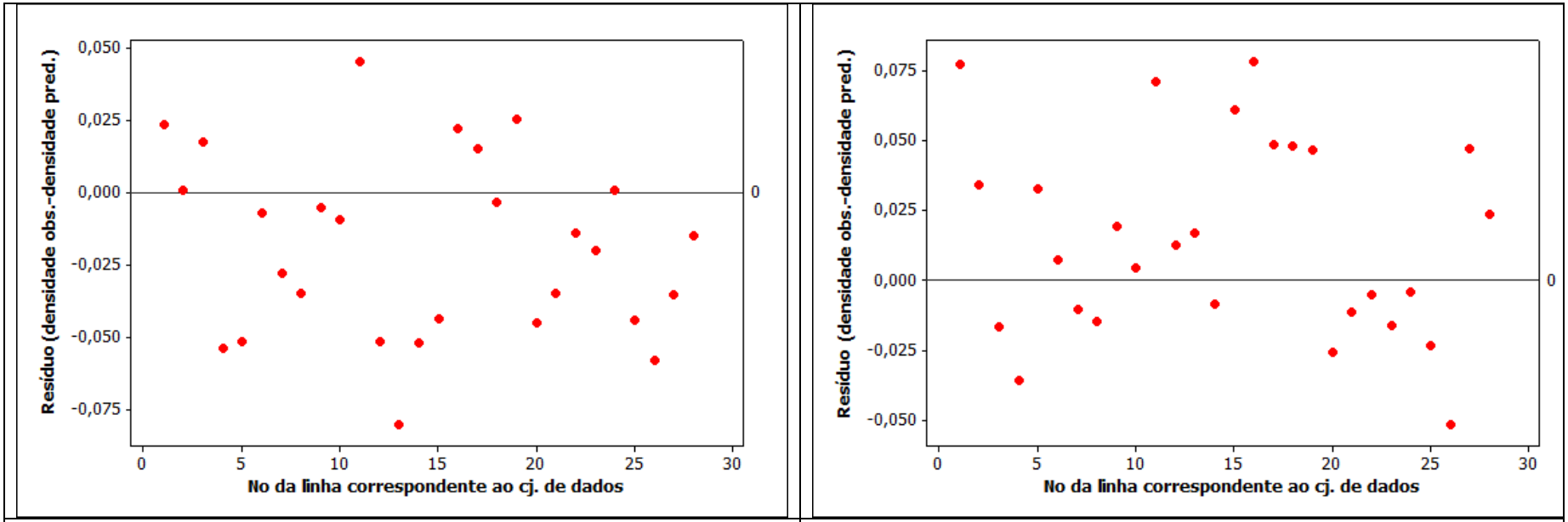
(b) Resistência sem a influência da matéria-prima

Figura 10 - Resíduos dos modelos ajustados para a resistência com e sem a influência das matérias primas.

5.6.2 Análise dos modelos da densidade com e sem influência da matéria-prima para telhas de 5 mm

A Figura 11 ilustra o comportamento da densidade frente a dados levantados posteriormente à definição dos modelos. A distribuição dos resíduos em torno de zero para ambos os modelos indicam certa semelhança entre eles. No caso, para os modelos com a influência da matéria-prima Figura 11 (a) e sem esta influência, Figura 11 (b), pode ser observada apenas uma pequena inversão, isto é, os resíduos com a influência da matéria-prima são em média mais negativos do que os sem a influência da matéria-prima. Na prática, há uma forte indicação que os dois modelos representam bem o conjunto de dados.

Neste caso, ao contrário da telha de 5 mm, o modelo sem a influência da matéria-prima apresentou o comportamento mais coerente.



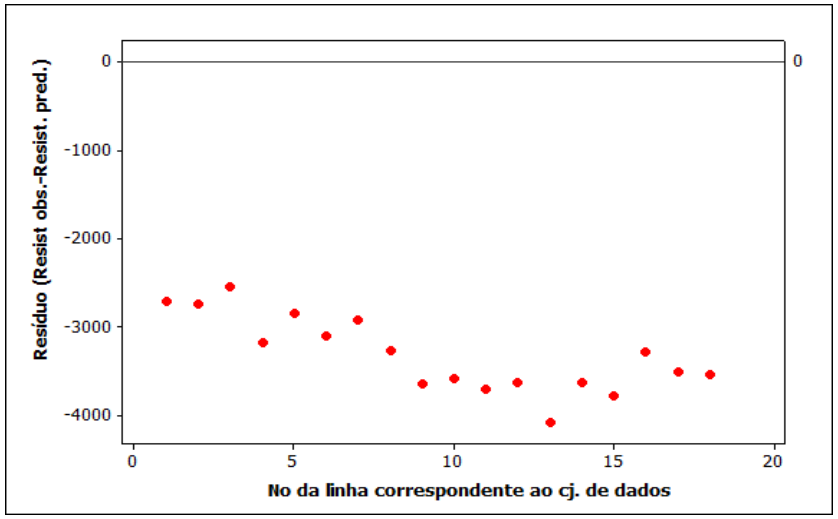
(a) Densidade com influência da matéria-prima | (b) Densidade sem a influência da matéria-prima

Figura 11 - Resíduos dos modelos ajustados para a densidade com e sem a influência das matérias primas.

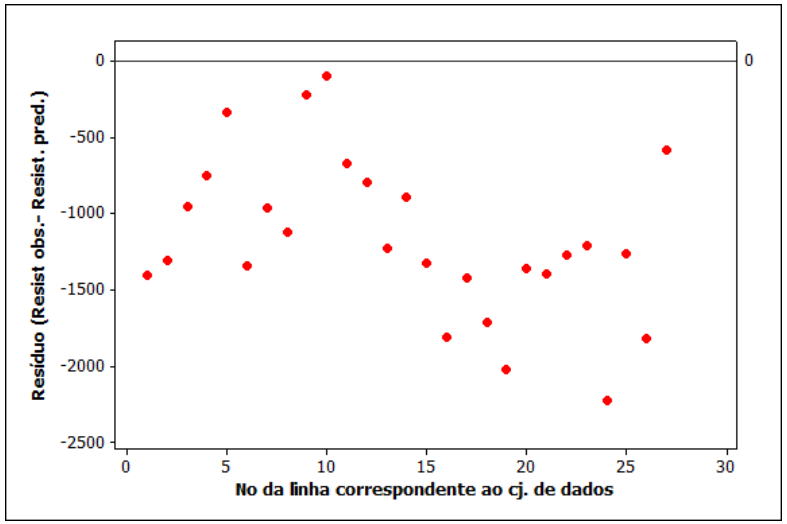
5.6.3 Análise dos modelos da resistência com e sem influência da matéria-prima para telhas de 6 mm

Para as telhas de 6 mm os modelos obtidos para a resistência, com a influência da matéria-prima, também foram função da variável peso da prensa. A Figura 12 (a) apresenta os valores de resíduos para dados obtidos com a prensa de 2560 kg e a Figura 12 (c) para dados obtidos com a prensa de 3500 kg. O modelo obtido para resistência, sem a influência das matérias-primas, não foi função do peso da prensa, os valores dos resíduos para este caso são apresentados na Figura 12 (b). Embora os resíduos em ambos os casos (com e sem a influência da matéria-prima) sejam todos negativos, o modelo sem a influência da matéria-prima foi mais coerente por apresentar menores resíduos, ver Figura 12 (b).

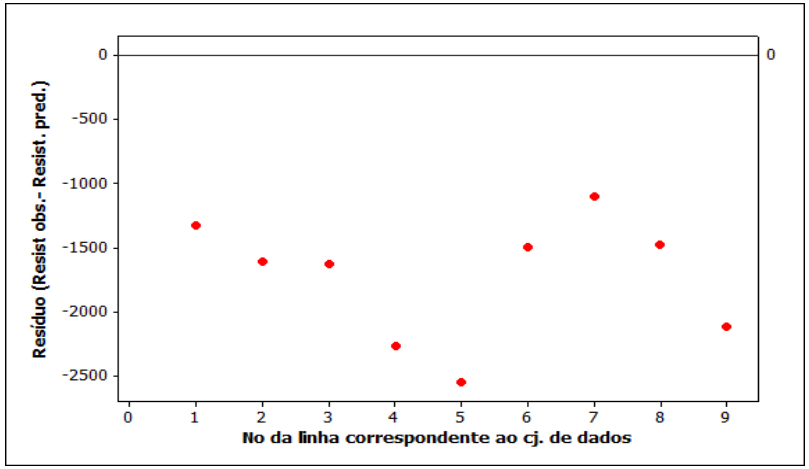
Isto sugere que sempre que houver uma manutenção com a substituição de elementos tais como o feltro, no equipamento, novos dados devem ser levantados e ajustados novos modelos de controle para a resistência, desconsiderando o efeito da matéria-prima.



(a) Resistência com influência da matéria-prima P.P. 2560kg



(b) Resistência sem a influência da matéria-prima



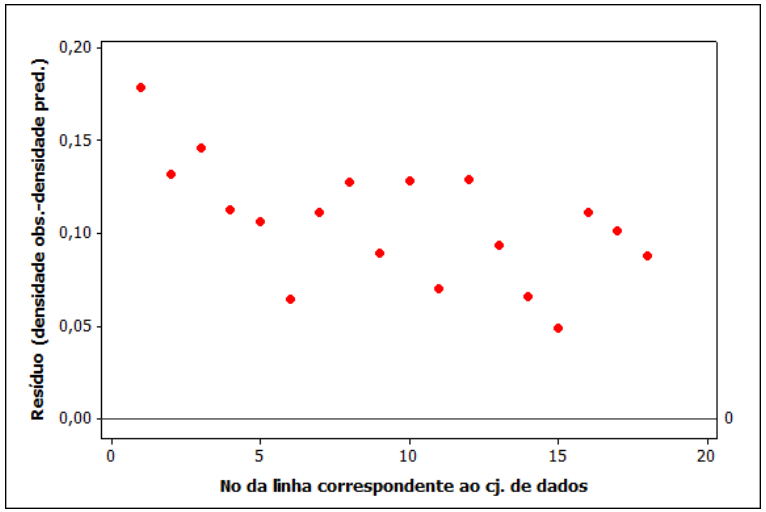
(c) Resistência com influência da matéria-prima P.P. 3500kg

Figura 12 - Resíduos dos modelos ajustados para a resistência com e sem a influência das matérias primas.

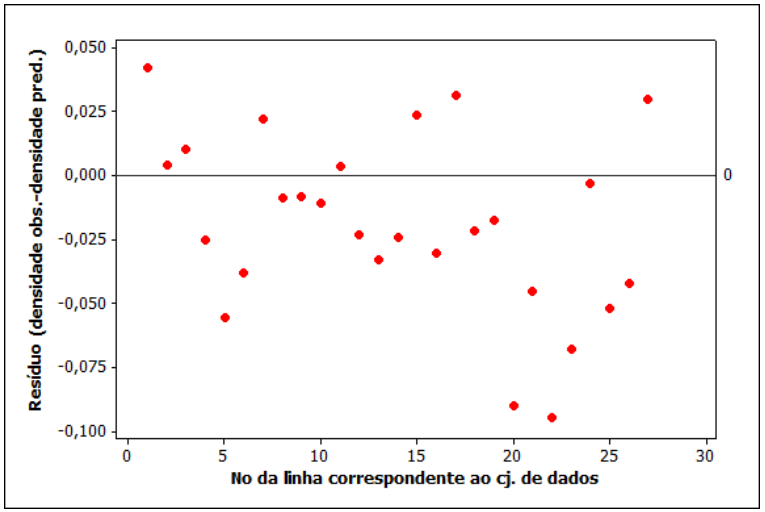
5.6.4 Análise dos modelos da densidade com e sem influência da matéria-prima para telhas de 6 mm

Para as telhas de 6 mm os modelos com a influência da matéria-prima também foram função do peso da prensa. A Figura 13 (a) apresenta os valores de resíduos para dados obtidos com a prensa de 2560 kg e a Figura 13 (c) para dados obtidos com a prensa de 3500 kg. O modelo obtido para resistência, sem a influência das matérias-primas, não foi função do peso da prensa, os valores dos resíduos para este caso são apresentados na Figura 13 (b).

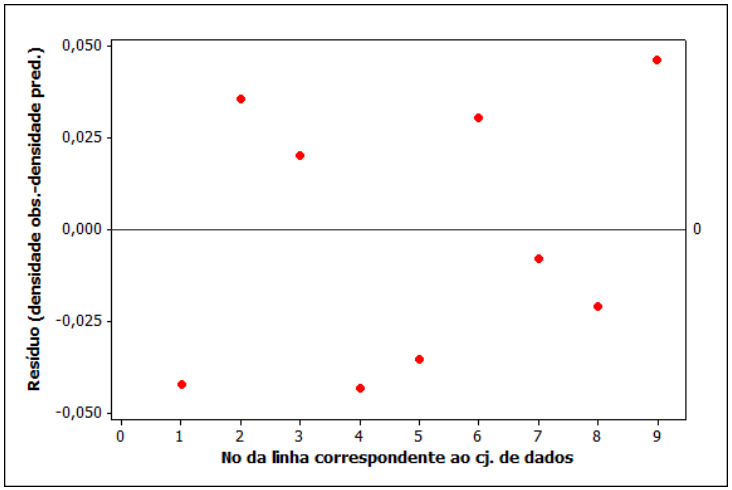
Neste caso o modelo para a prensa de 3500 kg (com influencia da matéria-prima) resíduos apresentados na Figura 13 (c) e o modelo sem a influência da matéria-prima cujos resíduos estão plotados na Figura 13 (b) são consistentes para representar o conjunto de dados .



(a) Densidade com influência da matéria-prima P.P. 2560 kg



(b) Densidade sem a influência da matéria-prima



(c) Densidade com influência da matéria-prima P.P. 3500 kg

Figura 13 - Resíduos dos modelos ajustados para a densidade com e sem a influência das matérias primas

5.7 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

5.7.1 Telha com espessura de 5 mm.

Na primeira análise (com influência da variação das matérias-primas) não foi necessário fazer a otimização, uma vez que para os modelos preditos para as variáveis resistência e densidade existia apenas uma variável em comum (umidade da manta).

Após a retirada das matérias-primas da análise, estes modelos apresentaram duas variáveis em comum (umidade da manta e densidade aparente da manta), sendo necessária a realização da otimização

Para a otimização na resistência foram adotados critérios com base nas restrições apresentadas, isto é R>4000 N/m

O critério proposto foi:

- Resistência abaixo de 4000 N/m desejabilidade nula;
- Resistência entre 4000 e 4500 desejabilidade entre 0 e 1;
- Resistência acima de 4500, desejabilidade 1.

Para realizar a otimização da densidade foram adotados critérios com base nas restrições apresentadas, isto é 1,45 g/cm^3 <densidade<1,51 g/cm^3

O critério proposto, agora, foi:

- densidade abaixo de 1,45 g/cm3 desejabilidade nula;
- densidade entre 1,45 e 1,48 d entre 0 e 1;
- densidade entre 1,48 e 1,51 d entre 1 e 0;
- densidade acima de 1,51 d nula.

A Tabela 25, mostra os valores das variáveis: umidade da manta (x_1) e densidade aparente da manta (x_2), que proporcionam os valores das respostas resistência e densidade, dentro dos limites padrões para a espessura de 5,0 mm (R ≥ 4000 N/m e 1,45 g/cm^3 ≤ d ≤ 1,51 g/cm^3). Nota-se que é possível obter valores com ótima desejabilidade para umidade da manta entre 0,0 e 1,0. Os pontos assinalados sobre as desejabilidades individuais, para as duas soluções apresentadas na Tabela 30, estão nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Tabela 30 - Valores para a função “desirability” (D), para a otimização da resistência e da densidade para a espessura 5,0 mm.

Umidade da Manta (x_1)		**Dens.Apar da Manta (x_2)**		**Resist**	**Dens.**	**D**
Valor codificado	Valor Real (%)	Valor codificado	Valor Real (g/cm³)			
-0,2	23,54	-1,0	1,83	4439	1,49	0,837
-0,1	23,74	-1,0	1,83	4451	1,48	0,880
0,0	23,95	-1,0	1,83	4462	1,48	0,922
0,1	24,16	-1,0	1,83	4473	1,48	0,964
1,0	26,01	-0,2	1,87	4493	1,48	0,971
1,0	26,01	-0,1	1,87	4482	1,48	0,924
1,0	26,01	0,0	1,88	4472	1,49	0,876
1,0	26,01	0,1	1,88	4462	1,49	0,827
0,4	24,77	-0,4	1,86	4445	1,49	0,808
0,5	24,98	-0,5	1,85	4467	1,48	0,900
0,6	25,19	-0,6	1,85	4489	1,48	0,988

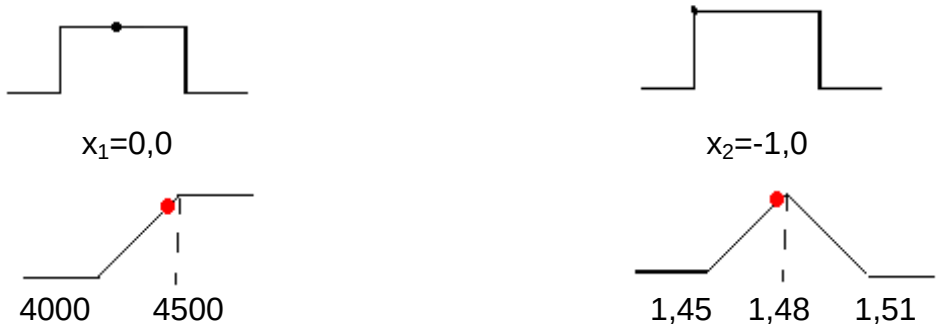


Figura 14 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global de 0,922.

As condições para a terceira solução são: (x_i) =(0,0; -1,0)

$d_1(\hat{y})$=0,922 e $d_2(\hat{y})$=0,922 e $D = \sqrt{0{,}922 \times 0{,}922} = 0{,}922$ com: $\hat{y}_1 = 4462$N/m e $\hat{y}_2 = 1{,}48$g/cm^3 resistência e densidade, respectivamente.

Já para a sétima solução tem-se pela Figura 14:

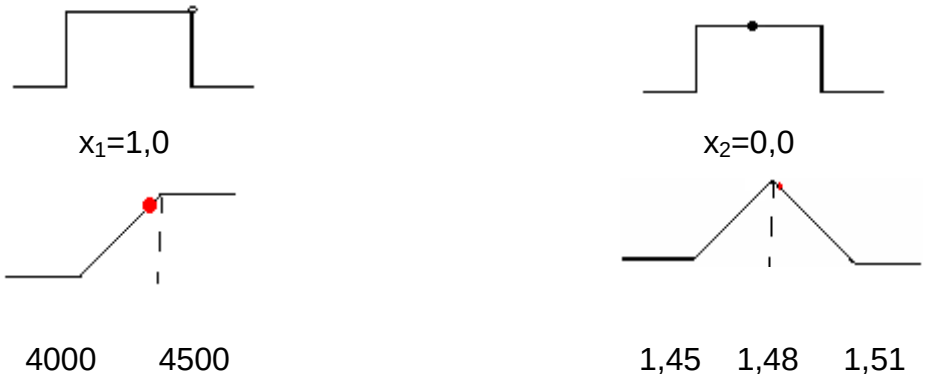


Figura 15 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global 0,876.

As condições para a sétima solução são: (x_i) =(1,0;0,0)

$d_1(\hat{y})$=0,944 e $d_2(\hat{y})$=0,813 e $D = \sqrt{0{,}944 \times 0{,}813} = 0{,}876$ com: $\hat{y}_1 = 4472$N/m e $\hat{y}_2 = 1{,}49$g/cm^3 resistência e densidade, respectivamente.

5.7.2 Telha com espessura de 6 mm.

Como descrito no item 4.5.4, a otimização foi refeita desconsiderando a influência das matérias-primas. A seguir será apresentada a otimização para os modelos da resistência e densidade com a influência das matérias-primas e na sequência será apresentada a otimização dos mesmos modelos sem a influência das matérias-primas, para espessura da telha de 6 mm.

a. Otimização para os modelos da resistência e densidade com a influência das matérias-primas

Para realizar a otimização na resistência foram adotados critérios com base nas restrições apresentadas, isto é R>5000 N/m.

O critério proposto foi:

- Resistência abaixo de 5000 N/m desejabilidade nula;
- Resistência entre 5000 e 5500 desejabilidade entre 0 e 1;
- Resistência acima de 5500, desejabilidade 1.

Para realizar a otimização da densidade foram adotados critérios com base nas restrições apresentadas, isto é 1,45 g/cm^3 <densidade<1,60 g/cm^3

Posteriormente o intervalo da densidade foi reduzido com a intenção de diminuir o custo. A otimização foi refeita para esta nova condição.

O critério proposto, agora, foi:

- densidade abaixo de 1,45 g/cm3 desejabilidade nula;
- densidade entre 1,45 e 1,48 d entre 0 e 1;
- densidade entre 1,48 e 1,51 d entre 1 e 0;
- densidade acima de 1,51 d nula.

Tabela 31 - Valores para a função "desirability" (D), para a otimização da resistência e da densidade (com a nova restrição 1,45<dens.<1,51) para a espessura 6,0 mm.

Umidade da Película (x_1)		**Dens.Apar da Manta (x_2)**		**Veloc. do Feltro (x_3)**		**Resist. (N/m)**	**Dens. (g/cm³)**	**D**
Valor codificado	Valor Real(%)	Valor codificado	Valor Real (g/cm³)	Valor codificado	Valor Real (m/min)			
0,6	36,94	-1,0	1,83	1,0	81,2	5385	1,48	**0,860**

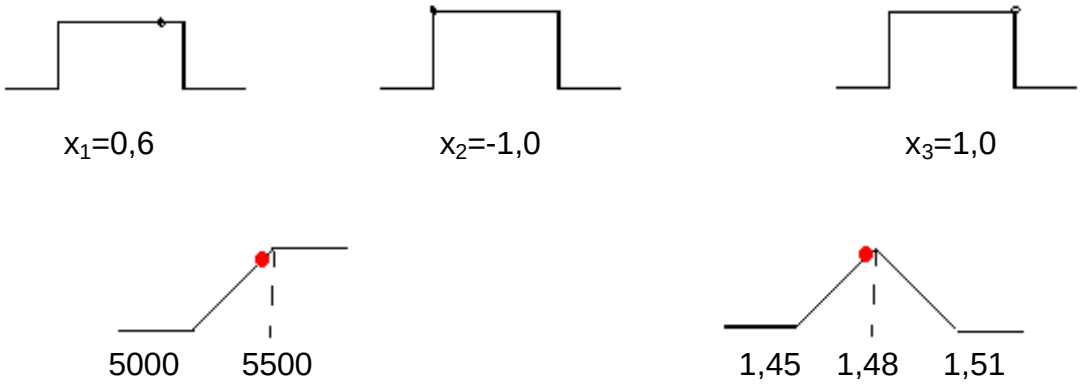


Figura 16 - Condições para as variáveis x_1, x_2 e x_3, para obtenção da Desirability global 0,860.

As condições para a única solução é: (x_i) =(0,6; -1,0; 1,0)

$d_1(\hat{y})$=0,770 e $d_2(\hat{y})$=0,959 e $D = \sqrt{0{,}770 \times 0{,}959} = 0{,}860$ com: $\hat{y}_1 = 5385$N/m e $\hat{y}_2 = 1{,}48$g/cm^3 resistência e densidade, respectivamente.

b. Otimização para os modelos da resistência e densidade sem a influência das matérias-primas

Os critérios adotados são os mesmos que foram utilizados no item a.

A Tabela 32, mostra os valores das variáveis: gramatura (x_1) e cone 1 (x_2), que proporcionam os valores das respostas resistência e densidade, dentro dos limites padrões para a espessura de 6,0 mm (R ≥ 5000 N/m e 1,45 g/cm^3 ≤ d ≤ 1,51 g/cm^3). Nota-se que é possível obter valores com ótima desejabilidade para gramatura entre -0,3 e 0,1. Os pontos assinalados sobre as desejabilidades individuais, para as duas soluções apresentadas na Tabela 32, estão nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Tabela 32 - Valores para a função "desirability" (D), para a otimização da resistência e da densidade para a espessura 6,0 mm.

Umidade da Manta (x_1)		**Dens.Apar da Manta (x_2)**		**Resist (N/m)**	**Dens. (g/cm³)**	**D**
Valor codificado	Valor Real (%)	Valor codificado	Valor Real (g/cm³)			
-0,3	1776	-1,0	42,65	5361	1,48	0,847
-0,2	1791	-1,0	42,65	5388	1,48	0,848
-0,1	1807	-1,0	42,65	5415	1,48	0,846
0,0	1822	-1,0	42,65	5442	1,49	0,839
0,1	1837	-1,0	42,65	5469	1,49	0,828
0,2	1853	-1,0	42,65	5496	1,49	0,813

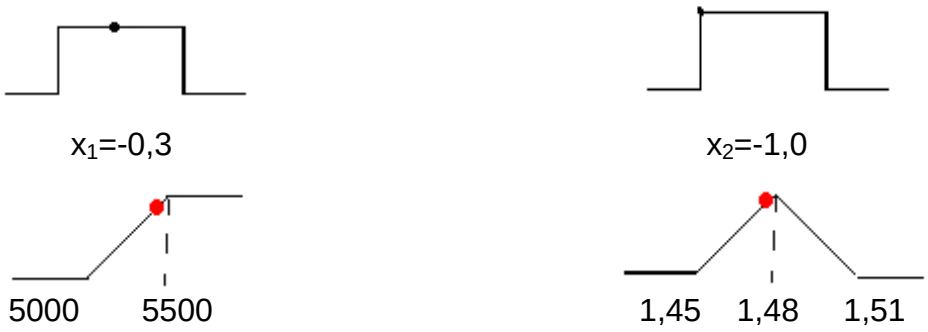


Figura 17 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global de 0,847.

As condições para a primeira solução são: (x_i) =(-0,3; -1,0)

$d_1(\hat{y})$=0,722 e $d_2(\hat{y})$=0,993 e $D = \sqrt{0{,}722 \times 0{,}993} = 0{,}847$ com: $\hat{y}_1 = 5361$N/m e $\hat{y}_2 = 1{,}48$g/cm^3 resistência e densidade, respectivamente.

Já para a quinta solução tem-se pela Figura 13:

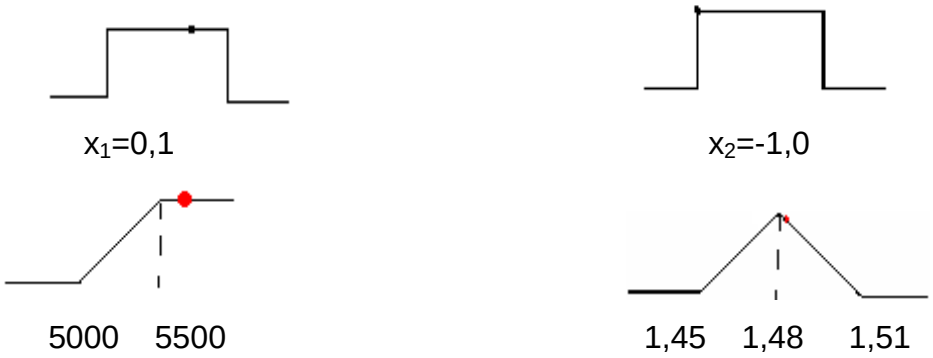


Figura 18 - Condições para as variáveis x_1 e x_2, para obtenção da Desirability global 0,828.

As condições para a sétima solução são: (x_i) =(1,0;0,0)

$d_1(\hat{y})$=0,938 e $d_2(\hat{y})$=0,731 e $D = \sqrt{0{,}938 \times 0{,}731} = 0{,}828$ com: $\hat{y}_1 = 5469$N/m e $\hat{y}_2 = 1{,}49$g/cm^3 resistência e densidade, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu o estudo detalhado do processo Hatschek, possibilitando a descrição do mesmo, assim como das variáveis envolvidas durante o processo e a influência nas variáveis que dão as características a telha.

As análises das variáveis sugerem:

- Que o processo responde aos modelos empíricos que estudam a relação entre as variáveis do processo de obtenção da telha e os mesmos podem ser utilizados para definir as condições de operação.
- Com as condições de operação bem estabelecidas poderá haver uma melhora na qualidade da telha, evitando assim desperdícios de produtos uma vez que estes estarão de acordo com os padrões pré-estabelecidos e conseqüentemente haverá uma redução de custo e aumento no lucro da empresa.

6.2 SUGESTÕES

Uma das possibilidades de continuação deste trabalho seria a aplicação do planejamento experimental para este processo.

Utilizando a mesma metodologia apresentada neste trabalho pode-se melhorar o processo da telha de fibrocimento sem a utilização do amianto. Devem ser estudadas as variáveis mais influentes no processo da telha de fibrocimento e estabelecer parâmetros a serem utilizados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15210-2**: Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios-Parte 2:Ensaios. Rio de Janeiro, 2005. 9p.

Abra, Associação Brasileira do Amianto **O amianto no Brasil** 2ª ed. São Paulo, EBART, 1996. 3-42 p.

Couts, R. S. P.; Ridikas, V. **Refined wood fibre-cement products**. Rotorua: 35th Annual Conference, 1982.

Couts, R.S.P; Ni, Y., Autoclave Bamboo Pulp Fibre Reforced Cement, **Cement & Concret Composites**, Australia, p.99, 1995.

Couts, R.S.P, A review of Australian research into natural fibre cement composites, **Elsevier Science Limited**, Australia, p.518, 2005.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), **Boletim informativo 2007**. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=1948. Acesso em: 20 de maio de 2008.

Derring, G.; Suich, R. Simultaneous Optimization of Several Responses Variables., **Journal of Quality Technology**, Califórnia, v.12, n. 4, p. 215-216, 1980.

Engineering Statistics Handbook, **Multiple responses: The desirability approach**. Disponível em: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section5/pri5322.htm. Acesso em: 30 de junho de 2008.

Khuri, A. I.; Cornell, J. A. **Responses Surfaces Designs and Analyses** New York, Marcel Dekker, Inc., 1987. 47-49 p.

Kuder, K. G.; Shah, S. P. **Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites** Construction and Building Materials, p. 1-6, 2009. No prelo.

MINITAB. **User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools**. Estados Unidos, MINITAB Inc., 2000. 2-22 p.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments** 6ª ed. Arizona, John Wiley & Sons, Inc., 2005. 38 p.

Montgomery, D.C.; Runger, G. C.; Hubele, N. F. **Estatística Aplicada à Engenharia** 2ª ed. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004. 3-4; 177-181 p.

Negro, C., et al. **Influence of flocculant molecular weight and anionic charge on flocculation behaviour and on the manufacture of fibre cement composites by the Hatscheck process** Cement and Concrete Research, v. 35, n.11, p. 2095-2103, 2005.

Negro, C., et al. **Optimal use of flocculants on the manufacture of fibre cement materials by the Hatschek process** Construction and Building Materials, p. 1, 2009. No prelo.

Neter, J.; Wasserman, W.; Kutner, M. H. **Applied Linear Regression Models** 1ª ed. Illinois, Richard D. Irwin, INC., 1983. 227 p.

Neville, A. M. **Propriedades do Concreto** 2ª ed. São Paulo, PINI Ltda., 1997, p. 23, 29-33, 37, 40, 54.

Rosato, D. V. **Asbestos: its industrial applications** 2ª ed. New York, Reinhold Publishing Corporation, 1959. 1-3; 9; 22; 27-29; 37-43; 63-73 p.

Ross, M.; Langer, et al. **The mineral nature of asbestos**. Regulatory Toxicology and Pharmacology, New York, n. 52, p. S26-S30, 2008.

Silva, A.C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. São Paulo: SIBi-USP, 2002.

Taqueda, M. E. S. A **Estatísca como catalisador do conhecimento no estudo e diagnóstico do processo**. 2009. 1v. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Tonoli, G. H.D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem o amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. Pirassununga: SIBi-USP, 2006.

Triola, M.F. **Introdução à Estatística** 10ª ed. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008. 5 p.