

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Edmir Augusto da Silva**

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
TEXTURIZAÇÃO POR FALSA TORÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

**Orientador:** Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Itajubá  
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Edmir Augusto da Silva**

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
TEXTURIZAÇÃO POR FALSA TORÇÃO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 / 09 / 2009, conferindo ao autor o título  
de *Mestre em Engenharia de Produção*.

**Banca Examinadora:**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Linda Lee Ho

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

Itajubá  
2009

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha esposa Suzana  
e ao meu filho Igor.

Na natureza não há nem recompensas nem castigos;  
há conseqüências.  
**Robert Green Ingersoll**

## **Agradecimentos**

Agradeço, maiormente a Deus, pelo dom da vida e pela graça de entender e abraçar as diversas oportunidades que esta vida me proporciona;

Aos meus familiares, pelo incentivo e constante auxílio na realização das coisas em que acredito;

À minha esposa Suzana e ao meu filho Igor, que muito me ajudam a todo o momento;

Aos professores Anderson Paulo de Paiva, Carlos Eduardo Sanches da Silva e Pedro Paulo Balestrassi pela valiosa orientação, competência e amizade tão fundamentais para a realização deste trabalho;

À Universidade Federal de Itajubá, através do Instituto de Engenharia de Produção e sua coordenação, por tornar possível essa realização;

Enfim, a todos que contribuíram para esta conquista direta ou indiretamente, meus sinceros agradecimentos.

## Resumo

A importância da cadeia têxtil no Brasil demanda contínua análise e estudos na busca de oportunidades para melhoria de seus processos, possibilitando assim maiores benefícios à sociedade. Nesta dissertação, buscou-se descrever a situação atual da indústria têxtil, focando-se os materiais sintéticos de poliéster, mais especificamente, os fios texturizados. Procurou-se discutir e apresentar alguns aspectos do desenvolvimento de produtos neste setor. Verificou-se que algumas etapas do processo requerem maior utilização do conhecimento científico e minimização da frequência na utilização de conhecimentos empíricos. O estudo conduzido baseou-se em dados históricos disponíveis do processo de texturização, a partir dos quais se propôs um estudo de modelagem e otimização. Três métodos (regressão linear múltipla, regressão por componentes principais e projeção de estruturas latentes ou mínimos quadrados parciais) foram estudados e aplicados a esses dados, destacando-se o método PLS (do inglês *partial least square*) como aquele de melhor adequação. Para a tarefa de otimização paramétrica utilizou-se o algoritmo genético (em inglês: genetic algorithm, GA) em função do elevado grau de não linearidade da função objetivo construída. Os resultados da modelagem foram considerados extremamente adequados para predição das variáveis desejadas e a otimização forneceu resultados excelentes, atendendo a todas as restrições impostas. Confirmou-se deste modo, a grande oportunidade existente para a implementação do método baseado em PLS-GA nas empresas do setor têxtil, bem como em processos de fabricação inerentes a outros segmentos produtivos.

**Palavras chave:** poliéster, multifilamentos, fios texturizados, falsa torção, mínimos quadrados parciais, estruturas projetadas latentes, algoritmo genético e otimização.

## **Abstract**

The importance of the Brazilian textile chain demands continuous analyses and studies in search of the opportunities for continuous process improvements, providing more benefits for the society. In this work an overall description of the current situation in the textile industry is done focusing on synthetic materials of polyester, more specifically, textured yarns. The work presents and discusses some aspects of the product development in textile industry. During the work was verified that some phases of the processes require better utilization of the scientific knowledge, thus minimizing the frequency of empirical knowledge. A study was conducted based on a historical database and a proposal was made for the modeling and optimization of the texturing process, the methodology though can be applied in any industry or any other field of the textile industry. Three techniques (multiple linear regression, principal component regression, partial least squares or projected latent structure) were studied and applied to the data where better results were obtained with Partial Least Squares. For the parametric optimization task was chosen the Genetic Algorithm due to the degree of nonlinearity of the objective function. The modeling results were considered extremely adequate for predicting the desired variables and the optimization gives excellent results based on imposed constraints. Therefore, it was confirmed the opportunity that exists for the implementation of the PLS-GA based approach to manufacturing processes of textile enterprises and many others industries.

**Keywords:** polyester, multifilaments, textured yarns, false twist, multiple linear regression, principal component regression, partial least squares, projected latent structures, genetic algorithm, and optimization.

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1	A indústria têxtil no Brasil e no mundo .....	14
1.2	Aspectos do desenvolvimento de novos produtos .....	20
1.3	Objetivo principal .....	22
1.3.1	Objetivos secundários .....	22
1.4	Justificativa.....	23
1.5	Abrangência do trabalho e limitações.....	23
1.6	Estrutura do trabalho .....	24
<b>2</b>	<b>Processo de texturização .....</b>	<b>26</b>
2.1	Texturização por falsa torção .....	27
2.2	Características visuais do fio .....	27
2.2.1	Cor.....	28
2.2.2	Maticidade .....	28
2.3	Características do fio referente ao toque.....	28
2.3.1	Volume e cobertura.....	29
2.3.2	Elasticidade.....	30
2.3.3	Conforto térmico.....	31
2.3.4	Toque.....	31
2.4	Textura .....	32
2.5	O processo de texturização .....	32
2.5.1	O processo de texturização por falsa torção .....	34
2.5.2	Sistema de inserção de falsa torção – agregado de fricção .....	37
2.6	Fatores importantes para a texturização .....	37
2.6.1	Dados da matéria prima.....	37
2.6.2	Dados do processo .....	43
2.6.3	Dados qualitativos.....	53
<b>3</b>	<b>Modelagem estatística .....</b>	<b>56</b>
3.1	Regressão linear múltipla .....	56

3.2	Regressão por componentes principais .....	62
3.3	Mínimos quadrados parciais ou estrutura latente projetada .....	64
3.4	Abordagem computacional.....	65
<b>4</b>	<b>Otimização baseada em algoritmos genéticos .....</b>	<b>68</b>
4.1	Algoritmo genético .....	69
<b>5</b>	<b>Modelagem do processo de texturização por falsa torção .....</b>	<b>74</b>
5.1	Trabalhos relevantes na área.....	76
5.2	Nova proposta de modelagem .....	78
5.3	Comparações entre o modelo univariado e dados reais .....	80
5.4	Variáveis do processo de texturização por falsa torção .....	81
5.5	Modelagem por regressão múltipla univariada .....	89
5.5.1	Análise de regressão múltipla.....	94
5.5.2	Regressão por componentes principais .....	100
5.5.3	Regressão por mínimos quadrados parciais .....	104
<b>6</b>	<b>Integração PLS-GA na otimização do processo.....</b>	<b>115</b>
6.1	Exemplo de aplicação da abordagem GA-PLS .....	115
6.1.1	Atendendo à solicitação do cliente .....	116
	<b>Conclusões.....</b>	<b>119</b>
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>122</b>
	<b>Anexo A – Processos pré-texturização .....</b>	<b>129</b>
A.1	– A fibra sintética poliéster.....	129
A.2	– Fiação química por fusão e convencional .....	131
A.3	– A rota do poliéster até a fiação .....	137
A.4	– Cristalização .....	142

## Lista de Figuras

Figura 1 – Balança Comercial Brasileira de Produtos Têxteis e Confeccionados. ....	15
Figura 2 – Exportadores em 2005.....	16
Figura 3 – Importadores em 2005.....	16
Figura 4 – Capacidade de PTA nominal. Fonte: PCI Fibras.....	17
Figura 5 – Capacidade de Paraxileno nominal. Fonte: PCI Fibras.....	17
Figura 6 – Rota Sintética (ABRAFAS).....	18
Figura 7 – Demanda global de sintéticos. Fonte: PCI Fibras.....	18
Figura 8 – Distribuição do consumo de fios e fibras sintéticos por país. Fonte: PCI Fibras ...	19
Figura 9 – Distribuição do consumo incluindo a China. Fonte: PCI Fibras .....	19
Figura 10 – Fio texturizado .....	27
Figura 11 – Possibilidades de elasticidade de tecido.....	30
Figura 12 – Épura do Filamento em máquina perfil V.....	34
Figura 13 – Fio sofrendo Falsa torção no agregado.....	35
Figura 14 – Representação da Falsa torção (Heberlein) .....	36
Figura 15 – Seção transversal Redonda e Trilobal .....	38
Figura 16 – Curva de tensão-esforço convencional.....	40
Figura 17 – Ângulo de ataque e ângulo da força friccional com o fio.....	50
Figura 18 – Encolhimento .....	54
Figura 19 – Área de meias e máquina.....	54
Figura 20 – Fases da evolução. Adaptado de Costa e Oliveira (2001). .....	70
Figura 21 – Codificação proposta por Busacca et al. (2001). .....	71
Figura 22 – Cruzamento.....	72
Figura 23 – Mutação (Busacca et al., 2001).....	72
Figura 24 – Visão geral da evolução do algoritmo genético.....	73
Figura 25 – Diagrama da evolução da texturização.....	78
Figura 26 – Diagrama da modelagem .....	80
Figura 27 – Análise estatística de $Y_1$ . .....	83
Figura 28 – Análise estatística de $Y_2$ . .....	83
Figura 29 – Análise estatística de $Y_3$ . .....	84
Figura 30 – Análise estatística de $Y_4$ . .....	84
Figura 31 – Análise estatística de $Y_5$ . .....	85
Figura 32 – Análise estatística de $Y_6$ . .....	85
Figura 33 – Análise de Componentes Principais para variáveis independentes (X). .....	88
Figura 34 – Análise de Componentes Principais para o conjunto de variáveis dependentes (Y). .....	89
Figura 35 – Análise de Componentes Principais para o conjunto XY. ....	89
Figura 36 – Dendograma de variáveis de entrada .....	91
Figura 37 – Dendogramas combinados (Correlação x Módulo de Correlação).....	92
Figura 38 – Escores do fator 1 versus 2 .....	93
Figura 39 – Representação da Matriz .....	94
Figura 40 – Análise de Regressão para $Y_1$ . .....	95
Figura 41 – Análise de Variância para o modelo de regressão de $Y_1$ e Somas de quadrados parciais. ....	95
Figura 42 – Análise de resíduos para a resposta $Y_1$ . .....	96
Figura 43 – Análise de autocorrelação serial para $Y_1$ e para seus resíduos.....	96
Figura 44 - Melhores combinações de variáveis para a explicação de $Y_1$ ( <i>Best subsets</i> ). .....	97
Figura 45 – Análise de regressão múltipla omitindo-se as variáveis correlacionadas.....	99
Figura 46 – Análise de regressão de $Y_1$ utilizando PCR com 8 componentes. ....	101

## Lista de Figuras (continuação)

Figura 47 – Análise de resíduos de Y1 por PCR.....	101
Figura 48 – Comparação entre os Erros-padrão para os modelos de regressão PCR.....	102
Figura 49 – Testes de Mediana de Mood e Mann-Whitney para diferenças entre os erros padrão de previsão com 8 e 10 componentes. ....	103
Figura 50 – Modelo PCR com 13 preditoras/componentes. ....	104
Figura 51 – Análise de Componentes Principais para 13 preditoras. ....	104
Figura 52 – Coeficientes obtidos com PLS e 8 componentes principais. ....	105
Figura 53 – Número ótimo de componentes principais no ajuste PLS para Y1.....	106
Figura 54 - Comparação entre o valor “Real” e “Valor calculado” por PLS (8 componentes). .....	106
Figura 55 – Análise de Resíduos para Y1 com regressão PLS. ....	107
Figura 56 – Normalidade dos resíduos das 6 respostas obtidos por regressão PLS. ....	107
Figura 57 – Coeficientes obtidos por PLS e 10 componentes. ....	108
Figura 58 – Coeficientes de PLS obtidos com 13 componentes. ....	108
Figura 59 – Análises estatísticas da diferença entre os erros de previsão de MLR e PLS.....	109
Figura 60 – Comparação entre os erros-padrão de estimativas dos métodos MLR, PCR e PLS. .....	110
Figura 61 – Teste da Mediana de Mood para “Erro Padrão” versus “Método de Regressão”. .....	110
Figura 62 – Comparação entre os valores previstos para Y1 pelos métodos MLR, PCR e PLS. .....	111
Figura 63 – Comparação de Y1(Teste) com os valores previstos por cada método.....	112
Figura 64 – Comparação entre o valor previsto por PLS e o valor real Y1(Teste). ....	112
Figura 65 – Comparações entre erros padrão de Y2 e Y3. ....	113
Figura 66 – Comparação entre erros padrão para Y4 e Y5. ....	113
Figura 67 – Comparações entre erros padrão (Y6). ....	114
Figura 68 – Exemplo de aplicação a otimizar. ....	117
Figura 69 – Exemplo de aplicação otimizado. ....	118
Figura 70 – Estrutura molecular do PET.....	130
Figura 71 – Foto ampliada da seção transversal do poliéster.....	130
Figura 72 – Fiação convencional.....	133
Figura 73 – Influência do “ <i>mod ratio</i> ” no alongamento e tenacidade.....	135
Figura 74 – Efeito da Velocidade no Alongamento.....	136
Figura 75 – Macromoléculas em um filamento de POY.....	137
Figura 76 – Força de estiragem.....	138
Figura 77 – Título individual do filamento.....	139
Figura 78 – (a) Tenacidade.....	140
Figura 79 – (b) alongamento do POY como função da velocidade.....	141
Figura 80 – Filamentos estirados com temperatura (30min) versus densidade.....	142
Figura 81 – Desenho esquemático do ponto de estiragem no filamento.....	143

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de falsa torção [t/m] .....	36
Tabela 2 – Ajuste entre YP e Y .....	81
Tabela 3 – Variáveis de resposta. ....	82
Tabela 4 – Variáveis de entrada.....	86
Tabela 5 – Correlação entre as variáveis preditoras e <i>P-value</i> .....	87
Tabela 6 – Correlação entre as variáveis dependentes e <i>P-value</i> .....	87
Tabela 7 – Resumo dos dados X.....	90
Tabela 8 – Modelos de regressão OLS para as seis características de resposta. ....	98
Tabela 9 – Valores de VIF <sup>2</sup> s para o modelo MLR completo. ....	98
Tabela 10 – Análise de regressão múltipla para modelos reduzidos. ....	100
Tabela 11 – Modelos de regressão PCR para as seis características de resposta. ....	102
Tabela 12 – Comparação entre modelos de regressão PCR.....	102
Tabela 13 – Comparação entre modelos de regressão múltipla e PLS. ....	109
Tabela 14 – Propriedades típicas de fibras sintéticas.....	131
Tabela 15 – Técnicas de Fiação Química.....	131

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

AATCC	<i>American Association of Textile Chemists &amp; Colorists</i>
ABIT	<i>Associação brasileira da indústria têxtil</i>
ABNT	<i>Associação brasileira de normas técnicas</i>
ABRAFAS	<i>Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BISFA	<i>Bureau International pour Standardisation dès Fibres Artificielles</i>
CB-17	<i>Comitê Brasileiro para assuntos têxteis</i>
CEN	<i>Commission Européenne de Normalisation</i>
CITENE	<i>Companhia Integrada Têxtil do Nordeste</i>
CITEPE	<i>Companhia Integrada Têxtil de Pernambuco</i>
DIN	<i>Deutsches Institut Für Normung</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
IEMI	<i>Instituto de Estudos e Marketing Industrial</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
ITMF	<i>International Textile Manufacturers Federation</i>
OMC	<i>Organização Mundial do Comércio</i>
PCR	<i>Principal components regression</i>
PET	<i>Poly Ethylene Terephthalate</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
PLS	<i>Partial Least Squares</i>
POY	<i>Partial Oriented Yarn</i>
PTA	<i>Purified Terephthalic Acid</i>
SYFA	<i>Synthetic Yarn and Fiber Association</i>
TMT	<i>Toray Murata Teijin</i>

# 1 Introdução

## 1.1 A indústria têxtil no Brasil e no mundo

A indústria têxtil remonta em importância aos primórdios da produção em massa, sendo alavancada na Inglaterra com a revolução industrial. Desde então, além de proporcionar a geração de grandes quantidades de empregos, tem sido contínuo objeto de estudo para que seu progresso possa trazer ainda mais benefícios à humanidade. A indústria têxtil tem migrado de países desenvolvidos para países em desenvolvimento, nos quais o custo de mão-de-obra é mais competitivo neste segmento da indústria. A concentração na geração de tecnologias, treinamento, execução de projetos industriais de grande porte e prestação de serviços, por sua vez, está quase sempre concentrada nos países desenvolvidos. Estes projetos industriais podem ser realizados virtualmente em qualquer parte do mundo e geram matéria-prima que pode ser utilizada pelos diversos setores da cadeia têxtil que, não necessariamente, se encontram no mesmo país, criando ambientes altamente competitivos. Dentro deste contexto, desenvolveu-se a indústria do poliéster, um derivado de petróleo largamente utilizado no cotidiano. Esta dissertação discorre principalmente sobre fatos da indústria têxtil, de modo a proporcionar um retrato desta realidade.

O mercado mundial hoje corresponde a aproximadamente 30 milhões de toneladas por ano de poliéster e o Brasil tem mercado de aproximadamente 750 mil toneladas por ano, uma fatia de 2,5% do consumo mundial.

Ao longo de sua história, que começou ainda no tempo do império, a indústria têxtil brasileira viveu períodos de grande expansão, intercalados por outros de estabilidade e até, de retração. Na década de 90, com sua exposição à concorrência internacional o setor sofreu um forte impacto negativo. Muitas empresas menos preparadas para competir com os fornecedores externos, foram obrigadas a abandonar suas atividades, mas muitas outras permaneceram no mercado e investiram em modernização, obtiveram uma redução de custos, buscaram melhorar sua competitividade e enfrentaram a concorrência dos importados. O fechamento de muitas empresas, porém, não significa uma redução da produção têxtil, uma vez que aquelas que permaneceram ativas mais do que compensaram a capacidade produtiva perdida com os seus investimentos e importações.

As indústrias têxteis e confeccionistas brasileiras participam com 5,2% do faturamento total da indústria de transformação. Em termos de pessoal ocupado, sua participação é ainda mais expressiva representando 17,3% do emprego total da indústria de transformação nacional (IEMI 2007).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil (ABIT), a indústria têxtil e de confecção do Brasil é a sétima mais importante do mundo, reunindo cerca de 30 mil empresas, competitivas e geradoras de 1,6 milhões de postos de trabalhos diretos. Representa 17% do PIB industrial, sendo o segundo maior empregador desse segmento, existem 70 escolas de moda e design, além de 12 universidades e faculdades na área. Certamente, o setor têxtil é um setor de grande relevância para a economia do País. Segundo a *International Textile Manufacturer's Federation* (ITMF) e a Organização Mundial do Comércio (OMC), pode-se verificar que o mercado têxtil mundial continua registrando uma significativa expansão, tanto no que se refere aos montantes produzidos, quanto ao comércio entre os grandes países produtores e consumidores. Segundo Cerri (2007), no mercado mundial, o consumo de sintéticos é de aproximadamente 65 mil toneladas e deste total poliéster representa 49%, no mercado brasileiro, o consumo de sintéticos representa 34,4% do mercado têxtil, enquanto que, no mercado mundial representa 39%. No Brasil, o consumo de poliéster representa 59% do consumo de sintéticos com um crescimento de 6% ao ano em média.

Segundo dados no site do Ministério de Desenvolvimento e do Comércio Exterior, em 2006, o poliéster deteve 80% do volume interno de fibras sintéticas, sendo que 45% deste volume são importados. Ainda segundo a mesma fonte, foram comercializados aproximadamente 215 mil toneladas em 2006 de poliéster.

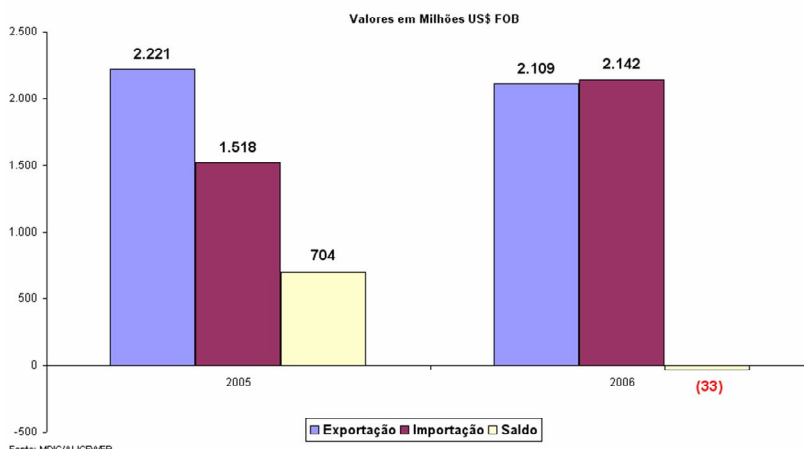


Figura 1 – Balança Comercial Brasileira de Produtos Têxteis e Confeccionados.

A “Figura 1” demonstra um gráfico da balança comercial do Brasil no setor têxtil e de confecção, na qual se percebe como a valorização do real está influenciando a importação, fazendo com que a mesma cresça.



Figura 2 – Exportadores em 2005

A Petrobrás, Petroquímica Suape, CITENE e CITEPE, realizaram o estudo “Integração trazendo competitividade para a Indústria têxtil do Nordeste” (CERRI, 2007). Segundo este estudo, o mercado têxtil mundial movimentava 495 bilhões de dólares americanos por ano. As “Figura 2” e “Figura 3” mostram graficamente alguns valores de exportação e importação por países onde se pode visualizar e posicionar o Brasil.

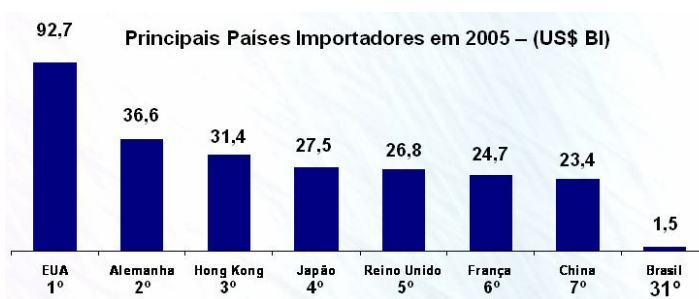


Figura 3 – Importadores em 2005

As representações gráficas dão uma dimensão do posicionamento do Brasil no cenário mundial.

Dentro do setor têxtil, esta dissertação irá se concentrar em fios sintéticos e mais especificamente no poliéster, um produto derivado de petróleo, obtido tal como descreve a “Figura 6”.

Estudos da *PCI Fibres* mostraram que um barril de petróleo (42 galões de óleo cru), produz: gasolina, óleo diesel, gasolina azul (aviões), coque, óleo industrial, gás liquefeito, gás, asfalto, petroquímicos, lubrificantes, querosene, outros. Do grupo “petroquímico” retira-se a matéria prima de poliéster, os quais representam menos de 2,5% da produção de uma refinaria. Daí conclui-se, que a empresa têxtil não tem um forte poder de negociação por si só e, dessa maneira, requer a formação de grupos maiores para ter expressão significativa em negociações. Neste caso, normalmente as empresas se vêm à mercê das variações do preço do petróleo.

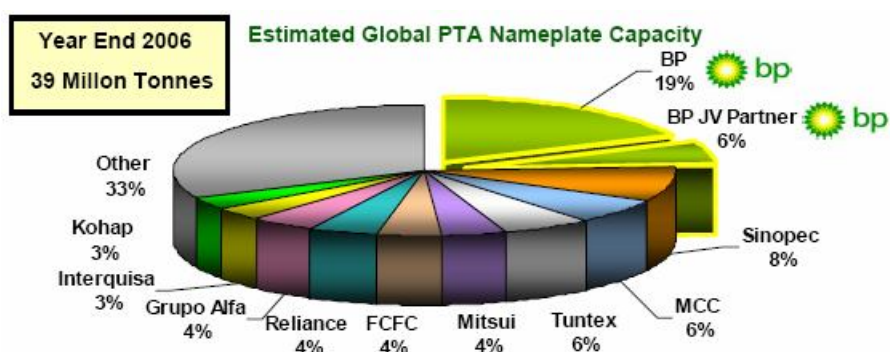


Figura 4 – Capacidade de PTA nominal. Fonte: PCI Fibres

O PTA (*purified terephthalic acid*) é uma das matérias primas do poliéster juntamente com o PX (paraxylene). Por isso, as maiores empresas produtoras de poliéster no mundo estão associadas a grandes grupos petroquímicos.

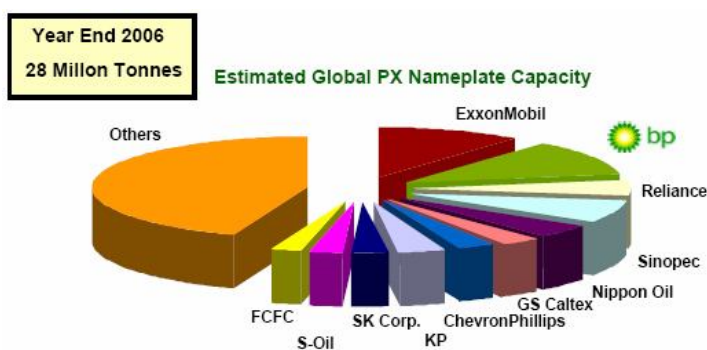


Figura 5 – Capacidade de Paraxileno nominal. Fonte: PCI Fibres



Observa-se que poliéster tem uma expressiva fatia de 73%, o que se aproxima da demanda de 30 milhões de toneladas em 2007. Assim se verifica a relevância da geração de conhecimento a partir de processos que utilizam esta fibra.

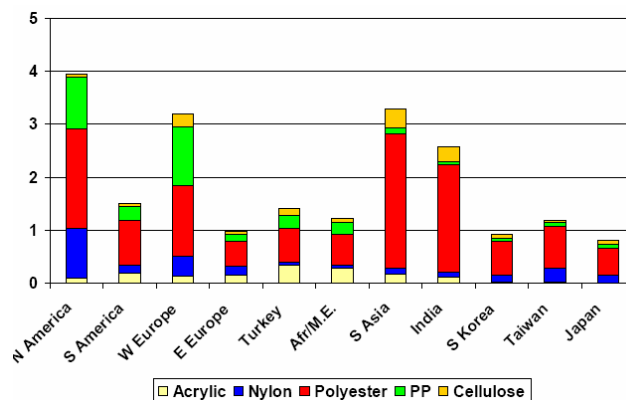


Figura 8 – Distribuição do consumo de fios e fibras sintéticos por país. Fonte: PCI Fibras

A “Figura 8” expressa graficamente a distribuição das fibras sintéticas nos blocos regionais relevantes no mundo. O gráfico mostra o consumo de fios e fibras artificiais e sintéticas pelos blocos de países, com valores expressos em milhões de toneladas em 2006 (PCI Fibras). Fica evidente que a América do Sul tem expressividade mediana se comparada aos demais blocos.

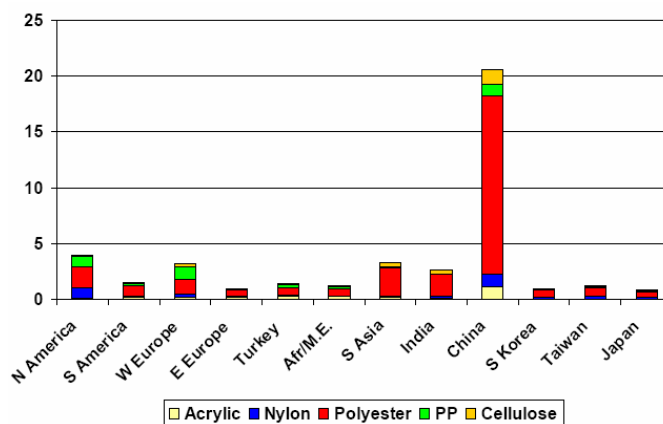


Figura 9 – Distribuição do consumo incluindo a China. Fonte: PCI Fibras

Os gráficos mostrados até então, excluíam a China de modo proposital. Ao incluir-se a China na Figura 9, nota-se a vultuosidade de consumo que este país teve em 2006.

Isto ocorre principalmente porque grande parte dos países desenvolvidos está usando a China como seu parque industrial, de maneira a preservar seus próprios interesses de

lucratividade e se preocupando somente com a parte criativa e administrativa de seus negócios.

Como o poliéster é derivado do petróleo, muito de seu preço está atrelado à variação do preço do barril, que por sua vez vem apresentando altas expressivas de preço. Apesar dos números apresentados parecerem grandes, não o são na verdade, se for considerado que a participação dos produtos petroquímicos não ultrapassa 2,5% da produção de uma refinaria (PCI Fibres).

A cadeia têxtil foi estudada em Nota Técnica emitida pela Unicamp em 2002, em “Estudo da Competividade de Cadeias Integradas Têxteis no Brasil”, mas precisa ser atualizada, embora a estrutura utilizada tenha sido bastante diversificada e interessante.

É importante salientar que também neste setor, as importações são objeto de contínuo escrutínio por parte das empresas Nacionais, pois deterioram o parque industrial doméstico e ameaçam a cadeia têxtil produtiva. No período de 2002 a 2006, segundo Cerri (2007), as importações no setor de confecção cresceram 185% em quantidade, mas comparado ao setor de fios que teve aumento de 817% este último requer cuidados especiais de maneira a se buscar meios de valorizar e desenvolver a indústria nacional. Existe um projeto de implantação de uma cadeia integrada têxtil e de confecção em Pernambuco, que pretende gerar 600.000 empregos diretos e indiretos, e movimentar 4 bilhões de Reais na região em 6 anos.

## **1.2 Aspectos do desenvolvimento de novos produtos**

A definição para desenvolvimento de novos produtos que mais se aplica à realidade das manufaturas têxteis é expressa por Juran e Gryna (1992) como “uma etapa da espiral da qualidade que traduz as necessidades do usuário, descobertas por intermédio de informações de campo, num conjunto de requisitos do projeto do produto para a fabricação”.

Dentro das estratégias para o desenvolvimento de produtos, descritas por Baxter (1998), pode-se contextualizar as empresas têxteis que conseguem sobreviver à concorrência como aquelas que possuem uma estratégia ofensiva, isto é, empresas que lideram o mercado de fios de poliéster (frente ao importado) colocando-se sempre a frente dos concorrentes, caracterizando uma cultura pró-ativa de inovação.

O projeto de produtos, para quem quer se manter competitivo, não deve ser desenvolvido somente como atividade intuitiva, empírica e de tentativa e erro, mas deve ser

desenvolvido apoiado em método sistêmico, com forte embasamento científico, da mesma maneira que inovações utilizam-se do pensamento criativo sistemático.

O desenvolvimento de novos produtos consolida-se como importante fator de competitividade (SILVA, 2001), os novos produtos buscam atender às necessidades latentes e/ou potenciais do mercado. Através da inovação, os produtos tradicionais estão evoluindo para produtos modernos com incorporação de tecnologia que agregam muito mais valor na contribuição financeira. A exigência de flexibilidade faz com que a produção em massa evolua para a diferenciação maciça. A necessidade de uma estratégia ofensiva na organização provoca uma adequação na estrutura do processo de desenvolvimento de produtos, forçando o mesmo a ser um time de empreendedorismo.

A concepção moderna do processo de desenvolvimento de produtos contribui diretamente na: redução de custos de produto, melhoria da qualidade, redução do prazo de desenvolvimento, aumento da flexibilidade, aumento da confiabilidade, e indiretamente contribui para: aprendizado, redução do custo de oportunidade, transformação da cultura organizacional, ampliação do ciclo de vida do produto, aumento da participação no mercado, aumento da margem de lucro, melhoria da imagem (CORRÊA, 1994).

Uma etapa relevante do desenvolvimento de produto é a definição do método de trabalho e a “aquisição de amostras”, isto é, para a obtenção de um produto, existe uma fase em que se faz necessária à construção de protótipos (amostras). A etapa de amostragem, sendo a atividade que ocorre atuando-se diretamente na máquina de produção em geral, raramente terá seu tempo de execução muito reduzido. Desta forma, é necessário se discutir métodos de modelagem do processo de maneira a se possibilitar um acesso remoto aos recursos de modo eficiente e de custo reduzido.

Segundo critérios de característica da concepção tradicional do processo de desenvolvimento de produtos de Deschamps e Nayak (1997), empresas que se enquadram na percepção departamentalizada, isto é, o desenvolvimento de produto opera de maneira fragmentada, onde cada departamento concentra-se em sua parcela de trabalho. Esta fragmentação pode ocasionar problemas ou dificuldades na criação de uma modelagem do processo, originando problemas de comunicação, uma vez que quando o cérebro humano recebe dados parciais, ele os completa para gerar a informação que necessita.

## 1.3 Objetivo principal

O objetivo principal desta dissertação é avaliar e comparar a adequação de três métodos de modelagem por regressão - a Regressão Linear Múltipla (MLR), a Regressão por Componentes Principais (PCR) e a modelagem por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) – aplicados ao processo de texturização por falsa torção de fibras de poliéster. Uma vez obtida a melhor aproximação para as características de saída do processo, a sua otimização será estudada utilizando-se o método de Algoritmos Genéticos (GA), o qual avaliará uma condição de ótimo, consideradas todas as restrições e especificações para o processo de texturização por falsa torção. Será verificada a possibilidade da utilização de dados históricos de um processo na construção de modelos, o que pode promover a redução de tempo e custo de desenvolvimento de produtos e conduzir ao aperfeiçoamento do processo de tomada de decisão.

### 1.3.1 Objetivos secundários

Além do objetivo principal exposto anteriormente, este trabalho tenciona também:

- Verificar a aplicabilidade dos métodos estatísticos de modelagem a processos complexos de um ambiente de manufatura têxtil.
- Mostrar que métodos estatísticos multivariados possibilitam uma modelagem confiável realizada em função de dados históricos disponíveis.
- Comparar modelos de regressão com os modelos baseados em equações diferenciais e da transferência de calor, comumente usados na manufatura de fios e fibras sintéticas.
- Avaliar a possibilidade de se substituir as equações diferenciais por equações de regressão.
- Avaliar a influência de estruturas de correlação presentes em dados de entrada (X) e saídas (Y), sobre a acurácia dos coeficientes dos modelos de regressão.
- Difundir a utilização da estatística multivariada e de métodos de otimização com algoritmos evolutivos.
- Proporcionar uma revisão bibliográfica, técnica e científica acerca de modelos aplicados a processos da indústria têxtil de poliéster nacional.

## 1.4 Justificativa

Compreender um complexo processo de fabricação multi-etapas, simultâneo, que requer um produto final que atinja padrões de qualidade em múltiplas características, já seria uma razão suficiente para a realização da presente pesquisa. Além deste argumento, outros aspectos se mostram igualmente relevantes, quais sejam:

- Possibilidade do uso de dados históricos de maneira não empírica e simultânea, de modo a propiciar adequações da produção e novos desenvolvimentos a partir dos mesmos, sem custo adicional de pesquisa ou procedimento experimental;
- Possibilidade de melhoria para o grau de explicação dos modelos matemáticos do processo. Como será demonstrado posteriormente, os modelos mecanicistas, baseados em equações diferenciais e de transferência de calor, divergem consideravelmente de dados reais, fornecendo ajustes apenas razoáveis para as características do processo de texturização por falsa torção, na maioria das vezes;
- Negligência sobre a influência da utilização de variáveis correlacionadas em problemas de modelagem;
- Possibilidade de se encontrar um conjunto de parâmetros de processo que atenda à maior quantidade possível de características como finalidade principal dos métodos de otimização. A otimização multicritério baseada em parâmetros de processo e características especificadas pelo mercado ou cliente é uma opção bastante apropriada e precisa se tornar mais acessível;
- Desenvolvimento de um procedimento de auxílio na tomada de decisão ligada à manufatura de produtos têxteis com múltiplas características correlacionadas. Há um grande apelo por parte dos gestores por métodos quantitativos que auxiliem nesta tarefa.

## 1.5 Abrangência do trabalho e limitações

Este trabalho abrange, de maneira geral, os processos produtivos de filamentados e multifilamentados e, pode-se estender ainda para processos de extrusão e fiação de polímeros, tanto na área têxtil, industrial ou técnica.

As limitações deste trabalho são:

- Será estudado apenas o processo de texturização por falsa torção de fios/fibras de poliéster. Nada poderá ser afirmado sobre outros processos de texturização ou fios/fibras produzidos com outras matérias-primas.
- Não serão incluídos os dados de controle de processo;
- Não será proposta nenhuma forma de controle de processo multivariado;
- Não serão computados os possíveis erros associados ao sistema de medição;
- Serão utilizados apenas pacotes estatísticos comerciais para o desenvolvimento deste estudo, com modelos avaliados apenas pelos algoritmos OLS e NIPALS.
- Como método de otimização múltipla, será utilizado o Algoritmo Genético. Nenhuma comparação com métodos gradientes, como GRG (*Generalized Reduced Gradient*), por exemplo, será feita.
- Devido ao conjunto de dados históricos utilizados, eventuais extrapolações devem ser criteriosas e, na medida do possível, evitadas e devem considerar apenas a região abrangida pelos dados originais. Estudos futuros podem expandir as fronteiras estabelecidas por esta limitação.

## 1.6 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, será realizada uma revisão sobre os diversos pontos relevantes de um processo de texturização e como se processa a transformação do poliéster em produto acabado. Neste capítulo, serão apresentadas também algumas formulações mecânicas do processo de maneira a ambientar o leitor com a complexidade do processo. Este capítulo, no entanto, pode ser omitido se o leitor estiver interessado somente na metodologia apresentada para modelagem e otimização. Estas formulações, que em sua maioria, não foram publicadas em periódicos científicos, constituem-se no principal mecanismo de previsão adotado pelas indústrias têxteis; poucas, entretanto, detêm este “know-how”.

No Capítulo 3, investigam-se os principais procedimentos estatísticos de regressão univariados e multivariados (a literatura tem extensivo material comparando estes métodos).

No Capítulo 4, apresentar-se-á uma revisão sobre procedimentos de otimização de múltiplas respostas baseados em Algoritmos Genéticos. Uma revisão sobre este tema será também feita.

No Capítulo 5, os modelos de regressão serão aplicados aos dados coletados do processo de texturização por falsa torção, e seus resultados serão comparados para se escolher

o modelo com a melhor adequação. Todas as análises estatísticas serão realizadas utilizando-se o software Minitab 15.

No Capítulo 6, será proposto um sistema de otimização de múltiplas respostas com restrições, com solução desenvolvida através da aplicação de Algoritmos Genéticos, denominado de “Abordagem combinada GA-PLS”.

Na seção de anexos, algumas informações adicionais sobre a fibra do poliéster, suas características e propriedades serão apresentadas. Este anexo revisa os processos anteriores à texturização. O autor verificou a importância e a necessidade de uma revisão como esta devido à baixa disponibilidade de material científico publicado nesta área no Brasil.

## 2 Processo de texturização

Para esta dissertação, realizou-se uma revisão bibliográfica para caracterização da matéria prima utilizada no processo de texturização e sobre pontos relevantes da mecânica envolvida no processo de texturização por falsa torção, caracterizando todo este processo. Muitos dos artigos referenciados datam do período entre 1973 e 2002, período durante o qual se desenvolveram as principais equações relacionadas com o processo de texturização, tornando-se o período mais produtivo em conhecimento. A dissertação procura consolidar alguns pontos relevantes usando referências mundiais. (Para informações adicionais veja Anexo A)

Segundo Fourné (1998), na maioria dos desenvolvimentos dos processos mecânicos da indústria têxtil, as invenções e desenvolvimentos na texturização de fios não passaram por uma seqüência racional desde a ciência básica, pelos cálculos de engenharia até implementação prática. O avanço empírico baseado no entendimento intuitivo tem sido a norma. Tudo isto não é para dizer que a pesquisa acadêmica tem sido colocada de lado. Na medida em que a ciência de cada aspecto é esclarecida, isto alimenta o entendimento qualitativo dos que se preocuparam com práticas operacionais. A matemática talvez tenha sido ignorada, mas as idéias proporcionaram uma consciência técnica. Grande parte do conhecimento nesta área foi transformada em procedimentos operacionais, largamente adotados e difundidos, sem haver, necessariamente, uma contrapartida relacionada com a publicação em periódicos científicos destas práticas. Ressalta-se, portanto, que apesar de poucas referências científicas, os modelos mecanicistas apresentados, constituem a prática do controle e desenvolvimento de processos da indústria têxtil.

Ao se tratar de texturização, a dissertação será dedicada apenas ao estudo do processo de texturização por falsa torção em multifilamentos de poliéster a partir de POY (do inglês *partially oriented yarn*). Seria extremamente complexo e inapropriado, se fazer uma inferência completa sobre todos os processos de texturização. A dissertação trata de prover uma fundamentação da texturização para estudos futuros e utilização destes conhecimentos para análises de experimentos que possam ser propostos. À medida que não seja possível fazer as demonstrações de cálculos de projetos, a ênfase será dada nos princípios que regem o fenômeno e nem sempre nos detalhes matemáticos, os quais estão descritos nas publicações originais.

## 2.1 Texturização por falsa torção

As fibras naturais, como lã e algodão, possuem ondulações, também chamadas de crimpagem. Para adquirir efeitos similares e possibilidades do fio fiado, muitos métodos foram desenvolvidos (HEARLE, 2002), e o método mais difundido atualmente é o de texturização por falsa torção.

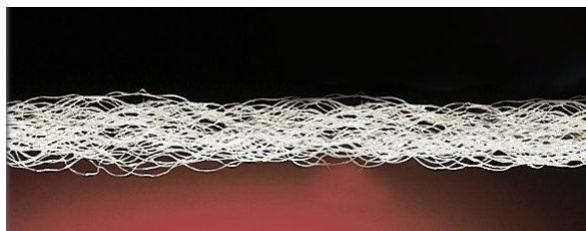


Figura 10 – Fio texturizado<sup>1</sup>

A texturização visa proporcionar aparência, toque e desempenho (propriedades mecânicas) a um custo reduzido. Estes fios (Figura 10) poderão ser empregados para melhorar as características dos tecidos. No tocante à texturização, esta dissertação irá discutir as características básicas que são relevantes à visão, toque e senso humano, propriedades dos filamentos sintéticos que atraem a atenção humana. A modificação de filamentos lisos recebe o nome de “texturização” ou ainda “texturação”.

## 2.2 Características visuais do fio

Segundo Demir e Behery (1997), a aparência da superfície depende de como a luz é refletida nela. Uma superfície com topologia não uniforme reflete luz aleatoriamente como observado num papel ordinário e fornece uma aparência opaca, onde uma superfície lisa reflete luz de maneira organizada como um espelho e, portanto, cria uma aparência brilhante. Fios, filamentos e tecidos se comportam da mesma maneira. Com isso pode-se dizer que tecidos produzidos com filamentos lisos irão ter aparência altamente brilhante e tecidos utilizando filamentos texturizados serão menos brilhantes. O perfil do filamento irá interferir

---

<sup>1</sup> Figura gentilmente fornecida pela Temco.

na reflexão da luz também. Logo, um perfil redondo irá refletir luz de maneira menos organizada do que em um perfil trilobal.

### **2.2.1 Cor**

A cor é uma sensação produzida nos olhos pelos raios decompostos da luz por um objeto. Esta sensação visual está diretamente relacionada com a estrutura molecular da fibra, ao invés das superfícies ou arranjos espaciais da mesma. Os compostos coloridos usam de pigmentos tintoriais durante a produção do filamento sintético; estas estruturas químicas absorvem luz visível com determinado tamanho de onda e transmitem somente tamanhos de onda selecionados para o olho.

### **2.2.2 Maticidade**

A maticidade é uma propriedade óptica que é fortemente determinada pela presença de pequenos centros espalhados na ou entre a fibra e pelo arranjo geométrico das fibras no filamento. Maticidade é um complexo fenômeno que observadores experientes podem variar somente em função do posicionamento dos filamentos e do tecido. Alguns dos fatores que podem influenciar a maticidade são: fonte de luz, propriedades direcionais da reflexão da luz, o nível geral da intensidade de luz refletida, a cor e a textura da superfície e percepção visual de profundidade.

No início da produção de fibras sintéticas elas eram brilhantes e lustrosas, porque transmitiam luz livremente. Aparentemente, esta característica era suficiente para vendê-las, mas eventualmente com o tempo, isto se mostrou uma limitação e esta aparência não se assemelhava com a aparência das fibras naturais que eram muito mais desejáveis. No poliéster, verificou-se que a adição de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) alterava sua aparência de brilhante para opaca.

## **2.3 Características do fio referente ao toque**

O apelo humano do tecido depende, em múltiplas interações, do efeito visual da textura do tecido e da sensação ao tocá-lo com as mãos ou vesti-lo. Não é fácil se separar os

efeitos visuais do toque, porque muitos indivíduos estão acostumados a ver e tocar o tecido ao mesmo tempo. De maneira geral, estas características de toque são: volume e cobertura, calor e, toque.

### **2.3.1 Volume e cobertura**

Volume pode ser considerado como o volume específico do fio ou tecido, isto é, o volume que o fio ou tecido ocupa em um espaço livre. Pela natureza das fibras e filamentos, entretanto, milhões delas em um fio ou tecido ocupam um pequeno espaço quando eles estão organizados de maneira ordenada, criando, portanto, pouco volume, e deixando pouco ar passar entre eles. Tecidos manufaturados com tais fios provocam uma sensação no usuário semelhante à lâminas de plástico, grudentas e desconfortável, e, deste modo, encontra pouca atração e uso. Para criar volume no fio e, desta forma, no tecido, os elementos básicos, isto é, fibras e filamentos, são tão desordenados organizadamente, que mesmo a distribuição na direção axial ou radial é uniforme, fazendo com que o fio ocupe o máximo volume no espaço. Este fenômeno é simplesmente adquirido pela irregularidade geométrica, como crimpagem, laço, ou ondulações dos elementos básicos. Fibras naturais possuem estas propriedades inerentes ao seu processo natural de formação. Fibras de algodão possuem formato transversal de feijão e torcido no sentido do comprimento; já a lã é enrolada e crimpada. Fibras sintéticas também são texturizadas para criar efeitos similares. Quando estas fibras ou filamentos são utilizados para se fazer os fios ou multifilamentos, algum ar fica preso entre as fibras, o que melhora as propriedades térmicas do fio; portanto, os tecidos manufaturados com estes fios ou multifilamentos proporcionarão um sentimento de calor, volume, e serão confortáveis. Estas propriedades normalmente atraem a natureza humana; por conseguinte, estes tecidos encontram muitas utilidades no dia-a-dia.

Fios volumosos ocupam um volume consideravelmente maior que o necessário para os filamentos por si só. Esta propriedade do fio está diretamente relacionada com a cobertura proporcionada com o tecido utilizando-se de mais ou menos fios, sendo que o tecido pode cobrir uma área sem clara aparência de uma rede de espaços vazios.

### 2.3.2 Elasticidade

A elasticidade é uma propriedade do tecido de se adaptar ao corpo das pessoas, causando sensação de conforto e leveza na movimentação. Esta propriedade ainda é responsável pela manutenção da aparência de “novo” ao tecido, mesmo após inúmeras lavagens. Estes tecidos que tem boa elasticidade não ficam com marcas de dobras ou se deformam.

Para ilustrar esta propriedade, a “Figura 11” mostra como a empresa Unifi Inc. divulga seu produto registrado sob nome “Reflexx”, classificando a elasticidade do tecido em três áreas principais sendo: de 5% a 15% chamado de elasticidade normal, veja também Derder (1985), de 20% a 30% de elasticidade de conforto, e de 35% a 45% de elasticidade de desempenho.

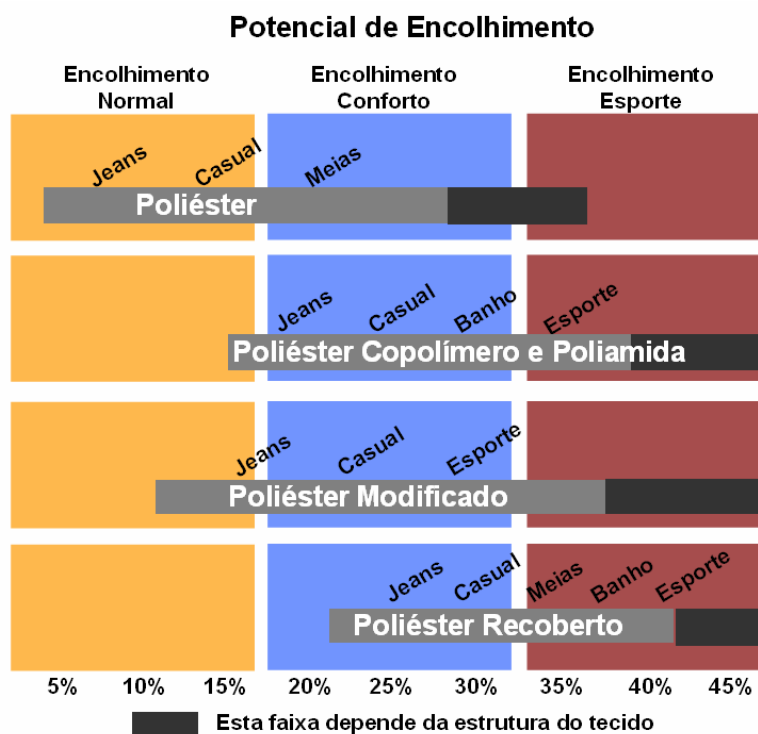


Figura 11 – Possibilidades de elasticidade de tecido<sup>2</sup>

Como esta elasticidade no mercado têxtil pode ser traduzida como encolhimento, muitas vezes esta propriedade é denominada desta forma. Isto ocorre, porque na medida em que se alteram as temperaturas com as quais o tecido é tratado, principalmente no acabamento ou em

<sup>2</sup> Figura retirada do projecto fornecido a clientes pela empresa em Feiras e eventos publicitários.

fases anteriores, o encolhimento do tecido varia em função desta, e conseqüentemente, a estrutura do tecido terá uma elasticidade diferente e que estará correlacionada com o encolhimento do mesmo. Daí, a denominação em comum. Busca-se utilizar fios com elasticidade para maior conforto do vestuário e, no caso do poliéster, isto funciona como uma alternativa aos fios elastoméricos, que normalmente são combinados através de recobrimento ou retorção, e ou a poliamida.

### **2.3.3 Conforto térmico**

As imperfeições na superfície da fibra ou na orientação das fibrilas no fio fiado, criam espaços vazios nos quais se armazenam alguma quantidade de ar. O ar estático funciona como bom isolador térmico, portanto, o fio fiado proporciona uma sensação de calor confortável. Através da mudança da superfície cilíndrica presente na geometria dos filamentos e sua disposição espacial ao longo do fio, o calor de filamentos contínuos pode ser aperfeiçoado. Filamentos texturizados também se portam como fios fiados e ar é mantido entre os filamentos.

Sem levar em consideração o conteúdo de fibra, calor e isolamento térmica é dependente no armazenamento de ar sobre uma grande faixa de vento, temperatura, e condições de umidade. É também verdade que, nas estruturas têxteis, a razão de transferência de calor depende muito mais na área real de contato entre pele e superfície do tecido que no tipo de fibra usada. Então, o fio texturizado no tecido proporcionará maior sensação de calor do que o fio liso no tecido.

### **2.3.4 Toque**

Toque é descrito como “uma avaliação subjetiva de um material têxtil obtido pelo senso do toque” (TTI, 1975). Toque é, portanto, um fenômeno psicológico. Isto implica na habilidade dos dedos para fazer uma sensível e discriminante avaliação, e da mente, para integrar e exprimir os resultados em um único valor julgado. Este julgamento não pode ser obtido objetivamente, porque os mecanismos relevantes dos sensores orgânicos - sistema nervoso e a mente - são desconhecidos até certo ponto, variando de indivíduo a indivíduo e em função do tempo para cada indivíduo (ELLIS, 1980).

A sensação obtida quando existe um contato entre a pele humana e o tecido é fortemente determinada pela dureza da capilaridade ou laços das fibras projetadas sobre a

superfície do tecido. Quanto mais finos forem estes capilares (ou fibrilas), mais suavidade no tecido será sentida. Entretanto, a sensação de um toque leve ou pesado será essencialmente governada por parâmetros diferentes. Por último, pode-se mencionar a maleabilidade e o caimento que são principalmente funções da construção e acabamento do tecido.

Ainda de acordo com Ellis (1980), existem quatro centros sensoriais correspondentes a 4 fatores: (1) suavidade, (2) dureza, (3) volume ou compactação (aspectos do peso e espessura), e (4) característica térmica (aspectos de calor, peso e espessura).

## **2.4 Textura**

O termo textura define e descreve aqueles atributos de um objeto que pode ser reconhecido pela visão humana (características visuais) ou toque (características táteis).

As principais propriedades da textura desejada nas confecções e têxteis domésticos são conforto térmico, opacidade, maleabilidade, e boas propriedades de vestimenta, casada com uma atraente aparência e fácil manutenção.

Atratividade e apelo ao consumidor de bens têxteis são fortemente relacionados à sua propriedade da superfície, que estão em constante contato com os sentidos humanos, como visão e toque. Estes atributos de um objeto que pode ser reconhecidos pela visão humana e toque estão descritos no termo textura, que abrange volume, cobertura, toque, e conforto térmico como propriedades táteis, e de aparência e maticidade como propriedades visuais.

## **2.5 O processo de texturização**

Devido à crescente demanda de bens têxteis e a diminuição de recursos naturais, fios sintéticos são imprescindíveis na indústria têxtil hoje. Estes fios sintéticos, como a poliamida e o poliéster, são fios multifilamentados fiados a partir de uma fieira. Entretanto, são desprovidos dos apelos humanos previamente discutidos. Apesar do apelo por produtos de origem natural, os fios sintéticos oferecem algumas propriedades superiores, como uma maior resistência, boa elasticidade, flexibilidade e resistência à abrasão.

Conforto térmico, toque, textura natural e aparência são consideradas propriedades desejáveis na maioria dos fios têxteis. Filamentos lisos contínuos não possuem estas qualidades, embora sejam frequentemente mais resistentes e muito mais uniformes que fios de

fibras naturais. Na produção de fios têxteis de filamentos sintéticos, o ideal seria combinar as propriedades desejadas para fibras naturais e sintéticas, mas isto é uma tarefa até hoje praticamente impossível de ser realizada. Entretanto, o objetivo primário de todo processo de produção do filamento sintético é o de imitar as características da fibra natural, mantendo as propriedades desejáveis das fibras sintéticas.

Um método para se alcançar este objetivo é seccionar os filamentos contínuos em fibras cortadas, que serão então processadas na forma de fios, utilizando-se métodos de fiação convencional de algodão ou lã. Entretanto, este procedimento é moroso, apesar de ser útil para misturas de fibras sintéticas e naturais. Alternativamente, filamentos contínuos podem ser convertidos em fios por vários métodos de texturização a baixo custo, mas muitas vezes estes processos inadequadamente simulam fios fiados.

Combinar as qualidades desejáveis de materiais naturais e sintéticos é uma meta inalcançável por si só. Alguns aspectos dos produtos naturais podem ser imitados pelos filamentos sintéticos através do método de texturização. Entretanto, a texturização, em geral, é o processo de modificação da estrutura regular dos filamentos sintéticos em alguma coisa como estruturas aleatórias. Esta estrutura pode ser alcançada de muitas maneiras, como por deformação térmica, mecânica e química dos filamentos individuais, e seus arranjos espaciais no conjunto do fio. Outra definição para texturização, dada por Denton (1987), é: texturização é o meio pelo qual distorções finas permanentes, ondulações, laços, espiras, ou rugas são introduzidos dentro dos filamentos lineares originais dos fios sintéticos sem destruir a continuidade dos filamentos originais. O produto final, que é o fio texturizado é volumoso com curvatura, ondulações, torcido ou filamentos emaranhados. Isto possibilita a sensação de suavidade natural, aumentando a sensação térmica e conforto dos tecidos.

Tecidos com fios texturizados têm melhor habilidade de retenção de sua forma que aqueles feitos com filamentos lisos. Isto se deve obviamente à melhorada propriedade de fricção entre filamentos. A flexibilidade é uma propriedade importante e desejada nos fios têxteis e tecidos, que depende da habilidade dos filamentos (na camada externa) em se deformar facilmente. Um filamento liso é comparativamente menos flexível que um filamento ondulado, curvado e, enrolado. Esta deformação fácil dos filamentos é uma função de sua curvatura e rigidez à torção, determinada pela densidade linear dos filamentos e da geometria dos filamentos no fio. Nos fios texturizados, filamentos se encontram em diversas configurações geométricas e são levemente ajuntados de maneira a não inibir seus movimentos relativos. Tecidos feitos com estes fios têm resultados de melhor flexibilidade e extensibilidade. A texturização também proporciona fios mais leves. Mantendo-se os outros

fatores iguais, o fio sendo mais leve, melhor será seu poder de cobertura. Seu alto poder de cobertura é também função do maior volume adquirido como discutido anteriormente.

A maioria das fibras termoplásticas sintéticas tem baixo conteúdo de umidade quando comparado às fibras naturais. Entretanto, o ar armazenado nos interstícios dos fios texturizados retém umidade, fazendo com que o fio texturizado tenha boas características de conforto. Porque alguma água é absorvida pelos filamentos sintéticos, fios texturizados são facilmente lavados e secos. Esta propriedade pode ser variada utilizando-se um número de filamentos diferentes, á medida que se aumenta o número de filamentos e a consequente absorção de água.

### 2.5.1 O processo de texturização por falsa torção

Demir e Behery (1997) descreveram que, imediatamente após a fiação dos polímeros, a estrutura molecular estará somente parcialmente estirada, com filamentos, portanto, não adequados para uso têxtil. O arranjo paralelo das macromoléculas pela estiragem cria uma estrutura tridimensional desejada de propriedades no filamento. As forças de coexistência nestes arranjos regulares e paralelos de macromoléculas é a força de coesão que pode ser liberada por calor.

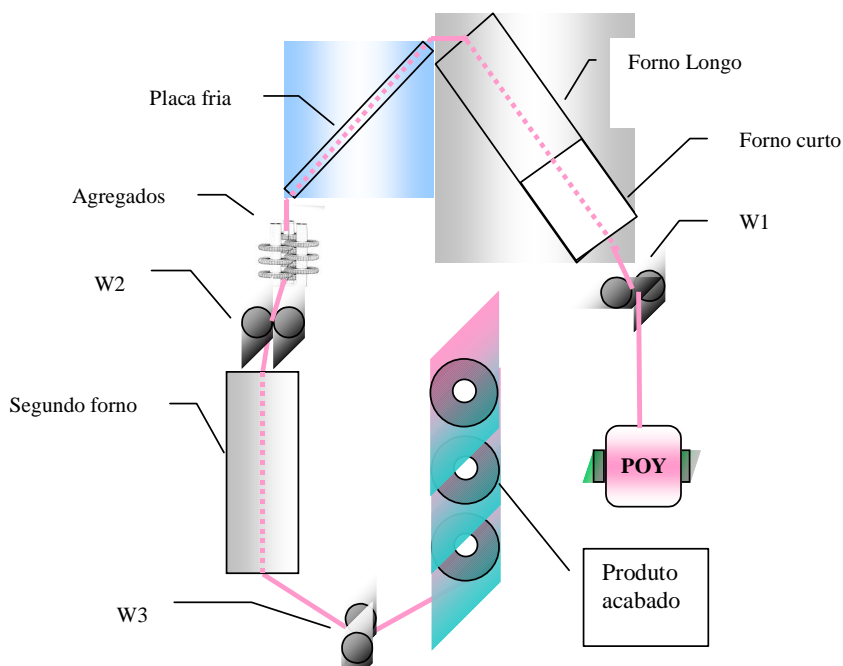


Figura 12 – Épura do Filamento em máquina perfil V.

Neste estado de mínima energia interna, se o filamento é mecanicamente deformado, a estrutura molecular irá aceitar a nova configuração do filamento. O resfriamento subsequente do filamento causará uma permanente fixação desta nova configuração. Desta maneira, muitos dos filamentos sintéticos são chamados de termoplásticos. Esta é uma característica particular da texturização termomecânica, da qual a texturização por falsa torção é um excelente exemplo.

Os requisitos básicos da texturização por falsa torção são:

1. Aquecimento do poliéster acima da temperatura de transição vítrea  $T_g$  (mas abaixo da temperatura de fusão  $T_m$ ), no Forno curto (localizado logo após o sistema de roletes W1).
2. Deformação dos filamentos até a forma desejada utilizando-se torção; utiliza-se o agregado que contém os discos de fricção.



Figura 13 – Fio sofrendo Falsa torção no agregado

3. Resfriamento dos filamentos abaixo de  $T_g$  mantendo-se a forma desejada, com resfriamento proporcionado pela placa fria.
4. Devido a memória termica do poliéster, os multifilamentos tendem a se rearranjar após o conjunto de fricção de modo que os multifilamentos resfriados ocupem um volume maior (textura) que o do início do processo.

As etapas (1), (2) e (3) ocorrem quase que simultaneamente entre W1 e W2.

Até aproximadamente 1956, um processo multi-etapas-torção fixação-distorção era utilizado (FOURNE, 1956), o qual foi substituído 1957/58 por um processo contínuo (Patente: DRP 618 050, 1932<sup>3</sup>). Aqui, o fio estacionário ou em movimento, é torcido entre dois pontos fixos e não rotacionários (pontos (a) e (c), Figura 14, por exemplo, na direção Z). O resultado para a porção entre (a) e (b) é torção S, e para a porção entre (b) e (c) é torção Z, isto é, o somatório anula a torção (Figura 14). Para fios em movimento, a torção S começa em (a) e fica constante até o elemento de torção em (b), a partir do qual se desfaz. Se o fio é fixado na área entre (a) e (b) em alto estado de torção, isto é, aquecido o suficiente e então resfriado, a torção será removida em (b), mas as ondulações causadas pela torção se manterão. Adicionalmente, estiragens parciais e termo-fixação após (c) podem remover parcialmente uma porção do volume e elasticidade de novo (Figura 12).

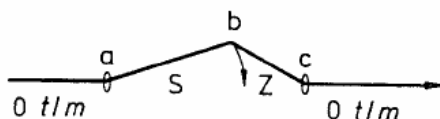


Figura 14 – Representação da Falsa torção (Heberlein)

A tabela a seguir apresenta fórmulas que dependem do título para a determinação dos níveis de torção recomendados no ponto (b). Segundo Fournè (1956) e fabricantes, estes valores usam interpolação de experimentos e otimização matemática de molas. Na prática, os valores reais para os fios, máquinas, fuso de falsa torção dentre outros fatores, devem ser determinados caso a caso segundo os valores medidos experimentalmente.

Tabela 1 – Valores de falsa torção [t/m]

De acordo com Título (dtex)	22	67	167	220	t/m (Fórmula)	Processo
Heberlein	4230	3080	2106	1865	$800+305560/(67+dtex)$	Torção real
Fournè	3658	2951	2123	1891	$30180/(1+16,7/dtex)\sqrt{dtex}$	Torção real
Barmag	5165	3457	2221	1940	$800+305560/(48+dtex)$	Falsa torção

A torção por fricção naturalmente é composta por grande quantidade de escorregamento na superfície dos discos e, entretanto, faz com que a análise matemática seja muito difícil e incerta. A redução de engrenagem que causa uma diferença de velocidade entre

<sup>3</sup> Patente Heberlein, empresa geradora de novas tecnologias na época, hoje parte da Oerlikon.

o disco e o filamento faz com que o escorregamento não interfira de maneira significativa na inserção de torções no filamento.

### **2.5.2 Sistema de inserção de falsa torção – agregado de fricção**

Embora tenham sido desenvolvidos e empregados diversos métodos de inserção de torção, atualmente, utilizam-se o sistema de discos de fricção e correias (*Toray Murata Teijing*, TMT). Esta dissertação focará o processo de texturização com torção produzida por discos de fricção.

O processo consiste, basicamente, em inserir alta torção ao filamento contínuo, fixando esta alta torção por um processo subsequente de aquecimento e resfriamento, seguido de completa distorção.

## **2.6 Fatores importantes para a texturização**

Nas próximas seções serão discutidos os vários métodos de mensuração das variáveis existentes no processo de texturização. As diversas empresas utilizam meios diferentes para definir os seus respectivos parâmetros de processo, otimizá-los e controlá-los. As seções a seguir mostrarão alguns dos mais importantes fatores para a texturização. Na modelagem proposta, serão utilizadas a maioria das variáveis descritas a seguir.

### **2.6.1 Dados da matéria prima**

Existem algumas informações da matéria prima que podem ser obtidas através do fornecedor ou que podem ser analisadas em laboratório próprio, segundo normas internacionais (ISO, CEN, BISFA, ASTM, AATCC, DIN, ABNT e fabricantes).

As informações sobre matéria-prima que geralmente são importantes são: (existem outras, como por exemplo, óleo, mas a dissertação está focando somente nas informações que serão usadas no experimento a ser discutido no capítulo de modelagem e otimização)

1. Lote de Fiação – Lote da produção de fiação, também chamado de “*Merge*”. Cada unidade de produção segue procedimento e filosofias próprias que concentram todas as informações básicas do fio fiado.
2. Maticidade – Brilhante (*Bright*), Semi Opaco (*Semi-Dull*), Opaco (*Dull*), Co-Polímero (*Copolymer*), Cor (*Color*), aparência e cor do polímero. Esta propriedade define o grau de abrasividade da superfície, já que a composição do poliéster muda de acordo com o polímero, e pode ser determinada de acordo com a quantidade de  $\text{TiO}_2$ , através de um teste de cinzas (em inglês, *Ash Test*). O POY brilhante, por exemplo, tem de 0,05% a 0,10% de  $\text{TiO}_2$ ; o semi-opaco, de 0,20 a 0,30%, e opaco, 0,50% de maneira geral. Esta dissertação focou na matiz semi-opaca.
3. Título do POY (*Denier*) – Densidade linear do multifilamento. “Denier” significa quantos gramas pesam 9.000 metros de fio. O sistema internacional utiliza a unidade Dtex, que significa quantos gramas existem em 10.000 metros de fio. No Sistema Internacional (SI), a base é kg/m, enquanto que a norma DIN 60905 especifica o sistema Tex (1 Tex = 1 g/1000m). A determinação do título se dá utilizando-se de um método gravimétrico, tal que:

$$T_1 = \frac{G \cdot 10^4}{Z \cdot l} [\text{dtex}] \quad (1)$$

Onde: G=massa da fibra (mg), l=comprimento (m) da volta, Z=número cabos.

4. Número de Filamentos – é o número de filamentos que compõem cada cabo de multifilamento. Será determinado pela quantidade de orifícios da fiação.

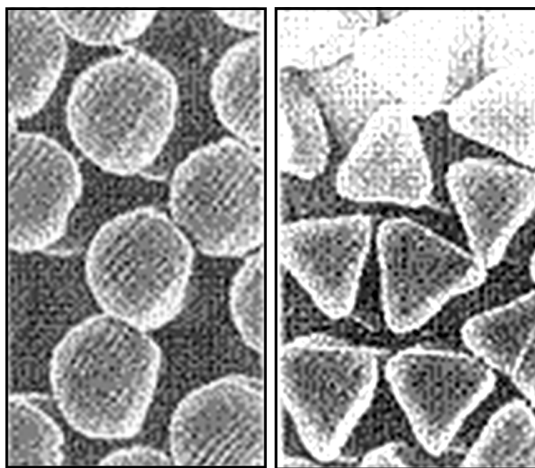


Figura 15 – Secção transversal Redonda e Trilobal

5. Tipo de Secção Transversal – Redonda, Trilobal (três lados), Octalobal (oito lados), Exótico (pode ter vários perfis). O perfil também irá influenciar o grau de abrasividade da superfície do multifilamento já que esta pode ser mais ou menos irregular.
6. Força de Estiragem (cN) – Tensão dinâmica obtida a partir da estigarem do POY a 1,7 (adimensional), utilizando o aparelho de força de estiragem Dynafil da Textechno (ASTM D5344-99), aparato descrito com detalhe em Fourné (1998).
7. Alongamento (%) – é extensão do fio até sua ruptura, medido em percentual do comprimento original. O alongamento é uma propriedade mecânica derivada da estiragem dinamométrica. Equipamentos de teste usam uma razão constante de extensão para tornar os diversos resultados comparáveis. O princípio do teste é prender o fio entre as garras e submetê-lo a um programa de tensão pré-definido. Uma célula de força irá registrar a força e um diagrama mostrará a curva de Tenacidade (Força) e alongamento. O Alongamento e tenacidade são fatores significantes para o controle de processo de produção do fio, processos futuros e características do produto. O alongamento é registrado no momento da ruptura do fio.
8. Tenacidade (cN/Den) – tenacidade obtida em função da razão entre a tensão (força) de ruptura e o título do fio. Dada a força de ruptura  $P_F$  [cN] e o título do fio  $T$  [Denier], a tenacidade  $\sigma_F$  será:

$$\sigma_F = \frac{P_F}{T} \quad (2)$$

O resultado se dará no mesmo teste em que se calcula o alongamento.

Segundo King (1991), o esforço sofrido pelo filamento pode ser demonstrado a partir do conceito de estiragem total como o produto do processo de fiação e estiragem. King (1991) escreveu um modelo matemático capaz de explicar o comportamento fundamental destes esforços, o que auxiliou o desenvolvimento de novos produtos. Utilizando-se as variáveis de 1 a 8, descritas anteriormente, as seguintes propriedades podem ser calculadas, ainda sobre a matéria-prima:

9. Índice de orientação (cN/Den) – Orientação é uma medida de alinhamento de cristálitos em uma região cristalina ou amorfa paralela com o eixo do filamento. Para medição desde índice em laboratório, pode-se utilizar de birrefringência ótica ou análise de raio-X. Para efeitos práticos, utilizam-se resultados da força de estiragem que está diretamente correlacionada com a orientação, tomando-se o Dynafil (força de estiragem) que é medido

usando-se uma estiragem a frio de 1,6 (adimensional). Logo, para se definir o “Índice de Orientação” em cN/Den, utiliza-se a razão da Força de estiragem pelo Denier, multiplicando-se o resultado pela estiragem utilizada. Este índice pode ser comparado entre fios de diferentes valores de Denier.

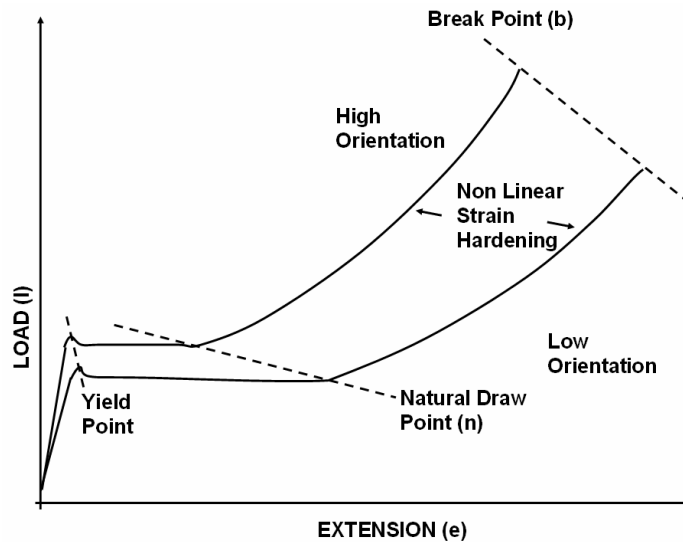


Figura 16 – Curva de tensão-esforço convencional

Na “Figura 16”, a extensão pode ser convertida em alongamento (%), taxa de estiragem, ou esforço, da mesma maneira que a força pode ser expressa como tensão baseada no título original ou no ponto de medição. Os pontos críticos são: o ponto de recuo (*yield point*), a estiragem natural (*natural draw ratio*), e estiragem de ruptura (*break*). A região não linear não foi caracterizada quantitativamente. A tenacidade, neste caso, será tratada em gramas por Denier [gpd], onde Denier é o título do fio originalmente, com a tenacidade específica baseada no título no momento da ruptura. Nos dois pontos críticos, de estiragem natural (n) e de ruptura (b), ou em qualquer ponto entre (r), as fórmulas a seguir são válidas.

Alongamento: 
$$E_r = \frac{(e_r - e_0)}{e_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Estiragem: 
$$\lambda_r = \frac{E_r}{100} + 1 \text{ [adimensional]}$$

Título: 
$$d_r = \frac{d}{\lambda_r} + 1 \text{ [Denier]}$$

Tenacidade verdadeira: 
$$\sigma_r = \frac{l_r}{d_r} \text{ [gpd]}$$

Esforço:  $\epsilon = \log(\lambda_r)$  [g]

Onde: d – Denier original;  $l$  – Força [g]; e – extensão [cm]; o – na origem; n – ponto de estiragem natural; r – em qualquer ponto; b – ponto de ruptura.

King (1991) assumiu que a tenacidade específica do PET poderia ser considerada constante e em torno de  $\sigma_b \approx 6,5$  [gpd], que a estiragem pode ser escrita em função da birrefringência ( $\Delta n$ ), tal que:

$$\lambda_b = 9,529 \cdot \Delta n^{-0,3865} \quad (3)$$

Como inferido por Vassilatou (1985), a estiragem natural e a ruptura são linearmente relacionadas como:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_b}{1,7} \quad (4)$$

Como a tenacidade específica foi considerada constante, tem-se:

$$T = \frac{\sigma_b}{\lambda_b} \quad (5)$$

Como a região entre a estiragem natural e a de ruptura é não linear e não é objetivo modelar esta região, pode-se, para esta região, definir o grau de estiragem ou fator de estiragem (conceito similar ao cálculo de grau de cristalização), tal que:

$$\lambda_f = \frac{(\lambda_y - \lambda_n)}{(\lambda_b - \lambda_n)} \quad (6)$$

O fator  $\lambda_f = 0,0$  indicará o nível mínimo (estiragem natural) e o fator  $\lambda_f = 1,0$ , o máximo (estiragem a ruptura). King (1991) também verificou que a função logarítmica do esforço é aproximadamente linear em relação ao fator de estiragem. Desta maneira, o esforço contribuído para o aumento da tensão após a estiragem natural pode ser representado usando o seguinte modelo:

$$\sigma_h = \exp(b_0 + b_1 \cdot \lambda_f) \quad (7)$$

Esta equação pode ser rearranjada para se obter:

$$\sigma_h = B_1^{\lambda_f} \quad (8)$$

Onde:  $B_1 = \exp(b_1)$ .

Quando obtidos os coeficientes por regressão linear, a equação deve ser reescrita para determinar a contribuição do esforço em relação à origem, e o esforço de aumento da tensão pode ser obtido por:

$$\sigma_H = B_1^{\lambda_f} - 1 \quad (9)$$

Logo o esforço total pode ser obtido pela soma dos esforços:

$$\sigma_T = \sigma_n + \sigma_H \quad (10)$$

King (1991) estimou os coeficientes usando regressão não linear na Equação 10 para obter:

$$\sigma_T = 0,773 + (5,669^{\lambda_f} - 1) \quad (11)$$

Neste caso, o material PET 0,645 IV com 34 filamentos teve uma constante de 5,669 para o esforço de aumento de tensão.

Das equações (5) e (7), pode-se escrever a estiragem de ruptura como função somente do fator de estiragem, tal que:

$$\lambda_b = \frac{1,7}{0,7\lambda_f + 1} \quad (12)$$

Experimentos no artigo de King mostraram que as propriedades físicas do fio na texturização seguem os princípios de comportamento da estiragem a frio.

10. Estiragem para ruptura – transformação de alongamento de ruptura em estiragem suficiente para romper o fio, definido por (Equação 12).
11. Estiragem Natural – Define-se como sendo 60% da estiragem de ruptura.
12. Tenacidade Específica – é o produto da tenacidade do POY e sua estiragem de ruptura.

Existem no mercado dois grandes produtores de máquinas para texturização de falsa-torção. São eles: Barmag e TMT. Ao se discutir sobre parâmetros de máquina, este trabalho utilizará o produtor Barmag, por ser o fornecedor de maior inserção no mercado. Dos modelos existentes de máquinas de texturização, será utilizado um perfil tipo “V” com forno curto, modelo AFK.

Os parâmetros de especificação da máquina (colocados na máquina via receita ou mudança mecânica) geralmente mais importantes serão discutidos no próximo item.

### 2.6.2 Dados do processo

1. Tipo Material Disco – Os tipos mais conhecidos e utilizados no mercado são: PU (poliuretano), Cerâmico tratado (marca mais conhecida Cerasoft), Cerâmico. Esta mudança é mecânica. Os fios têm que deslizar na superfície do disco, e o valor da fricção fio/superfície influencia o nível de torção desenvolvida no fio e o acréscimo de tensão no sistema. Esta dissertação não discutirá as influências dos diferentes tipos de disco no processo.
2. Velocidade de produção (m/min) – Velocidade periférica do segundo eixo da máquina (não se usa o último eixo como referência).
3. Taxa de Estiragem – diferença de velocidade periférica entre o primeiro eixo e o segundo; zona que também é chamada de zona de estiragem, e onde ocorre a texturização (estiragem, aquecimento e torção/distorção simultâneos).
4. D/Y – Abreviatura da razão da velocidade periférica de disco sobre a velocidade do fio (*speed of Disc/Yarn*). Esta proporção define a estabilidade da texturização aplicada ao fio. Na inserção de torção, os discos de fricção são capazes de inserir mais de uma torção por revolução do disco, o que resulta em uma alta taxa de inserção de torção para uma velocidade dos elementos de fricção relativamente baixa. Com os discos de fricção, é também possível minimizar o aumento da tensão no caminho do fio (épura).
5. Sobre alimentação 2 (%) – após a zona de estiragem, existem outras zonas onde se relaxa o fio para estabilização. Neste caso, sobre alimentação 2, também denominado como zona de fixação, é a região na qual se estabelece a quantidade de fio dentro do forno de fixação.

6. Sobre alimentação 3 (%) – zona de entrelaçamento para se colocar “nós” com jato de ar (entrelaçadores), esta dissertação não discutirá as influências do entrelaçamento no processo.
7. Sobre alimentação 4 (%) – zona de enrolamento onde se define a dureza da bobina de fio final, medida em termos de densidade.
8. Temperatura do Forno curto (°C) – o forno de texturização tem duas fases (uma curta outra longa) que juntas formam o forno de texturização. O objetivo do forno como um todo é elevar a temperatura do fio de modo a propiciar uma estiragem longitudinal uniforme (orientação das macromoléculas, cristalização da cadeia) e com isso ter condições de texturização constantes para gerar propriedades no fio também constantes. Os fornos são elétricos de alta temperatura com insertos que alinham a passagem dos fios. Estes insertos podem ser retirados facilmente para limpeza quando necessário.
9. Temperatura do Forno Longo (°C) – complemento do item anterior.
10. Temperatura do Segundo Forno (°C) – Forno de Fixação onde ocorre a termo-fixação do fio determina o encolhimento do fio. Forno de fluído térmico normalmente Glicol (do inglês *downtherm*).

A partir dos parâmetros citados, podem ser calculados alguns indicadores que facilitam a parametrização do processo. Estes indicadores podem ser utilizados para se comparar fios de títulos diferentes ou até maquinários diferentes.

11. Título do fio liso – Ao se medir o título do fio em Denier, mede-se o mesmo na forma texturizada (fio com ondulações devido à crimpagem sofrida pela torção e distorção). Para cálculos mecânicos, busca-se uma forma mais uniforme como se houvesse somente a estiragem. Título do fio liso é, portanto, a Razão do Título da matéria prima POY pela estiragem.
12. Fator de estiragem – normaliza a estiragem utilizada no processo, sendo que 0 é a estiragem natural do fio em questão e 1, a estiragem de ruptura.

Alguns parâmetros importantes do processo de texturização estão relacionados com a Temperatura do fio. O estudo mais recente sobre aquecimento de filamentos em fornos curtos de alta temperatura foi realizado por Eskin (2003). O estudo foi sobre o modelo bidimensional instável por convecção-radiação. Algumas suposições foram admitidas baseadas em estudos

anteriores de comportamento do fio em fornos de alta temperatura e aquecimento por convecção e radiação:

- Dada que a quantidade de torção inserida no multifilamento é insuficiente de causar embaraço, o perfil do fio se aproxima de um cilindro infinitamente longo. Portanto, o fio pode ser assumido como um cilindro sólido.
- Qualquer ponto no perfil do fio pode ser localizado por coordenadas polares  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ . Enquanto o fio está dentro do forno, ele rotaciona a velocidades altas (até 500.000 rpm) devido à torção gerada pelo agregado. No forno, o fio é aquecido por convecção pelo ar das vizinhanças dentro do forno. Resultando destes fatores, o fio é aquecido uniformemente por toda a circunferência, de modo que a temperatura seja a mesma ao redor da circunferência em qualquer raio na secção transversal do fio. Então, a temperatura do fio é independente da coordenada  $\theta$ .
- A temperatura do forno não é constante ao longo do comprimento. A medição da temperatura em pontos diferentes ao longo do forno mostrou que o perfil da temperatura era parabólico, com pico no centro do forno. Entretanto, a temperatura da superfície do forno usada neste estudo foi assumida como parabólica.

Partindo-se das suposições apresentadas, a equação diferencial da temperatura do fio é dada por:

$$k \frac{l}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho C V_{\text{tex}} \frac{\partial T}{\partial z} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

Onde:  $k$ , condutividade térmica [W/m K],  $l$ , comprimento do forno [m],  $r$ , raio do fio [m],  $T$ , temperatura do forno [°C],  $z$ , posição do fio [m],  $\rho$ , densidade do polímero [kg/m<sup>3</sup>],  $C$ , calor específico [J/kg K],  $V_{\text{tex}}$ , Velocidade de texturização,  $t$ , tempo [s].

Definindo-se as superfícies de contorno, a especificação da temperatura do fio na entrada como temperatura ambiente serve como uma condição inicial, logo:

$$T(r,z,t)=T_0 \text{ em } t=0$$

E as condições de contorno como,

$$\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r=0 \quad (14)$$

$$k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} = h(T_a - T(r, z, t)) + q \quad \text{em } r=r_0 \quad (15)$$

Sendo  $T_a$  = temperatura ar ambiente e  $q$  = fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (radiação térmica da parede do forno). Assim, tem-se que:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z=0 \text{ e } z=1 \quad (16)$$

O método para a radiação total para área fechada foi usado para calcular a fluxo de calor radioativo para cada superfície, tal que:

$$\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\delta_{kj}}{\varepsilon_j} - F_{k-j} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right] q_j = \sum_{j=1}^N F_{k-j} \sigma (T_k^4 - T_j^4) \quad (17)$$

Onde  $\sigma$  = constante Stefan-Boltzman [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ],  $\varepsilon$  = emissividade,  $F_{1 \rightarrow 2}$  = fator de visão.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi S_{1 \rightarrow 2}^2} dA_2 dA_1 \quad (18)$$

Onde  $\phi$  = ângulo de visão,  $A$  = área [ $\text{m}^2$ ].

Da literatura, Eskin (1983) ainda retirou os fatores de visão do anel elemento do fio e o elemento anular do forno. As quantidades adimensionais da equação diferencial inicial podem ser definidas por:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \beta^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \gamma^2} - \varphi \frac{\partial \theta}{\partial \gamma} = \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \quad \xi > 0, 0 < \eta < 1, 0 < \gamma < 1 \quad (19)$$

Sujeito às seguintes condições de contorno:

$$\theta = \theta_0 \quad \text{em } \zeta = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0 \quad \text{em } \eta = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = Bi(\theta_a - \theta) + \mathcal{G} \quad \text{em } \eta = 1 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \gamma} = 0 \quad \text{em } \gamma = 0 \text{ e } \gamma = 1 \quad (23)$$

Onde as quantidades adimensionais são definidas por:

$$\theta(\eta, \gamma, \xi) = T/T_r; \eta = r/r_0; \gamma = z/L \quad (24)$$

$$Bi = hr_0/k; \mathcal{G} = qr_0Tr/k; \beta = r_0/L \quad (25)$$

$$\xi = t\alpha / r_0^2; \theta_a = Ta/Tr; \varphi = \frac{V_{tex} r_0^2}{\alpha L} \quad (26)$$

Aqui,  $\alpha$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ ),  $T_r$  é a temperatura de referência,  $\theta_0$  é a temperatura adimensional inicial e  $Bi$  é o número de Biot. A emissividade do forno é dada 0,75, e a emissividade do fio é dada 0,70.

A convecção natural dentro do forno se dá em regime laminar. Baseado na máxima diferença de temperatura e na característica de comprimento igual à altura do forno, o número de Rayleigh é  $2,35 \times 10^6$ , que é abaixo do valor crítico. Para o cálculo do diâmetro do fio, utiliza-se o raio do fio  $r_0$ , que pode ser calculado usando-se a densidade linear do fio  $D_1$  (dtex).  $D_1$  por sua vez, pode ser calculada em termos da tensão na zona de torção,  $w$  e torção inserida  $N$  como se segue:

$$D_1 = D_0 \left[ 1 + \{0,9D_0 - 2(w-5)\} \frac{29N^2 10^{-5}}{2(60-w)} \right] \quad (27)$$

Onde  $D_0$  é a densidade linear (dtex) na zona de torção para torção zero.

$$D_0 = 1,17D_n \left( 1 - \frac{w}{208} \right) - 3,75 \quad (28)$$

Na equação 29,  $D_n$  é a densidade nominal linear (dtex) do fio fornecido. Dados experimentais mostraram que densidade linear ( $D$ ), na saída do rolete depende somente da densidade linear,  $D_n$  e da tensão da zona de torção,  $w$ . Assim, pode-se escrever:

$$D = 0,93D_0 + 2,0 = 1,0881D_n \left( 1 - \frac{w}{208} \right) - 1,2085 \quad (29)$$

Então, o raio pode ser calculado pela definição da densidade linear, tal que:

$$D_1 = \pi r_0^2 \cdot 10^6 [cm] \cdot \rho \quad (30)$$

ou,

$$r_0 = 10^{-3} \sqrt{\frac{D_1 (dtex)}{\pi \rho}} \quad (31)$$

onde  $\rho$  e  $r_0$  são a densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) e o raio (cm) do fio, respectivamente.

Devido à texturização por falsa torção, a construção de torção causa um decréscimo na velocidade do fio na zona de torção. Desse modo, a velocidade requerida para cálculo do tempo de aquecimento não pode ser obtida pela medida da velocidade dos roletes, que é a velocidade do fio sem torção. Além disto, a torção por polegada real do fio na zona de aquecimento não é conhecida devido à distribuição das torções do ponto de torção (fuso) em direção a zona de aquecimento. Se o produto da velocidade e densidade linear do fio é  $D_1 V_{\text{tex}}$  na zona de velocidade e  $DV$  na saída do rolete, desde que em equilíbrio, o fluxo de massa através do sistema é constante:

$$D_1 V_{\text{tex}} = DV \quad (32)$$

Se  $L$  é o comprimento do aquecimento na zona de torção, então o tempo de aquecimento é dado por:

$$t^* = L / V_{\text{tex}} = L D_1 / DV \quad (33)$$

Desde que a velocidade de produção pode ser obtida pela velocidade do rolete de saída, a velocidade de texturização do fio dentro do forno e o tempo de residência podem ser obtidos em termos da densidade linear, tanto na zona de torção quanto na saída do rolete.

Hearle, Grosberg & Backer (1970) mostraram que, fios de poliéster altamente torcidos com uma multiplicação de torção maior que 70, têm um fator de empacotamento da ordem de 0,75.

O coeficiente de condutividade térmica do fio foi calculado da seguinte equação:

$$k_{\text{fio}} = k_a \left[ 1 + \frac{\Phi}{\frac{(1-\Phi)}{4} + \frac{k_a}{(k_f - k_a)}} \right] \quad (34)$$

onde  $\Phi$  é o fator de empacotamento.

Os valores de condutividade térmica do poliéster é  $k_f=0,1406$  [j/mK],  $T_g = 45$  °C,  $T_m = 215$  °C, Densidade [ $\text{kg/m}^3$ ] 1030 e calor específico  $C$  [J/kgK] 1883.

A teoria descrita até aqui provê informações suficientes para os cálculos da temperatura do fio dentro e na saída do forno.

13. Temperatura do fio final zona 1(°C) – como foi descrito anteriormente, o forno de texturização tem duas zonas e ao passar pelas mesmas considerando-se o título do fio, a velocidade da máquina, as características do forno e do poliéster, pode-se estimar a temperatura do fio no final da mesma (considera-se ambiente climatizado em 25°C). O comprimento desta zona é de 0,3 [m].
14. Temperatura do fio final zona 1 e 2 (°C) – da mesma maneira que o item (13), porém, este forno possui comprimento de 0,7 [m].
15. Densidade da Fibra (g/cm<sup>3</sup>) – Ajuste da densidade em função da densidade linear do POY (Título Denier). O cálculo da densidade pode ser feito pelo método de imersão da amostra em coluna, para medir o empacotamento molecular.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (35)$$

16. Percentual de cristalinidade – considerando-se densidade da fibra limites normais de trabalho entre 1,336 g/cm<sup>3</sup> a 1,455 g/cm<sup>3</sup>, pode-se determinar o percentual de cristalinidade baseado na densidade da fibra calculado anteriormente. Dada a densidade cristalina  $\rho_c$ , definida como a máxima densidade do polímero, obtida do peso e volume molecular da célula de unidade cristalina; e densidade amorfa  $\rho_a$ , obtida pela medida de densidade de uma amostra totalmente amorfa. O grau de cristalinidade (v/v)  $\alpha$  é definido como:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} * 100[\%] \quad (36)$$

Onde:  $\rho$  = densidade medida [g/cm<sup>3</sup>],  $\rho_a \approx$  densidade amorfa, PET = 1,3310[g/cm<sup>3</sup>],  $\rho_c$  = densidade cristalina, PET= 1,4550 [g/cm<sup>3</sup>].

17. Temperatura do fio antes do agregado (°C) – observando-se o T<sub>g</sub> do poliéster deve-se controlar para que o fio entre no agregado resfriado (abaixo do T<sub>g</sub>). Este valor estimado se dá em função da velocidade de produção, temperatura do fio e título do fio liso (considera as características da AFK)

Thwaites (1985) apresentou um modelo simplificado e derivado das equações a seguir para razão de tensão do fio e geração de torque. Razão de tensão do fio é dado em termo

de ângulo de contato,  $\Delta\theta$ , e o coeficiente de fricção,  $\mu$ , por uma equação modificada de Capstan, tal que;

$$\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} = \mu \cdot \Delta\theta \cdot \text{Cos} \psi \cdot \text{Sen} \gamma \quad (37)$$

Onde  $\psi$  e  $\gamma$  são complementos do ângulo de ataque e o ângulo obtido pela força friccional com o fio, respectivamente.

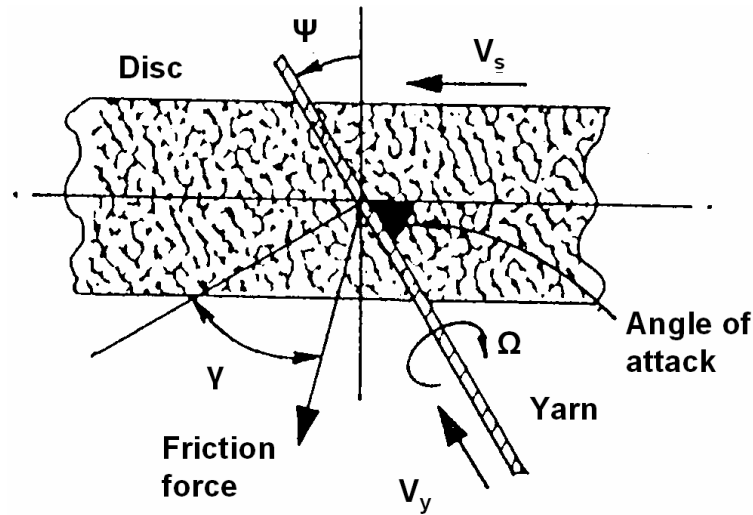


Figura 17 – Ângulo de ataque e ângulo da força friccional com o fio

O torque gerado pelo fuso é dado em termos da diferença de tensão por:

$$\Delta Q = (T_{out} - T_{in}) \cdot R \cdot \text{Cotg} \gamma \quad (38)$$

Onde  $R$  é o raio do fio. Finalmente, o ângulo a cada ação de fricção é dado em termos da velocidade axial do fio,  $V_y$ , e velocidade angular,  $\Omega$ , por:

$$\tan \gamma = \frac{V_y - V_s \cdot \text{Sen} \psi}{V_s \cdot \text{Cos} \psi - \Omega \cdot R} \quad (39)$$

O modelo simplificado, deste modo, se mostra dependente da constância sobre as variáveis  $\mu$ ,  $R$ , e  $\psi$  e as razões  $\Omega/V_y$  e  $V_s/V_y$ .

Para análise de entre torção e ângulo hélice usou-se a seguinte simbologia:

- $\theta$  = ângulo hélice na superfície do fio estirado e torcido
- $N$  = número de torções por unidade de medida do fio estirado
- $r_0$  = raio equivalente do fio liso considerando-se 100% empacotamento dos

filamentos ( $\pi r_0$  x densidade polímero = densidade linear do fio liso x  $10^{-6}$ )

- $Y_c$  = razão de contração do fio, isto é, comprimento do fio liso/comprimento do fio torcido
- $T_e$  = Taxa de Estiragem
- $U$  = densidade linear do fio liso não estirado, POY (dtex)
- $T$  = densidade linear do fio liso estirado (dtex)
- $D$  = velocidade da superfície do disco de fricção
- $Y$  = Velocidade de produção do fio liso
- $\rho$  = densidade do polímero

Podem-se relacionar estes parâmetros com duas equações; a primeira, da geometria do fio, pode ser escrita como:

$$2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot N \cdot Y_c^{\frac{3}{2}} = \tan \theta \quad (40)$$

A segunda, de acordo com Hearle e Morton (1957), é dada por:

$$Y_c = \frac{1}{2} \cdot (1 + \sec \theta) \quad (41)$$

Destas equações, uma terceira pode ser derivada para relacionar a torção e o ângulo hélice de superfície.

$$N = \frac{2(\sec \theta - 1)}{\pi \cdot r_0 (1 + \sec \theta)} \quad (42)$$

18. Tensão do fio liso (g) – é estimada a partir do índice de orientação do POY, título do fio liso, *helix angle* (em português ângulo de torção. Examinando-se o fio após torcido pode-se definir um ângulo de torção que determina o número de torções que o fio recebeu no agregado por unidade de comprimento).
19. Tensão do fio texturizado T1 (g) – acrescenta ao estimador anterior, fatores que influenciam a texturização como DY, temperatura do fio e torções por unidade de comprimento. Esta tensão antes do agregado é fator determinante da velocidade máxima que determinado fio irá possuir considerando situações ideais de texturização.
20. T<sub>1</sub> Stress (g/Den) – com objetivo de se conceber uma maneira de se comparar as tensões idéias entre diversos fios, definiu-se o stress, que é a razão da tensão do fio texturizado

pelo título do fio liso. Posteriormente, observou-se que existem faixas de trabalho indicadas para cada tipo de máquina (perfil) e características de fio específicas.

21. Tensão do fio texturizado  $T_2$  (g) – O fio ao passar pelo agregado ocorre que, acima do mesmo está sofrendo torção do fio e ao passar completamente pelo agregado o fio distorce. Portanto, a tensão antes e após indicam o grau de recuperação do estado original do fio (este processo é a texturização em si). Define-se a tensão após o agregado em função do tipo de polímero, tipo de disco, título, filamentos e tensão de entrada.
22.  $T_2/T_1$  *Tension Ratio* – Razão de  $T_2$  e  $T_1$ . Ajustando-se o ângulo de contato entre o fio e a superfície do disco, a razão  $T_2/T_1$  pode ser feita igual a ou menor que 1. Greenwood (1977) discute extensivamente a lei de Amonton,

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\mu\alpha} \quad (43)$$

23. Unitens %CV – é definido em função de stress (tensão por unidade de título), seção transversal do filamento, DY, tipo de disco, velocidade de produção, temperatura do fio.
24. Velocidade de instabilidade (m/min) – cálculo da velocidade onde ocorrerá a instabilidade de processo em função de índice de orientação, estiragem e temperatura do fio.
25. Velocidade segura de Operação (m/min) – 80% da velocidade de instabilidade. Na verdade, a diferença entre a velocidade de instabilidade e a velocidade de operação é o fator de segurança adotado para o processo.
26. Torção (T/m) – torção por unidade de comprimento, definido por Título do fio liso, geometria do disco (AFK) e densidade da fibra.
27. Temperatura Fio 2º Forno (°C) – mesma idéia usada no cálculo do primeiro forno, agora para o segundo forno. A temperatura do fio na saída deste forno ajudará estimar o encolhimento final do fio, estimado em função do título, filamentos, temperatura do forno e sobre-alimentação.

As máquinas de texturização produzem simultaneamente vários fios, algumas com 108, 216 ou até 240 posições, que produzem fio ao mesmo tempo. Um grande desafio é fazer com que todos estes fios estejam sendo produzidos exatamente da mesma forma e com a mesma qualidade. Para possibilitar este processo, intensivos programas de manutenção preditiva, preventiva e corretiva são aplicados, bem como controles de processos, a fim de se minimizar controles no produto acabado. Os controles de processos se valem de medições *on-*

*line* tais como: medições de tensões, temperaturas, controles visuais, velocidades, etc. Utiliza-se o laboratório têxtil para determinar os índices serimétricos do fio, descritos no próximo item.

### 2.6.3 Dados qualitativos

1. Lote – Define parâmetros de máquina e conseqüentemente identifica produtos.
2. Cabos – os fios com título e número de filamentos podem ser unidos em mais de um cabo.
3. Título Denier do fio texturizado – estimado em função de sobre-alimentação total, título do fio liso, sobre-alimentação no enrolamento, número de cabos. Denier é uma medida de densidade linear em gramas por 9000 m de fios.
4. Denier por Filamento – Razão do título estimado acima pelo número de filamentos.
5. Alongamento de texturização (%) – alongamento estimado.
6. Tenacidade do Texturizado (g/Den) – tenacidade estimada.
7. Encolhimento Leeson (%) – encolhimento em água a fervura, o procedimento é similar ao descrito para o encolhimento a seco, porém o meio aonde se deixa a meada por 10 minutos é a água a fervura.
8. Encolhimento à Seco (%) – encolhimento em ar quente. O fio, em meada de 2500 dtex tensionado a 1 cN/tex, é pré-tensionado por um peso (0,01cN/tex e 0,99 cN/tex) de frente a uma régua na posição vertical, o  $L_1$  (comprimento sob força  $F_1$ ) é medido, e após repouso de 10 min na estufa a 120 °C o  $L_2$  (comprimento sob força  $F_2$ ,  $F_1 > F_2$ ) é medido, e logo após  $L_3$  (comprimento após retirar  $F_2$ ).

$$E = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \bullet 100[\%] \quad (44)$$

$$K = \frac{L_1 - L_3}{L_1 - L_2} \bullet 100[\%] \quad (45)$$

$$B = \frac{L_1 - L_3}{L_1 - L_2} \bullet 100[\%] \quad (46)$$

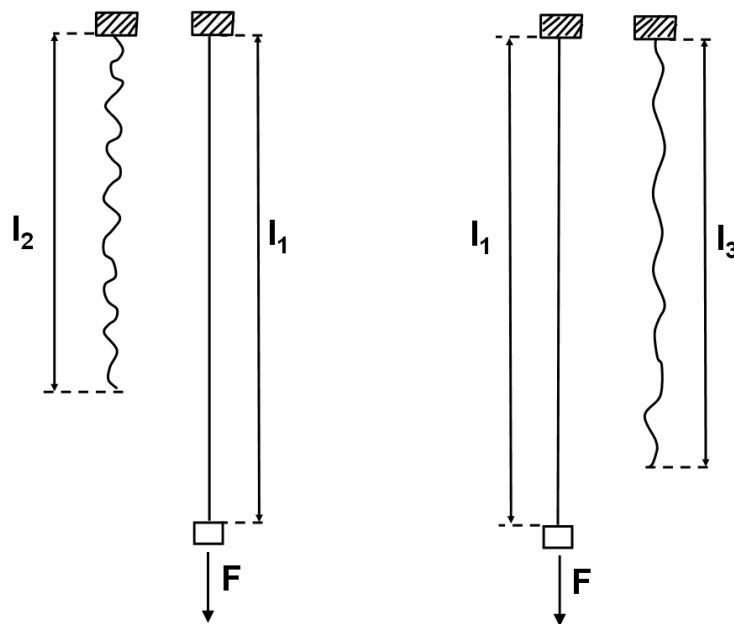


Figura 18 – Encolhimento

Tingimento é uma parte do controle de processo muito importante porque coloca à prova muitas das etapas em que o fio passou, mostrando o fio quase como o cliente irá ver.



Figura 19 – Área de meias e máquina.

Este processo consiste na confecção de meias onde cada bobina de fio é tecida por alguns metros subseqüentemente, de maneira que toda a máquina seja tinta no mesmo banho para se fazer a leitura das bandas onde se separam algumas posições que, eventualmente,

estejam se destacando, uma vez que deseja que todas as posições se comportem de maneira similar. As leituras são feitas em cabines padronizadas e com luz também padrão. Muitas empresas utilizam-se do método da escala cinza (AATCC) para graduar as posições entre elas, a escala cinza varia de 1 a 5 sendo o nível cinco onde não se percebe qualquer diferença de tonalidade de cor entre as posições.

9. Absorção relativa cor %K/S – estimado em função do título, temperatura do fio e stress. O pigmento do corante é absorvido nas regiões amorfas da fibra, por isso existem pigmentos com maior e menor tamanho de molécula. Como indicador de absorção de cor, a razão K/S pode ser calculada como:

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (47)$$

Onde: R é o grau de refletância.

10. Quebras – rupturas no fio que ocorrem no decorrer da produção do mesmo, importante indicador de qualidade de matéria prima e de regulação de processo (se os valores forem estimados serão informações extremamente úteis para cálculo de produtividade). Estas quebras podem ser medidas por unidades ocorridas no turno de produção, por unidade de massa produzida do produto, ou ainda algumas empresas definem o inverso quantas unidades de massa se produzem até que ocorra uma quebra.

### 3 Modelagem estatística

Nesta dissertação, três métodos de regressão serão estudados e comparados com o intuito de se obter modelos razoáveis para o processo de texturização por falsa torção:

- (a) Método de “Regressão linear múltipla” (MLR, do inglês *Multiple Linear Regression*), utilizando-se algoritmo de mínimos quadrados ordinários (OLS);
- (b) Método de “Regressão por Componentes Principais” (PCR) e algoritmo OLS e,
- (c) Método de regressão por “Mínimos Quadrados Parciais” (PLS), utilizando o algoritmo NIPALS.

Este três métodos podem ser implementados a partir da maioria dos pacotes estatísticos. Não serão discutidos outros algoritmos além do OLS e do NIPALS, em função de sua indisponibilidade nos pacotes estatísticos tradicionais, especificamente, o Minitab 15, utilizado nesta pesquisa. Depois de comparadas, as equações de regressão com os melhores ajustes e os menores erros serão utilizadas como funções-objetivo em um problema de otimização com múltiplas respostas, como será discutido no capítulo 5. O critério de escolha do melhor método para a modelagem dos dados do processo de texturização por falsa torção, será baseado na ordem de grandeza do coeficiente de ajuste ( $R^2$  aj.) e do erro padrão da previsão (PSE) para um conjunto de dados de teste de tamanho  $n=51$ .

A seguir, apresenta-se uma breve revisão dos três métodos que serão empregados neste trabalho.

#### 3.1 Regressão linear múltipla

O método dos mínimos quadrados ordinários (OLS) (do inglês *Ordinary Least Squares*) é o algoritmo tipicamente usado para estimar os coeficientes de um modelo de regressão simples e múltipla, linear ou não-linear, arranjos fatoriais completos, fracionados ou superfícies de resposta.

Sejam consideradas as  $n > k$  observações da variável de resposta disponíveis, assim como  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Assumindo-se que valor esperado do erro seja zero, pode-se escrever que:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (48)$$

O método dos mínimos quadrados baseia-se na escolha de valores para  $\beta$  na equação (49), de modo que a soma dos quadrados dos erros seja minimizada. A função de mínimos quadrados pode ser escrita como (MONTGOMERY, 2001):

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (49)$$

A função  $L$  deve ser minimizada em função de  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . Assim, tem-se que:

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} = \frac{\partial L}{\partial \beta_j} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right) = 0 \quad (50)$$

Simplificando-se e generalizando-se a equação (50), obtém-se:

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} x_{ik} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ik} y_i \quad (51)$$

Estas equações são chamadas de Equações normais de mínimos quadrados (MONTGOMERY, 2006). Nota-se que existem  $p = k+1$  equações, uma para cada coeficiente de regressão desconhecido.

Em notação matricial, o sistema de equações (51) pode ser escrito como:

$$\mathbf{Y} = \beta \mathbf{X} + \varepsilon \quad (52)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \quad (53)$$

É possível notar que  $L$  pode ser expresso como:

$$L = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \beta^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \beta + \beta^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \beta = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\beta^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \beta^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \beta \quad (54)$$

Como os estimadores de mínimo quadrado devem satisfazer a:

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\beta} = 0 \quad (55)$$

Uma simplificação da eq. (55) conduz a:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (56)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação (56) pela inversa da matriz  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ , tem-se:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (57)$$

A equação (57) é a expressão matricial das equações normais de mínimos quadrados, descritos anteriormente (MONTGOMERY, 2006)

Modelos de regressão linear múltipla são frequentemente utilizados como aproximações de funções. Isto é, como a verdadeira relação funcional entre  $x$  e  $y$  não é conhecida, aproxima-se tal relacionamento por um modelo de regressão, que é relativamente adequado dentro de certa faixa de variação das variáveis independentes.

Como se sabe,  $\hat{y}_i$  representa um valor ajustado, obtido a partir do modelo de regressão. A diferença entre o valor real observado  $y_i$  e  $\hat{y}_i$ , denomina-se resíduo, e pode ser representado por:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (58)$$

Considerando-se a soma de quadrados para os resíduos, pode-se escrever:

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (59)$$

Substituindo-se  $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}$ , chega-se a:

$$SS_E = (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}) = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} + \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (60)$$

$$SS_E = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (61)$$

Como:  $\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y}$ , a equação (61) se torna:

$$SS_E = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (62)$$

A equação (62) é chamada soma de quadrados residual.

Derivando-se uma forma matricial para a soma de quadrados total, vem que:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (63)$$

Para a soma de quadrados do modelo, tem-se que:

$$SS_m = SS_T - SS_e = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 - (\mathbf{y}^T \mathbf{y} - \hat{\boldsymbol{\beta}} \mathbf{X}^T \mathbf{y}) = \hat{\boldsymbol{\beta}} \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 \quad (64)$$

O teste para a significância da regressão determina se existe uma relação linear entre a variável de resposta  $y$  e um subconjunto de regressores. As hipóteses apropriadas neste caso são:

$$\begin{aligned} H_0 &= \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 &= \beta_j \neq 0 \end{aligned} \quad (65)$$

A rejeição da hipótese nula implica que no mínimo um dos regressores contribui significativamente para a explicação da variação de  $Y$ . Uma vez que raramente um modelo explica 100% da variação da resposta modelada, é provável que exista uma diferença entre o valor observado e o valor modelado. Se a hipótese nula, descrita na equação (65) for verdadeira, então  $SQ_R/\sigma^2$  será uma variável aleatória  $\chi^2$ , com  $k$  graus de liberdade. O número de graus de liberdade para esta variável é igual ao número de regressores presentes no modelo. Por sua vez,  $SQ_E/\sigma^2$  segue o mesmo condicionamento, com  $n-p$  graus de liberdade. As duas expressões anteriores são independentes. Logo, dividindo-se as duas variações encontra-se uma distribuição F. Portanto, a estatística de teste para a significância do modelo pode ser descrita por:

$$F_0 = \frac{SQ_M/k}{SQ_E/(n-p)} = \frac{MQ_M}{MQ_E} \quad (66)$$

Deve-se rejeitar a hipótese nula se o valor calculado na equação (66) for maior do que o valor de  $F_{(\alpha, k, n-p)}$ .

As hipóteses para testar a significância de qualquer coeficiente de regressão são:

$$\begin{aligned}
H_0 : \beta_j &= 0 \\
H_1 : \text{Pelo menos um } \beta_j &\neq 0
\end{aligned}
\tag{67}$$

Se a hipótese nula não for rejeitada, então o coeficiente poderá ser retirado do modelo. A estatística de teste utilizada para esta finalidade é da pela equação (68):

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 \cdot C_{jj}}} \tag{68}$$

Na equação (68)  $C_{jj}$  é o j-ésimo elemento da diagonal de  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  correspondente a  $\hat{\beta}_j$ . Observa-se que o denominador da equação (68) é o erro-padrão do coeficiente  $\hat{\beta}_j$ . Deve-se rejeitar a hipótese nula se  $T_0 > t_{(\alpha/2, n-p)}$ .

Um intervalo de confiança para os coeficientes de regressão é dado por:

$$P(\hat{\beta}_j - t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \leq \beta_j \leq \hat{\beta}_j + t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}) = 1 - \alpha \tag{69}$$

Do mesmo modo, pode-se também construir um intervalo de confiança para a resposta média de um determinado ponto como  $x_0 = [1 \quad x_{01} \quad x_{02} \quad \dots \quad x_{0k}]^T$ . A resposta média neste ponto é estimada por  $\hat{\mu}_{Y|x_0} = x^T \hat{\beta}$ , com variância dada pela equação 70:

$$V(\hat{\mu}_{Y|x_0}) = \sigma^2 x_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} x_0 \tag{70}$$

Logo, um intervalo de confiança a  $100(1-\alpha)\%$  da média é dado por:

$$P\left(\hat{\mu}_{Y|x_0} - t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\sigma^2 x_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} x_0} \leq \mu_{Y|x_0} \leq \hat{\mu}_{Y|x_0} + t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\sigma^2 x_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} x_0}\right) = 1 - \alpha \tag{71}$$

A medida mais comum de adequação de um modelo é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Este termo representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  adj.), que considera o

fato de que  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Também é fato que a inclusão de muitos termos no modelo de regressão aumenta substancialmente o valor de  $R^2$ . Se o modelo recebeu fatores adicionais desnecessários, haverá um incremento em  $R^2$ , sem haver, necessariamente, melhoria de informação na resposta. É por este motivo que o valor de  $R^2$  ajustado é mais apropriado para se comparar modelos com diferentes quantidades de termos.

O valor de  $R^2$  pode ser calculado aplicando-se a equação (72), tal que:

$$R^2 = \frac{SQ_M}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (72)$$

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado) é uma modificação que considera o número  $p$  de variáveis incluídas no modelo. Observando-se a equação (73), nota-se que o valor ajustado decresce à medida que  $p$  aumenta.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (73)$$

Os resíduos de um modelo de regressão desenvolvem um importante papel no julgamento da sua adequação. Considerando-se alguns aspectos peculiares, o conjunto de resíduos deve ter distribuição normal com média zero e variância  $\sigma^2$ , devem ser não correlacionados com outros resíduos, com a média dos tratamentos, com as variáveis preditoras e ao longo do tempo. Devem ter padrão aleatório, não tendencioso e devem preferencialmente assumir a forma padronizada segundo a equação (74).

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{MQ_E}} = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} \quad (74)$$

A padronização dos resíduos cria um escalonamento para o desvio-padrão, o que torna sua interpretação mais fácil.

Para quantificar a presença de multicolinearidade na regressão linear será usado o fator de inflação da variância (do inglês, *variation inflation factor*), o cálculo é feito para cada preditor e valores acima de 5 geralmente são indesejáveis, valores iguais a 1 indicam ausência de correlação entre os preditores.

### 3.2 Regressão por componentes principais

A Regressão por Componentes Principais (do inglês: *principal components regression*, PCR) consiste na aplicação do método de mínimos quadrados ordinários utilizando como variáveis independentes, os escores dos componentes principais da matriz de preditoras  $\mathbf{X}$  (AGUILERA et al., 2006; LIU et al., 2003). De acordo com Sun (1996), a principal vantagem desse método é que a substituição das variáveis originais pelos componentes principais atenua (ou até mesmo, elimina) os efeitos da multicolinearidade, provocada pela utilização de variáveis preditoras correlacionadas; a principal desvantagem é que a interpretação pode ser dificultada pelo fato de não se usar as variáveis originais e as componentes principais são afetadas pelo escalonamento das variáveis.

A quantidade de escores de componentes principais que devem ser utilizados neste tipo de regressão depende da estrutura de variância-covariância (ou correlação) apresentada pelos dados da matriz de preditoras  $X$ . O método de extração destes componentes se dá a partir da Análise de Componentes Principais.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada que se dedica à explicação da estrutura de variância-covariância existente em um conjunto de dados, utilizando-se combinações lineares das variáveis originais. Segundo Johnson e Wichern (2002) e Rencher (2002), seus objetivos principais são: (1) a redução de dimensionalidade e (2), a interpretação de dados. Embora  $p$  componentes sejam necessários para se reproduzir a variabilidade total de um sistema de interesse, geralmente, a maior parte desta variabilidade pode ser representada por um pequeno número  $k$  de componentes principais. Isto quer dizer que existe quase tanta informação em  $k$  componentes principais que nas  $p$  variáveis originais. A idéia geral da ACP é, portanto, que  $k$  componentes principais podem substituir, sem perda considerável de informação, as  $p$  variáveis originais. O conjunto original de dados, consistindo de  $n$  medições das  $p$  variáveis, é reduzido para um conjunto posterior formado por  $n$  medições de  $k$  componentes principais.

De acordo com Rencher (2002), a ACP geralmente revela relacionamentos que não seriam identificados no conjunto original, o que resulta em uma interpretação mais abrangente do fenômeno de interesse. Segundo Johnson e Wichern (2002), o  $i$ -ésimo componente principal poderá ser escrito matematicamente como uma combinação linear  $\ell_i^T X$  que for solução da expressão (78) a seguir:

$$\begin{aligned}
& \text{Maximizar } \text{Var}(\ell_i^T \mathbf{X}) \\
& \text{Sujeito a: } \ell_i^T \ell_i = 1 \\
& \text{Cov}(\ell_i^T \mathbf{X}, \ell_k^T \mathbf{X}) = 0 \quad \text{para } k < i
\end{aligned} \tag{75}$$

Por vezes é útil escrever as combinações lineares na forma de escores dos componentes principais. Em muitas aplicações, a matriz de variáveis padronizadas está representada pelas  $p$  colunas das características estudadas, em cada uma das suas  $n$  observações. Assim, na prática é mais comumente empregada a matriz transposta de  $\mathbf{Z}$  (**vide explicação de  $\mathbf{Z}$  a seguir**).

Para se encontrar uma expressão adequada a esta realidade que represente a mesma informação que  $Y_i = \mathbf{A}_i^T \mathbf{Z}$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ , utilizam-se os escores de componentes principais ( $PC_k$ ), que podem ser representados como:

$$PC_k = \mathbf{Z}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left( \frac{x_{11} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{21} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{p1} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \\ \left( \frac{x_{12} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{22} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{p2} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{x_{1n} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{2n} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{pn} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1p} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{1p} & A_{2p} & \dots & A_{pp} \end{bmatrix} \tag{76}$$

Onde:  $\mathbf{Z}$  é a matriz das variáveis originais padronizadas e,  $\mathbf{A}$ , é a matriz de autovetores resultantes da decomposição espectral da matriz de variância-covariância (ou correlação) dos dados originais.

Para se identificar o número de componentes principais adequados para representar um conjunto original, existem vários critérios. Segundo Jonhson e Wichern (2002), o mais conhecido é o critério de Kaiser, que estabelece como número adequado de componentes todos aqueles com autovalores maiores que a unidade. Entretanto, devido à variação ocorrida na amostragem, aproximadamente metade dos autovalores excederão à unidade. Segundo Jonhson e Wichern (2002), para se escolher os componentes principais que representem satisfatoriamente um conjunto de dados, considera-se adicionalmente para análise, todos os componentes com explicação conjunta (e acumulada) maior que 80%. Quando se observa que um número reduzido de componentes (geralmente menor do que o número de variáveis)

atende a esses dois critérios, identifica-se a presença de redundância no conjunto e, conseqüentemente, a possível redução de dimensionalidade.

Uma vez determinados e armazenados o número de componentes principais e seus escores, o método OLS tradicional pode ser, então, aplicado.

### **3.3 Mínimos quadrados parciais ou estrutura latente projetada**

O método de “Mínimos Quadrados Parciais” (em inglês: *partial least squares*, PLS) é um método de regressão para uma ou múltiplas variáveis dependentes, extremamente útil quando as preditoras utilizadas são altamente correlacionadas ou, quando existem mais preditoras do que observações, situação na qual o método OLS geralmente falha, produzindo coeficientes com erros padrões muito grandes (YACOUB e MacGREGOR, 2004; WENTZELL e VEGA, 2003; HELLAND, 1988; HOSKULDSSON, 1988; WOLD et al., 1984). De maneira semelhante ao PCR, o método PLS reduz o número de preditoras a um conjunto de componentes principais. No caso multivariado, os resultados obtidos através do PLS podem diferir substancialmente daqueles obtidos por modelagem individual de cada resposta  $Y_i$ . Segundo Velleman e Welsh (1981), além da multicolinearidade, PLS é um método particularmente adequado para tratar dados tais como preditoras com um coeficiente de variação muito pequeno (o que sugere que a preditora é quase uma constante) ou o excesso de dados faltantes.

A maior diferença existente entre os métodos PLS e PCR é que, enquanto no PCR os componentes principais são determinados exclusivamente pelos valores dados das variáveis de entrada (X), no PLS, os valores dados tanto das variáveis X como Y, influenciam a construção dos componentes (WEBSTER et al., 1974)

Portanto, PLS é um método que procura formar componentes que capturam o máximo de informação das variáveis X e que seja útil para prever  $Y_i$ , enquanto reduz a dimensionalidade do problema de regressão pela utilização de um número menor de componentes que de variáveis originais. Este método é considerado especialmente útil para construir equações preditivas quando existem muitas variáveis explicativas e comparativamente poucos dados (HOSKULDSSON, 1988).

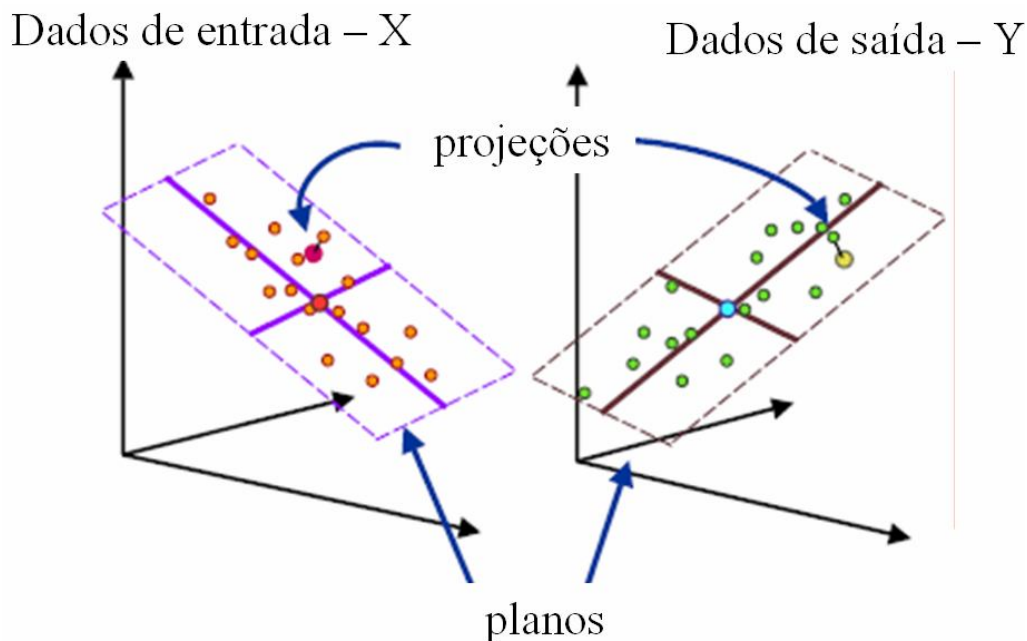


Figura 20 – Interpretação Geométrica do PLS.

### 3.4 Abordagem computacional

Como na Regressão Linear Múltipla, o propósito principal da Regressão por Mínimos Quadrados Parciais é construir um modelo  $Y=XB+E$ , onde  $Y$  é uma matriz de resposta do tipo  $n$  por  $m$  variáveis,  $X$  é uma matriz de variáveis preditoras do tipo  $n$  por  $p$ ,  $B$  é a matriz de coeficientes de regressão do tipo  $p$  por  $m$ , e  $E$  é um termo de ruído para o modelo cujas dimensões são idênticas a  $Y$ . Geralmente, as variáveis em  $X$  e  $Y$  são padronizadas.

Tanto o método PCR quanto o PLS, produzem escores de fatores como combinação linear das variáveis preditivas originais, de modo que não existam correlações entre os componentes usados no modelo de regressão preditivo, procedimento semelhante ao método de componentes principais. Por exemplo, suponha que exista um conjunto de dados com a variável resposta  $Y$  (na forma matricial), portanto um vetor, e um grande número de variáveis preditoras  $X$  (na forma matricial), algumas das quais altamente correlacionadas. A regressão usando um fator de extração computa o escore da matriz  $T=XW$  para uma matriz de peso apropriado  $W$ , e então considera o modelo de regressão  $Y=TQ+E$ , onde  $Q$  é uma matriz de coeficientes de regressão (peso) para  $T$ , e  $E$  é um termo de erro (ruído). Uma vez que os pesos

$Q$  são computados, o modelo de regressão descrito é equivalente a  $Y=XB+E$ , onde  $B=WQ$ , que pode ser usado como um modelo de regressão preditivo.

$$T=XW \quad (77)$$

Onde:  $T_{n \times c}$ ;  $X_{n \times p}$ ;  $W_{p \times c}$ ;

Regressão por componentes principais e regressão por mínimos quadrados parciais diferem nos métodos usados para extrair os fatores escores. De maneira sucinta, regressão por componentes principais produzem matriz peso  $W$  refletindo uma estrutura de covariância entre as variáveis preditivas, enquanto que regressão por mínimos quadrados parciais produzem uma matriz peso  $W$  refletindo uma estrutura de covariância entre as variáveis preditivas e de respostas.

Para estabelecer o modelo, o método de regressão por mínimos quadrados parciais produz a matriz de peso  $W_{p \times c}$  para  $X$  de maneira que  $T=XW$ , isto é, as colunas de  $W$  são vetores peso para a coluna  $X$  produzindo a matriz de escores  $T_{n \times c}$ . Estes pesos são computados de maneira que cada um deles maximiza a covariância entre as respostas e os fatores escores correspondentes. Procedimentos de mínimos quadrados ordinários de  $Y$  em  $T$  são, então executados, para produzir  $Q$ , as cargas para  $Y$  (ou pesos para  $Y$ ), tal que  $Y=TQ+E$ . Uma vez que  $Q$  é computado, obtém-se  $Y=XB+E$ , onde  $B=WQ$ , e o modelo de predição está completo.

$$Y=TQ+E \quad (78)$$

Onde:  $Y_{n \times m}$ ;  $T_{n \times c}$ ;  $Q_{c \times m}$ ;  $E_{n \times m}$ ,

$$Y=XB+E \quad (79)$$

$$B=WQ \quad (80)$$

Uma matriz adicional necessária para uma descrição do procedimento completo de regressão por mínimos quadrados parciais é a matriz de fator de carga  $P$ , do tipo  $p$  por  $c$ , que fornece um fator para o modelo  $X=TP+F$ . Neste caso,  $F$  é a parte inexplicável do escore  $X$ .

$$X=TP+F \quad (81)$$

Onde:  $\mathbf{X}_{n \times p}$ ;  $\mathbf{T}_{n \times c}$ ;  $\mathbf{P}_{c \times p}$

A maior parte dos softwares estatísticos emprega o algoritmo NIPALS (*Nonlinear Iterative Partial Least Squares*), apesar do processo de extração de componentes também poder ser executado a partir do processo de decomposição em valores singulares (do inglês: singular value decomposition, SVD). Basicamente, o algoritmo NIPALS produz modelos de regressão consecutivos, adicionando-se um componente principal a cada iteração. Os componentes são calculados uma primeira vez utilizando-se as matrizes padronizadas de X e Y. Em seguida, os componentes são calculados para a matriz de resíduos de X e Y. As iterações terminam quando se alcança o número máximo de componentes estabelecidos pelo usuário, ou quando os resíduos da matriz X se igualam a zero.

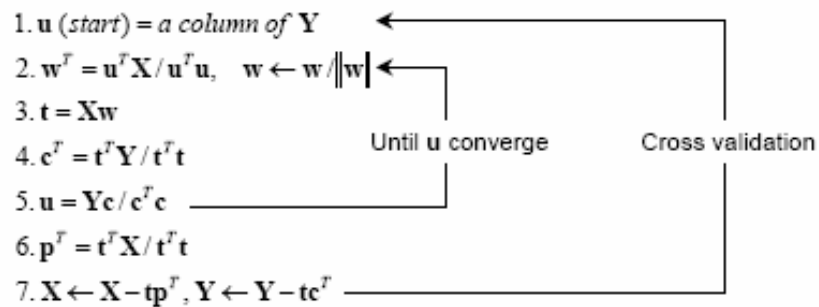


Figura 21 – Algoritmo extraído de Wold (2001).

Ressalte-se que quando o número de componentes adotados é igual ao número de preditoras, os coeficientes de regressão obtidos por OLS serão iguais àqueles calculados por PLS. Segundo Wold et al. (2001) e Geladi e Kowalski (1986), geralmente, um processo de validação cruzada, no qual uma observação ou um grupo de observações é separado do conjunto original, é utilizado para se identificar o número ótimo de componentes que devem ser utilizados. Este critério de otimização busca minimizar o erro de previsão, contrapondo-se  $R^2$  e  $R^2$  de previsão (PRESS), alguns pacotes estatísticos também adotam para o  $R^2$  de previsão a nomenclatura de  $Q^2$ .

## 4 Otimização baseada em algoritmos genéticos

O objetivo deste capítulo é discorrer sobre a utilização do método de otimização de Algoritmos Genéticos (GA), aplicado às funções  $Y_i$ , estabelecidas a partir dos métodos estatísticos de modelagem. O algoritmo genético foi escolhido por ser bem adequado a um sistema de otimização baseado em funções não-lineares. O objetivo principal da otimização de cada característica é o atendimento de sua especificação ou, seu alvo  $T_i$ . Desse modo, uma função-objetivo para um problema nominal, pode ser estabelecida como:

$$\text{Minimizar } Z_i = (\hat{Y}_i - T_i)^2 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (82)$$

Nota-se que, embora as funções de  $Y_i$  (obtidas por MLR, PLS ou PCR) sejam lineares, suas diferenças em relação aos respectivos alvos  $T_i$ , são não lineares (quadráticas).

Analogamente, desejando-se otimizar simultaneamente todas as características, pode-se utilizar uma média geométrica (KOKSOY, 2006; KOKSOY e YALCINOZ, 2006), tal que:

$$\text{Minimizar } Z_{Global} = \prod_{j=1}^r [(\hat{Y}_j - T_j)^2]^{1/p} \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (83)$$

Como no caso do processo de texturização existem muitas variáveis, algumas delas determinadas e/ou especificadas em função da matéria prima, outras qualitativas especificadas pelo cliente e ou processo, propõe-se o seguinte sistema de otimização, usando-se de limites inferiores e superiores de especificação (LIE e LSE, respectivamente):

$$\text{Minimizar } Z_{Global} = \prod_{j=1}^r [(\hat{Y}_j - T_j)^2]^{1/p} \quad (84)$$

$$\text{Sujeito a : } LIE_i \leq X_i \leq LSE_i \quad (85)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

O sistema das equações (84) e (85) anteriores estabelece um modelo geral de otimização para o processo de texturização, onde  $j$  e  $p$  são o número de variáveis que deseja-se otimizar ao mesmo tempo (normalmente 2 ou mais). Entretanto, de acordo com a revisão bibliográfica do capítulo 2, observa-se que algumas variáveis de decisão  $X_i$  dependem da natureza do produto e, conseqüentemente, da matéria-prima. Desse modo, dependendo do produto desejado pelo cliente, estabelecem-se os valores para  $x_i$  com  $i = 1, \dots, 4$ , de modo que estas variáveis se tornem constantes. Sendo  $T_i$  o valor nominal especificado de  $Y_i$  e  $|Y_i - T_i| = D_i$ , sendo  $D_i$  o módulo da diferença, tem-se como restrição  $D_i < 1$  ( $D_i$  pode ser definido segundo critérios de controle de processo). Assim, propõe-se o seguinte sistema de otimização:

$$\text{Minimizar } Z_{Global} = \prod_{j=1}^r \left[ \left( \hat{Y}_j - T_j \right)^2 \right]^{1/p} \quad (84)$$

$$\text{Sujeito a : } LIE_i \leq X_i \leq LSE_i \quad (85)$$

$$x_1 = T_1(cte)$$

$$x_2 = T_2(cte)$$

$$x_3 = T_3(cte)$$

$$x_4 = T_4(cte)$$

$$|Y_j - T_j| \leq 1$$

$$i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, r$$

O sistema de otimização anterior mostra duas linhas gerais de restrições adotadas para o processo de texturização por falsa torção: uma para as variáveis de processo, para a qual o histórico, experiência, restrições de máquina, matéria-prima dentre outros indicadores de qualidade, influenciarão o nível a ser adotado de limite mínimo e máximo especificado e outra, na qual o cliente ou o mercado especificam a faixa aceitável para o grupo de resultados serimétricos.

## 4.1 Algoritmo genético

Segundo Busacca et al. (2001) e Costa e Oliveria (2001), os *Algoritmos Genéticos* são procedimentos computacionais de busca e otimização baseados no conceito da seleção

natural; é uma técnica de otimização que utiliza uma população de soluções (ou pontos) ao contrário de se utilizar um único ponto, como nos métodos gradientes. Criado por Holland (1960) e aperfeiçoado por Goldberg (1989), baseado no princípio “O indivíduo que melhor se ajusta (adapta), sobrevive” (Darwin), a “solução” que melhor atender a função-objetivo é aquela que sobreviverá às mutações e combinações.

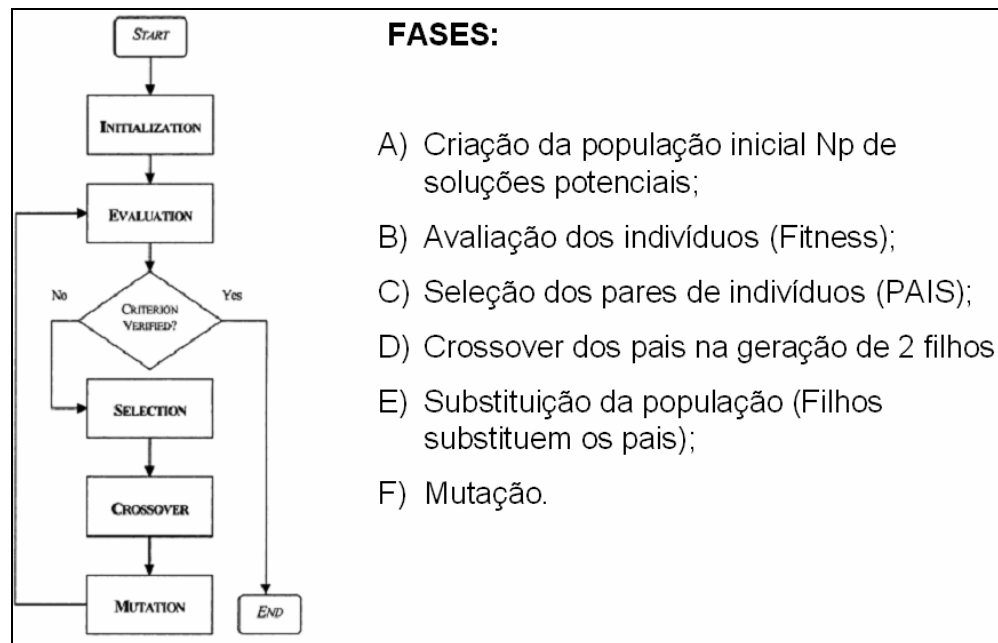


Figura 22 – Fases da evolução. Adaptado de Costa e Oliveira (2001).

Jeong et al. (2005) afirmam que algoritmo genético é um método de otimização global que pode ser aplicado em várias áreas, incluindo-se a facilitação de projetos de *lay-out*, determinação de condições de máquina, projetos de construções, estimativas de parâmetros de sistema, e otimização de parâmetros de processo (CALDAS e NORFORD, 2002; ISLIER, 1998; COOK et al., 2000; DAREN, 2001; EDWARD et al., 2002; TANG e LI, 2002).

Este algoritmo busca soluções através da evolução de um grupo de cromossomos que representam um vetor de solução. Em cada geração, uma nova população é gerada através de operações genéticas tais como: geração, cruzamento, mutação, e elitismo. Duas descendências de cromossomos podem ser produzidas pelo acasalamento probabilístico dos dois cromossomos selecionados baseados na razão de cruzamento (operação de cruzamento). O cromossomo elite com a melhor aptidão (do inglês *fitness*) é reproduzido para a próxima geração. O processo de evolução é continuado até que certo critério de parada seja atingido, os critérios de parada podem ser: um máximo número de gerações, tempo disponível de computação, valor objetivo desejado, melhoria mínima, ou melhoria mínima relativa (JANG

et al., 1997). A “Figura 23”, adaptada de Busacca et al. (2001), apresenta um diagrama com as principais relações semânticas definidas no algoritmo.

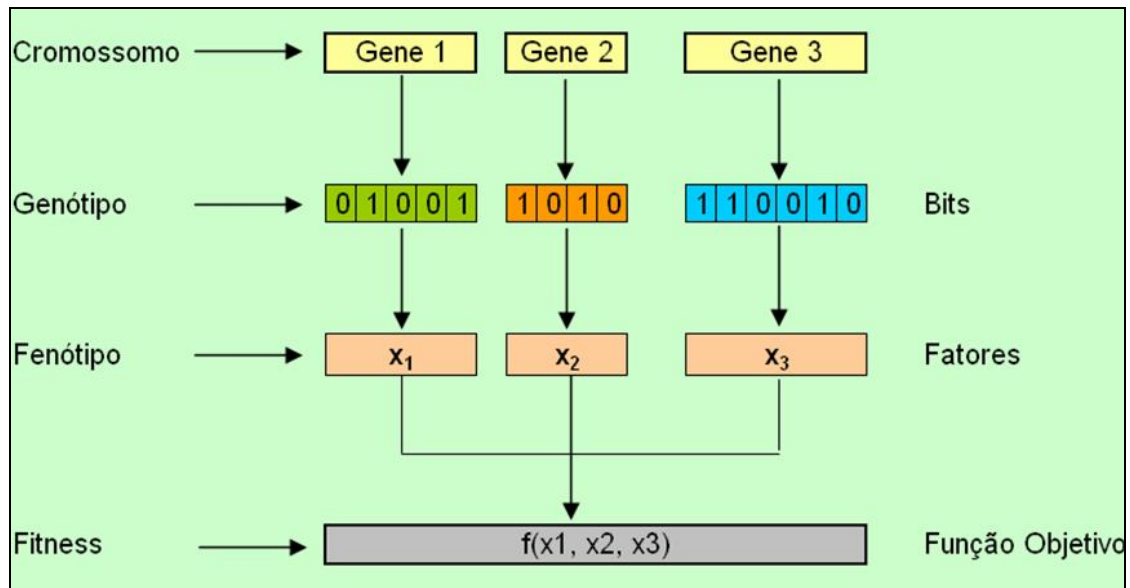


Figura 23 – Codificação proposta por Busacca et al. (2001).

Após a geração da população inicial, os indivíduos são ordenados segundo sua adequação (do inglês, *Fitness*), esta ordenação é utilizada para definir que indivíduos sobrevivem para a próxima geração, um indivíduo é uma **solução potencial** para o problema de otimização (BUSACCA et al., 2001).

Os GA's requerem diversidade genética, entretanto, uma pequena diversidade pode gerar a convergência prematura para um ótimo local e o excesso de diversidade da população pode gerar agrupamentos de indivíduos com diferentes ótimos locais. Desta forma, unindo-se pais de agrupamentos diferentes, pode-se contribuir para a geração de filhos com carga genética ruim, e em termos de otimização, este procedimento pode levar a não convergência do algoritmo, além de aumentar o tempo de processamento (BUSACCA et al., 2001).

Ainda sobre o algoritmo, a primeira população é gerada de forma aleatória, utilizando-se de uma distribuição de probabilidade uniforme dentro de certa faixa especificada. O algoritmo de procriação (do inglês *Breeding*) também é probabilístico, com isso a soma acumulada dos valores da função de adequação de cada cromossomo é normalizada para totalizar 1. A nova população é, então, gerada aleatoriamente, seguindo as probabilidades estabelecidas em função das frequências acumuladas. O procedimento é semelhante à

Simulação de Monte Carlo. Evidentemente, os indivíduos (cromossomos ou vetores de solução) com os melhores valores da função de adequação, terão maiores chances de sobreviver para a próxima geração.

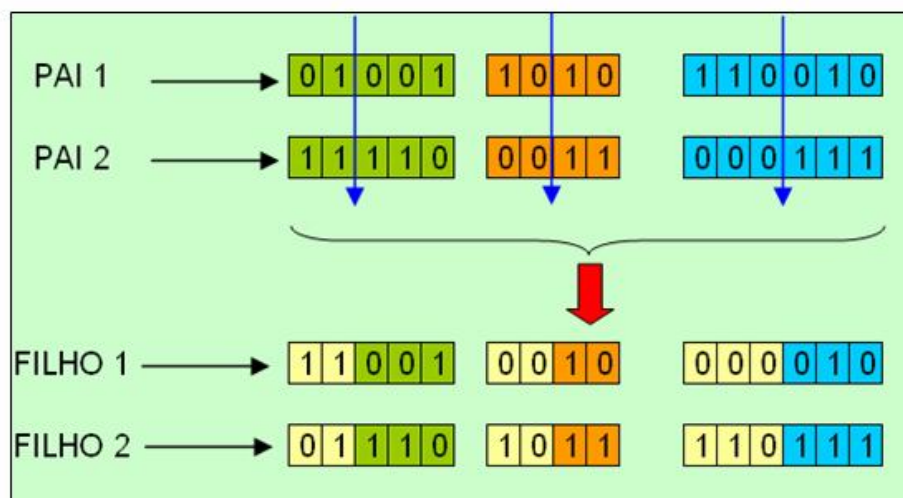


Figura 24 – Cruzamento.

Com a população temporária gerada no passo anterior,  $N_p/2$  pais são sorteados aleatoriamente (sem reposição) e independentemente de seus valores de adequação, e cada par será dividido em posições aleatórias (sorteio probabilístico) e as partes são recombinadas, gerando uma descendência de dois filhos.

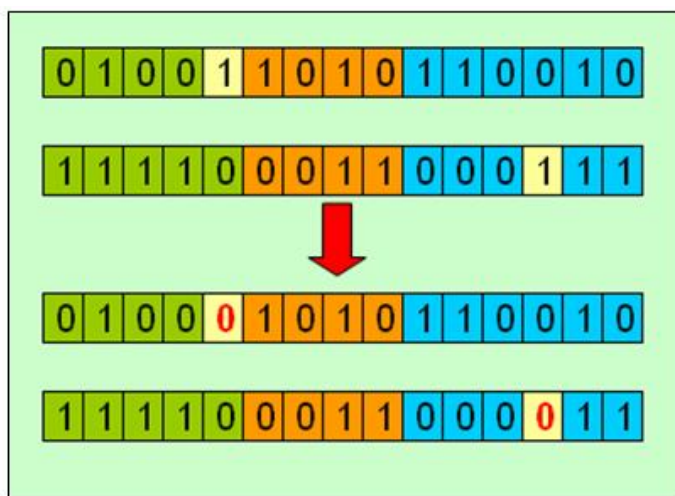


Figura 25 – Mutação (Busacca et al., 2001)

O cruzamento não é realizado em todos os pares de cromossomos (vetores de solução), e em geral, este rearranjo é feito em uma porção da população de pares de pais, com probabilidade  $PC \geq 60\%$ , um número aleatório  $R$  é gerado na faixa de  $[0, 1]$  e o cruzamento é realizado somente se  $R < PC$ , desta forma, sendo  $R > PC$  os filhos serão iguais aos pais. O passo seguinte é substituir os pais pelos filhos.

Existe ainda a **MUTAÇÃO**, processo de alteração de um bit de  $0 \rightarrow 1$  (e vice-versa) na população de bits. De modo geral, o número de bits mutantes é igual a:  $PM \times \text{Total de Bits}$ , onde  $PM = 10^{-3}$ . Esta evolução ocorre até que o número de gerações alcance o valor pré-estabelecido ou o tempo de processamento atinja o valor previsto.

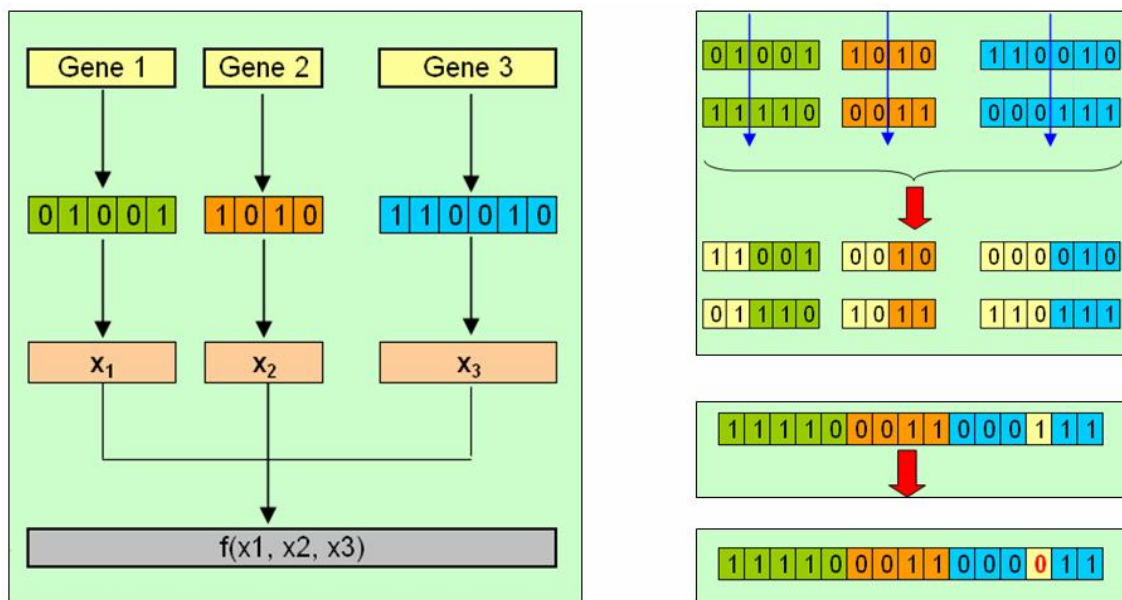


Figura 26 – Visão geral da evolução do algoritmo genético.

Nos Algoritmos Genéticos usados em otimização não-linear restrita, a função de aptidão é uma equação sem restrições. Portanto, para se utilizar os GA's em problemas de otimização não-linear com restrições é necessário se utilizar funções de barreira (método interior) ou penalidade (método exterior) para transformar um problema restrito em irrestrito. Como os GA's não dependem de uma solução básica inicial viável, as funções de penalidade são mais usadas que as de barreira (COSTA e OLIVEIRA, 2001). Desse modo, a função de aptidão poderá ser escrita como:

$$F(x) = f(x) + R \left( \sum_{k=1}^p [\max\{0, g_k(x)\}]^2 + \sum_{l=1}^m [h_l(x)]^2 \right) \quad (86)$$

Nesta dissertação, usou-se o solver do Excel versão premium.

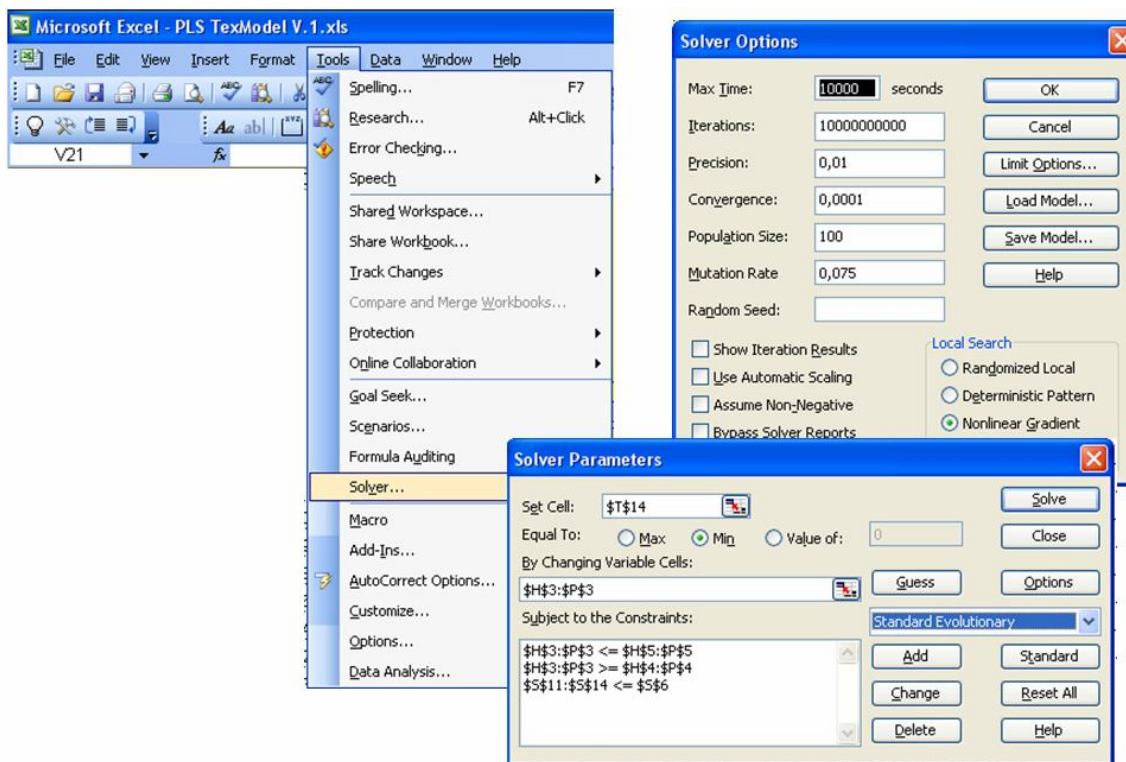


Figura 27 – Telas do Excel Solver (versão em inglês)

## 5 Modelagem do processo de texturização por falsa torção

Os modelos comumente utilizados para explicar o processo de texturização por falsa torção utilizam, em sua maioria, uma metodologia desenvolvida a partir de equações diferenciais relacionadas ao processo de transferência de calor ocorrido durante a texturização, bem como as propriedades físicas do polímero e outros princípios da mecânica. Diferentemente desta abordagem tradicional, optou-se neste trabalho, pela aplicação de modelos de regressão. Estudando-se a natureza do conjunto de dados coletados deste processo, três métodos de regressão serão avaliados: o modelo de regressão multivariada por Mínimos Quadrados Parciais (PLS), o modelo de Regressão Linear Múltipla univariada (MLR) e o modelo de Regressão por Componentes Principais (PCR). Em função da existência

de um grande banco de dados disponível para este processo, este estudo comparativo é bastante viável.

A otimização de processos é normalmente realizada a partir de modelos causais construídos ou através de experimentos projetados que relatam os efeitos independentes de todas as variáveis ajustáveis do processo para com toda a variável resposta de interesse. Entretanto, em processos muito complexos, existem muitas variáveis ajustáveis (manipuladas), muitas vezes altamente correlacionadas, além de restrições operacionais (por exemplo, o encolhimento do fio texturizado que se correlaciona com título do POY, temperaturas, velocidades, etc.). Nestes casos, modelos causais completos não são fáceis de serem obtidos, ou quando obtidos, explicam pouco da variável de interesse. Entretanto, uma quantidade significativa de dados de processos operacionais está muitas vezes disponível, com uma grande faixa de condições de trabalho. Este fato tem sido verificado principalmente em empresas que se adequaram à normas internacionais, nas quais a rastreabilidade é, na maioria dos casos, um requisito importantíssimo. Estes dados podem possibilitar a construção de modelos causais restritos que mostram como grupos de processos e variáveis de matéria prima afetam a qualidade do produto em um subespaço das variáveis originais. Modelos de variáveis latentes lineares ou não, construídos usando PLS, são ideais para tal propósito (YACCOUB e MACGREGOR, 2004).

Nesta dissertação, uma metodologia é proposta para desenvolvimento de processos e controles baseados na otimização dos subespaços definidos pelos modelos de variáveis latentes construídos com estes dados disponíveis. Modelos de regressão são desenvolvidos e estratégias de otimização, usando algoritmos genéticos, são implementadas para atender aos objetivos importantes de desenvolvimento do produto e controle de processo. A combinação de métodos de regressão e otimização pode, assim, ser extremamente efetiva em encontrar condições de processo que alcançam objetivos de qualidade desejáveis, reduzindo o tempo de desenvolvimento requerido para se atingir qualidade final de produto com variabilidade reduzida.

No desenvolvimento e/ou otimização de processos têxteis químicos, é essencial identificar os efeitos que as variáveis de processo têm nos valores da qualidade final do produto e sua variabilidade nos diversos estágios do processo. Se um modelo dinâmico fundamental do processo está disponível, todos podem usá-lo para desenvolver novos produtos, e otimizar ou controlar o processo na presença da matéria prima e variações de condições ambientais ou estruturais. Alternativamente, modelos empíricos que estimam os efeitos causais de variáveis ajustáveis e das variáveis de processo e das variáveis das matérias

primas no processo de qualidade podem ser obtidos por experimentos planejados. Estes modelos podem ser usados de maneira similar (dentro de designadas regiões restritas) para otimizar ou controlar o processo (MELVIK et al., 2001). No entanto, para processos complexos, modelos fundamentais não estão disponíveis na maioria das vezes, de maneira a considerar todas as variáveis do processo. O grande número de variáveis correlacionadas não permite, por sua vez, um ajuste independente dos parâmetros, fazendo com que a obtenção de modelos empíricos seja difícil, de modo que representam o comportamento do processo dentro de restrições operacionais ou de custo.

Com o advento de padronizações de processo e a utilização de normalização ISO, criou-se uma mentalidade na qual a atenção para se fazer uso dos dados históricos coletados no processo vem a cada dia crescendo e tendo maior importância. Num primeiro momento, estes dados eram usados como simples conferência e informação de rastreabilidade, mas agora, já são vistos como fonte potencial de informação útil, através da qual pode-se retirar uma imensurável quantidade de conhecimento, se um método de análise de dados adequado for empregado.

É importante ressaltar que, apesar de existirem vários trabalhos sobre a modelagem de processos de texturização, os mesmos foram realizados em empresas produtoras de máquinas e empresas líderes na produção de poliéster mundial. E, como é de praxe neste segmento, suas publicações não são comuns, em função do cuidado que se tem com a propriedade intelectual. Do mesmo modo, não se verifica também a criação de patentes, o que de certa forma é um contra ponto para a preocupação inicialmente mencionada. Esta é uma realidade que talvez seja uma característica deste setor. Neste contexto, esta dissertação pretende comparar o desempenho dos modelos de regressão com métodos e equações utilizados comumente na industrial têxtil, tal como descrito no Capítulo 2, mas que não tem respaldo em publicações científicas, embora se reconheça sua característica investigativa. No próximo item, citam-se os trabalhos que, de uma maneira ou de outra, se assemelham à tentativa proposta nesta dissertação.

## **5.1 Trabalhos relevantes na área**

Yuzheng et al. (2007) discutiram sobre a modelagem da distribuição da torção no fio fantasia (*slub-yarn*) usando relações mecânicas e matemáticas, mas pouca análise estatística. Sztandera et al. (2007) escreveram sobre técnicas de inteligência computacional para construir

sistemas que podiam desenvolver formulações de polímeros com características desejadas pelo consumidor. Para isso, usaram um extenso banco de dados no qual se evidenciava a correlação existente entre a estrutura com a propriedade dos polímeros. Através de redes artificiais neurais e algoritmo genético, as propriedades dos polímeros puderam ser preditas.

Como as modelagens se baseiam, em sua maioria, em teorias da mecânica, Endo et al. (2003) propuseram uma nova teoria para a mecânica de torção existente nos discos de fricção, a partir de experimentos. Zimlik et al. (2000) relatam que as propriedades dos fios podem ser determinadas através de dados do filamento, com modelos que permitem a predição do alongamento, tenacidade e modulo inicial para fios. A técnica utilizada foi de princípio de conservação de energia e análise das curvas de alongamento e estrutura de torção. O artigo discorre sobre o modelo matemático proposto.

Pal et al. (1996) realizaram um DOE (do inglês *design of experiments*) para microfibras, usando três matérias primas, e texturizaram o fio utilizando 4 variáveis de processo em cinco níveis. Featherstone et al. (1986) apresentaram uma abordagem Lagrangiana (Lagrange) de modelagem auxiliada por computador. Este artigo também mencionou Twaites (1981), que utilizou uma abordagem de coordenadas do sistema do tipo Euler. Ghosh et al. (1981) discorreram sobre a influência da temperatura do primeiro forno, espaço entre discos, taxa de estiragem e D/Y nas propriedades do fio. O experimento utilizado foi um arranjo de superfície de resposta do tipo Box-Behnken com três níveis e 27 experimentos. O estudo apontou existência relevante de interações.

Chudoba et al. (2007) realizaram um estudo multivariado do efeito da torção, carga e comprimento no comportamento da tensão de fios multifilamentados de vidro, empregando basicamente a análise de correlação e ANOVA. Durand et al. (2007) usaram uma combinação de algoritmo genético e mínimos quadrado parciais (PLS) na análise quantitativa infravermelha de têxteis de algodão e viscose. O artigo afirma que o espectro total disponibiliza 480 variáveis, mas com a utilização de variáveis latentes (componentes principais) o modelo requer somente 11 destas e tem um erro de 3,74%. Na mesma linha de leitura espectroscópica, Rodgers et al. (2000) mediram a memória térmica da poliamida em carpetes utilizando comparativamente MLR e PLS. De maneira similar, Ownes (1997) propôs um método para determinar qualidade do fio diretamente na máquina texturizadora. Este estudo (parcialmente patrocinado pela Milliken) utilizou MLR e PLS na análise de dados, além de utilizar correlação, análise discriminante e análise de componentes principais para análise específica dos espectros. Karakas et al. (2004) estudaram a influência dos parâmetros principais da

texturização por falsa torção, como temperatura de fio e velocidade de texturização, nas propriedades mecânicas e estruturais da Poliamida 6.6 usando análise de variância.

Como se percebe nos trabalhos relacionados com o tema desta pesquisa, existem poucos trabalhos que consideram a utilização conjunta de modelagem multivariada e otimização aplicados ao entendimento e melhoria do processo de texturização por falsa torção. Assim, parece razoável que esta proposta seja investigada.

## 5.2 Nova proposta de modelagem

King, Jerry (2002) apresentou um seminário na associação de fios texturizados dos EUA ressaltando a evolução do desenvolvimento dos produtos têxteis e os desafios para o futuro no que tange o processo de desenvolvimento de produtos texturizados (Figura 28). Como foi verificado no item 5.1, os trabalhos escritos na década de 80, mostravam algumas idéias de como os fundamentos da mecânica influenciariam os resultados dos processos. Na década de 70, iniciaram-se os experimentos verificando-se interações e possibilidades, o que de certa forma colaborou com a descoberta de meios para melhoria da produtividade. A partir da década de 90, verifica-se um aumento suave de produtividade sem nenhuma melhoria tecnológica, apesar de haver um aumento contínuo de produtividade ao longo dos anos até o dia de hoje.

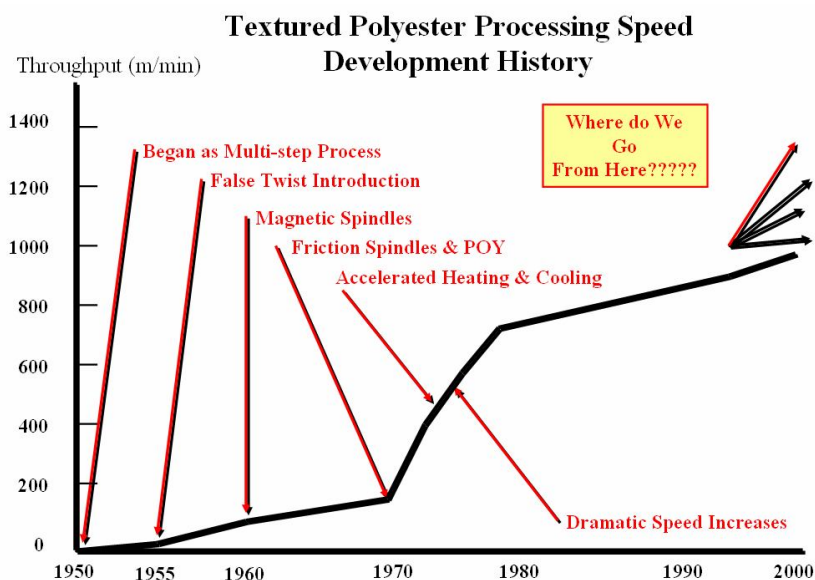


Figura 28 – Diagrama da evolução da texturização

King, Charlie (2003) também apresentou trabalhos com modelagem de POY (na fiação) no mesmo seminário da TYAA (*Textured Yarn American Association*), hoje designada SYFA (*Synthetic Yarns and Fiber Association*). Encerradas as apresentações, a proposta de dar continuidade aos trabalhos de modelagem, baseada na idéia seria combinar os trabalhos de modelagem apresentados, foi feita, de modo a criar um modelo de texturização que previsse as propriedades dos fios texturizados a partir de dados da matéria prima POY e informações de parâmetros de máquina. King, Jerry (2002) não publicou seus trabalhos além do seminário, mas discutiu todas as fórmulas que encontrou para determinação de fatores chaves na texturização no seminário. Já King, Charlie (2003) havia publicado um de seus trabalhos com estiragem a frio de poliéster e uma proposta de modelagem. Novamente, deve-se enfatizar que, no setor têxtil, muitas das práticas utilizadas no desenvolvimento de processos e produtos têm um caráter eminentemente técnico (prático) e confidencial, mas, com pouca validade científica, principalmente no que tange as publicações em periódicos especializados.

A partir destas informações e de equações já descritas nos capítulos anteriores desta dissertação, construiu-se um modelo para o processo de texturização em meados de 2003. E este modelo, não publicado por razões de confidencialidade, é considerado estratégico para as empresas que o detém, e apresenta um ajuste razoável para todas as propriedades do fio, estimado a partir de alguns fatores de produtividade e controle de processo. A modelagem utilizou-se de metodologias determinísticas, baseadas em equações diferenciais relacionadas com o processo de transferência de calor ocorrido durante a texturização, propriedades físicas do polímero e outros princípios fundamentais da mecânica.

Na Figura 29, mostra-se de forma geral, a metodologia adotada para o tratamento dos dados, visando sua modelagem e otimização. A Figura 29 apresenta a estrutura adotada neste caso. Ressalta-se que todo o processo de análise ocorreu numa condição *off line* (fora da linha de processo), devido à intenção de se evidenciar a quantidade de conhecimento subjacente que existe em dados históricos de boa qualidade.

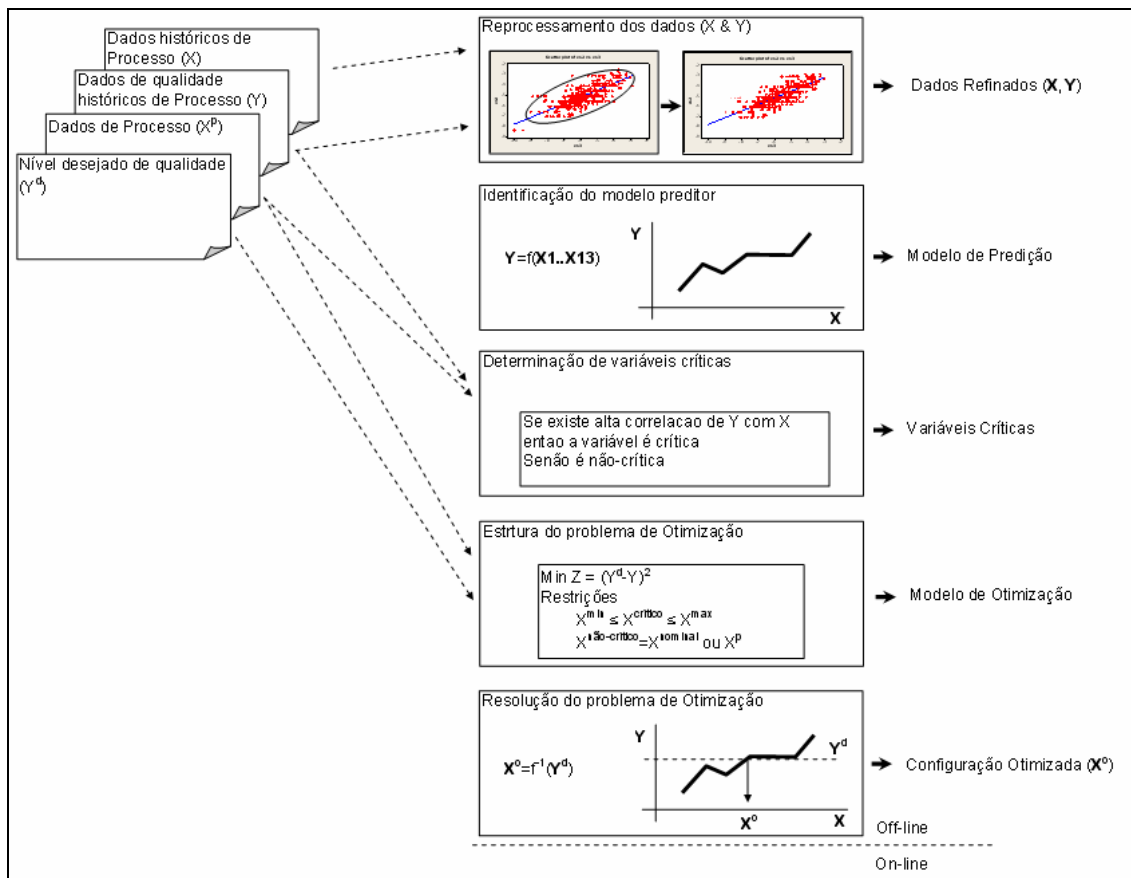


Figura 29 – Diagrama da modelagem

### 5.3 Comparações entre o modelo univariado e dados reais

O objetivo principal desta dissertação é verificar a possibilidade de se encontrar, através de métodos de regressão, modelos de explicação razoável para as características do processo de texturização. Neste contexto, busca-se justificar a pertinência desta proposta confrontando-se dados reais de processo com aqueles calculados com base no modelo univariado (um modelo adotado na prática e sobre o qual não há publicações científicas).

Nesta contraposição, mediu-se a correlação entre os dados. Destacados na tabela 2 aparecem, em **negrito**, os resultados obtidos anteriormente com a modelagem determinística usando-se equações diferenciais.

Tabela 2 – Ajuste entre YP e Y

Variável Calculada	Resultado real	<b>R<sup>2</sup> Modelo Univariado</b>
YP1	Y1	<b>88.7%</b>
YP2	Y2	<b>82.9%</b>
YP3	Y3	<b>99.7%</b>
YP4	Y4	<b>66.0%</b>
YP5	Y5	<b>28.5%</b>
YP6	Y6	<b>84.3%</b>

Conforme se observa na tabela 2, existe a possibilidade de se melhorar a explicação das características do processo de texturização, investigando-se a utilização de modelos de regressão, principalmente para as variáveis Y4 e Y5. É disto que tratam os próximos itens deste trabalho.

#### **5.4 Variáveis do processo de texturização por falsa torção**

O ponto de partida para a construção dos modelos de regressão utilizados neste trabalho, foi um banco de dados com informações do processo de texturização, de uma fábrica de fios que utiliza processos padronizados, em condições de qualidade e controle. Após a eliminação de algumas variáveis problemáticas (de difícil controle ou com dados faltantes em excesso), definiu-se o conjunto de dados utilizados nas análises que se seguem. Este trabalho reduziu o escopo da modelagem para um ambiente de texturização por falsa torção, utilizando-se como matéria prima o POY semi-opaco, em uma máquina de forno curto, com perfil V e agregados de discos de Poliuretano com disposição fixa.

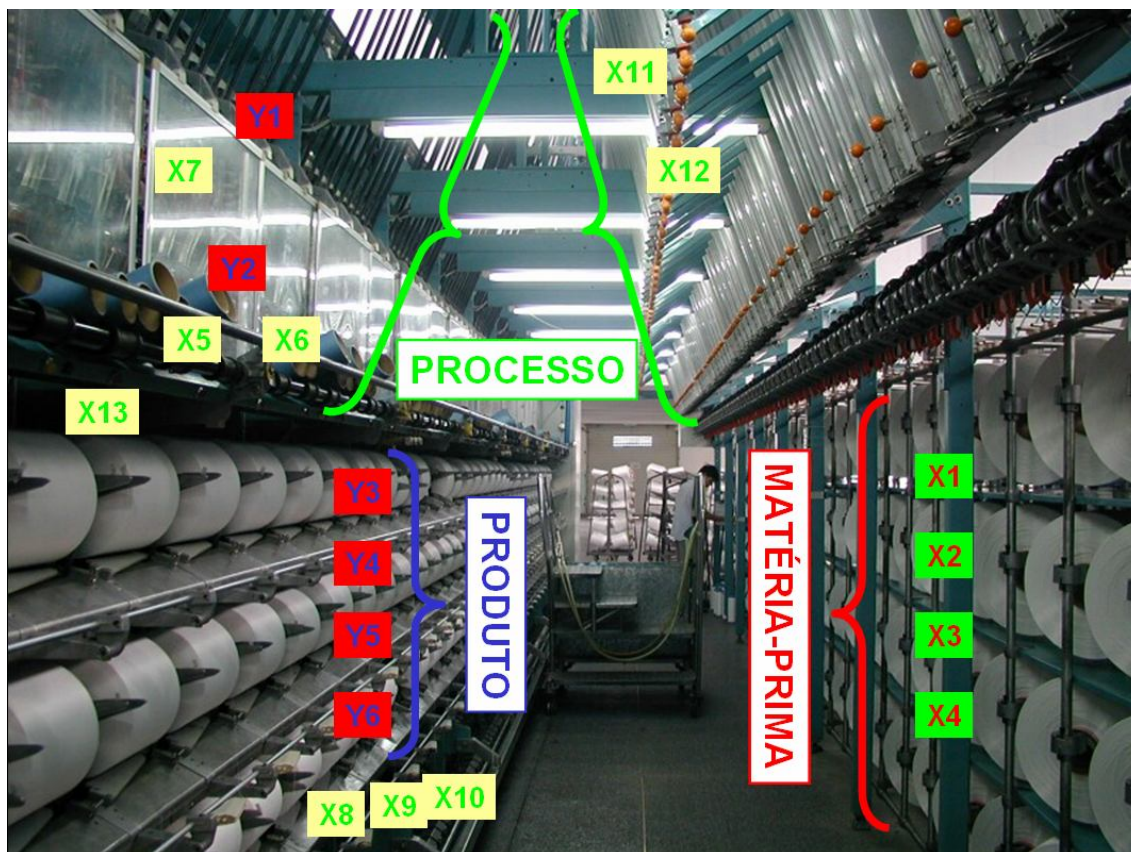


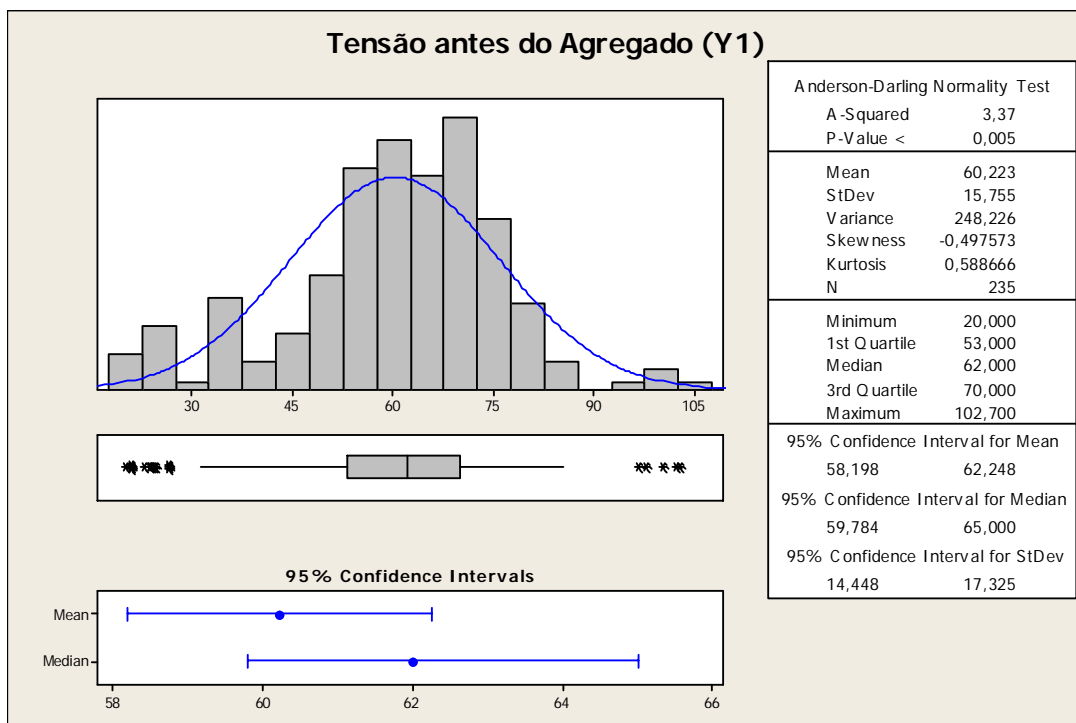
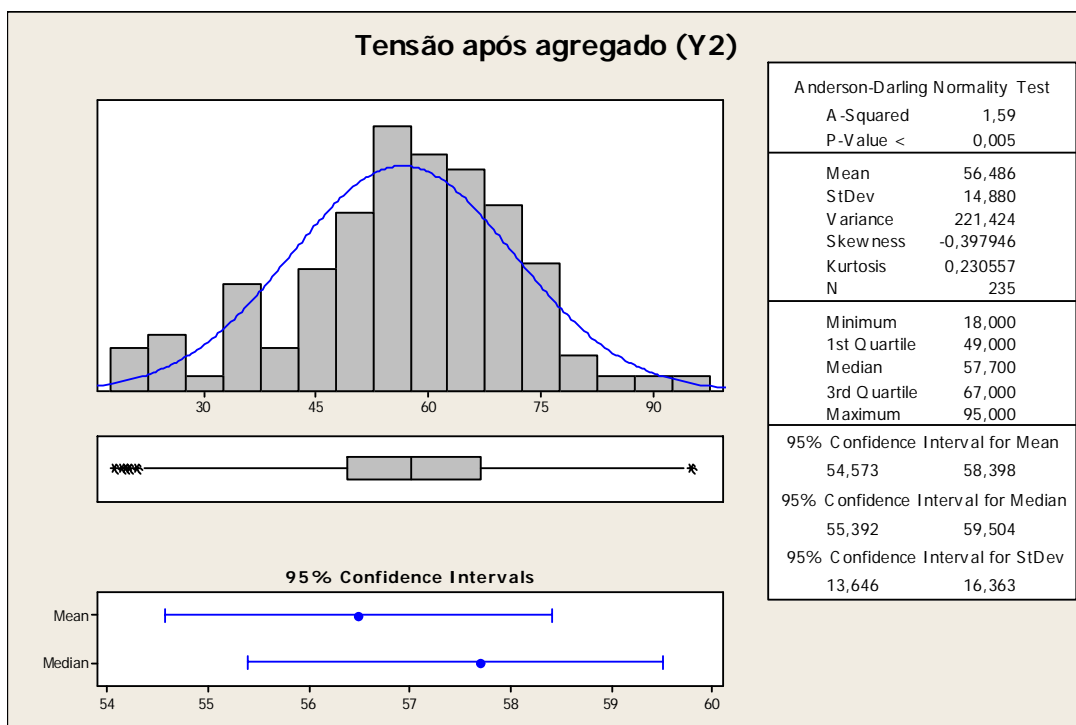
Figura 30 – Visualização das variáveis no processo (Foto cedida por Udo Schweizer).

A seguir, são apresentados os conjuntos de variáveis independentes (X) e dependentes (Y) consideradas para o estudo. O banco de dados é formado por uma amostra de tamanho  $n=235$ , com 13 variáveis preditoras (X) e 6 variáveis de resposta (Y), representando as principais características de qualidade do processo de texturização por falsa torção de fibras de poliéster (Tabela 3).

**Tabela 3 – Variáveis de resposta.**

Tensão antes do agregado T1 (cN)	Tensão após agregado T2 (cN)	Denier (g/9km)	Alongamento (%)	Tenacidade (cN/tex)	Encolhimento à fervura (%)
Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6

A seguir, apresentam-se algumas medidas estatísticas utilizadas para caracterizar cada uma destas variáveis de resposta.

Figura 31 – Análise estatística de  $Y_1$ .Figura 32 – Análise estatística de  $Y_2$ .

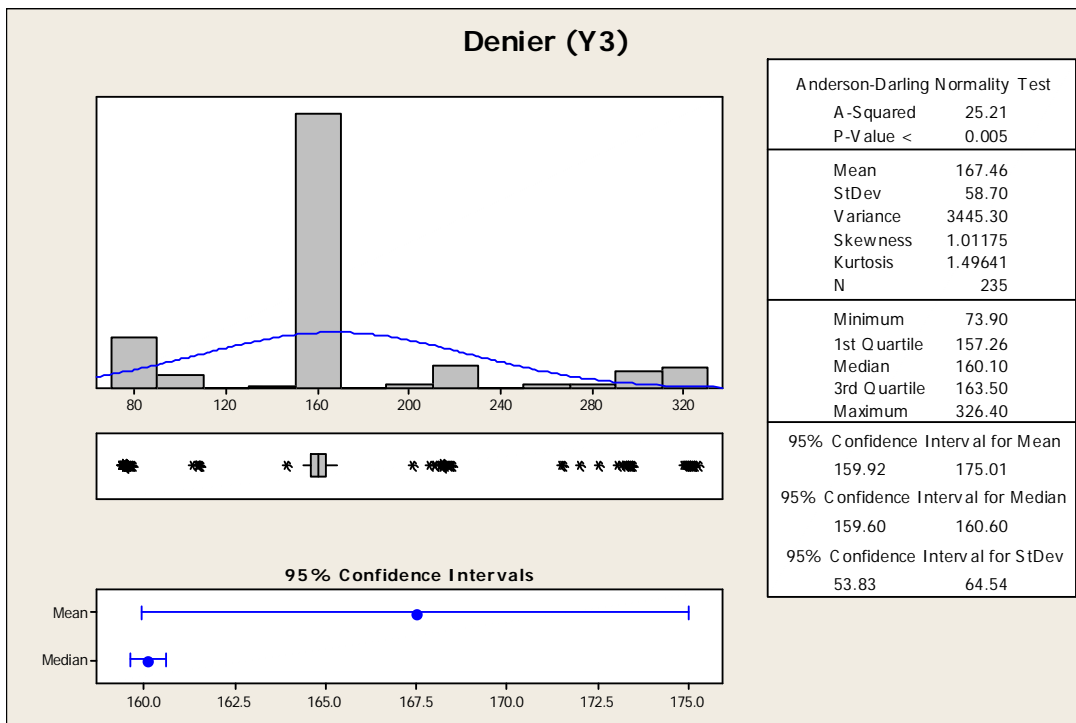


Figura 33 – Análise estatística de Y<sub>3</sub>.

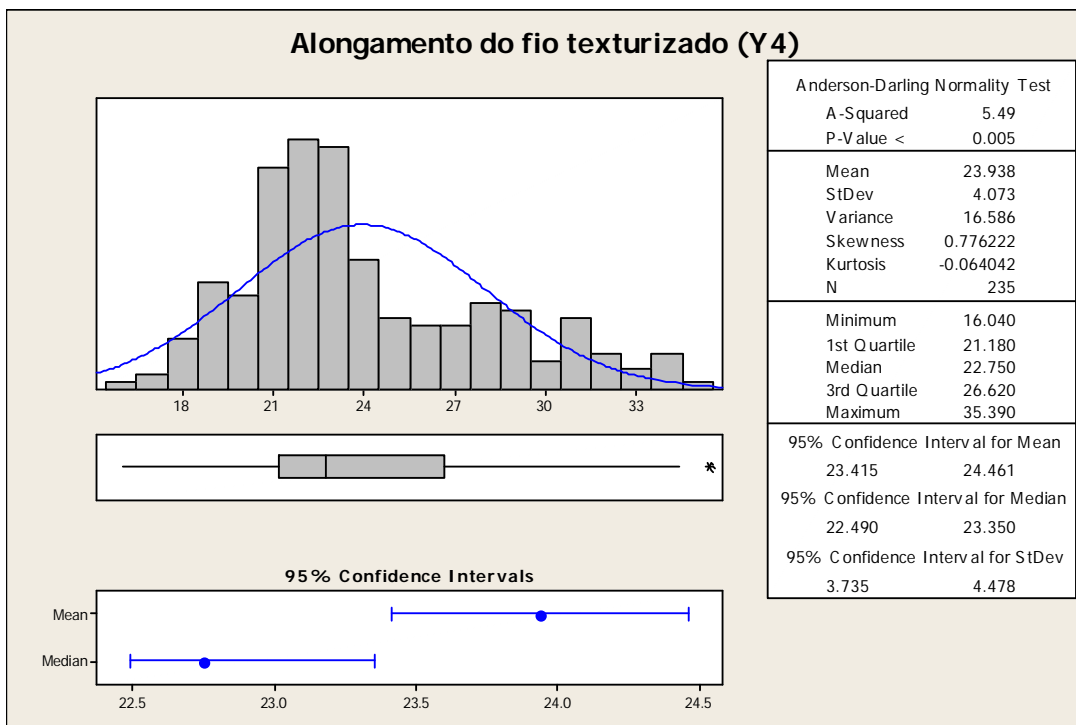


Figura 34 – Análise estatística de Y<sub>4</sub>.



Figura 35 – Análise estatística de Y<sub>5</sub>.

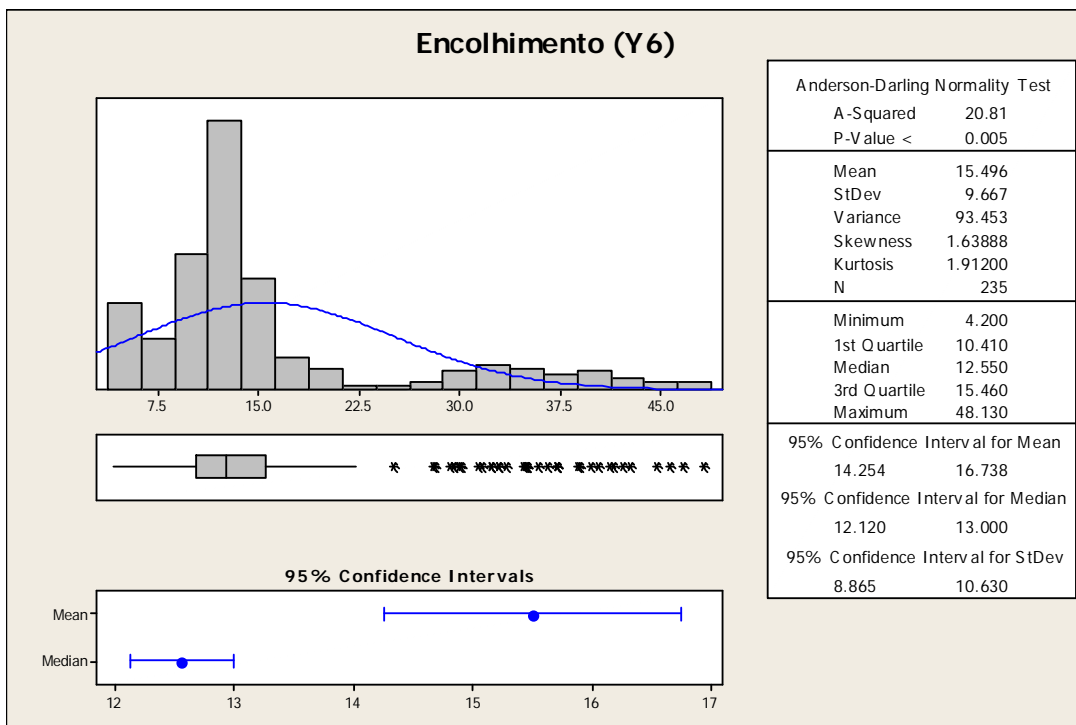


Figura 36 – Análise estatística de Y<sub>6</sub>.

Analogamente, apresentam-se (Tabela 4) as principais medidas estatísticas das 13 variáveis independentes.

**Tabela 4 – Variáveis de entrada**

$x_i$	Descrição	Média	Desvio Padrão	Q1	Mediana	Q3
$x_1$	Título do POY (Denier)	269,32	86,54	262,00	265,00	269,00
$x_2$	Número de Filamentos	51,58	18,85	34,00	48,00	68,00
$x_3$	Força de Estiragem (cN)	97,56	29,71	88,00	96,00	99,00
$x_4$	Alongamento do POY (%)	118,55	4,78	116,00	119,00	121,00
$x_5$	Velocidade de produção (m/min)	688,19	141,37	550,00	700,00	800,00
$x_6$	Taxa de Estiragem	1,68	0,07	1,66	1,70	1,73
$x_7$	D/Y	1,72	0,12	1,64	1,69	1,76
$x_8$	Sobre alimentação 2 (%)	-2,06	1,90	-3,50	-2,00	0,00
$x_9$	Sobre alimentação 3 (%)	-4,78	0,93	-5,50	-5,00	-4,00
$x_{10}$	Sobre alimentação 4 (%)	-5,55	1,12	-6,30	-5,75	-4,80
$x_{11}$	Temperatura Forno Curto (°C)	442,79	41,74	440,00	450,00	470,00
$x_{12}$	Temperatura Forno Longo (°C)	342,53	40,57	300,00	350,00	380,00
$x_{13}$	Temperatura 2° Forno (°C)	151,49	75,87	150,00	175,00	205,00

Considerando-se os conjuntos de variáveis X e Y citados anteriormente, pode-se avaliar também a estrutura de correlação entre estes conjuntos. A seguir, serão apresentadas duas análises de correlação: (Tabela 5) para as predictoras  $x_i$  e (ii), para as variáveis dependentes  $y_i$ . Desejando-se estudar a aplicação de técnicas multivariadas como o PLS, por exemplo, uma análise de componentes principais de três conjuntos de variáveis (X, Y e XY) também será apresentada.

Tabela 5 – Correlação entre as variáveis preditoras e *P-value*

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12
x2	0.220 0.001											
x3	0.841 0.000	0.357 0.000										
x4	0.081 0.216	-0.024 0.714	-0.305 0.000									
x5	-0.264 0.000	-0.605 0.000	-0.248 0.000	-0.085 0.196								
x6	-0.304 0.000	-0.544 0.000	-0.482 0.000	0.380 0.000	0.693 0.000							
x7	0.210 0.001	0.345 0.000	0.135 0.038	0.040 0.540	-0.391 0.000	-0.461 0.000						
x8	-0.102 0.120	0.037 0.570	-0.028 0.669	-0.048 0.466	0.087 0.186	-0.018 0.785	0.054 0.413					
x9	0.044 0.498	0.143 0.028	0.066 0.315	0.041 0.536	0.022 0.738	0.005 0.945	-0.039 0.554	0.507 0.000				
x10	0.034 0.605	0.285 0.000	0.035 0.596	0.066 0.312	-0.145 0.026	-0.111 0.089	0.087 0.182	0.401 0.000	0.818 0.000			
x11	0.340 0.000	-0.442 0.000	0.226 0.000	-0.022 0.742	0.403 0.000	0.288 0.000	-0.290 0.000	-0.025 0.699	0.045 0.492	-0.110 0.094		
x12	0.331 0.000	-0.306 0.000	0.299 0.000	-0.011 0.866	0.392 0.000	0.275 0.000	-0.290 0.000	0.092 0.158	0.024 0.718	-0.083 0.206	0.550 0.000	
x13	0.124 0.058	-0.153 0.019	0.103 0.115	-0.051 0.437	0.072 0.271	-0.071 0.279	0.099 0.129	-0.169 0.009	-0.689 0.000	-0.804 0.000	0.107 0.102	0.113 0.084

Tabela 6 – Correlação entre as variáveis dependentes e *P-value*

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
Y2	0.974 0.000				
Y3	0.574 0.000	0.517 0.000			
Y4	-0.257 0.000	-0.253 0.000	0.430 0.000		
Y5	-0.120 0.067	-0.059 0.368	-0.736 0.000	-0.413 0.000	
Y6	0.034 0.608	0.035 0.599	-0.130 0.047	-0.319 0.000	0.149 0.022

Para o conjunto de dados do processo de texturização em questão, observa-se na figura 37 a seguir, que 5 componentes principais explicam 82% da variação das 13 variáveis independentes originais. Isto indica certo nível de redundância a qual, no contexto dos métodos de regressão, pode ser entendida como um indício de multicolinearidade. Esta constatação já havia sido identificada nas análises de correlação anteriores.

De maneira análoga, a figura 38 apresenta a ACP para as respostas (Y). Observa-se que 3 componentes principais são capazes de explicar 90,5% da variação do conjunto original. Logo, a redução de dimensionalidade também é possível (e viável) para o conjunto de variáveis dependentes.

No contexto do método de regressão PLS, é importante que exista uma estrutura de correlação forte no conjunto formado pelas variáveis  $x_i$  e  $y_i$ . A figura 39 mostra a ACP aplicada ao conjunto de 19 variáveis (13 variáveis independentes e 6 dependentes). Nota-se que 6 componentes principais são capazes de explicar 85,8% da variação total encontrada no conjunto original.

<b>Eigenvalue</b>	3,3781	2,7582	2,3399	1,2198	0,9410	0,6442	0,4873	0,4011
<b>Proportion</b>	0,260	0,212	0,180	0,094	0,072	0,050	0,037	0,031
<b>Cumulative</b>	0,260	0,472	0,652	0,746	0,818	0,868	0,905	0,936
<b>Eigenvalue</b>	0,3233	0,2029	0,1438	0,1081	0,0522			
<b>Proportion</b>	0,025	0,016	0,011	0,008	0,004			
<b>Cumulative</b>	0,961	0,977	0,988	0,996	1,000			
<b>Variable</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>	<b>PC8</b>
x1	0,174	0,239	-0,484	0,305	0,010	0,058	-0,011	0,218
x2	0,437	0,048	0,032	0,069	-0,093	-0,417	-0,370	0,195
x3	0,230	0,249	-0,483	-0,069	-0,101	-0,089	-0,157	0,249
x4	-0,061	-0,105	0,097	0,832	0,209	-0,178	0,110	0,015
x5	-0,429	-0,146	-0,106	-0,192	0,099	0,158	-0,510	0,353
x6	-0,431	-0,217	0,031	0,265	-0,002	-0,066	-0,319	0,255
x7	0,308	0,138	0,097	0,118	0,514	0,648	-0,326	-0,135
x8	0,078	-0,306	-0,124	-0,272	0,700	-0,352	0,209	0,096
x9	0,171	-0,482	-0,234	-0,020	0,038	0,057	0,067	0,175
x10	0,262	-0,471	-0,152	0,049	-0,073	0,139	-0,045	-0,096
x11	-0,268	0,036	-0,439	0,054	-0,019	0,310	0,458	0,119
x12	-0,235	0,032	-0,459	0,026	0,108	-0,240	-0,301	-0,738
x13	-0,162	0,479	0,064	-0,065	0,392	-0,187	0,083	0,190

Figura 37 – Análise de Componentes Principais para variáveis independentes (X).

Principal Component Analysis: Y1; Y2; Y3; Y4; Y5; Y6						
Eigenanalysis of the Correlation Matrix						
Eigenvalue	2,5713	1,9517	0,9060	0,4742	0,0774	0,0193
Proportion	0,429	0,325	0,151	0,079	0,013	0,003
Cumulative	0,429	0,754	0,905	0,984	0,997	1,000
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Y1	0,533	-0,351	0,125	-0,092	0,066	-0,751
Y2	0,512	-0,372	0,159	-0,174	0,400	0,620
Y3	0,561	0,248	-0,169	-0,054	-0,745	0,194
Y4	0,093	0,609	-0,006	-0,721	0,299	-0,105
Y5	-0,354	-0,441	0,343	-0,609	-0,435	0,049
Y6	-0,076	-0,333	-0,901	-0,260	0,052	-0,012

Figura 38 – Análise de Componentes Principais para o conjunto de variáveis dependentes (Y).

Eigenanalysis of the Correlation Matrix								
Eigenvalue	4,9121	4,2847	3,4715	1,3837	1,2521	0,9959	0,6393	0,5056
Proportion	0,259	0,226	0,183	0,073	0,066	0,052	0,034	0,027
Cumulative	0,259	0,484	0,667	0,740	0,805	0,858	0,892	0,918
Eigenvalue	0,4798	0,2855	0,2405	0,1832	0,1243	0,0738	0,0699	0,0489
Proportion	0,025	0,015	0,013	0,010	0,007	0,004	0,004	0,003
Cumulative	0,943	0,958	0,971	0,981	0,987	0,991	0,995	0,997
Eigenvalue	0,0346	0,0138	0,0007					
Proportion	0,002	0,001	0,000					
Cumulative	0,999	1,000	1,000					

Figura 39 – Análise de Componentes Principais para o conjunto XY.

## 5.5 Modelagem por regressão múltipla univariada

Considerando-se que os modelos determinísticos não apresentam resultados compatíveis com os dados reais, optou-se por se estudar métodos alternativos para a modelagem e otimização do processo de texturização baseado em métodos estatísticos. Para se construir um modelo para controle e otimização, seria necessário se projetar um experimento com todas as variáveis de matéria prima, e com todas as variáveis controladas (manipuladas) de processo para que se pudesse afirmar que as relações causais poderiam ser estabelecidas. No entanto, neste estudo, uma faixa limitada de matérias-primas foi realmente utilizada, em parte, porque eram matérias-primas utilizadas no período da coleta de dados e, em outra, pelo método a ser proposto poder ser aplicado com relativa facilidade para cada

novo produto de interesse. Em função do número relativamente alto de variáveis, de sua estrutura de correlação, da boa qualidade e quantidade dos dados observados e da impossibilidade de intervir na planta durante seu funcionamento, não se utilizou um arranjo de DOE.

A análise de correlação discutida anteriormente, evidenciou a forte estrutura de dependência existente entre os conjuntos de preditoras e respostas.

**Tabela 7 – Resumo dos dados X.**

xi	Descrição	Média	Desvio Padrão	MIN	MAX
x1	Título do POY (Denier)	269,32	86,54	115,00	510,00
x2	Número de Filamentos	51,58	18,85	34,00	96,00
x3	Força de Estiragem (cN)	97,56	29,71	40,00	212,00
x4	Alongamento do POY (%)	118,55	4,78	101,00	135,00
x5	Velocidade de produção (m/min)	688,19	141,37	400,00	950,00
x6	Taxa de Estiragem	1,68	0,07	1,50	1,80
x7	D/Y (Vel. Disco/Fio)	1,72	0,12	1,52	2,15
x8	Sobre alimentação 2 (%)	-2,06	1,90	-5,30	0,00
x9	Sobre alimentação 3 (%)	-4,78	0,93	-7,00	-2,40
x10	Sobre alimentação 4 (%)	-5,55	1,12	-8,40	-2,90
x11	Temperatura Forno Curto (°C)	442,79	41,74	320,00	550,00
x12	Temperatura Forno Longo (°C)	342,53	40,57	200,00	420,00
x13	Temperatura 2º Forno (°C)	151,49	75,87	0,00	240,00

Os dados foram coletados ao longo de um *start-up* de produção e a partir de testes para produção de amostras, quando técnicos manipularam as variáveis para alcançar propriedades desejadas. A matriz de dados utilizada contém 235 linhas, referentes a 235 produtos produzidos em situações diferentes de parâmetro, de processo ou tempo. A matéria-prima foi fixada em poliéster semi-opaco com seção transversal redonda. Com isso, os Títulos (X1) e Filamentos (X2) estudados variam de 115 a 510 Denier e 34 a 96 Filamentos. A força de estiragem (X3) e o alongamento (X4) deste grupo de matéria-prima abrange a faixa de 40 a 212 cN e 101 a 135 %, respectivamente. As variáveis de X1 a X4 formam o grupo da matéria-prima. Na análise de variáveis de processo, que de sua interação resulta o volume do fio,

aparecem as variáveis D/Y (X7) e Temperatura do segundo forno (X13), variando de 1,52 a 2,15 e 0 a 240°C, respectivamente. Em um outro grupo, aparecem todas as sobre-alimentações (X8, X9 e X10) que variam entre 0 e -8,4%. Um grupo característico de variáveis é composto somente de variáveis manipuladas do processo, compreendido por Velocidade de produção (X5), Taxa de Estiragem (X6), Temperatura do forno de texturização (X11, forno curto e X12 forno longo), variando de 400 a 950 m/min, 1,50 a 1,80, e 200 a 550 °C. Deste modo, a matriz de entrada será 13 x 235. A “Figura 40” mostra o Dendograma das variáveis de entrada com os grupos encontrados por ele. Esta estrutura de apresentação de dados assemelha-se a uma árvore cujas raízes podem formar grupos (ou *clusters*) de acordo com o grau de similaridade entre as variáveis. Cada vez que um grupo é quebrado tem-se um indício de redução da similaridade.

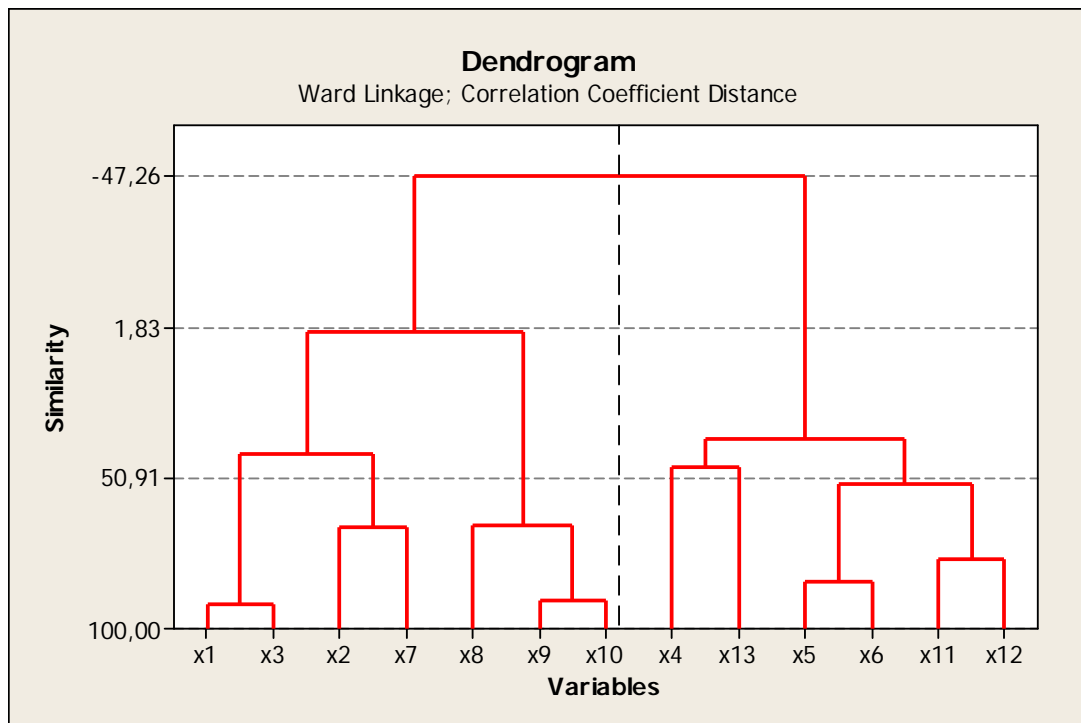


Figura 40 – Dendograma de variáveis de entrada

Para melhor entendimento do processo, pode-se fazer uma análise de cluster onde grupos de variáveis que possuem relações fortes serão facilmente identificadas. Esta Análise de Cluster utilizou a correlação como medida de similaridade e o Método de Ward como mecanismo de ligação. Este método procura agrupar as variáveis de modo a minimizar a variância das unidades “dentro” dos grupos formados, enquanto se maximiza a variância “entre” estes

grupos. Percebe-se a formação de dois grupos bem distintos de variáveis X, marcados por uma grande dissimilaridade (linha pontilhada vertical). Esta dissimilaridade se deve, além do valor da correlação, ao sinal da correlação entre as variáveis. Para o primeiro grupo, formado pelas variáveis  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_2$ ,  $x_7$ ,  $x_8$ ,  $x_9$  e  $x_{10}$ , o nível de similaridade está acima de 51%, com destaque para a similaridade entre as correlações de  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_9$  e  $x_{10}$  (92,06%).

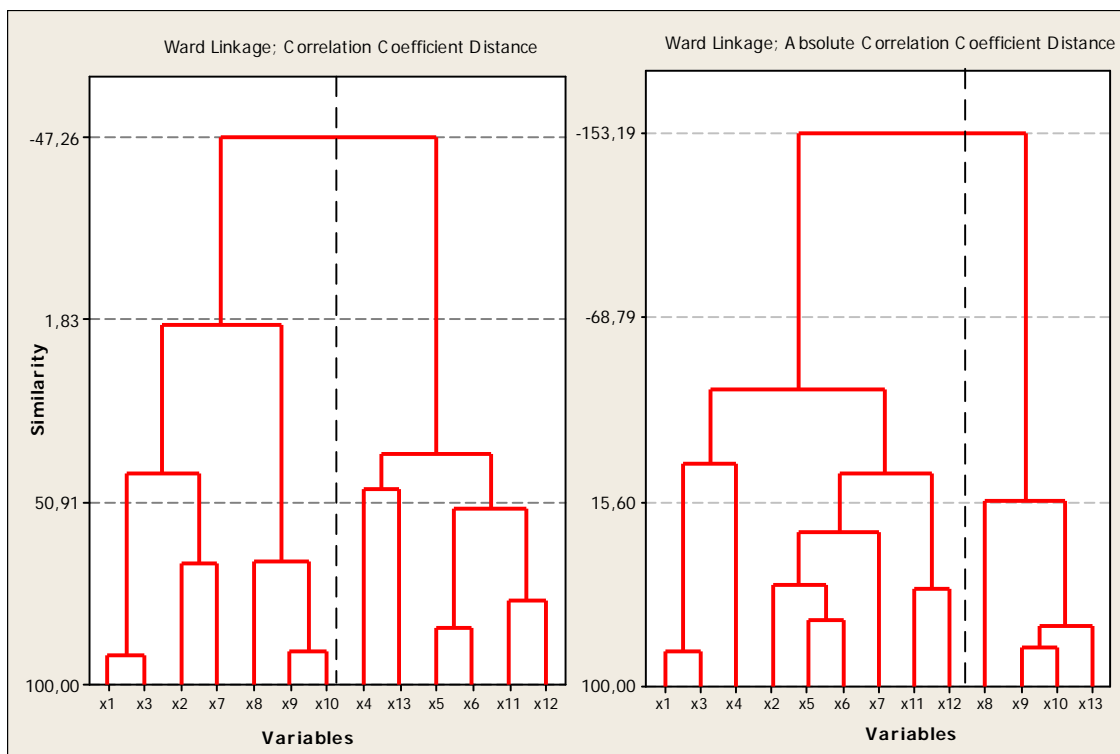


Figura 41 – Dendogramas combinados (Correlação x Módulo de Correlação).

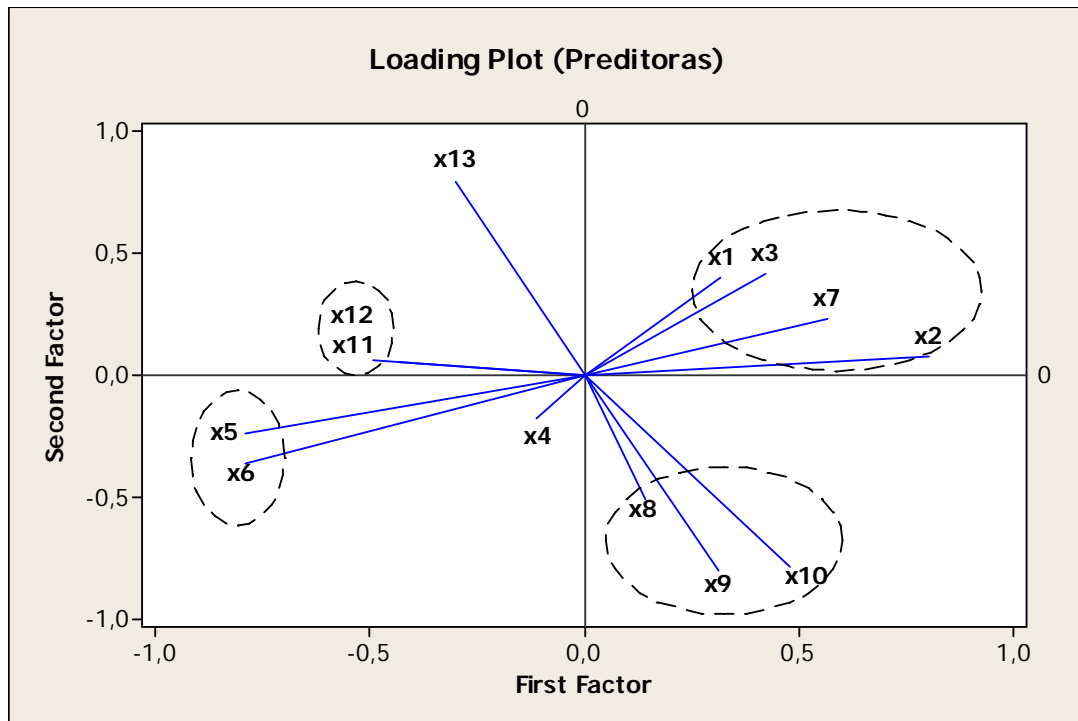


Figura 42 – Escores do fator 1 versus 2

Considerando-se comparativamente o valor absoluto da correlação, nota-se um rearranjo dos grupos, embora muitas variáveis ainda permaneçam nos grupos anteriores. Desta análise, depreende-se que o nível de correlação é suficiente, inclusive, para agrupá-las com moderada intensidade. Este é um outro indício que a correlação no conjunto de preditoras não pode ser desconsiderada.

A figura 42 mostra, utilizando uma análise de fatores baseada em extração por componentes principais, os mesmos grupos de variáveis da Análise de Cluster. Para evitar os efeitos da multicolinearidade, variáveis com correlações altas poderiam ser eliminadas e/ou substituídas por aquelas com as quais se correlacionem intensamente.

Para as variáveis de saída, separaram-se as três variáveis de processo extremamente relevantes para a qualidade do produto final e três indicadores da qualidade do produto que influenciam todas as propriedades dos tecidos que irão empregar estes fios.

A matriz de dados de entrada e saída, X e Y (esquemáticamente representada na figura 43 a seguir), contém seis fatores importantes para a qualidade do produto, três variáveis de processo, que foram coletados diretamente das folhas de controle de processo, e quatro fatores intrínsecos do produto, que foram coletados do laboratório de serigrafia.

	Variáveis de processo					Variáveis da Qualidade				
Observações	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	...	...	X <sub>1m</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	...	Y <sub>1r</sub>
	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	...	...	X <sub>2m</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	...	Y <sub>2r</sub>
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	X <sub>n1</sub>	X <sub>n2</sub>	X <sub>n3</sub>	...	...	X <sub>nm</sub>	Y <sub>n1</sub>	Y <sub>n2</sub>	...	Y <sub>nr</sub>

Figura 43 – Representação da Matriz

### 5.5.1 Análise de regressão múltipla

A figura 44 a seguir representa a análise de Y1. Nota-se um ajuste bastante alto para a resposta de interesse ( $R^2$  adj. = 90,6%), a significância estatística do modelo (P-value = 0,000) e Durbin-Watson igual a 2,02625, o que representa a ausência de autocorrelação serial conforme mostra a figura 44. Individualmente, apenas as variáveis  $x_8$ ,  $x_{12}$  e  $x_{13}$  não apresentam significância para  $\alpha = 5\%$ .

As variáveis  $x_1$ ,  $x_3$  e  $x_{10}$  foram aquelas que apresentaram os maiores VIF's, todos maiores que 5. Avaliando-se a soma de quadrados seqüencial (Seq SS) na Figura 45, nota-se que as variáveis mais importantes na explicação do comportamento de Y1 são, nesta ordem,  $x_1$ ,  $x_5$  e  $x_6$ .

Na figura 46, observa-se que os resíduos deste modelo são aproximadamente normais. O gráfico de resíduos versus valor ajustado (*Fitted Value*) não apresenta aparentemente padrões de heteroscedasticidade, tais como os formatos de funil ou borboleta, como sugere Montgomery (2001).

O gráfico de “resíduos padronizados versus ordem” sugere um padrão aleatório de distribuição dos resíduos, sem indícios de clusters, tendências, misturas ou oscilação excessiva. Há poucos resíduos além dos limites de -2 e +2, o que sugere a ausência de *outliers*.

The regression equation is

$$Y1 = -184 + 0,0922 x1 + 0,0831 x2 + 0,285 x3 - 0,447 x4 + 0,0124 x5 + 163 x6 - 14,3 x7 - 0,191 x8 + 2,23 x9 - 2,82 x10 - 0,0490 x11 - 0,0020 x12 - 0,00889 x13$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-184,36	18,77	-9,82	0,000	
x1	0,09221	0,01070	8,62	0,000	8,587
x2	0,08306	0,02605	3,19	0,002	2,417
x3	0,28466	0,03276	8,69	0,000	9,493
x4	-0,4466	0,1075	-4,15	0,000	2,651
x5	0,012440	0,004205	2,96	0,003	3,542
x6	163,467	9,600	17,03	0,000	4,421
x7	-14,270	3,436	-4,15	0,000	1,646
x8	-0,1914	0,2167	-0,88	0,378	1,704
x9	2,2296	0,6839	3,26	0,001	4,021
x10	-2,8234	0,6862	-4,11	0,000	5,888
x11	-0,04904	0,01096	-4,48	0,000	2,097
x12	-0,00200	0,01073	-0,19	0,853	1,899
x13	-0,008889	0,008410	-1,06	0,292	4,082

S = 4,83160    R-Sq = 91,1%    R-Sq(adj) = 90,6%

Durbin-Watson statistic = 2,02625

Figura 44 – Análise de Regressão para Y1.

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	13	52925,7	4071,2	174,40	0,000
Residual Error	221	5159,1	23,3		
Total	234	58084,8			

Source	DF	Seq SS
x1	1	24481,8
x2	1	2569,0
x3	1	2651,7
x4	1	929,5
x5	1	10491,9
x6	1	10449,6
x7	1	342,2
x8	1	65,3
x9	1	1,0
x10	1	402,6
x11	1	513,9
x12	1	1,0
x13	1	26,1

Figura 45 – Análise de Variância para o modelo de regressão de Y1 e Somas de quadrados parciais.

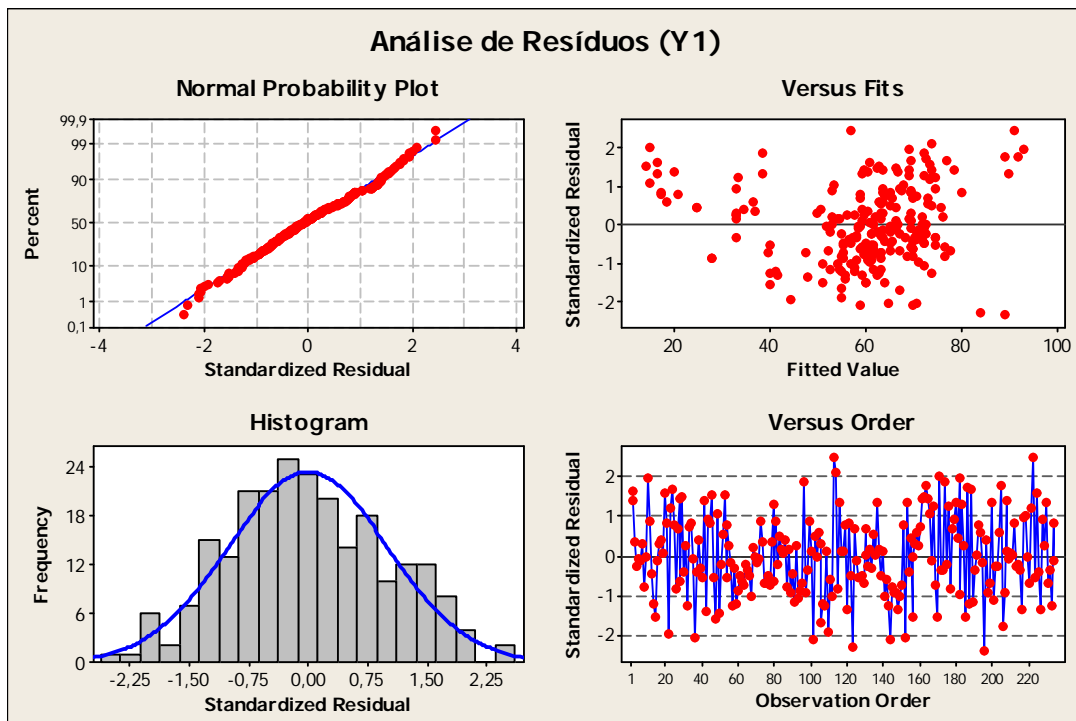


Figura 46 – Análise de resíduos para a resposta Y1.

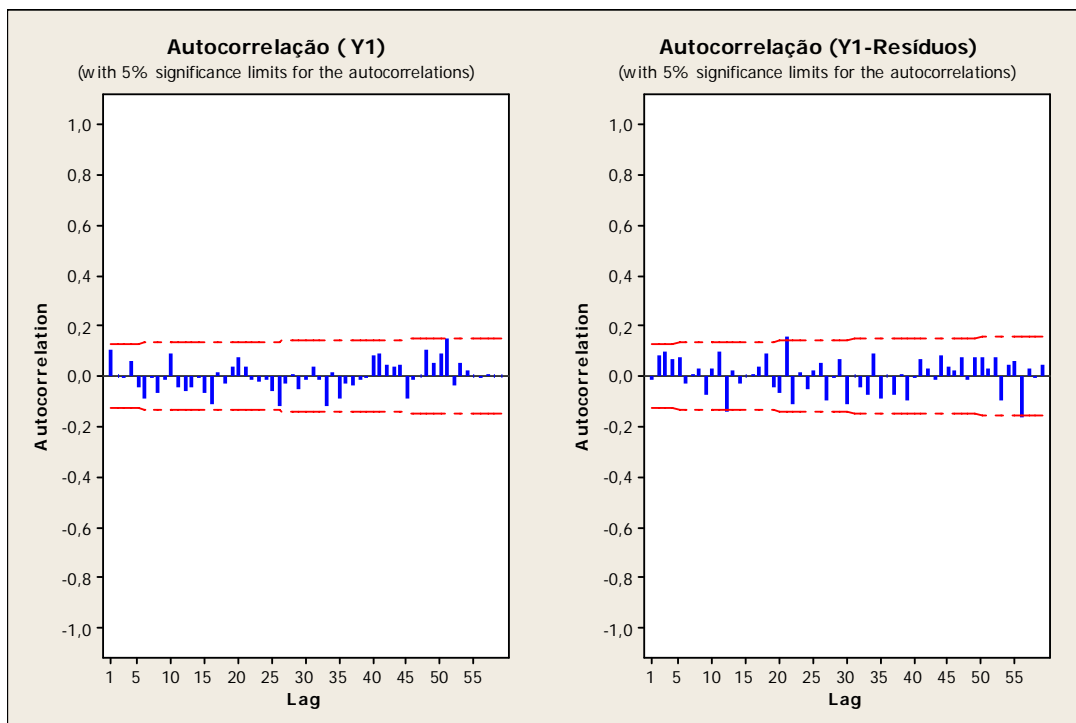


Figura 47 – Análise de autocorrelação serial para Y1 e para seus resíduos.



condição de 21.692. A presença de multicolinearidade não implica em mudança nos valores dos regressores, mas sim, no aumento da variância para a previsão, ou seja, as previsões feitas com modelos formados por variáveis de entrada correlacionadas tendem a fornecer estimativas menos precisas do que aqueles isentos de correlação. Myers e Montgomery (2002) afirmam ainda que, mesmo se a multicolinearidade estiver presente, o modelo de regressão ainda será útil se as novas observações previstas pertencerem ao domínio (ou espaço experimental) da variável  $x$ . Entretanto, a previsão de observações por extrapolação estará bastante comprometida quanto à sua precisão. A seguir apresentam-se as demais análises de regressão.

**Tabela 8 – Modelos de regressão OLS para as seis características de resposta.**

Coeficientes	Modelos Completos					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
$b_0$	<b>-184,361<sup>1</sup></b>	<b>-136,785</b>	<b>186,145</b>	<b>96,763</b>	<b>2,288</b>	21,933
$b_1$	<b>0,092</b>	<b>0,093</b>	<b>0,656</b>	<b>0,015</b>	<b>-0,003</b>	<b>-0,024</b>
$b_2$	<b>0,083</b>	0,013	-0,018	<b>-0,085</b>	-0,001	<b>-0,127</b>
$b_3$	<b>0,285</b>	<b>0,228</b>	-0,023	<b>-0,029</b>	<b>0,003</b>	<b>0,048</b>
$b_4$	<b>-0,447</b>	<b>-0,460</b>	-0,038	<b>0,375</b>	<b>-0,012</b>	0,126
$b_5$	<b>0,012</b>	<b>0,010</b>	<b>0,007</b>	<b>0,006</b>	0,000	<b>-0,009</b>
$b_6$	<b>163,467</b>	<b>144,604</b>	<b>-120,830</b>	<b>-68,191</b>	<b>2,211</b>	-1,594
$b_7$	<b>-14,270</b>	<b>-20,577</b>	2,229	-0,812	<b>0,158</b>	-3,626
$b_8$	-0,191	0,099	0,101	<b>0,311</b>	<b>0,023</b>	<b>-0,462</b>
$b_9$	<b>2,230</b>	<b>2,596</b>	-0,367	<b>-0,542</b>	0,022	0,566
$B_{10}$	<b>-2,823</b>	<b>-3,740</b>	<b>-1,704</b>	0,132	0,006	<b>1,550</b>
$B_{11}$	<b>-0,049</b>	<b>-0,039</b>	0,008	<b>-0,017</b>	-0,001	<b>0,025</b>
$B_{12}$	-0,002	-0,011	<b>-0,021</b>	<b>0,010</b>	<b>0,002</b>	<b>0,046</b>
$B_{13}$	-0,009	-0,011	-0,002	<b>0,009</b>	0,000	<b>-0,096</b>
$R^2_{adj.}$	<b>90,60%</b>	<b>86,60%</b>	<b>99,80%</b>	<b>80,90%</b>	<b>73,70%</b>	<b>87,90%</b>
S	4,831	5,445	2,474	1,778	0,194	3,368
Darbin-Watson	2,026	2,016	2,283	2,129	2,136	2,227

<sup>(1)</sup> – Valores em negrito representam coeficientes significativos ( $P$ -value < 5%).

Tabela 9 apresenta os valores dos VIF's, que são iguais para todos os modelos de regressão apresentados anteriormente, uma vez que o conjunto de preditoras utilizado é o mesmo. Destacam-se em negrito, os VIF's considerados altos.

**Tabela 9 – Valores de VIF's para o modelo MLR completo.**

$X_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$
VIF	<b>8,58</b>	2,42	<b>9,49</b>	2,65	3,54	<b>4,42</b>	1,65	1,70	4,02	<b>5,89</b>	2,09	1,89	4,08

Há uma explicação bastante simples para a ocorrência de multicolinearidade no caso do processo de texturização. Neste caso, os dados utilizados para a modelagem foram obtidos via metodologia determinística. Baseado em equações diferenciais descritas no capítulo 2, cálculos intermediários facilitaram a geração de equações para as variáveis que se desejava calcular. A existência de detalhes importantes nestes cálculos intermediários permite inferir que a qualidade destas equações intermediárias influencia diretamente na qualidade das respostas preditas, além da qualidade dos dados iniciais usados.

Uma maneira bastante simples de se corrigir problemas com multicolinearidade é eliminar as variáveis que apresentam correlações fortes. Os dendogramas das figuras 40 e 41 anteriores mostraram que as maiores similaridades devido à correlação se dão entre os pares de variáveis  $x_1$  e  $x_3$ ,  $x_5$  e  $x_6$ ,  $x_9$  e  $x_{10}$ . Para saber qual variável do par deveria ser eliminada para corrigir o problema, optou-se por aquela com o menor valor para a “Soma de quadrados sequencial”, ou seja, a variável do par que possui o menor coeficiente. Desse modo, optou-se por se manter as variáveis  $x_1$ ,  $x_5$  e  $x_{10}$ .

```
The regression equation is
Y1 = 31,3 + 0,161 x1 + 0,141 x2 - 0,025 x4 + 0,0605 x5 - 35,5 x7 + 0,259 x8
      - 4,37 x10 - 0,0481 x11 + 0,0181 x12 - 0,0537 x13
```

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	31,35	19,56	1,60	0,110	
x1	0,161189	0,008068	19,98	0,000	2,005
x2	0,14095	0,03697	3,81	0,000	1,998
x4	-0,0251	0,1050	-0,24	0,812	1,037
x5	0,060492	0,004992	12,12	0,000	2,048
x7	-35,539	5,005	-7,10	0,000	1,433
x8	0,2595	0,3098	0,84	0,403	1,428
x10	-4,3671	0,9160	-4,77	0,000	4,304
x11	-0,04805	0,01688	-2,85	0,005	2,042
x12	0,01815	0,01643	1,10	0,270	1,826
x13	-0,05371	0,01237	-4,34	0,000	3,624

S = 7,54338    R-Sq = 78,1%    R-Sq(adj) = 77,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	10	45338,6	4533,9	79,68	0,000
Residual Error	224	12746,2	56,9		
Total	234	58084,8			

Figura 49 – Análise de regressão múltipla omitindo-se as variáveis correlacionadas.

A análise da figura 49 mostra que os VIF's diminuem consideravelmente com a remoção das variáveis  $x_3$ ,  $x_6$  e  $x_9$ . Não obstante disto, a explicação do modelo cai bastante (de

90,6% para 77,1%), com um aumento considerável da variância/desvio ( $S_{\text{completo}}=4,83$ ;  $S_{\text{reduzido}}=7,54$ ). A tabela 10 mostra o resultado deste procedimento aplicado a todas as respostas.

Tabela 10 – Análise de regressão múltipla para modelos reduzidos.

Coef.	Reduzido					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
b0	31,348	<b>45,751</b>	<b>78,678</b>	<b>32,095</b>	<b>4,851</b>	<b>33,511</b>
b1	<b>0,161</b>	<b>0,147</b>	<b>0,661</b>	<b>0,012</b>	<b>-0,003</b>	<b>-0,009</b>
b2	<b>0,141</b>	0,057	0,004	<b>-0,078</b>	-0,001	<b>-0,109</b>
b3	-	-	-	-	-	-
b4	-0,025	-0,032	<b>-0,764</b>	0,000	-0,004	0,010
b5	<b>0,060</b>	<b>0,053</b>	<b>-0,027</b>	<b>-0,014</b>	<b>0,001</b>	<b>-0,009</b>
b6	-	-	-	-	-	-
b7	<b>-35,539</b>	<b>-39,204</b>	<b>13,315</b>	<b>5,959</b>	-0,099	<b>-4,806</b>
b8	0,259	0,558	0,067	<b>0,238</b>	<b>0,027</b>	<b>-0,355</b>
b9	-	-	-	-	-	-
b10	<b>-4,367</b>	<b>-4,776</b>	-0,236	<b>0,827</b>	-0,016	<b>1,767</b>
b11	<b>-0,048</b>	<b>-0,036</b>	0,003	<b>-0,020</b>	-0,001	<b>0,024</b>
b12	0,018	0,005	<b>-0,029</b>	0,005	<b>0,002</b>	<b>0,048</b>
b13	<b>-0,054</b>	<b>-0,052</b>	<b>0,027</b>	<b>0,026</b>	0,000	<b>-0,097</b>
$R^2_{\text{adj.}}$ :	<b>77,10%</b>	<b>74,80%</b>	<b>99,30%</b>	<b>48,90%</b>	<b>70,10%</b>	<b>87,60%</b>
S	7,543	7,466	4,806	2,912	0,207	3,398

<sup>(1)</sup> – Valores em negrito representam coeficientes significativos ( $P\text{-value} < 5\%$ ).

Nota-se que a exclusão dos termos correlacionados diminui a explicação e aumenta a variância de todos os modelos. Como se acredita que a manutenção de todas as 13 variáveis é importante para o entendimento do processo, ao passo que todas as variáveis devem ser definidas para que o processo funcione, se faz necessário estudar uma outra abordagem para contornar o problema das correlações nas variáveis de entrada.

### 5.5.2 Regressão por componentes principais

Aplicando-se o método de mínimos quadrados ordinários (OLS) aos escores dos componentes principais, obtidos via decomposição espectral da matriz de variância-covariância (ou correlação) do conjunto de predictoras, tem-se:

The regression equation is

$$Y1 = 60,2 - 1,82 PC1x + 1,57 PC2x - 7,17 PC3x + 2,47 PC4x - 2,27 PC5x - 2,79 PC6x - 6,95 PC7x + 8,17 PC8x$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	60,2230	0,4330	139,09	0,000	
PC1x	-1,8179	0,2361	-7,70	0,000	1,000
PC2x	1,5654	0,2613	5,99	0,000	1,000
PC3x	-7,1654	0,2837	-25,26	0,000	1,000
PC4x	2,4707	0,3929	6,29	0,000	1,000
PC5x	-2,2665	0,4473	-5,07	0,000	1,000
PC6x	-2,7938	0,5406	-5,17	0,000	1,000
PC7x	-6,9511	0,6216	-11,18	0,000	1,000
PC8x	8,1676	0,6851	11,92	0,000	1,000

S = 6,63737    R-Sq = 82,9%    R-Sq(adj) = 82,3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	48128,4	6016,1	136,56	0,000
Residual Error	226	9956,4	44,1		
Total	234	58084,8			

Figura 50 – Análise de regresso de Y1 utilizando PCR com 8 componentes.

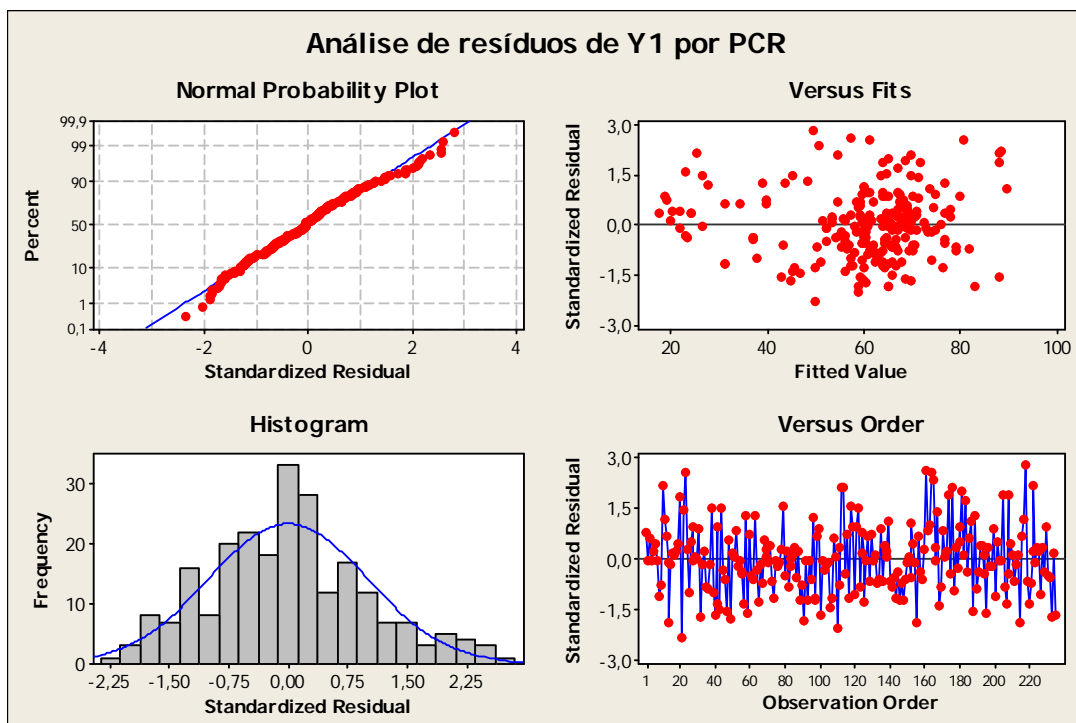


Figura 51 – Análise de resíduos de Y1 por PCR.

Tabela 11 – Modelos de regressão PCR para as seis características de resposta.

Coeficientes	Modelos Completos					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
$b_0$	60.2230	56,4855	167.463	23,9381	4,43272	15,4961
$b_1$	-1.8179	-2,4476	12.4353	0,8631	-0,11358	0,2909
$b_2$	1.5654	1,4222	16.0386	1,0347	-0,09150	-4,3428
$b_3$	-7.1654	-6,5038	-26.9260	-0,1071	0,06798	-1,6791
$b_4$	2.4707	1,9094	14.6771	0,1965	-0,11847	0,6688
$b_5$	-2.2665	-2,0275	0.9599	1,3789	0,04000	-3,5532
$b_6$	-2.7938	-2,6106	4.379	0,2041	-0,04003	1,9749
$b_7$	-6.9511	-4,8875	2.169	1,7437	-0,10507	0,6569
$b_8$	8.1676	7,6426	11.079	-1,4276	-0,03426	-3,7766
$R^2_{adj.}$ :	<b>82,3%</b>	<b>77,2%</b>	<b>94,3%</b>	<b>56,8%</b>	<b>70,8%</b>	<b>84,8%</b>

Tabela 12 – Comparação entre modelos de regressão PCR.

$R^2_{adj.}$ (PCR 8 componentes):	<b>82,3%</b>	<b>77,2%</b>	<b>94,3%</b>	<b>56,8%</b>	<b>70,8%</b>	<b>84,8%</b>
$R^2_{adj.}$ (PCR 10 componentes):	87,4%	83,2%	97,4%	68,4%	71,1%	86,7%
$R^2_{adj.}$ (PCR 13 componentes):	90,6%	86,6%	99,8%	80,9%	73,7%	87,9%

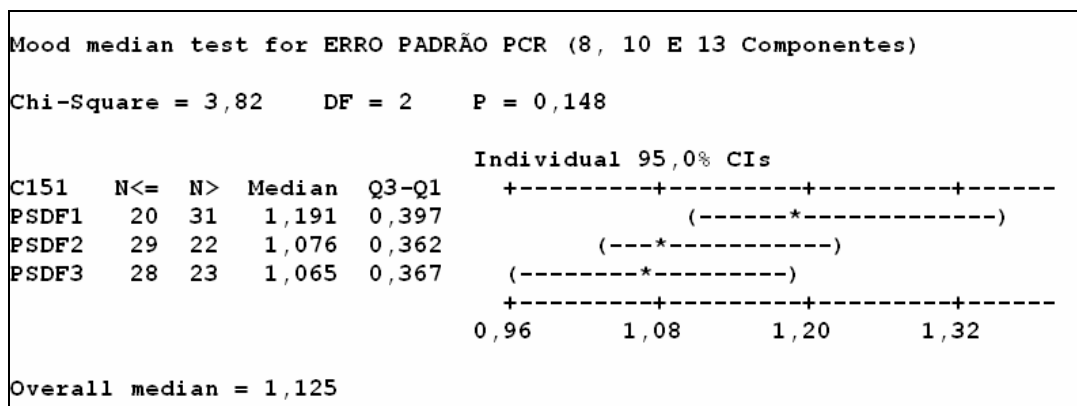


Figura 52 – Comparação entre os Erros-padrão para os modelos de regressão PCR.

Nota-se que a utilização de 8 componentes principais conduz a ajustes melhores do que aqueles obtidos com a eliminação das variáveis correlacionadas. Porém, estes resultados não são tão bons quanto aqueles alcançados pelos modelos completos. A figura 53 a seguir mostra os resultados utilizando todos os componentes. Neste caso, os ajustes são exatamente iguais àqueles demonstrados pelos modelos completos, com os todos os coeficientes apresentando VIF's iguais a um, ou seja, sem os efeitos da multicolinearidade.

```

Mood median test for ERRO PADRÃO DE PCR

Chi-Square = 3,18    DF = 1    P = 0,075

C115  N<=  N>  Median  Q3-Q1  Individual 95,0% CIs
PSDF1  21  30   1,191  0,397  -----+-----+-----+-----
PSDF2  30  21   1,076  0,362  (-----*-----)
                                           (-----*-----)
                                           -----+-----+-----+-----
                                           1,10    1,20    1,30

Overall median = 1,149

A 95,0% CI for median(PSDF1) - median(PSDF2): (-0,014;0,268)
=====
Mann-Whitney Test and CI: PSDF1; PSDF2

           N  Median
PSDF1    51  1,1909
PSDF2    51  1,0755

Point estimate for ETA1-ETA2 is 0,0853
95,0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0,0136;0,1887)
W = 2884,0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0,0854

```

Figura 53 – Testes de Mediana de Mood e Mann-Whitney para diferenças entre os erros padrão de previsão com 8 e 10 componentes.

Não se percebem diferenças significativas entre as medianas dos erros de previsão para o modelo PCR com 8, 10 ou 13 componentes. Portanto, neste caso, será utilizado o modelo com 8 componentes.

The regression equation is

$$Y1 = 60,2 - 1,82 PC1xx + 1,57 PC2xx - 7,17 PC3xx + 2,47 PC4xx - 2,27 PC5xx - 2,79 PC6xx - 6,95 PC7xx + 8,17 PC8xx + 4,88 PC9xx + 4,96 PC10xx - 7,14 PC11xx + 2,07 PC12xx + 0,28 PC13xx$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	60,2230	0,3152	191,08	0,000	
PC1xx	-1,8179	0,1718	-10,58	0,000	1,000
PC2xx	1,5654	0,1902	8,23	0,000	1,000
PC3xx	-7,1654	0,2065	-34,70	0,000	1,000
PC4xx	2,4707	0,2860	8,64	0,000	1,000
PC5xx	-2,2665	0,3256	-6,96	0,000	1,000
PC6xx	-2,7938	0,3935	-7,10	0,000	1,000
PC7xx	-6,9511	0,4525	-15,36	0,000	1,000
PC8xx	8,1676	0,4987	16,38	0,000	1,000
PC9xx	4,8839	0,5555	8,79	0,000	1,000
PC10xx	4,9577	0,7012	7,07	0,000	1,000
PC11xx	-7,1430	0,8330	-8,57	0,000	1,000
PC12xx	2,0727	0,9605	2,16	0,032	1,000
PC13xx	0,276	1,382	0,20	0,842	1,000

S = 4,83160    R-Sq = 91,1%    R-Sq(adj) = 90,6%

Figura 54 – Modelo PCR com 13 preditoras/componentes.

### 5.5.3 Regressão por mínimos quadrados parciais

A seguir, apresenta-se uma seqüência de procedimentos compatível com a adoção do modelo de análise de regressão PLS. Primeiramente, executa-se uma análise de componentes principais, para se avaliar se a estrutura de correlação das matrizes X e Y são compatíveis com a aplicação desta técnica.

Eigenanalysis of the Correlation Matrix								
Eigenvalue	3,3781	2,7582	2,3399	1,2198	0,9410	0,6442	0,4873	0,4011
Proportion	0,260	0,212	0,180	0,094	0,072	0,050	0,037	0,031
Cumulative	0,260	0,472	0,652	0,746	0,818	0,868	0,905	0,936
Eigenvalue	0,3233	0,2029	0,1438	0,1081	0,0522			
Proportion	0,025	0,016	0,011	0,008	0,004			
Cumulative	0,961	0,977	0,988	0,996	1,000			

Figura 55 – Análise de Componentes Principais para 13 preditoras.

Nota-se que 8 componentes explicam 94% da estrutura de variação dos dados de entrada. Assim, podem-se utilizar os oito componentes com segurança na análise de regressão por PLS. A figura 56 mostra os coeficientes estimados utilizando estes componentes.

Regression Coefficients						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
Constant	-170,688	-135,972	-112,476	91,6255	4,35655	65,5632
x1	0,096	0,090	0,396	0,0089	-0,00169	-0,0042
x2	0,102	0,012	-0,315	-0,0931	0,00158	-0,0987
x3	0,277	0,244	0,774	-0,0136	-0,00211	-0,0224
x4	-0,365	-0,330	1,381	0,3293	-0,01924	-0,0898
x5	0,024	0,023	-0,047	-0,0023	0,00063	-0,0078
x6	146,604	128,840	-44,706	-56,4342	1,54420	-1,4586
x7	-15,999	-18,223	23,807	-2,7665	-0,13482	-9,3499
x8	-0,183	-0,072	-0,582	0,3436	0,03414	-0,8344
x9	1,680	1,401	2,549	-0,2761	0,01355	1,9169
x10	-2,349	-2,324	-1,831	0,3257	-0,01371	2,6004
x11	-0,029	-0,032	0,036	-0,0142	-0,00003	0,0410
x12	-0,031	-0,029	-0,006	0,0092	0,00056	0,0194
x13	-0,008	-0,007	0,024	0,0167	0,00012	-0,0669

Figura 56 – Coeficientes obtidos com PLS e 8 componentes principais.

Na figura 57, nota-se que o número ótimo de componentes que devem ser utilizados na modelagem individual de Y1 é de 8 componentes principais, ou seja, a partir de 8 componentes, a explicação do modelo não aumenta mais significativamente. O mesmo se aplica às demais respostas.

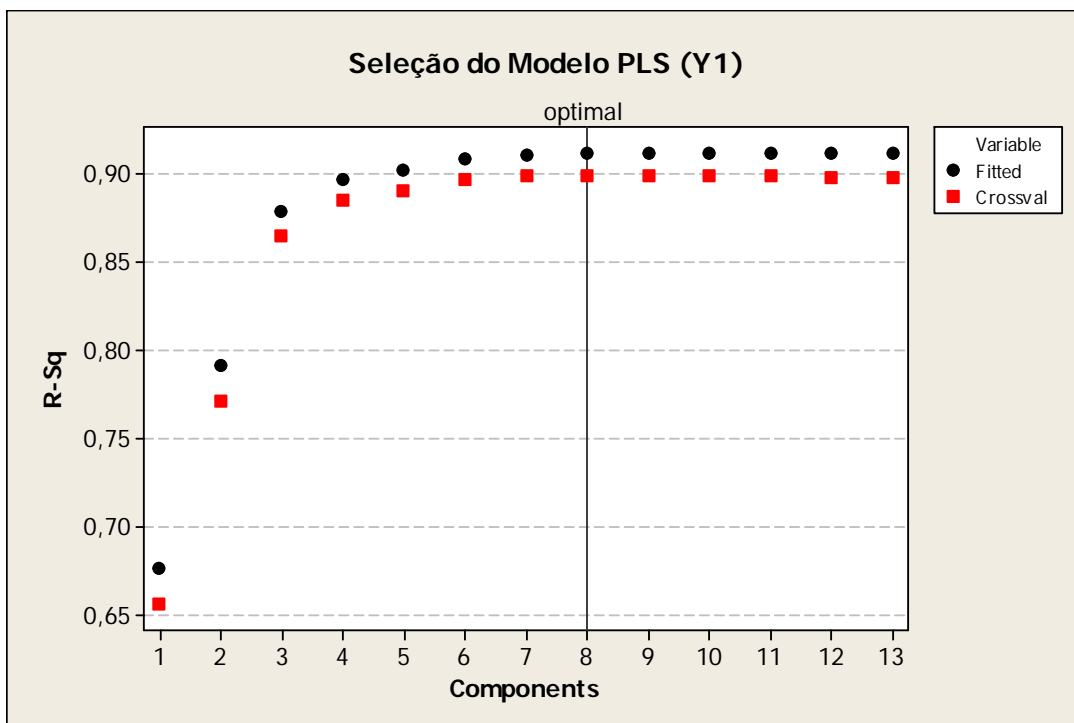


Figura 57 – Número ótimo de componentes principais no ajuste PLS para Y1

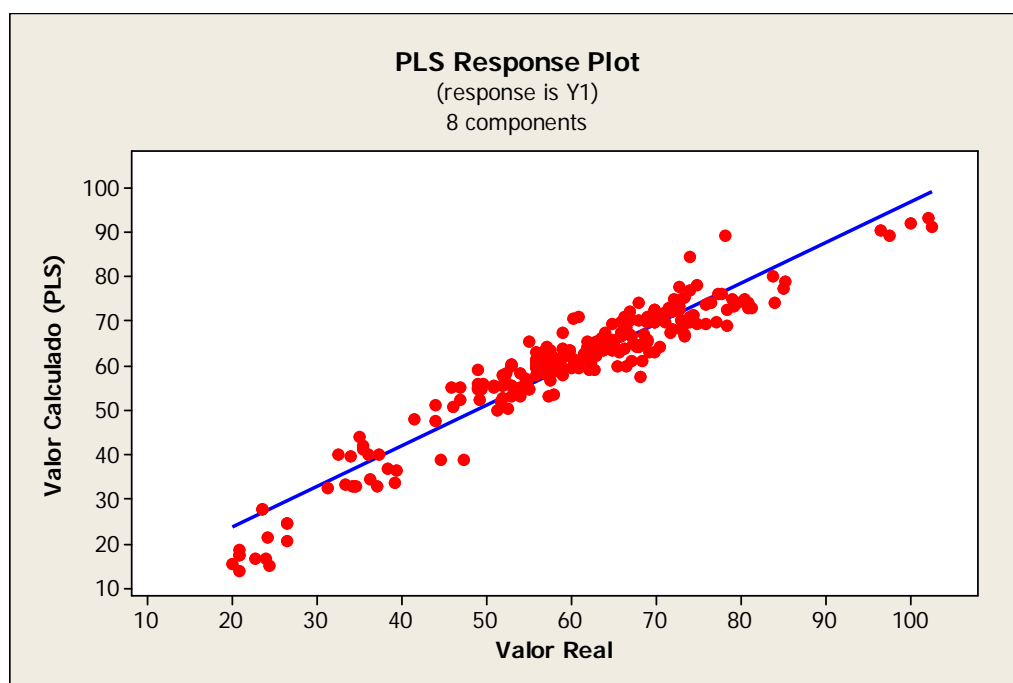


Figura 58 - Comparação entre o valor “Real” e “Valor calculado” por PLS (8 componentes).

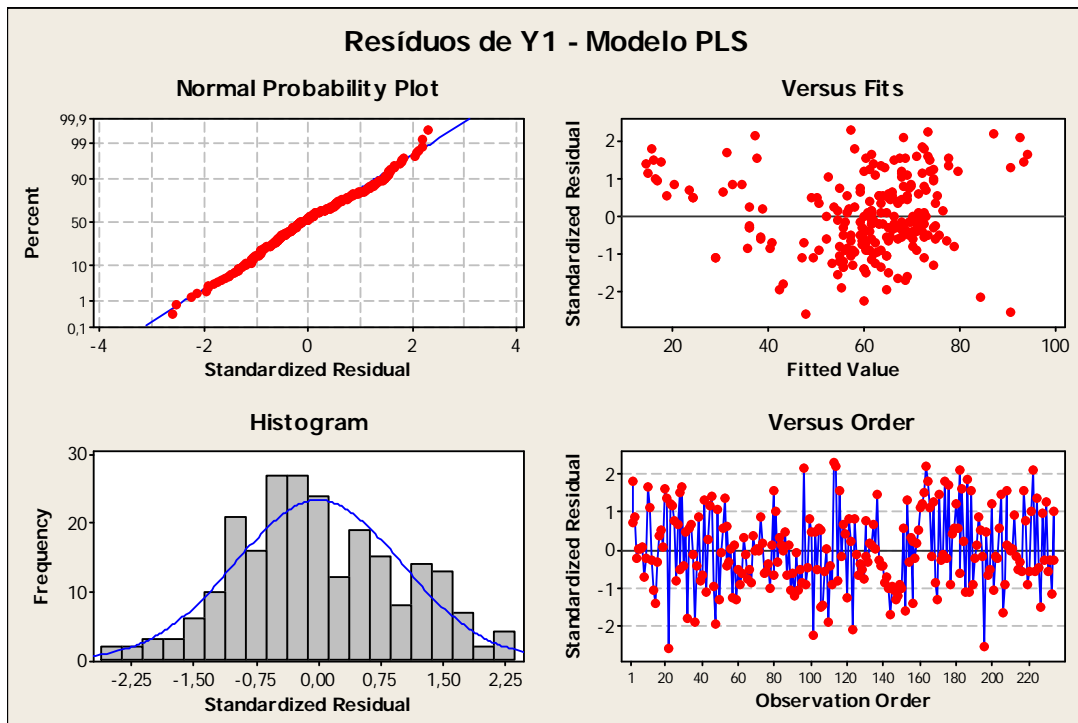


Figura 59 – Análise de Resíduos para Y1 com regressão PLS.

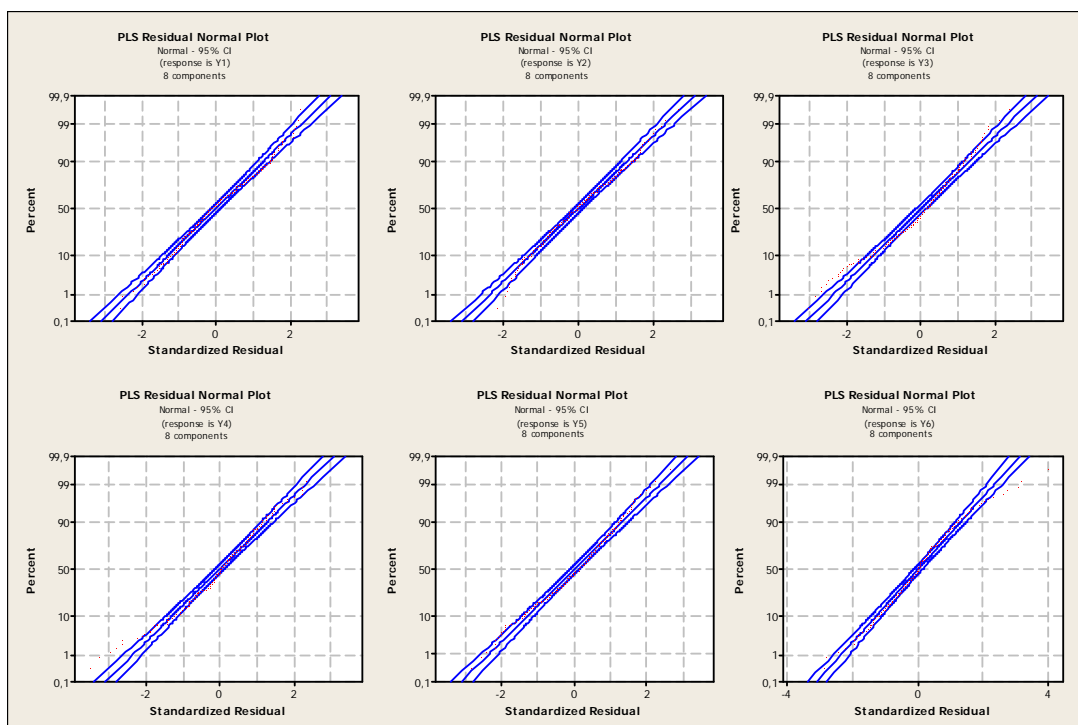


Figura 60 – Normalidade dos resíduos das 6 respostas obtidos por regressão PLS.

Regression Coefficients						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
Constant	-188,005	-147,959	-74,2080	93,3450	3,68262	43,4511
x1	0,092	0,085	0,4089	0,0104	-0,00182	-0,0083
x2	0,086	0,004	-0,2840	-0,0933	0,00088	-0,1221
x3	0,292	0,257	0,7353	-0,0172	-0,00161	-0,0065
x4	-0,401	-0,405	1,5649	0,3692	-0,01928	-0,0856
x5	0,014	0,010	-0,0111	0,0039	0,00046	-0,0125
x6	160,469	147,185	-93,3425	-64,1789	1,83785	7,2697
x7	-14,925	-20,938	28,5507	-0,3550	0,00422	-4,4295
x8	0,005	0,226	-1,3443	0,2026	0,03675	-0,7661
x9	1,457	1,496	2,5292	-0,4355	-0,00215	1,3759
x10	-2,816	-2,908	-0,2607	0,5621	-0,02456	2,2712
x11	-0,045	-0,034	0,0536	-0,0184	-0,00085	0,0134
x12	-0,006	-0,017	-0,0487	0,0104	0,00164	0,0554
x13	-0,016	-0,010	0,0351	0,0157	-0,00024	-0,0787

Figura 61 – Coeficientes obtidos por PLS e 10 componentes.

Regression Coefficients						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
Constant	-184,361	-136,785	186,145	96,7627	2,28769	21,9327
x1	0,092	0,093	0,656	0,0145	-0,00321	-0,0239
x2	0,083	0,013	-0,018	-0,0850	-0,00086	-0,1267
x3	0,285	0,228	-0,023	-0,0290	0,00258	0,0483
x4	-0,447	-0,460	-0,038	0,3750	-0,01233	0,1261
x5	0,012	0,010	0,007	0,0055	0,00028	-0,0091
x6	163,467	144,604	-120,830	-68,1914	2,21102	-1,5941
x7	-14,270	-20,577	2,229	-0,8120	0,15770	-3,6265
x8	-0,191	0,099	0,101	0,3109	0,02267	-0,4623
x9	2,230	2,596	-0,367	-0,5415	0,02210	0,5662
x10	-2,823	-3,740	-1,704	0,1324	0,00637	1,5501
x11	-0,049	-0,039	0,008	-0,0173	-0,00072	0,0249
x12	-0,002	-0,011	-0,021	0,0097	0,00158	0,0463
x13	-0,009	-0,011	-0,002	0,0093	0,00034	-0,0957

Figura 62 – Coeficientes de PLS obtidos com 13 componentes.

Das análises anteriores e da tabela a seguir, depreende-se que, aumentando-se o número de componentes utilizados, aumenta-se também a explicação dos modelos, enquanto que os coeficientes se aproximam daqueles obtidos com a regressão múltipla.

Tabela 13 – Comparação entre modelos de regressão múltipla e PLS.

Método	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (Regressão Múltipla):	90,6%	86,6%	99,8%	80,9%	73,7%	87,9%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PLS-8 componentes):	90,5%	86,4%	97,7%	79,2%	72,2%	85,1%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PLS-10 componentes):	91,0%	87,2%	98,1%	81,5%	73,5%	87,5%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PLS-13 componentes):	91,1%	87,3%	99,8%	81,9%	75,1%	88,5%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PCR-8 componentes):	82,3%	77,2%	94,3%	56,8%	70,8%	84,8%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PCR-10 componentes):	87,4%	83,2%	97,4%	68,4%	71,1%	86,7%
R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (PCR-13 componentes):	90,6%	86,6%	99,8%	80,9%	73,7%	87,9%

Nota-se que os maiores ajustes para as respostas ocorrem com PLS de 13 componentes e a própria regressão linear múltipla (MLR). Entretanto, os erros de previsão no método PLS são estatisticamente menores do que aqueles apresentados pela MLR. De acordo com a teoria, eliminando-se a influência da multicolinearidade, reduz-se o erro de previsão do modelo (MYERS e MONTGOMERY, 2002). Ou seja, embora os coeficientes sejam os mesmos, o erro de previsão será menor porque os coeficientes foram calculados levando-se em consideração uma combinação linear não correlacionada das preditoras. Neste caso, mostra-se que as características do algoritmo NIPALS superam as do algoritmo OLS, no que tange a ordem de grandeza dos erros de previsão.

```

Mann-Whitney Test and CI: PSDF1; PSEFit1

      N  Median
PSDF1  51  1,0650
PSEFit1 51  0,8039

Point estimate for ETA1-ETA2 is 0,2340
95,0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (0,1533;0,3209)
W = 3338,0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0,0000

=====
Mood Median Test: Erro de Previsão versus Método_

Mood median test for Erro de Previsão
Chi-Square = 6,63  DF = 1  P = 0,010

Individual 95,0% CIs
Método_      N<=  N>  Median  Q3-Q1  +-----+-----+-----+-----+
MLRerro      19  32   1,065  0,367  (------*-----)
PLSerro(13PC) 32  19   0,804  0,343  (-----*-----)
+-----+-----+-----+-----+
0,75        0,90        1,05        1,20

```

Figura 63 – Análises estatísticas da diferença entre os erros de previsão de MLR e PLS.

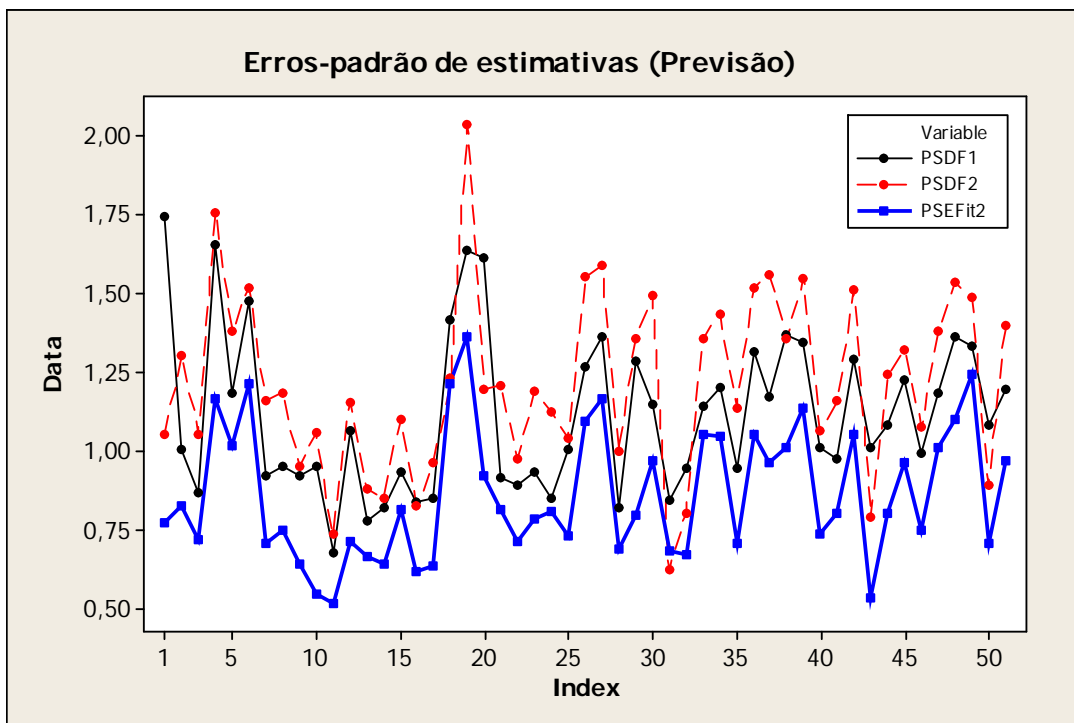


Figura 64 – Comparação entre os erros-padrão de estimativas dos métodos MLR, PCR e PLS.

Na figura 65, mostra-se uma comparação entre os erros-padrão de estimativas para a previsão de 51 observações, previstas segundo os métodos MLR, PCR e PLS. Nesta figura, PSDF1 é o erro de previsão associado ao modelo de regressão múltipla (MLR); PSDF2 é o erro de previsão obtido empregando-se o método PCR com 8 componentes e, PSEFit2, o erro de previsão do modelo PLS com 8 componentes.

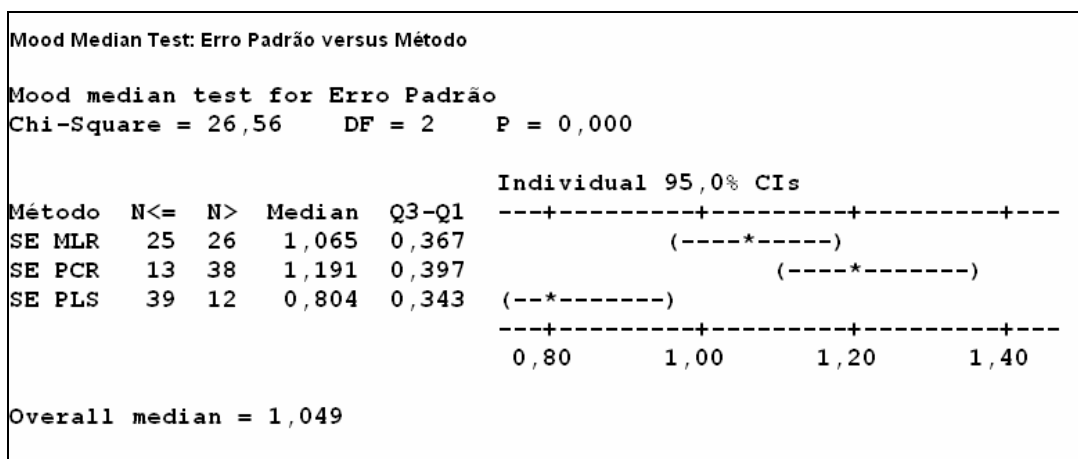


Figura 65 – Teste da Mediana de Mood para “Erro Padrão” versus “Método de Regressão”.

Como os dados de erro padrão não apresentam normalidade, estabeleceu-se a utilização do teste de hipótese não-paramétrico da Mediana de Mood para se avaliar diferenças significativas entre os erros de previsão de cada método utilizado. De acordo com os resultados apresentados na figura 66, o erro padrão do método PLS é significativamente menor do que aqueles apresentados pelos métodos PCR e MLR ( $P\text{-value} = 0,000$ ). É possível notar a diferença entre os intervalos de confiança de 95% para a mediana dos erros de previsão de PLS e MLR em relação aos erros de previsão do método PCR, neste caso. Não foi identificada diferença significativa entre os intervalos dos erros de MLR e PCR.

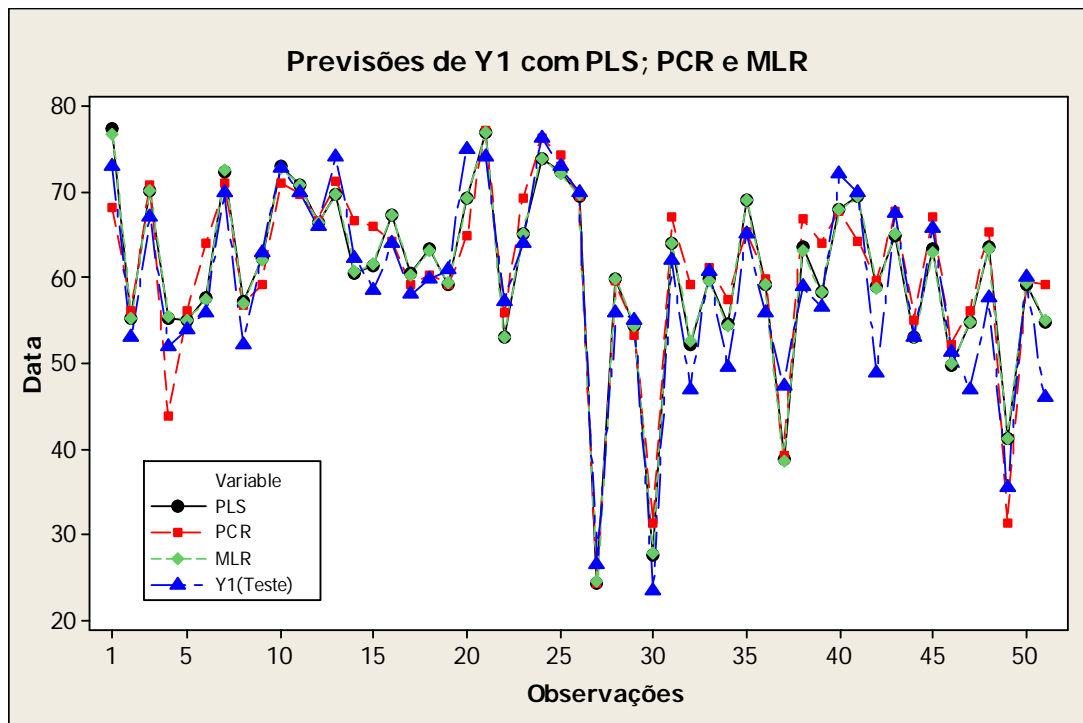


Figura 66 – Comparação entre os valores previstos para Y1 pelos métodos MLR, PCR e PLS.

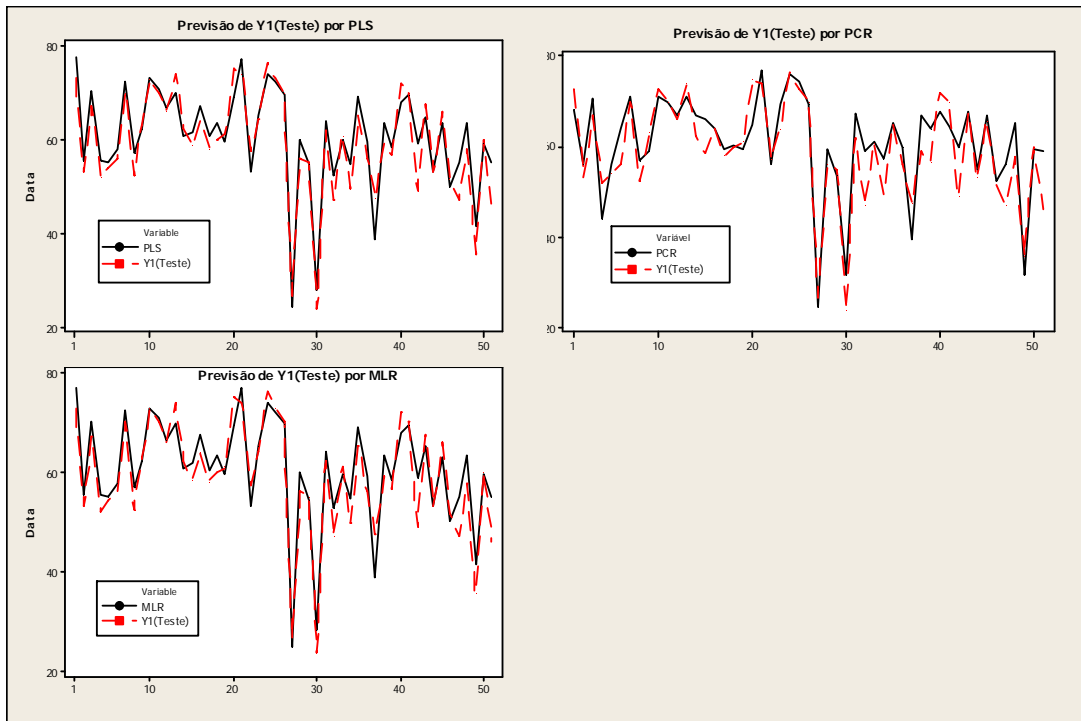


Figura 67 – Comparação de Y1(Teste) com os valores previstos por cada método.

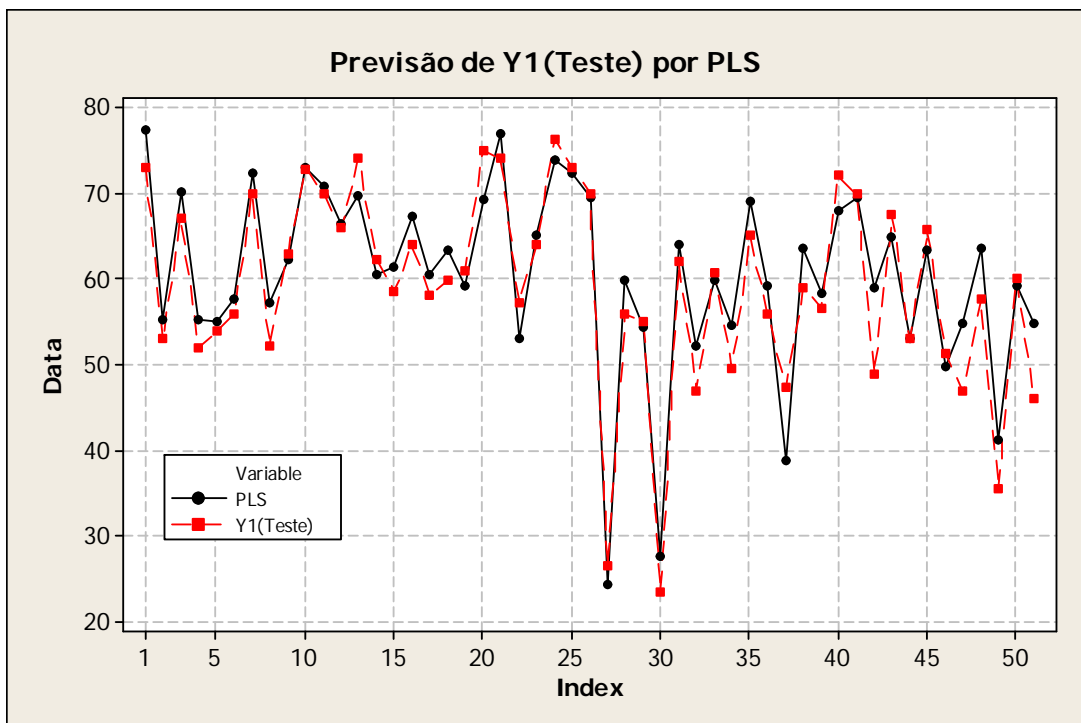


Figura 68 – Comparação entre o valor previsto por PLS e o valor real Y1(Teste).

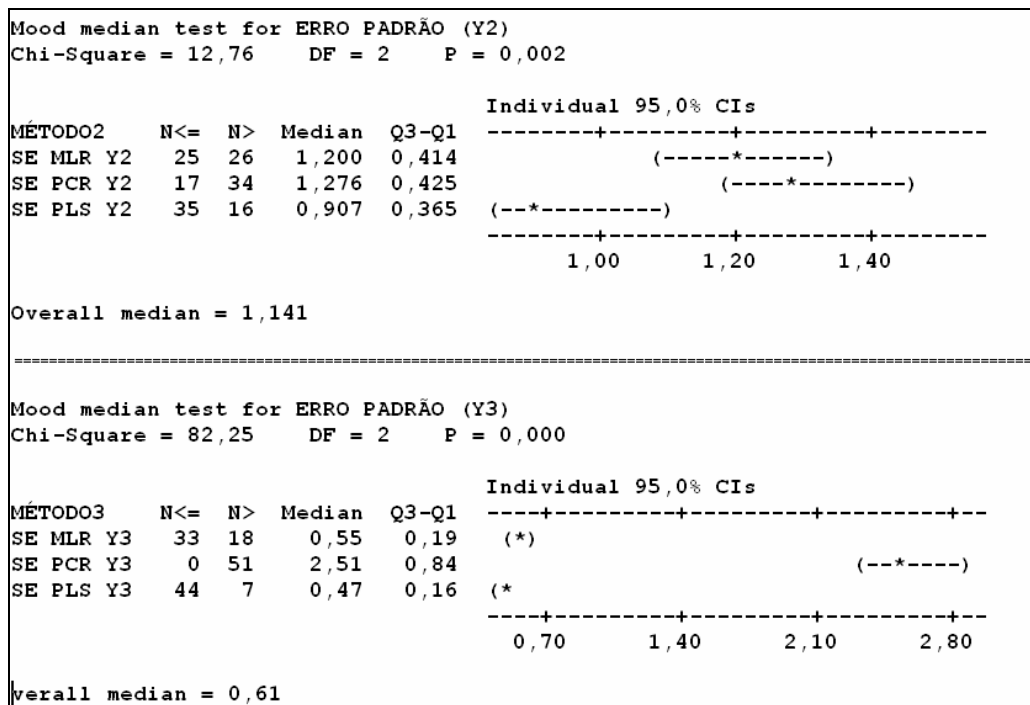


Figura 69 – Comparações entre erros padrão de Y2 e Y3.

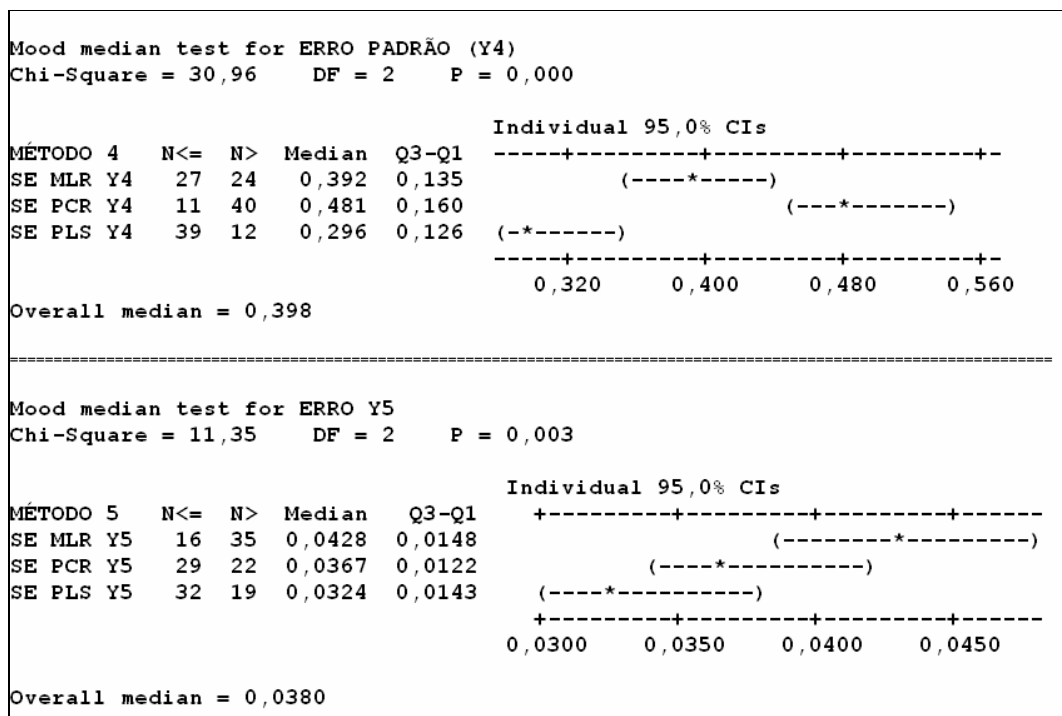


Figura 70 – Comparação entre erros padrão para Y4 e Y5.

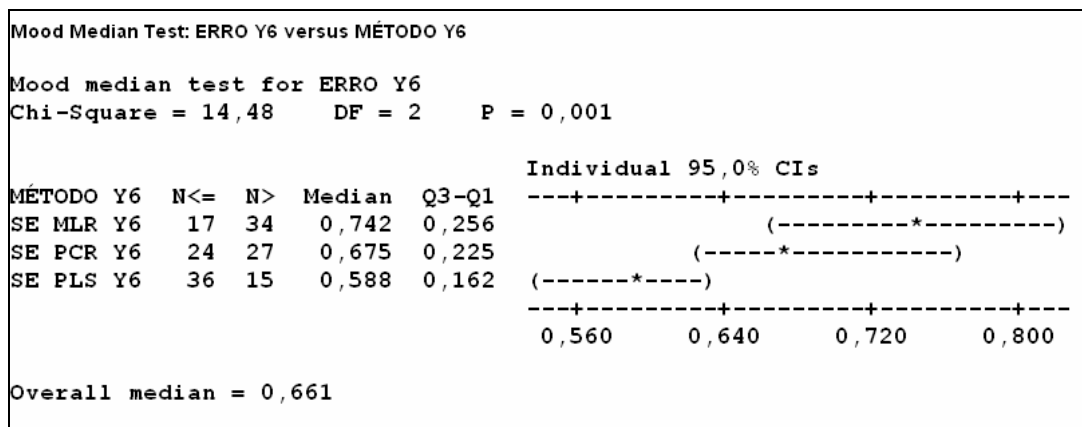


Figura 71 – Comparações entre erros padrão (Y6).

As análises anteriores indicaram um erro de previsão significativamente menor com o PLS como método de regressão do que com os métodos PCR e MLR. Isto foi observado nos testes de Mediana de Mood para todas as seis respostas de interesse, exceto para a resposta Y5, na qual se observa uma interseção entre os intervalos de confiança para a mediana dos erros de previsão entre os métodos PLS e PCR. De maneira geral, portanto, torna-se evidente que, para o processo de texturização em análise, os métodos que consideram a estrutura de correlação presente nas preditoras e respostas apresentam erros de previsão menores, para os mesmos ajustes.

Não se pode afirmar obviamente que todos os processos de manufatura e/ou de texturização, apresentarão estruturas correlacionadas como estas apresentadas neste trabalho. Entretanto, se estruturas semelhantes ocorrerem para qualquer outro banco de dados, o método poderia ser considerado como solução interessante.

## 6 Integração PLS-GA na otimização do processo

Os resultados apresentados no Capítulo 5 sugerem que o método PLS é bastante adequado quando um processo de manufatura é formado por um sistema complexo de variáveis independentes e dependentes que se correlacionam. Regressões tradicionais requerem não colinearidade e/ou realização de experimentos, os quais são onerosos em processos complexos, difíceis de serem feitos e na maioria das vezes, sem aplicabilidade prática. Em trabalhos futuros onde a comparação com outros métodos não seja necessária sugere-se o PLS como uma técnica de destacado desempenho na presença de conjuntos com muitas variáveis e poucos dados, multicolinearidade, dados faltantes ou *outliers*, este método parece ser adequado ao controle de processos têxteis. Desse modo, os dados podem ser coletados normalmente, como se faz via de regra para o controle de processos e rastreabilidade, e no momento em que se tem uma quantidade que se julgue suficiente, aplica-se o método PLS para a modelagem. Esta modelagem poderá ser atualizada com novos dados de produção ou ajustes de processo, promovendo um processo contínuo de melhoria.

Uma vez obtidos os modelos das características de interesse, pode-se utilizá-los como funções objetivo ou restrições em problemas de otimização. É disto que trata este capítulo: utilizar as formulações estabelecidas no Capítulo 4, utilizando as funções modeladas no Capítulo 5. Dada a natureza não-linear dos sistemas de otimização discutidos anteriormente, será utilizado o Algoritmo Genético para a solução do problema. Esta abordagem híbrida se denominará “Integração GA-PLS”.

Dadas as condições de contorno necessárias ao estabelecimento dos sistemas de equações do processo de otimização, apresenta-se a seguir um exemplo de otimização de um produto têxtil de interesse.

### 6.1 Exemplo de aplicação da abordagem PLS-GA

Dentro deste capítulo, serão enunciadas algumas possibilidades práticas de aplicação da metodologia proposta de modelagem por PLS e otimização por GA que podem promover a melhoria de *setups* de máquina, reduzindo os custos de produção ou qualidade, ou obtendo condições de matéria prima que proporcionem melhores características dos produtos finais. Estas configurações ótimas permitam o atendimento dos requisitos do mercado, seja na forma

de uma solicitação direta do cliente ou através da análise de um técnico do segmento em questão. Os clientes, de um modo geral, têm uma percepção de qualidade que pode ser traduzida em parâmetros da qualidade dos fios, que neste trabalho denominou-se “dados serimétricos”.

### **6.1.1 Atendendo à solicitação do cliente**

Se um cliente utiliza diferentes lotes de uma empresa ao longo do tempo, e recebe os relatórios com os dados serimétricos do fio, ele tenderá a ser mais crítico com relação à variação destes dados quando houver mudança de lotes. Se o cliente tem em seu corpo técnico pessoas com conhecimento na área têxtil, a solicitação de dados serimétricos específicos e variação dos mesmos é procedimento comum. Nas empresas de setores onde a normalização está presente, este procedimento de solicitação já é esperado e dificilmente atendido sem que diversos testes sejam feitos para se verificar sua viabilidade. Como se sabe, estes testes demandam recursos que poderiam ser mais bem aproveitados em atividade que gerem valor.

Tomando-se como exemplo que um cliente solicite um fio com título final de 165 denier e 34 filamentos, para uma aplicação de malharia. Ao se requisitar o produto na fábrica, deve-se especificar o fio como:

Título de 165 denier com 34 filamentos;

Tenacidade > 3,5 cN/den, pois malharia não requer grande esforço;

Alongamento entre 22 e 24 %, para se tomar cuidado com o tingimento;

Encolhimento em torno de 14%.

A partir dos dados acima, pode-se estabelecer os valores objetivo dos parâmetros de qualidade especificados (no capítulo de otimização estes valores são designados como  $T_i$ ). Desta maneira, existe um objetivo a ser alcançado que é a determinação dos níveis dos parâmetros de máquina e matéria prima que podem atender a esta especificação. Supondo-se que a matéria prima a ser utilizada já se encontre em estoque, seleciona-se um lote adequado para este produto final, o qual deverá ter um 265 denier com 34 filamentos. Este fio (POY) estará identificado por um lote de fiação, que tem características físicas já descritas em relatório de qualidade quando na especificação de matéria prima. Com esta informação, já estão disponíveis o objetivo e a matéria prima, faltando somente a definição dos parâmetros

de máquina e indicações de processo. Esta etapa pode ser definida através da modelagem e otimização proposta. O valor a ser definido para a diferença de  $D_i = |T_i - Y_i|$ ,  $D_i$  será de 1 unidade, pois, historicamente, o cliente não tem tido problemas com variações desta magnitude.

	X																	
	Título POY (Denier)	Filamentos	Força de Estragem (cN)	Alongamento (%)	Vel. de produção (m/min)	Taxa de Estragem	D/Y	Sobre alimentacao 2 (%)	Sobre alimentacao 3 (%)	Sobre alimentacao 4 (%)	Temp. do Forno curto (°C)	Temp. do Forno Longo (°C)	Temp. Segundo Forno (°C)					
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13					
	265	34	99	119														
					800	1.6	1.5	-4	-5	-7	200	350	150	LIE				
					800	1.8	2	-3	-4	-6	300	400	250	LSE				
														(Yi-Ti)<? 1				
														Di				
														FObj				
Tensao antes (cN)	Y1	-170.69	0.10	0.10	0.28	-0.36	0.02	146.60	-16.00	-0.18	1.68	-2.35	-0.03	-0.01	Yi	Ti		
Tensao após (cN)	Y2	-135.97	0.09	0.01	0.24	-0.33	0.02	128.84	-18.22	-0.07	1.40	-2.32	-0.03	-0.01	-157.8	74.3		
Denier (g/9km)	Y3	-112.48	0.40	-0.31	0.77	1.38	-0.05	-44.71	23.81	-0.58	2.55	-1.83	0.04	-0.01	222.8	165.0	57.8	1.00
Alongamento (%)	Y4	91.63	0.01	-0.09	-0.01	0.33	0.00	-56.43	-2.77	0.34	-0.28	0.33	-0.01	0.01	128.7	23.0	105.7	11164.63
Tenacidade (cN/den)	Y5	4.36	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	1.54	-0.13	0.03	0.01	-0.01	0.00	0.00	1.5	4.5	3.0	9.22
Encolhimento Leesona %	Y6	65.56	0.00	-0.10	-0.02	-0.09	-0.01	-1.46	-9.35	-0.83	1.92	2.60	0.04	0.02	48.2	14.0	34.2	17.91

Figura 72 – Exemplo de aplicação a otimizar.

Na figura 72, pode-se observar as suposições feitas em função dos dados requeridos pelo cliente, e conseqüentes atribuições feitas em função de dados históricos. Com relação aos parâmetros de máquina, estes também devem seguir a experiência ou necessidade da empresa no momento, visando maximizar a qualidade e reduzir custos. Desta maneira, sugeriu-se um conjunto de dados para o limite superior e inferior. As seis funções-objetivo utilizadas (Y1 a Y6), foram obtidas através do método PLS, adotando-se 8 componentes principais. Como se demonstrou anteriormente, os ajustes ( $R^2_{adj}$ ) destas respostas são, respectivamente: 90,5%; 86,4%; 97,7%; 79,2%; 72,2%; 85,1%. Nota-se que estes ajustes são relativamente maiores (e melhores) do que aqueles obtidos com o modelo de King (não descrito no trabalho devido a propriedade intelectual).

Com todo este procedimento pronto, pode-se executar o algoritmo de solução para se encontrar as possibilidades de parâmetros de máquina e respectivos indicadores de processo que atenderão às restrições, seguindo o modelo proposto. É interessante observar que o objetivo da otimização é a minimização da média geométrica formadas pelas diferenças quadráticas entre cada função estimada (cada característica) os seus respectivos objetivos. Desta maneira a restrição de  $D_i$  em uma unidade somente funciona como restrição auxiliar.

	Título POY (Denier)																							
	Filamentos		Força de Estragem (cN)		Alongamento (%)		Vel. de produção (m/min)		Taxa de Estragem		DIY		Sobre alimentacao 2 (%)		Sobre alimentacao 3 (%)		Sobre alimentacao 4 (%)		Temp. do Forno curto (°C)		Temp. do Forno Longo (°C)		Temp. Segundo Forno (°C)	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13											
	265	34	99	119	800	1.73	1.75	-4.00	-4.00	-6.04	300	397	150	X										
					800	1.6	1.5	-4	-5	-7	200	350	150	LIE										
					800	1.8	2	-3	-4	-6	300	400	250	LSE										
														(Yi-Ti)<?										
														1										
														Yi										
														Ti										
														Di										
														FObj										
Tensao antes (cN)	Y1	-170.69	0.10	0.10	0.28	-0.36	0.02	146.60	-16.00	-0.18	1.68	-2.35	-0.03	-0.03	-0.01	72.8	74.3							
Tensao após (cN)	Y2	-135.97	0.09	0.01	0.24	-0.33	0.02	128.84	-18.22	-0.07	1.40	-2.32	-0.03	-0.03	-0.01	69.7	71.5							
Denier (g/9km)	Y3	-112.48	0.40	-0.31	0.77	1.38	-0.05	-44.71	23.81	-0.58	2.55	-1.83	0.04	-0.01	0.02	165.0	165.0			0.0				0.00
Alongamento (%)	Y4	91.63	0.01	-0.09	-0.01	0.33	0.00	-56.43	-2.77	0.34	-0.28	0.33	-0.01	0.01	0.02	24.0	23.0			1.0				0.99
Tenacidade (cN/den)	Y5	4.36	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	1.54	-0.13	0.03	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	4.5	4.5			0.0				0.00
Encolhimento Leesona %	Y6	65.56	0.00	-0.10	-0.02	-0.09	-0.01	-1.46	-9.35	-0.83	1.82	2.60	0.04	0.02	-0.07	13.0	14.0			1.0				1.00

Figura 73 – Exemplo de aplicação otimizado

Na figura 73, têm-se uma sugestão de parâmetros adequados para se atender à solicitação do cliente. Este processo de estabelecer funções-objetivo usando métodos estatísticos e a sua consequente otimização requerem dados históricos e alguns conhecimentos de engenharia têxtil, as informações adicionais importantes entendidas a partir do estudo não envolvem custos abusivos em sua obtenção. Logo, é uma informação extremamente relevante por indicar as soluções possíveis sem utilizar recursos que podem estar gerando valor para a empresa.

Na hipótese de o conjunto de parâmetros apresentados na Figura 73 ser uma solução possível que não atenda às expectativas (ou restrições), é possível se adequar os limites inferior e superior de modo a se encontrar outras soluções, ou ainda, pode-se valer da opção de alterar as restrições de  $D_i$  para valores menores, sendo mais rígido na aproximação dos resultados esperados e calculados.

Este exemplo utilizou uma solicitação do cliente, muito embora pudesse ter sido proveniente de clientes internos como os setores de planejamento ou qualidade, decorrentes de uma análise de custos, ou da necessidade de melhoria de qualidade ou produtividade.

Outros exemplos poderiam ser apresentados, porém, a solução muito provavelmente seguiria a mesma sequência conceitual, demonstrando as soluções possíveis viáveis para o problema.

## Conclusões

Nesta dissertação, foram evidenciados muitos detalhes do processo de texturização que devem ser observados na produção de fios texturizados de poliéster. Estes detalhes, registrados pelas empresas como informações de matéria-prima e parâmetros de processo, podem ser utilizados para melhoria do mesmo se devidamente tratados, utilizando-se métodos como o PLS, por exemplo, para geração de modelos que sirvam para previsão, simulação ou otimização, como se demonstrou. Os resultados positivos alcançados expõem a grande oportunidade existente para as empresas reduzirem ou eliminarem os testes realizados empiricamente, fazendo com que ganhos evidentes apareçam. O trabalho ainda demonstrou que a metodologia proposta para a geração deste novo conjunto de informação, obtido a partir do processamento dos dados disponíveis, não tem alto custo, o que indica sua adoção por qualquer processo de manufatura.

Algumas conclusões específicas acerca da modelagem e otimização do processo de texturização por falsa torção são as seguintes:

- Embora se dispusesse de um banco de dados consideravelmente grande, o pré-processamento do mesmo, eliminando *outliers*, dados faltantes e possíveis erros de registro, foi fundamental para os bons ajustes encontrados;
- As análises de resíduos foram úteis na confirmação de que o conjunto final de dados era adequado às tarefas de modelagem e otimização, conferindo um grau de confiabilidade aos resultados;
- Embora o conjunto de dados utilizados fosse grande, empregando-se o método PLS, pode-se utilizar um banco de dados pequeno (formado em curto período), o que permitiria a redução tempo de desenvolvimento de produtos;
- A eliminação de dados faltantes exclui, de certa forma, informações referentes à outras variáveis. Esta eliminação não seria necessária se o usuário utilizar o método PLS diretamente. Este método é robusto à ocorrência de dados faltantes;
- Dados relativos a processos de texturização por falsa torção apresentam correlações fortes e significativas, tanto no conjunto de preditoras quanto no conjunto de respostas. A modelagem independente das características dos produtos têxteis pode se constituir em um equívoco;

- Sobre o conjunto original de 19 variáveis (13 de entrada e 6 de saída), 6 componentes principais foram suficientes para se explicar 86% da variação do conjunto, o que mostra a redundância do conjunto de dados e a presença de multicolinearidade.
- Quanto ao conjunto de respostas, 3 componentes principais explicam 90% da variação de todas as respostas. Isto mostrou que as características da fibra texturizada não podem ser modeladas de forma independente;
- Embora seja algumas vezes indesejável, a estrutura de correlação mostrou alguns aspectos positivos de sua presença, tais como a boa relação entre predictoras e respostas, e os *clusters* de variáveis formados, compatíveis com a natureza do processo, como o conjunto de velocidades de sobrealimentação, por exemplo;
- O método MLR apresentou bons ajustes, embora tenha apresentado problemas de multicolinearidade e erros de previsão comparativamente mais altos que o PLS;
- A eliminação das variáveis de entrada correlacionadas eliminou o problema da multicolinearidade, mas reduziu sensivelmente a explicação do modelo;
- O método PCR com 8 componentes não apresentou bons ajustes para as respostas;
- Não foram detectadas diferenças significativas quanto ao erro de predição na utilização dos métodos PCR e PLS com 8, 10 ou 13 componentes, respectivamente;
- O método PLS com 8 componentes apresentou erros de previsão estatisticamente menores que os métodos PCR (8 componentes) e MLR;
- O método de otimização por Algoritmos Genéticos mostrou-se eficiente ao proporcionar soluções muito próximas aos alvos pré-estabelecidos, atendendo a todas as restrições;
- Embora 8 componentes principais tenham sido suficientes, melhores ajustes e condições de *setup* poderiam ser atingidos utilizando-se PLS com 13 componentes.
- As seis funções-objetivo utilizadas (Y1 a Y6), foram obtidas através do método PLS, adotando-se 8 componentes principais. Como se demonstrou anteriormente, os ajustes ( $R^2_{adj.}$ ) destas respostas são, respectivamente: 90,5%; 86,4%; 97,7%; 79,2%; 72,2%; 85,1%. Nota-se que estes ajustes são relativamente maiores (e melhores) do que aqueles obtidos com o modelo de King. O mesmo se observou nos métodos PCR e MLR.

De uma maneira geral, a análise comparativa entre os métodos de regressão MLR, PCR e PLS, mostrou os bons níveis de ajuste e previsibilidade do método PLS, o que o qualifica como uma excelente opção para modelagem de processos de texturização.

Trabalhos futuros podem abordar a utilização do método PLS no controle de processo multivariado da manufatura, aplicações *on-line* no sistema, modelagem mais complexas incluindo mais fatores e processos. Outrossim, pode-se pensar também na utilização de modelos não lineares, incluindo-se interações entre variáveis e termos quadráticos. Também poderiam ser estudadas outras opções de análise tais como a “Correlação Canônica” e a Regressão múltipla multivariada. No âmbito dos métodos MLR e PCR pode-se considerar a padronização dos dados de entrada antes da modelagem e também, a consideração de métodos de rotação (Varimax, Equimax, etc) para a extração dos componentes principais que representarão os dados originais.

## Referências bibliográficas

- AGUILERA, A.M., ESCABIAS, M., VALDERRAMA, M.J. *Using principal components for estimatin logistic regression with high-dimensional multicollinear data*, Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 50 (8), 1905-1924 pp.
- ARTUNC, H.; WEINSDORFER, H., *Einfluß der Geschwindigkeit beim PES-Spinnen und dès Fadenlaufprofils der Texturiermaschine auf das Verarbeitungsverhalten beim Texturieren*, CTI 38/90, Oct. 1988, p.897.
- BARMAG OËRLIKON, Machine Manufacturer, Remscheid, Germany. Disponível em: [www.barmag.com](http://www.barmag.com), acesso em: 5 de março de 2008.
- BAXTER, M., *Projeto de produto*, São Paulo: Edgard Blücher, 1998, p. 93-94.
- BRASIL TÊXTIL, IEMI, Instituto de Estudos e Marketing Industrial Ltda. Relatório (anual) Setorial da Indústria Têxtil Brasileira, 2007.
- BURNHAM, A. J.; J. F. MacGregor; R. Viveros. *A statistical framework for multivariate latent variable regression methods based on maximum likelihood*. Journal of Chemometrics, 1999 (13): 49–65.
- BUSACCA G.P., MARSEGUERRA M., ZIO E., *Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems*. Reliability and Engineering Systemn Safety, 2001, 2 (1), 59–74.
- CALDAS, L.G., L.K. NORFORD. *A Design Optimization Tool Based on a Genetic Algorithm*. Automation in Construction, 2001, 11 (2), 173-184.
- CERRI, P.L., *Integração trazendo competitividade para a Indústria têxtil do Nordeste*. Apresentação para o Banco do Nordeste, 2007.
- CHUDOBA, R., VORECHOVSKY, M., ECKERS, V. & GRIES, T. *Effect of Twist, Loading Rate and Length on Tensile Behavior of Multifilament Yarns (A Multivariate Study)*. Textile Research Journal, 2007, Vol. 77 (11), 880-891.
- COOK, D.F.; RAGSDALE, C.T; MAJOR, R.L., *Combining a neural network with a genetic algorithm for process parameter optimization*. Engineering Applied Artificial Intelligence, 2000, 13(4), 391–396.
- COPAS, J. B. *Regression, Prediction, and Shrinkage*, Journal of the Royal Statistical Society, ser. B, 1983, 45, 3 1 1-354.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N., *Administração estratégica de serviços*. São Paulo: Atlas, 1994, p. 151.
- COSTA, L., OLIVEIRA, P., *Evolutionary algorithms approach to the solution of mixed integer non-linear programming problems*, Computers and Chemical Engineering, 2001, 25, 257-266.
- DAREN, Z., *QSPR studies of PCBs by the combination of genetic algorithms and PLS analysis*. Computers Chemistry, 2001, 25(2), 197–204.
- DAVIES, A. M. C. *Uncertainty testing in PLS regression*. Spectroscopy Europe, 2001 13(2). Disponível em: [http://www.spectroscopyeurope.com/TD\\_13\\_2.pdf](http://www.spectroscopyeurope.com/TD_13_2.pdf), acesso em 5 de março de 2008.

- DAVIS, E.W.; TALBOT, J.R., *Polyester, Fibers*, in Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 2<sup>nd</sup> Edition, 1985, V.12, 119-113.
- DE JONG, S. *SIMPLS: An alternative approach to partial least squares regression*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, 18: 251-263.
- DEMIR, A.; BEHERY, H.M., *Synthetic Filament Yarn: Texturing Technology*. Prentice-Hall, Inc, NJ: 1997.
- DENTON, M.J., *Texturing of Continuous Filament Synthetic Yarns*, The Journal (Bradford Textile Society), 1987, 51-56.
- DERDER, G., *Textured Polyester Filament Yarns in Spun Yarn Weaving*, Melliand Textilberiche (English Edition), September 1985, 699-713.
- DESCHAMPS, J. P.; NAYAK, P. R., *Produtos irresistíveis: como operacionalizar um fluxo perfeito de produtos do produtor ao consumidor*, São Paulo: Makron Books, 1997.
- DIETRICH, W.; REICHEL, G.; RENKERT, H. *Untersuchungen zum PES-schmelzspinnprozeß bei Abzugsgeschwindigkeiten von 5000 ...10000m/min*, CTI Sept. 1982, p.612.
- DURAND, A. DEVOS, O., RUCKEBUSCH, C., HUVENNE, J.P. *Genetic algorithm optimization combined with partial least squares regression and mutual information variable selection procedures in near-infrared quantitative analysis of cotton-viscose textiles*. Analytica Chimica Acta, 2007, 595, 72-79.
- EDWARD, E.; CONRAD, B.; SELWAYAN, S., *Optimization of a neural network model for calibration of voltammetric data*. Chemometrics Intelligence Laboratory System, 2002, 61(1-2), 35-49.
- ELLIS, B.C., *A Review of Techniques for the Assessment of Hand*, Textile Research Journal, April 1980, 231-238.
- ENDO, T., SHINTAKU, S., & KINARI, T. *Mechanics of Disk-type False Twisting Part I: Yarn Path and Friction Force on a Single Disk*. Textile Research Journal, Feb. 2003, 73 (2), 139-146.
- ESKIN, N., *Analysis of a high temperature heater in a false twist texturing process*, Energy Conversion and Management Vol. 44, 2003, pgs. 2531-2547.
- FALK, R. F.; NANCY B. M. *A primer for soft modeling*. University of Akron Press. Includes an introduction to PLS, Akron, Ohio: 1992.
- FEATHERSONE, A.M., HEARLE, J.W.S., WELLSTEAD, P.E. *Simulation of the False Twist Textile Yarn Texturing Process*, Simulation Council Inc., 1986, 46:2, 53-60.
- FOURNE, F.V., *Stretch Yarn (krauselmateral)*, Melliand-Textilber. 37 1956, p.661, 39 1958 p.247 e 361.
- FOURNE, F.V., *Synthetic Fibers*. Hanser, Munich: 1999, p.16.
- FRONTLINE Solvers, *Premium Solver Plataform User Guide*, 2006. 317p.
- GANDHI, R.S., PAL, S.K., KOTHARI, V.K. *Draw-Texturing of Microfiber Polyester Yarn*. Textile Research Journal, Dezembro 1996, 66 (12), 770-776.
- GARTHWAITE, P.H. *An Interpretation of Partial Least Squares*, Journal of the American Statistical Association, Vol. 89, No. 425. Mar., 1994, pp. 122-127.
- GELADI, P.; KOWALSKI, B. *Partial least-squares regression: A tutorial*. Analytica

- Chimica Acta, 1986, 185: 1-17. A standard introduction to PLS, albeit using chemometric examples.
- GHOSH, S. & WOLHAR, J. *The Influence of Some Machine-Setting Variables on the Properties of Yarns in the Friction-Twist-Draw-Texturing Process*, Textile Research Institute, 1981, Vol. 51 (6), 373-383.
- GOLDBERG, D.E., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- GREENWOOD, K., *An Apparent Friction Paradox (Amonton's law)*, Journal of Physics, D: Applied Physics, 1977, Vol. L53-L58.
- GUNST, R. F.; MASON, R. L. *Biased Estimation in Regression: An Evaluation Using Mean Squared Error* Journal of the American Statistical Association, 1977, 72, 616-628.
- HADI, A. S.; LING, R. F. *Some cautionary notes on the use of principal components regression*. The American Statistician, 1998, 52, 15-19.
- HAIR, J.F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L., BLACK, W.C. *Análise Multivariada de Dados*, 5<sup>a</sup> Edição, 2005, 593p.
- HEARLE, J.W., *Texturing Technology*. The Textile Institute, Manchester: 2002.
- HEARLE, J.W.S.; GROSSBERG, P.; BACKER, S., *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*. New York: Wiley-Interscience, 1970.
- HEARLE, J.W.S.; MORTON, W.E., Journal of Textile Institute, 1957, Vol. 48, T159.
- HELLAND, I. S. *On the Structure of Partial Least Squares Regression*, Communications in Statistics, Part B Simulation and Computations, 1988, 17, 581-607.
- HELLAND, I. S. *Partial Least Squares Regression and Statistical Methods*, Scandinavian Journal of Statistics, 1990, 17, 97-114.
- HEUVEL, H.M.; HUISMAN, R., J. Polymer Science. 22(8) 1978 p.2229.
- HOLLAND J., *Iterative circuit computers*. Proceedings of the Western Joint Computer Conference, 1960.
- HOSKULDSSON, P., *PLS Regression Methods*, Journal of Chemometrics, 1988, 2, 211-228.
- HULLAND, J. *Use of Partial Least Squares (PLS) in Strategic Management Research: A review of four recent studies*. Strategic Management Journal, 1999, 20, 195-204.
- HUNYAR, A.; REICHERT, H., *Faserforsch und Textiltechn.* 4 1954, p.1.
- HWANG J.T. G.; NETTLETON, D. *Principal components regression with data-chosen components and related methods*. *Technometrics*, 2003, 45(1), 70-79.
- ISLIER, A.A., *A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design*. International Journal Production Research, 1998, 36(6), 1459-1569.
- JANG, J.S.R.; SUN, C.T.; MIZUTANI, E.; *Neuro-fuzzy and Software Computing: A computational approach to learning and machine intelligence*, 1997 (Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ).
- JEONG, B.; LEE, J.; CHO, H. *Efficient optimization of process parameters in shadow mask manufacturing using NNPLS and genetic algorithm*. International Journal of Production Research Vol. 43, n.15, Agosto 2005, p.3209-3230.
- JOHNSON RA, WICHERN D., *Applied multivariate statistical analysis*, 5<sup>th</sup> ed., Prentice-

Hall, New Jersey, 2002.

JOLLIFE, I. T. *A note on the use of principal components in regression*. Applied Statistics, 1982, 31, 300-303.

JURAN, J.M.; GRZYNA, F. M., *Controle da qualidade – ciclo dos produtos: do projeto à fabricação*, São Paulo: Makron Books, 1992 v.3, p. 4.

KARAKAS, H.C., DAYIOGLU, H. *Influence of Major False-Twist Texturing Parameters on the Structural Properties of Polyamide 6.6 Yarn*. Fibers & Textiles in Eastern Europe, 2004, v. 12, n. 2 (46).

KING, C.M., *Summer Conference Short Seminar*, Presentation, Charlotte, SC: 2003.

KING, C.M., *The development of physical properties during the spinning and cold drawing of PET*, Fiber Industries Inc., Charlotte, NC: 1991.

KING, J., TYAA *Summer Conference Short Seminar*, Presentation, Charlotte, SC: 2002.

KÖKSOY O., *Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion*. Applied Mathematics and Computation, 2006, 175 (2), 1716–1729.

KÖKSOY O., YALCINOZ T., *Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm*. Applied Mathematics and Computation, 2006, 175 (2), 1657–1674.

LIU, R. X., KUANG, Q. GONG, HOU, X. L. *Principal component regression analysis with SPSS*. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2003, 71 (2), 141-147.

LOHMÖLLER, J.B. *Latent variable path modeling with partial least squares*. New York: 1989, Springer-Verlag, 283 p.

LUDEWIG, H., *Polyesterfasern*, Akademie-Verlag, Berlin, 1975, p.51 e 81.

MALTHOUSE, E. C.; TAMHANE, A. C.; MAH, R. S. H. *Nonlinear partial least squares*. Computers in Chemical Engineering, 1997, 21: 875-890.

MASON, R. L.; GUNST, R. F. *Selecting principal components in regression*. *Statistics and Probability Letters*, 1985, 3, 299-301.

McINTYRE, J.E., *Fibers, Manufacture*, in Encyclopaedia of Polymer Science and Technology, 2<sup>nd</sup> Edition, 802-839.

McINTYRE, J.E., *The Chemistry of Fibers*, Edward Arnold, London: 1971

MDICE, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/>, acesso em 5 de março de 2008.

MELVIK, B.H., FAERGESTAD, E.M., ELLEJAER, M.R., NAES, T. *Using Raw Material Measurements in Robust Process Optimization*, Chemometrics Intell Lab. Syst., 55 (2001), 133-145.

MONTGOMERY, D.C., *Design and analysis of experiments*, 4<sup>th</sup> ed., Wiley, New York, 2001.

MONTGOMERY, D.C., PECK, E.A., VINING, G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis*, 2006, John Wiley & Sons, 4<sup>th</sup> ed., 640p.

MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*, 2002, 2<sup>nd</sup> ed., 798p.

OWENS, K. *Development of a Practical Method for Measuring Heat History of Texturized Polyester At-line Using NIRA (Near Infra-Red Analysis)*. Master Thesis at Institute Textile

Technology Charlottesville, Virginia, May 1997.

PATENTE DRP 618 050 (Ad.: 11 March 1932 – Heberlein & Co. Watwill, Switzerland).

PCI, PCI Fibres pertencente ao grupo: May House Ltd., <<http://www.pcifibres.com/>>, CARMICHAEL, A. apresentada na SYFA, Synthetic Yarn and Fiber Association. Statistical Methods for Forecasting. New York: John Wiley & Sons, 1983.

PHATAK, A.; JONG, S., *The geometry of partial least squares*, Journal of Chemometrics, Vol. 11, 1997, 311-338.

PROCHNIK, V.; *Estudo da Competitividade de Cadeias Integradas no Brasil: Impactos das zonas de livre comércio*, NEIT-IE-UNICAMP: 2002.

RAUBENHEIMER, J. E. *An item selection procedure to maximize scale reliability and validity*. South African Journal of Industrial Psychology, 2004, 30 (4), 59-64.

RENCHE A.C., *Methods of multivariate analysis*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, 2002, 732p.

REVISTA TÊXTIL, disponível em: <http://www.revistatextil.com.br/> acesso em 5 de março de 2008.

RODGERS, J.E., GHOSH, S. *Measuring Nylon Carpet Yarn Heat History by Remote NIR Spectroscopy Part I: Development of laboratory Remote Fiber-Optic Measurements*, Textile Research Journal, 2000, 70 (6), 510-524.

SANCHES, R.A., *Otimização dos Parâmetros de Regulagem das Máquinas Circulares de Malharia, utilizando a Metodologia Taguchi*. Campinas: 2001, p. 17.

SELLIN, N. *Partial least square modeling in research on educational achievement*, 1995 256-267 in Wilifred Bos and Rainer H. Lehmann, eds., Reflections on educational achievement; Papers in honour of T. Neville Postlethwaite, New York: Waxmann Munster, 1995.

SELLIN, N.; KEEVES, J.P. Path analysis with latent variables, 1994, 4352-4359 in Torstein Husen and T. Neville Postlethwaite, eds., International encyclopedia of education, 2nd ed., London: Elsevier Publishers, 1994.

SILVA, C. E. S., *Método para avaliação do desempenho do processo de desenvolvimento de produtos*, Florianópolis, SC: 2001, p. 25.

SJOSTROM, M.; WOLD, S.; LINDBERG, W.; PERSSON, J.-A.; MARTENS, H.; *A Multivariate Calibration Problem in Analytical Chemistry Solved by Partial Least-Squares in Latent Variables*, Analytica Chemica Acta, 1983, 150, 61-70.

SPSS, Statistical Package for the Social Sciences, disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/SPSS>, acesso em 19 maio de 2008.

STONE, M.; BROOKS, R. J. *Continuum Regression: Cross-Validated Sequentially Constructed Prediction Embracing Ordinary Least Squares, Partial Least Squares and Principal components Regression*, Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B, 1990, 52, 237-269.

SUN, J., *A multivariate principal component regression analysis of NIR data*. Journal of Chemometrics, 1996, 10, 1-9.

SYFA, Synthetic Yarns and Fiber Association, site da associação disponível em: [www.thesyfa.org](http://www.thesyfa.org), acesso em 27 de maio de 2008.

SZTANDERA, L., CARTWRIGHT, H.M. & CHIH-CHUNG, C. *Genetics Algorithms in*

- Molecular Design of Novel Fibers*. National Textile Center Annual Report. NTC Project: C05-PH01, Novembro 2007, 9 páginas.
- TANG, K. AND LI, T., *Combining PLS with GA-GP for QSAR*. Chemometrics Intelligence Laboratory System, 2002, 64(1), 55–64.
- TEMME, D.; KREIS, H.; HILDEBRANDT, L. *PLS path modeling– A software review*. SFB 2006 649 Discussion Paper 2006-084. Berlin: Institute of Marketing, Humboldt-Universität zu Berlin, Germany.
- TENENHAUS, M.; PAGÈS, J.; AMBROISINE, L.; GUINOT, C. *PLS methodology to study relationships between hedonic judgements and product characteristics*. Food Quality and Preference, 2004 16(4), 315-325.
- TENENHAUS, M.; VINZI, V. E.; CHATELIN, Y.-M.; LAURO, C. *PLS path modeling*. Computational Statistics and Data Analysis, 2005, 48(1):159–205.
- THWAITES, J.J. & HOOPER, C.W. *The Dynamics of the False Twist Process Part IV: Draw Texturing Experiments*, Journal of the Textile Institute, 1981, 72:6, 249-259.
- THWAITES, J.J., *The Mechanics of Friction-Twisting Reassessed*, Part II: Tension and Torque Generation in the Disc Spindle, Journal of Textile Institute, 1985, Vol. 76, No 3, pg. 157-170.
- TMT MACHINERY INC, Machine Manufacturer, Kioto, Japão. Disponível em: [www.tmt-mc.jp](http://www.tmt-mc.jp), acesso em: 5 de março de 2008.
- TOBIAS, R. D. *An introduction to partial least squares regression*. Cary, NC: SAS Institute, 1997. Disponível em: <http://ftp.sas.com/techsup/download/technote/ts509.pdf>, acesso em março 2008.
- TTI, *Textile Terms and Definitions*, The Textile Institute, 7<sup>th</sup> edition, Manchester: 1975.
- UNIFI INC., disponível em: [www.unifi.com](http://www.unifi.com), acesso em 5 de março de 2008.
- VAN DE VOET, H. *Comparing the predictive accuracy of models using a simple randomization test*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1994, 25: 313-323.
- VASSILATOS, G., *High-Speed Fiber Spinning*, Wiley-Interscience, New York: 1985, Chapter 14.
- VELLEMAN P.F., WELSH R.E., *Efficient computing of regression diagnostics*. American Statistician, 1981, 35, 234–242.
- VINZI, V. E.; WYNNE W. C.; HENSELER, J.; HUIWEN W. EDS. *Handbook of partial least squares: Concepts, methods and applications in marketing and related fields*. Series: Springer Handbooks of Computational Statistics. New York: 2008 Springer-Verlag.
- WEBSTER, J. T.; GUNST, R. F.; MASON, R. L. Latent Root Regression Analysis, Technometrics, 1974, 16, 5 13-522.
- WENTZELL, P.D.; VEGA, M. L. *Comparison of principal components regression and partial least squares regression through generic simulations of complex mixtures*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2003 65(2), 257-279.
- WILKINSON, G.D., *Draw-Textured Yarn Technology*, Monsanto Textile Company 1974.
- WINSTON, W.L.; ALBRIGHT, S.C., *Practical Management Science: Spreadsheet Modeling and Applications*, 3a ed., Thomson, South Western: 2007.
- WOLD, H. *Partial least squares*, 1985, 581-591 in Samuel Kotz and Norman L. Johnson,

eds., Encyclopedia of statistical sciences, Vol. 6, New York: Wiley, 1985.

WOLD, S., SJOSTROM, M., ERIKSSON, L., *PLS-regression: a basic tool of Chemometrics*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, v. 58,, 109-130.

WOLD, S.; RUHE, A.; WOLD, H.; DUNN, W. J. *The Collinearity Problem in Linear Regression: The Partial Least Squares (PLS) Approach to Generalized Inverses*, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1984, 5, 735-743.

YACOUB, F., MACGREGOR, J.F., *Product Optimization and Control in the Latent Variable Space of Nonlinear PLS Models*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2004, Vol. 70, 63-74.

YUSHENG, L., WEIDONG, G., HONGBO, W. *A model for the twist distribution in the slub-yarn*. International Journal of Clothing Science and Technology Vol. 19, n.1, 2007, p.36-42.

ZIMLIKI, D.A., KENNEDY, J.M. HIRT, D.E., & REESE, G.P. *Determining Mechanical Properties of Yarns and Two-Ply cords from Single-Filament Data Part I: Model Development and Predictions*. Textile Research Journal, 2000, 70 (11), 991-1004

## **Anexo A – Processos pré-texturização**

Este anexo visa atender às necessidades da realidade dos profissionais que atuam na área têxtil brasileira, proporcionando uma revisão bibliográfica referente ao detalhamento do processo de texturização. A sua leitura podem auxiliar o leitor interessado na compreensão dos fenômenos físicos que envolvem o processo.

### **A.1 – A fibra sintética poliéster**

O poliéster encontra-se classificado como fibra sintética derivada do petróleo. Outros grupos existentes de fibras são naturais, artificiais e sintéticas. A normalização da indústria têxtil no Brasil é realizada pela ABNT/CB-17 (Comitê Brasileiro de Têxteis e do Vestuário). As fibras sintéticas (e as fibras em geral) consistem de polímeros, componentes formados por moléculas grandes, que contém unidades estruturais repetidas muitas vezes em cada molécula. Uma molécula sozinha talvez contenha centenas de unidades repetidas, fazendo com que seu peso molecular chegue a 10.000. Tais moléculas são chamadas de macromoléculas ou cadeias de moléculas (McINTYRE, 1971).

A simples existência de um polímero não pressupõe a existência de uma fibra. Por exemplo, existem muitos tipos de plásticos que são feitos de polímeros e claramente não são fibras. A característica mais importante que distingue polímeros na forma de fibras é sua orientação em uma direção particular (propriedades anisotrópicas). Portanto, as fibras tendem a ser muito mais resistentes no sentido longitudinal do que no transversal. As propriedades físicas das fibras são fortemente influenciadas pela organização das cadeias poliméricas, isto é, macromoléculas, com setores ou seções cristalinas ou não cristalinas, e as disposições destes setores em relação um ao outro (McINTYRE, 1971).

O poliéster (PES) é polimerizado por reação entre um álcool e um ácido. O caminho mais usual é a polimerização do ácido tereftálico (feito de para-xileno, que é destilado do petróleo e altamente purificado), com etileno glicol (o óleo é quebrado para gerar etileno gasoso). Este gás é oxidado no ar com catalisador para formar óxido de etileno, que é então hidratado para produzir etileno glicol, no vácuo por um mecanismo a elevada temperatura (em torno de 270°C) para formar polietileno tereftalato (também representado por PET).

A estrutura molecular do poliéster está representada na figura 74 a seguir:

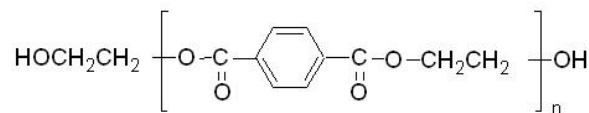


Figura 74 – Estrutura molecular do PET

As fibras de poliéster são fiadas através da passagem de uma massa fundida por orifícios de uma feira (spinneretes). Existe um grande número de perfis que podem ser encontrados com estes orifícios. Em função da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do poliéster ser de  $80^\circ\text{C}$ , os filamentos são estirados à quente para desenvolver orientação e cristalinidade. As propriedades da fibra de poliéster são grandemente afetadas pela estrutura da fibra. Por sua vez, a estrutura da fibra, que tem uma grande influência na aplicabilidade das fibras de poliéster, depende enormemente dos parâmetros de processo pelo qual a fibra passa até sua formação. De maneira geral, a estrutura da fibra é determinada pela velocidade de fiação, estiragem à quente, relaxamento e sua tensão, e processos de fixação utilizados (DAVIS et al., 1985).

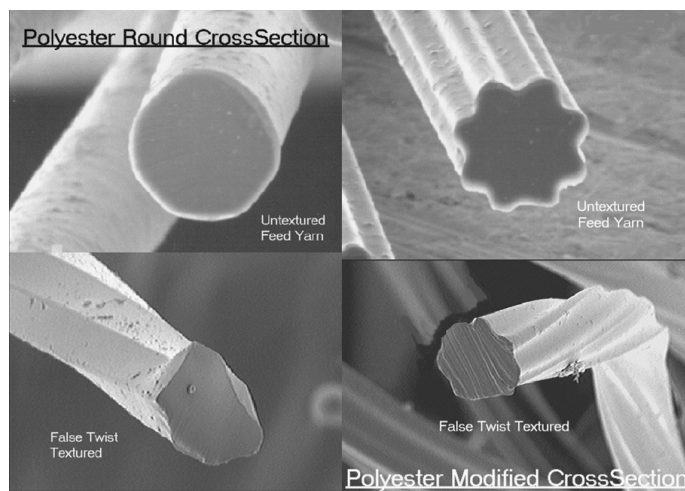


Figura 75 – Foto ampliada da seção transversal do poliéster

O poliéster é conhecido por ter alta recuperação elástica, particularmente em pequenas deformações. As propriedades mecânicas do poliéster úmido são virtualmente iguais às daquelas do poliéster seco. Fibras de poliéster têm excelente resistência a ácidos, álcalis, ataques de micróbios, e luz. A baixa higroscopicidade (capacidade de absorver água de 0,4% em condições controladas) faz a fibra de poliéster sujeita a eletricidade estática.

O tingimento de fibras de poliéster, em geral, requer cuidados, devido à falta de áreas hidrofílicas e inerente dureza das moléculas de poliéster. Algumas empresas que atendem mercados não críticos quanto à uniformidade tintorial se utilizam de métodos convencionais, mas quando se fornece para mercados mais exigentes (como automobilístico), a utilização de alta temperatura de tingimento, Carrier (composto químico que facilita o contato do corante com a fibra) e igualizantes se fazem necessários.

Esta dissertação focou somente no poliéster, a “Tabela 14” ilustra as propriedades das fibras mais populares no mercado a fim de contextualizar melhor o poliéster no meio sintético. As fibras sintéticas, apesar de suas características intrínsecas de cada polímero, têm algumas semelhanças, o que possibilita utilização de mesmos conceitos de produção e controle de processo. À medida que as tecnologias são desenvolvidas, verifica-se a chegada de novas fibras no mercado, as consolidadas são as descritas na “Tabela 15”.

**Tabela 14 – Propriedades típicas de fibras sintéticas.**

	Poliamida	Poliéster	Polipropileno
Tenacidade, N/tex: 65% umidade relativa, 21 °C Molhada	0,40-0,70 0,35-0,62	0,35-0,53 0,35-0,53	0,44-0,79 0,44-0,79
Alongamento a ruptura, %: 65% umidade relativa, 21 °C Molhada	15-30 20-40	15-30 15-30	15-30 15-30
Módulo de elasticidade, N/tex (65% umidade relativa, 21 °C)	3,5	7,9	2,6-4,0
Higroscopicidade, % (65% umidade relativa)	4,0-4,5	0,4	Nenhum
Gravidade específica	1,14	1,38	0,90
Variação volumétrica na água, %	2-10	Nenhuma	Nenhuma
Temperatura de transição vítrea, °C: (T <sub>g</sub> ) 0% umidade relativa 100% umidade relativa	107 -8	80 80	-10 -10
Temperatura de fusão, °C (T <sub>m</sub> )	215-250	260	165

## A.2 – Fiação química por fusão e convencional

Existem alguns tipos mais comuns de fiação para fibras, a “Tabela 15” mostra três tipos de fiação.

**Tabela 15 – Técnicas de Fiação Química**

Fiação por Fusão	Fiação a seco	Fiação úmida
Poliamida	Acetato	Viscose
Poliéster	Triacetato	Raion
Polipropileno	Acrílico	Acrílico
Polietileno	Elastômeros	Elastômeros

A fiação por fusão foi desenvolvida no final de 1930 para Poliamida 6 e 6.6, e agora é utilizada por várias outras fibras (McINTYRE). De maneira geral, as plantas de fiação por fusão recebem chips ou são ligadas diretamente à polimerização. O material recebido é fundido em uma rosca do extrusor, que alimentará o cabeçote de fiação.

Um típico sistema de fiação convencional descontínuo é mostrado na Figura 76. Os termos em inglês da figura são traduzidos a seguir:

11. *Chip Hopper* – Silo de chips, no processo descontínuo, o processo contínuo fornece material fundido diretamente ao extrusor;
12. *Motor control panel* – painel de controle do motor, dosagem de chips;
13. *Extruder* – Extrusora, responsável pela formação da massa fundida;
14. *Extruder control panel* – Painel de controle da extrusora;
15. *Condenser* – Condensador;
16. *Pre-filter* – Pré-filtro, uma série de filtragens é necessária dependendo do processo e da pureza desejada;
17. *Spinning head* – Cabeça de fiação, as fieiras estarão logo após as bombas de fiação;
18. *Spining head control panel* – painel de controle da cabeça de fiação;
19. *Drive shaft* – Eixo, controlam as bombas de fiação;
20. *Reduction gear* – Engrenagem de redução;
21. *Quench Box* – Área de resfriamento, reduzem a temperatura dos filamentos de maneira uniforme e controlada;
22. *Spin Tube* – Tubo de Fiação;
23. *Oiling Jet* – Bicos de óleo de ensimagem, aplicação de lubrificante e anti-estático;
24. *Heater* – Aquecedores, troca de calor para fluido térmico normalmente o glicol;
25. *Sealed vapor phase heater* – aquecedor selado a vapor do fluido térmico;
26. *Inverter* – Inversores;
27. *Motor control panel* – Painel de controle dos motores;
28. *Oiling roller* – Rolos de ensimagem;
29. *Godet roller* – Rolos godet;
30. *Interlace* – Entrelaçadores, fazem o fechamento dos filamentos;
31. *Take-up winder* – Cabeçote de enrolamento;

A massa fundida pode passar por sistemas de filtrações para eliminar partículas sólidas grandes ou impurezas, os quais, se chegarem às fieiras, poderão bloquear seus orifícios ou

ainda, se passarem pelos orifícios, poderão causar prejuízos nas propriedades do filamento e consequentemente influenciar negativamente a qualidade e produtividade de processos futuros. Após a filtragem, a massa fundida passa por feiras, com quantidade determinada pelas bombas de fiação. Estas feiras contêm orifícios através dos quais a massa fundida é extrudada sob uma pressão superior a 20 MPa. Os orifícios variam de 175 a 750  $\mu\text{m}$  na saída e a capilaridade muito inferior que a espessura da feira de 3 a 10 mm. Cada orifício funciona como um funil para evitar descontinuidades de fluxo e, o número de orifícios por feira varia de dezenas a centenas, para filamentos contínuos.

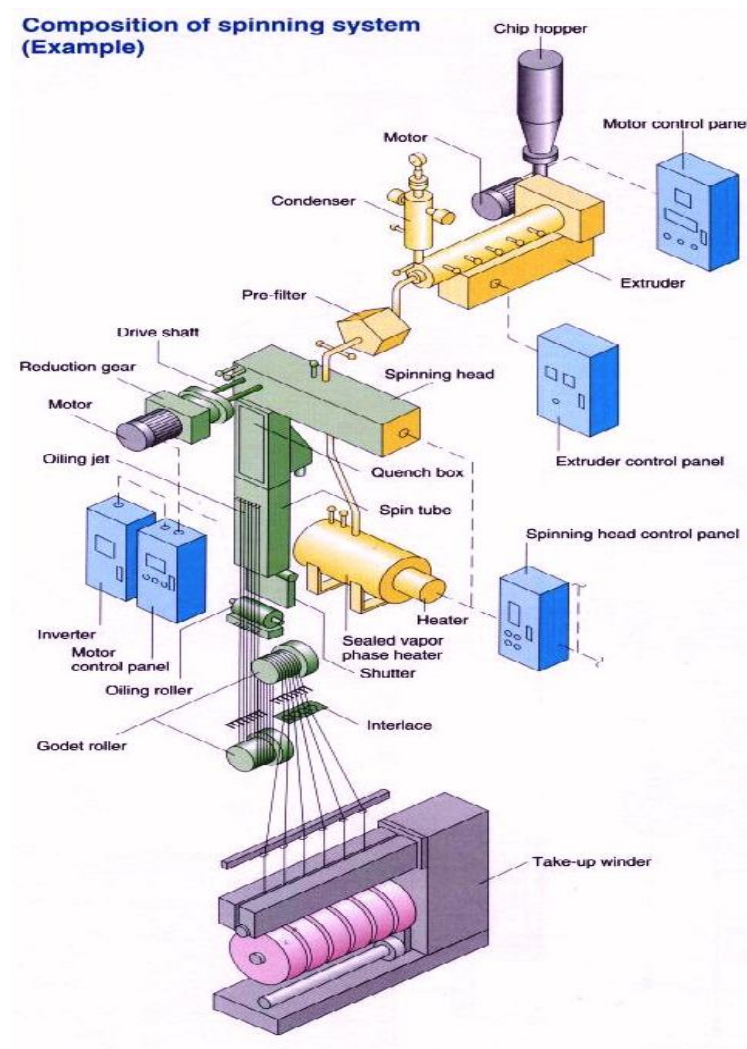


Figura 76 – Fiação convencional

A velocidade com a qual o polímero irá sair do orifício da feira (espinerete) será determinada pela velocidade da rosca da extrusora. A “Figura 73” mostra que existe um

sistema fechado entre a extrusora e a cabeça de fiação que contém as fieiras por onde saem os filamentos que irão compor o multifilamento. O cabeçote de fiação que enrola os multifilamentos tem velocidade própria controlada de acordo com necessidades do processo. Portanto, a diferença de velocidade entre o enrolamento e a saída da fieira determina o grau de orientação das moléculas. A tensão gerada neste processo propicia um aumento de orientação da macromolécula à medida que ela é estendida (estirada). A tensão nesta região também é fortemente influenciada pelo arraste do ar de insuflamento que resfria o fio e determina o grau de uniformidade do filamento.

A fieira não controla diretamente a densidade linear do filamento. A densidade linear é controlada pela saída de polímero por cada orifício, ( $W$ ) (g/min) e a velocidade de fiação dada pela velocidade do cabeçote de enrolamento,  $V$ (m/min). A densidade linear (tex) do filamento fundido é então,  $10^3 W/V$ . A relação entre diâmetro do orifício da fieira e a densidade linear envolve a taxa de estiragem entre o orifício e o enrolamento  $V_0/V$ , onde  $V_0$  é a velocidade de extrusão média:

$$\text{Densidade Linear} = \frac{A\rho W_p V_0}{V} \quad (87)$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ ) do orifício;  $\rho$ , a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) do extrudado a temperatura de saída;  $V$ , a velocidade de fiação e  $W_p$ , a fração de polímero que deixa a fieira (em fiação por fusão  $W_p = 1$ ).

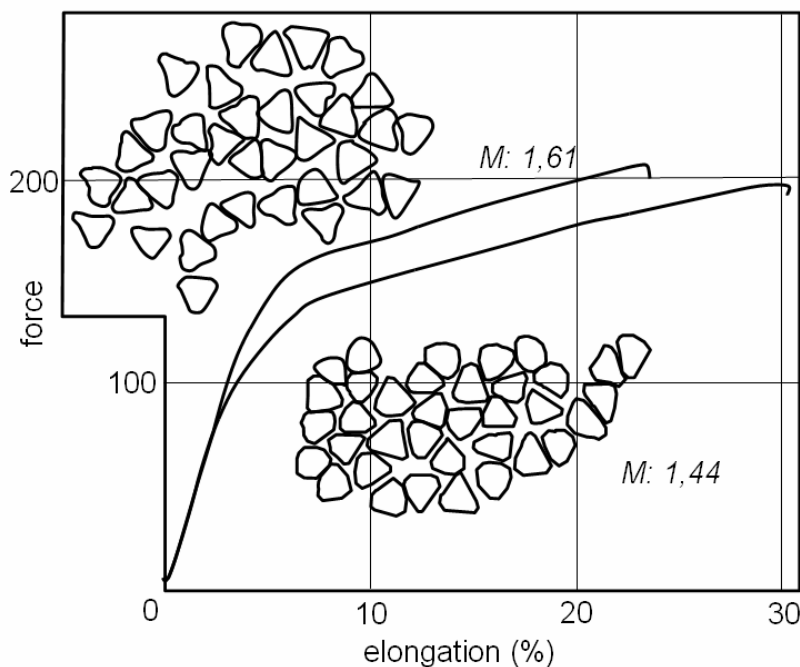


Figura 77 – Influência do “*mod ratio*” no alongamento e tenacidade

A massa de polímero fundido passa pelo orifício da fieira e é estirada pela força vinda do rolo de enrolamento. Comparando-se o diâmetro da fibra ao sair da fieira com seu diâmetro final, define-se a relação chamada de perfil da capilaridade (denominado *Mod. ratio* em inglês). A velocidade com que esta massa é puxada pelo rolo de enrolamento provoca um atrito com o ar de insuflamento, influenciando a taxa de estiragem. Procura-se ter uma zona morta nesta área, logo após a fieira, a fim de se evitar o acúmulo de monômeros ao redor dos orifícios.

Imediatamente após esta região, um ar gelado e filtrado é lançado através dos filamentos a uma vazão controlada para gerar um resfriamento uniforme. O tipo de filamento a ser produzido irá requerer um tipo de resfriamento adequado ao número de filamentos.

Os filamentos resfriados convergem de maneira a formar o multifilamento contínuo. Este multifilamento passará por um rolo ou bico de aplicação de óleo de ensimagem, que é uma mistura de lubrificante, óleos anti-estáticos e aditivos, ainda podendo conter biocidas e inibidores de corrosão. Este óleo melhora a coesão entre filamentos e reduz atrito nos guias-fios estacionados. A coesão do multifilamento é fundamental para que não apareçam filamentos abertos (laços). Filamentos soltos causam quebras de um grupo de filamentos ou do multifilamento, fazendo com que processos futuros sejam comprometidos. A eletricidade

estática, comum ao poliéster, pode acarretar sérios problemas se não for combatida com óleos anti-estáticos. As concentrações de ensimagem na superfície da fibra giram em torno de 0,5%.

A fiação pode ser classificada em função do grau de orientação das moléculas. Na “Figura 78”, esta relação da orientação das moléculas com as velocidades de fiação e respectivas classificações é demonstrada. Nota-se que à medida que se aumenta a velocidade do enrolamento (produção), reduz-se o alongamento (%) da fibra, o que ocasiona maior orientação das macromoléculas.

Esta dissertação irá se concentrar na região do processo em que se obtém o fio parcialmente orientado (POY, do inglês *partially oriented yarn*), que será utilizado como matéria-prima no processo de texturização. A “Figura 79” representa o filamento de um POY.

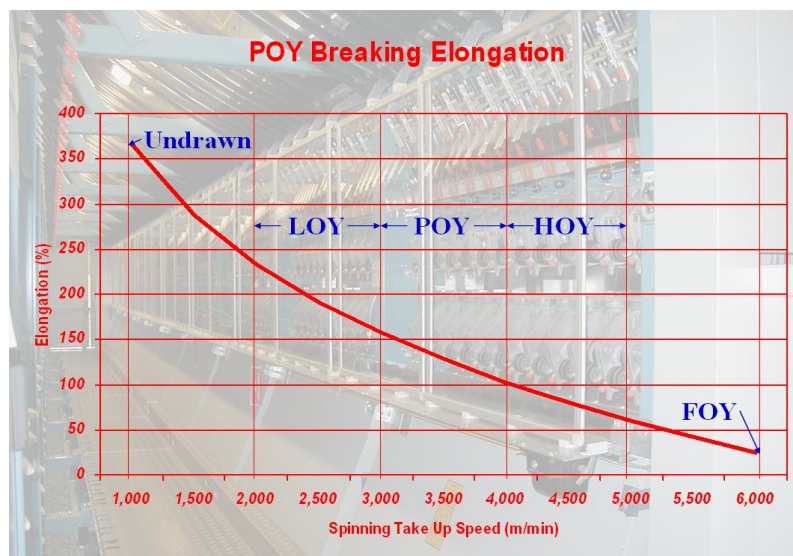


Figura 78 – Efeito da Velocidade no Alongamento.

As investigações sobre a fiação POY tiveram início por volta de 1950, mas sua comercialização teve início na década de 1970, principalmente, porque cabeçotes de enrolamento de alta velocidade não estavam disponíveis até então. A fibra obtida na faixa de velocidade do POY é quase completamente amorfa, mas tem resistência maior que fibras obtidas com velocidades menores.

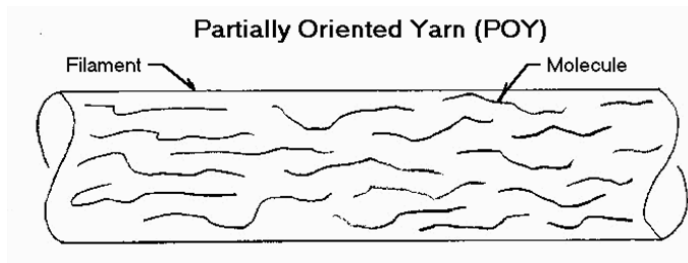


Figura 79 – Macromoléculas em um filamento de POY.

### A.3 – A rota do poliéster até a fiação

A massa fundida da policondensação contínua é empurrada pela bomba de descarga do finalizador da cabeça de fiação no menor caminho possível. Normalmente, filtros adicionais não são necessários, e as velocidades da massa fundida variam de 4 a 6 cm/s, em tubos com um diâmetro interno de 32 a 100 mm. Para viscosidade intrínseca normal de  $[\eta]=0,6$  a  $0,7$  a massa fundida e os tubos devem ter temperaturas  $\leq 280^{\circ}\text{C}$ , e para viscosidade intrínseca alta de  $[\eta]\approx 0,9$  a temperatura pode ser  $\leq 290^{\circ}\text{C}$ , com um tempo máximo de residência de 10 min. Os tubos são soldados com gás fórmico e eletrodo polido no interior a uma altura máxima de irregularidade  $R_t \leq 0,4\mu\text{m}$  (veja <http://en.wikipedia.org/wiki/Roughness> para detalhes em cálculos para análise de polimentos de superfície) e, como válvulas, não podem ter cantos ou depressões. Os conjuntos de fiação, também chamados de pacos, podem usar ou não areia de aço como filtros e conter um filtro na frente da fieira, com distribuição de  $20\mu\text{m}$  para os títulos usuais.

Os *chips* são transportados por ar da desidratação mecânica até a secagem, onde eles são cristalizados em secadores à vácuo entre  $130$  a  $145^{\circ}\text{C}$ , sob contínuo movimento e, então, secados até uma umidade residual menor que  $0,004\%$  a  $180^{\circ}\text{C}$ , por um total de 8 a 12 h, incluindo uma redução de temperatura de aproximadamente 2 h para  $80^{\circ}\text{C}$ . Para maiores capacidades, hoje, cristalizadores contínuos e secadores são preferidos, os quais também cristalizam os *chips* sob um constante movimento e com temperatura entre  $140$  a  $145^{\circ}\text{C}$ . Os *chips* serão então secos até uma umidade residual menor que  $0,004\%$  durante a descida de temperatura da torre de secagem, a  $180^{\circ}\text{C}$ , com ar ou nitrogênio, e com ponto de orvalho menor que  $-40^{\circ}\text{C}$ . O transporte de *chips* e sua armazenagem desde a extrusão são feitos da mesma maneira com ar seco ou nitrogênio. O tamanho do extrusor deve ter 10 a 20% de capacidade reserva. O comprimento de rosca deve ser de 25 a 30 vezes o diâmetro (D). A pressão da massa fundida na entrada da rosca está entre 100 e 130 bar para fins têxteis, com

bombas de fiação de 150 a 200 bar de diferença de pressão. Para grandes instalações, filtros podem ser instalados com conexão para evitar perdas nas trocas dos mesmos.

Por experiência, para filamentos têxteis para texturização, utiliza-se o POY com velocidades entre 3200 a 3600 m/min, até 5200 m/min (FOURNÈ, 1999; LUDEWIG, 1975). Fournè (1999) ainda mostra um estudo que reúne muitas outras fontes, no qual (Figura 80) a curva da força de estiragem é dada como função da velocidade de enrolamento. O alongamento à ruptura decresce com o aumento da velocidade, enquanto que a tenacidade específica aumenta. A 5000 m/min, os valores finais de fiação para diâmetro, orientação, cristalização e birrefringência são atingidos em aproximadamente 60 cm abaixo da fieira, isto é, em 10 ms (milisegundos). A 9000 m/min isto ocorre em 10 cm ou 1ms (ARTUNC et al., 1988; DIETRICH et al., 1982)

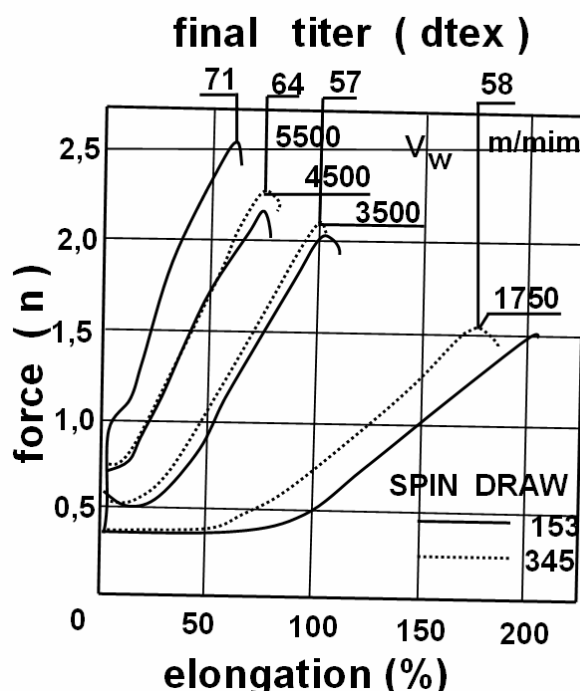


Figura 80 – Força de estiragem

Para avaliações de estabilidade no processo de fiação é possível concluir que o mínimo título individual do filamento deve ser:

$$T_{\min} [d\text{tex}, p.f.] = f \left[ Q \cdot \sqrt{\ln \left( \frac{v_L}{v_0} \right)} \right] \quad (88)$$

Na equação 88,  $T$  = título individual do filamento,  $Q$  = vazão da fieira em g/min,  $v_L/v_0$  = estiragem de fiação.

De acordo com esta equação, os filamentos com maiores títulos individuais, indicados na área A da “Figura 81”, são fiados mais facilmente que quando comparados com os filamentos de menores títulos individuais, indicados na área B da “Figura 81” e que gerarão muitas quebras. A “Figura 81” representa graficamente a variação do título versus a vazão. A vazão, controlada pela bomba de fiação que controla a passagem de polímero pela fieira de fiação, separa a massa de polímero em filamentos.

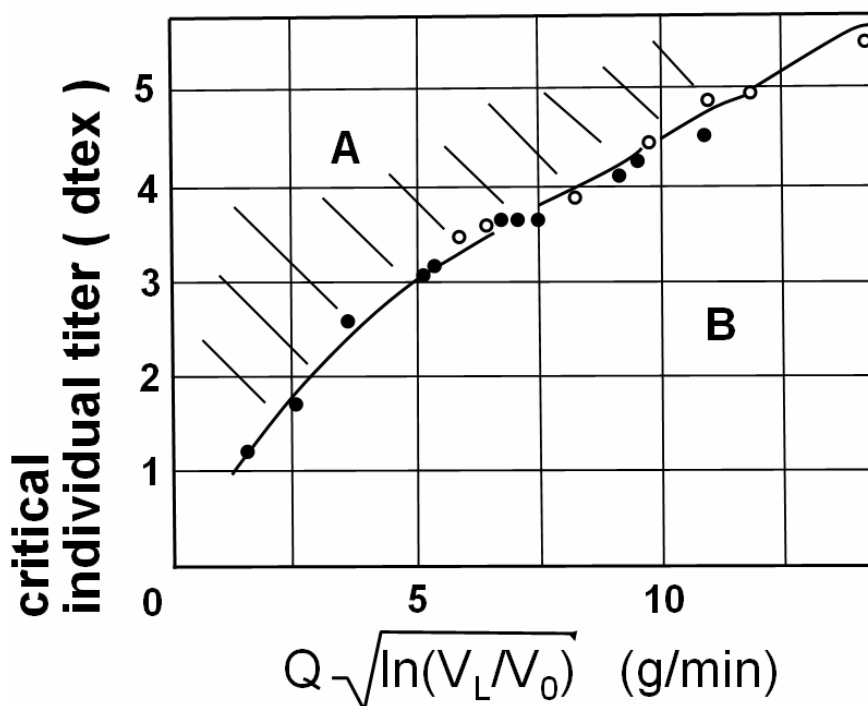


Figura 81 – Título individual do filamento

A razão para isto é a fiação fracionada (pontos finos e grossos) que ocorrem à frequência de aproximadamente  $10^5 \text{ s}^{-1}$ . Outra investigação discute relações entre títulos individuais do filamento (2,5 a 4,3 dtex), velocidade de enrolamento (1750 a 5500 m/min), estiragem da fiação (153 a 613) e tenacidade à ruptura (2,0 a 4,0 cN/dtex), alongamento à ruptura (em %), o módulo elástico inicial (18 a 70 cN/dtex), a força de encolhimento (300 a

3300 cN/mm<sup>2</sup>), o módulo de estiragem (0,6 a 7,5 cN/dtex), tamanho do cristal (30 a 65 Å) e a velocidade de extrusão através do orifício da fieira (4 a 40 m/min) bem como a absorção de corante (em mg de pigmento/[g] de fibra, com molécula grande) de 7 a 11 antes e 1 a 4 depois da estiragem e molécula menores de 10 a 11 antes e 4 a 10 depois de estirado.

A influência dos parâmetros mencionados pode ser resumida como se segue:

1. Para altas distorções de fiação (153 a 613) o aumento da tenacidade diminui, tanto em relação à velocidade de extrusão como em relação à velocidade de enrolamento (Figura 82) (HUNYAR et al., 1954).

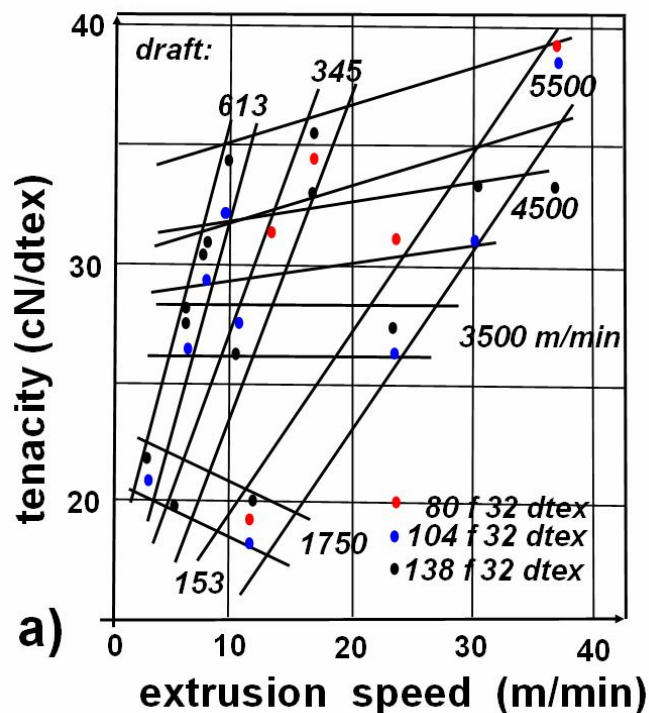


Figura 82 – (a) Tenacidade

2. O alongamento à ruptura reage numa direção contrária (Figura 82). Na faixa de aproximadamente 4000 m/min, a fiação induz cristalização (HEUVEL et al., 1978).
3. O módulo inicial aumenta com o aumento da velocidade de fiação, enquanto a razão de distorção não tem influência. Maiores títulos de fiação mostram menores módulos iniciais devido ao resfriamento vagaroso no início em função da alta capacidade térmica.
4. A força de encolhimento aumenta com o aumento da velocidade de enrolamento e maiores razões de distorção (> 345). Maiores títulos individuais, porém, diminuem a força de encolhimento.

5. A força de estiragem dinâmica para a estiragem residual aumenta com a velocidade de enrolamento, paralelamente com o aumento da razão de distorção e encolhimento.
6. O módulo de estiragem, igual à força na região inicial da estiragem, aumenta também com maiores velocidades de enrolamentos.
7. O tamanho de cristais (medidos através de raios-X) aumenta com maiores velocidades de fiação.

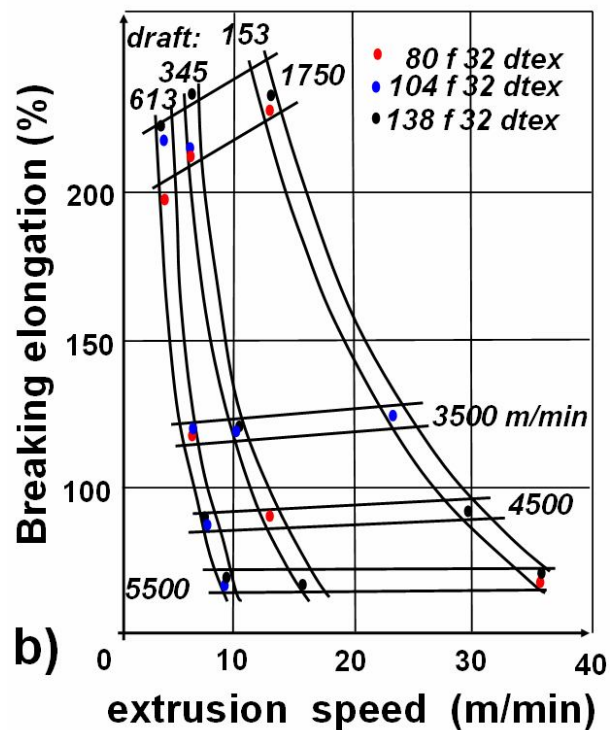


Figura 83 – (b) alongamento do POY como função da velocidade

8. A birrefringência (maiores respostas para maiores pré-orientação de cadeias moleculares) aumenta com maiores velocidades de enrolamento; este aumento é menor para filamentos grossos (denier por filamento, dpf) nas velocidades de até 3500 m/min que para dpf's mais finos, acima de 4500 m/min o aumento de orientação devido a estiragem a cobre.

## A.4 – Cristalização

Para o poliéster na forma de *chips* na abertura de uma extrusora de rosca simples, a cristalização se torna claramente visível: poliéster não cristalizado adere à zona de entrada logo que atingem a temperatura de 120 a 150 °C, formando um anel adesivo e bloqueiam a entrada de novos *chips*. Também nos fios, as regiões amorfas e cristalinas determinam as propriedades das fibras. No filamento, uma estrutura amorfa e regiões cristalinas seguem uma a outra e às vezes se misturam. Quando os filamentos são aquecidos, por exemplo, durante a texturização, as cadeias adjacentes aumentam como mostra a “Figura 84” para diferentes estiragem dos filamentos de poliéster. (FOURNÈ 1998)

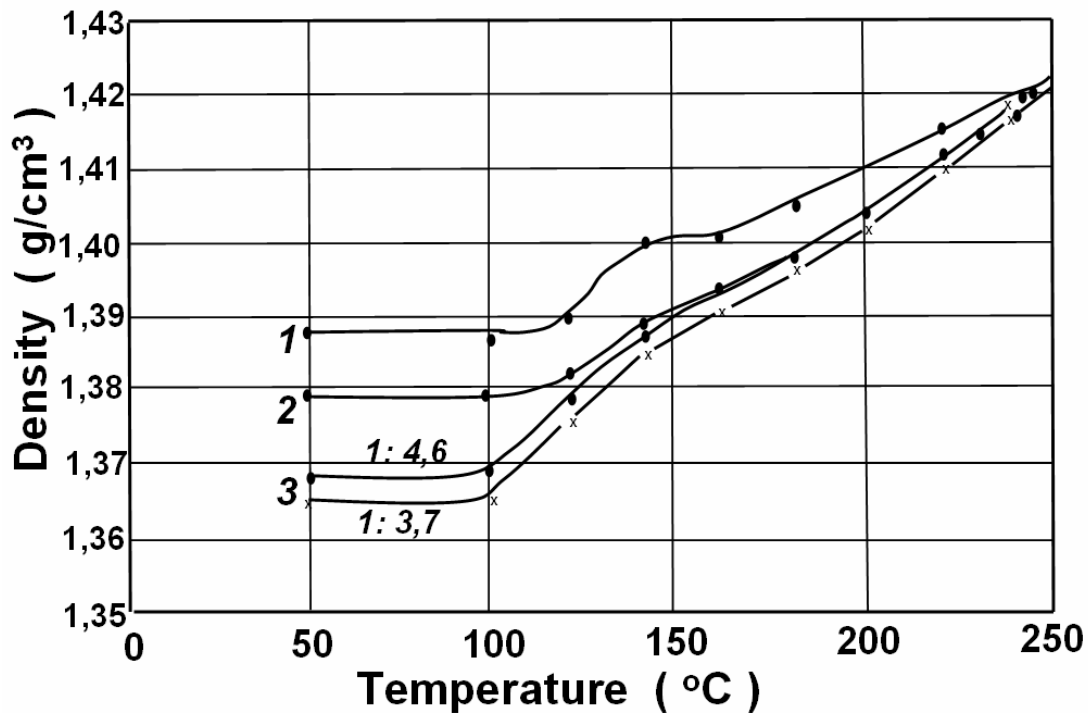


Figura 84 – Filamentos estirados com temperatura (30min) versus densidade

A curva (1) na “Figura 84” foi medida em um material não estirado. O grau de cristalização pode ser calculado como:

$$\alpha = \frac{(\gamma - \gamma_a)}{(\gamma_k - \gamma_a)} \quad (89)$$

Onde:  $\gamma$  = densidade e define (a) como completamente amorfa e (k) para completamente cristalino, as densidades para poliéster são:  $\gamma_k = 1,455$  e  $\gamma_a = 1,331$  [g/cm<sup>3</sup>].

As curvas mostram materiais com diferentes estiragens. Desta maneira, conhecendo-se a estiragem da fibra e a temperatura à qual está exposta, pode-se determinar a densidade da mesma.

No processo de estiragem, o que ocorre de maneira microscópica é o alinhamento das cadeias de macromoléculas, gerando aumento da cristalização do polímero. A “Figura 85” representa esta transformação de modo a deixar uma representação clara deste processo pelo qual o polímero passa. Pode-se verificar uma região na qual as macromoléculas estão totalmente desordenadas e desalinhadas. Neste estado, o polímero não proporciona resistência. Ao se estirar o polímero, ocorre a formação de pontos de estiragem (do inglês *necks*) e a partir deste ponto, as macromoléculas passam a ter maior grau de alinhamento de acordo com a estiragem e temperatura aplicadas. Este dois fatores são os de maiores influência para com o grau de cristalização ou orientação do polímero.

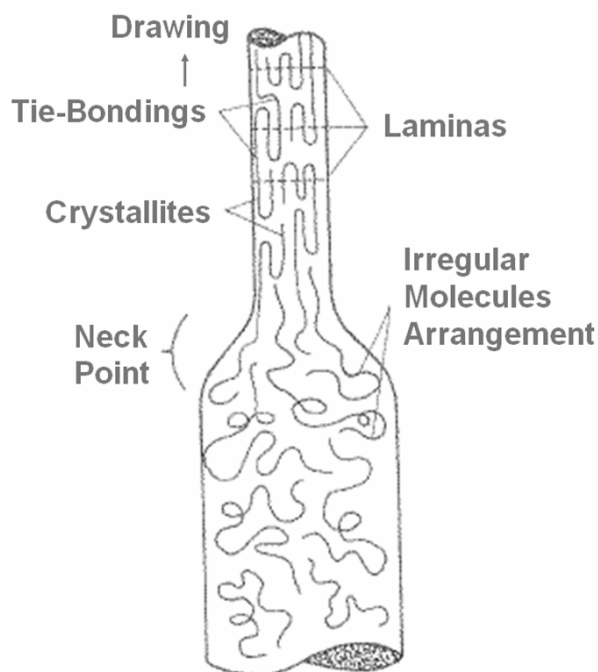


Figura 85 – Desenho esquemático do ponto de estiragem no filamento