

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
DESENVOLVIMENTO PROCESSOS QUÍMICOS

***Utilização do QFD como ferramenta para
desenvolvimento de uma resina termoplástica para
prototipagem rápida***

Autor: Luciana Rodrigues Oriqui

Orientador: Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Reis



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
DESENVOLVIMENTO PROCESSOS QUÍMICOS

***Utilização do QFD como ferramenta para
desenvolvimento de uma resina termoplástica para
prototipagem rápida***

Autor: Luciana Rodrigues Oriqui

Orientador: Prof. Dr. Rubens Maciel Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Reis

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Campinas – São Paulo
Setembro, 2008

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP**

Or48u Oriqui, Luciana Rodrigues
Utilização do QFD como ferramenta para desenvolvimento de uma resina termoplástica para prototipagem rápida / Luciana Rodrigues Oriqui. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Rubens Maciel Filho, Marcelo de Carvalho Reis.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Desdobramento da função qualidade. 2. Laboratorios experimentais. 3. Pesquisa e desenvolvimento. 4. Prototipagem rápida. 5. Poliamidas. I. Maciel Filho, Rubens. II. Reis, Marcelo de Carvalho. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Titulo em Inglês: The use of QFD as a tool for development of a thermoplastic resin for rapid prototyping

Palavras-chave em Inglês: QFD, Research Laboratories, Rapid Prototyping, PA12, Product Development

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Franco Giuseppe Dedini, Flávio Luis Schmidt

Data da defesa: 20/10/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

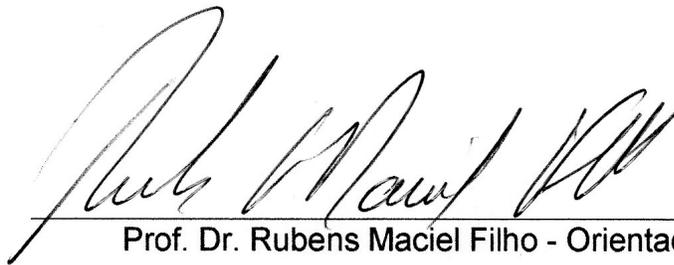
Comissão Julgadora – Dissertação de Mestrado

Candidato: Luciana Rodrigues Oriqui

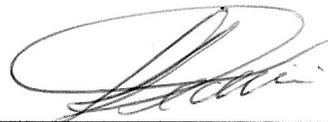
Data da Defesa: 20 de outubro de 2008

Título da Dissertação: Utilização do QFD como ferramenta para desenvolvimento de uma resina termoplástica para prototipagem rápida

Dissertação de Mestrado defendida por Luciana Rodrigues Oriqui e aprovada em 20 de outubro de 2008 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho - Orientador



Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini



Prof. Dr. Flávio Luis Schmidt

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho (Orientador)

A toda a minha família, que sempre me apoiou e incentivou a seguir em frente na realização de meus sonhos. Aos meus filhos, Gabriella e Lucca, pelo amor incondicional mesmo quando o trabalho me fez ausente. Aos meus pais, Osvaldo e Regina, que viabilizaram esse projeto; sem seu apoio realmente não haveria como chegar até aqui. Ao Márcio e à Valéria que me orientaram de diferentes formas em momentos cruciais. Ao Marcelo, amigo de sempre, referência pessoal e profissional. Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos, obrigada.

Agradecimentos

Muito bom poder agradecer às pessoas que fizeram parte de um sonho, um ideal conquistado. Esta oportunidade de reconhecê-los formalmente é um “capítulo” muito especial deste trabalho.

Não poderia começar de outra forma que não essa, o agradecimento a Deus por me permitir tanto e, principalmente, por ter-me dado o privilégio de nascer dentro do seio familiar no qual convivo.

São vários os tantos outros agradecimentos devidos:

Ao Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Reis, pela competência, pelo apoio incondicional, pelo acompanhamento e orientação em cada etapa do trabalho e pela amizade irrestrita. Muito lhe devo, obrigada, de todo o meu coração.

Ao Prof. Dr. Rubens Maciel Filho, por permitir-me participar do programa de mestrado como sua orientada e pela ajuda no decorrer do projeto. Obrigada.

Ao Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva, Chefe da Divisão de Tecnologias para Desenvolvimento de Novos Produtos do CenPRA, amigo especial que muito me ajudou, tanto nas orientações sobre o processo de prototipagem, quanto no incentivo para conclusão deste trabalho. Obrigada, meu amigo.

Ao. Sr. Marcelo Fernandes de Oliveira, técnico e especialista em prototipagem rápida do CenPRA, pelo tempo e paciência a mim concedidos. Grata pelas orientações.

À Maria Carolina Burgos Costa, do LOPCA, pelo total apoio desde que a conheci. Sua ajuda foi de imensa valia.

À Dra. Mylene Cristina Ferreira Rezende e ao Dr. André Luiz Jardini Munhoz, pela atenção, críticas e recomendações na qualificação. Foram todas elas muitíssimo bem-vindas.

Ao Toninho, amigo querido, com o qual se pode contar a qualquer hora. Obrigada pela ajuda nas dúvidas.

À Christine, Kátia e Sandra, obrigada por me ouvirem e apoiarem sempre que precisei.

À Universidade Estadual de Campinas e à Faculdade de Engenharia Química, grata pela oportunidade.

*Quando se sabe ouvir,
Não precisam muitas palavras.
Quanto tempo eu levei,
Para entender que nada sei.
(Edgard Scandurra)*

RESUMO

A metodologia Desdobramento da Função Qualidade, QFD é uma importante ferramenta na gestão de desenvolvimento de novos produtos. Seu maior mérito é o de disseminar, sistematicamente, os desejos e necessidades dos clientes para dentro das empresas e laboratórios de pesquisa e desenvolvimento, reduzindo o tempo de projetos e re-projetos de produtos, com conseqüente redução de custos e aumento da qualidade do produto final. Como os laboratórios de pesquisa universitários atendem diversas empresas, que os procuram para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias, entender exatamente o que o cliente espera de seus serviços, é essencial para o planejamento do trabalho e otimização de tempo e recursos. Esta dissertação trata da aplicação da metodologia QFD em um laboratório de pesquisas, como ferramenta de suporte no desenvolvimento de uma resina termoplástica, *nylon* 12, para processos de prototipagem rápida. Os objetivos gerais são adequar o desenvolvimento da poliamida 12 à qualidade exigida pelo cliente do laboratório, explicitar conhecimentos e antecipar-se às possíveis dificuldades técnicas para obtenção do produto final com as características previamente estabelecidas.

Palavras-chave: QFD, laboratórios de pesquisa, prototipagem rápida, PA 12, desenvolvimento de produtos.

ABSTRACT

The Quality Function Deployment methodology, QFD, is an important tool for the developing management of new products. Its largest merit is to disseminate, in a systematic way, the customers' desire and needs in the companies and also to research / development laboratories. This procedure will reduce the time of products' projects and re-projects, with consequent reduction of costs and increase of final product quality. As the research laboratories in the universities support several organizations which use them for new products development and technologies, the exact understanding concerning to what the customer expects from their services, is essential for the work planning and optimization of time and resources. This dissertation concerns to QFD methodology application in a research laboratory, as a support tool in the plastic resin development, nylon 12, for rapid prototyping processes. The general objectives are to adapt the polyamide 12 development according to the customer laboratory requirements in terms of quality, to make the knowledge clear and to anticipate possible technical difficulties for obtaining the final product with the previously established characteristics.

Key words: QFD, research laboratories, rapid prototyping, PA 12, products development

SUMÁRIO

Resumo	9
Abstract	10
Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas	14
Acrônimos, Abreviações e Significados	16
1. Introdução	
1.1 Considerações Iniciais.....	18
1.2 Interação QFD e Projeto de Produto.....	22
2. Revisão Bibliográfica	
2.1 QFD (<i>Quality Function Deployment</i> ou Desdobramento da Função Qualidade).....	27
2.2 Prototipagem Rápida.....	42
2.3 Poliamida.....	49
2.4 Reator.....	57
3. Aplicação da Metodologia QFD	
3.1 Fases dos Procedimentos no CenPRA	
3.1.1 <u>Fase 1</u> – Processos SLS.....	65
3.1.2 <u>Fase 2</u> – Aplicação de Questionários.....	69
3.2 Fases dos Procedimentos no LOPCA	
3.2.1 Definição dos Requisitos Técnicos.....	73
3.2.2 Definição dos Parâmetros do Processo.....	78
4. Resultados e Análises	
4.1 Resultados	
4.1.1 Matriz Casa da Qualidade.....	83
4.1.2 Matriz Planejamento do Processo.....	86
4.2 Análises.....	90
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	
5.1 Objetivos Gerais e Conclusões.....	90
5.2 Desafios do Modelo.....	91
5.3 Trabalhos Futuros.....	91
6. Referências Bibliográficas	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desafios e mudanças nas indústrias de processos químicos. Fonte: (Saraiva e Costa, 2004).....	19
Figura 2 – Desenvolvimento seqüencial de produto e processos. Fonte: (Michalek <i>et al</i> , 2006).....	26
Figura 3 – Relação entre satisfação do cliente e nível de desempenho do produto. Fonte: (Cheng e Melo Filho, 2007).....	31
Figura 4 – Abordagem das “quatro fases” para desenvolvimento do QFD. Fonte: (Fernandes e Rebelato, 2006).....	33
Figura 5 – Matriz da Qualidade. Fonte: (Cheng e Melo Filho, 2007).....	34
Figura 6 – Possíveis passos para o estabelecimento da Qualidade Planejada. Fonte: (Cheng e Melo Filho, 2007).....	36
Figura 7 – Matriz da Qualidade Genérica. Fonte: (Cheng e Melo Filho, 2007).....	38
Figura 8 – Matriz da Qualidade de uma máquina de escrever. Fonte: (Wasserman, 1993).....	40
Figura 9 – Efeitos do QFD no tempo de desenvolvimento de produtos. Fonte: (Cristiano <i>et al</i> , 2001).....	41
Figura 10 – Princípio do processo SLS. Fonte: (Volpato <i>et al</i> , 2007).....	44
Figura 11 – Direções dos eixos no processo SLS. Fonte: (Volpato <i>et al</i> , 2007).....	45
Figura 12 – Grupo amino carboxílico. Fonte: (Würzburg, 1995).....	52
Figura 13 – Dois métodos de produção do <i>Nylon</i> 12. Fonte: (Griehl e Ruestem, 1970).....	53

Figura 14 – Reação reversível de policondensação. Fonte: (Zheng <i>et al</i> , 2005).....	57
Figura 15 – Desenho esquemático do aparato experimental de reator batelada. Fonte: (Zheng <i>et al</i> , 2005).....	58
Figura 16 – Fluxograma do processo da planta piloto do LOPCA. Fonte: (LOPCA, 2008).....	61
Figura 17 – Reator experimental. Fonte: (LOPCA, 2008).....	62
Figura 18 – Gráfico de Pareto dos itens de qualidade exigida.	72
Figura 19 – Correlação entre os requisitos técnicos.....	74
Figura 20 – Correlação entre os parâmetros do processo.....	82
Figura 21 – Matriz Casa da Qualidade.....	84
Figura 22 – Gráfico de Pareto dos requisitos técnicos.....	85
Figura 23 – Matriz de Planejamento do Processo.....	87
Figura 24 – Gráfico de Pareto dos parâmetros do processo.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da poliamida PA 12. Fonte: (Würzburg, 1995).....	54
Tabela 2 – Propriedades das poliamidas. Fonte: (Wiebeck e Harada, 2005).....	55
Tabela 3 – Propriedades dos materiais para SLS <i>Nylon</i> 12. Fonte: (Zarringhalam <i>et al</i> , 2006).....	56
Tabela 4 – Lista de equipamentos da planta piloto do LOPCA. Fonte: (LOPCA, 2008).....	62
Tabela 5 – Lista de instrumentos da planta piloto do LOPCA. Fonte: (LOPCA, 2008).....	63
Tabela 6 – Lista de linhas da planta piloto do LOPCA. Fonte: (LOPCA, 2008).....	64
Tabela 7 – Voz do Consumidor.....	67
Tabela 8 – Aplicação da metodologia AHP para determinação do grau de importância dos itens de qualidade exigida.	70
Tabela 9 – Avaliação dos principais fornecedores de poliamida 12 ao CenPRA para os processos SLS.....	71
Tabela 10 – Características das correlações entre requisitos técnicos. Fonte: (Costa, 2007).....	77
Tabela 11 – Justificativas para a definição dos parâmetros do processo. Fonte: (LOPCA, 2008).....	79

Tabela 12 - Correlações entre parâmetros do processo e requisitos técnicos “essenciais”. Fonte: (LOPCA, 2008).....80

Tabela 13 – Comparativo entre prioridades de Qualidades Exigidas, Requisitos Técnicos e Parâmetros do Processo.....89

ACRÔNIMOS, ABREVIações E SIGNIFICADOS

Acrônimo	Idioma Original	Significado em Português
3D	<i>3 Dimension</i>	3 dimensões
AHP	<i>Analytic Hierarchical Process</i>	Processo de Análise Hierárquica
ASI	<i>American Supplier Institute</i>	Nome de um Instituto nos Estados Unidos
C	<i>Specific Heat</i>	Calor Específico
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	Desenho Gráfico Computacional
CenPRA	<i>Ver significado em português</i>	Centro de Pesquisas Renato Archer
CO ₂	<i>Ver significado em português</i>	Hidróxido de Carbono
CPD	<i>Chemical Product Design</i>	Projetos de Produtos Químicos
CSTR	<i>Continuous Stirred-Tank Reactor</i>	Reator de Fluxo Contínuo
CTI	<i>Ver significado em português</i>	Centro de Tecnologia da Informação
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyse, Improve, Control</i>	Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar
DOE	<i>Design of Experiments</i>	Planejamento de Experimentos
E	<i>Young's Modulus</i>	Módulo de Elasticidade
EaB	<i>Elongation at Break</i>	Elongação à Ruptura
EOS	<i>Ver significado em português</i>	Nome do fabricante da poliamida PA2200
FEQ	<i>Ver significado em português</i>	Faculdade de Engenharia Química
h	<i>Slice Thickness</i>	Espessura da camada no processo de sinterização a laser
HDT	<i>Heat Distortion Temperature</i>	Temperatura de Distorção Térmica
HoQ	<i>House of Quality</i>	Casa da Qualidade
K	<i>Termal Conductivity</i>	Condutividade Térmica
LOPCA	<i>Ver significado em português</i>	Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado
MFI	<i>Melt Flow Index</i>	Índice de Fluidez do Fundido

Acrônimo	Idioma Original	Significado em Português
OCNH	<i>Ver significado em português</i>	Grupo Amino Carboxílico
P	<i>Fill Laser Power</i>	Potência do Laser
PA	<i>Polyamide</i>	Poliamida
P_w	<i>Water Partial Pressure</i>	Pressão Parcial da Água
QD	<i>Quality Deployment</i>	Desdobramento da Qualidade
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>	Desdobramento da Função Qualidade
QFD_r	<i>Restrict Quality Function Deployment</i>	Desdobramento da Função Qualidade no sentido restrito
QFDVA	<i>Quality Function Deployment and Value Analysis</i>	Combinação das ferramentas Desdobramento da Função Qualidade e Análise do Valor
RM	<i>Rapid Manufacturing</i>	Manufatura Rápida
RP	<i>Rapid Prototyping</i>	Prototipagem Rápida
SCSP	<i>Scan Spacing</i>	Espaçamento do <i>scan</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>	Sinterização Seletiva a Laser
SS	<i>Scan Size</i>	Tamanho do <i>scan</i>
STL	<i>StereoLithographi</i>	Padrão de geometria 3D (malha de triângulos)
T_b	<i>Part Bed Temperature</i>	Temperatura de Plataforma de Construção
T_c	<i>Crystallization Temperature</i>	Temperatura de Cristalização
T_g	<i>Glass Transition Temperature</i>	Temperatura de Transição Vítreá
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i>	Análise Termogravimétrica
T_m	<i>Melting Temperature</i>	Temperatura de Fusão
TQC	<i>Total Quality Control</i>	Controle da Qualidade Total
TQM	<i>Total Quality Management</i>	Administração da Qualidade Total
UNICAMP	<i>Ver significado em português</i>	Universidade Estadual de Campinas
ρ	<i>Density</i>	Densidade
ΔH	<i>Melting Enthalpy</i>	Entalpia específica de fusão

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais:

No mercado mundial, face ao aumento contínuo e acelerado na competitividade entre as empresas, para as mesmas sobreviverem nesse novo ambiente, muitas indústrias mudaram sua estratégia de produção para customização em massa (forma de atender os clientes de forma individualizada, porém com produtividade administrada através de algumas técnicas como produção modular, por exemplo) de tal forma a criar uma conexão mais efetiva entre o que os clientes desejam e o que o produto oferece (Lin e Chen, 2005), contribuindo, dessa forma, para melhor se posicionarem estrategicamente.

Uma conseqüência relevante dessa competição, cada vez mais acirrada, foi a tomada de novas atitudes pelos clientes, que passaram não só a exigir que os fornecedores entendessem e atendessem suas expectativas, quanto os fez cada vez mais sensíveis aos preços praticados, desafiando as empresas a otimizar seus projetos de produto de tal forma a maximizar a satisfação do consumidor e, ao mesmo tempo, exercer maior controle sobre seus custos (Lai *et al*, 2007).

Inseridas nesse ambiente, as indústrias químicas têm, recentemente, em todo o mundo, passado por importantes desafios técnicos, sociais e econômicos que exigem a implementação de mudanças para sua sobrevivência e crescimento no mercado, através de profundas e rápidas revisões na natureza de seus produtos, objetivando a manutenção da lucratividade e o crescimento sustentável das mesmas (Figura 1).

Entre os aspectos técnicos está a necessidade de redução no consumo de energia e no consumo de materiais, além do trabalho integrado e em uma perspectiva multiescala (nanoescala a macroescala). Em relação aos aspectos sociais, destaca-se a demanda crescente por desenvolvimento sustentável e proteção ambiental, além da responsabilidade pela melhoria da qualidade de vida através da prevenção e da cura de algumas doenças. Já os aspectos econômicos podem ser representados pelo novo dinamismo do mercado e pela necessidade das indústrias químicas em atenderem as exigências dos consumidores por qualidade e desempenho dos produtos que consomem. Todos esses desafios demandam reestruturações na educação formal dos engenheiros químicos (Saraiva e Costa, 2004).

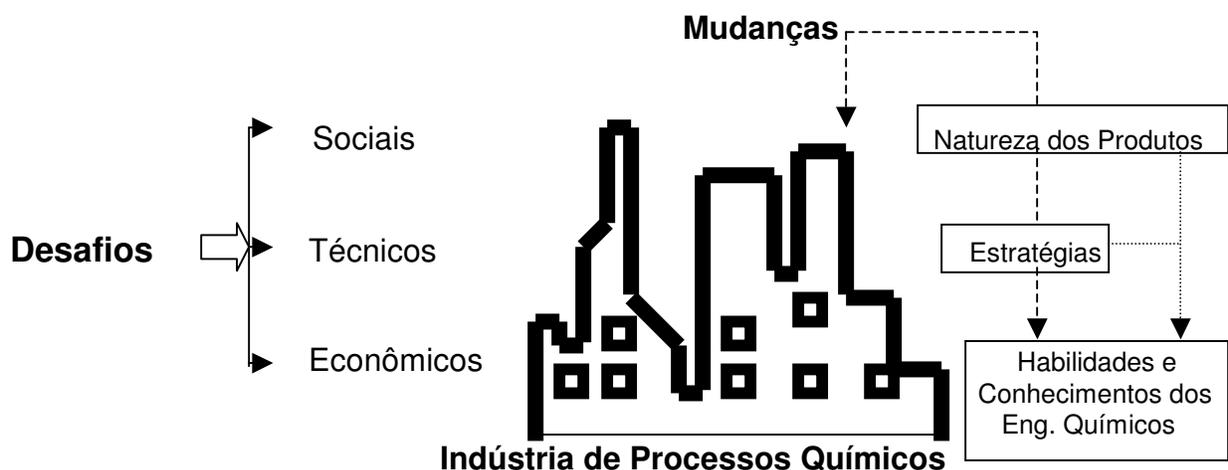


Figura 1: Desafios e mudanças nas indústrias de processos químicos (Adaptado de Saraiva e Costa, 2004).

Gani¹ (2004) ratificou que para as empresas progredissem focadas nessas novas demandas era necessário que ficassem atentas a sustentabilidade no desenvolvimento de novos produtos, com tecnologias que impactassem cada vez menos nos recursos naturais e que atendessem as demandas do mercado de forma eficiente, com otimização dos custos de produção e qualidade do produto final.

Uma das muitas mudanças observadas nas indústrias químicas foi a evolução da produção de *commodities*, cujo foco é o projeto de processo, com processos contínuos, equipamentos exclusivos e baixas margens de contribuição financeira. Para melhor se adequar ao mercado e às exigências do cliente, a produção passou a focar em produtos mais específicos, que demandam projetos de produtos com produções menores, normalmente em bateladas, uso de equipamentos não exclusivos e com alto valor agregado. Estas mudanças foram estratégicas para as indústrias conseguirem se manter lucrativas e sobreviverem. (Moggridge e Cussler (2000); Saraiva e Costa, (2004)).

Segundo Westerberg e Sobrahmanian (2000), a produção de *commodities* pode ser feita por qualquer empresa química que possa simplesmente comprar tecnologia para tanto e, como conseqüência, neste segmento, as empresas para se manterem no mercado de forma competitiva, têm que produzir com menor custo e maior qualidade que as outras, ou então ainda conseguir ser protegida por patente, o que lhes garante uma trégua ao menos por um período.

A escolha estratégica do processo mais adequado é crítica pelo alto investimento de capital envolvido e, nesse sentido, é relevante uma análise bastante cuidadosa para a escolha do processo acertado que garanta uma vantagem estratégica sobre os competidores (Partovi, 2007).

Nessa busca por estratégias para manutenção da rentabilidade, observou-se nas empresas, ao longo das décadas mais recentes, os fenômenos das reestruturações e racionalizações de mão de obra (*downsizing*), entre outros. Após exaustivas otimizações e reestruturações, Moggridge e Cussler (2000) afirmaram ter restado às indústrias químicas três estratégias: a primeira era deixar a área química e isto pareceu razoável para algumas empresas petroquímicas, por exemplo. A segunda era focar exclusivamente em *commodities*. Esta parece ter sido a estratégia preferida de algumas empresas privadas que souberam como se adaptar a este segmento, minimizando custos e aumentando a eficiência e eficácia interna. A terceira estratégia era concentrar-se em produtos químicos especializados,

produzidos em menores volumes e com alto valor agregado. Esta estratégia tem como consequência imediata, um maior investimento em pesquisas.

Esse deslocamento de diversas indústrias químicas para produção de produtos químicos mais especializados, pode ser observado principalmente nas áreas de biotecnologia e farmacêutica, onde o ciclo de vida normalmente curto de seus produtos pode ser razoavelmente prolongado ou através da proteção de uma patente estrategicamente abrangente ou, ainda, por um longo processo de desenvolvimento (Westerberg e Subrahmanian, 2000).

Para atender essa nova perspectiva de mercado, segundo Shaw *et al* (2004) e Saraiva e Costa (2004), as indústrias químicas vêm cada vez mais buscando que seus engenheiros tenham maior habilidade em projetos de produtos em complemento aos tradicionais projetos de processos. Essa demanda vem causando reestruturações nos cursos tradicionais de engenharia química em algumas universidades tais como Universidade de Coimbra, Carnegie Mellon, Universidade de Minnesota, Cambridge, Universidades de Groningen e Oldenburg, Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik (DIL), Universidade Técnica da Dinamarca, Universidade de Karlsruhe, Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong, Universidade de Sheffield, entre outras. Essas reestruturações compreendem a inserção de disciplinas de Projetos de Produtos Químicos (*Chemical Product Design*, CPD) na grade curricular dos cursos de Engenharia Química.

Como em Projetos de Produtos é essencial que se tenha o maior conhecimento possível a respeito das necessidades dos clientes e ainda que se possa priorizar essas demandas em forma de especificação das características de qualidade do produto, processo e matéria-prima, Cheng e Melo Filho (2007) indicam o uso do *Quality Function Deployment* (QFD), em português Desdobramento da Função Qualidade, método de análise diferencial na gestão de desenvolvimento de novos produtos, como sendo o instrumento adequado para esta finalidade.

Utilizar os requisitos do consumidor, suas necessidades e desejos, para direcionar o projeto de produto e implementar devidos ajustes antes do produto ser lançado, mais propriamente na fase de planejamento do projeto e pré-produção, pode significar um incremento significativo na competitividade do produto (Hochman, O'Connell, 1993; Pinto, 2006). Daí a escolha do tema da dissertação, que trata da importância e funcionalidade da ferramenta QFD como suporte na gestão de desenvolvimento de novos produtos.

É relevante ressaltar que, dentre os objetivos gerais da aplicação da metodologia QFD, três se destacam:

- ✓ Adequar a qualidade exigida pelo cliente, traduzindo suas reais necessidades para o processo produtivo;
- ✓ Transformar conhecimentos tácitos em conhecimentos explícitos;
- ✓ Antecipar-se aos “gargalos de engenharia” que correspondem às dificuldades técnicas atuais em atender as especificações dos clientes.

No intuito de avaliar a aplicabilidade da ferramenta QFD como suporte para o desenvolvimento de novos produtos nas indústrias químicas, depois de apresentados e desenvolvidos alguns conceitos preliminares, será utilizada a metodologia para orientar um laboratório de processos químicos em um projeto de desenvolvimento da resina plástica PA12 para um centro de pesquisas que utiliza este material como principal matéria-prima em processos de prototipagem rápida.

1.2 Interação QFD e Projeto de Produto

As companhias têm adotado “qualidade” no intuito de maximizar a satisfação do cliente como um tipo de vantagem competitiva para se sobressair no mercado (Lai *et al*, 2007), já incorporada aos objetivos de negócios da empresa e não mais como um programa independente (Guimarães, 1996). Projetistas de produto trabalham na redução de custos e maximização dos lucros dos produtos ao mesmo tempo em que procuram atender aos requisitos dos diversos segmentos que influenciam ou são

influenciados pela ação de uma organização (*stakeholders*), envolvidos no processo e às considerações de produção – investimentos em máquinas e alocação de produção, por exemplo. A ferramenta QFD ajuda os projetistas a organizar estes diversos requisitos de mercado e técnicos (Michalek *et al*, 2006), em direcionamentos objetivos de ordem estratégica que priorizam características técnicas e etapas do processo para assegurar a aproximação entre satisfação do consumidor e lucratividade da empresa.

Pode-se dizer que, de forma geral, o projeto de produto é uma atividade mista que se inicia com requisitos do consumidor para culminar na satisfação dos mesmos, através de produtos com características específicas. O projetista precisa claramente definir os requisitos dos consumidores e as características técnicas para então chegar ao mais apropriado projeto (Lin e Chen, 2005). Nesse contexto, considerar quantitativamente a relação entre as decisões técnicas e os objetivos do próprio negócio das indústrias, tais como lucratividade e participação no mercado (*market share*), é extremamente relevante.

Moggridge e Cussler (2000) apontam um esquema de projeto de produtos com quatro etapas:

1. Necessidades: que necessidades o produto precisa atender? Deve-se estabelecer um padrão para comparação, um padrão a ser objetivado (*benchmark*), e converter os desejos expressos de forma qualitativa em especificações técnicas e quantitativas.

2. Idéias: quais diferentes produtos poderiam preencher tais necessidades? No segmento de produtos químicos, são bastante utilizados, para essa finalidade, um processo de geração de idéias usualmente conhecido como "*brainstorming*", a busca na literatura e também pesquisas de patentes nas mesmas áreas ou em áreas correlacionadas.

3. Seleção: quais idéias parecem mais promissoras? Deve-se escolher uma ou duas melhores idéias para um detalhamento e desenvolvimento de projeto.

4. Produção: como se pode produzir e testar o novo produto? É importante construir e testar protótipos de possíveis produtos e estimar os custos envolvidos na produção. Esta etapa também é importante para testar a segurança e confiabilidade do produto, principalmente no caso de indústrias farmacêuticas.

O *Quality Function Deployment* (QFD), ou Desdobramento da Função Qualidade, é um método de gestão de desenvolvimento de novos produtos, desenvolvido no Japão, pelo Professor Akao, no estaleiro da Mitsubishi, em Kobe, no final dos anos 60, como um método para garantia da qualidade dentro do ambiente de Controle de Qualidade Total, ou *Total Quality Control* (TQC) (Slack *et al*, 1997).

Em 1997, em um Simpósio Internacional de QFD em Linköping, Akao (1997) relata que na verdade, o QFD foi concebido no Japão no final dos anos 60, quando as indústrias japonesas estavam migrando de seu modelo de produção baseado em imitações e cópias para o desenvolvimento de produtos originais. Neste ambiente de TQC (*Total Quality Control*) para desenvolvimento de novos produtos é que foi apresentada a metodologia QFD pelos Doutores Shigeru Mizuno e Yoji Akao. Nessa época a indústria automobilística japonesa encontrava-se em franca expansão e se fazia necessário um maior controle de qualidade antes do início da produção e não após os produtos acabados, como era feito até então. Em 1966, a partir de uma tabela de controle de processos apresentada por Mr. Kyotaka Oshiumi da Bridgestone Tire Corp., Akao montou sua primeira tabela a ser usada em desenvolvimento de produtos e, em 1972, publicou pela primeira vez uma abordagem do conceito desdobramento da qualidade, que estabelecia a implantação de um método de controle da qualidade a ser feito antes e durante todo o processo de produção. Essa abordagem só foi totalmente aceita após a criação de um gráfico que foi tornado público pelo estaleiro da Mitsubish em Kobe. Esse gráfico tornou-se o núcleo da metodologia QFD que foi definida como a verdadeira sistematização da qualidade a partir das necessidades dos clientes (Akao, 1997).

A dimensão da aplicabilidade do QFD, iniciada a partir da voz do cliente e propagada por todo o processo produtivo até a entrega do produto final ao mercado, foi bem retratada por Guimarães (1996), *“A base conceitual desta metodologia consiste em traduzir a voz dos clientes (seus desejos e necessidades) para especificações de produtos ou serviços, fazendo com que a voz do cliente se propague por entre as funções da organização, com acompanhamento e documentação eficazes, de modo que estes desejos e necessidades (também chamados de requerimentos) estejam incorporados aos produtos ou serviços finais”*.

Segundo Danny e Eddie (1999), os consumidores julgam a qualidade de um produto em função do quanto ele atende suas necessidades e do valor oferecido no mercado. Nesse sentido, as empresas precisam desenvolver produtos a um baixo custo e com qualidade e funcionabilidade requerida pelos clientes para que possam sobreviver no turbulento e competitivo mercado global.

Um dos fatores primordiais para garantia da eficácia da metodologia QFD é a necessidade de formação de uma equipe multidisciplinar composta por projetistas, especialistas em compras, gerentes de produção e analistas financeiros, entre outros, e que possuam apoio e comprometimento da alta direção das empresas. Este foco integrativo multi-departamental ajuda a manter o foco no consumidor durante todo o ciclo de desenvolvimento do produto ou processo e também é bastante relevante para que não se percam pontos de vista importantes na tarefa de tradução da “voz” do cliente (Kim *et al*, 2005; Guimarães, 1996).

O ciclo de desenvolvimento de produtos e processos está representado na Figura 2.

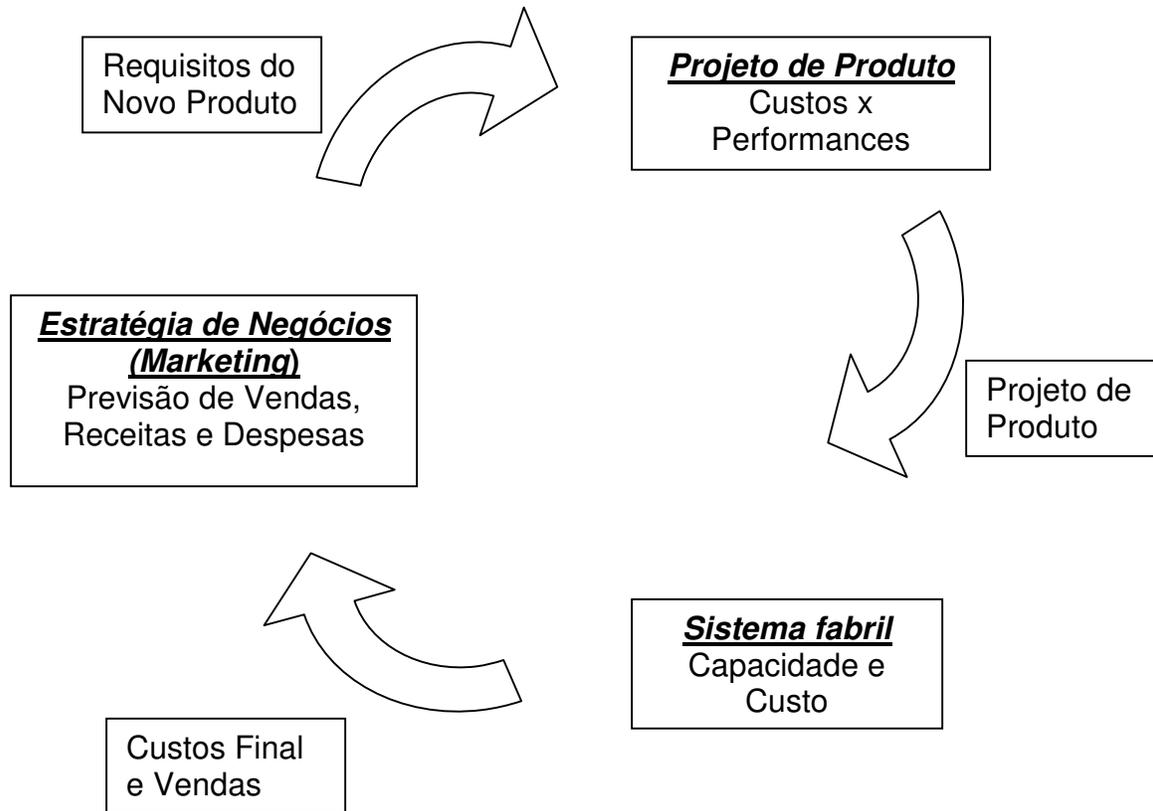


Figura 2: Desenvolvimento Seqüencial de Produto e Processos (Adaptado de Michalek, et al., 2006)

Pelo fato do trabalho ser desenvolvido junto a um Laboratório de Pesquisas, não há uma equipe multidisciplinar heterogênea como seria possível na aplicação da ferramenta em uma indústria, por exemplo. Neste caso específico de desenvolvimento de matéria-prima, a “equipe” será composta pelos projetistas do Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado (LOPCA) da Faculdade de Engenharia Química, FEQ, da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, e por representantes de seu cliente, o Centro de Tecnologia da Informação (CTI), anteriormente denominado CenPRA (Centro de Pesquisas Renato Archer) e antes ainda de Centro de Tecnologia de Informática.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QFD (*Quality Function Deployment* ou Desdobramento da Função Qualidade)

As empresas brasileiras, em sintonia com o cenário mundial, encontram-se em um momento de busca por alternativas de melhorias e modernização dos produtos existentes, bem como por desenvolvimento de novos produtos e serviços. Mais do que nunca se faz necessário ouvir e entender as necessidades dos clientes, que estão sempre em contínua mudança e renovação. Fleury (1999), resumidamente concluiu que a capacidade de aprender, mudar e inovar é básica para a sobrevivência das empresas nessa nova estrutura de mercado.

Como consequência dessa mudança contínua no desejo dos clientes e ainda face ao desenvolvimento ininterrupto de novos padrões e tecnologias, o ciclo de vida de um produto está se tornando cada vez mais curto, fato este bem retratado por Vicente Falconi Campos (*apud Cheng et al, 1995*), “... estamos vivendo uma economia crescentemente globalizada onde todos os mercados são expostos a todos os produtos dos mais variados produtores em vários países. Um produto de sucesso hoje poderá ser um produto preterido pelo mercado amanhã. É necessário que as empresas tenham elevada competência para o desenvolvimento contínuo de novos produtos que satisfaçam as necessidades mutantes dos clientes. Este é o principal fator de sobrevivência de uma empresa no mundo em que vivemos”.

Danny e Eddie (1999), afirmam que um produto ou serviço só é considerado de boa qualidade quando eles atendem sua finalidade com alta conformidade às suas especificações.

Apesar do surgimento do QFD ter sido na década de 60 somente na década de 80, mais propriamente a partir de 1986, a metodologia foi realmente divulgada e difundida nos Estados Unidos, principalmente pela versão divulgada pelo ASI, *American Supplier Institute*, desenvolvida por Makabe e transmitida por Don Clausing com adoção somente do Desdobramento da Qualidade, QD, e também pela versão desenvolvida por Don Clausing e difundida pelo *Goal/QPC* de Bob King e denominada QFD Melhorado, *Enhanced QFD*, onde o método de Projeto Robusto (*Robust Design*) foi acrescentado ao QFD, ou melhor, ao QD (Cheng e Melo Filho, 2007)

No Brasil, a metodologia QFD somente passou a ser difundida a partir da década de 90 e a evolução da utilização do QFD no país foi estudada por Sassi e Cauchick (2002) através de publicações de artigos entre 1995 e 2001 e sua aplicabilidade foi verificada em inúmeros segmentos de mercado, com resultados concretos em ampla diversidade de produtos e serviços.

Akao (*apud Cheng et al, 1995*), define QFD como “*uma forma de comunicar sistematicamente a informação com a qualidade e de explicitar ordenadamente trabalho relacionado com a obtenção de qualidade; tem como objetivo alcançar o enfoque da garantia da qualidade durante o desenvolvimento de produto e é subdividido em Desdobramento da Qualidade (QD) e Desdobramento da Função Qualidade no Sentido Restrito (QFD_r)*”.

Segundo Cheng e Melo Filho (2007), “*no QD o foco é a qualidade do produto requerida pelo cliente e no QFD_r o foco é a execução bem feita do trabalho humano*”. Ou seja, no QD o objetivo é estabelecer a priorização das qualidades exigidas pelos consumidores em função das características técnicas possibilitadas pela empresa, e no QFD_r o objetivo é validar, através do trabalho humano, o planejamento feito no QD assegurando sua execução.

Pode-se resumir esses enfoques em uma única equação:

$$\boxed{\text{QFD}_{\text{amplo}} = \text{QD} + \text{QFD}_r}$$

A base do QFD é a Administração da Qualidade Total, ou *Total Quality Management* (TQM), uma abordagem sistemática para a gestão das organizações que têm cultura de melhoria contínua e que reconhecem que as pessoas são elementos-chave para o sucesso de uma empresa (Pinto, 2006).

No Brasil, algumas empresas já dominam a ferramenta QFD com resultados muito significativos, principalmente devido a sua relevância nos projetos de produtos e como complemento a outras ferramentas como o Seis Sigma, por exemplo (Stancliffe *et al.*, 2007).

A metodologia Seis Sigma, pode ser definida como uma ferramenta para reduzir a variação do processo dentro dos limites definidos pelo cliente. Tem como pilares o foco nas necessidades do cliente e o fato de ser uma metodologia robusta, baseada em dados e controles estatísticos para gestão de processo através do modelo DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve, Control*, que se referem, respectivamente, à: Seleção de projetos, Desempenho do processo atual, Análise das causas, Melhoria do processo e Manutenção do processo sob controle). O QFD na metodologia Seis Sigma consiste em uma ferramenta indicada para obtenção e tradução das necessidades do cliente em características críticas para a qualidade, informações essas imprescindíveis para o início da aplicação da metodologia, por levarem a visão do cliente para dentro da organização (Rotondaro *et al.*, 2006; Pande *et al.*, 2007 e Breyfogle, 2003).

Pela diversidade de aplicações citadas na literatura e por ser uma ferramenta importante para o setor empresarial, principalmente no que se refere à gestão no desenvolvimento de novos produtos, é preciso que um maior número de nossos empresários conheçam ao menos os aspectos básicos da metodologia QFD e o que ela pode fazer por suas empresas.

A metodologia do QFD consiste em converter os requisitos do consumidor, também chamados de “voz do consumidor” em características da qualidade do

produto e, com estas informações, e através de desdobramentos sistemáticos das relações entre os requisitos do consumidor e as características de qualidade do produto, remover ou minimizar o máximo possível a subjetividade dos requisitos apontados e determinar prioritariamente e de forma objetiva, os requisitos técnicos do produto (Stancliffe *et al.*, 2007).

Esses desdobramentos são feitos por meio de tabelas, matrizes e procedimentos de extração, relação e conversão (Sassi e Cauchick, 2002), que traduzem as exigências do cliente em linguagem técnica do fornecedor, de tal maneira a estabelecer um conceito do produto em função da qualidade planejada, em cada estágio do desenvolvimento do produto e do processo de produção (Kim, 1997). Um aspecto importante e diferencial na utilização dessa metodologia é a necessidade absoluta de um trabalho conjunto entre todos os departamentos de uma empresa, que, além de promover maiores informações sob diferentes perspectivas, contribui na operacionalização das matrizes e, principalmente, da Matriz de Qualidade, que requer a colaboração de todos os envolvidos num mesmo projeto, para a correta atribuição dos valores e pesos de cada inter-relação entre características obtidas no decorrer do desenvolvimento (Delgado *et al*, 2001).

A primeira e fundamental fase do processo QFD consiste em traduzir, categorizar e classificar os desejos e as necessidades dos clientes, em termos tecnicamente quantificáveis, ou seja, em características técnicas do produto (Pinto, 2006).

Para melhor entender a “voz dos clientes”, Kano (Kano, 1991, *apud*: Cheng *et al*, 1995), desenvolveu o modelo (Figura 3) que relaciona o nível de satisfação do cliente com o nível de incorporação física do item de qualidade. Segundo Lai *et al* (2007), a combinação do modelo de Kano e a ferramenta QFD proporcionam um melhor entendimento da “voz do consumidor” nos projetos de produto.

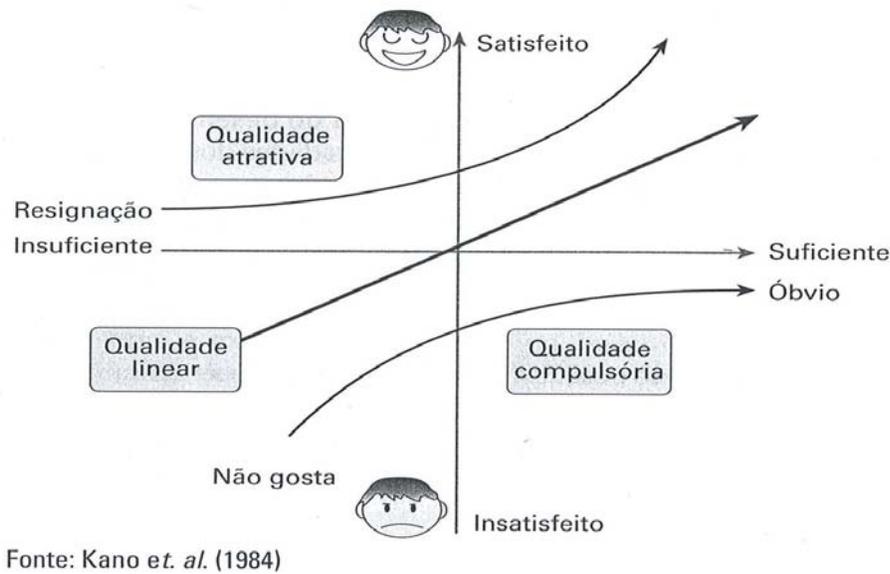


Figura 3: Relação entre satisfação do cliente e nível de desempenho do produto (Kano et al, apud Cheng e Melo Filho, 2007)

Cruz e Carvalho (2003) e Sirelli *et al* (2007), explicam as qualidades compulsórias, lineares e atrativas, da seguinte forma:

✓ Os itens de qualidade compulsória, também chamados de qualidade óbvia, não são declarados pelo consumidor e usualmente estão ligados à confiabilidade do produto, ou seja, são qualidades consideradas óbvias pelos clientes que contam encontrá-las no produto como garantia intrínseca do mesmo e que, quando estão presentes, não causam satisfação extra, mas quando estão ausentes no produto, causam extrema insatisfação. Uma boa forma de defini-los é através do departamento de atendimento ao consumidor, onde é possível acessar as reclamações dos clientes em relação ao produto. Como exemplo de itens de qualidade compulsória ou óbvia, pode-se citar a manutenção de aeronaves como critério de escolha por determinada companhia aérea: os clientes simplesmente esperam esse serviço, sem considerarem a necessidade de terem que solicitar por esse procedimento.

✓ Os itens de qualidade linear são os geralmente manifestados pelos consumidores em pesquisas de mercado e, que trazem maior satisfação quando são encontrados no produto e insatisfação caso estejam ausentes ou sejam insuficientes.

✓ Os itens de qualidade atrativa têm alta influência na satisfação do consumidor que não esperam encontrá-los nos produtos e, por isso mesmo, sua presença garante uma satisfação bastante relevante. Por outro lado, não geram insatisfação pela sua ausência. Usualmente uma boa maneira de acompanhá-los é através da observação do comportamento de consumidores e de tendências de inovações tecnológicas. Como exemplo de qualidade atrativa, pode-se citar a presença de GPS em um carro.

Antecipar e incorporar estes requisitos óbvios, lineares e atrativos ao projeto de produto pode ser um grande diferencial na competitividade da empresa (Hochman, O'Connell, 1993). Vale ressaltar a importância das qualidades óbvias serem plenamente atendidas, independentemente do grau de importância dado pelos clientes, sob pena do produto não ter mercado e que, nesse mesmo contexto, as qualidades lineares devam ser pelo menos compatíveis com as dos concorrentes. As qualidades atrativas devem ser planejadas para serem argumentos de vendas diferenciados (Cheng e Melo Filho, 2007).

Das poucas maneiras de decifrar, remover a ambigüidade subjetiva das necessidades apontadas pela voz do consumidor, podemos destacar, por exemplo, pesquisas de mercado, entrevistas, encontros com consumidores, dados da Assistência Técnica, entre outros (Stancliff *et al*, 2007 e Nascimento, 2002). Delgado *et al* (2001), citam Glenn Manzur, especialista em QFD, e seu incentivo, em programas de treinamento de QFD *Black Belt*, ao uso das visitas "gemba", ou seja, visitas "customizadas" para observar e por vezes questionar, o consumidor em um ambiente especialmente preparado para otimizar essa experiência personalizada.

Ainda segundo Delgado *et al* (2001), a maior dificuldade é juntar e agrupar todas as diferentes informações e observações obtidas nas “gembas” para formatar da melhor maneira possível a “voz do consumidor”.

A Figura 4 apresenta a mais típica entre as diversas abordagens de desenvolvimento de QFD que conta com quatro fases e cujo princípio de desdobramento de matrizes pode ser estendido ao se fazer o *como* de um estágio tornar-se o *quê* do próximo. Segundo Fernandes e Rebelato (2006), “... as diferenças entre as diversas abordagens derivam da amplitude da aplicação e do uso de recursos de apoio”.

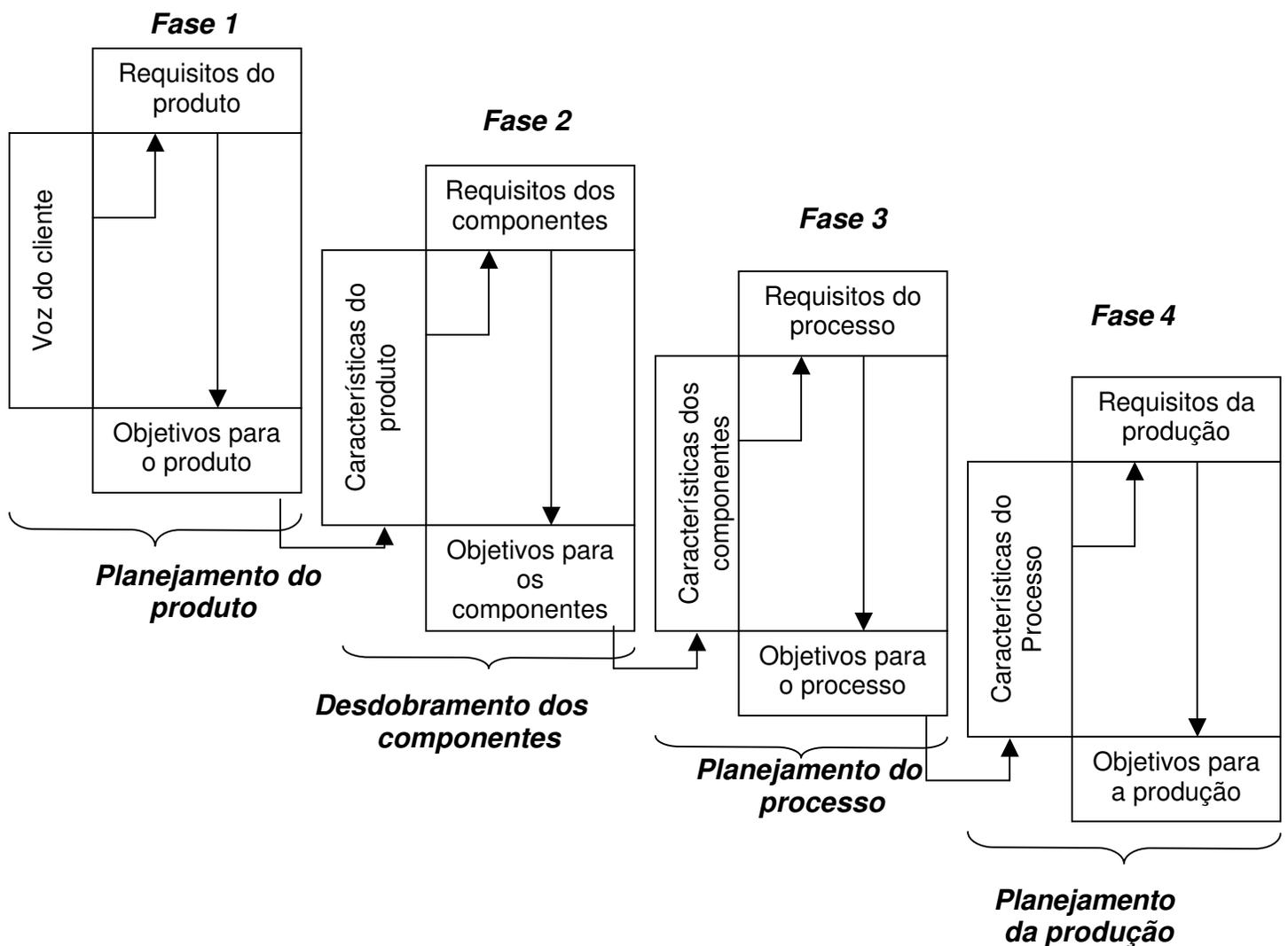


Figura 4: Abordagem das “quatro fases” para desenvolvimento do QFD (Adaptado de Fernandes e Rebelato, 2006)

Segundo Hochman e O'Connel (1993), o processo de desenvolvimento do QFD inicia-se com a fase 1, que analisa a "voz do consumidor" e seu desdobramento em requisitos do produto ou características da qualidade. Na fase 2, um time multidisciplinar traduz as características de qualidade em requisitos de componentes. Na fase 3, o time planeja as operações e processos que irão produzir esses componentes e, na fase 4, são escolhidas as etapas de controle que irão assegurar a confiabilidade da operacionalização dos processos.

Muitas empresas acabam focando seus esforços e trabalhando com o QFD somente na fase 1, ou seja, com a Casa da Qualidade (Kim *et al*, 2005). Esta associação exclusivista é extremamente simplista já que a Casa da Qualidade ou *House of Quality* (HoQ), mostrada na Figura 5, é apenas uma parte da metodologia.

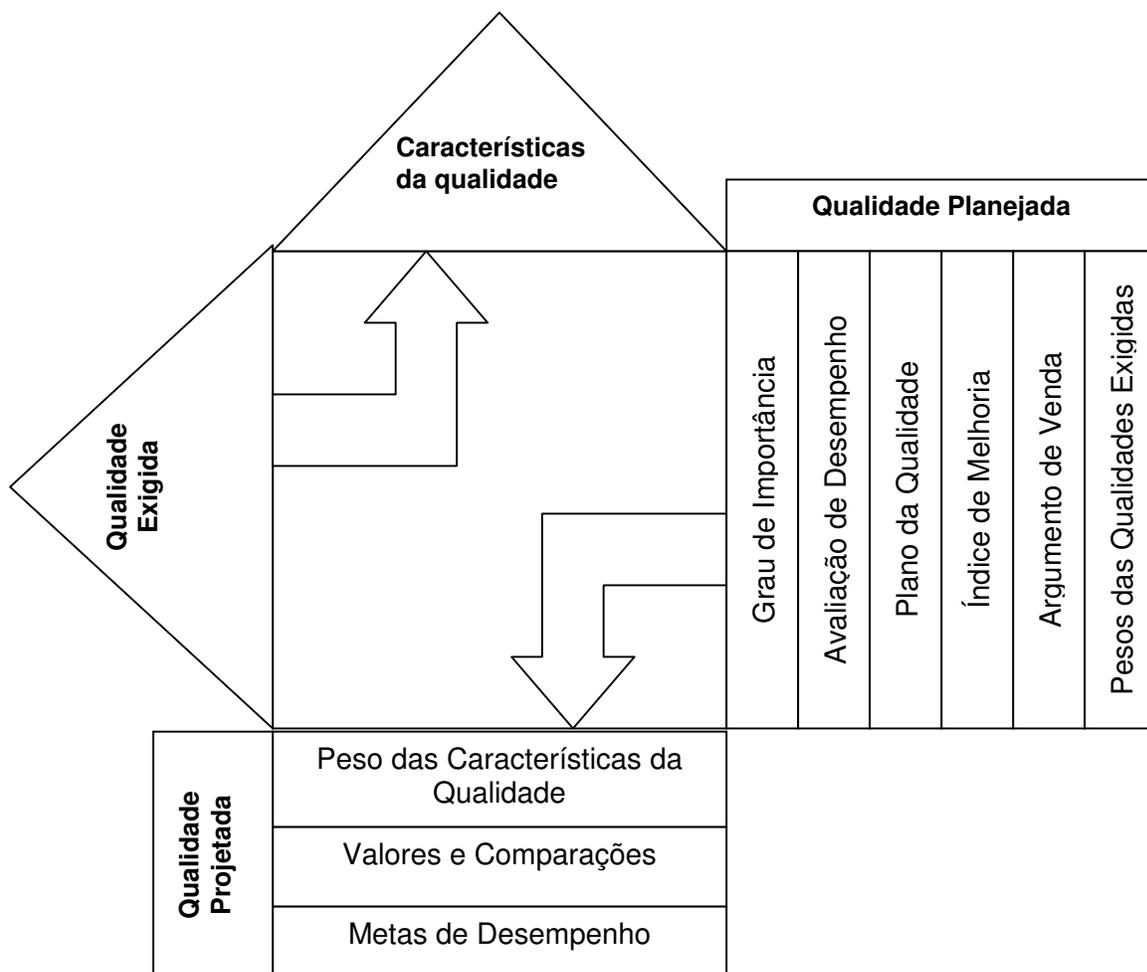


Figura 5: Matriz da Qualidade (Cheng e Melo Filho, 2007)

A partir da “voz do consumidor” obtém-se os “O QUÊs” – qualidades exigidas que correspondem às linhas da matriz da Casa da Qualidade e, a partir de cada uma dessas exigências de qualidade, deve-se chegar a uma lista de requisitos técnicos que possam satisfazer as mesmas. Esta lista, também chamada de “COMO”, corresponde às colunas da matriz Casa da Qualidade e é normalmente obtida por *brainstorming* com uma equipe multifuncional que procura traduzir a voz dos clientes, também chamadas de qualidade exigida, em requisitos técnicos que representam os itens através dos quais a qualidade pode ser atendida. Na matriz obtida, determina-se se há relação entre cada qualidade exigida e cada requisito técnico e, caso haja, quão forte é esta relação. Normalmente são utilizados símbolos ou valores, por exemplo, 1, 3 e 9, que especificam respectivamente o grau do relacionamento fraco, moderado ou forte entre as variáveis (Pinto, 2006). Se a relação for inexistente deve-se deixar o espaço em branco.

A matriz Casa da Qualidade, além das informações típicas sobre “o que fazer” (atributos do consumidor), “como fazer” (características de projeto) e a inter-relação entre estas informações, pode também conter informações sobre os principais concorrentes (*benchmarking*) da empresa onde se está aplicando a metodologia QFD (Kim, 1997). Pode-se dizer então que a matriz da qualidade (Casa da Qualidade) do QFD é uma articulação formal de como a empresa vê o relacionamento entre os requisitos do consumidor (*o quê*) e as características de projeto do novo produto (*como*) (Slack *et al*, 1997).

Algumas representações da matriz Casa da Qualidade ainda utilizam setas para representar o melhor comportamento das características da qualidade, ou requisitos técnicos. Setas para cima indicam que quanto maior a presença do requisito técnico, melhor, e setas para baixo que quanto menor a presença, melhor (Cheng e Melo Filho, 2007).

Slack *et al* (1997) e Cheng e Melo Filho (2007), através da Figura 6 e dos passos 1 a 8 representam o módulo de operacionalização da matriz Casa da Qualidade.

Qualidade Planejada									
1 Qualid. exigida	2 Grau de importância	Avaliação e Desempenho			Planejamento			Peso	
		Nossa empresa	Empresa	Empresa Y	Plano de qualidade	Índice de melhoria	Argumento de venda	Peso absoluto	Peso relativo
		3	4	5	6	7	8		
Total =							X	100%	

Figura 6: Possíveis passos para o estabelecimento da Qualidade Planejada (Cheng e Melo Filho, 2007)

Passo 1: Construir a tabela de qualidade exigida, ou os “o quê”/requisitos dos consumidores obtidos através de pesquisas de mercado, modelo de Kano, gembas, etc.

Passo 2: Pesquisar opinião da amostra, ou todo o público-alvo, quanto ao grau de importância que atribui a cada item de qualidade exigida. Sua importância recebe um valor através de escala previamente definida (1, 3, 9 por exemplo) ou através da metodologia *Analytic Hierarchical Process* (AHP) (Kim et al, (2005); Wasserman (1993); Water e Vries (2006))

Passo 3: Pesquisar a opinião de uma amostra do público-alvo, quanto às avaliações competitivas que indicam o desempenho do produto atual da empresa e dos principais concorrentes, com relação aos itens de qualidade exigida.

Passo 4: Estabelecer o plano de qualidade (nível de desempenho) da empresa para cada item de qualidade exigida, ou seja, que “nota” se pretende obter dos clientes, após o lançamento do novo produto no mercado.

Passo 5: calcular o índice de melhoria, como se segue:

Índice de Melhoria = $\frac{\text{Plano de Qualidade}}{\text{Avaliação recebida pela Empresa}}$

Passo 6: Decidir quais itens serão utilizados como argumentos de venda. O argumento de venda é um valor numérico acrescentado ao valor dos itens de qualidade exigida com o objetivo de aumentar o valor dos seus pesos, por se tratarem de um posicionamento estratégico pré-definido pela empresa.

<u>Classificação do argumento de venda</u>	<u>Valor</u>
Especial	1,5
Comum	1,2
Sem argumento	1,0

Passo 7: Calcular o peso absoluto de cada item de qualidade exigida, como a seguir:

Grau de Importância x Índice de Melhoria x Argumento de Venda Ou Passo 2 x Passo 6 x Passo 7
--

Passo 8: Calcular o peso relativo de cada item de qualidade exigida, convertendo o peso absoluto em contribuição percentual no peso total

Peso Relativo = $\frac{\text{Peso Absoluto}}{\text{(somatória de todos os pesos absolutos)}}$

A Figura 7 mostra uma Casa da Qualidade Genérica com suas devidas equações para cálculo da Qualidade Projetada (Cheng e Melo Filho, 2007)

QE = Qualidades exigidas CQ = Características da qualidade							Grau de Importância
QE \ CQ	CQ₁	CQ₂	CQ₃	CQ₄	...	CQ_p	
QE₁	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	...	X _{1p}	P ₁
QE₂	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	...	X _{2p}	P ₂
QE₃	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	...	X _{3p}	P ₃
QE₄	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	...	X _{4p}	P ₄
...
QE_n	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}	X _{n4}	...	X _{np}	P _n

Peso das características da qualidade	Absoluto	PaC ₁	PaC ₂	PaC ₃	PaC ₄	...	PaC _p	Σ PaC	Total
	Relativo		PrC ₁	PrC ₂	PrC ₃	PrC ₄	...	PrC _p	Σ PrC

Figura 7: Matriz da Qualidade Genérica (Adaptada de Cheng e Melo Filho, 2007)

Onde:

$$PaC_j = \sum_{i=1}^n P_i \times X_{ij}$$

e

$$PrC_j = \frac{PaC_j}{\sum PaC}$$

Um dos elementos muito importantes na *House of Quality* (HoQ) é claramente entender as necessidades do cliente e do grau de importância atribuído a cada necessidade (Stancliff *et al*, 2007).

Yong *et al* (2005) apontam a importância de correta atribuição da força do relacionamento entre os requisitos do consumidor (“o quês”) e as características técnicas (“comos”) como essenciais para o sucesso dos projetos de desenvolvimento de produtos. Nos projetos de produtos, a alteração de um valor de atributo técnico pode afetar o valor de outros atributos técnicos e, conseqüentemente, a relação com os requisitos dos clientes (Lai *et al*, 2007).

Através do uso da metodologia QFD, mais propriamente, através da Casa da Qualidade e da correlação entre os requisitos dos consumidores e os atributos técnicos correspondentes, obtém-se a priorização dos itens a serem desenvolvidos no projeto de produto (Sharma *et al*, 2006).

Como já mencionado anteriormente, três símbolos são usados para mostrar a força do relacionamento entre as qualidades exigidas e as características de qualidade. Três valores são vinculados a esses símbolos. Kim *et al* (2005) alertam sobre o fato dos projetistas de produtos escolherem esses valores arbitrariamente, normalmente usando as escalas 1-3-9, 1-3-5, 1-2-4 ou 1-6-9. Para contornar essa arbitrariedade, recomendam a utilização do processo *Analytic Hierarchical Process* (AHP) que utiliza comparações “pareadas” para obter o peso relativo dos relacionamentos. Cada comparação pareada representa uma estimativa das prioridades ou pesos das comparações entre os itens.

O modelo AHP leva em consideração a subjetividade das decisões tomadas quando poucas informações estão disponíveis e evidencia a importância da experiência e conhecimento dos participantes envolvidos no processo de decisão (Water e Vries, 2006).

Wasserman (1993) utilizou em sua matriz Casa da Qualidade (Figura 8), o modelo AHP para gerar o grau de importância dado pelos clientes aos itens de qualidade exigida e a escala 1-3-9 para denotar fraco, médio ou forte relacionamento entre qualidade exigida e características da qualidade, ou requisitos técnicos. Neste trabalho será adotado o mesmo critério: a utilização do modelo AHP para definir o grau de relacionamento e a escala 1-3-9 para denotar a força dos relacionamentos.

Características da Qualidade Qualidades Exigidas		Grau de Importância	Comprimento do "Lápis"	Tempo entre afiações	Pó de chumbo gerado	Haexagonalidade	Mínimo Resíduo de Borracha	Peso Absoluto (Total = 1.440)	Peso Relativo
		Fácil de se carregar	15						180
Não borrar	25						525	36,5	
Ponta durável	45						585	40,6	
Não deslizar	15						150	10,4	
Importância Técnica	Peso Absoluto	105	210	630	270	630	1.845	 9 pontos	
	Peso Relativo	5,69	11,38	34,15	14,63	34,15	100,0	 3 pontos	
			 1 ponto						
"Rank" de Prioridades		4	3	1	2	1			

Figura 8: Matriz da Qualidade de uma Máquina de Escrever (Adaptado de Wasserman, 1993)

O resultado final da aplicação da ferramenta QFD é um ranking de prioridades no desenvolvimento do projeto, para que o produto final esteja o mais próximo possível das expectativas traduzidas do cliente. Entre os principais benefícios do uso do QFD, pode-se citar: redução do tempo de desenvolvimento, redução de reclamações e melhor atendimento às necessidades e aos desejos do cliente (Cheng *et al.* 1995).

Cristiano *et al* (2001) ilustram, na Figura 9, o típico efeito da aplicação da metodologia QFD em projetos de produtos e desenvolvimento de processos.

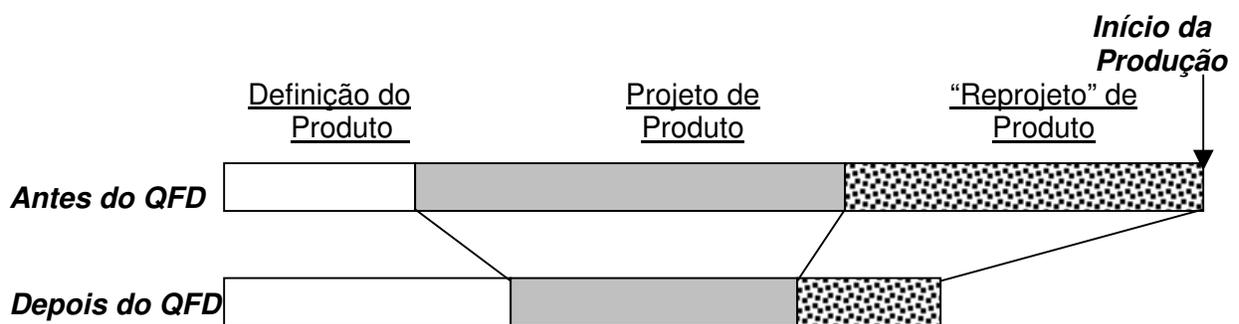


Figura 9: Efeitos do QFD no tempo de desenvolvimento de produtos (Cristiano *et al*, 2001)

Guimarães (1996) sintetiza QFD como uma metodologia de planejamento estratégico que traz como consequência importante, entre outras, uma melhoria da qualidade no seu sentido mais amplo, ou seja, que satisfaz os desejos e necessidades de seus clientes.

2.2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Segundo Volpato *et al* (2007), a Prototipagem Rápida ou “*Rapid Prototyping* (RP)”, pode ser definida como “*um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, isto é, baseado no princípio da manufatura por camada. Esta tecnologia permite fabricar componentes (protótipos, modelos, etc.) físicos em 3 dimensões (3D), com informações obtidas diretamente no modelo geométrico gerado no sistema Computer Aided Design (CAD) tridimensionais, e, mais recentemente, com os protótipos rápidos*”.

A evolução da Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* – RP), que inicialmente só produzia peças para protótipos não funcionais, devido aos prováveis problemas com o acabamento final, para Manufatura Rápida (*Rapid Manufacturing* – RM), tecnologia que possibilita a fabricação de produtos funcionais e bem acabados, permitindo seu uso como produto final, tem possibilitado a abertura de novos mercados para essas tecnologias (Zarringhalam *et al*, 2006).

Atualmente vários segmentos de mercado se beneficiam do uso das tecnologias de RP e de RM, em especial do processo *Selective Laser Sintering* (SLS), sendo já bastante difundidas na fabricação de protótipos e peças para as indústrias eletrônicas, mecânicas e biomédicas, entre outras (Salmoria *et al*, 2007).

O processo SLS produz peças a partir de matéria-prima em forma de pó e é a tecnologia mais comumente utilizada na RM, principalmente em função das vantagens do processo como, por exemplo, a variedade de materiais que podem ser utilizados no processamento (poliamida, poliamida com carga de microesferas de vidro, elastômero, poliestireno, cerâmica, metais e ligas), a taxa de produção mais elevada, a versatilidade, a capacidade de produzir mais funcionalidade nas peças, entre outras, comparadas com técnicas mais convencionais (Yadroitsev *et al*, 2007).

Os sistemas SLS são normalmente comercializados por dois fornecedores: 3D Systems dos Estados Unidos (antiga DTM) e EOS da Alemanha, que por sua vez também comercializam a matéria-prima Poliamida 12, PA12, com o nome comercial DURAFORM e PA2200, respectivamente. (Zarringhalam *et al*, 2006).

Volpato *et al* (2007) apresentam as etapas de processo SLS, de modo geral, como sendo as seguintes:

- 1) a modelagem tridimensional da peça em um sistema CAD;
- 2) a geração da geometria 3D da peça no padrão *StereoLithography* (STL) que basicamente representa uma aproximação da superfície da peça usando malha de triângulos;
- 3) a verificação do arquivo de dados;
- 4) o planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de suporte e estratégias de deposição de material);
- 5) a fabricação e,
- 6) o pós-processamento, geralmente limpeza e acabamento da peça.

Mais especificamente, ainda segundo Volpato *et al* (2007):

- Basicamente, nas etapas 1 a 4, são definidos no CAD o modelo das peças, a divisão e a definição virtual do modelo em camadas com espessuras específicas que devem ser definidas para posterior produção seqüencial.
- Inicia-se, então, na etapa 5, o processo da fabricação física das peças com o arraste/deslizamento da matéria-prima estocada em dois depósitos contíguos à plataforma de construção (*part bed*), formando uma camada com superfície lisa e homogênea na plataforma (Figura 10).
- Esta camada é aquecida em atmosfera inerte (nitrogênio) a uma temperatura T_b pouco inferior ao ponto de fusão do material (T_m). Um sistema de varredura desloca o feixe do laser de CO_2 sobre a camada, fornecendo a

energia necessária para sinterizar as partículas, de acordo com a geometria da camada 2D de cada seção transversal da peça.

- Este processo se repete em finas camadas até o final da peça.
- Na seqüência, a plataforma que suporta a peça desce, na direção do eixo Z (Figura 11), um incremento igual à espessura h da camada fatiada no CAD e uma nova camada de material é espalhada sobre a anterior.
- Uma vez que a temperatura da nova camada atinja a temperatura de trabalho T_b , o laser inicia novamente a varredura na superfície, resultando em nova sinterização.
- Este ciclo é repetido até que todas as camadas sejam depositadas e a peça seja produzida.
- O pó não sinterizado pode ser reutilizado por mais algumas vezes.

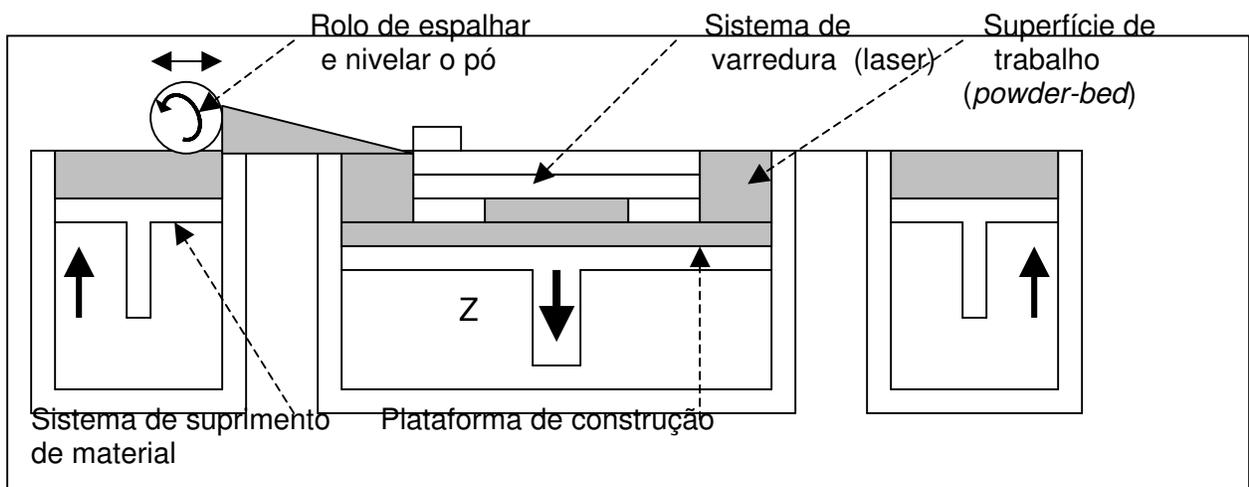


Figura 10: Princípio do processo SLS (Volpato et al, 2007)

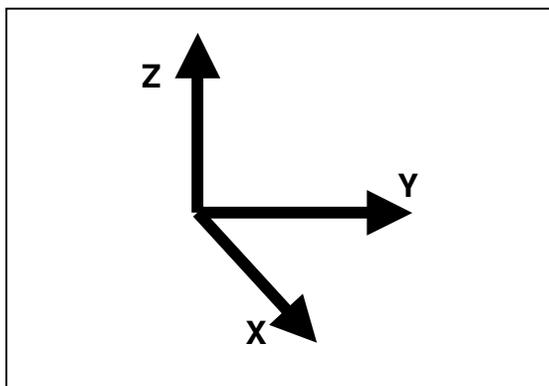


Figura 11: Direções dos eixos no processo SLS (adaptado de Volpato et al, 2007)

As propriedades das diferentes matérias-primas em forma de pó influenciam os parâmetros de fabricação no processo RP e esses parâmetros de fabricação afetam a estrutura e as propriedades da peça final. Por exemplo, a forma e o tamanho das partículas influenciam a densidade da matéria-prima enquanto que o comportamento do fluxo de fusão e da estabilidade térmica definem a potência do laser e a velocidade de escaneamento (Salmoria et al, 2007).

Gibson e Shi (1997) ratificam a importância da influência das propriedades da matéria-prima em pó nos parâmetros de fabricação e ressaltam, especialmente, cinco desses parâmetros: a temperatura na plataforma de construção (*part bed temperature* - T_b), a potência P do laser, o tamanho do *scan* (SS), o espaçamento do *scan* ($SCSP$) e a espessura das fatias (h), sendo:

- T_b : as temperaturas T_b são controladas de forma que, antes do scanner de laser começar a se mover, a matéria-prima na plataforma de construção seja aquecida até T_b e se possa, então, reduzir a potência do laser e a distorção no processo de sinterização.

- P : a potência do laser, P , deve ser ajustada de tal forma a garantir que a matéria-prima na superfície da plataforma de construção esteja aquecida até próxima a temperatura de fusão, T_m (*melting temperature*), durante o processo

de “escaneamento”. Yadroitsev *et al* (2007) ressaltam que, para uma determinada potência do laser, a temperatura e o volume do material fundido serão maiores, para menores velocidades de escaneamento ou varredura.

- SS: o tamanho do *scan*, *SS*, corresponde à distância que os scanners se movem uma vez por etapa com o laser ligado. O tamanho do *scan*, *SS*, determina a velocidade do feixe de laser que, por sua vez, influencia a potência do laser e o tempo de fabricação das peças finais. A velocidade do feixe também determina a densidade de energia absorvida pela matéria-prima.

- SCSP: o espaçamento do *scan*, *SCSP*, é a distância entre dois vetores de *scan* vizinhos paralelos. Se o espaçamento do *scan* é muito grande, a seção transversal pode não ser completamente sinterizada, já que ela está relacionada ao tamanho do raio laser e à densidade energética que, por sua vez, tem grande influência na qualidade geral das peças RP.

- *h*: a espessura das fatias (*h*) que representa a profundidade que o pistão submerge em cada camada, determinando a espessura de cada uma delas na peça cilíndrica. O efeito de cada passo é relacionado com esta espessura da camada. Maiores espessuras demandam menor tempo total de fabricação, porém menor qualidade das peças finais. Menor espessura gera peças com melhor acabamento superficial, porém, simultaneamente, com maior tempo de fabricação e, conseqüente, com maior exposição da matéria-prima à temperatura do alimentador, o que pode gerar maior degradação.

Tontowi e Childs (2001) também discorrem sobre a relevância do controle da temperatura da plataforma de contração (T_b). Como o sistema de aquecimento da plataforma muitas vezes não é uniforme em toda a extensão da mesma, isso pode afetar a densidade final das peças produzidas e, por conseqüência, suas resistências. Em seus experimentos concluem que quanto mais baixa a T_b , mais baixa a densidade da peça sinterizada e que, para manter a alta densidade, como sugerido pela potência laser padrão, a densidade energética tem que ser capaz de aumentar ou

diminuir após a flutuação da T_b . É geralmente aceito que a variação da densidade da peça final esteja relacionada com a sua posição na plataforma de construção e, portanto, com a variação da T_b na posição específica de sua localização.

Na utilização do processo SLS para fabricação de protótipos funcionais são bastante importantes não só as propriedades mecânicas como também a aparência do produto final, sendo que a qualidade na aparência pode ser basicamente definida pela precisão dimensional e rugosidade superficial, enquanto as propriedades mecânicas são definidas por força da tração, dureza superficial e densidade (Gibson e Chi, 1997).

Ming e Gibson (2006) descrevem a possibilidade de incorporar cores às peças finais fabricadas, adaptando uma impressora jato de tinta a um equipamento SLS. A proporção entre tinta e etanol (é necessário acrescentar etanol à tinta já que a mesma pura, sem a adição do etanol, tem alta tensão superficial e, portanto, baixa penetração no pó) dependerá da taxa de penetração da tinta, do efeito do etanol - que altera a estrutura do material e a degradação da cor, da cor da tinta, da estrutura da matéria-prima a ser utilizada no processo e da estabilidade da tinta dentro do equipamento SLS. Constatou-se que é melhor adicionar cor antes da sinterização já que nesta fase os poros são melhores distribuídos que na região já sinterizada. Vale ressaltar que a adição de cores ao processo pode gerar alguns efeitos paralelos como, por exemplo, o aumento da condutividade térmica do pó e, conseqüentemente, diminuição da capacidade calorífica do mesmo gerando mais calor perdido durante a sinterização. Outro efeito possível é a diminuição da resistência à tração do protótipo final com a adição de tinta.

A utilização de polímeros no processo SLS oferece algumas vantagens em relação aos materiais metálicos e cerâmicos. Entre elas pode-se citar baixas temperaturas de processo, controle do fluxo de fusão e alta resistência à corrosão (Salmoria *et al*, 2007).

Dois tipos de polímeros têm sido extensivamente usados nestes processos: polímeros amorfos, como os policarbonetos e os polímeros cristalinos, como a poliamida. Esta última, também conhecida como *nylon*, tem calor latente e temperatura de fusão, enquanto os amorfos têm somente temperatura de transição vítrea (Tontowi e Childs, 2001)

Os polímeros termoplásticos, dentre eles o *nylon*, têm maior ênfase nos processos SLS, principalmente devido à sua capacidade de reciclagem que acaba gerando economia de material (Gibson e Chi, 1997).

Polímeros semicristalinos, predominantemente *Nylon* 12 e 11, podem ser sucessivamente sinterizados, com propriedades mecânicas superiores às dos polímeros amorfos, mas o encolhimento durante a cristalização impede a produção de peças precisas. Por esta razão é essencial que, para os materiais serem processados por SLS, a temperatura de fusão tenha que ser consideravelmente mais alta que a temperatura de cristalização e, então, a cristalização poderá ser retardada e reduzida durante o processo de construção para permitir que novas camadas se unam às anteriores com uma microestrutura mais homogênea (Zarringhalam *et al*, 2006).

2.3 POLIAMIDA (PA)

Os polímeros caracterizam-se por suas longas cadeias de repetidas unidades de meros que quando são idênticas, caracterizam os chamados homopolímeros, sendo que o número de unidades repetidas representa o grau de polimerização, n . As principais propriedades dos polímeros dependem principalmente de dois fatores: a flexibilidade de suas cadeias e a interação das cadeias com seus vizinhos (Birley *et al*, 1992).

Rosen (1993) diferencia os polímeros termoplásticos dos termofixos pelos seus comportamentos frente ao aquecimento e resfriamento, sendo que:

- os termoplásticos amolecem com o aquecimento, fluindo quando uma tensão é aplicada e reconquistam reversivelmente seus estados anteriores, sólidos ou borrachoso, quando são resfriados;
- os termofixos, apesar de poderem ser amolecidos por aquecimento e tornados fluidos por aplicação de tensão, não reassumem reversivelmente seus estados anteriores depois de resfriados.

Os polímeros podem ser amorfos ou semicristalinos, ou seja, podem possuir somente regiões amorfas ou então possuir simultaneamente regiões amorfas e regiões cristalinas. As regiões amorfas encontram-se em estado sólido vitrificado quando abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g , já que suas cadeias moleculares estão fortemente imobilizadas nessas condições. A temperatura de transição vítrea, ou *glass transition temperature*, T_g , refere-se à região amorfa e é nela que o polímero amolece e o volume livre aumenta repentinamente para um ponto onde a movimentação das longas cadeias tornam-se viáveis. Quando a temperatura aumenta acima de T_g para aproximadamente $(T_g + 30K)$, o movimento molecular aumenta provocando a queda no módulo de elasticidade E e as propriedades físicas do polímero assumem característica “borrachosa”. À medida que a temperatura aumenta ainda mais, viabiliza-se totalmente a movimentação das cadeias e as moléculas então assumem um estado de movimentação contínua e aleatória que definem o estado de “fusão” dos polímeros amorfos. Já a temperatura

de fusão, ou *melting temperature*, T_m , refere-se à temperatura onde há fusão das regiões cristalinas. Perto desta temperatura T_m , o volume específico dos cristalinos altera-se drasticamente e é por isso que materiais cristalinos encolhem facilmente quando são resfriados a partir de T_m e também que resfriamentos diferentes podem causar distorções (Gibson e Chi, 1997).

Birley *et al* (1992) tratam da importância do percentual da fase cristalina de um polímero em suas propriedades finais e o quanto este percentual está relacionado com o tratamento térmico durante seu processamento.

As poliamidas são termoplásticos bastante utilizados em processos de sinterização a laser, especialmente devido a suas boas propriedades mecânicas que muito interessam nas peças finais produzidas (Wiebeck e Harada, 2005).

Ainda segundo Wiebeck e Harada (2005), *“... a influência do grau de cristalinidade das poliamidas é marcante nas propriedades físicas do material. No entanto, o efeito da cristalinidade dificilmente pode ser discutido independentemente da absorção de água pelas poliamidas, devido à natureza higroscópica das ligações hidrogênio que se transformam em hidroxilas. A presença de água funciona como plastificante no polímero, separando as cadeias moleculares e diminuindo a cristalinidade e a temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero de um valor da ordem de 50°C para 0°C. Conseqüentemente, se reduz, por um lado, a rigidez e a resistência à fluência dos nylons, e por outro lado, aumenta-se a resistência ao impacto e a tenacidade dos mesmos”*.

Rosen (1993), a partir da premissa de que as cadeias de polímeros estão mais eficientemente compactadas nas áreas cristalinas que nas amorfas, enumera alguns efeitos do grau de cristalinidade nas propriedades mecânicas de um polímero:

- maior cristalinidade resulta em maior densidade. Essa correlação positiva faz com que a densidade seja uma medida bastante conveniente do grau de cristalinidade de um polímero.

- quanto maior a cristalinidade de um polímero, maior sua resistência à tensão.
- a cristalinidade pode aumentar significativamente as propriedades mecânicas de um polímero.
- quanto maior a cristalinidade mais dificilmente deformável o polímero é.

Segundo Wiebeck e Harada (2005), as resinas de poliamida podem ser divididas em dois grupos:

- Grupo I: resinas polimerizadas a partir de uma diamina e de um diácido (exemplos: poliamidas 6.6; 6.10, 6.12; etc)
- Grupo II: resinas polimerizadas a partir de um aminoácido (exemplos: poliamidas 6.11; 12; etc.)

Phang *et al* (2005) afirmam que, dentre os termoplásticos, apesar dos vários estudos sobre a poliamida 6, há um especial destaque para a poliamida 12, ou *nylon* 12, que possui longas cadeias alifáticas, menor ponto de fusão e maior resistência mecânica que *nylon* 6 e *nylon* 66, além de geralmente apresentar propriedades superiores como flexibilidade, resistência à pressão, rigidez, boa resistência ao impacto, boas propriedades mecânicas em temperaturas extremas, estabilidade térmica, baixa densidade, impermeabilidade e resistência química.

Todas as poliamidas alifáticas, incluindo *nylon* 12, são apenas moderadamente estáveis à luz e ao calor, mas pequenas quantidades de estabilizadores melhoram sensivelmente esta propriedade. Devido à suas altas temperaturas de processamento e baixa afinidade com a água, é necessária uma técnica especial para trabalhar com *nylon* 12, já que apesar da baixa absorção de água, o nylon 12 é sensível à hidrólise (Griehl e Ruestem, 1970).

Na poliamida 12, comumente conhecida como PA 12, o grupo aminoácido carboxílico (Figura 12) ocorre em intervalos regulares em moléculas básicas lineares, determinando as características fundamentais da aplicabilidade das mesmas nos plásticos de engenharia. Já a presença de hidrocarbonetos alifáticos entre os grupos

OCNH é responsável pela alta cristalinidade destas moléculas. Os grupos OCNH determinam a quantidade de absorção de água de sólidos PA, que aumentam com o encurtamento da seqüência de hidrocarbonetos entre elas (Würzburg, 1995).

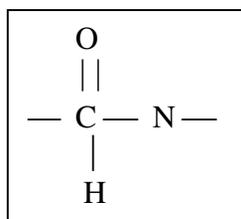


Figura 12: Grupo amino carboxílico (Würzburg, 1995)

O *nylon 12* vem sendo amplamente utilizado em vários segmentos industriais, destacando-se naqueles que exigem dimensões precisas mesmo em sistemas de distribuição de água, por serem altamente estáveis em presença de umidade (Phang *et al*, 2005).

Segundo Griehl e Ruestem (1970), o *nylon 12* pode ser preparado a partir da lauril lactama e também do correspondente ácido ω -amino láurico (Figura 13), sendo que a lauril lactama é uma substância sem cor, facilmente cristalizável, que se funde a aproximadamente 153°C, moderadamente solúvel em água, mas facilmente solúvel em solventes orgânicos. Essa baixa solubilidade em água exige altas temperaturas e pressão nos processos de polimerização hidrolítica para poderem causar a ruptura do anel lactâmico. O ácido ω -amino láurico gerado, na presença de água produz primeiramente uma poliamida de baixo peso molecular, mas que, após a remoção de água em um tanque de reator, gera facilmente um polímero. Traços de água que não puderem ser removidos completamente agem como estabilizantes fazendo com que o grau de polimerização encontrado seja inferior ao esperado.

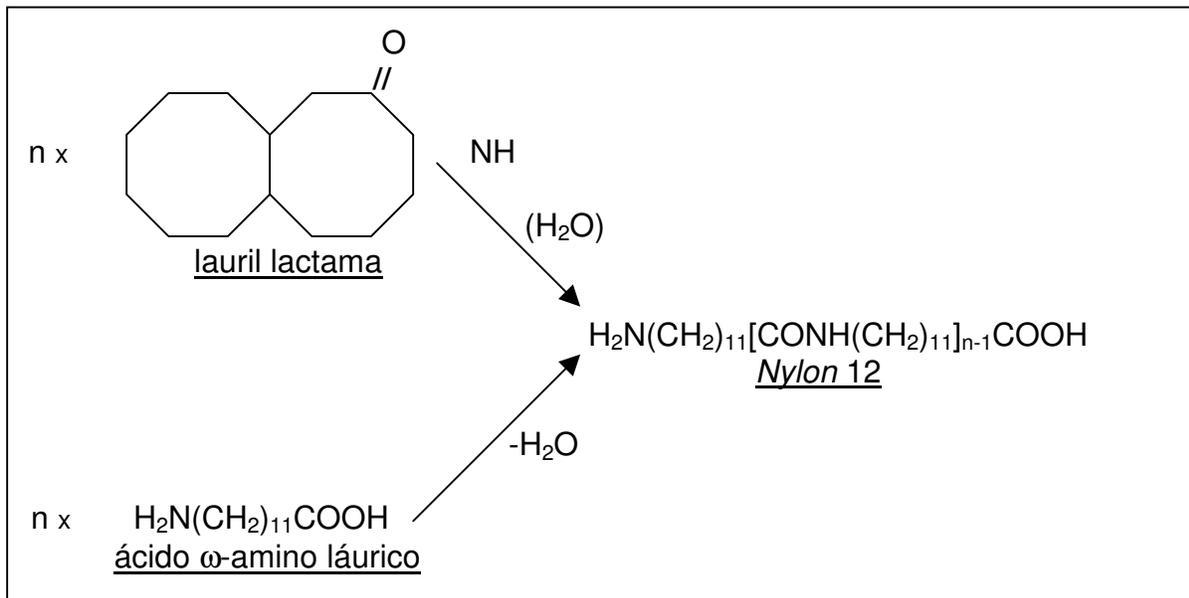


Figura 13: Dois métodos de produção do Nylon 12 (Griehl e Ruestem, 1970)

Ainda segundo Griehl e Ruestem (1970), o Nylon 12 também pode ser obtido a partir da polimerização aniônica da lauril lactama, porém este método tem que acontecer na falta absoluta de água.

A Tabela 1 traz uma relação das principais propriedades do *nylon* PA 12.

Propriedades	Unidade de Medida	PA 12
Densidade	g/cm ³	1,01 – 1,02
Absorção de Água, 23 ^o .C / 50% RH	%	0,9
<u>Mecânicas</u>		
Tensão limite de escoamento	N/mm ²	50
Elongação elástica	%	6 - 8
Tensão limite de ruptura	N/mm ²	55
Elongação à ruptura – EaB	%	200
Módulo Elasticidade	kN/mm ²	1,2 – 1,6
Tensão limite de escoamento à flexão	N/mm ²	70 – 85
Dureza Rockwell	Escala R	R 110
<u>Térmicas</u>		
Temperatura de fusão	°C	172 – 180
Temperatura de serviço, 10 ⁴ h	°C	70 – 80
HDT, Temperatura de distorção térmica, 1,85 N/mm ² (264psi)	°C	55
Condutividade térmica	W /mK	0,3
Expansão térmica linear	10 ⁻⁵ *K ⁻¹	11
<u>Outras</u>		
Absorção da água, 23 ^o .C, saturada em água	%	1,5
<i>Características gerais</i>		Diminuindo-se a absorção de água, aumenta-se a estabilidade dimensional, com aumento do comprimento da cadeia (CH ₂) e diminuição dos valores térmicos

Tabela 1: Propriedades da poliamida PA 12 (Adaptado de Würzburg, 1995)

Vale a pena ressaltar que a tensão limite de ruptura é fortemente correlacionada ao peso molecular da matéria-prima. Matérias-primas com maior grau de polimerização, ou seja, com maiores pontos de fusão e viscosidade de solução, possuem melhor qualidade, tanto em relação à dureza quanto à resistência ao impacto do que produtos com grau de polimerização mais baixo (Griehl e Ruestem, 1970).

Wiebeck e Harada (2005) fornecem na tabela 2 uma versão resumida sobre as principais propriedades da poliamida PA12.

<u>Propriedades</u>	<u>PA 12</u>
Temperatura de fusão (° C)	177
Densidade (g/cm ³)	1,02
Resistência à tração (MPa)	52
Módulo de flexão (MPa)	1.172
Absorção de água (%) em 14 horas de imersão	0,25

Tabela 2: Propriedades das poliamidas (Adaptado de Wiebeck e Harada, 2005)

Nesse trabalho será focado o estudo da poliamida 12, ou *nylon* 12 como matéria-prima para os processos SLS.

Basicamente, nos processos SLS, um polímero em forma de pó, antes do processamento, é aquecido rapidamente por laser e então é resfriado cristalizando-se naturalmente para gerar peças RP. Fica claro, dessa forma, que propriedades térmicas têm particular importância em seu estudo, porém deve-se ressaltar que, além da T_g e da T_m , outras propriedades têm influência significativa no processo de fabricação e dentre elas podem-se citar o calor específico C , a condutividade térmica k , o tamanho das partículas e a densidade ρ (Gibson e Chi, 1997).

Fischer *et al* (2005), em seus estudos, afirmam que em processos SLS, a potência do laser média crítica depende não só da “liga” mas também da morfologia, compactação e granulometria, da matéria-prima, que altamente influenciam a capacidade de dissipação de calor.

Os fabricantes dos equipamentos de SLS, 3DSystems e EOS, forneceram uma tabela com algumas propriedades de suas respectivas matérias-primas Nylon 12, conforme Tabela 3.

	3D Systems	EOS
Força de Tração (MPa)	44	45
Módulo de Tração (MPa)	1600	1700
Tensão no Alongamento de Ruptura (%)	9	20
Ponto de Fusão (°C)	184	184
Tamanho Médio das Partículas (µm)	58	58
Dimensão das Partículas, Faixa 90% (µm)	25 – 92	Não disponibilizado
Umidade de Absorção, 23°C (%)	0,41	0,52

Tabela 3: Propriedades dos materiais para SLS Nylon 12 (Zarringalam et al, 2006)

2.4 REATOR

Nylons são polímeros produzidos através de reações reversíveis de policondensação entre aminas e grupos finais carboxílicos. A reação sentido esquerda/direita (Figura 14) é a reação de formação das poliamidas e a reversa é a reação de hidrólise (Zheng *et al*, 2005).



Figura 14: Reação reversível de policondensação (Zheng *et al*, 2005)

A temperatura na formação das poliamidas deve ser precisamente monitorada, já que afeta diretamente o desempenho do produto final. Por exemplo, se a temperatura de fusão T_m for muito baixa, freqüentemente isto resulta em não homogeneidade ou ainda pior, em grânulos não fundíveis. Já uma T_m excessivamente alta, ou um longo tempo a uma temperatura mais baixa, pode gerar degradação com conseqüente deterioração nas propriedades e desempenho dos produtos (Birley *et al*, 1992).

Usualmente, os estudos sobre a cinética e equilíbrio do *nylon* focam em condições de alto teor de água e baixas temperaturas, encontradas nas fases iniciais do processo de obtenção da poliamida, mas é importante o entendimento das condições de baixo teor de água e altas temperaturas, encontradas nos estágios finais dos processos de produção industrial de *nylon*. Segundo Zheng *et al* (2005) “o entendimento apropriado deste estágio é relevante nos projetos de reatores industriais, controle de qualidade do produto e otimização das condições de operação do processo”.

A Figura 15 exibe um diagrama esquemático de um reator em sistema de batelada.

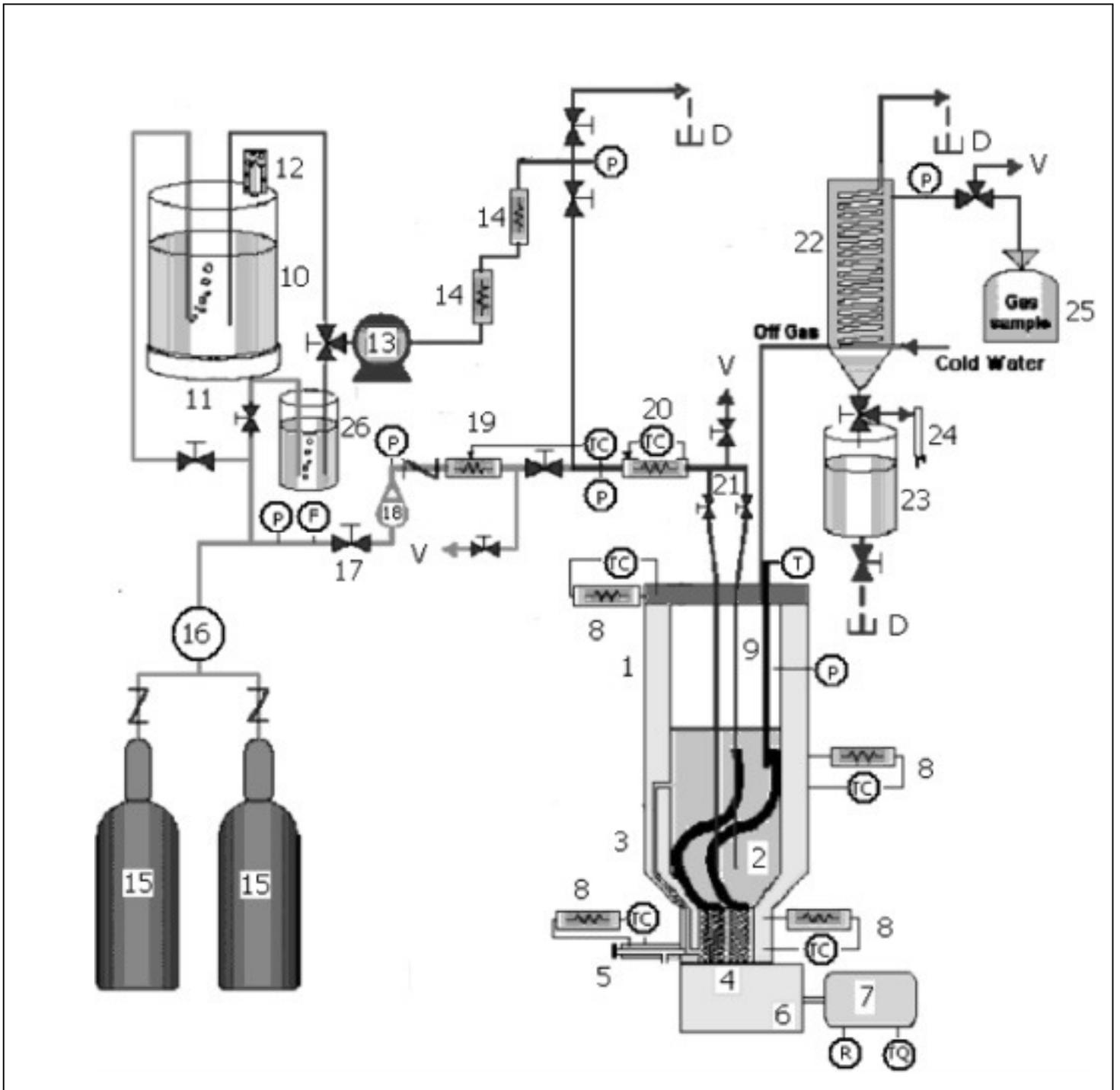


Figura 15: Desenho esquemático do aparato experimental de reator batelada (Zheng et al, 2005)

Onde:

- (1) Corpo do reator
- (2) Propulsores (agitadores)
- (3) Canal de recirculação
- (4) Seção extrusora
- (5) Válvula das amostras
- (6) Velocidades (*Gearbox*)
- (7) Motor e direção
- (8) Zonas de aquecimento do reator
- (9) Fusão RTD (*Melt RTD*)
- (10) Tanque de água
- (11) Escala
- (12) Selo Água
- (13) Bomba
- (14) Aquecedores geradores de vapor
- (15) Cilindros de N₂
- (16) Regulador
- (17) Válvula de regulação de N₂
- (18) Rotâmetro
- (19) Pré-aquecimento N₂
- (20) Aquecimento final
- (21) Tubulação
- (22) Bobina do condensador (vidro)
- (23) Reservatório do condensado
- (24) Bureta
- (25) Amostragem do gás
- (26) Tanque de solução aquosa HMD
- (P) Manômetro
- (T) Sensor de Temperatura
- (TC) Controlador de Temperatura
- (F) Medição do fluxo de massa / Dibatômetro
- (R) Sensor RPM
- (TQ) Sensor Torque
- (D) Drenagem
- (V) Ventilador

No trabalho de Zheng *et al* (2005), Figura 15, o teor de água no polímero fundido foi ajustado através de vapor, numa mistura com nitrogênio em proporção previamente determinada, que entrou no reator como um gás previamente aquecido. A taxa do fluxo, a composição e a temperatura do gás foram devidamente reguladas. Nos experimentos com diferentes concentrações iniciais de grupos terminadores, a diminuição da pressão parcial da água, P_w , no gás expurgado causou rápida diminuição da concentração de água no fundido, fazendo com que a taxa de reação de policondensação fosse superior à taxa de reação de hidrólise, com conseqüente diminuição de concentração dos grupos terminadores enquanto as ligações amidas eram formadas. Assim que o equilíbrio era restabelecido, a pressão P_w era aumentada para a concentração de água no fundido aumentar novamente e então a taxa de reação de hidrólise superar a taxa de reação de policondensação, levando a uma cadeia de ligações hidrolíticas entre as amidas, aumentando novamente a concentração de grupos terminadores.

As Figuras 16 e 17 referem-se ao fluxograma de processo e ao reator CSTR, presente no LOPCA, onde será desenvolvida um poliamida 12 que atenda o máximo possível os requerimentos do cliente CenPRA, segundo o ranking de prioridades definidos pela aplicação da ferramenta QFD.

As Tabelas 4, 5 e 6 referem-se às descrições de Equipamentos, de Instrumentos e de Linhas respectivamente, relativas à planta do reator no LOPCA.

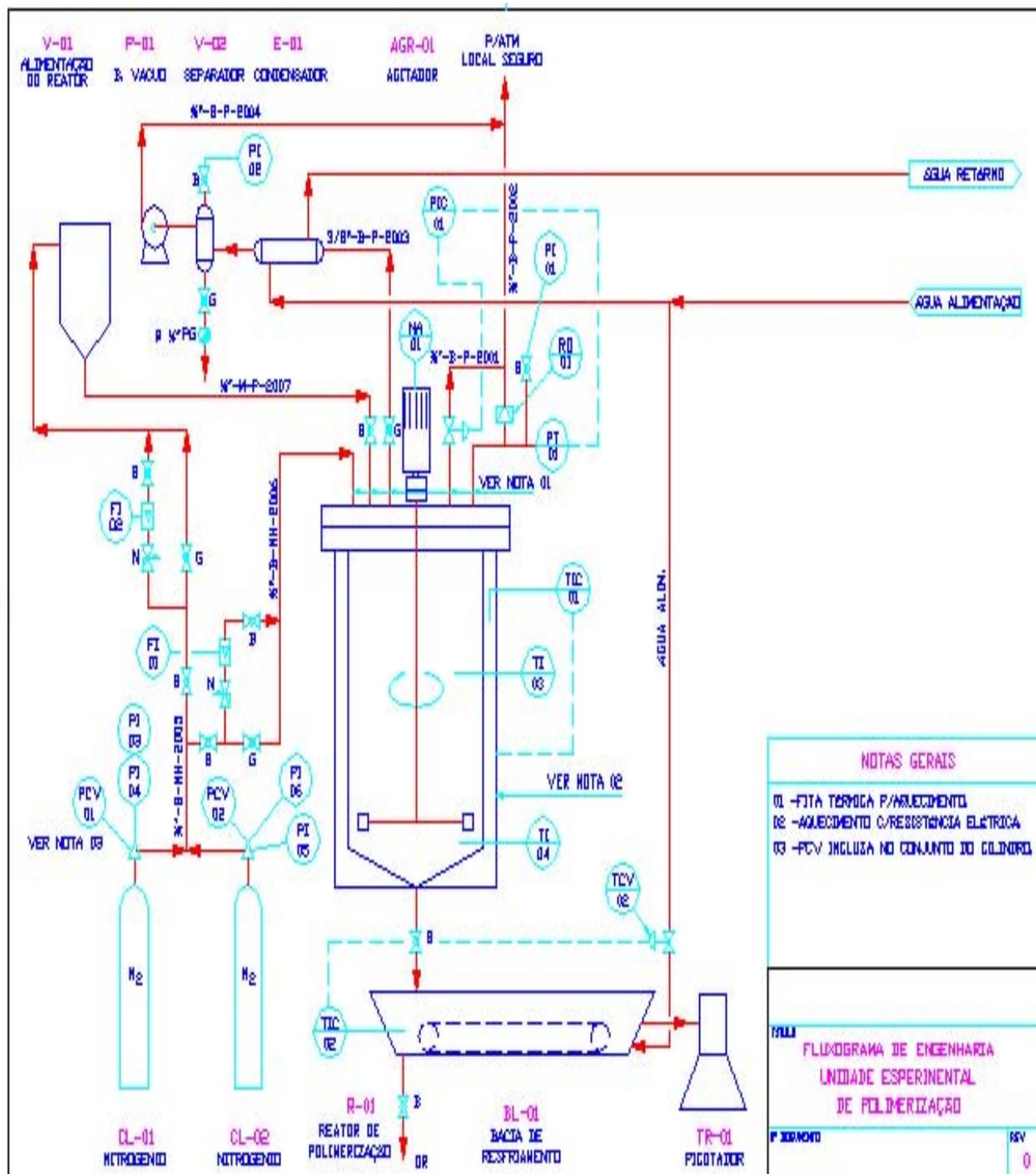


Figura 16: Fluxograma do processo da planta piloto do LOPCA (material fornecido pelo LOPCA, 2008)

Identificação	Serviço, Linha ou Equipamento
FI01	Suprimento de N ₂ para Reator
FI02	Suprimento de N ₂ para Alimentação de Monômeros
PI01	Reator de Polimerização
PI02	Vaso Separador da Bomba de Vácuo
PI03	Suprimento de N ₂
PI04	Suprimento de N ₂
PI05	Suprimento de N ₂
PI06	Suprimento de N ₂
PIC01	Reator de Polimerização
PCV01	Suprimento de N ₂
PCV02	Suprimento de N ₂
PCV03	Reator de Polimerização
PT01	Reator de Polimerização
RD-01	Linha 1/2"-B-P-002
TCV01	Alimentação de Água para a Bacia de Resfriamento
TI01	Reator de Polimerização
TI02	Reator de Polimerização
TIC01	Resistência Elétrica do Motor
TIC02	Bacia de Resfriamento
FI-03/04	Suprimento de Ar Sintético para Instrumentos

Tabela 5: Lista de Instrumentos da planta piloto do LOPCA (material fornecido pelo LOPCA, 2008)

Número da Linha	Descrição da Linha	
	De	Para
1/2"-B-P-001	Bomba de Vácuo	1/2"-B-P-002
1/2"-B-P-002	Reator	Local Seguro
1/2"-B-P-003	Reator	1/2"-B-P-002
3/8"-B-P-001	Reator	E-01
3/8"-B-P-002	E-01	V-02
1/4"-PG	V-02	Receptor de Resíduos
3/8"-B-P-003	E-01	Canaleta
1/2"-M-P-001	V-01	Reator
1/2"-B-P-004	Água Alimentação	E-01
1/2"-B-P-005	3/8"-B-P-004	BL-01
1/4"-B-P-001	BL-01	Canaleta
1/4"-B-NH-001	CL-01/02	V-01
1/4"-B-NH-002	1/4"-B-NH-001	Reator

Tabela 6: Lista de Linhas da planta piloto do LOPCA (material fornecido pelo LOPCA, 2008)

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA QFD

3.1 - FASES DOS PROCEDIMENTOS NO CENPRA

3.1.1 Fase 1- Processo SLS

Para coletar informações para o projeto foram realizadas visitas ao CenPRA com o propósito de visualizar no próprio ambiente de trabalho, gema, algumas necessidades do cliente que, porventura, não viessem a ser explicitadas em questionamentos diretos feitos de forma interativa no mesmo ambiente.

Estas visitas possibilitaram a visualização do processo integral de fabricação de protótipos no equipamento SLS, que pode ser estruturado, basicamente, pelas seguintes etapas:

- recebimento dos pedidos;
- composição e otimização da área de trabalho do SLS através do CAD, onde a correta geometria colocada na área de trabalho pode vir a interferir na qualidade do produto final;
- *start up* do equipamento;
- produção;
- jateamento final para limpeza das peças.

Na primeira aproximação com o cliente, foi visto o processo completo de prototipagem, desde o recebimento dos pedidos, o trabalho para chegar-se no CAD ao melhor arranjo de construção, cujas orientações de peças acabam interferindo na qualidade final da mesma, até o início da prototipagem onde os parâmetros do equipamento SLS são ajustados em função do projeto desenvolvido no CAD e o início da produção.

Após o acompanhamento de todo o processo de prototipagem, pode-se visualizar a etapa final, correspondente à separação e limpeza de cada peça, feita por jateamento de ar.

A discussão sobre cada etapa e o recolhimento das informações sobre o que realmente era desejado de um poliamida para processos de prototipagem foi feita em outra oportunidade, na presença de pesquisadores do CenPRA. Com as informações recolhidas nessa ocasião, pode-se montar a lista das “Qualidades Exigidas”, ou seja, os “O QUÊs” da matriz Casa da Qualidade (Tabela 7).

O nível 1, da Tabela 7, corresponde ao agrupamento, em três categorias, das informações fornecidas: matéria-prima, processo e produtos finais fabricados pelo processo SLS.

O nível 2 mostra o quê o cliente afirmou desejar de um poliamida, em cada categoria, para otimizar o resultado de seus processos.

Para facilitar o entendimento do quê exatamente estava sendo requerido, fez-se o desdobramento exibido no nível 3, quando se mostrou necessário.

O nível 4 exhibe as formas (“COMOs”) de se atender às exigências dos níveis 2 e 3.

Voz Consumidor (VoC)

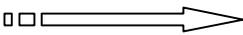
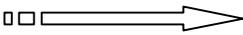
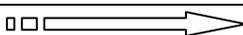
<i>Nível 1 (O QUÊ)</i>	<i>Nível 2 (O QUÊ)</i>	<i>Nível 3 (O QUÊ)</i>	<i>Nível 4 (COMO)</i>
I – Matéria-prima PA12	“Fluidez” no espalhamento da matéria-prima		Menor granulometria
			Morfologia granulométrica
	Com opções de cores		Aceitar pigmentos
	Menor custo		Estudar processo geral
	Vida Útil	Suportar maior tempo de exposição ao processo SLS	Resistência à degradação térmica
II – Processo SLS	Estabilidade no Processo ⁽¹⁾	Diminuir T_b	Diminuir T_g e T_m
		Menor Potência do Laser	Densidade da Matéria-prima
			Calor Latente Fusão
			Calor Específico
III – Produto Final	Estabilidade Dimensional	Sem rugosidade	$T_{\text{fusão}}$ consideravelmente maior que $T_{\text{cristalização}}$
			Menor espessura das camadas
			Alta entalpia de fusão
		Sem empenamento	Gradiente otimizado entre T_b e P
	Resistência Mecânica e Química	Alta deformação elástica	Aumentar módulo elasticidade (E)
		Boa resistência à fadiga	Aumentar Viscosidade de Fusão
			Aumentar Peso Molecular Médio
			Coefficiente de Elasticidade
		Maior estabilidade nas medidas projetadas ⁽²⁾	Aumentar Temperatura de Distorção Térmica (HDT)

Tabela 7: Voz do Consumidor (pesquisa feita no CenPRA em 12/08/2008)

(1) Estabilidade do Processo: obtenção do maior gradiente de energia possível entre a temperatura T_b (minimizar) e a potência P (minimizar), sem que haja empenamento do material e que a peça final produzida tenha elevado *Heat Distortion Temperature* (HDT).

(2) Maior estabilidade nas medidas projetadas: que as peças finais não tenham variações nas dimensões finais em relação às projetadas e que também sejam mais estáveis aos ajustes do processo.

3.1.2 Fase 2 – Aplicação dos Questionários

Nesta fase, foram feitos questionários para que o cliente pudesse, de forma pareada e aplicando o método AHP, (Tabela 8) classificar a importância dos itens de qualidade exigida e também avaliar o desempenho dos principais fornecedores atuais da matéria-prima em pesquisa nesse projeto (Tabela 9), a poliamida PA12. Através de especificações dos atuais fornecedores (a empresa 3D Systems fornece a Poliamida Duraform e a EOS fornece a poliamida PA 2200) e dos dados obtidos na tabela 9, pode-se melhor definir valores-meta para o desenvolvimento do produto.

Participaram da reunião para aplicação dos questionários, cujos resultados são mostrados nas Tabelas 8 e 9, o chefe e o técnico especialista da Divisão de Tecnologias para Desenvolvimento de Novos Produtos do GenPRA, ambos com vasta experiência em prototipagem rápida.

Na Tabela 8, para atribuição do peso de comparativo entre duas qualidades exigidas foi esclarecido aos especialistas que eles deveriam sempre responder, segundo a escala fornecida, qual a importância de cada variável de linha em relação as variáveis da coluna, comparações essas feitas sempre de forma pareada.

Matriz AHP para Grau de Importância da Qualidade Exigida (O QUÊs)

(pesquisa realizada no CenPRA, em 12/08/2008)

Escala: 1 = menos importante
 3 = igualmente importante
 9 = mais importante

	“Fluidez” no espalhamento da metéria prima	Com opções de cores	Menor custo	Suportar maior tempo exposição ao processo	Diminuir T _b	Diminuir potência do laser	Sem rugosidade	Sem empenamento	Alta deformação elástica	Boa resistência à fadiga	Maior estabilidade nas medidas projetadas	Total
‘Fluidez’ no espalhamento da matéria-prima	X	9	9	3	3	3	3	1	9	3	1	44
Com opções de cores	1	X	1	1	1	1	1	1	3	1	1	12
Menor custo	1	9	X	3	1	1	3	1	9	9	1	38
Suportar maior tempo de exposição ao processo SLS	3	9	3	X	3	3	9	3	9	9	3	53
Diminuir T _b	3	9	9	3	X	9	9	3	9	9	3	66
Diminuir potência do laser	3	9	9	3	1	X	3	3	9	9	3	52
Sem rugosidade	3	9	3	1	1	3	X	1	3	9	1	33
Sem empenamento	9	9	9	3	3	3	9	X	9	9	3	66
Alta deformação elástica	1	3	1	1	1	1	3	1	X	3	1	16
Boa resistência à fadiga	3	9	1	1	1	1	1	1	3	X	1	22
Maior estabilidade nas medidas	9	9	9	3	3	3	9	3	9	9	X	66

Tabela 8: Aplicação da metodologia AHP para determinação do grau de importância dos itens de qualidade exigida (CenPRA, 12/08/2008)

Item a ser Avaliado	Desempenho do Nylon 12 Virgem										
	5- Ótimo 4- Bom	3- Regular				1- Péssimo					
1. "Fluidez" no espalhamento da matéria-prima	Duraform	<input checked="" type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input checked="" type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
2. Opções de cores	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	1
3. Tempo de exposição ao processo SLS	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
4. T _b requerida	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
5. Potência do laser requerida	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
6. Acabamento superficial	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
7. Deformação elástica	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
8. Resistência à fadiga	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
9. Custo	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
10. Estabilidade nas medidas	Duraform	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1
	PA 2200	<input type="checkbox"/>	5	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	1

Tabela 9: Avaliação dos principais fornecedores de poliamida 12 (CenPRA , dia 12/08/2008)

A Figura 18 representa o Gráfico de Pareto para os Itens de Qualidade Exigida, obtido a partir do grau de importância atribuído pelo método AHP.

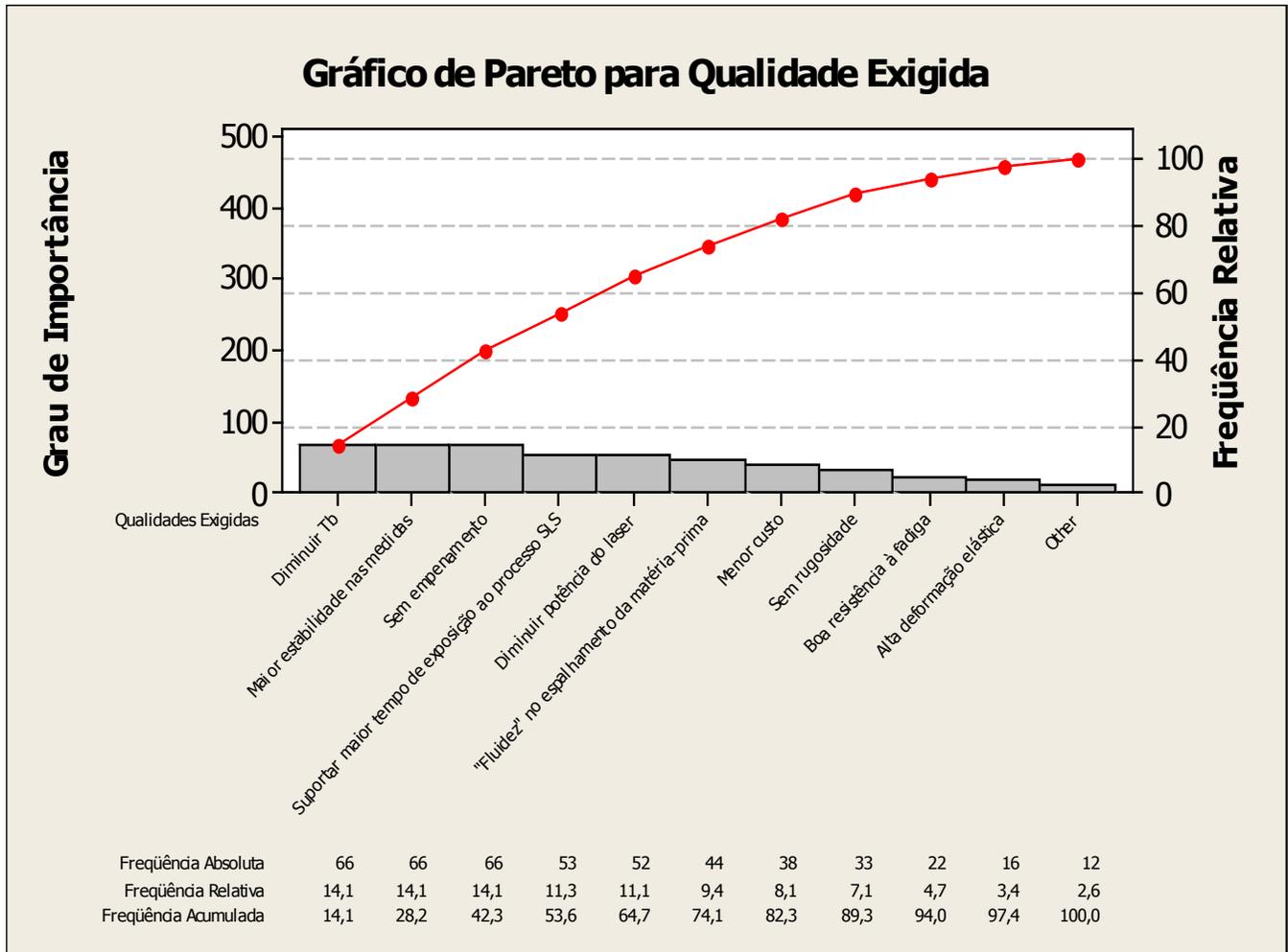


Figura 18: Gráfico de Pareto dos Itens de Qualidade Exigida (obtido através do software Minitab 15)

Observar que o axioma de Pareto (neste caso, seria “20% dos itens respondem por 80% das prioridades”) não foi observado, muito provavelmente por um número grande de variáveis envolvidas, que dificultaram uma comparação pareada de maior acuidade.

3.2 - FASES DOS PROCEDIMENTOS NO LOPCA

3.2.1 Definição dos Requisitos Técnicos e Montagem da Matriz Casa da Qualidade

Nesta fase foram definidos junto a pesquisadores especialistas em polímeros quais seriam os requisitos técnicos de um poliamida 12 que poderiam atender as exigências do cliente (qualidades exigidas definidas anteriormente).

Observar que a exigência de “menor custo”, apesar de bastante importante, foi suprimida a partir dessa etapa. Não foi feito o desdobramento de custos, devido à planta do reator não se encontrar em funcionamento no momento em que este trabalho foi desenvolvido e, portanto, faltariam alguns parâmetros importantes para o estudo e desdobramento apropriados.

Nosso modelo conceitual foi composto com o desdobramento da qualidade em associação com o desdobramento da tecnologia. Posteriormente deve ser feito o desdobramento do custo de tal forma a se projetar um produto que satisfaça o cliente e que esteja em equilíbrio com o custo.

A partir das definições dos requisitos técnicos foi construída uma matriz de correlação entre os requisitos (Figura 19), informação esta extremamente relevante no planejamento estratégico do processo.

Os símbolos indicam o grau de correlação, conforme escala indicada logo abaixo da Figura 19, entre os requisitos.

	Temperatura de Transição Vítreia (T_g)	Temperatura de Fusão (T_m)	Temperatura de Cristalização (T_c)	Morfologia das Partículas	Granulometria	Entalpia Específica de Fusão (ΔH)	Índice de Fluidez do Fundido (MFI)	Resistência à Degradação Térmica	Elongação à Ruptura (EaB)	"Creep"	Módulo Elasticidade (E)	Temperatura de Distorção Térmica (HDT)
Temperatura de Transição Vítreia (T_g)												
Temperatura de Fusão (T_m)												
Temperatura de Cristalização (T_c)												
Morfologia das Partículas												
Granulometria												
Entalpia Específica de Fusão (ΔH)												
Índice de Fluidez do Fundido (MFI)												
Resistência à Degradação Térmica												
Elongação à Ruptura (EaB)												
"Creep"												
Módulo Elasticidade (E)												
Temperatura de Distorção Térmica (HDT)												

Figura 19: Correlação entre os Requisitos Técnicos

Grau de Correlação			
	Forte e Positiva		
	Média e Positiva		
	Fraca e Positiva		

Onde:

- T_g : Temperatura de transição vítrea

- T_m : Temperatura de fusão

- T_c : Temperatura de cristalização ou “*crystallization temperature*”, é a temperatura na qual o polímero deve ser resfriado para recuperar sua forma estável (Birley *et al*, 1992).

- Morfologia das Partículas: arranjos geométricos dos átomos nas cadeias de um polímero (podem exercer influência significativa em suas propriedades volumétricas) (Rosen, 1993)

- Granulometria: tamanho médio das partículas (representada pela densidade, g/cm³)

- Entalpia específica de fusão (ΔH): é a energia requerida para aumentar a temperatura de uma unidade de massa para um valor almejado (calor latente de fusão é energia requerida para fundir uma unidade de massa do estado cristalino para o líquido, sem haver aumento de temperatura, ou seja é a energia necessária para destruir as forças de ligações cristalinas) (Birley *et al*, 1992).

- Índice de fluidez do fundido (MFI): está relacionado com a massa molecular do polímero. Quanto menor o índice, maior é a viscosidade do fundido e, portanto, maior também seu peso molecular médio, o que acaba gerando melhorias nas propriedades mecânicas, especialmente na elongação à ruptura (EaB) (Zarringhalam *et al*, 2006).

➤ Resistência à degradação térmica: tempo que um material suporta altas temperaturas sem degradar. *Thermogravimetric analysis* (TGA) ou análise termogravimétrica fornece uma medida absoluta da resistência térmica de um material (Würzburg, 1995).

➤ Elongação à ruptura (EaB): indica a ductibilidade (maleabilidade, flexibilidade).

➤ Creep: fluência ou escorregamento entre moléculas, decorrente da natureza viscoelástica do plástico (mm/h) (Birley *et al*, 1992).

➤ Módulo Elasticidade (E): relação entre a tensão e a deformação.

➤ (HDT) Temperatura de distorção térmica ou “Heat Distortion Temperature”: Trata-se da temperatura de distorção quando submetida ao calor, sob carga constante (Würzburg, 1995).

No conceito clássico da Matriz Casa da Qualidade, essas correlações formam o “teto” da Casa, ou seja, estão posicionadas logo acima dos Requisitos Técnicos.

Costa (2007) em sua dissertação trata das correlações entre os requisitos técnicos da poliamida, que têm uma característica bastante especial de serem todos, de alguma forma, correlacionados em diferentes graus e quase sempre em função do peso molecular médio do polímero. A Tabela 10 demonstra algumas dessas correlações.

Requisitos Essenciais⁽¹⁾	Correlação com os outros requisitos técnicos
Aumento do Peso Molecular do Polímero	<ul style="list-style-type: none"> - Conseqüente aumento de T_g e T_m (quanto maior o tamanho de cadeias, maiores estas temperaturas) - Diminuição do índice de fluidez do fundido, MFI (quanto maior o peso molecular, menor o MFI) - Aumento na Entalpia Específica de Fusão (devido a maior dificuldade de mobilidade das cadeias) - Aumento da T_c (polímeros com cadeias maiores apresenta menor mobilidade e, portanto, maior T_c) - Maior Resistência à Degradação Térmica - Aumento na Flexibilidade (Elongação à Ruptura, EaB)⁽²⁾ - Menor Temperatura de Distorção Térmica, HDT (a HDT aumenta com o grau de cristalinidade e com a densidade da peça; são distorcidos mais facilmente porque as cadeias poliméricas tendem a voltar para a conformação de equilíbrio (enoveladas), o que causa distorção da peça, em temperaturas mais baixas) - Diminuição no "Creep" (materiais de maior peso molecular deformam com mais facilidade, apresentando menos ruptura na deformação)
Aumento no Índice de Fluidez do Fundido (MFI)	<ul style="list-style-type: none"> - Menor T_g e T_m - Maior cristalinidade (cristalização mais rápida e em menores temperaturas que quando em baixo MFI) - Maior "Creep"
Aumento da Entalpia Específica de Fusão	<ul style="list-style-type: none"> - Conseqüente aumento na T_m

Tabela 10: Características das correlações entre requisitos técnicos (Adaptado de Costa, 2007)

⁽¹⁾ Principais requisitos que são mais fortemente correlacionados com todos os demais

⁽²⁾ Além do Peso Molecular, outros fatores também afetam a elongação à ruptura dos polímeros

3.2.2 Definição dos Parâmetros do Processo

Foram definidos, pelos pesquisadores do LOPCA, os parâmetros do reator CSTR que permitiriam o controle dos requisitos técnicos especificados a respeito da poliamida a ser fabricada.

A Tabela 11 exibe os motivos da indicação dos parâmetros relacionados:

- ✓ temperatura;
- ✓ concentração de monômeros (ácido amino láurico ou amino dodecanóico ou lauril lactama);
- ✓ concentração de água na polimerização;
- ✓ concentração de terminadores de cadeia (ácidos mono ou dicarboxílicos ou mono ou diaminas, isto é, ácido benzóico ou benzilamina).

Parâmetros	Justificativas
1. Temperatura	Representa a temperatura mínima necessária para que a reação de polimerização seja iniciada.
2. Concentração de Monômeros	Como é a partir das ligações entre monômeros que se formam moléculas maiores, os polímeros, quanto maior a concentração de monômeros, maior o peso molecular do polímero.
3. Concentração de água na polimerização	O aumento da concentração de água tende a diminuir o peso molecular dos polímeros, uma vez que uma maior concentração de água no meio reacional tende a reduzir o número de cadeias poliméricas em crescimento. A água deve ser eliminada da reação para permitir que os monômeros continuem se unindo uns aos outros. Dessa forma, o peso molecular diminui quando a concentração de água aumenta. Na etapa da policondensação há eliminação de água como subproduto.
4. Concentração de terminadores de cadeia	Os terminadores de cadeia têm a função de impedir que as cadeias poliméricas continuem crescendo, ou seja, esses agentes de terminação de cadeia tendem a tornar inativos alguns segmentos do polímero no meio reacional. Assim, uma maior concentração desses agentes tende a diminuir o peso molecular do polímero.

Tabela 11: Justificativas para a definição dos parâmetros do processo (LOPCA, 2008)

As correlações, que indicam a forma com que os parâmetros do processo influenciam nos requisitos técnicos, estão demonstradas na Tabela 12.

Parâmetros do Processo	Correlações com os Requisitos Técnicos
1. Temperatura	O aumento da temperatura determina o aumento do peso do polímero, por auxiliar na retirada de água na reação e, portanto, diminuir o índice de fluidez do fundido, MFI
2. Concentração de Monômeros	Correlação forte e positiva com o peso molecular (quanto maior a concentração de monômeros, maior o peso molecular e menor o índice de fluidez do fundido, MFI)
3. Concentração de Água na Polimerização	Influência forte no peso molecular do polímero devido às cadeias do polímero aumentarem de tamanho quando a água presente na reação é eliminada, diminuindo o índice de fluidez do fundido (quanto maior a concentração de água, menor o peso molecular e, conseqüentemente, maior o índice de fluidez do fundido, MFI)
4. Concentração de Terminadores de Cadeia	Os agentes terminadores de cadeia também exercem influência no peso molecular do polímero, sendo que, quanto maior a concentração de terminadores, menor o peso molecular, pois o agente de terminação tem a função de fazer parar o crescimento das cadeias de polímero (quanto maior a concentração de terminadores – dentro da faixa indicada para a polimerização, menor o peso molecular e maior o índice de fluidez do fundido, MFI)

Tabela 12: Correlações entre parâmetros do processo e requisitos técnicos essenciais (LOPCA, 2008)

Já em relação à correlação entre os próprios parâmetros, a equipe de pesquisadores justificou as atribuições dos graus de correlação da seguinte forma:

- ✓ Os parâmetros são controláveis (manipuláveis) e, no início da reação de polimerização é fixado, primeiramente, um determinado valor para cada um deles.
- ✓ À medida que a reação de polimerização vai acontecendo, a temperatura e as concentrações de monômeros, água e terminadores de cadeia variam.
- ✓ O aumento de temperatura tende a aumentar a conversão da reação, que, por sua vez, acaba diminuindo a concentração de monômeros.
- ✓ A água é mais facilmente eliminada com o aumento da temperatura (se a temperatura aumenta, a concentração de água no meio reacional tende a diminuir).
- ✓ A concentração dos terminadores de cadeia tende a diminuir com o aumento da temperatura, pois os mesmos vão sendo consumidos à medida que a polimerização ocorre.

Essa mesma equipe também atribuiu o grau de correlação entre os parâmetros (Figura 20) e definiu que, estabilizantes e aditivos, específicos para otimizar o desempenho do *nylon* no processo SLS, seriam adicionados somente após a fabricação da poliamida básica.

	Temperatura	Concentração de Monômeros	Concentração de Água na Polimerização	Concentração de Terminadores de Cadeia
Temperatura				
Concentração de Monômeros				
Concentração de Água na Polimerização				
Concentração de Terminadores de Cadeia				

Figura 20: Correlação entre os Parâmetros de Processo

Grau de Correlação				
	Forte e Positiva			Forte e Negativa
	Média e Positiva			Média e Negativa
	Fraca e Positiva			Fraca e Negativa
		Sem Correlação		

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Matriz Casa da Qualidade

A partir das definições de Qualidade Exigida e dos Requisitos Técnicos, pôde-se construir a Matriz Casa da Qualidade (Figura 21) onde, posteriormente, com a equipe de pesquisadores do LOPCA, atribuiu-se pesos às relações entre os itens de qualidade exigida e os requisitos técnicos relacionados a cada um deles.

Fazendo os devidos cálculos (o peso absoluto de cada coluna, corresponde à somatória das multiplicações dos graus de importância de cada item de qualidade exigida, pela força, na matriz representado por um símbolo, do relacionamento com o requisito técnico em questão) chega-se à ordem das prioridades dos requisitos técnicos para o atendimento das necessidades do cliente.

Observar que cada requisito técnico se relaciona com todo item de qualidade exigida e seus respectivos graus de importância. Desta forma, o resultado obtido de frequência relativa dos parâmetros é, de fato, um indicativo da importância de cada requisito no atendimento global das exigências de qualidade manifestadas pelo cliente.

Conforme já dito anteriormente, as setas indicam:

↑	Quanto maior a presença, melhor.
↓	Quanto menor a presença, melhor.

Grau de Relacionamento entre Qualidade Exigida e Requisitos Técnicos			Requisitos Técnicos da Poliamida											Pontuação		
			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑		↑	
9		Forte	Grau de importância (AHP)	T_g	T_m	T_c	Morfologia das Partículas	Granulometria	Entalpia específica de fusão	Índice de fluidez do fundido (MFI)	Resistência à degradação térmica	Elongação à ruptura (EaB)	“Creep” (deformação/tempo)	Módulo Elasticidade (E)	HDT (Temp. Distorsão Térmica)	
3		Médio		T_g	T_m	T_c	Morfologia das Partículas	Granulometria	Entalpia específica de fusão	Índice de fluidez do fundido (MFI)	Resistência à degradação térmica	Elongação à ruptura (EaB)	“Creep” (deformação/tempo)	Módulo Elasticidade (E)	HDT (Temp. Distorsão Térmica)	
1		Fraco	Qualidade Exigida	T_g	T_m	T_c	Morfologia das Partículas	Granulometria	Entalpia específica de fusão	Índice de fluidez do fundido (MFI)	Resistência à degradação térmica	Elongação à ruptura (EaB)	“Creep” (deformação/tempo)	Módulo Elasticidade (E)	HDT (Temp. Distorsão Térmica)	
Características da Qualidade																
“Fluidez” no espalhamento da matéria-prima			44													968
Com opções de cores			12													168
Menor custo			38													798
Suportar maior tempo de exposição ao processo SLS			53													1166
Diminuir T_b			66													3630
Diminuir Potência do Laser			52													2704
Sem rugosidade			33													1287
Sem empenamento			66													2046
Alta deformação elástica			16													672
Boa resistência à fadiga			22													682
Maior estabilidade nas medidas			66													2772
Pesos Absolutos das Características da Qualidade				1651	1676	1728	1153	1389	1610	2187	1095	642	1548	948	1266	16893
Pesos Relativos das Características da Qualidade (%)				9,77	9,92	10,23	6,83	8,22	9,53	12,95	6,48	3,80	9,16	5,61	7,49	99,99
“Rank” de Prioridades				4	3	2	9	7	5	1	10	12	6	11	8	

Figura 21: Matriz Casa da Qualidade

A Figura 22 representa o gráfico de Pareto para os requisitos técnicos.

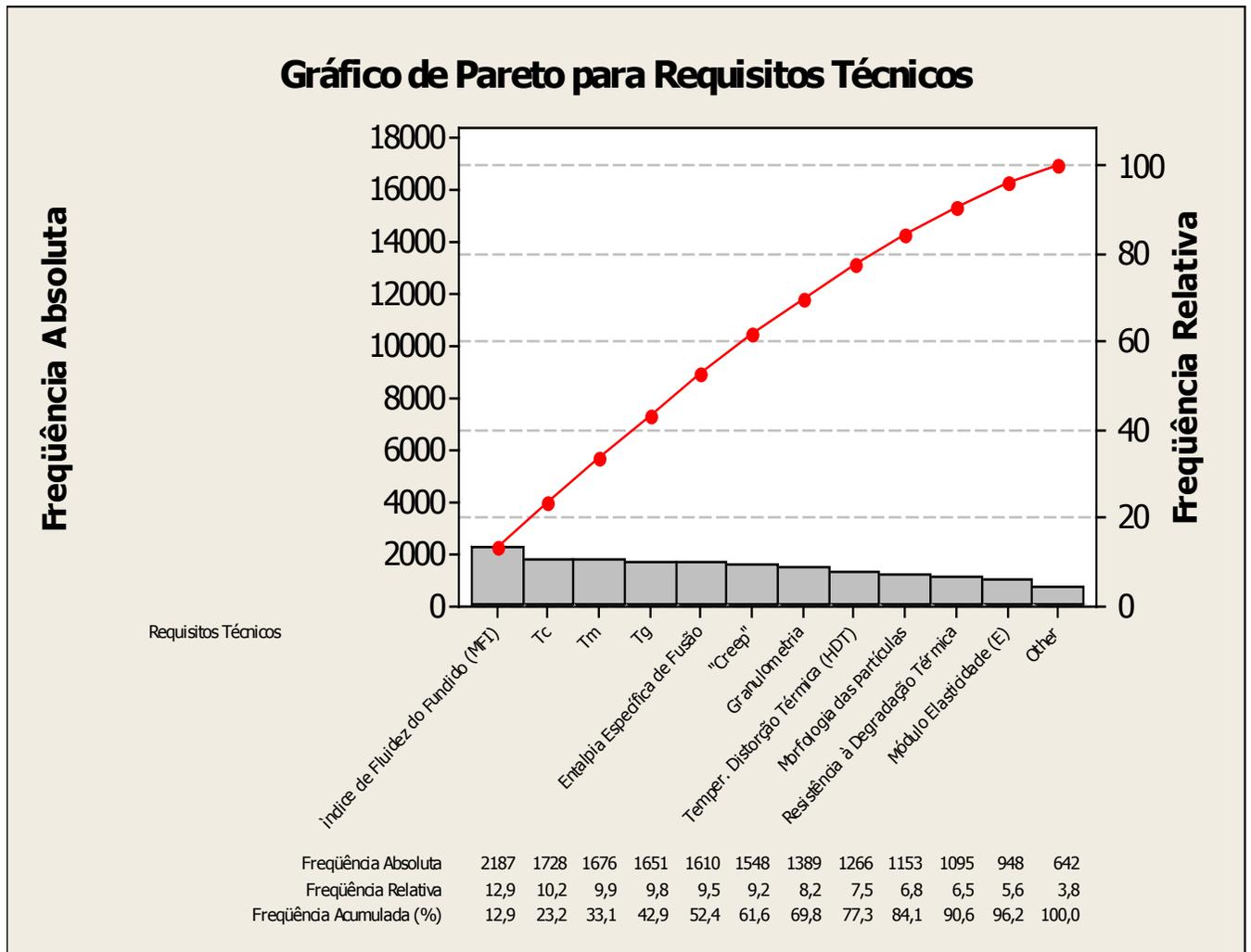


Figura 22: Gráfico de Pareto dos Requisitos Técnicos (obtido através do software Minitab 15)

Observar que o axioma de Pareto (neste caso, seria “20% dos requisitos técnicos respondem pelo atendimento de aproximadamente 80% das solicitações”) não foi observado, muito provavelmente por um número grande de variáveis envolvidas, que dificultaram uma comparação pareada de maior acuidade.

4.1.2 Matriz de Planejamento do Processo

A Matriz Planejamento do Processo (Figura 23), relaciona os requisitos técnicos com os parâmetros do processo.

Os pesos relativos dos requisitos técnicos, obtidos a partir da Matriz Casa da Qualidade (Figura 21), foram retransmitidos para a Matriz de Planejamento do Processo (Figura 23), como seus respectivos graus de importância.

De forma similar à Matriz Casa da Qualidade, a ordem prioritária (*rank*) das frequências relativas da Matriz de Planejamento do Processo está diretamente correlacionada a todos os requisitos técnicos e seus respectivos graus de importância, uma vez que seus cálculos envolvem essa associação.

Como os graus de importância dos Requisitos Técnicos estavam diretamente associados às Qualidades Exigidas, a voz do cliente propagou-se de uma matriz a outra, caracterizando a essência da metodologia QFD.

Grau de Relacionamento entre Características da Qualidade e Parâmetros do Processo		
9		Forte
3		Médio
1		Fraco

Características da Qualidade		Parâmetros do Processo					Pontuação
		<u>Grau de Importância</u>	Temperatura	Concentração de Monômeros	Concentração de Água na Polimerização	Concentração de Terminadores de Cadeia	
Índice de Fluidez do Fundido (MFI)	↑	12,95					310,80
T _C	↓	10,23					81,84
T _m	↓	9,92					238,08
T _g	↓	9,77					136,78
Entalpia Específica de Fusão (ΔH)	↓	9,53					76,24
"Creep"	↓	9,16					73,28
Granulometria	↓	8,22					65,76
Temperatura de Distorção Térmica (HDT)	↓	7,49					179,76
Morfologia das Partículas		6,83					54,64
Resistência à Degradação Térmica	↑	6,48					155,52
Módulo Elasticidade (E)	↑	5,61					44,88
Elongação à Ruptura (EaB)	↑	3,80					38,00
Peso Absoluto			181,3	521,0	579,6	173,7	1455,6
Peso Relativo			12,46	35,79	39,82	11,93	100,00
"Rank" de Prioridades			3	2	1	4	

Figura 23: Matriz de Planejamento do Processo

A Figura 24 refere-se ao Gráfico de Pareto dos parâmetros do processo.

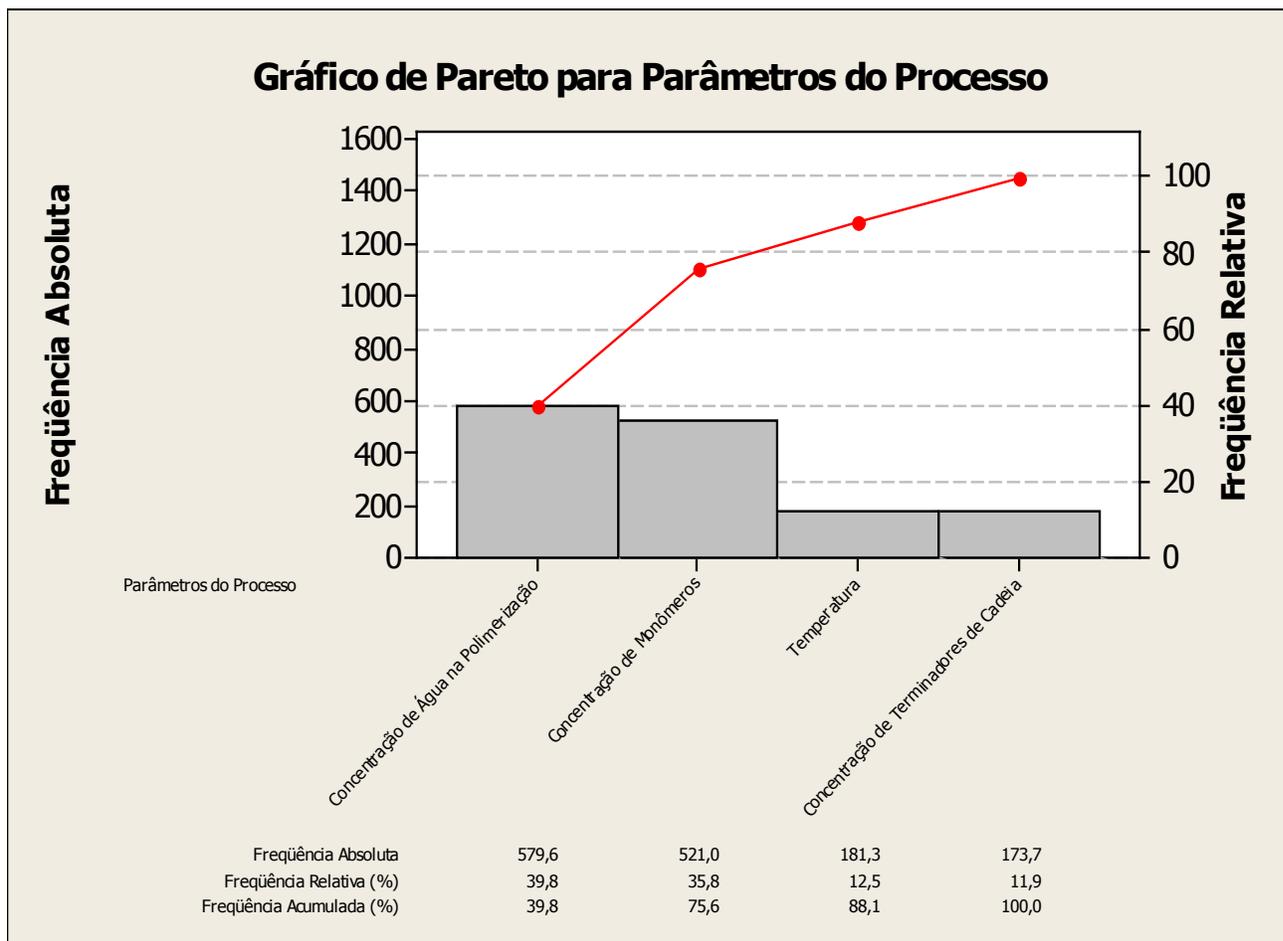


Figura 24: Gráfico de Pareto dos Parâmetros do Processo (obtido através do software Minitab 15)

4.2 ANÁLISES

A tabela 13 traz o comparativo dos “*ranks*” de prioridades obtidos e as setas indicam o que se pretende de cada um dos itens (aumentar (↑) ou diminuir (↓)).

Prioridades	Qualidades Exigidas		Requisitos Técnicos		Parâmetros do Processo	
1	Temperatura da Câmara de Construção, T_b	↓	Índice de Fluidez do Fundido (MFI)	↑	Concentração de Água na Polimerização	↑
2	Estabilidade nas medidas finais	↑	Temperatura de Cristalização, T_c	↓	Concentração de Monômeros	↓
3	Empenamento	↓	Temperatura de Fusão, T_m	↓	Temperatura	↓
4	Tempo de exposição ao processo SLS	↑	Temperatura de Transição Vítreia, T_g	↓	Concentração de Terminadores de Cadeia	↑
5	Potência do laser	↓	Entalpia Específica de Fusão (ΔH)	↓		
6	Fluidez no espalhamento da matéria-prima	↑	“ <i>Creep</i> ”	↓		
7	Custo	↓	Granulometria	↓		
8	Rugosidade na peça final	↓	Temperatura de Distorção Térmica, HDT	↑		
9	Resistência à fadiga	↑	Morfologia das Partículas			
10	Alta deformação elástica	↑	Resistência à Degradação Térmica	↑		
11	Opções de cores	↑	Módulo Elasticidade (E)	↑		
12			Elongação à Ruptura (EaB)	↑		

Tabela 13: Comparativo entre prioridades de Qualidades Exigidas, Requisitos Técnicos e Parâmetros de Processo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 OBJETIVOS GERAIS E CONCLUSÕES

Como já dito anteriormente, o objetivo geral do trabalho foi o de adequar o desenvolvimento da poliamida 12 à qualidade exigida pelo cliente, traduzindo suas reais necessidades para o processo produtivo e, dessa forma, através dos parâmetros de controle do processo, otimizar a qualidade do produto final.

Outro objetivo bastante relevante foi transformar conhecimentos tácitos em conhecimentos explícitos e também levantar a hipótese de repensar possíveis alterações no processo produtivo, equipamentos e parâmetros de controle, que pudessem minimizar as dificuldades técnicas de controles e possibilitar conseqüente melhoria da qualidade do produto final em relação às expectativas do cliente.

A metodologia QFD, de fato, possibilitou ao LOPCA confrontar as prioridades das qualidades exigidas, dos requisitos técnicos e dos parâmetros de processo correlacionados às variáveis respostas a serem controladas e, através dessas informações, desenvolver um projeto de pesquisa mais direcionado com as reais necessidades do cliente, no caso o CenPRA.

O QFD possibilitou também, através das informações obtidas, antecipar-se aos “gargalos de engenharia” que correspondem às dificuldades técnicas atuais de atender as especificações do cliente. Conhecendo essas limitações, pode-se pesquisar mais a fundo os parâmetros de controle atuais e a possibilidade de inserção de outros que possam vir a auxiliar efetivamente nos controles dos requisitos técnicos requeridos.

5.2 – DESAFIOS DO MODELO

Na aplicação da metodologia QFD é relevante o número de pessoas envolvidas, de diversos departamentos, nas “traduções”, obtidas através de “*brainstormings*”, sobre as formas (ou seja, os “COMOs”) de atender aos “O QUÊs” explicitados.

Neste trabalho, por se tratar de um laboratório de pesquisa de uma universidade, onde os pesquisadores estão envolvidos em projetos específicos, houve uma decorrente limitação do número de pessoas participando de cada etapa do processo. O desafio é conseguir a participação do maior número de participantes possível. Em uma empresa, o desafio é montar uma equipe multifuncional e integrada.

5.3 – TRABALHOS FUTUROS

Como, sabidamente, as correlações entre os parâmetros constituem uma fonte importante de referências para tomada de decisões estratégicas, em trabalhos futuros, além das correlações entre os “COMOs” de cada matriz, seria importante também traçar a correlação entre os diversos fatores, isto é entre os “O QUÊs” e os “COMOs”, além das interações entre as diversas variáveis. Poderiam também ser feitos testes experimentais para chegar-se aos valores efetivos das correlações, aos efeitos das interações e, também, às equações de regressão de cada variável resposta pretendida. Possivelmente um estudo de Projetos de Experimentos, “*Design of Experiments*”, DOE, seria a indicação adequada para essa análise.

No caso deste estudo específico, seria relevante construir matrizes temporais, já que as características relevantes não são as mesmas e nem seguem um padrão linear durante todo o processo.

O estudo conjunto das metodologias QFD e Análise do Valor, proposto por Silva *et al*, 2004 e por eles denominado Desdobramento da Função Qualidade e Análise do Valor, QFDVA (*Quality Function Deployment and Value Analysis*), pode ser uma boa alternativa para análise de custos necessária ao projeto.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAO, Y, *QFD: Past, Present and Future*, International Symposium on QFD'97 - Linköping

BIRLEY, A.W.; HAWORTH, B.; BATCHELOR J.; *physics of Plastics, Processing, Properties and Materials Engineering*, 1992, Hanser Publishers, 528p.

BREYFOGLE, F.W., *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods*, 2003, Second Edition, Edit. Wiley, 1187p.

CAUCHICK, P.A.M., *QFD: Conceito e Aplicação*, Anais do II Seminário de Qualidade, Universidade Metodista de Piracicaba, 1998.

CHENG, C.L; SCAPIN, CA; OLIVEIRA, CA; KRAFETUSKI, E; DROMOND, FB; BOAN, FS; PRATES, LR; VILELA, RM, *QFD: Planejamento da Qualidade*, Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1995.

CHENG LC; MELO FILHO LDR, *Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos*, 2007, Editora Blücher, 539p.

COSTA M.C.B, *Modelagem e Simulação para Correlação entre as Características do Polietileno (PE) com as Propriedades Finais dos Artefatos Produzidos na Indústria*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química UNICAMP, Abril 2007.

CRISTIANO, J.J., JEFFREY K.L.; WHITE, III C.C.; *Key Factors in the Successful Application of Quality Function Deployment (QFD)*, IEEE Transactions on Engineering Management, Fevereiro 2001, Vol. 48. no.1, pp. 81 – 95.

CRUZ, A.T.J; CARVALHO, M.M, *Obtenção da Voz do Consumidor: estudo de caso em um hotel ecológico*, Produção, 2003, Vol. 13, No.3, São Paulo, www.scielo.br, print ISSN 0103-6513.

DANNY C.K. HO; EDDIE W.L. CHENG, *Quest for Value Mix*, Managing Service Quality, 1999, Vol. 9, No.3, pp. 204-208.

DELGADO, DD; OKAMITSU, J; MAZUR, GH, *QFD Killed My Pet*, 13th. Symposium on Quality Function Deployment, 2001.

FANG, H.H. and ROGERSON, J.H, *Value Engineering for Managing the Design Process*, International Journal of Quality & Reliability Management, 1998, Vol. 16 No.1, pp.42-55

FERNANDES J.M.R.; REBELATO, M.G.; *Proposta de um Método para integração entre QFD e FMEA*, Gestão & Produção, 2006, v.13, n. 2, pp.245-259.

FISCHER, P.; BLATTER, A.; ROMANO, V.; WEBER, H.P.; *Selective laser sintering of amorphous metal powder*, Applied Physics A Materials Science & Processing, 80, 2005, pp. 489-492.

FLEURY, A., *Gerenciamento do Desenvolvimento de Produtos na Economia Globalizada*, 1^o. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Belo Horizonte, 1999.

GANI ¹ R, *Chemical Product Design, Challenges and Opportunities*, Computers and Chemical Engineering, 28 (2004), pp. 2441-2457.

GANI R, *Computer-Aided Methods and Tools for Chemical Product Design*, Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82 (A11), pp. 1494-1504.

GIBSON, I; SHI, D; *Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process*, Rapid Prototyping Journal, 1997, Vol. 3, No. 4, pp. 129-136

GRIEHL W.; RUESTEM D.; *Nylon 12 – Preparation, Properties and Applications*, Industrial and Engineering Chemistry, vol.62. no.3, March 1970, pp. 16-22.

GUIMARÃES, Leovani M., *QFD – Uma Ferramenta de Suporte à Estratégia Competitiva*, Revista Controle de Qualidade, Editora Banas, Janeiro 1996, nº 56 – pp. 50-54

HOCKMAN, S.D; O’CONNELL, P.A., *Quality Function Deployment: Using the Customer to Outperform the Competition on Environmental Design*, IEEE, 1993, pp. 165-172.

KANO, H., *A Qualidade Atrativa e Obrigatória*, Tokyo:AOTS, 1991 (Notas de Aula), *apud* CHENG, C.L., et al, *QFD: Planejamento da Qualidade*, Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1995.

KIM, KJ, *Determining Optimal Design Characteristic Levels in Quality Function Deployment*, Quality Engineering 1997-1998, 10(2), pp.295-307.

KIM, YP; YOON CH; YUN DK, *Determining customer-oriented technical importance ratings: an evaluative study*, International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, Vol 22, No. 4, pp. 393-409.

LAI, X; TAN, KC; XIE, M, *Optimizing Product Design Using Quantitative Quality Function Deployment: a Case Study*, Quality and Reliability Engineering International, 2007, No. 23, pp. 45-57.

LI, L.; KOCH, M.H.J.; JEU, W.H.; *Crystalline structure and morphology in Nylon-12: a small – and – wide – angle X-Ray scattering study*, Macromolecules, 2003, 36, pp. 1626-1632.

LIN, MC; CHEN LA, *A Matrix Approach to the Customer-Oriented Product Design*, Concurrent Engineering: Research and Applications, 2005, Junho, Vol. 13, No.2, pp. 95-109.

LOPCA, 2008: Informações coletadas junto aos pesquisadores do LOPCA, especificamente para este trabalho, em setembro de 2008.

MICHALEK JJ; CERYAN O; PAPALAMBROS PY; KOREN Y, *Balancing Marketing and Manufacturing Objectives in Product Line Design*, Journal of Mechanical Design, 2006, Novembro, Vol.128, pp.1196-1204

MING, L.W.; GIBSON, I; *Experimental investigation of ink on powder used for selective laser sintering*, Journal of Materials Processing Technology, 174 (2006), pp. 91-101.

MOGGRIDGE GD; CUSSLER EL, *An Introduction to Chemical Product Design*, TranslChemE, 2000, vol 78, Parte A, Janeiro, pp. 5-11

NASCIMENTO C.A.A.M., *Aplicação do QFD para Identificar Pontos Críticos do Processo de Desenvolvimento de Produtos a Partir dos dados de Assistência Técnica – Experimento em Empresa de Tecnologia da Informação*, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte-MG, 2002.

PANDE P.S.; NEUMAN R.P.; CAVANAGH R.R.,; *Estratégia Seis Sigma, Como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho*, 2007, 3ª. Reimpressão, Editora Qualitymark, 442pp.

PARTOVI, F.Y., *An Analytical Model of Process Choice in the Chemical Industry*, International Journal of Production Economics, 105 (2007), pp. 213-227.

PHANG, I.Y.; LIU, T.; MOHAMED, A.; PRAMODA, K.P.; CHEN, L.; SHEN, L.; CHOW, S.Y.; HE, C.; LU, X.; HU, X.; *Morphology, thermal and mechanical properties of nylon 12/organoclay nanocomposites prepared by melt compound*, Polymer International, 54, 2005, pp. 456-464.

PINTO, MARIA, *Data Representation Factors and Dimensions from the Quality Function Deployment (QFD) Perspective*, Journal of Information Science, 2006, 32 (2), pp.116-130.

ROSEN, S.L.; *Fundamental Principles of Polymeric Materials, Second Edition*, 1993, A Wiley - Interscience Publication, 420p.

ROTONDARO RG; RAMOS AW; RIBEIRO CO; MIYAKE DI; NAKANO D; LAURINDO FJB; LEE HOO L; CARVALHO MM; BRAZ MA; BALESTRASSI PP, *Seis Sigmas, Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços*, 2006, Editora Atlas, 375pp.

SALMORIA G.V.; LEITE J.L.; AHRENS C.H.; LAGO, A.; PIRES A.T.N., *Rapid manufacturing of PA/HDPE blend specimens by selective laser sintering: Microstructural characterization*, Polymer Testing 26 (2007), pp.361-368.

SARAIVA PM; COSTA R, *A Chemical Product Design Course With a Quality Focus*, Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(A11), p. 1474-1484

SASSI A.C.; CAUCHIK P.A.M., *Análise de Publicações sobre o QFD no Desenvolvimento de Serviços e Produtos*, XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba – PR, ENEGEP 2002.

SHARMA JR, SHARMA DK, RAWANI AM, *Driven Product Development*, Manufacturing Engineer, 2006, June/July, pp. 39-41

SHAW A; YOW HN; PITT MJ; SALMAN AD; HAYATI I, *Experience of Product Engineering in a Group Design Project*, Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(A11), pp 1467-1473

SILVA, F.L.R; CAVALCA, K.L; DEDINI, F.G, *Combinated Application of QFD and VA Tools in the Product Design Process*, International Journal of Quality & Reliability Management, 2004, V.1, p.231-252

SIRELI Y; KAUFFMANN P; OZAN E, *Integration of Kano's Model Into QFD for Multiple Product Design*, IEEE Transactions on Engineering Management, 2007, Vol 54, no. 2, May, pp.380-390

SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHNSTON, R, *Administração da Produção*, 1997, ed. Atlas, 747p.

STANCLIFFE, M; KROCKER, J; WANG, X, *Focusing Core Binder Needs*, Modern Casting, 2007, March, pp. 40-43

TONTOWI, A.E.; CHILDS, T.H.C.; *Density prediction of crystalline polymer sintered parts at various powder bed temperatures*, Rapid Prototyping Journal, V. 7, n.3, 2001, pp. 180-184.

VOLPATO, N.; AHRENS, C.H.; FERREIRA, C.V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J.R.L.; SILVA, J.V.L., *Prototipagem Rápida, Tecnologias e Aplicações*, 1ª. Edição, 2007, Editora Blücher, 239p.

WASSERMAN, G.S.; *On how to prioritize design requirements during the QFD planning process*, IIE Transactions, May 1993, Vol.25, No.3, pp.59-65.

WATER H.V.; VRIES, J.; *Choosing a quality improvement project using the analytic hierarchy process*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol.23, No.4, 2006, pp.409-425.

WESTERBERG A.W.; SUBRAHMANIAN, E.; *Product Design*, Computers and Chemical Engineering, 24, 2000, pp.959-966.

WIEBECK H.; HARADA J., *Plásticos de Engenharia – Tecnologia e Aplicações*, 2005, Editora Artliber, 349p.

WÜRZBURG, I.W.W.; *Saechtling International Plastics Handbook, for the Technologist, Engineer and User, 3rd. Edition*, 1995, Hanser Publishers, 644p.

YADROITSEV, I; BERTRAND, PH; SMUROV, I.; *Parametric analysis of the selective laser melting process*; Applied Surface Science 253, 2007, pp. 8064-8069.

YONG, P.K., CHEOL, H.Y., DEOK, K.Y., *Determining customer-oriented technical importance ratings: an evaluative study*, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 22, no. 4, 2005, pp. 393-409

ZARRINGHALAM, H.; HOPKINSON, N.; KAMPERMAN, N.F; VLIEGER, J.J, *Effects of processing on microstructure and properties of SLS Nylon 12*, Materials Science and Engineering, 2006, A 435-436, pp.172-180.

ZHENG W., McAULEY, K.B.; MARCHILDON, E.K.; YAO, K.Z.; *Effects os End-Group Balance on Melt-Phase Nylon 612 Polycondensation: Experimental Study and Mathematical Model*, Ind. Eng. Chem. Res, 2005, Vol. 44, No. 8, pp. 2675-2686

Outras

Informações sobre o CenPRA: www.cti.gov.br

Informações sobre Minitab15: www.minitabbrasil.com.br