PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA DE POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS - PPGEPS

LUIS CARLOS MACHADO

MODELO CONCEITUAL INTEGRANDO PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NA CONCEPÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

CURITIBA
2013

LUIS CARLOS MACHADO

MODELO CONCEITUAL INTEGRANDO PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NA CONCEPÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna.

CURITIBA

2013

LUIS CARLOS MACHADO

MODELO CONCEITUAL INTEGRANDO PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NA CONCEPÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Área de concentração: Gestão de Operações, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna, Dr. (PPGEPS – PUCPR)

Orientador

_____

Prof. Osíris Canciglieri Junior, Ph.D. (PPGEPS – PUCPR)

Membro interno

_____

Prof. Danilo Marcondes Filho, Dr. (DEST – UFRGS)

Membro externo

Curitiba, 09 de Setembro de 2013.

RESUMO

Em função da necessidade de diminuir o tempo do desenvolvimento de produtos e proporcionar a diminuição dos custos de produção, as empresas se vêem obrigadas a utilizar tecnologias que lhes proporcionem estas condições. Para isso, é relevante conhecer as principais tecnologias de prototipagem rápida existentes no mercado e suas áreas de aplicação. Este trabalho objetiva: (i) apresentar os processos de prototipagem rápida, mais utilizados, e as principais áreas de atuação; (ii) desenvolver um modelo conceitual para aplicação do delineamento de experimento no processo de prototipagem rápida; e (iii) aplicar o modelo conceitual proposto no processo de prototipagem rápida de impressão 3D por injeção, destacando os principais resultados. A aplicação do modelo conceitual proposto é baseada em uma sequência de etapas, onde cada etapa foi desenvolvida de forma clara e objetiva, e se fundamenta em conceitos da literatura e experiência prática. A análise da aplicação do modelo conceitual ilustra resultados satisfatórios, destacando a adequada integração dos conceitos na concepção de novos produtos. Recomenda-se a utilização do modelo em outros processos de prototipagem rápida.

Palavras-chave: Desenvolvimento de produto, prototipagem rápida, delineamento de experimentos.

ABSTRACT

Due to the need to reduce product development time and provide a reduction in production costs, the companies find themselves forced to use technologies that give them these conditions. In order, it is important to know the main rapid prototyping processes in the market and their application areas. This paper aims: (i) to present rapid prototyping processes, most used, and the main areas of activity; (ii) to develop a conceptual model for the application of Design of Experiment in the rapid prototyping; and (iii) to apply proposed conceptual model in the rapid prototyping 3D printing, showing the main results. The application of conceptual model proposed is organized on a sequence of steps, where each steps is designed to clearly and objectively, and is based on concepts from literature and expertise. The analysis of application illustrates relevant results, detaching an adequate integration between the concepts for conception of new products. It is recommended to use this model in other rapid prototyping processes.

Key-words: Product development, rapid prototyping, design of Experiments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma do método de trabalho.....16
Figura 2. Principais etapas do processo de manufatura por camada.....21
Figura 3. Processo de Estereolitografia. 22
Figura 4. Processo de modelagem por deposição de material fundido. 23
Figura 5. Processo LOM. 24
Figura 6. Processo de Sinterização Seletiva. 25
Figura 7. Esquema do processo LENS. 27
Figura 8. Esquema representativo do processo SIS. 30
Figura 9. Fresadora (torno) CNC.....32
Figura 10. Quantidade de aquisição de equipamentos à nível mundial. 34
Figura 11. Aplicações de prototipagem rápida em diferentes áreas.....34
Figura 12. Análise dos processos de prototipagem rápida mais usados.....35
Figura 13. Cientistas realizam um experimento com o feixe de elétrons 37
Figura 14. Representação geométrica do fatorial 2^3. 40
Figura 15. Fluxograma para aplicação do processo de prototipagem rápida. 49
Figura 16. Impressora 3D (a) e *Software* da impressora 3D (b).....67
Figura 17. Resultado do modelamento. 67
Figura 18. Posição das camadas em relação ao sentido de aplicação da força. 68
Figura 19. Ensaio do corpo de prova na máquina de medir tração EMIC DL 10000.69
Figura 20. Gráfico do comportamento do corpo de prova a 0°.....69
Figura 21. Gráfico do comportamento do corpo de prova a 90°.....70
Figura 22. Representação da rugosidade da superfície. 70
Figura 23. Esquema gráfico da medição de rugosidade em Ra.....71
Figura 24. Esquema do funcionamento do rugosímetro.....71
Figura 25. Gráfico de cubos para variável Tempo.....76
Figura 26. Gráfico de interações da variável tempo. 76
Figura 27. Gráfico de efeitos principais para à variável tempo.....76
Figura 28. Gráfico de cubos para variável rugosidade. 78
Figura 29. Gráfico de interação da variável rugosidade. 79
Figura 30. Gráfico de efeitos principais para a variável rugosidade. 79
Figura 31. Gráfico de cubos para variável Custo. 81

Figura 32. Gráfico de interação da variável Custo. 81
Figura 33. Gráfico de cubos para a variável Dimensão.....84
Figura 34. Gráfico de interação para a variável Dimensão. 84
Figura 35. Gráfico de efeitos principais para a variável Dimensão.....84
Figura 36. Gráfico de cubos para variável resistência à tração.....87
Figura 37. Gráfico de interação para variável resistência à tração.....87
Figura 38. Gráfico de efeitos para variável resistência à tração.....87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diagrama de contrastes do fatorial 2^3 40
Tabela 2. Comparação de custos do processo de Prototipagem Rápida.....51
Tabela 3. Materiais usados nos processos de Prototipagem Rápida.....52
Tabela 4. Qualidade dos processos de Prototipagem Rápida.....54
Tabela 5. Precisão dos processos de Prototipagem rápida. 55
Tabela 6. Comparação do tempo dos processos de Prototipagem Rápida. 56
Tabela 7. Comparação da rugosidade entre processos de Prototipagem Rápida. ...56
Tabela 8. Aplicação de Desenho Experimental.....59
Tabela 9. Coleta de dados do experimento da variável “gotas” 300 u/seg.....72
Tabela 10. Coleta de dados do experimento da variável “gotas” 150 u/seg.....73
Tabela 11. De fatores e níveis de controle do experimento. 73
Tabela 12. Desenho fatorial completo da variável tempo.....74
Tabela 13. Tabela da ANOVA para variável tempo.....74
Tabela 14. Tabela de análise de variância.....75
Tabela 15. Desenho fatorial completo da variável rugosidade. 77
Tabela 16. Tabela da Anova para a variável rugosidade. 77
Tabela 17. Tabela de Análise de variância. 78
Tabela 18. Desenho fatorial completo da variável custo. 80
Tabela 19. Tabela da Anova para a variável custo. 80
Tabela 20. Tabela da Análise de variância. 81
Tabela 21. Desenho fatorial completo da variável dimensão. 82
Tabela 22. ANOVA para a variável dimensão. 83
Tabela 23. Tabela de Análise de variância. 83
Tabela 24. Desenho fatorial completo da variável resistência à tração.....85
Tabela 25. Tabela da ANOVA para a variável resistência à tração.....85
Tabela 26. Tabela de Análise da variância. 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	*Computer Aided Design*
CAM	*Computer Aided Machine*
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	*Design of Experiment*
FDM	*Fusion Deposition Model*
LENS	*Laser Engineered Net Shaping*
LOM	*Laminated Object Manufacturing*
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SIS	*Seletive Inhibitions of Sinterin*
SRP	*Subtrative Rapid Prototyping*
STL	*Standard Template Library*
VMC	*Vertical Machining Center*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO **12**
1.2 OBJETIVOS **13**
1.3 JUSTIFICATIVA **14**
1.4 METODOLOGIA **14**
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO **16**

2 ARTIGO 1 17

2.1 INTRODUÇÃO **19**
2.2 HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA. **20**
2.3 OS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA USADOS NOS DESENVOLVIMENTO DE MODELOS. **21**
2.4 APLICAÇÃO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS. **33**
2.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS. **38**
2.6 CONCLUSÃO **43**
2.7 REFERÊNCIAS. **44**

3 ARTIGO 2 46

3.1 INTRODUÇÃO **48**
3.2 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO **48**
3.3 ETAPAS DE DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA **51**
3.4 ETAPAS DE DEFINIÇÃO DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS. **57**
3.5 CONCLUSÃO. **60**
3.6 REFERÊNCIAS. **61**

4 ARTIGO 3 62

4.1 INTRODUÇÃO **64**
4.2 PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE IMPRESSÃO 3D POR INJEÇÃO. **66**
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS. **66**
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS. **72**
4.5 CONCLUSÃO. **88**
4.6 REFERÊNCIAS. **89**

5 CONSIDERACÕES FINAIS. 90

5.1 CONCLUSÕES. **90**
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. **92**

6 REFERÊNCIAS 93

1 INTRODUÇÃO

A globalização trouxe grandes pressões competitivas no meio industrial, com isso as empresas vivem momentos de grande transformação forçando uma mudança no sistema produtivo, o qual se tornou mais complexo, flexível e dinâmico. Devido á esta necessidade, o desenvolvimento de novos produtos, em um menor espaço de tempo e com melhor qualidade, se faz necessário para que os processos de fabricação sejam cada vez mais confiáveis, mais baratos e consequentemente, reduzam o tempo de produção.

Apesar das empresas desenvolverem protótipos que, na maioria das vezes são feitos de forma artesanal, o que torna o processo caro, demorado, e com geometria e dimensões não ideais, o que dificulta a sua análise. Estas mesmas empresas com visão de futuro estão vendo no processo de prototipagem rápida um caminho mais rápido e seguro para desenvolvimento de produtos.

Segundo Kruth (2003), as tecnologias de prototipagem rápida podem ser classificadas em tecnologias que envolvem adição e remoção de material. Estes processos surgiram primeiramente no setor espacial, mas com o passar do tempo se tornaram mais baratos e interessantes, com isso sua utilização em outros setores industriais começou a se desenvolver, e novos processos foram criados. A prototipagem rápida vem sendo um processo de fabricação muito utilizado nas empresas, principalmente nas áreas de desenvolvimento de produtos.

Segundo Wohlers (1998) a prototipagem rápida pode ser aplicada às mais diversas áreas, tais como, automotiva, aeronáutica, marketing, restauração, educação, paleontologia e arquitetura. Segundo Choi e Chan (2004), a prototipagem rápida visa produzir protótipos de forma relativamente rápida para inspeção visual, avaliação ergonômica, análise de forma e dimensional, ademais como padrão mestre para a produção de ferramentas, e na redução de tempo do processo de desenvolvimento do produto.

Para Volpato (2007), o protótipo de um produto ou componente é parte essencial no seu processo de desenvolvimento, pois possibilita que a análise de sua forma e funcionalidade seja feita em uma fase anterior à produção do ferramental definitivo. Segundo Mooden (2005) a utilização da prototipagem rápida no processo

de desenvolvimento de produtos apresenta os seguintes pontos fortes: sua capacidade de produzir formas tridimensionais complexas e detalhadas, a redução do Lead Time para peças únicas e a possibilidade de sua instalação em ambientes não industriais, devido à baixa geração de ruídos e desperdícios. O termo prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias, usadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador (C.A.D). Estes sistemas que nos fornecem informações gráficas virtuais, porém para o cliente estas informações não ficam bem claras, pois através da prototipagem rápida é possível verificar de forma palpável se o produto tem as características exigidas pelo cliente.

Tais métodos são especiais, uma vez que ligam materiais camada a camada, de forma a construir o objeto desejado. Estes processos oferecem diversas vantagens quando comparados aos processos de fabricação tradicionais.

Segundo Meerkamm e Warzack (2001), cerca de 70% dos custos de um produto são determinados no projeto. Segundo Volpato (1999), as principais finalidades dos protótipos são as reduções de tempo e custo, aprendizagem, comunicação, integração e redução dos riscos de inovação, encurtando assim, as etapas do processo de produção. As primeiras técnicas para prototipagem rápida ficaram disponíveis na década de oitenta. Hoje em função do desenvolvimento de novos processos e materiais a prototipagem rápida já é utilizada para produção de peças em que, a quantidade é relativamente pequena.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Dentro deste panorama atual, em que a competitividade é de fundamental importância, os processos de fabricação encontram espaço como uma das tecnologias que possibilitam tornar os sistemas produtivos mais ágeis e flexíveis. Devido à necessidade de se desenvolver produtos e produzi-los de forma cada vez mais rápida, as empresas não conseguem competir de forma justa com outros mercados e acabam inflacionando seus produtos, muitas vezes por falta de conhecimento, fazendo com que o preço ao consumidor não seja atrativo, uma solução para este problema pode ser resolvido através da análise de processos de produção e com isso determinar qual processo é mais viável.

Apesar da implantação do processo de prototipagem rápida ter um custo elevado, os resultados podem ser satisfatórios, pois permitem a agilidade no processo de desenvolvimento de produtos.

Como existem vários processos de prototipagem rápida o ideal é escolher o processo que tenha o melhor custo benefício, e dentro deste perfil o processo de prototipagem rápida de impressão 3D por injeção oferece o equipamento que tem o um baixo custo, o que o torna ao alcance das pequenas e médias empresas, assim como instituições de ensino, porém, sabe-se que somente o custo do equipamento não é única variável para definir se o processo é viável, há outras variáveis que influenciam na escolha, tais como: tempo do processo, geometria, acabamento, precisão dimensional e geométrica, variedade de materiais, custo do material, facilidade de operação e resistência do produto desenvolvido.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um método para aplicação do Delineamento de Experimentos nos processos de prototipagem rápida.

1.2.2 Objetivo específico

a) Apresentar as tecnologias de prototipagem rápida mais utilizadas e suas áreas de aplicação;
b) Criar um modelo conceitual para aplicação do Delineamento de Experimentos no processo de prototipagem rápida;
c) Aplicar o modelo conceitual no processo de Prototipagem Rápida de impressão 3D por injeção;

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa esta direcionada para o processo de prototipagem 3D por injeção em virtude das características do processo, pois seu funcionamento apresenta fácil manuseio, nível de ruído muito baixo, o que possibilita seu uso em ambientes diversos, diversidades nas propriedades dos materiais utilizados, em relação a cores, resistência e tempo de produção.

A tendência da impressora 3D por injeção é ter um custo muito baixo, com previsões de que futuramente serão utilizadas em ambientes domésticos. A utilização do processo de prototipagem rápida de impressão 3D por injeção nessa pesquisa consiste no fato de ser um processo relativamente novo, onde tem-se uma quantidade pequena de informações com relação a sua aplicabilidade e viabilidade do processo.

Para fazer a análise dos dados é necessário utilizar ferramentas estatísticas que forneçam informações confiáveis, como o Delineamento de Experimentos, para que um experimento seja realizado de forma eficiente e produza resultados eficazes, devem ser empregados métodos científicos no seu planejamento (MONTGOMERY, 1997). Nesse contexto, o Delineamento de Experimentos é uma técnica para se obter um melhor desempenho das características da qualidade, tendo por resultado uma maior capacidade competitiva do produto no mercado (ELSAYED, CHEN, 1993). Galdámez (2002) afirma que a estatística, como ciência, possui inúmeras aplicações para a melhoria de sistemas produtivos.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1 Método de pesquisa

Do ponto de vista da natureza pode ser uma pesquisa aplicada que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesse locais (SILVA, MENEZES, 2005).

A forma de abordagem define com uma pesquisa quantitativa, pois, considera que tudo pode ser quantificável, que significa traduzir em números opiniões e informações para classifica-los e analisa-los. Requer o uso de técnicas estatísticas.

O objetivo científico dessa pesquisa é explicativo, pois, visa identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o "porquê" das coisas. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental, e nas ciências sociais requer o uso do método observacional, assume, em geral, a formas de Pesquisa Experimental (GIL, 1991).

O procedimento da pesquisa é experimental, quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto, (SILVA, MENEZES, 2005).

1.4.2 Método de trabalho

O desenvolvimento dos estudos propostos nesta pesquisa ocorre segundo as seguintes etapas, ver Figura 1.

a) Pesquisa bibliográfica sobre os processos existentes de prototipagem rápida, áreas de utilização desses processos e técnicas estatísticas para análise de dados.
b) Pesquisa bibliográfica sobre os projetos experimentais para análise de dados para elaboração do modelo conceitual em processos de prototipagem rápida.
c) Definição do problema, efetuar o levantamento e critérios técnicos dos equipamentos à serem utilizados, definir o experimento, selecionar qual processo será usado e definir o desenho experimental.
d) Aplicar o modelo conceitual proposto no processo de prototipagem rápida 3D por injeção.
e) Definir o processo de prototipagem rápida, o produto, realizar os experimentos, coletar os dados, fazer a análise do experimento utilizando o *software* Minitab 15®.

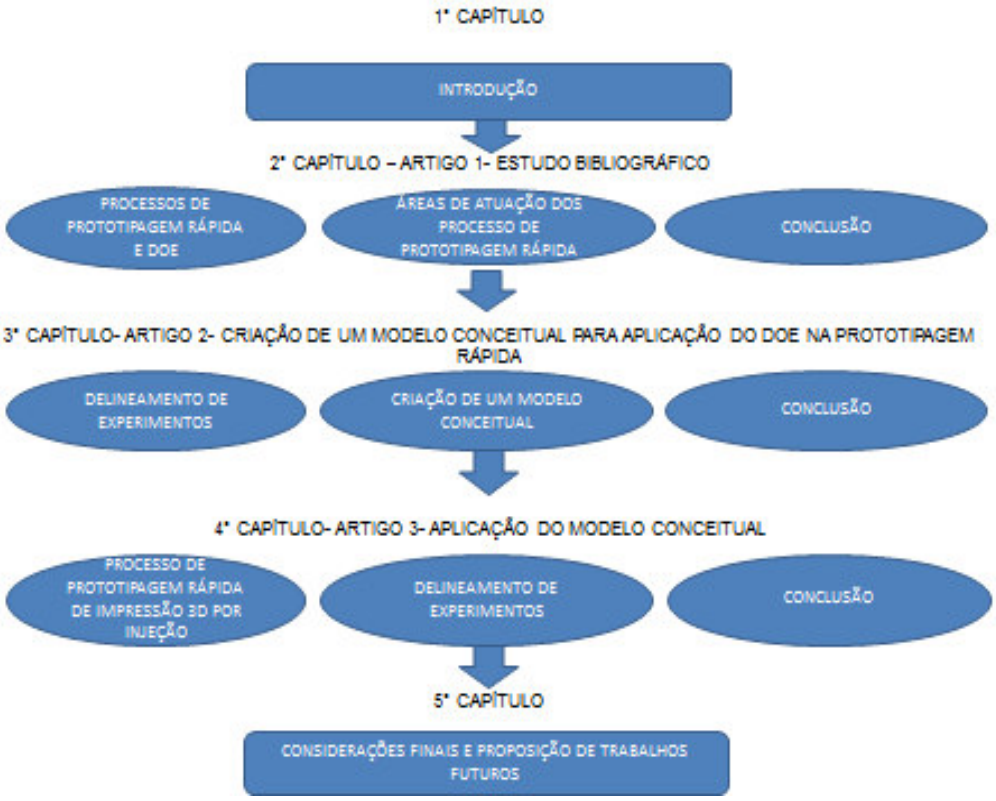


Figura 1. Fluxograma do método de trabalho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta a introdução, problematização, objetivos, justificativa e metodologia. No capítulo 2, é apresentado o artigo 1, contendo uma revisão bibliográfica sobre os processos de prototipagem rápida, mais utilizados e as diversas áreas de aplicação. No capítulo 3, foi desenvolvido o segundo artigo: que apresenta um modelo conceitual para aplicação do Delineamento de Experimentos no processo de Prototipagem Rápida. O capítulo 4 ilustra a aplicação do modelo conceitual proposto em prototipagem rápida de impressão 3D, apresentado no terceiro artigo. No capítulo 5 estão as considerações finais.

2 ARTIGO 1

Uma visão dos processos de prototipagem rápida no desenvolvimento de produtos

A view of the rapid prototyping processes in product development

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ (PUC-PR)

Publicado na revista SODEBRAS (1809-3957), N.86, Vol. 8, pp. 86-93, Fev. 2013.

UMA VISÃO DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

A VIEW OF THE RAPID PROTOTYPING PROCESSES IN PRODUCT DEVELOPMENT

Luis Carlos Machado[1]; Ângelo M. O. Sant'Anna[2]
[1]Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas
[2]Prof. Dr. em Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PPGEPS/ PUCPR
e-mail.: luis.machado@senai.pr.gov.br, angelo.santanna@pucpr.br

Resumo

Em função da necessidade de diminuir o tempo de desenvolvimento de produtos, proporcionando uma diminuição dos custos de produção, as empresas se veem obrigadas a utilizar tecnologias que lhes proporcionem estas condições. O objetivo deste trabalho é apresentar as tecnologias de prototipagem rápida, existentes no mercado, e também mostrar as diversas áreas onde os processos de prototipagem são utilizados. A escolha do processo depende de fatores como resistência, acabamento, material, custo, tempo, etc. Uma área de aplicação que é pouco explorada e tende a crescer é a de manutenção, pois, com a aplicação de materiais com propriedades bem próximas às peças confeccionadas por processos de produção tradicionais, e também, com os processos de prototipagem proporcionando uma qualidade elevada e custos reduzidos, se torna cada vez mais atraente a produção de peças de reposição para manutenção em processos de prototipagem rápida.

Palavras-chave: Prototipagem rápida; Processos Industriais; Desenvolvimento de produtos.

Abstract:

Due to the need to shorten the product development, providing a reduction in production costs, companies find themselves forced to use technologies that give them these conditions. The objective of this work is to present the rapid prototyping technologies are on the market, and also show the various areas where prototyping processes are used. The choice of process depends on factors such as strength, finish, material, cost, time, etc. One area of application is not explored tends to grow and maintenance is therefore the application of materials with properties very close to parts made by traditional production processes, and also with prototyping processes by providing a high quality and reduced costs, becomes increasingly attractive production of spare parts for maintenance in rapid prototyping processes.

Key-words: Rapid prototyping; Industrial Processes, Product Development.

2.1 INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida (PR) é um processo de fabricação muito utilizado nas empresas, principalmente nas áreas de desenvolvimento de novos produtos. Esta tecnologia pode ser também utilizada por outras áreas, como por exemplo, saúde médica e odontológica, aeronáutica aeroespacial, cerâmica e outros.

O *design* de produto foi profundamente influenciado pela revolução tecnológica dos últimos anos, quando surgiram novas tecnologias e novos processos produtivos, e junto a eles, novas metodologias de design adaptadas a esse novo contexto. Além disso, pelo desenvolvimento destes produtos industriais estarem inseridos em um universo tecnológico complexo e competitivo, onde a qualidade e a eficiência são requisitos primordiais, há um apelo para que designers utilizem essas tecnologias e linguagens computacionais a fim de minimizar os riscos envolvidos no processo (ALCOFORADO, 2008)

O termo prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias usadas para se fabricar objetos físicos, diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador (C.A.D., *Computer Aided Design*). Tais métodos são bastante especiais, uma vez que eles ligam materiais, camada a camada, de forma a constituir o objeto desejado. Eles oferecem diversas vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos de fabricação tradicionais baseados em remoção de material, tais como fresagem ou torneamento, as vantagens mais evidentes são em relação ao tempo de confecção e principalmente a geometrias complexas, onde a fabricação pelo processo de usinagem se torna praticamente inviável.

Tais métodos permitem aos projetistas criar rapidamente protótipos concretos a partir de seus projetos, ao invés de figuras bidimensionais. Esses modelos apresentam diversos usos. Eles constituem um auxílio visual excelente durante a discussão prévia do projeto com clientes. Além disso, o protótipo pode permitir testes prévios como, por exemplo, ensaios de resistência e análise para verificar pontos de concentração de tensões na peça.

A verdade é que os projetistas sempre construíram protótipos; os processos de prototipagem rápida permitem que eles sejam feitos mais depressa e de forma mais barata. De fato, estima-se que a economias de tempo e de custos proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos sejam da acima de 70% (MEERKAM e WARZAC, 2001).

As primeiras técnicas para prototipagem rápida ficaram disponíveis na década de oitenta e foram usadas para produzir modelos e partes de protótipos. Hoje em função do desenvolvimento de novos materiais para prototipagem já é utilizada para produção de produtos em que a quantidade é relativamente pequena.

2.2 HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.

O surgimento inicial do sistema de prototipagem rápida foi em 1987 com o processo de estereolitografia da empresa americana 3D *Systems*. Em 1991 surgiram os processos *Fused deposition modelin* (FDM) da empresa americana Stratasys, o *Solid Ground Curing* (SGC) da empresa Israelense Cubital e o Manufatura de Objetos em Lâmina (LOM) desenvolvido por Michel Fygin. Em 1992 o *Selective Laser Sintering* (SLS) desenvolvido por Charles W. Hull e Raymond S. Freed e comercializado pela empresa americana DTM, o *System Soliform* Estereolitografia (SSE) da empresa japonesa Teijin Seiki. Em 1993 o Direct Shell Production Casting (DSPC) da empresa americana Soligen. Em 1994 *Model Maker* (MM) da empresa americana Sander Prototype, Solid Center (SC) da empresa japonesa Kira Corp, Sistema de estereolitografia da empresa alemã Fockele & Schuartz, sistema Eosint da empresa alemã EOS, Sistema de estereolitografia da empresa japonesa Ushio.

A partir de 2000 surgiram outros processos que derivam dos anteriores, porém acrescentando a possibilidade da utilização de materiais metálicos, como os processos de prototipagem *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) desenvolvido pelos laboratórios SANDIA- Estados Unidos, o processo Electron Beam Free Form Fabrication (EBF3) desenvolvido por engenheiros do Centro Langley da NASA e o processo *Selective Inhibition of Sintering* (SIS) desenvolvido pelo pesquisador Dr. Behnokh Khoshnevis da Universidade Southern Califórnia-Estados Unidos.

O processo de prototipagem rápida por impressão 3D é o que tem a possibilidade de aplicação mais evidenciado pois é o processo com menor custo de equipamento, além de já possuir equipamentos de alta velocidade e também esta sendo utilizado em nanotecnologia o *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) processo desenvolvido por engenheiros da Universidade de Viena- Áustria.

Os processos de prototipagem rápida, atualmente existentes são constituídos por cinco etapas básicas (PALM, 1988):

1. Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para estereolitografia;
3. Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. Limpeza e acabamento do protótipo.

Esquema representado graficamente. A fig.2 mostra graficamente o que acontece na conversão do arquivo CAD em formato STL.

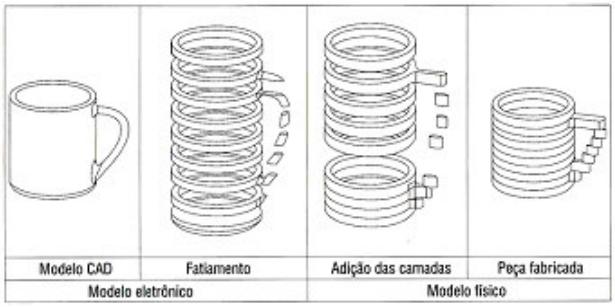


Figura 2. Principais etapas do processo de manufatura por camada.
Fonte: (VOLPATO, 2007).

2.3 OS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA USADOS NOS DESENVOLVIMENTO DE MODELOS.

2.3.1 Estereolitografia (SLA, "Stereolithography")

Este processo pioneiro, patenteado em 1986, deflagrou a revolução da prototipagem rápida. Ele constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta. O modelo é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. Uma fonte de raio laser

ultravioleta, com alta precisão de foco, traça a primeira camada, solidificando a seção transversal do modelo e deixando as demais áreas líquidas. A seguir, um elevador mergulha levemente a plataforma no banho de polímero líquido e o raio laser cria a segunda camada de polímero sólido acima da primeira camada. O processo é repetido sucessivas vezes até o protótipo estar completo. Uma vez pronto, o modelo sólido é removido do banho de polímero líquido e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa (fig.3). Uma vez que a estereolitografia foi a primeira técnica bem sucedida de prototipagem rápida, ela se tornou um padrão de avaliação (benchmarking) para as demais, que surgiram posteriormente.

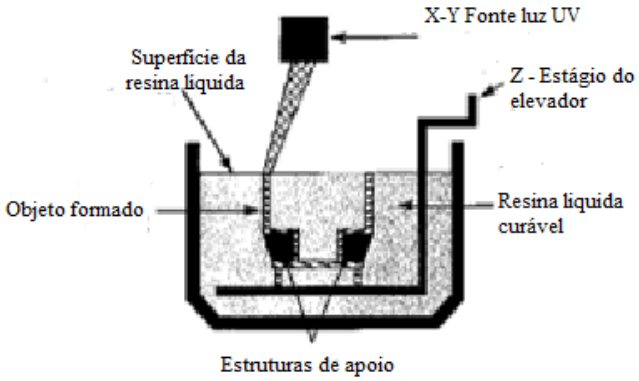


Figura 3. Processo de Estereolitografia.
Fonte: (SLA – 3D Systems Inc.)

2.3.2 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, "Fused Deposition Modeling")

O processo FDM é uma das tecnologias de prototipagem rápida que vem se consolidando como técnica para acelerar e melhorar o processo de desenvolvimento de novos produtos (WOHLERS, 2007). Neste processo filamentos de resina termoplástica aquecida são extrudadas a partir de uma matriz em forma de ponta que se move num plano X-Y. A matriz de extrusão controlada deposita filetes de material extremamente fino sobre a plataforma de construção, formando a primeira camada do componente. A plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que a resina termoplástica endurece rapidamente. Após esse endurecimento a plataforma se abaixa ligeiramente e a matriz de extrusão deposita

uma segunda camada sobre a primeira. O processo é repetido até a construção total do protótipo (fig.4). São construídos suportes durante a fabricação para segurar o protótipo durante sua fabricação. Tais suportes são fixados ao protótipo usando-se um segundo material, mais fraco, ou uma junção perfurada. As resinas termoplásticas adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida.

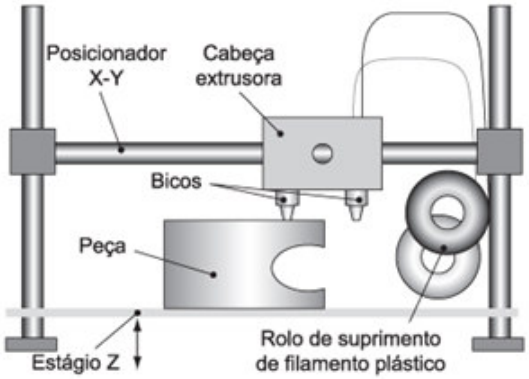


Figura 4. Processo de modelagem por deposição de material fundido.
Fonte: (Artis, 2006).

2.3.3 Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, Laminated Object Manufacturing)

Neste processo camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo, são unidas umas nas outras formando o protótipo. A tecnologia de prototipagem rápida conhecida por Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM) possui impacto direto (na espessura da camada, na temperatura, na plataforma, e na velocidade de calor do laser) ou indireto (na velocidade de alimentação e na velocidade da plataforma) durante o processo de deposição de camadas na superfície vertical, (KECHAGIAS, 2007).

O material original consiste de bobinas de papel laminado com cola ativada pelo calor. Um rolo coletor avança a tira de papel sobre a plataforma de construção, onde há uma base feita de papel e fita com espuma nas duas faces. A seguir, um rolo aquecido aplica pressão para fixar o papel à base. Uma fonte de raio laser com alta precisão de foco corta o contorno da primeira camada sobre o papel e então quadricula a área em excesso, ou seja, o espaço negativo do protótipo. Esse quadriculado rompe o material extra, tornando fácil sua remoção durante o

processamento posterior. Esse material em excesso proporciona um excelente suporte para projeções, saliências e seções com paredes finas durante o processo de construção. Após o corte da primeira camada a plataforma é abaixada, liberando o caminho para que o rolo coletor avance a tira de papel e exponha material novo. Então a plataforma se eleva até um ponto ligeiramente inferior à altura original, o rolo aquecido liga a segunda camada a primeira e a fonte de raio laser corta a segunda camada.

Este processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias para construir a peça, a qual apresentará textura similar à de madeira. Uma vez que os modelos são feitos de papel, eles devem ser selados e revestidos com tinta ou verniz para se evitar eventuais danos provocados pela umidade (fig.5). Os mais recentes desenvolvimentos deste processo permitem o uso de novos tipos de materiais, incluindo plástico, papel hidrófobo e pós-cerâmicos e metálicos. Estes materiais pulverulentos geram no final do processo uma peça "verde" que deve ser posteriormente sinterizada para que se alcance máxima resistência mecânica.

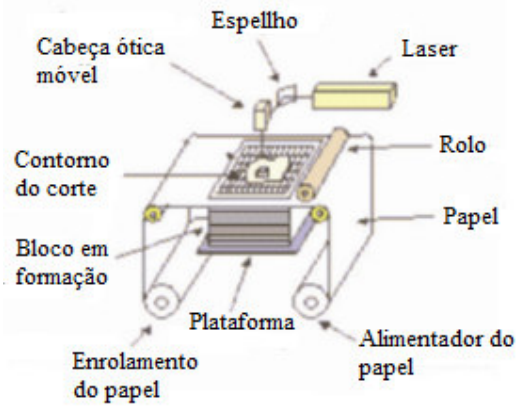


Figura 5. Processo LOM.
Fonte: (Rede nacional de Prototipagem Rápida- Portugal).

2.3.4 Sinterização Seletiva a Laser (SLS, "Selective Laser Sintering")

Este processo, patenteado em 1989, usa um raio laser para fundir, de forma seletiva, materiais pulverizados, tais como náilon, elastômeros e metais, num objeto sólido. As peças são construídas sobre uma plataforma a qual está imediatamente abaixo da superfície de um recipiente preenchido com o pó fusível por calor.

O raio laser traça a primeira camada, sinterizando o material. A plataforma é ligeiramente abaixada, reaplica-se o pó e o raio laser traça a segunda camada. O processo continua até que a peça esteja terminada (fig.6). O pó em excesso ajuda a dar suporte ao componente durante sua construção (SOUZA e ULBRICH, 2009).

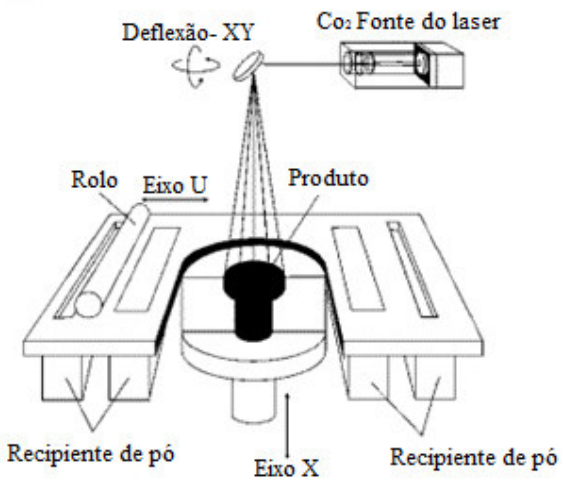


Figura 6. Processo de Sinterização Seletiva.
Fonte: (SLS – DTM Corp.)

2.3.5 Cura Sólida na Base (SGC, "Solid Ground Curing")

Este processo é bastante similar a estereolitografia, pois ambos usam radiação ultravioleta para endurecer, de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. Contudo, ao contrário da estereolitografia, este processo cura uma camada inteira de uma vez. Em primeiro lugar, a resina foto sensível é borrifada sobre a plataforma de construção. A seguir, a máquina gera uma foto-máscara (como um estêncil) correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro acima da plataforma de construção, usando-se um processo similar ao das máquinas fotocopiadoras. Em seguida, a máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa apenas através das porções transparentes da máscara, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero correspondentes à camada atual. Após a cura da camada, a máquina suga por vácuo o excesso da resina líquida e borrifa cera em seu lugar para dar suporte ao modelo durante sua construção.

A superfície superior é fresada de forma a ficar plana e o processo é repetido para se construir a próxima camada. Assim que a peça ficar pronta é necessário remover a cera nela presente, através de sua imersão num banho de solvente. Essas máquinas são de grande porte e podem produzir modelos de grande tamanho.

2.3.6 Impressão por Jato de Tinta (MJT, "Multi Jet Modeling"; BPM, "Ballistic Particle Manufacturing")

Ao contrário das técnicas expostas anteriormente, esta aqui se refere a uma classe inteira de equipamentos que usam a tecnologia de jato de tinta. Os protótipos são construídos sobre uma plataforma situada num recipiente preenchido com material pulverulento. Um cabeçote de impressão por jato de tinta "imprime" seletivamente um agente ligante que funde e aglomera o pó nas áreas desejadas. O pó que continua solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo que vai sendo formado. A plataforma é ligeiramente abaixada, adiciona-se mais material pulverulento e o processo é repetido. Ao se terminar o processo a peça "verde" é sinterizada, removendo-se o pó que ficou solto. Podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.3.7 Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, "Laser Engineered Net Shaping")

Processo relativamente novo, que apresenta a vantagem de produzir protótipos de metal plenamente densos, com boas propriedades metalúrgicas e velocidades razoáveis de construção. Aqui um gerador de raio laser de alta potência é usado para fundir pó metálico fornecido coaxial ao foco do raio laser, através de um cabeçote de deposição. O raio laser passa através do centro do cabeçote e é focado para um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto e lentes. Uma mesa X-Y é movida por varredura de forma a gerar cada camada do objeto. O cabeçote é movido para cima à medida que cada camada é completada. O raio laser pode ser conduzido até a área de trabalho através de espelhos ou fibra ótica. Os pós-metálicos são fornecidos e distribuídos ao redor da circunferência do cabeçote por gravidade ou através de um gás portador inerte pressurizado (fig.7).

Mesmo nos casos onde não necessitar de uma corrente de gás para transportar o pó metálico é necessário ter uma corrente de gás inerte para se proteger a poça de metal líquido do oxigênio atmosférico, de forma a se garantir as propriedades metalúrgicas e promover melhor adesão entre camadas através de melhor molhamento superficial. Podem ser usados pós de diversas ligas metálicas, tais como aço inoxidável, inconel, cobre, alumínio e titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material usado, taxa de deposição e outros parâmetros, podendo oscilar desde algumas centenas até 20.000 watts ou mais. Os protótipos produzidos requerem usinagem para acabamento, apresentando densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional.

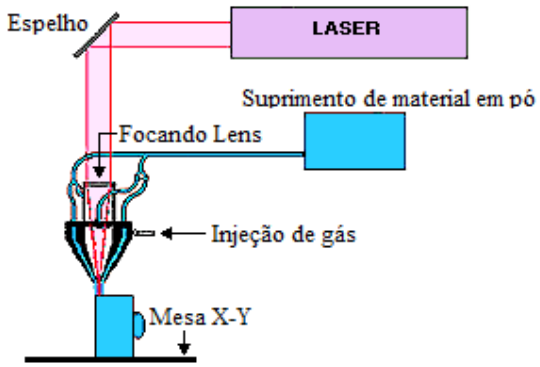


Figura 7. Esquema do processo LENS.
Fonte: (cimject.ufsc).

2.3.8 Fabricação de peças em formato livre por feixes de elétrons (EBF3 – "Eletron Beam Free Form Fabrication")

A técnica de impressão 3D de peças metálicas ocorre dentro de uma câmara de vácuo, onde um feixe de elétrons é focalizado sobre um suprimento contínuo de metal em pó, fundindo-o e fazendo sua deposição camada a camada sobre a peça em construção.

O processo foi batizado de EBF3 – *Electron Beam Free Form Fabrication* – fabricação de peças em formato livre por feixe de elétrons. O equipamento tem dois bicos de injeção de metal que funcionam simultaneamente, o que significa que ele é capaz de misturar dois metais diferentes em uma liga única ou incorporar material no interior de outro. Esta última possibilidade permitirá, por exemplo, a incorporação de

fibras ópticas de vidro no interior de peças metálicas e a colocação de sensores em áreas impossíveis de serem trabalhadas.

A única exigência do processo é que os metais sejam compatíveis com o uso dos feixes de elétrons, tornando o alumínio, o titânio e outros metais semelhantes, as matérias-primas ideais para a fabricação das peças por impressão 3D. O uso terrestre e mais imediato da impressão 3D com metais é ainda mais promissor. Hoje, uma peça para a indústria aeronáutica pode começar com um bloco de titânio de 3.000 quilogramas, torneado e desbastado até chegar a um objeto de 150 kg.

Os outros 2.850 quilogramas precisarão ser reciclados, sem contar a enorme quantidade de fluido de corte e energia desperdiçados no processo. Com a EBF3 você pode fabricar a mesma peça usando apenas 175 Kg de titânio e desbastar apenas 25 quilogramas para ter a peça em sua conformação final, diz a engenheira Karen Taminger, coordenadora do grupo de pesquisadores. “E a prototipagem metálica utiliza muito menos eletricidade para criar a mesma peça. Segundo ela, a fabricação das peças camada por camada, abre a possibilidade de contar com cavidades internas e complexas que não são possíveis com a usinagem de um bloco de metal, o que deverá permitir a fabricação de peças que levarão a um aumento na eficiência das turbinas de aviões, entre vários outros equipamentos de ponta.

2.3.9 Impressora 3D de alta velocidade.

A impressora de alta resolução constrói os objetos usando uma resina líquida, que é endurecida nos pontos precisos por um feixe de laser altamente focalizado. O ponto focal do laser é guiado ao longo de resina por espelhos móveis. A resolução é tão elevada que torna-se possível a construção de peças de alta complexidade que não são maiores do que um grão de areia. A nova impressora 3D também é muito rápida: ” Até agora, a técnica usada era muito lenta. Costuma-se medir a velocidade de impressão em milímetros por segundo, este equipamento pode fazer cinco metros em um segundo”, garante o professor Jurgen Stampfl. E não se trata apenas de uma maravilha mecânica: a chamada técnica da litografia de dois fótons exigiu o desenvolvimento de uma resina especial.

“A resina contém moléculas que são ativadas pelo laser. Elas induzem uma reação em cadeia em outros componentes de resina e os solidificam”, esta é a definição de Jan Torgesten, pesquisador que ajudou a desenvolver o aparelho.

Essas chamadas moléculas iniciadoras somente são ativadas se absorverem dois fótons do laser de uma vez- daí o nome da técnica. E isso só acontece no centro do feixe do laser, onde a intensidade é maior, garantindo uma precisão sem precedentes.

2.3.10 Prototipagem rápida com metais.

Engenheiros do Centro de Pesquisas Langley, da NASA, desenvolveram um sistema de prototipagem rápida que permite a fabricação de peças de ligas metálicas a partir de um desenho feito no *software* CAD no computador.

A possibilidade de fabricar peças metálicas sem o desenvolvimento de moldes abre novas possibilidades de aplicações, além da redução de custos nas aplicações já existentes da indústria aeronáutica, espacial e na fabricação de implantes médicos customizados para cada paciente.

2.3.11 Inibição Seletiva de Sinterização (SIS - "Seletive Inhibitions of Sinterin")

Um pesquisador da Universidade *Southern* California (Estados Unidos), desenvolveu um novo equipamento que gera "impressões tridimensionais" em plástico e mesmo em metal, de forma mais rápida e mais barata do que os atuais sistemas de prototipagem rápida. O Dr. Behrokh Khoshnevis ganhou renome mundial com seu sistema "*Contour-Crafting*", capaz de construir até casas por meio de um sistema parecido com a impressão jato-de-tinta. O novo aparelho representa um avanço significativo sobre os equipamentos de sinterização a laser, já largamente utilizados para a geração de peças complexas em 3D à partir de arquivos gerados por computador (Inovação tec., 2003).

O Dr. Khoshnevis afirma que sua nova criação, batizada de SIS "Selective Inhibition of Sintering": Inibição Seletiva de Sinterização poderá viabilizar a prototipagem rápida em escritórios e até mesmo em residências. As máquinas de prototipagem rápida por sinterização constroem os objetos aplicando camadas sucessivas e finíssimas, de menos do que um milímetro de espessura, de material plástico em pó sobre uma área de trabalho. Em seguida, esse material é sinterizado,

ou fundido, em áreas selecionadas. A parcela não fundida do pó é removida e o processo é repetido múltiplas vezes, até que a peça esteja pronta (fig.8).

Esses processos são conhecidos como prototipagem rápida porque inicialmente eram utilizados para a geração de protótipos ou para a criação de moldes. Mas, com o avanço da tecnologia e dos equipamentos, várias empresas já utilizam o sistema para a criação de produtos finais, em um processo chamado de fabricação direta ou manufatura de mesa. Esses equipamentos utilizam raios laser para sinterizar o material (Inovação tec., 2011).

O novo processo SIS, ao contrário, trata automaticamente uma parte do pó aplicado para que se torne resistente à ligação com as partículas adjacentes, submetendo a peça inteira a um calor uniforme e de alta intensidade. Áreas não tratadas do pó sinterizam e áreas tratadas. Vários materiais anti-sinterização podem ser utilizados, inclusive água salgada. Segundo o Dr. Khoshnevis, o seu processo tem várias vantagens sobre os equipamentos a laser (Inovação tec., 2011). Os *lasers* e *scanners* utilizados são caros, duram pouco e consomem muita energia. Já o processo SIS pode utilizar uma chama a gás ou mesmo resistências elétricas de aquecedores comuns. Isto é o que permite que até pós metálicos possam vir a ser utilizados, fabricando-se diretamente uma peça de metal. Outra vantagem levantada pelo criador do equipamento é que o método SIS é mais rápido, já que os sistemas a laser têm que passar continuamente sobre toda a peça, ligando e desligando o feixe de luz para fundir partes específicas da peça. Isto pode fazer com que peças grandes e complexas levem até dias para serem construídas. Já uma peça padrão pode ser construída em 15 segundos com o método SIS (Inovação tec., 2003).

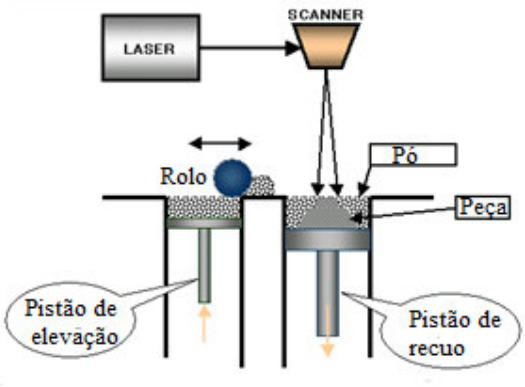


Figura 8. Esquema representativo do processo SIS.
Fonte site inovação Tecnológica.

2.3.12 Prototipagem Rápida por remoção de material.

O processo SRP (*Subtractive Rapid Prototyping*) é comumente confundido com o VMC (*Vertical Machining Center*), ou CNC (*Computer Numeric Control*) os centros de usinagem, pelas semelhanças dos equipamentos. A base da tecnologia é a mesma, ambos iniciam o processo de fabricação a partir de um bloco de material, desbastando-o até se obter o objeto desejado. Ambos desbastam uma variedade enorme de materiais desde metais aos mais usuais dos polímeros como o Nylon, ABS, Poliacetal, Acrílicos, etc. Utilizam-se de décadas de desenvolvimento tecnológico em controles de precisão dos eixos de usinagem com servos-motores AC, trocadores de ferramentas, eixos adicionais de usinagem, entre outros, entretanto, existem diferenças significativas entre o processo de SRP e os centros de usinagem (VMCs).

Enquanto os VMCs são otimizados para as confecções de objetos metálicos e ferramental em aço, os equipamentos de SRP são equipamentos pequenos, com perfil de desktops, cabendo dentro dos escritórios de desenvolvimento, podendo ser ligados em redes domésticas de energia elétrica e necessitam de pouca manutenção. Trabalham com baixo nível de ruído e não utilizam sistemas de refrigeração e filtragem. São fáceis de operar e geralmente contam com *software* CAM integrado e otimizado para o processo de prototipagem, proporcionando a possibilidade de designers e engenheiros a criação de protótipos rápidos de excelente precisão e acabamento superficial (CURTIS, 2006).

As propriedades mecânicas dos protótipos ficam por conta dos materiais a serem usinados, que além daqueles polímeros usuais, contam como uma variedade enorme de poliuretanos que cada vez mais simulam os polímeros pretendidos na produção em escala do protótipo desenvolvido. A utilização de metais não ferrosos também é usual nos processos de SRP.

Os equipamentos, em sua maioria, utilizam os três eixos comuns de usinagem, mas uma variedade considerável tem apresentado um quarto eixo de giro do protótipo e trocadores automáticos de ferramentas, para a usinagem do protótipo em seu verso logo após a finalização da primeira face do objeto. Podendo-se então, iniciar a construção do protótipo e retirá-lo do equipamento ao fim da usinagem sem interferência manual durante o processo.

O acabamento superficial e o tempo de execução dos protótipos também sofrem influência direta do tipo de material, das ferramentas de usinagem e dos controles via software das atividades do equipamento antes da construção do objeto. Assim, a qualidade do acabamento superficial está sujeita ao objetivo final do protótipo e não apenas a qualidade que o equipamento oferece.

Outra possibilidade em alguns equipamentos de SRP é a troca do cabeçote de usinagem por scanner tri dimensional, capaz de fazer a leitura de objetos muitas vezes construídos manualmente e que servem de base para o desenho CAD, onde se viabilizará a correção de imperfeições de superfícies, para então a usinagem posterior, no mesmo equipamento, de um protótipo mais próximo do pretendido. Esta possibilidade de usinagem e digitalização através de scanner, além dos custos acessíveis e o conceito plug-and-play dos *softwares* que gerenciam a integração CAD/CAM, revela uma das características dos equipamentos de SRP, o conceito in-house dos equipamentos, o que sob o ponto de vista da sigilosidade é um elemento importante no desenvolvimento de produtos (CURTIS, 2006).

Portanto, a diversidade de materiais e a flexibilidade do processo de SRP, além da velocidade de resposta na execução de protótipos, habilitam este processo ao conceito de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*).

A inovação no campo no fantástico mundo de CAD/CAM está em constante evolução. Imagine o que é ser capaz de criar prototipagem rápida e com um grau de perfeição inigualável. A fresadora CNC fig.9, para além do processo de usinagem, executa também desde a criação de joias, esculturas em madeira ou mármore, tudo isto realizável em apenas poucas horas ou mesmo minutos, em vez de semanas e às vezes meses. As fresadoras CNC funcionam como tornos multifuncionais que podem fazer prototipagem rápida nos mais diversos materiais.

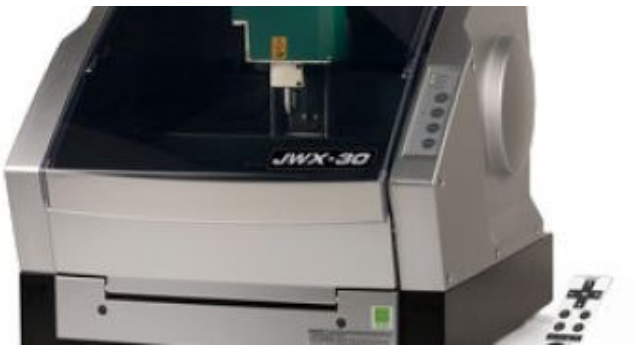


Figura 9. Fresadora (torno) CNC.

Com a fresadora CNC é agora possível criar um projeto desde a ideia inicial até a sua conclusão, usando apenas o computador e uma única ferramenta. Isso é o que o fantástico mundo de CAD CAM CNC (Sistema Numérico Computadorizado) pode fazer. As máquinas CNC (tornos) vieram para revolucionar.

O sistema de fresadoras CNC (tornos) é um compacto, controlado por computador, uma máquina tridimensional com uma interface de fácil utilização que permite que mesmo um iniciante trabalhe como um profissional experiente em artesanato de joias, madeira, mármore e outros materiais leves. A configuração original das máquinas CNC permite executar muitas outras funções, incluindo a escultura em cera usada para fundição no fabrico de joias, também de corte de madeira e de contorno, escultura em mármore, etc.

2.4 APLICAÇÃO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.

Segundo WOHLERS (2007), é possível utilizar a tecnologia da PR no desenvolvimento dos produtos como segue:

a) Na construção de protótipos, para avaliação e adequação da funcionalidade e da forma geométrica dos produtos, isto é, para análise da aplicabilidade. Desta análise derivam-se importantes mecanismos para quantificar a matéria-prima a ser utilizada e prever as dimensões e precisões envolvidas no produto;
b) Frequentemente os protótipos construídos são modelos físicos da aparência externa de produtos ou propostas intuitivas (mostruário). Nesses casos, a facilidade e a rapidez de construção do protótipo e seu custo são fatores fundamentais, isto é, a PR só é justificada quando efetivamente facilita a etapa inicial de desenvolvimento de produtos;
c) A PR é utilizada para satisfazer à exigência de alguns processos, como a fundição sobre pressão, que necessita de moldes especiais. Nesses casos, o protótipo gerado é o molde que deve ter alta precisão dimensional, excelente acabamento superficial, adequada resistência ao calor e satisfatória dureza.

A fig.10 mostra que a quantidade de aquisição de equipamentos de prototipagem rápida no Brasil ainda é muito pequena comparada a países com nível de desenvolvimento econômico maior, porém com perspectivas de melhoras consideráveis. A fig.11 mostra o percentual dos processos de prototipagem em diferentes áreas, a nível mundial. A fig.12 apresenta uma análise de conteúdo dos processos de prototipagem rápida, destacando vantagens e desvantagens.

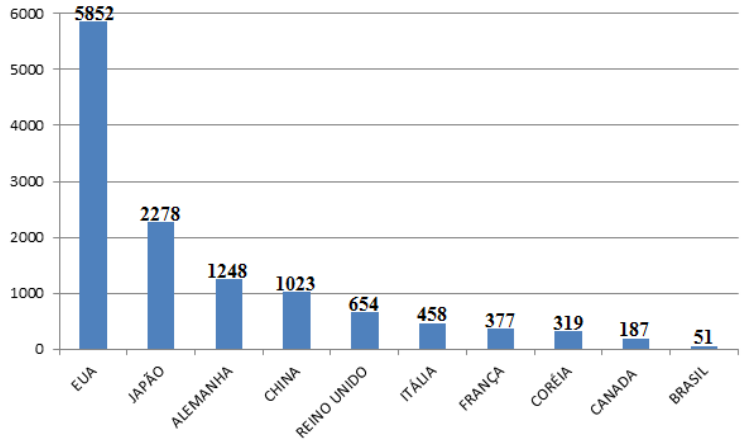


Figura 10. Quantidade de aquisição de equipamentos à nível mundial.
Fonte: (Revista CADWARE INDÚSTRIA, junho/2006).

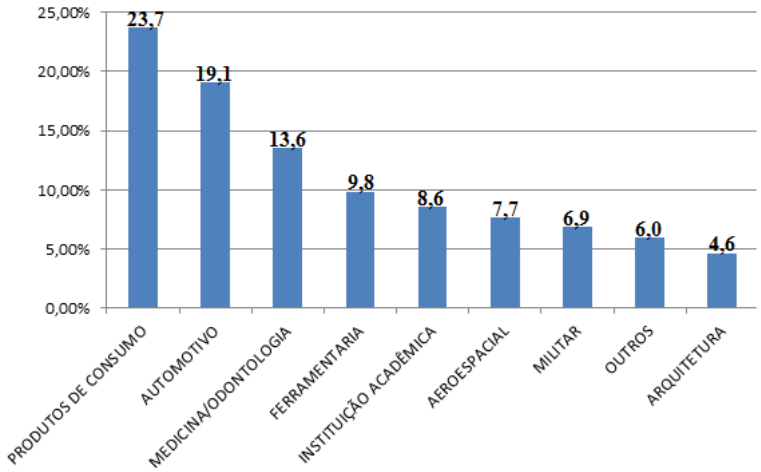


Figura 11. Aplicações de prototipagem rápida em diferentes áreas.
Fonte: (WOHLERS ASSOCIATES, 2007).

PROCESSOS	ANO	ÀREAS DE ATUAÇÃO	DESENVOLVEDORES/ EMPRESA	MATERIAIS	FORMAS DE PROCESSO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
ESTEREOLITOGRAFIA	1987	PRODUTOS FUNCIONAIS	3D SYSTEMS	RESINA LÍQUIDA	FONTE DE LASER	Melhor processo em termo de acabamento Boa precisão, Elevada gama de materiais	Custo da matéria prima elevado, baixa resistência mecânica das peças, tempo de construção alto, necessidade de pós-cura
FDM (FUSÃO POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL)	1991	PRODUTOS FUNCIONAIS	STRATASYS	ABS, ELASTÔMEROS	EXTRUSÃO À QUENTE	Grande precisão dimensional Permite a utilização de dois materiais simultâneos Propriedades mecânicas elevadas	Processo lento Custo do equipamento elevado. Custo do produto elevado
LOM (MANUFATURA DE OBJETOS EM LÂMINAS)	1991	PRODUTOS FUNCIONAIS	MICHEL FYNGIN	PAPEL ADESIVO PLASTICO METAL	FONTE DE LASER	Boa precisão dimensional no eixo x,y. Baixo custo do material e do processo Ótimo para peças de grande porte	Instabilidade do papel Baixa precisão no eixo x Necessidade de retrabalho Dificuldades de obter pequenas espessuras
SLS (SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER)	1992	PRODUTOS FUNCIONAIS	CHARLES W. HULL	POLIAMIDA CERÂMICA METAL	FONTE DE LASER	Resistência mecânica e térmica elevada Rapidez na execução Grande variedade de material	Superfícies rugosas. Porosidade, alto custo da matéria prima. Baixa precisão dimensional
IMPRESSÃO JATO DE TINTA	1996	PRODUTOS FUNCIONAIS	3D SYSTEMS	PÓ CERÂMICO OU POLIMÉRICO	LÂMPADA ULTRA VIOLETA	Não necessita de suporte físico Peças de qualquer geometria Variedade de material Pode-se obter peças prontas.	Superfícies com rugosidade elevada. Difícil de remover o pó não ligado.
LENS (CONFORMAÇÃO PRÓXIMA AO FORMATO FINAL VIA LASER)	2000	PRODUTOS FUNCIONAIS	SANDIA	LIGAS DE TITÂNIO E AÇO	FONTE DE LASER	Construção de peças metálicas Boas propriedades mecânicas	Custo do equipamento elevado Necessidade de retrabalho
EBF3 (FABRICAÇÃO DE PEÇAS EM FORMATO LIVRE POR FEIXES DE ELÉTRONS)	2009	PRODUTOS FUNCIONAIS	CENTRO DE PESQUISA LANGLEY (NASA)	PÓ METÁLICO -ALUMÍNIO -TITÂNIO	FEIXE DE ELÉTRONS	Mistura dois metais diferentes Usa menos eletricidade que a fabricação da peça por meios convensionais.	Custo do equipamento elevado. Exigência de que os materiais sejam compatíveis com o uso do feixe de elétrons.
SIS (INIBIÇÃO SELETIVA DE SINTERIZAÇÃO)	2009	PRODUTOS FUNCIONAIS	BEHNOKH KHOSHNEVIS	POLÍMEROS METAIS	FONTE DE LASER	Elevada gama de materiais. Processo relativamente mais barato segundo seu criador. Tempo de processo baixo	Processo relativamente novo.
IMPRESSÃO 3D POR INJEÇÃO.	2010	PRODUTOS FUNCIONAIS E CONJUNTOS MONTADOS	3D SYSTEMS	ABS RESINA EPOXI	LÂMPADA ULTRA VIOLETA	Alta precisão, alto grau de acabamento, construção de conjuntos montados.	Limitação de materiais Resistência mecânica média

Figura 12. Análise dos processos de prototipagem rápida mais usados.

Amplamente divulgada a aplicação da prototipagem na indústria tem aumentado consideravelmente, pois, com o desenvolvimento de novos produtos e a competitividade se faz necessário à redução de tempo, e com o desenvolvimento de novos materiais, em alguns casos podemos confeccionar peças já como produto final no processo de prototipagem rápida. A aplicação dos processos de prototipagem rápida é muito difundido no setor automotivo, porém de forma geral também em outros setores produtivos como por exemplo na manutenção, no desenvolvimento de novos produtos, na simulação de equipamentos, e também na engenharia reversa e com a tendência da diminuição dos custos, outras áreas do setor industrial também investirão nesta tecnologia.

Também em expansão na área de saúde de modo geral são cinco as aplicações da prototipagem rápida, requerem a utilização de diferentes materiais e, consequentemente, o emprego de diferentes tecnologias de prototipagem rápida. São eles: (1) biomodelos para planejamento e treinamento cirúrgico em polímero ou gesso; (2) guias para perfuração de ossos feitas em polímeros; (3) scaffolds ou telas de suporte de metais, cerâmicos, polímeros ou compósitos biocompatíveis; (4) implantes densos que podem ser construídos em metal, compósito, polímero, ou cerâmica e (5) confecção de próteses (MAIA, 2006).

Para criar muitos dos modelos utilizados nas aplicações descritas anteriormente, é necessário o uso de biomateriais. Os biomateriais são substâncias naturais ou sintéticas que são toleradas de forma transitória ou permanente, pelos diversos tecidos que constituem o organismo humano. Segundo a Conferência de Consenso em biomateriais para aplicações clínicas de 1982 entende-se por biomaterial: “Toda substância (com exceção de drogas) ou combinação de substâncias, de origem sintética ou natural, que durante um período de tempo indeterminado é empregado como um todo ou parte integrante de um sistema para tratamento, ampliação ou substituição de quaisquer tecidos, órgãos ou funções corporais".

Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida (OLIVEIRA, 2007). Os cientistas austríacos agora estão trabalhando em resinas biocompatíveis, para aplicações biomédicas. Essas resinas poderão ser usadas para criar estruturas de suporte, os chamados andaimes ou matrizes extracelulares, nos quais células vivas poderão se agarrar e crescer, facilitando a criação de tecidos biológicos artificiais.

No campo da nanotecnologia Engenheiros da Universidade de Tecnologia de Viena, na Áustria, construíram a primeira impressão 3D com resolução nanométrica, abrindo caminho para seu uso também na fabricação de Microssistemas Integrados e nano-máquinas.

Usando uma tecnologia chamada litografia de dois fótons, a impressora atingiu uma precisão tal que permite seu uso de peças para medicina. A necessidade de peças de reposição é um dos maiores desafios das viagens espaciais interplanetárias de longa duração, assim como para o estabelecimento de bases na Lua, qualquer equipamento quebrado dependeria do envio de peça sobressalentes da Terra. Numa viagem a marte, por exemplo, isso seria impraticável. Uma impressora 3D capaz de imprimir peças de metal representa o fim desse problema (ver fig. 13).

Figura 13. Cientistas realizam um experimento com o feixe de elétrons em gravidade.
Fonte: (Inovação Tecnológica, 2011).

Uma área que vem despertando interesse no uso de tecnologias de prototipagem rápida é a manutenção, neste setor de trabalho provavelmente seja o mais crítico, pois o impacto de um equipamento quebrado na linha de produção pode ter consequências desastrosas o que acarreta danos econômicos irreparáveis, e a prototipagem rápida pode em alguns casos diminuir esse impacto.

A partir dessas informações e com dados coletados através de uma revisão bibliográfica conclui-se que fazendo uma análise de uma peça quebrada de uma máquina podemos confeccioná-la através do processo de prototipagem rápida, obviamente definindo o tipo de material e também o processo a ser usado podemos

saber qual será a resistência mecânica dessa peça, e a partir daí utilizar esta peça por um determinado tempo até a aquisição da peça final.

Na área de Engenharia reversa esta técnica já esta sendo usada, pois, neste caso parte-se de uma peça já desenvolvida onde também é possível utilizar o Scanner 3D para se fazer a imagem da peça e passar para um *software* de desenho CAD, fazer as devidas atualizações e efetuar a construção da mesma.

2.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS.

Esta seção apresenta conceitos sobre Delineamento de Experimentos, focalizando a utilização do experimento fatorial 2^k utilizados na pesquisa de campo. Estudiosos como Genichi Taguchi mostraram que as especificações deveriam ficar sempre próximas aos valores nominais das dimensões especificadas. Na busca de se aproximar da nominal, devem-se estabelecer parâmetros que suportem e mantenham as dimensões especificadas.

O controle estatístico de processos tenta “manter” o processo em faixas de controle denominadas limites de controle. A média de uma característica de qualidade do processo pode não coincidir com a dimensão nominal especificada pelo projeto. Entretanto para tentar manter-se com as dimensões nominais, deve-se realizar experimentos com as variáveis envolvidas no processo e observar as respostas neles obtidas.

Tais experimentos têm justamente por objetivo:

a) Determinar os fatores que influenciam na saída do processo.
b) Ajustar e fixar os fatores controláveis para se obtenham respostas dentro dos valores que, normalmente, sejam os valores nominais especificados em projeto (MONTGOMERY, 2001).
c) Tornar o projeto robusto, sendo mais robusto quanto menos for impactado por fatores de ruído interno ou externo. A robustez de um produto ocorre mais em função de um bom projeto que produz rigidez dos controles dos processos de fabricação (BOX *et al.*, 1978).

O planejamento de experimentos, é usado para aperfeiçoar o processo, aproximando os resultados obtidos aos requisitos nominais, igualmente, para reduzir a variabilidade e os custos totais. Em projetos, usa-se, para selecionar parâmetros que tornem o projeto robusto, avaliar materiais alternativos e fixar os parâmetros-chave do projeto, ou seja, os parâmetros que impactam no desempenho do produto (CALEGARE, 2001). Um projeto é considerado robusto quando emite uma ótima resposta aos fatores de sinal, não importando os ruídos externos e com o mínimo de ruído interno. Em outras palavras o desempenho de saída é o melhor possível inclusive em condições não ideais.

Observa-se que, até os anos 70, estudos experimentais eram construídos considerando-se regras combinatórias. O DOE clássico foi desenvolvido por Sir Ronald A. Fischer em 1920, na estação de pesquisa agrícola de Rothamsted em Londres. Após 1970, os experimentos passaram a se realizar, usando-se algoritmos de otimização (ANTONY, 2006). Taguchi desenvolveu seus métodos em meados da década de 50; sua abordagem experimental, porém, foi introduzida nos Estados Unidos na década de 80 (LOUVET, 2005).

2.5.1 Experimentos Fatoriais.

Experimentos fatoriais são aqueles que incluem todas as combinações de vários conjuntos de tratamentos ou fatores. (O planejamento fatorial é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, podem ser completos ou fracionados). Um experimento fatorial completo ocorre quando todas as possíveis combinações de níveis dos fatores são testadas. Um experimento fatorial fracionado ocorre quando apenas uma fração do fatorial completo é testada (WERKEMA e AGUIAR, 1996).

Existe um caso particular de experimento fatorial, denominado planejamento fatorial 2^k, que trabalha com *k* fatores e dois níveis em cada fator, esse tipo de planejamento é usado normalmente nos estágios iniciais de pesquisa. Os níveis de fatores habitualmente são codificados com os sinais: (+) atribuído ao nível superior e (-) atribuído ao nível inferior. Um experimento fatorial 2^3, por exemplo, possui três fatores, com 2 níveis cada, produzindo 8 tratamentos ((1), a, b, c, ab, ac, bc e abc) (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

O experimento fatorial 2^3 pode ser representado geometricamente por um cubo, justamente por esse formato explicar melhor os efeitos e também porque o experimento é dito “ortogonal”. A fig. 14 mostra que os vértices “a, b e c” estão a 90º entre si. Os vértices projetados têm nomenclaturas combinadas “ab”, “ac”, “bc” e “abc”. Quatro vértices ligados formam um plano.

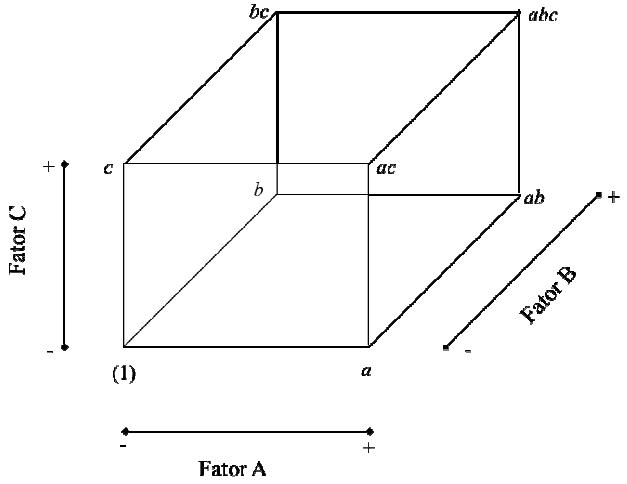


Figura 14. Representação geométrica do fatorial 2^3.

A Tab. 1 apresenta o diagrama de contrastes cujo objetivo é mostrar que os sinais das interações secundárias resultam do produto dos sinais das interações primárias. O sinal da interação AB (+) é resultante da multiplicação entres os sinais de A (-) e B (-).

Tabela 1. Diagrama de contrastes do fatorial 2^3

Combinação de			1ª ordem			2ª ordem		3ª ordem
tratamento	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	+	-	-	-	+	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

O procedimento de análise das médias é o passo final do experimento fatorial. O planejamento experimental é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização. Um planejamento adequado permite, além do aprimoramento de

processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução de tempos de análise e dos custos envolvidos.

No que se refere ao projeto de produtos, o planejamento experimental permite a avaliação e comparação de configurações (projetos) distintas, avaliação do uso de materiais diversos, a escolha de parâmetros de projeto adequados a uma ampla faixa de utilização do produto e à otimização de seu desempenho.

Para que um experimento seja realizado de forma eficiente e produza resultados eficazes, deve-se empregar métodos científicos no seu planejamento (MONTGOMERY, 1997). O Delineamento de Experimentos (DOE) é uma das ferramentas para se obter uma melhor performance das características da qualidade, tendo por resultado uma maior capacidade competitiva do produto no mercado (ELSAYED; CHEN, 1993; PHADKED, 1989).

2.5.2 Tipos de planejamentos fatoriais.

Segundo Montgomery (2005), os planejamentos fatoriais são classificados em:

[1]. Planejamento completamente Aleatorizado com um único fator.

Este planejamento é indicado quando somente um fator experimental está sendo estudado, possui uma estrutura onde o efeito do fator é estudado por meio da alocação ao acaso das unidades experimentais aos tratamentos (Níveis). Os ensaios são realizados em ordem aleatória.

[2]. Planejamento fatorial.

Este planejamento é indicado quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e as interações entre os fatores podem ser importantes, possui uma estrutura de forma que em cada repetição completa do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização dos ensaios são feitas de modo aleatório.

[3]. Fatorial 2^k em blocos.

Este planejamento é indicado quando o número de ensaios necessários para o planejamento em *k* fatores em 2 níveis é muito grande para que sejam realizados sob condições homogêneas, possui uma estrutura onde o conjunto completo de tratamentos é dividido em subconjuntos de modo que as interações de ordem mais alta são confundidas como os blocos. São tomadas observações em todos os

blocos. Os blocos surgem geralmente como consequência de restrições de tempo, homogeneidade de materiais, etc.

[4]. Fatorial 2^k fracionário.

Este planejamento é indicado quando existem muitos fatores e não é possível coletar observações em todos os tratamentos, sua estrutura possui vários fatores estudados em dois níveis, mas somente um subconjunto do fatorial completo é executado. A formação dos blocos é possível algumas vezes.

[5]. Blocos aleatorizados.

Este planejamento é indicado quando o efeito de um fator esta sendo estudado e é necessário controlar a variabilidade provocada por fatores perturbadores conhecidos. Estes fatores perturbadores (material, tempo, pessoas, etc.) são divididos em blocos ou grupos homogêneos, em sua estrutura são tomadas decisões correspondentes a todos os tratamentos em cada bloco. Usualmente os blocos são considerados em relação a um único fator perturbador.

[6]. Blocos incompletos balanceados.

Este planejamento é indicado quando todos os tratamentos não podem ser acomodados em um bloco, na sua estrutura os tratamentos testados em cada bloco são selecionados de forma balanceada, dois tratamentos quaisquer aparecem juntos em um mesmo bloco o mesmo número de vezes que qualquer tratamento.

[7]. Blocos incompletos parcialmente balanceados.

Este planejamento é indicado quando um planejamento em blocos incompletos balanceados, necessita de um número de blocos excessivamente grande, na sua estrutura alguns pares de tratamentos aparecem juntos n vezes, outros pares aparecem juntos n^2 vezes, e os pares restantes aparecem juntos m vezes.

[8]. Quadrados latinos.

Este planejamento é indicado quando um fator de interesse está sendo estudado e os resultados podem ser afetados por duas outras variáveis experimentais ou por duas fontes de heterogeneidade. É suposta a ausência de interações, na sua estrutura o quadrado latino é um arranjo para permitir dois grupos de restrições de bloco. Os tratamentos são distribuídos em correspondência às colunas e linhas de um quadrado. Cada tratamento aparece uma vez em cada linha e uma vez em cada coluna. O número de tratamentos dever ser igual ao número de

linhas e colunas do quadrado. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras, as quais correspondem às colunas e linhas do quadrado.

[9]. Quadrados de Youden.

Este planejamento é similar ao quadrado latino, mas o número de linhas, colunas e tratamentos não precisam ser iguais, na sua estrutura cada tratamento ocorre uma vez em cada linha. O número de tratamentos deve ser igual ao número de colunas. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras.

[10]. Hierárquico.

Este planejamento é indicado no caso de experimentos com vários fatores em que os níveis de um fator (B) são similares mas não idênticos para diferentes níveis de outro fator (A). Ou seja, o *j*-ésimo nível de B quando A está no nível 1 é deferente do j-ésimo nível de B quando A está no nível 2 e assim por diante, e possui uma estrutura onde os níveis do fator B estão aninhados abaixo dos níveis do fator A.

[11]. Superfície resposta.

Este planejamento é indicado para fornecer mapas empíricos ou gráficos de contorno. Estes mapas ilustram a forma pela qual os fatores, que podem ser controlados pelo pesquisador, influenciam a variável resposta, na sua estrutura Os níveis dos fatores são vistos como pontos no espaço de fatores (muitas vezes multidimensional) no qual a resposta será registrada.

2.6 CONCLUSÃO

A prototipagem rápida é cada vez mais utilizada na confecção de geometrias mais complexas. Esta tecnologia permite a utilização de diferentes tipos de materiais em suas aplicações. A confecção de protótipos personalizados é uma realidade. Contudo, cada tipo de tecnologia utilizada para a confecção de modelos através da prototipagem rápida, pode gerar diferentes resultados dimensionais e visuais.

Este trabalho procurou mostrar diversos processos de prototipagem. A escolha do processo depende de fatores como resistência, acabamento, material, custo, tempo, etc. Também foi comentado sobre as áreas de atuação em que o processo de prototipagem rápida mais cedo ou mais tarde se fará necessário para um maior desenvolvimento, como exemplo, na área médica onde a tendência é

aumentar seu uso em função das novas tecnologias e materiais, na área de nanotecnologia onde já é possível fabricar peça com dimensões micrométricas.

Os primeiros equipamentos tinham um custo elevado, porém com o desenvolvimento de novas tecnologias estes custos foram reduzidos o que faz com que o acesso a essas tecnologias fique cada vez mais acessível, o que nos leva a crer que em muito pouco tempo esta tecnologia será utilizada em nossos lares assim com as impressoras que atualmente temos em nossas casas.

Uma área que tende a crescer é a de manutenção, pois, com o desenvolvimento de materiais e também com processos de prototipagem cada vez melhor, a certeza de que as peças confeccionadas por meio de prototipagem rápida terão resistência bem próxima ou igual às peças originais.

2.7 REFERÊNCIAS.

AHRENS, C.H ; FERREIRA, C.V. ; PETRUSVCH, G. ; MAIA, A.M. ; CARVALHO, J. ; SANTOS, R.L.S. ; SILVA, J.V.L. ; VOLPATO, N.-"Prototipagem no Brasil. Realidade e perspectivas", **Revista Cadware**, junho/2006.Disponível em <www.cadware.com.br>. Acesso em 18/05/2012.

ALCOFORADO, M. G. Design Interativo: **O Poder Comunicativo dos Protótipos. In: 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design**, SENAC, São Paulo, Anais Eletrônicos, 2008.

CHEN, L. C. Reverse engineering in the design of turbine blades – a case study in applying the MAMDP. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 16, p.161-167, 2000.

COLLINS; WOHLERS ASSOCIATES INC. vol. 1. **Desenvolvimento de Produto. Máquinas e Metais**. São Paulo, p.76-89, 1998.

ELSAYED, E. A.; CHEN, A. Optimal levels of process parameters for products with multiples characteristics. **International Journal Production Research**. v. 31, n. 5, 1993.

FOGIATTO, J.A. **O uso da prototipagem rápida na área médico-odontológica, Ortodontia Contemporânea**, 21/05/2011. Disponível em <www.ortodontiacontemporanea.com/>. Acessado em 15/03/2012.

INOVAÇÃO TECNOLOGICA. **Fábrica espacial fará peças usando canhão de elétrons, site Inovação Tecnológica**, 28/06/2011. Disponível em <www.inovacaotecnologica.com.br> Acessado em 12/02/2012.

INOVAÇÃO TECNOLOGICA. **Novo processo de prototipagem rápida, site Inovação Tecnológica**, 09/12/2003. Disponível em < www.inovacaotecnologica.com.br> Acessado em 13/03/2012.

KECHAGIAS, F. An experimental investigation of the surface roughness of parts produced by LOM process. **Rapid Prototyping Journal**, v.13, n. 1, p.17-22, 2007.

MAIA, I.A; NORITOMI, P.; SILVA, J.V.L.; PEREIRA, L.C.; OLIVEIRA M.; NARGI G. e ULBRICH, C.B.L. **Aplicações da Prototipagem Rápida na construção de implantes femorais personalizados**, IV Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, Caxambu-MG, 2006.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

OLIVEIRA, M.F; MAIA, I.A; NORITOMI, P.Y; NARGI, G.C; SILVA, J.V.L; FERREIRA, B.M.P; DUEK, Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida, **Revista Matéria**, vol.12, n.2 , pp. 373- 382, 2007.

PALM, W. Rapid prototyping primer: the learning factory. Disponível em <www.rapidprototypinghomepage.com/> Acessado em 12/05/2012.

PROJETO MOBILIZADOR RNPR, (2000), Prototipagem Rápida na indústria cerâmica, **Tecnometal**, N.º 129, pp. 5-17, julho/agosto 2000.

RNPR, REDE NACIONAL DE PROTIPAGEM RÁPIDA DE PORTUGAL. Comparação de Sistemas e Processos de RP e SRP. Projeto de Implantação da Rede, Ano 13 , N.º 45, pp. 28-33, Setembro, 2000.

SOUZA, A. F.; ULBRICH C.B.L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 336p. 2009.

TAMINGER, K. **Aparelho semelhante ao replicador de Star Trek é desenvolvido pela NASA**, 11/11/2009. Disponível em <www.hypescience.com>. Acessado em 25/10/2011.

VOLPATO N., **Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 244 p. 2007.

WHOLERS, T. – Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing, State of the Industry, **Annual Worldwide Progress Report**, Wohlers Associates, Colorado, 2003.

WOHLERS, T. Rapid Prototyping & Tooling, **Annual Worldwide Progress Report**, Wohlers Associates, Colorado, USA, 1998.

3 ARTIGO 2

Modelo conceitual para aplicação do delineamento de experimentos no processo de prototipagem rápida

Conceptual model for implementation of design of experiments in the process of rapid prototyping

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ (PUC-PR)

Previsão de envio ao Rapid Prototyping Journal (ISSN 1355-2536).

MODELO CONCEITUAL PARA APLICAÇÃO DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

CONCEPTUAL MODEL FOR IMPLEMENTATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS IN THE RAPID PROTOTYPING PROCESSES

Luis Carlos Machado[1]
Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna[2]

[1]Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas
[2]Prof. Dr. em Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PPGEPS/ PUCPR
e-mail.: luis.machado@senai.pr.gov.br; angelo.santanna@pucpr.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo apresentar um modelo conceitual de aplicação da técnica de Delineamento de Experimentos no processo de prototipagem rápida. Para alcançar este objetivo foi inicialmente desenvolvido um fluxograma, onde o primeiro passo foi definir o produto depois definir o processo de prototipagem rápida adequado, através dos itens a serem observados na sequência. Posteriormente, aplicar o experimento fatorial através das definições: do problema encontrado, das variáveis resposta, dos fatores e níveis de controle, do modelo de delineamento a ser aplicado que pode ser auxiliado por uma tabela desenvolvida neste artigo, efetuar a análise dos dados e as conclusões.

Palavras-chave: Prototipagem rápida; planejamento de experimentos, fluxograma.

Abstract

This paper aims to present a conceptual model for the application of the technique of Design of Experiments in the process of rapid prototyping. To achieve this goal was initially developed a flowchart, where the first step was to define the product then define the process of rapid prototyping appropriate, through the items to be observed in the sequence. Subsequently, applying the factorial experiment using the settings: the problem encountered variable response factors and levels of control template design to be applied can be aided by a table developed in this article, perform the data analysis and conclusions.

Keywords: Rapid prototyping, design of experiments, flowchart.

3.1 INTRODUÇÃO

O nível de competição no desenvolvimento de novos produtos se intensificou muito nos últimos anos e com a globalização isto ficou mais evidente. Tornou-se necessário o novo produto chegar ao mercado o mais cedo possível para que se possa alcançar vantagem competitiva.

Assim, a prototipagem rápida (RP) está se tornando uma tecnologia chave, para que produto seja desenvolvido em tempos menores, pois o ciclo de vida de um produto esta cada vez menor, com isso a necessidade do desenvolvimento de protótipos físicos, ferramentas e modelos o mais rápido possível. Porém o desenvolvimento de novos produtos através do processo de prototipagem rápida necessita de uma ferramenta de controle para se definir parâmetros de qualidade, e uma técnica para avaliar se o nível de qualidade é satisfatório, pode ser com a utilização das ferramentas estatísticas, através dos planejamentos experimentais.

Nos dias atuais, são realizados experimentos em praticamente todas as áreas de conhecimento, sendo esses experimentos universais e tendo aplicação em diferentes áreas, como: Agronomia, Medicina, Engenharia, Psicologia, entre outras.

Uma das formas de alcançar as características de competitividade, qualidade ou fatores críticos e também atender as necessidade e expectativas dos clientes é utilizando as técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos (*Design of Experiments*, DOE) na análise do desenvolvimento de produtos e processos de fabricação. Esta técnica utiliza o método de ANOVA (*Analysis of Variance*) como ferramenta primária para análise estatística do projeto experimental, (MONTGOMERY, 1991).

3.2 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO

A elaboração do modelo conceitual integrando os conceitos de tecnologias de prototipagem rápida e de delineamento de experimentos foi fundamentada nos estudos da literatura e experiência prática. A fig.15 apresenta o modelo conceitual para aplicação em processos de prototipagem rápida utilizando o delineamento de experimentos.

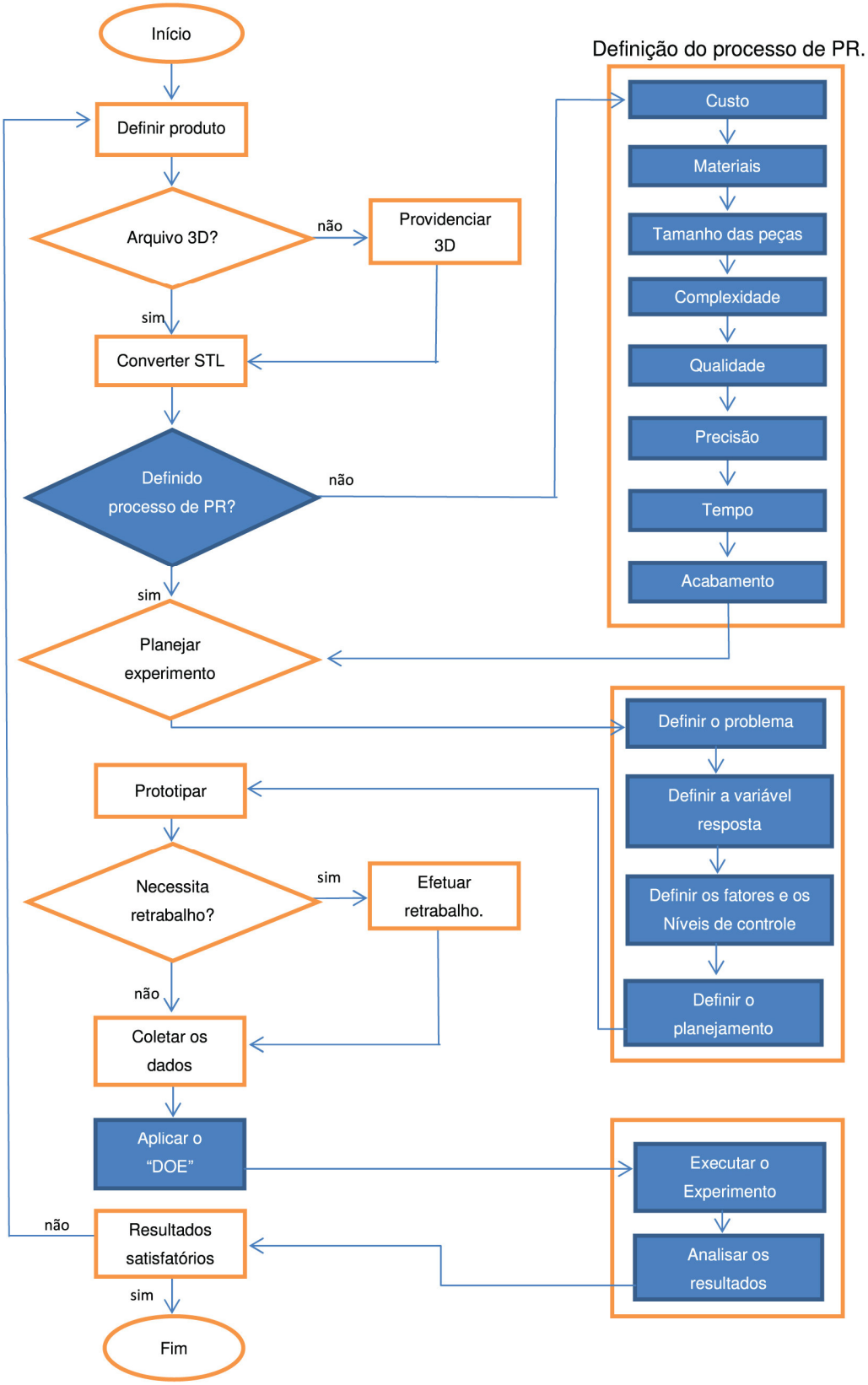


Fig. 15- Fluxograma para aplicação do processo de prototipagem rápida.

3.2.1 Definição do produto.

A definição do produto é a primeira etapa no processo de prototipagem rápida, porém esta definição depende de vários fatores. Uma vez que tenha sido identificada uma oportunidade de desenvolvimento de produto, é necessário partir para uma definição mais detalhada das necessidades do cliente e das suas expectativas em relação ao produto.

As necessidades dos clientes, desejos ou demandas, são colocadas de forma mais qualitativa do que quantitativa e expressam o que as diversas partes interessadas no produto esperam do mesmo. Nesta lista, não podem deixar de serem considerados aspectos econômicos, ambientais, ergonômicos, de segurança, de estética e de durabilidade. Obter uma lista de especificações do produto, isto é, requisitos técnicos a serem atendidos pelo produto, que são obtidos a partir da tradução das necessidades dos clientes em linguagem técnica e, também, de normas e outras restrições (inclusive de fabricação) que devem ser atendidas pelo produto. As especificações servirão não somente para orientar o desenvolvimento do produto, mas, para fornecer valores de referência para os testes a serem realizados no protótipo do produto.

Ao lado da definição funcional do produto, é muito importante definir questões relacionadas ao estilo e significado do produto para os clientes (BARBOSA, 2001). É necessário manter uma identidade visual já consagrada em versões anteriores do produto, de modo que o novo produto seja facilmente reconhecido? Similarmente, é necessário manter uma identidade de marca? Existe um padrão de estilo para a categoria de produto que se deseja manter, ou, pelo contrário, questionar com a nova proposta? Que mensagens o produto deve passar para o cliente (estabilidade, segurança, arrojo, aventura)?

Para a segunda etapa, depois de observados todos os detalhes se faz necessário que o produto esteja em um modelo de arquivo 3D.

3.3 ETAPAS DE DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

3.3.1 Custo do processo.

O custo é o item que mais impacta na escolha do processo de prototipagem rápida, porém, não é o único, itens tais como: geometria do produto, precisão dimensional, materiais disponíveis, tamanho das peças, facilidade na operação do equipamento, acabamento superficial e tempo do processo, são conseguidos através do modelo do equipamento de prototipagem rápida, que na atualidade é muito diversificada, assim como, sua variedade de preço que pode ser de R$ 4000,00 até valores maiores de R$ 500.000,00, por esse motivo têm-se a necessidade de avaliar bem qual é a finalidade do protótipo, pois, o custo do equipamento esta, diretamente ligado à qualidade desses itens.

O fator manutenção do equipamento tem influência considerável da variável custo na confecção de protótipos, principalmente em virtude dos contratos de manutenção oferecidos pelas empresas que tem exclusividade destes serviços.

Pode utilizar como exemplo, a confecção do protótipo de um produto onde será analisado somente seu aspecto estético e ergonômico, onde precisão e acabamento superficial não tem influência, neste caso, pode-se utilizar o equipamento com menor valor o que irá diminuir o custo do processo. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre custos dos processos de Prototipagem Rápida.

Tabela 2. Comparação de custos do processo de Prototipagem Rápida.

PROCESSOS	CUSTO
Estereolitografia	Alto custo da matéria prima e equipamento
FDM	Alto custo do equipamento
LOM	Baixo custo da matéria prima.
SLS	Alto custo da matéria prima
Impressão Jato de Tinta	Baixo custo do equipamento
LENS	Alto custo do equipamento
EBF3	Alto custo do equipamento
SIS	Baixo custo
Impressão 3D por Injeção	Baixo custo do processo
SRP	Baixo custo

3.3.2 Materiais disponíveis.

A escolha do material depende especificamente de qual será a aplicação do protótipo, os primeiros processos desenvolvidos utilizavam materiais com propriedades mecânicas relativamente baixas, como papéis e resinas, o que fazia com que as peças desenvolvidas fossem utilizadas apenas para fins estéticos e ergonômicos, porém, nos processos mais recentes temos uma grande variedade de materiais, que nos fornecem propriedades mecânicas elevadas que, em alguns casos podemos utilizar como produtos finais e prontos para serem utilizados.

Os processos atuais utilizam como materiais para o processo de prototipagem rápida uma grande variedade de polímeros, metais e também os biomateriais para construção de Scaffolds (Estruturas porosas) na área da Engenharia Tecidual.

A Tabela 3 apresenta os processos de Prototipagem Rápida, os materiais e a comparação de propriedades mecânicas.

Tabela 3. Materiais usados nos processos de Prototipagem Rápida.

PROCESSOS	MATERIAIS	PROPRIEDADES MECÂNICAS
Estereolitografia	Resina Liquida	Baixa
FDM	ABS, Elastômeros	Boa
LOM	Papel adesivo, plástico e metal.	Baixa
SLS	Poliamida, cerâmica e metal.	Alta
Impressão Jato de Tinta	Pó cerâmico ou polimérico	Boa
LENS	Ligas de Titânio e aço	Boa
EBF3	Pó metálico, alumínio e Titânio.	Boa
SIS	Polímeros e metais	Boa
Impressão 3D por Injeção	ABS, resina Epoxi.	Média
SRP	Polímeros, metais, resinas.	Boa

3.3.3 Tamanho das peças.

Uma das limitações dos processos iniciais de prototipagem rápida era exatamente seu tamanho, o que com o desenvolvimento de novos processos e novas técnicas acabou variando muito, na atualidade temos equipamentos com a capacidade de desenvolvimento de protótipos do tamanho de uma casa, mas também peças muito pequenas utilizadas na área da nanotecnologia, o que nos dá uma margem muito interessante para a escolha do processo com relação ao tamanho das peças.

3.3.4 Complexidade.

Um dos grandes problemas na execução de um novo produto é definir o processo de produção que seja capaz de executar geometrias complexas, com rapidez, qualidade e precisão requerida, pois, apesar dos processos de usinagem terem evoluído muito, há geometrias que são impossíveis de se conseguir com processos tradicionais, o que faz com que os processos de Prototipagem Rápida sejam mais adequados para executar estas tarefas, além disso, há processos que confeccionam conjuntos montados, onde, pode se fazer determinados testes de movimento e funcionalidade dos produtos, ganhando tempo e com certeza diminuindo custos com o desenvolvimento dos produtos.

3.3.5 Qualidade.

O termo qualidade é utilizado numa infinidade de situações, como por exemplo: Qualidade de vida, qualidade do ensino, qualidade de um atendimento, etc. Em função dessas situações, a ASQ (*American Society for Quality* – Sociedade Americana de Qualidade), definiu o seguinte conceito de Qualidade: “Um termo subjetivo, para o qual cada pessoa, ou setor, tem a sua própria definição”.

Em sua utilização técnica, a qualidade pode ter dois significados: (i) As características de um produto ou serviço, que dão suporte (ou sustentação), à sua habilidade em satisfazer requisitos especificados ou necessidades implícitas; e (ii) Um produto ou serviço livre de deficiências.

Através desses conceitos foi possível desenvolver uma análise que pode nos auxiliar na escolha do processo de prototipagem rápida mais adequado com relação à qualidade que é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Qualidade dos processos de Prototipagem Rápida.

PROCESSOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Estereolitografia	Melhor processo em termos de acabamento, boa precisão.	Baixa resistência mecânica.
FDM	Grande precisão, permite a utilização de dois materiais simultâneos.	Processo lento, alto custo do equipamento.
LOM	Boa precisão eixo x, y, ótimo para peças grandes.	Instabilidade do papel, baixa precisão em z.
SLS	Resistência mecânica e térmica elevada, grande variedade de materiais.	Superfícies rugosas, baixa precisão dimensional.
Impressão Jato de Tinta (Pó)	Peças com qualquer geometria, grande variedade de materiais.	Difícil remover o pó não ligado.
LENS	Construção de peças metálicas, boas propriedades mecânicas.	Custo do equipamento elevado, necessidade de retrabalho.
EBF3	Mistura dois materiais, usa menos eletricidade que meios convencionais.	Exigência de materiais compatíveis com feixe de elétrons.
SIS	Elevada gama de materiais, processo relativamente barato segundo seu criador.	Processo relativamente novo.
Impressão 3D por Injeção	Alta precisão, alto grau de acabamento, construção de conjuntos montados.	Limitação de materiais, resistência mecânica média.
SRP	Alta precisão, baixo tempo, variedade de materiais.	Limitação geométrica, limitação de uma peça por operação.

3.3.6 Precisão.

A precisão dimensional é o valor numérico obtido através das medições feitas no produto acabado, ela é definida através da unidade de medida aplicada que é conseguida pela precisão do instrumento usado para efetuar estas medidas, esta precisão é definida pelo cliente ou através NBR ISO 2768-1 que trata das tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Precisão dos processos de Prototipagem rápida.

PROCESSOS	PRECISÂO
Estereolitografia	Boa
FDM	Alta
LOM	Boa
SLS	Baixa
Impressão Jato de Tinta	Baixa
LENS	Baixa
EBF3	Boa
SIS	Baixa
Impressão 3D por Injeção	Alta
SRP	Alta

3.3.7 Tempo.

O tempo é definido normalmente em relação ao volume da peça e pelo *software* do equipamento, apesar do nome Prototipagem Rápida a confecção do produto pelo processo de Prototipagem Rápida pode levar algumas horas, porém já existem equipamentos que conseguem construir produtos em questão de segundos. A Tabela 6 apresenta a comparação de alguns processos de prototipagem rápida em relação a variável tempo.

Tabela 6. Comparação do tempo dos processos de Prototipagem Rápida.

PROCESSOS	TEMPO
Estereolitografia	Alto
FDM	Alto
LOM	Médio
SLS	Médio
Impressão Jato de Tinta	Médio
LENS	Alto
EBF3	Médio
SIS	Baixo
Impressão 3D por Injeção	Médio
SRP	Baixo

3.3.8 Acabamento.

É o tratamento final executado em uma superfície para que ela fique com o aspecto desejado, que são medidos através da rugosidade superficial. No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 6405-1985. A Tabela 7 ilustra a comparação da rugosidade entre processos.

Tabela 7. Comparação da rugosidade entre processos de Prototipagem Rápida.

PROCESSOS	RUGOSIDADE
Estereolitografia	Ótima
FDM	Boa
LOM	Regular
SLS	Regular
Impressão Jato de Tinta	Boa
LENS	Regular
EBF3	Boa
SIS	Boa
Impressão 3D por Injeção	Ótima
SRP	Ótima

3.4 ETAPAS DE DEFINIÇÃO DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS.

3.4.1 Definição do problema.

Na prática, geralmente é difícil perceber que existe um problema que exige experimentos planejados formais, de modo que pode ser difícil obter-se um relato do problema claro, preciso e aceito por todos. No entanto é absolutamente essencial desenvolver completamente todas as ideias sobre o problema e sobre os objetivos específicos do experimento. Usualmente é importante solicitar informações de todas as partes envolvidas com engenharia, qualidade, marketing, cliente, gerência e operadores (que em geral, têm muito discernimento que costuma ser ignorado). Uma definição clara do problema e dos objetivos do experimento costuma contribuir substancialmente para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema.

Esta é a fase onde a voz do cliente tem uma fundamental importância com relação a suas necessidades, qual o problema com o produto quais processos de produção estão disponíveis, quais os níveis de qualidade e principalmente qual o resultado que o cliente espera do experimento.

3.4.2 Definição da variável resposta.

São as variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis resposta que são importantes de se avaliar, (OLIVEIRA, 1999; WERKEMA e AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991; JURAN, 1951).

A partir desta fase se faz necessária a atuação de especialistas, pois a importância do domínio dos problemas por todas as pessoas envolvidas é primordial, e também durante os experimentos, o processo deve ser cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com planejamento, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão o experimento. (WERKEMA e AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991; COLEMAN e MONTGOMERY, 1993). Também é nesta fase que são definidas as características das variáveis resposta que podem ser do tipo: nominal-é-melhor, maior-é-melhor ou menor-é-melhor.

3.4.3 Definição dos fatores e os níveis de controle.

Fatores de controle são alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal é introduzir estímulos nos fatores e avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso determinar os principais fatores do processo. Os fatores podem se dividir em qualitativos e quantitativos, e podem ser representados por números ou letras.

Níveis de controle são condições de operação dos fatores de controle investigado nos experimentos, os níveis podem ser identificados por nível baixo e nível alto, (OLIVEIRA, 1999). O condutor do experimento deve escolher os fatores que sofrerão variação, os intervalos e os níveis específicos nos quais cada rodada será feita. Exige-se conhecimento do processo para fazer isso. Esse conhecimento é em geral, uma combinação de experiência prática e conhecimento teórico.

É importante investigar todos os fatores que possam ser importantes e evitar ser excessivamente influenciado pela experiência passada, particularmente nos estágios inicias do experimento ou quando o processo não está ainda muito amadurecido. Quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é em geral, melhor manter baixo o número de níveis de fatores, em geral, são usados dois níveis, (COLEMAN; MONTGOMERY, 1993).

3.4.4 Definição do planejamento experimental.

O ideal é dar preferência aos planejamentos em andamento, caso não exista, se as etapas anteriores forem seguidas corretamente esta etapa será relativamente simples de realizar. Ao selecionar ou construir um planejamento experimental, devem ser considerados o números de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo, também nessa fase são definidas as sequencias de corridas, o número de réplicas, as restrições do experimento e as possíveis iterações que possam ocorrer entre os fatores que estão sendo avaliados (MONTGOMERY, 1991). A Tabela 8 apresenta a descrição dos tipos de desenho experimental para auxiliar na escolha adequada.

Tabela 8. Aplicação de Desenho Experimental.

DESENHO EXPERIMENTAL	APLICAÇÃO
Completamente Aleatorizado	Quando somente um fator experimental está sendo estudado
Fatorial	Quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e as interações entre os fatores podem ser importantes
Fatorial 2k em blocos	Quando o número de ensaios necessários para o planejamento em k fatores em 2 níveis é muito grande.
Fatorial 2k fracionário	Quando existem muitos fatores (k muito grande) e não é possível coletar observações em todos os tratamentos
Blocos aleatorizados	Quando o efeito de um fator está sendo estudado e é necessário controlar a variabilidade provocada por fatores perturbadores conhecidos.
Blocos Incompletos Balanceados	Quando todos os tratamentos não podem ser acomodados em um bloco
Blocos Incompletos Parcialmente Balanceados	Quando um planejamento em blocos incompletos balanceados necessita de um número de blocos excessivamente grandes.
Quadrados Latinos	Quando um fator de interesse está sendo estudado e os resultados podem ser afetados por duas outras variáveis experimentais ou por duas fontes de heterogeneidade.
Quadrados de Youden	Similares aos quadrados latinos, mas o número de linhas, colunas e tratamentos não precisam ser iguais.
Hierárquico	Experimentos com vários fatores em que os níveis de um fator (B) são similares mas não idênticos para diferentes níveis de outro fator (A).
Superfície de resposta	Consiste em fornecer mapas empíricos ou gráficos de contorno. Estes mapas ilustram a forma pela qual os fatores, que podem ser controlados pelo pesquisador, influenciam a variável resposta.

3.4.5 Execução do experimento.

Nesta fase é de suma importância o acompanhamento da equipe ou por um responsável, para assegurar que os procedimentos sejam executados conforme o planejado. Qualquer mudança no momento em que o experimento é realizado deve ser registrada, e os relatórios tem que ser apresentados no final do experimento (HOPPEN, 1996). A pesquisa experimental é um iterativo, ou seja, as informações reunidas da primeira rodada de testes são utilizadas como dados de entrada da segunda e por isso, cuidados devem ser tomados para não esgotar todos os recursos na primeira rodada de experimentos (MONTGOMERY, 1991).

3.4.6 Análise dos resultados.

Nesta fase podem ser utilizados *softwares* estatísticos, que ajudam a aplicar as técnicas de planejamento para análises dos experimentos, os gráficos lineares e os gráficos de probabilidade normal, (WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991).

Fazer a análise com o uso de métodos estatísticos, para que as conclusões estabelecidas sejam objetivas. Obviamente que esses métodos não permitem afirmar se uma dada variável apresenta ou não um determinado efeito: apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com o nível de qualidade estabelecido.

Ao finalizar a análise dos resultados, os responsáveis devem retirar as conclusões práticas dos resultados e definir as ações de melhoria do processo de fabricação. Os gráficos são muito usados nesta fase por apresentarem uma forma bastante evidente de apresentar os resultados, o que facilita sua análise.

3.5 CONCLUSÃO.

Neste trabalho procurou-se desenvolver um método de para inserir o Delineamento de Experimentos no processo de prototipagem rápida, o qual foi apresentado de forma resumida através de um fluxograma no início deste trabalho, um dos problemas encontrados foi à escolha do processo de Prototipagem Rápida adequado, pois, temos um grande número de processos e, para tentar solucionar este problema foram apresentadas características que auxiliassem parcialmente nesta escolha.

Para aplicação do Delineamento de Experimentos (DOE) foi utilizada uma sequência, que foi conseguida através da revisão bibliográfica, onde cada item foi desenvolvido de forma clara e objetiva para que tenhamos resultados satisfatórios e que os objetivos sejam alcançados.

3.6 REFERÊNCIAS.

ASQ - **American Society for Quality** - Sociedade Americana para a Qualidade.

BARBOSA, A. L. S.; SORESINI, A. L. G.; CHUDEK, C. A. S.; BRANDALISE, R. **Bengala para deficientes visuais. Trabalho da Disciplina Metodologia do Projeto**. Curso de Engenharia Industrial Mecânica da UTFPR. Curitiba: CEFET-PR, 2001.

CANCIGLIERI, O; SEELHORST, A; IAROZINSKI, A. **Processo de prototipagem rápida por deposição ou por remoção de material na concepção de novos produtos-uma abordagem comparativa**, XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007.

CHIABRA, M. Obtaining desired surface roughness of castings produced using ZCast direct metal casting process through Taguchi's experimental approach. **Rapid Prototyping Journal**, p.458–471, 06/2012.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v.35, n.1, 1993.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 6 ed., John Wiley & Sons, 2005.

NORMAS ABNT NBR 6405-1985. **Rugosidade Superficial**.

NORMAS ABNT NBR ISO 2768-1. **Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F., A. (2006). **Gestão de Desenvolvimento de Produtos - Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo, Saraiva, 2006.

SONG, Y.; PARK, S; CHAE, S. 3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n.45 p.1063–1069, 2005.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 294 p., 1996.

ZIEMIAN, C., W.; CRAWN, P. M. Computer aided decision support for fused deposition modeling, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 7. Number 3.p. 138-147, 2001.

4 ARTIGO 3

Aplicação do modelo conceitual no processo de prototipagem rápida de impressão 3D por injeção

Application of conceptual model in the process of rapid prototyping 3d printing for injection

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ (PUC-PR)

Previsão de envio ao Rapid Prototyping Journal (ISSN 1355-2536).

APLICAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL NO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE IMPRESSÃO 3D POR INJEÇÃO

APPLICATION OF CONCEPTUAL MODEL IN THE PROCESS OF RAPID PROTOTYPING 3D PRINTING FOR INJECTION

Luis Carlos Machado[1]
Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna[2]

[1]Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas
[2]Prof. Dr. em Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PPGEPS/ PUCPR
e-mail.: luis.machado@senai.pr.gov.br; angelo.santanna@pucpr.br

Resumo

A necessidade de desenvolver novos produtos em tempos cada vez menores, fez com que criassem métodos e processos de produção que proporcionem estas condições, neste rumo, o desenvolvimento dos processos de prototipagem rápida esta numa crescente, tanto no desenvolvimento dos processos já existentes, mas principalmente no desenvolvimento de novos processos que os tornam mais rápidos e mais baratos. O objetivo do artigo é fazer a análise do processo de prototipagem rápida aplicando o modelo conceitual, que auxilia na escolha do processo de prototipagem rápida e também na aplicação do Delineamento de Experimentos. O resultado obtido foi através da confecção de um produto no processo de prototipagem rápida de impressão 3D por injeção, e a partir da definição das variáveis, foram coletados os dados e, posteriormente analisados, através da técnica de Delineamento de Experimentos aplicados no software Minitab.

Palavras-chave: Prototipagem rápida, delineamento de experimentos, fatorial.

Abstract

The need to develop new products in time dwindling, led them to create methods and production processes that provide these conditions, in turn, the development of rapid prototyping processes in this growing, both in the development of existing processes, but mostly the development of new processes that make them faster and cheaper. The aim of the paper is to make the analysis of the process of applying rapid prototyping approach, which assists in choosing the rapid prototyping process and in the application of Design of Experiments. The result was obtained through the making of a product in the process of rapid prototyping 3D printing by injection, and from the definition of variables, data were collected and subsequently analyzed by the technique applied in the Design of Experiments Minitab software.

Keywords: Rapid Prototyping, randomized, factorial design.

4.1 INTRODUÇÃO

Na economia globalizada, a inovação é um componente vital para o sucesso do negócio. Criou-se em todos os setores industriais a necessidade crescente de resposta rápida às solicitações do mercado. A necessidade das empresas aumentarem sistematicamente o poder de competição para manterem-se ou superarem no mercado a concorrência. Além de todos estes desafios, a vida dos produtos no mercado está ficando cada vez mais curta.

Novas tecnologias, como CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Machine*) já reduzem o tempo de desenvolvimento e lançamento de novos produtos. A elas agrega-se a RP (Prototipagem Rápida ou Rapid Prototyping), que permite a confecção de modelos tridimensionais sólidos, a partir de arquivos CAD, estima-se que existam mais de 30 processos de prototipagem rápida por adesão.

A prototipagem rápida vem contribuindo significativamente nesse cenário, quanto a materiais, técnicas e processos. Um fabricante, que não seja capaz de se mover rapidamente no mundo dos negócios e atualizar-se tecnicamente, ficaria, seriamente comprometido. As estatísticas sobre o sucesso dos negócios mostram claramente a participação crescente dos novos produtos, com isso a prototipagem rápida se coloca como um agente facilitador no desenvolvimento de novos produtos, graças a sua integração com o CAD (*Computer Aided Design*), assim torna-se um elemento que agiliza o desenvolvimento do produto, reduzindo o tempo na obtenção de modelos ou protótipos nas fases de projeto conceitual, testes e atividades pré-produção.

As técnicas de impressão 3D estão iniciando uma espécie de "Quarta Revolução Industrial". Essa técnica, que começou como um método de prototipagem rápida, e que agora já é chamada de fabricação aditiva, a qual permite a fabricação de peças de grande porte tais como: aviões de pequeno porte, vasos sanguíneos artificiais, e atualmente esta entrando na era da nanotecnologia.

A pesquisa científica é um processo de aprendizagem contínua, em que os métodos estatísticos podem torná-la tão eficiente quanto possível. O seu emprego permite a identificação das principais causas do processo sobre as quais se deve atuar, no sentido de otimizar o alcance de uma meta proposta. As causas mais prováveis (hipóteses) podem ser identificadas e testadas num tempo e custo mínimos e, ao mesmo tempo, com a manutenção de um nível de confiança pré-

estabelecido para as conclusões, por meio da realização de experimentos estatisticamente planejados. A metodologia de planejamento de experimentos é fundamental no projeto de um novo processo, no estudo e determinação de condições operacionais, e no melhoramento contínuo da qualidade de um produto ou processo.

O planejamento experimental é essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em atividade. Um planejamento bem elaborado permite-nos, além do aprimoramento de processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução de tempos de análise e dos custos envolvidos em projetos, usa-se, para selecionar parâmetros que tornem o projeto robusto, avaliar materiais alternativos e fixar os parâmetros-chave do projeto, ou seja, os parâmetros que impactam no desempenho do produto (CALEGARE, 2001).

O planejamento experimental é utilizado para ajustar e fixar os fatores controláveis para que se obtenham respostas dentro dos valores que, normalmente, sejam os valores nominais especificados em projeto (CALEGARE, 2001). Uma das formas de alcançar as características de competividade ou fatores críticos e, atender as necessidades e expectativas dos consumidores é com a utilização da técnica de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de produtos ou nos processos de fabricação.

Os conceitos de DOE são utilizados pelas empresas que buscam a melhoria da qualidade dos produtos de forma contínua e estão efetivamente comprometidas em assegurar a satisfação de seus clientes, de maneira pró ativa. O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas de mudança nas respostas ou variáveis de saída (CALEGARE, 2001).

4.2 PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE IMPRESSÃO 3D POR INJEÇÃO.

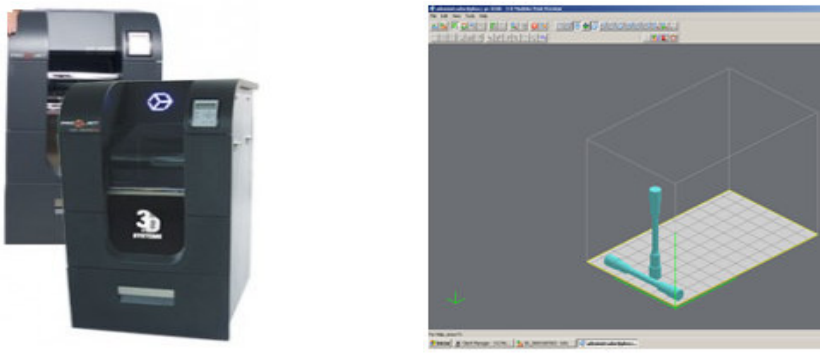
Quando pensamos em imprimir logo visualizamos uma folha de papel, o que é natural, porém temos no mercado equipamentos que imprimem objetos em 3D, então já podemos construir objetos físicos com qualquer geometria em tamanho real apenas através de desenho feitos em softwares CAD.

Este equipamento não é novidade para grandes indústrias, que já utilizam este processo a alguns anos que é conhecido como prototipagem rápida. Quando surgiram estes equipamentos seu custo era muito elevado, porém com o desenvolvimento de novos processos tornou-se viável, acredita-se que em pouco tempo este equipamento estará presente em nossos lares.

O conceito de impressão 3D é a produção de um produto físico acabado. O processo de prototipagem rápida por injeção é um processo relativamente novo, ele usa uma variação de cartuchos de resinas ou Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com suporte em estado líquido que são injetados através dos cabeçotes e tratados (curados) em camadas pela ação de uma lâmpada ultravioleta (UV). Estas camadas são depositadas em uma plataforma que se desloca no plano xy, a espessura das camadas é dada através do eixo z que vai depositando material a partir da base da plataforma. Como à necessidade de usar material suporte para construção de peças tem-se a possibilidade de confeccionar conjuntos montados funcionais, como rolamentos de esferas, sistemas de movimentação com engrenagens, e também tem grande precisão geométrica e de acabamento superficial.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.

Esta seção consiste em realizar a análise do produto confeccionado pela impressora 3D Project 3000 Professional 3D Printer da empresa 3D Systems (figs.16(a) e (b)) apresenta o resultado da conversão do arquivo CAD (*Computer Aided Design*) para o STL (*Standard Template Library*) na tela do *software* da impressora 3D, para esta análise será observado os seguintes parâmetros: espessura da camada de deposição, velocidade dessa deposição e também a posição de impressão do produto.



(a) (b)

Figura 15. Impressora 3D (a) e *Software* da impressora 3D (b).

Para o experimento foi desenvolvido um corpo de prova cilíndrico conforme a norma da ABNT, e o modelamento foi desenvolvido através do *software* CAD Catia V5, conforme fig.17.

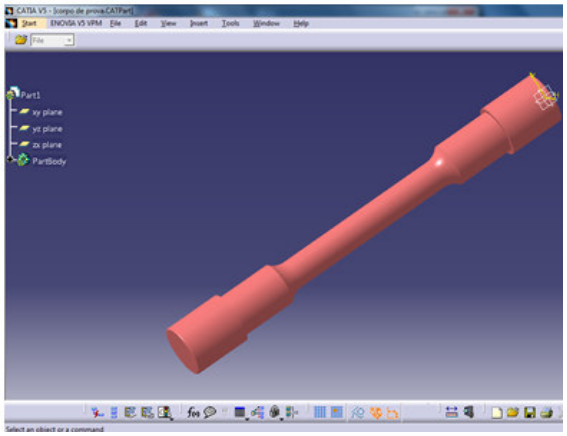
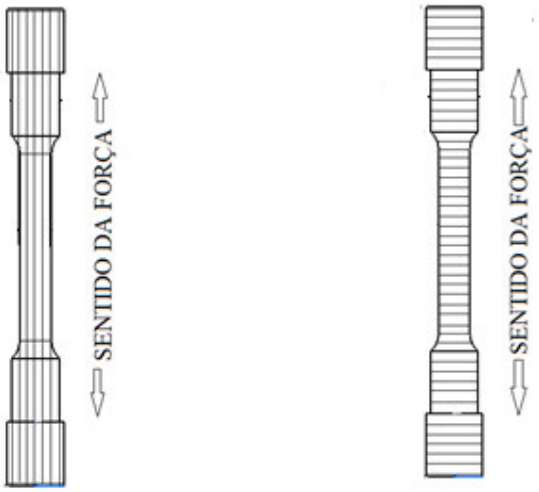


Figura 16. Resultado do modelamento.
Fonte: o autor.

4.3.1 Etapas de implementação do Modelo Conceitual no processo de impressão 3D por injeção.

Para iniciar o processo de impressão 3D, a necessidade do modelo CAD ser convertido em arquivo STL, logo após este arquivo é aberto no software da impressora, para eventuais configurações. A quantidade e a posição das peças são definidas pelo operador do equipamento. Para o experimento foi utilizado como material a resina epóxi, fornecido pela empresa 3D SYSTEMS através de cartuchos de ½ quilo com chip interno.

O experimento consiste em confeccionar corpos de prova variando: a espessura da camada de deposição, que pode ser de 32 *µm* e 64 *µm*; a velocidade de deposição que é definida através da quantidade de gotas injetadas por segundo, que pode ser de 300 u/seg. e 150 u/seg.; e a inclinação da peça, que pode ser de 0° e 90° em relação à deposição das camadas conforme ilustram as figs.18(a) e (b).



(a) **Deposição das camadas (0°)** (b) **Deposição das camadas (90°)**

Figura 17. Posição das camadas em relação ao sentido de aplicação da força.
Fonte: o autor.

4.3.1.1 O tempo do processo.

Neste processo a impressora possui um software que fornece todas as configurações necessárias para a confecção do protótipo, fornecendo também, o tempo de duração do processo, a quantidade de material da peça e do suporte assim como a melhor disposição das peças na plataforma de impressão.

4.3.1.2 O custo do protótipo.

Definido pela soma dos custos (R$): do material da peça, o material do suporte, e da energia elétrica.

4.3.1.3 A resistência à tração.

Que é avaliada pela carga aplicada por unidade de área no momento da ruptura. Para medir a resistência à tração dos corpos de prova foi utilizada uma

máquina de medição de tração EMIC (ver na Fig.19). Os resultados da medição de resistência à tração estão ilustrados na fig.20, que demonstra a mudança da fase elástica para a plástica onde atinge o limite máximo de escoamento, e, neste caso a força máxima aplicada foi de 203,17 kg/f, e apresenta também o valor da tensão a ruptura que é definida pela força aplicada, dividindo esta pela área, onde obtemos o valor de 2,58 kg/mm². Observa-se no gráfico que a curva forma uma parábola antes do rompimento do material, indicando que, quando a força máxima é atingida o material se alonga até o rompimento total. Neste caso a camada de deposição esta paralela em relação à força aplicada.

Figura 18. Ensaio do corpo de prova na máquina de medir tração EMIC DL 10000.
Fonte: o autor.

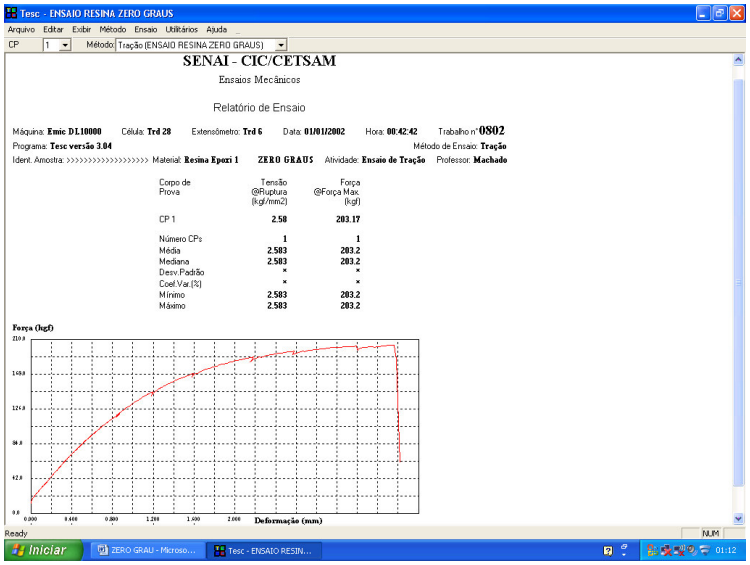


Figura 19. Gráfico do comportamento do corpo de prova a 0°.

A fig.21 apresenta a posição das camadas perpendiculares em relação à força aplicada, a força máxima mostrada é de 179,77 kg/f e, na sua mudança de fase elástica para plástica isto é seu limite de escoamento, é muito baixo, pois no momento em que se atinge esta força o material rompe-se, o que é facilmente percebido no gráfico através de sua curva, e com isso o valor de tensão á ruptura é desprezível.

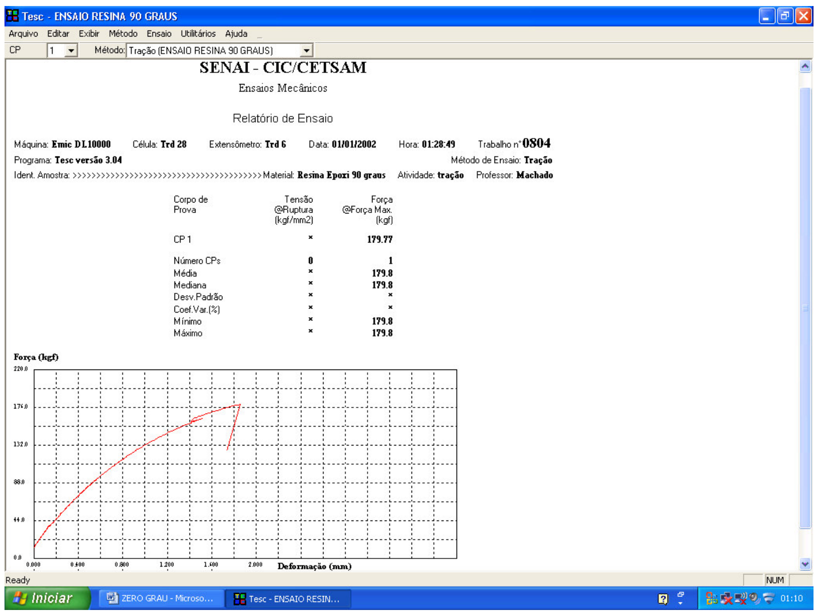


Figura 20. Gráfico do comportamento do corpo de prova a 90°.

4.3.1.4 A Rugosidade.

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície, a função e estética e também funcional (ver fig.22).

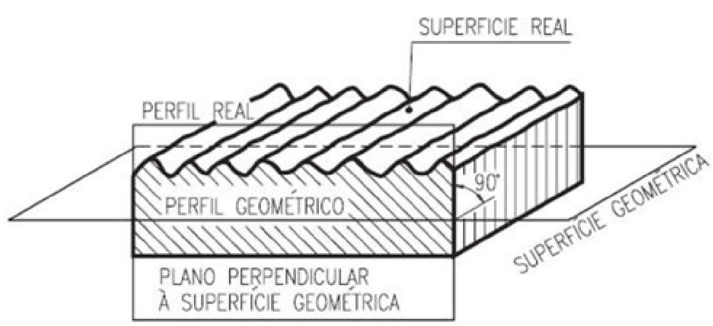


Figura 21. Representação da rugosidade da superfície.

Conceitos básicos da rugosidade conforme norma ABNT NBR ISO 4287:2002, esta norma especifica termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) pelo método do levantamento do perfil.

Superfície geométrica (perfeita), superfície real, superfície efetiva (medida), perfil geométrico, perfil real, perfil efetivo (com ondulações), perfil de rugosidade (sem ondulações) e ondulações (processo).

O parâmetro de rugosidade utilizado foi o Ra, que indica a Rugosidade média (*Roughness average*). Este é o parâmetro mais utilizado no setor industrial. A fig. 23 ilustra a média aritmética alterada por picos ou vales atípicos.

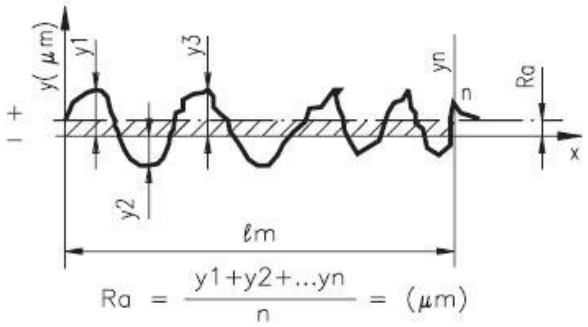


Figura 22. Esquema gráfico da medição de rugosidade em Ra.

A fig.24 apresenta a representação esquemática do funcionamento de um rugosímetro. A sapata presente no rugosímetro serve para acompanhar as ondulações da superfície e assim minimizar o atrito da agulha de leitura com a superfície. Para fazer as medições da rugosidade dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro da marca Mitutoyo Modelo SJ 201 P.

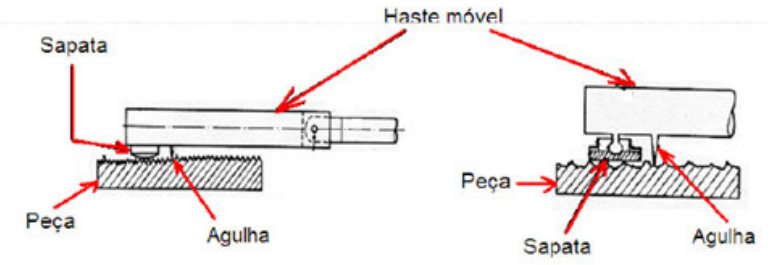


Figura 23. Esquema do funcionamento do rugosímetro.

4.3.1.5 A Precisão dimensional.

Para determinar a precisão dimensional dos corpos de prova foram utilizados, Paquímetro Universal da marca Mtutoyo de 150 mm com precisão de 0,05 mm e micrômetro externo marca Mitutoyo 0-25 com precisão de 0,01 mm.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Nesta fase será feita a coleta de dados, e, através da técnica de Delineamento de Experimentos, será feita a análise dos resultados, a fim de verificar qual será a influência dos parâmetros em cada variável resposta, para isso será utilizado o design fatorial 2^3, que é o mais indicado para esse modelo de experimento, e para otimizar esta análise foi utilizando o *software* Minitab 15®.

Nos experimentos foram utilizados três fatores assim definidos: espessura da camada, inclinação do protótipo e quantidade de gotas. Cada fator com dois níveis de controle.

As tabelas 9 e 10 apresentam os dados coletados para análise do experimento. Na tabela 9 o valor da variável "gotas" é de 300u/seg., já na tabela 10 é de 150 u/seg.

Tabela 9. Coleta de dados do experimento da variável "gotas" 300 u/seg

Quantidade de gotas por segundo (300 u/sec)												
	Espessura da camada 32 µm						Espessura da camada 64 µm					
Variáveis resposta	Protótipo (0°)			Protótipo (90°)			Protótipo (0°)			Protótipo (90°)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
tempo(h)	5,17	5,21	5,17	35,06	36,11	35,08	2,37	2,29	2,34	17,31	17,37	17,33
rugosidade(µm)	32	35	33	38	39	41	44	43	45	43	42	45
mat.peça (kg)	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
mat. Suporte (kg)	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015
custo peça (R$)	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13
custo sup. (R$)	9,78	9,78	9,78	8,15	8,15	8,15	9,78	9,78	9,78	8,15	8,15	8,15
custo energia (R$)	1,14	1,15	1,14	7,72	7,95	7,72	0,52	0,51	0,52	3,81	3,82	3,81
Corpo Ø 10mm	9,96	10,01	9,99	9,98	9,94	9,95	10,04	10,05	10,08	10,07	10,06	10,04
res. à tração (kg/f)	203,2	212,5	208	179,8	161,8	169,9	198,3	203,6	197,3	177,9	160,5	169,8

Tabela 10. Coleta de dados do experimento da variável “gotas” 150 u/seg

Quantidade de gotas por segundo (150 u/sec)												
	Espessura da camada 32 µm						Espessura da camada 64 µm					
Variáveis resposta	Protótipo (0°)			Protótipo (90°)			Protótipo (0°)			Protótipo (90°)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
tempo(h)	5,17	5,21	5,17	35,06	36,11	35,08	2,37	2,29	2,34	17,31	17,37	17,33
rugosidade(µm)	47	48	43	47	49	49	49	47	48	47	49	49
mat.peça (kg)	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
mat. Suporte (kg)	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015
custo peça (R$)	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13	23,13
custo sup. (R$)	9,78	9,78	9,78	8,15	8,15	8,15	9,78	9,78	9,78	8,15	8,15	8,15
custo energia (R$)	1,14	1,15	1,14	7,72	7,95	7,72	0,52	0,51	0,52	3,81	3,82	3,81
Corpo Ø 10mm	10,02	10,01	10,03	10,04	10,05	10,07	10,09	10,07	10,08	10,1	10,08	10,12
res. à tração (kg/f)	203,2	208,5	208	175,9	161,8	161	198,3	200,6	197,5	170,9	160,5	165,7

No desenvolvimento deste experimento foram definidas cinco variáveis resposta, assim descritas: O tempo de execução do protótipo (h); a rugosidade superficial (µm); o custo total do protótipo (R$): custo do material, custo do suporte e custo da energia elétrica; a precisão dimensional (mm); e a resistência a tração (kg/f).

A partir da definição das “variáveis resposta”, foi aplicado o desenho fatorial 2^3, que define o desenho fatorial com três fatores e dois níveis de controle: Fatores controláveis de controle são alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal é introduzir estímulos nos fatores e avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso determinar os principais fatores do processo. Os fatores podem se dividir em qualitativos e quantitativos, e podem ser representados por números ou letras.

Os níveis de controle são condições de operação dos fatores de controle investigado nos experimentos, os níveis podem ser identificados por nível baixo e nível alto indicados na tabela 11.

Tabela 11. De fatores e níveis de controle do experimento.

Fatores	Níveis
Espessura da camada	32µm e 64µm.
Inclinação do protótipo	0° e 90°.
Injeção de gotas	150 u/seg. e 300u/seg.

4.4.1 Variável tempo.

A Tabela 12 apresenta o ajuste fatorial: tempo e espessura da camada; Inclinação do protótipo; Gotas. A Tabela 13 ilustra a ANOVA, apresentando os efeitos e coeficientes estimados para variável tempo (unidades codificadas).

Tabela 12. Desenho fatorial completo da variável tempo.

Ordem	Espessura da camada	Inclinação do protótipo	Gotas	Tempo (h)
18	0,064	0	150	2,37
21	0,032	0	300	5,17
1	0,032	0	150	5,17
7	0,032	90	300	36,06
5	0,032	0	300	5,21
12	0,064	90	150	17,31
15	0,032	90	300	36,11
19	0,032	90	150	35,06
4	0,064	90	150	17,37
20	0,064	90	150	17,33
2	0,064	0	150	2,29
22	0,064	0	300	2,37
6	0,064	0	300	2,29
23	0,032	90	300	35,08
13	0,032	0	300	5,17
9	0,032	0	150	5,21
10	0,064	0	150	2,34
16	0,064	90	300	17,31
3	0,032	90	150	36,11
8	0,064	90	300	17,37
14	0,064	0	300	2,34
17	0,032	0	150	5,17
11	0,032	90	150	35,08
24	0,064	90	300	17,33

Tabela 13. Tabela da ANOVA para variável tempo.

Fatores	Efeito	Coef.	Coef. De EE	T	P
Constante		15,109	0,06056	249,50	0,000
Espessura	-10,548	-5,274	0,06056	-87,09	0,000
Inclinação	22,702	11,351	0,06056	187,44	0,000
gotas	0,083	0,042	0,06056	0,69	0,501
Espessura x Inclinação	-7,698	-3,849	0,06056	-63,56	0,000
Espessura x gotas	-0,083	-0,042	0,06056	-0,69	0,501
Inclinação x gotas	0,083	0,042	0,06056	0,69	0,501
Inclinação x gotas x espessura	-0,083	-0,042	0,06056	-0,69	0,501

A estimativa do desvio padrão é S= 0,296676, o coeficiente de determinação é R-quad.=99,92%, o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é R^2(ajustado) = 99,95%. A Tabela 14 indica a análise de variância para variável tempo (unidades codificadas).

Tabela 14. Tabela de análise de variância

Fonte	GL	SQ sec.	SQ ajust.	MQ ajust.	F	P
Efeitos principais	3	3759,84	3759,84	1253,28	14239,12	0,000
2-Interações de fatores	3	355,67	355,67	118,56	1346,98	0,000
3-Interações de fatores	1	0,04	0,04	0,04	0,47	0,501
Erro residual	16	1,41	1,41	0,09		
Erro puro	16	1,41	1,41	0,09		
Total	23	4116,96				

No caso 2-Interações de fatores F_{calc} = 1346,98 > F_{tab}=2,353, indica que existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, no caso 3-Interações de fatores F_{calc} = 0,47 < F_{tab}=6,314, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, se p-valor < α (0,05), rejeita-se H_0, onde não há diferenças significativas entre os grupos.

A tabela da análise de variância para a regressão, indica que, o modelo de regressão no caso de 2-Interações de fatores foi significativo já que a fonte de variação associada ao modelo é significativa onde p-valor é menor que α, já no caso de 3-Interação de fatores não foi significativo, pois que a fonte de variação associada ao modelo não é significativa onde p-valor é maior que α.

As fig. 25, 26 e 27 indicam que a variável “gotas” é a única que não tem influência na variável tempo, porém a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas, como mostrado no gráfico abaixo, neste caso a melhor combinação é a inclinação do protótipo a 0° e a espessura da camada de 0,064μm, na qual obtemos o menor valor de tempo, neste caso menor-é-melhor.

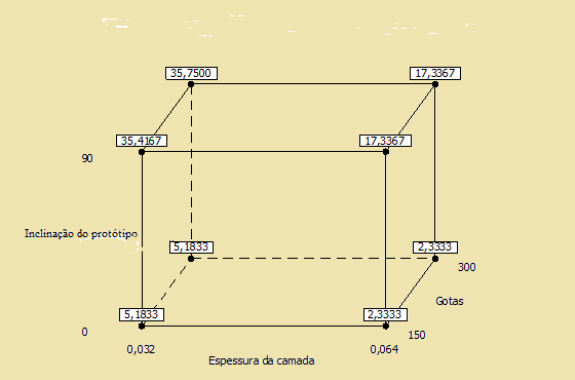


Figura 24. Gráfico de cubos para variável Tempo.

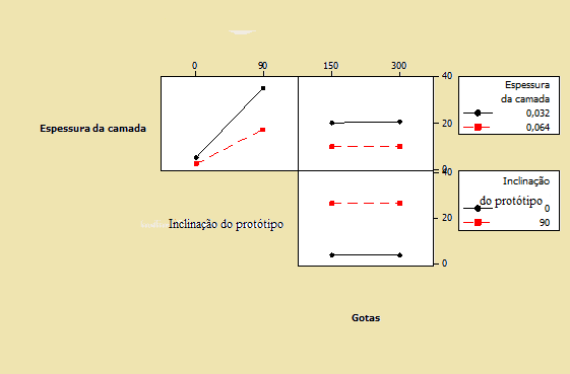


Figura 25. Gráfico de interações da variável tempo.

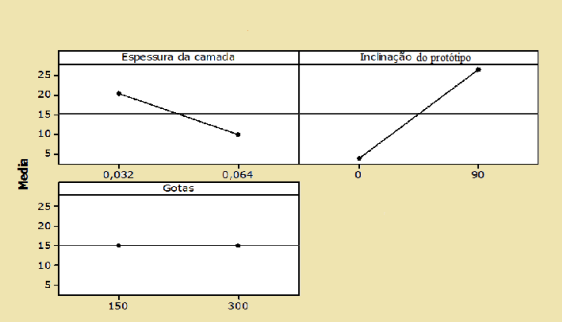


Figura 26. Gráfico de efeitos principais para à variável tempo.

4.4.2 Variável rugosidade.

A Tabela 15 apresenta o ajuste fatorial: rugosidade vs. Espessura da camada; Inclinação do protótipo; gotas. A Tabela 17 apresenta os efeitos e coeficientes estimados para variável rugosidade (unidades codificadas).

Tabela 15. Desenho fatorial completo da variável rugosidade.

Ordem	Espessura da camada	Inclinação do protótipo	Gotas	Rugosidade (μm)
6	0,064	0	300	43
5	0,032	0	300	32
7	0,032	90	300	38
2	0,064	0	150	49
15	0,032	90	300	39
21	0,032	0	300	35
14	0,064	0	300	44
10	0,064	0	150	47
16	0,064	90	300	42
4	0,064	90	150	47
11	0,032	90	150	47
3	0,032	90	150	49
1	0,032	0	150	47
19	0,032	90	150	49
20	0,064	90	150	49
17	0,032	0	150	48
24	0,064	90	300	45
9	0,032	0	150	43
8	0,064	90	300	45
12	0,064	90	150	49
22	0,064	0	300	43
23	0,032	90	300	41
13	0,032	0	300	33
18	0,064	0	150	48

Tabela 16. Tabela da Anova para a variável rugosidade.

Prazo	Efeito	Coef.	Coef. De EE	T	P
Constante		43,833	0,3118	140,58	0,000
Espessura	4,167	2,083	0,3118	6,68	0,000
Inclinação	2,333	1,167	0,3118	3,74	0,002
gotas	-7,667	-3,833	0,3118	-12,29	0,000
Espessura x Inclinação	-1,833	-0,917	0,3118	-2,94	0,010
Espessura x gotas	3,167	1,583	0,3118	5,08	0,000
Inclinação x gotas	1,000	0,500	0,3118	1,60	0,128
Inclinação x gotas x espessura	-0,833	-0,417	0,3118	-1,34	0,200

A estimativa do desvio padrão é S = 1,52753, o coeficiente de determinação é R-quad=86,39%, o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é R^2(ajustado) = 91,31%. A tabela 17 indica a análise de variância para variável rugosidade (unidades codificadas).

Tabela 17. Tabela de Análise de variância.

Fontes	GL	SQ sec.	SQ ajust.	MQ ajust.	F	P
Efeitos principais	3	489,500	489,500	163,167	69,93	0,000
2-Interações de fatores	3	86,333	86,333	28,778	12,33	0,000
3 Interações de fatores	1	4,167	4,167	4,167	1,79	0,200
Erro residual	16	37,333	37,33	2,33		
Erro puro	16	37,333	37,333	2,333		
Total	23	617,333				

No caso 2-Interações de fatores F_{calc}=12,33 > F_{tab}=2,353, indica que existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, no caso 3-Interações de fatores F_{calc}=1,79 < F_{tab}=6,314, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, se p-valor < α (0,05), rejeita-se H_0,onde não há diferenças significativas entre os grupos, a tabela da análise de variância para a regressão, indica que, o modelo de regressão no caso de 2-Interações de fatores foi significativo já que a fonte de variação associada ao modelo é significativa onde p-valor é menor que α, já no caso de 3-Interação de fatores não foi significativo pois que a fonte de variação associada ao modelo não é significativa onde p-valor é maior que α.

As fig. 28, 29 e 30 indicam que todas as variáveis tem influência na variável rugosidade, pois a mudança das variáveis é significativa, como mostrado nos gráficos abaixo, e neste caso a melhor combinação é a inclinação do protótipo a 0°, a espessura da camada de 0,032*μm* e gotas a 300 u/seg., onde obtemos o menor valor de rugosidade, neste caso menor-é-melhor.

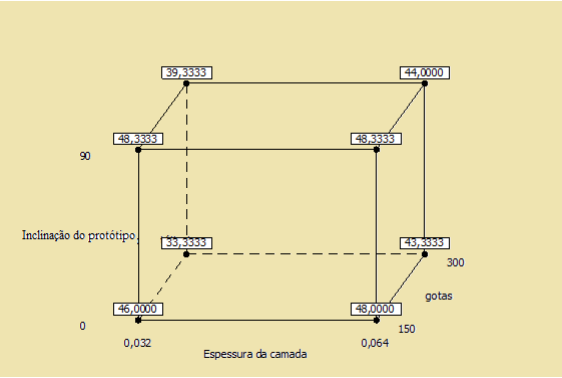


Figura 27. Gráfico de cubos para variável rugosidade.

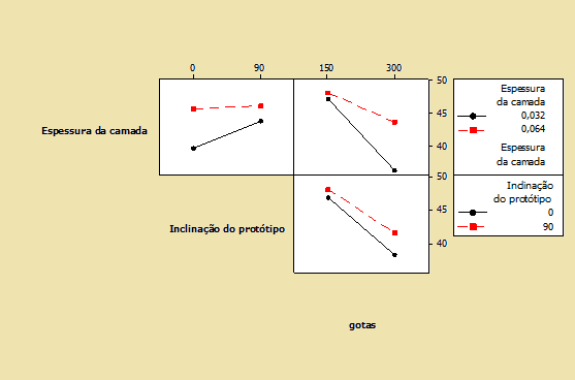


Figura 28. Gráfico de interação da variável rugosidade.

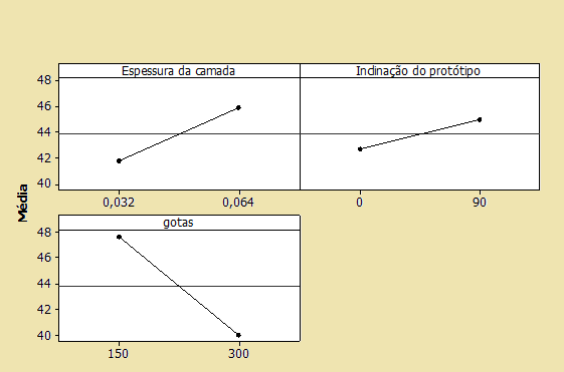


Figura 29. Gráfico de efeitos principais para a variável rugosidade.

4.4.3 Variável custo.

A Tabela 18 apresenta o ajuste fatorial: custo e. espessura da camada; Inclinação do protótipo; gotas. Tabela 19 apresenta os efeitos e coeficientes estimados para Custo (unidades codificadas).

A estimativa do desvio padrão é S = 0, 0633114, o coeficiente de determinação é R-quad =99,88%, o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é R-quad.(ajustado) = 99,92%. A tabela 20 indica a análise de variância para Custo (unidades codificadas).

No caso 2-Interações de fatores F_{calc}=1429,50 > F_{tab}=2,353, indica que existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, no caso 3-Inerações de fatores F_{calc}=0,30 < F_{tab}=6,314, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, se p-valor < α (0,05), rejeita-se H_0,onde não há diferenças significativas entre os grupos, o quadro da análise de variância para a regressão, indica que, o modelo de regressão no caso de 2-

Interações de fatores foi significativo já que a fonte de variação associada ao modelo é significativa onde p-valor é menor que α, já no caso de 3-Interação de fatores não foi significativo pois a fonte de variação associada ao modelo não é significativa onde p-valor é maior que α.

Tabela 18. Desenho fatorial completo da variável custo.

Ordem	Espessura da camada	Inclinação do protótipo	Gotas	Custo (R$)
21	0,032	0	300	34,05
4	0,064	90	150	35,09
13	0,032	0	300	34,06
15	0,032	90	300	39,00
5	0,032	0	300	34,05
14	0,064	0	300	33,43
18	0,064	0	150	33,43
8	0,064	90	300	35,09
19	0,032	90	150	39,00
22	0,064	0	300	33,42
10	0,064	0	150	33,43
20	0,064	90	150	35,10
2	0,064	0	150	33,42
24	0,064	90	300	35,10
11	0,032	90	150	39,23
3	0,032	90	150	39,17
1	0,032	0	150	34,05
7	0,032	90	300	39,23
6	0,064	0	300	33,43
12	0,064	90	150	35,09
17	0,032	0	150	34,06
23	0,032	90	300	39,00
9	0,032	0	150	34,05
16	0,064	90	300	35,09

Tabela 19. Tabela da Anova para a variável custo.

Prazo	Efeito	Coef.	Coef. De EE	T	P
Constante		35,420	0,01292	2740,74	0,000
Espessura	-2,319	-1,160	0,01292	-89,73	0,000
Inclinação	3,359	1,680	0,01292	129,96	0,000
gotas	-0,014	-0,007	0,01292	-0,55	0,591
Espessura x Inclinação	-1,692	-0,846	0,01292	-65,48	0,000
Espessura x gotas	0,014	0,007	0,01292	0,55	0,591
Inclinação x gotas	-0,014	-0,007	0,01292	-0,55	0,591
Inclinação x gotas x espessura	0,014	0,007	0,01292	0,55	0,591

Tabela 20. Tabela da Análise de variância.

Fonte	GL	SQ sec.	SQ ajust.	MQ ajust.	F	P
Efeitos principais	3	99,976	99,9764	33,3255	8314,05	0,000
2-Interações de (No.) fatores	3	17,190	17,1897	5,7299	1429,50	0,000
3-Interações de (No.) fatores	1	0,001	0,0012	0,0012	0,30	0,591
Erro residual	16	0,064	0,0641	0,0040		
Erro puro	16	0,064	0,0641	0,0040		
Total	23	117,231				

As fig. 31, 32, e 33 indicam que a variável “gotas” é a única que não tem influência na variável custo, pois a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas, como mostrado no gráfico abaixo, neste caso a melhor combinação é a inclinação do protótipo a 0° e a espessura da camada de 0,064μm, na qual obtemos o menor custo, neste caso menor-é-melhor.

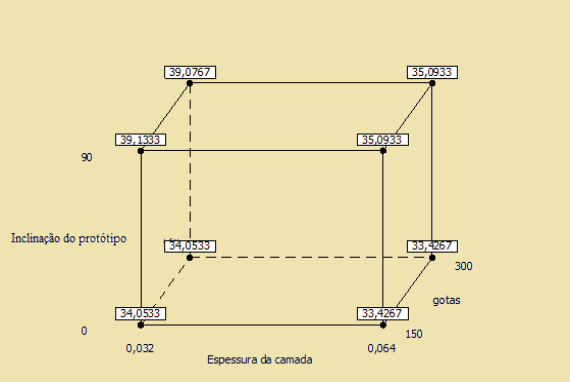


Figura 30. Gráfico de cubos para variável Custo.

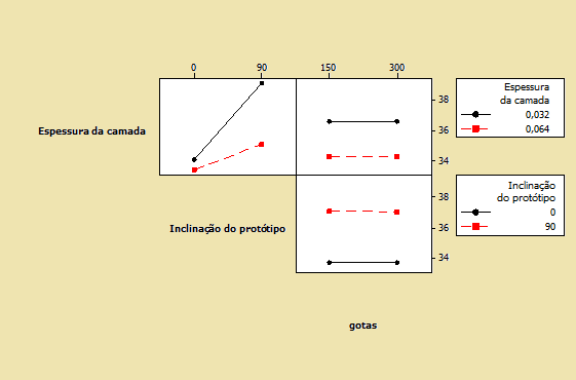


Figura 31. Gráfico de interação da variável Custo.

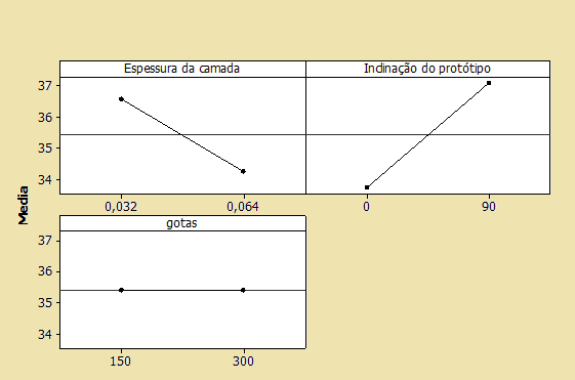


Figura.34- Gráfico dos efeitos principais para variável custo.

4.4.4 Variável dimensão.

A Tabela 21 apresenta o ajuste fatorial: Dimensão e Espessura da camada; Inclinação do protótipo; gotas. A Tabela 22 apresenta os efeitos e coeficientes estimados para Dimensão (unidades codificadas).

Tabela 21. Desenho fatorial completo da variável dimensão.

Ordem	Espessura da camada	Inclinação do protótipo	Gotas	Dimensão (Ø10mm)
9	0,032	0	150	10,02
17	0,032	0	150	10,01
23	0,032	90	300	9,98
6	0,064	0	300	10,04
12	0,064	90	150	10,10
19	0,032	90	150	10,04
14	0,064	0	300	10,05
21	0,032	0	300	9,96
10	0,064	0	150	10,09
13	0,032	0	300	10,01
8	0,064	90	300	10,07
24	0,064	90	300	10,06
22	0,064	0	300	10,08
18	0,064	0	150	10,07
11	0,032	90	150	10,05
2	0,064	0	150	10,08
4	0,064	90	150	10,08
20	0,064	90	150	10,12
1	0,032	0	150	10,03
5	0,032	0	300	9,99
15	0,032	90	300	9,94
16	0,064	90	300	10,04
3	0,032	90	150	10,07
7	0,032	90	300	9,95

Tabela 22. ANOVA para a variável dimensão.

Prazo	Efeito	Coef.	Coef. De EE	T	P
Constante		10,0388	0,003656	2745,65	0,000
Espessura	0,0692	0,0346	0,003656	9,46	0,000
Inclinação	0,0058	0,0029	0,003656	0,80	0,437
gotas	-0,0492	-0,0246	0,003656	-6,72	0,000
Espessura x Inclinação	0,0042	0,0021	0,003656	0,57	0,577
Espessura x gotas	0,0158	0,0079	0,003656	2,17	0,046
Inclinação x gotas	-0,0208	-0,0104	0,003656	-2,85	0,012
Inclinação x gotas x espessura	0,0108	0,0054	0,003656	1,48	0,15

A estimativa do desvio padrão é S = 0, 0179118, o coeficiente de determinação é R-quad =78,40%, o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é R-quad.(ajustado) = 86,20%. A tabela 23 indica a análise de variância para Dimensão (unidades codificadas).

Tabela 23. Tabela de Análise de variância.

Fonte	GL	SQ sec.	SQ ajust.	MQ ajust.	F	P
Efeitos principais	3	0,0434125	0,0434125	0,0144708	45,10	0,000
2-Interações de fatores	3	0,0042125	0,0042125	0,0014042	4,38	0,020
3-Interações de fatores	1	0,0007042	0,0007042	0,0007042	2,19	0,158
Erro residual	16	0,0051333	0,0051333	0,0003208		
Erro puro	16	0,0051333	0,0051333	0,0003208		
Total	23	0,0534625				

No caso 2-Interações de fatores F_{calc} = 4,38 > F_{tab}=2,353, indica que existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, no caso 3-Interação de fatores F_{calc} = 2,19 < F_{tab}=6,314, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, se p-valor < α (0,05), rejeita-se H0,onde não há diferenças significativas entre os grupos, o quadro da análise de variância para a regressão, indica que, o modelo de regressão no caso de 2-Interações de fatores foi significativo já que a fonte de variação associada ao modelo é significativa onde p-valor é menor que α, já no caso de 3-Interação de fatores não foi significativo pois que a fonte de variação associada ao modelo não é significativa onde p-valor é maior que α.

As fig. 33, 34, 35 indicam que todas as variáveis tem influência na variável dimensão, pois a mudança das variáveis é significativa, como mostrado nos gráficos abaixo, e neste caso a melhor combinação é a inclinação do protótipo a 0°, a espessura da camada de 0,032*µm* e gotas a 300 u/seg., onde obtemos o valor mais próximo do nominal, e neste caso nominal-é-melhor.

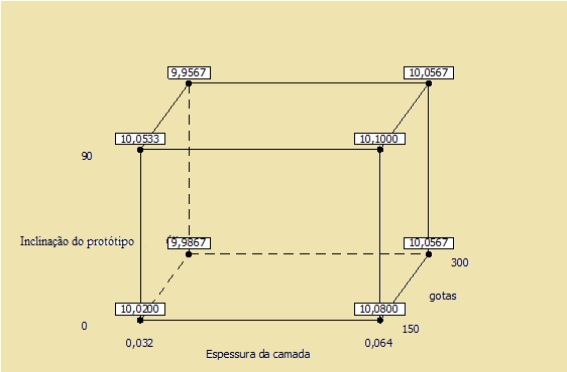


Figura 32. Gráfico de cubos para a variável Dimensão.

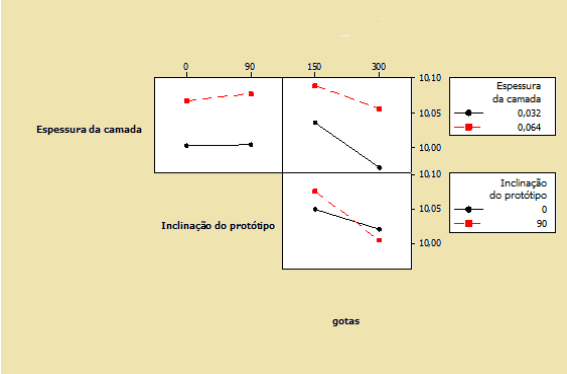


Figura 33. Gráfico de interação para a variável Dimensão.

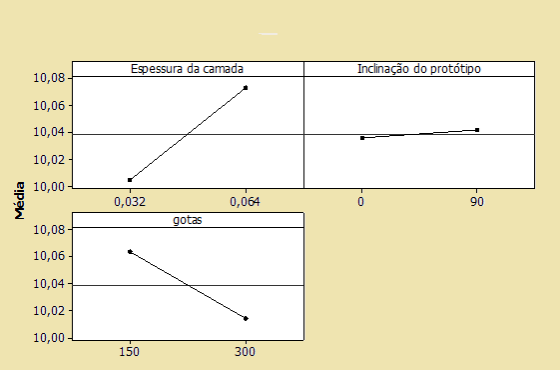


Figura 34. Gráfico de efeitos principais para a variável Dimensão.

4.4.5 Variável resistência á tração.

A Tabela 24 apresenta o ajuste fatorial: Tração vs. Espessura da camada; Inclinação do protótipo; gotas. Tabela 25 apresenta os efeitos e coeficientes estimados para Tração (unidades codificadas).

Tabela 24. Desenho fatorial completo da variável resistência à tração.

Ordem	Espessura da camada	Inclinação do protótipo	Gotas	Tração (kg/f)
4	0,064	90	150	170,9
14	0,064	0	300	198,3
8	0,064	90	300	177,9
5	0,032	0	300	203,2
20	0,064	90	150	160,5
10	0,064	0	150	198,3
1	0,032	0	150	203,2
12	0,064	90	150	165,7
2	0,064	0	150	200,6
16	0,064	90	300	160,5
24	0,064	90	300	169,8
19	0,032	90	150	175,9
17	0,032	0	150	208,5
9	0,032	0	150	208,0
22	0,064	0	300	203,6
23	0,032	90	300	179,8
11	0,032	90	150	161,8
3	0,032	90	150	161,0
15	0,032	90	300	161,8
18	0,064	0	150	197,5
21	0,032	0	300	212,5
13	0,032	0	300	208,0
6	0,064	0	300	197,3
7	0,032	90	300	169,9

Tabela 25. Tabela da ANOVA para a variável resistência à tração.

Término	Efeito	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		185,60	1,247	148,83	0,000
Espessura da camada	-4,39	-2,20	1,247	-1,76	0,097
Inclinação do protótipo	-35,29	-17,65	1,247	-14,15	0,000
gotas	2,56	1,28	1,247	1,03	0,320
Espessura da camada* Inclinação do protótipo	3,58	1,79	1,247	1,43	0,171
Espessura da camada*gotas	-0,24	-0,12	1,247	-0,10	0,924
Inclinação do protótipo*gotas	1,43	0,71	1,247	0,57	0,576
Espessura da camada* Inclinação do protótipo*gotas	-0,04	-0,02	1,247	-0,02	0,987

A tabela 26 indica a análise de variância para Tração (unidades codificadas). A estimativa do desvio padrão é S = 6,10952, o coeficiente de determinação é R-quad =83,84%, o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é R-quad.(ajustado) = 89,67%.

Tabela 26. Tabela de Análise da variância.

Fonte	GL	SQ sec.	SQ ajust.	MQ ajust.	F	P
Efeitos principais	3	7628,00	7628,00	2542,67	68,12	0,000
2-Interações de (No.) fatores	3	89,22	89,22	29,74	0,80	0,514
3-Interações de (No.) fatores	1	0,01	0,01	0,01	0,00	0,987
Erro residual	16	597,22	597,22	37,33		
Erro puro	16	597,22	597,22	37,33		
Total	23	8314,45				

No caso 2-Interações de fatores F_{calc}=0,80 < F_{tab}=2,353, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, no caso 3-Interações de fatores F_{calc}=0,00 < F_{tab}=6,314, indica que não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, se p-valor < α(0,05), rejeita-se H0,onde não há diferenças significativas entre os grupos, o quadro da análise de variância para a regressão, indica que, o modelo de regressão não foi significativo já que a fonte de variação associada ao modelo não é significativa onde p-valor é maior que α.

As fig. 36, 37 e 39 indicam que todas as variáveis tem influência na variável resistência à tração, pois a mudança das variáveis é significativa, como mostrado nos gráficos abaixo, e neste caso a melhor combinação é a inclinação do protótipo a 0°, a espessura da camada de 0,032 µm e gotas a 300 u/seg., onde obtemos o maior valor de resistência à tração, neste caso maior-é-melhor.

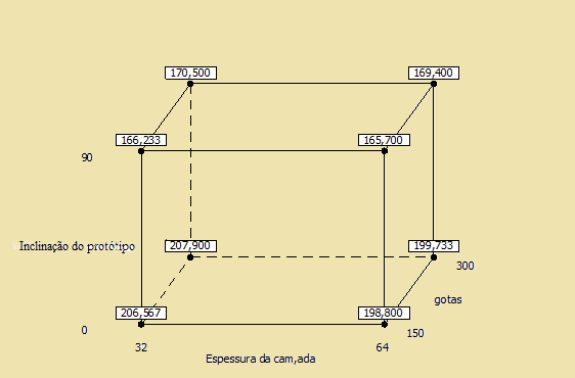


Figura 35. Gráfico de cubos para variável resistência à tração.

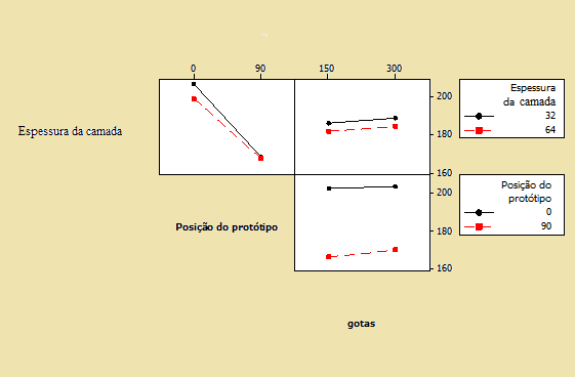


Figura 36. Gráfico de interação para variável resistência à tração.

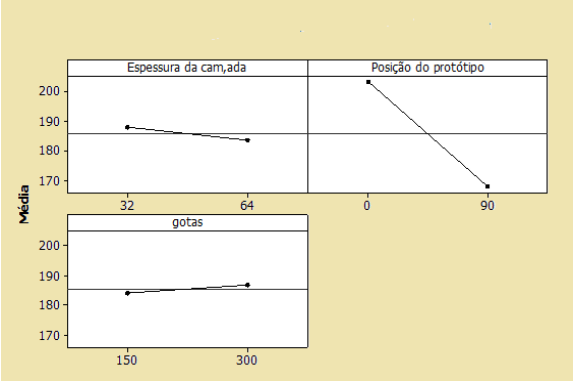


Figura 37. Gráfico de efeitos para variável resistência à tração.

4.5 CONCLUSÃO.

A utilização da técnica de Delineamento de Experimentos (DOE) através de desenho fatorial 2^3 mostrou-se eficiente, uma vez, que essa técnica forneceu informações das “variáveis resposta” de forma individual, e também coletiva através das interações, onde foi possível definir quais as combinações mais adequadas para o desenvolvimento do processo de prototipagem rápida de impressão 3D, o que obviamente poderá ser utilizada em outros processo de prototipagem.

Através da análise feita foi possível observar que, as configurações de fábrica do equipamento são as mais adequadas para a maioria das variáveis, porém no caso de algumas combinações poderemos obter resultados satisfatórios tais como:

(i) A variável “gotas” é a única que não tem influência na variável resposta “tempo”, porém a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas.

(ii) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “rugosidade”, pois a mudança das variáveis é significante.

(iii) A variável “gotas” é a única que não tem influência na variável resposta “custo”, porém, a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas.

(iv) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “dimensão”, pois a mudança das variáveis é significante.

(v) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “resistência à tração”, pois a mudança das variáveis é significante.

4.6 REFERÊNCIAS.

ABNT NBR ISSO 4287, "**Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: método do perfil**- Termos, definições e parâmetros de rugosidade." ABNT, 2002.

AGOSTINHO, O. L.,RODRIGUES, A, C, L. e LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1995. 195 p.

ANTONY, J. Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner, **Sensor Review**, 2006.

BOX, G.E.P.; HUNTER,W.G.; HUNTER,J.S. **Statistics for Experimenters**. New York, John Willey ,1978.

CALEGARE, A. J.A. **Introdução ao delineamento de experimentos**. 1ªed. Ed Edgar Blucher, SP, 2001.

COLOMBARI, R.R. **Aplicação de Delineamento de Experimentos para o processo de solda à projeção**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção, pela universidade Federal de Itajubá, 2004.

KECHAGIAS, J. Investigation of LOM process quality using design of experiments approach. **Rapid prototyping journal**, Vol. 13, No. 5, pp. 316-323, 2007.

MONTGOMERY D.C. **Design and analysis of experiments**. 5ª ed. John Wiley. NY. USA. ISBN 0- 471-31649-0. 2001. 600 pgs.

MONTGOMERY D. C; RUNGER G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª ed. LTC Editora. RJ, 2003, 465 pg.

VIJAV, S.; KRISHNA, G.; VENKATESWARA, R.; Application of design of experiments (DOE) to simulate selective laser melting process for optimum temperature distribution, **Indian Journal of Engineering**, v. 1, n. 1, 2012.

WERKEMA, M. C; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Ed. FCO da EE UFMG Belo Horizonte MG, 1996.

5 CONSIDERACÕES FINAIS.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões dos estudos realizados na dissertação, e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES.

Esta dissertação teve como objetivo inicial apresentar os tipos de prototipagem rápida, suas áreas de atuação assim com apresentar a técnica de Delineamento de Experimentos na forma de uma revisão bibliográfica que foi conseguida através do artigo 1 que define que a prototipagem rápida é cada vez mais utilizada na confecção de geometrias mais complexas. Esta tecnologia permite a utilização de diferentes tipos de materiais em suas aplicações. A confecção de protótipos personalizados é uma realidade. Contudo, cada tipo de tecnologia utilizada para a confecção de modelos através da prototipagem rápida, pode gerar diferentes resultados dimensionais e visuais.

Este trabalho procurou mostrar diversos processos de prototipagem. A escolha do processo depende de fatores como resistência, acabamento, material, custo, tempo, etc. Também foi comentado sobre as áreas de atuação em que o processo de prototipagem rápida mais cedo ou mais tarde, se fará necessário, para um maior desenvolvimento, como exemplo, na área médica onde a tendência é aumentar seu uso em função das novas tecnologias e materiais, na área de nanotecnologia onde já é possível fabricar peça com dimensões micrométricas.

Os primeiros equipamentos tinham um custo elevado, porém com o desenvolvimento de novas tecnologias estes custos foram reduzidos o que faz com que o acesso a essas tecnologias fique cada vez mais acessível, o que nos leva a crer que em muito pouco tempo esta tecnologia será utilizada em nossos lares assim com as impressoras que atualmente temos em nossas casas.

Uma área que tende a crescer é a de manutenção, pois, com o desenvolvimento de materiais e também com processos de prototipagem cada vez melhor, a certeza de que as peças confeccionadas por meio de prototipagem rápida terão resistência bem próxima ou igual às peças originais.

No artigo 2 procurou-se desenvolver um método para inserir o Delineamento de Experimentos no processo de prototipagem rápida, o qual foi apresentado de forma resumida através de um fluxograma no início deste trabalho, um dos problemas encontrados foi à escolha do processo de Prototipagem Rápida adequado, pois, temos um grande número de processos e, para tentar solucionar este problema foram apresentadas características que auxiliassem parcialmente nesta escolha.

Para aplicação do Delineamento de Experimentos (DOE) foi utilizada uma sequência, que foi conseguida através da revisão bibliográfica, onde cada item foi desenvolvido de forma clara e objetiva para que tivéssemos resultados satisfatórios e que os objetivos fossem alcançados.

No artigo 3 o objetivo foi aplicar os conceitos do artigo 2, através da confecção de um protótipo no processo de prototipagem rápida de Impressão 3D por Injeção e fazer a análise das variáveis utilizando o Delineamento de Experimentos (DOE).

A utilização da técnica de Delineamento de Experimentos (DOE) através de desenho fatorial 2^3 mostrou-se eficiente, uma vez, que essa técnica forneceu informações das “variáveis resposta” de forma individual, e também coletiva através das interações, onde foi possível definir quais as combinações mais adequadas para o desenvolvimento do processo de prototipagem rápida de impressão 3D, o que obviamente poderá ser utilizada em outros processo de prototipagem.

Através da análise feita foi possível observar que, as configurações de fábrica do equipamento são as mais adequadas para a maioria das variáveis, porém no caso de algumas combinações poderemos obter resultados satisfatórios tais como:

(i) A variável “gotas” é a única que não tem influência na variável resposta “tempo”, porém a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas.

(ii) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “rugosidade”, pois a mudança das variáveis é significante.

(iii) A variável “gotas” é a única que não tem influência na variável resposta “custo”, porém, a mudança das variáveis, espessura da camada e inclinação do protótipo podem ser significativas.

(iv) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “dimensão”, pois a mudança das variáveis é significante.

(v) Todas as variáveis tem influência na variável resposta “resistência à tração”, pois a mudança das variáveis é significante.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Apesar de apresentar as áreas de atuação do processo de prototipagem neste trabalho, sugere-se aprofundar a utilização do processo de prototipagem rápida na área de manutenção que ainda sofre muito com a demora na confecção de peças de reposição.

Aplicar o Delineamento de Experimentos em outros processos de prototipagem.

Fazer um estudo comparativo entre processos de prototipagem rápida utilizando o Delineamento de Experimentos.

6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISSO 4287, "**Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: método do perfil**- Termos, definições e parâmetros de rugosidade." ABNT, 2002.

AGOSTINHO, O. L.,RODRIGUES, A, C, L. e LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1995. 195 p.

AHRENS, C.H ; FERREIRA, C.V. ; PETRUSVCH, G. ; MAIA, A.M. ; CARVALHO, J. ; SANTOS, R.L.S. ; SILVA, J.V.L. ; VOLPATO, N.-"Prototipagem no Brasil. Realidade e perspectivas", **Revista Cadware**, junho/2006.Disponível em <www.cadware.com.br>. Acesso em 18/05/2012.

ALCOFORADO, M. G. Design Interativo: **O Poder Comunicativo dos Protótipos. In: 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design**, SENAC, São Paulo, Anais Eletrônicos, 2008.

ANTONY, J. Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner, **Sensor Review**, 2006.

ASQ - **American Society for Quality** - Sociedade Americana para a Qualidade.

BARBOSA, A. L. S.; SORESINI, A. L. G.; CHUDEK, C. A. S.; BRANDALISE, R. **Bengala para deficientes visuais. Trabalho da Disciplina Metodologia do Projeto**. Curso de Engenharia Industrial Mecânica da UTFPR. Curitiba: CEFET-PR, 2001.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for Experimenters**. New York, John Willey ,1978.

CALEGARE, A. J.A. **Introdução ao delineamento de experimentos**. 1ªed. Ed Edgar Blucher, SP, 2001.

CANCIGLIERI, O; SEELHORST, A; IAROZINSKI, A. **Processo de prototipagem rápida por deposição ou por remoção de material na concepção de novos produtos-uma abordagem comparativa**, XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007.

CHEN, L. C. Reverse engineering in the design of turbine blades – a case study in applying the MAMDP. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 16, p.161-167, 2000.

CHIABRA, M. Obtaining desired surface roughness of castings produced using ZCast direct metal casting process through Taguchi's experimental approach. **Rapid Prototyping Journal**, p.458–471, 06/2012.

COLEMAN, D.E.; MONTEGOMERY, D.C., A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v.35, n.1, 1993.

COLLINS; WOHLERS ASSOCIATES INC. vol. 1. **Desenvolvimento de Produto. Máquinas e Metais**. São Paulo, p.76-89, 1998.

COLOMBARI, R.R. **Aplicação de Delineamento de Experimentos para o processo de solda à projeção**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção, pela universidade Federal de Itajubá, 2004.

ELSAYED, E. A.; CHEN, A. Optimal levels of process parameters for products with multiples characteristics. **International Journal Production Research**. v. 31, n. 5, 1993.

FOGIATTO, J.A. **O uso da prototipagem rápida na área médico-odontológica, Ortodontia Contemporânea**, 21/05/2011. Disponível em <www.ortodontiacontemporanea.com/>. Acessado em 15/03/2012.

INOVAÇÃO TECNOLOGICA. **Fábrica espacial fará peças usando canhão de elétrons, site Inovação Tecnológica**, 28/06/2011. Disponível em <www.inovacaotecnologica.com.br> Acessado em 12/02/2012.

INOVAÇÃO TECNOLOGICA. **Novo processo de prototipagem rápida, site Inovação Tecnológica**, 09/12/2003. Disponível em < www.inovacaotecnologica.com.br> Acessado em 13/03/2012.

KECHAGIAS, F. An experimental investigation of the surface roughness of parts produced by LOM process. **Rapid Prototyping Journal**, v.13, n. 1, p.17-22, 2007.

KECHAGIAS, J. Investigation of LOM process quality using design of experiments approach. **Rapid prototyping journal**, Vol. 13, No. 5, pp. 316-323, 2007.

MAIA, I.A; NORITOMI, P.; SILVA, J.V.L.; PEREIRA, L.C.; OLIVEIRA M.; NARGI G. e ULBRICH, C.B.L. **Aplicações da Prototipagem Rápida na construção de implantes femorais personalizados**, IV Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, Caxambu-MG, 2006.

MONTGOMERY D. C; RUNGER G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª ed. LTC Editora. RJ, 2003, 465 pg.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

MONTGOMERY, D.C., **Design and analysis of experiments**. 6 ed., John Wiley & Sons, 2005.

NORMAS ABNT NBR 6405-1985. **Rugosidade Superficial**.

NORMAS ABNT NBR ISO 2768-1. **Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**.

OLIVEIRA, M.F; MAIA, I.A; NORITOMI, P.Y; NARGI, G.C; SILVA, J.V.L; FERREIRA, B.M.P; DUEK, Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida, **Revista Matéria**, vol.12, n.2 , pp. 373- 382, 2007.

PALM, W. Rapid prototyping primer: the learning factory. Disponível em <www.rapidprototypinghomepage.com/> Acessado em 12/05/2012.

PROJETO MOBILIZADOR RNPR, (2000), Prototipagem Rápida na indústria cerâmica, **Tecnometal**, N.º 129, pp. 5-17, julho/agosto 2000.

RNPR, REDE NACIONAL DE PROTIPAGEM RÁPIDA DE PORTUGAL. Comparação de Sistemas e Processos de RP e SRP. Projeto de Implantação da Rede, Ano 13 , N.º 45, pp. 28-33, Setembro, 2000.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F., A. (2006). **Gestão de Desenvolvimento de Produtos - Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo, Saraiva, 2006.

SONG, Y.; PARK, S; CHAE, S. 3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n.45 p.1063–1069, 2005.

SOUZA, A. F.; ULBRICH C.B.L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 336p. 2009.

TAMINGER, K. **Aparelho semelhante ao replicador de Star Trek é desenvolvido pela NASA**, 11/11/2009. Disponível em <www.hypescience.com>. Acessado em 25/10/2011.

VIJAV, S.; KRISHNA, G.; VENKATESWARA, R.; Application of design of experiments (DOE) to simulate selective laser melting process for optimum temperature distribution, **Indian Journal of Engineering**, v. 1, n. 1, 2012.

VOLPATO N., **Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 244 p. 2007.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 294 p., 1996.

WHOLERS, T. – Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing, State of the Industry, **Annual Worldwide Progress Report**, Wohlers Associates, Colorado, 2003.

WOHLERS, T. Rapid Prototyping & Tooling, **Annual Worldwide Progress Report**, Wohlers Associates, Colorado, USA, 1998.

ZIEMIAN, C., W.; CRAWN, P. M. Computer aided decision support for fused deposition modeling, **Rapid Prototyping Journal**, Volume 7. Number 3.p. 138-147, 2001.