

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Marcelo Fernandes*
de Oliveira E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *15.12.2008*
Cecília Amélia Zavaglia
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Aplicações da Prototipagem Rápida em Projetos de Pesquisa

Autor: Marcelo Fernandes de Oliveira

Orientadora: Prof^a. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

108/2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO**

Aplicações da Prototipagem Rápida em Projetos de Pesquisa

Autor: Marcelo Fernandes de Oliveira

Orientadora: Prof^a. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Curso: Engenharia Mecânica – Mestrado

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Trabalho Final de mestrado apresentado à comissão de pós graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Campinas, 2008

SP – Brasil

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

OL4a Oliveira, Marcelo Fernandes de
Aplicações da prototipagem rápida em projetos de
pesquisa / Marcelo Fernandes de Oliveira. --Campinas,
SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Prototipagem Rápida. 2. Processo de fabricação.
3. Imagem tridimensional. I. Zavaglia, Cecília Amélia
de Carvalho. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Applications of rapid prototyping in research projects

Palavras-chave em Inglês: Rapid Prototyping, Manufacturing process, 3D -
imaging

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Jonas de Carvalho,
Maria Gabriela Caffarena Celani

Data da defesa: 15/12/2008

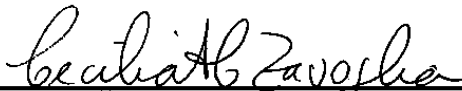
Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO
Trabalho Final de Mestrado

Aplicações da Prototipagem Rápida
em Projetos de Pesquisa

Autor: Marcelo Fernandes de Oliveira

Orientadora: Profª. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia



Profª. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Presidente

DEMA/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Jonas de Carvalho

EESC/USP/São Carlos



Profª. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

FEC/UNICAMP

Campinas, 15 de Dezembro de 2008

Dedicatória:

Dedico esta obra, fruto do meu trabalho humano, a Deus que por Ele todas as coisas são feitas, e a minha família, onde tem como âmago, minha querida esposa Andréia, que com paciência e ternura, ao lado dos nossos três filhos até esse momento, Mariana, Daniel e Lucas, sempre me incentivou, e que por Eles me esforço para tornar o dia mais santo e produtivo, junto daqueles que convivo.

Agradecimentos

Este trabalho, fruto do esforço, não poderia ser concluído sem a contribuição e colaboração de diversas pessoas, às quais aqui presto minha sincera homenagem, procurando ser justo e grato com todos. Agradeço a Deus por colocá-los no meu caminho e peço que os abençoe.

Aos meus pais Sr. João Oswaldo e Sra. Maria Celeste (*in memoriam*) pelo incentivo em todos os momentos da minha vida, que pela confiança e serenidade na fé, formaram humanamente seus quatro filhos.

A Prof^ª. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, minha orientadora, pelo estímulo constante, contribuições e sugestões nas discussões e viabilidade.

Ao Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva, pelo estímulo constante, abertura de oportunidades, liberdade para interlocução e discussão com os proponentes e projetistas citados neste trabalho, pelas inúmeras discussões técnicas e sugestões durante esses anos de trabalho colaborativo, meu muito obrigado.

Ao Centro de Tecnologia da Informação (CTI), pelo provimento dos recursos e ambiente para desenvolvimento dos trabalhos, sem isto este trabalho não seria possível.

Ao Dr. Izaque Alves Maia, pelas valiosas discussões e contribuições no embasamento deste trabalho, deixando claras as idéias e opiniões.

A Eng^ª. Tatiana Al Chueyr Pereira Martins, pelas importantes e refinadas discussões e sugestões na revisão deste trabalho.

Ao Dr. Pedro Yoshito Noritomi, pelas contribuições nas discussões técnicas sempre procurando enriquecer o trabalho com suas colocações e sugestões.

Ao Eng. Paulo Inforçatti Neto e Arnaldo Lixandrão, pelo apoio e disposição na editoração deste documento, sem o trabalho deles isso seria mais difícil.

Ao Msc. Geraldo Delgado Gonçalves Neto, pelas contribuições nas discussões referentes à metodologia utilizada neste trabalho.

Ao Dr. Ailton Santa Bárbara e Eng^o. Richard Luis Gallo, pelas discussões preliminares desse trabalho quando éramos todos aprendizes nestas tecnologias.

A rede Iberoamericana de biofabricação – BIOFAB/CYTED, que através de seus membros deram relevantes contribuições e sugestões no aprimoramento das técnicas de estruturação tridimensional de biomateriais.

Finalmente aos proponentes e pesquisadores dos 40 projetos conforme aqui classificados, que pronta e generosamente colaboraram nas importantes informações prestadas nas respostas ao questionário, entrevistas, e imagens relativas a aplicação, que sem isto este trabalho não seria possível, são eles;

Dr. Milton e Dra. Raquel Bugs, pesquisadores no CTI/ Campinas no projeto PRJ. 1,

Dra. Adriana Silva, pesquisadora associada ao CTI no projeto PRJ. 2,

Prof^a. Dra. Gabriela Celani e Juliana Matsubara, FEC-DAC/Unicamp no projeto PRJ. 3,

Thiago José Coser, Instituto de Artes/Unicamp, no projeto PRJ. 4,

Sônia Skoda, Instituto de Artes/USP, no projeto PRJ. 5,

Prof^a. Dra. Gabriela Celani e Érica Pinheiro, FEC-DAC/Unicamp no projeto PRJ. 6,

Prof^a. Dra. Gabriela Celani e Dra. Regiane Pupo, FEC-DAC/Unicamp no projeto PRJ. 7,

Prof. Dr. Eduardo Kazuo Sannomya, Universidade Metodista SP no projeto PRJ. 8,

Dr. Sergio Alex Kugland de Azevedo, diretor do Museu Nacional do RJ no projeto PRJ. 9,

Dra. Luciana B. de Carvalho, pesquisadora do Museu Nacional do RJ no projeto PRJ. 10,

Msc. Regina Kunzler e Prof. Dr. Gustavo Donatelli, UFSC/SC no projeto PRJ. 11,

Liciane Bertol, LdSM/UFRGS no projeto PRJ. 12,

Abel Chang, PUC/PR no projeto PRJ. 13,

Dr. Victor Pellegrini Mammana, pesquisador do CTI no projeto PRJ. 14,

Eng. Rodrigo Peixoto, bolsista do CTI, no projeto PRJ. 15,

Daniel Takanori Kemmoku, bolsista do CTI, no projeto PRJ. 16,

Msc. Sidney Cunha, pesquisador do CTI, no projeto PRJ. 17,

Msc. Elisângela P. Freitas, UNESP/Botucatu, no projeto PRJ. 18 e 19

Bruno Benneheim, da UNIP-SP, no projeto PRJ. 20

Dr. João Braga, vice-diretor do INPE e Luis A. Reitano, pesquisadores no projeto PRJ. 21,

Equipe Solid Edge-SAE/ EESC-USP, representada por Caio Sicchieri, no projeto PRJ. 22,

Equipe FEM/Unicamp-Fórmula SAE, representada por Bruno Pucci, no projeto PRJ. 23,

Msc. Thiago Rodrigues Dias Velho, FEM-DPM/Unicamp, no projeto PRJ. 24,

Equipe ECOCAR-Unicamp, representada por Augusto C. Sanchez, no projeto PRJ. 25,

Eng^o. José Antonio Resende Beiral, responsável pelo projeto AUXILIS no CTI, no PRJ. 26,

Equipe AeroDesign-FEM/Unicamp, representada por Cesar Laureti, , no projeto PRJ. 27,

Dr. César Oleskovics, cirurgião e fundador da empresa Bioparts, no projeto PRJ. 28,

Dr. Leandro S. Baccarin, cirurgião bucomaxilo, HSPE-IAMSPE no projeto PRJ. 29,

Dr. Aron J. Pazin Andrade e Juliana Leme, da Fundação Adib Jatene, no projeto PRJ. 30,

Dr. Aleksandro C. Almeida e Dr. Tarlei Botrel, ESALQ/Piracicaba, no projeto PRJ. 31,

Prof. Dr. Humberto Ferasoli Filho, da UNESP/Bauru, no projeto PRJ. 32,

Prof. Dr. Francisco Galvão Roland, da clínica Roland, no projeto PRJ. 33 e 34,

Breno Raizer, da FEM-DPM/Unicamp, no projeto PRJ. 35,

Msc. Priscila Marafon, da FO/USP, no projeto PRJ. 36,

Prof^a. Dra. Gabriela Celani e Luis Milan, FEC-DAC/Unicamp, no projeto PRJ. 37,

Prof. Dr. Giovanni A. P. Di Giacomo, UNIFESP, no projeto PRJ. 38,

Msc. Aristides Pavani, pesquisador do CTI responsável pelo experimento, projeto PRJ. 39,

Eng^o. Paulo Inforçatti, bolsista no CTI, no projeto PRJ. 40.

*“Faça-se, cumpra-se, seja louvada e eternamente glorificada a justíssima e amabilíssima
Vontade de Deus sobre todas as coisas. Assim seja”.*

São Josemaria Escrivá

Resumo

A Prototipagem Rápida (PR), ao longo dos últimos 20 anos, vem provendo inovação, redução de tempo e custo nas mais diversas aplicações, propiciando o surgimento de novos paradigmas, em diferentes setores de atividades. A PR tem como recurso principal a capacidade de construir rapidamente formas físicas complexas, difíceis ou mesmo impossíveis de serem construídas pelas tecnologias estabelecidas há mais tempo.

O presente trabalho avalia a aplicação da prototipagem rápida em 40 projetos de pesquisa, distribuídos em 18 áreas e subáreas do conhecimento. Essa avaliação, de caráter qualitativo é construída a partir dos pareceres dos proponentes desses projetos e da experiência do autor com as tecnologias PR utilizadas neste trabalho. Foram avaliados os benefícios do emprego da PR e o desempenho dos materiais em quatro classes de aplicações dos projetos: prototipagem visual (PV), prototipagem funcional (PF), ferramental rápido (FR) e manufatura rápida (MR).

A capacidade da PR em construir formas complexas é o grande benefício trazido aos projetos de pesquisa. Esse benefício é corroborado pelo bom desempenho das peças construídas com os materiais nylon/SLS, gesso/3DP e ABS/FDM, dentro das classes de aplicações. Para as necessidades apresentadas, relativas ao corpo e superfície das peças, é discutido o emprego de técnicas de pós-processamento. Para PV, a necessidade maior é evitar o amarelamento da superfície do nylon/SLS. Para PF, são necessidades o reforço mecânico das peças de nylon/SLS e ABS/FDM para solicitações dinâmicas e, também, reforço mecânico para peças de pequenas dimensões. É necessária também a planarização das superfícies para peças utilizadas em escoamento hidrodinâmico. Em FR, o uso dos três materiais foi aplicado em ferramental indireto ao invés do direto. Finalmente, nylon/SLS e ABS/FDM foram usados com sucesso em MR e isto, por si só, significa uma superação nas aplicações desses materiais.

Palavras-chave: Prototipagem Rápida, SLS, FDM, 3DP

Abstract

Over the last 20 years, Rapid Prototyping (RP) has provided innovation, time and cost reduction in diverse applications, enabling the emergence of new paradigms in different sectors. RP has as main feature the ability to quickly build complex physical forms which are difficult or even impossible to build using previous established technologies.

This study evaluates the application of rapid prototyping in 40 research projects, in 18 areas and subareas of knowledge. This qualitative assessment is based on the point of view of both the proponents of the projects and the author who has experience in the RP technologies employed in this work. The benefits of using RP and the materials performance were evaluated distributing the projects into four classes according to their applications defined by author: visual prototyping (VP), functional prototyping (FP), rapid tooling (RT) and rapid manufacturing (RM).

The RP ability of building complex forms was pointed out as the great benefit to all analyzed research projects. This benefit is confirmed by the good performance due to the application of the pieces built with nylon/SLS, gypsum/3DP and ABS/FDM within the classes of application. In this study we discuss the employment of post-processing techniques to solve some needs presented and regarding the pieces surface and body. For VP, the main need was to avoid the yellowing on nylon/SLS surfaces. For FP, the needs point to the mechanical strength of the nylon/SLS and ABS/FDM pieces for dynamic requests, as well as the mechanical strength of pieces of small dimension. In the analysis of FP projects, also, the planarization of the surfaces has been requested for hydrodynamic flow. Regarding RT, the three materials was employed as indirect RT instead direct RT. Finally, nylon/SLS and ABS/FDM were successfully used in RM, and this fact alone represents an overcome of the application of these materials.

Key words: Rapid Prototyping, SLS, FDM, 3DP

Sumário

Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xv
Acrônimos	xvi
Artigos Relacionados com esta Dissertação	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificativa	2
1.4. As Atividades de PR no CTI.....	3
1.5. Escopo do Trabalho.....	5
2. Prototipagem Rápida – Conceitos, Aplicações e Tecnologias.....	6
2.1. Conceitos.....	6
2.2. Tecnologias Comerciais de PR	8
2.2.1. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas em pó	9
2.2.2. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas líquidas.....	11
2.2.3. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas sólidas	12
2.3. Aplicações	14
3. Metodologia.....	18
3.1. Levantamento dos dados.....	18
3.2. Apresentação dos dados	19
3.3. Análise dos dados.....	19
4. Resultados	22

5. Discussão	65
5.1. Prototipagem Visual (PV)	65
5.2. Prototipagem Funcional (PF)	69
5.3. Ferramental Rápido (FR)	72
5.4. Manufatura Rápida (MR).....	74
6. Conclusão	77
6.1. Considerações finais e propostas para outros trabalhos.....	79
Referências Bibliográficas	81
Anexos	88
Anexo I. Definição das tecnologias (Volpato 2007).....	88
Anexo II. Endereço eletrônico dos fornecedores de equipamentos e materiais de PR.....	101
Anexo III. Questionário	102
Anexo IV. Formato de Ficha para Classificação do Projeto.....	106
Anexo V. Teses e Dissertações Concluídas dos Proponentes dos Projetos	107

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Representação das principais etapas do processo de PR (Volpato, 2007).</i>	6
<i>Figura 2 - Miniatura do 14-Bis. Peça monolítica, contendo partes móveis (hélice, rodas, e leme), construído no CTI.</i>	7
<i>Figura 3 - Limites dimensionais atuais (escala meso) e futuro dimensional das tecnologias PR. Escala macro: um avião autônomo de 28 metros de envergadura com partes construídas em PR e, posteriormente, coladas (Integração da Lockheed Martin). Escala micro: um sistema mecânico com engrenagens menores que 1mm de diâmetro. Escala nano: uma peça na forma de boi com as dimensões de um glóbulo vermelho.</i>	16

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matérias-primas em pó.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matéria-prima líquida</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matéria-prima sólida (bloco e fio)</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 4- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matéria-prima sólida (folhas)</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 5- Aplicações de PR em setores de atividades</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 6 - Parâmetros de avaliação dos materiais das peças</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 7 - Atribuição aos projetos: código, título, classe de aplicação de PR, material e área do conhecimento</i>	<i>23</i>

Acrônimos

3D – Três Dimensões

3DP – *3-Dimensional Printer*

ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

AEB – Agência Espacial Brasileira

ATM – Articulação Temporomandibular

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – Computer Aided Manufacturing

CMYK – Sistema de cores formado por Cyan (C), Magenta (M), Yellow (Y) e Black(K)

CNC – *Computer Numeric Control*

CTI - Centro de Pesquisas Renato Archer

CTI – Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

CVT – *Continuously Variable Transmission*

DLC – *Diamond Like Carbon*

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

DNA - *Deoxyribonucleic acid*

ECOCAR – Maratona Universitária da Eficiência Energética

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EESC-SC – Escola de Engenharia de São Carlos

ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FO-USP – Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo

FR – Ferramental Rápido

HBDF – Hospital de Base do Distrito Federal

HBDF – Hospital do servidor Público do Estado

IA – Instituto de Artes

IJP – *Ink Jet Printer*

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais

InVesalius – *Software* público para Análise de Imagens Médicas

ISS- *Internacional Space Station*

LdSM – Laboratório digital de Sistemas de Manufatura

LENS – *Laser Engineered Net Shaping*

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MEMS – *Micro Electrical Mechanical Systems*

MJM – Multi-Jet Modeling

MR – Manufatura Rápida

NIP – Nuvens de Interação Proteica

OLPC – *One Lap Top per Child*

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

pdb – *Protein Data Bank*

PDP – Processo de Desenvolvimento de Produto

PF – Protótipo Funcional

PLT – *Paper Lamination Technology*

PMMA – Polimetilmetacrilato

PR – Prototipagem Rápida

PRJ. – Projeto

ProEXP – Prototipagem em Experimentos Científicos

ProIND – Prototipagem na Indústria

ProMED – Prototipagem na Medicina

PUC – Pontifícia Universidade Católica

PV – Protótipo Visual

RMPD – *Rapid Micro Product Development*

ROSCOSMOS – *Russian Federal Space Agency*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

SLA – *Stereolithography*

SLM – *Selective Laser Melting*

SLS – *Selective Laser Sintering*

SUS – Sistema Único de Saúde

TC – Tomografia Computadorizada

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNESP – Universidade Estadual de São Paulo

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UNIFESP – Universidade Federal do Estado de São Paulo

USP – Universidade de São Paulo

UV – Ultravioleta

Artigos Relacionados com esta Dissertação

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; SOUZA, W. J.; OLIVEIRA, M. F.; CAMARGO, A. P., Desenvolvimento de protótipos de microaspersores utilizando prototipagem rápida e torneamento mecânico. In: REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL. **Submetido.**

BONALDO, T.; GRANJA, A. D.; CELANI, G.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, J. V. L. , Prototipagem rápida no processo de produção digital de edificações. In: WORKSHOP BRASILEIRO – GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETOS NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 8, São Paulo, 2008. **Anais.** Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura, n.p.

BUGS, R. K. B; OLIVEIRA, M. F.; PASCHOAL, G. H. L.; MAIA, I. A.; SILVA, J. V. L.; BUGS, M. R. Impressão 3D de macromoléculas biológicas por prototipagem rápida: uma ferramenta de inovação tecnológica para o ensino de bioquímica e o desenvolvimento de biotecnologia no país, *Biochemistry and Molecular Biology Education*. **Submetido.**

BUGS, R. K. B; SILVA, J. V. L.; BUGS, M. R.; MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; PASCHOAL, G. H. L.; MARTINS, T. A. C. P, Impressão 3D de Macromoléculas Biológicas por Prototipagem Rápida: uma ferramenta de inovação tecnológica para o ensino de bioquímica e o desenvolvimento de biotecnologia no país, 2008 **Projeto:** Brasília, XXIII Prêmio Jovem Cientista, Educação para Reduzir as Desigualdades Sociais, Popularização da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Submetido**

CELANI, G.; PUPO, R.; PICCOLI, V.; SILVA, J.V.L; OLIVEIRA, M. F.; JARDINI, A.; CANCHERINI, L.; MARQUES, R. Playing doll houses in the museum: the use of 3D scanning and rapid prototyping techniques for producing scale models of sculputures In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA, 14, Cyprus, 2008. **Anais.** International Society on Virtual systems and multimedia, 2008, p. 229-233.

CELANI, G.; PUPO, R.; PICCOLI, V. Digital fabrication and art-exhibition design: a case study. In: Al-Qawasmi, J.;Chiuini, M. A. e El-Hakim, S. – Digital media and its applications in cultural heritage. Aman: CSAAR Press, novembro 2008, 563p, p. 413-428.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; NORITOMI, P. Y.; SILVA, J. V. L., Application of rapid manufacturing to build artifacts for using in microgravity environment. An International Space

Station case. In: VIRTUAL AND RAPID MANUFACTURING – VRAP, 3, Leiria, 2007. **Anais**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, p.559-562.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SAURA, C. E.; SILVA, J. V. L., NORITOMI, P. Y. Rapid Manufacturing – A tool to support experiments in the international space station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAD/CAM ROBOTICS AND FACTORIES OF THE FUTURE – ISPE, 23, Granada, 2008. **Anais**. Granada, International Society for Production Enhancement, n. p.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SAURA, C. E.; SILVA, J. V. L., NORITOMI, P. Y. Rapid manufacturing of a chamber utilized in a microgravity experiment aboard the international space station. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICS ENGINEERING - COBEM, 19, Brasília, 2007. **Anais**. Brasília, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, n.p.

ROCKENBACK, M; BERTOL, L.; SILVA, F. P.; ROLDO, L.; Análise de biomodelos fabricados por usinagem e prototipagem rápida utilizando digitalização tridimensional a laser. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20, FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA URS, 17, Porto Alegre, 2008. **Resumos**: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, res. 151

SALGADO, C. L; SANCHEZ, E. M.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, J. V. L., ZAVAGLIA, C. A. Evaluation of bioabsorbable polylactone used in rapid prototyping for medical application. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ÓRGÃOS ARTIFICIAIS E BIOMATERIAIS, 5, Ouro Preto, 2008. **Resumos**: Belo Horizonte, Sociedade Latino Americana de Biomateriais, Engenharia de Tecido e Órgãos Artificiais, Res C506.

SANCHEZ, A. C.; SANCHEZ, E.M.S., MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SALGADO, C. L.; ZAVAGLIA, C. A. C. Caracterização da poliamida em função das características de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser. In, JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CENPRA, 9, Campinas, 2007. **Resumos**. Campinas, Centro de Pesquisas Renato Archer, 2008. p. 87-89.

SANCHEZ, E. M. S; SALGADO, C. L.; CAVANI, C. S. ; OLIVEIRA, M. F ; SILVA, J. V. L.; ZAVAGLIA, C. A. C. Evaluation of mechanical properties of polyamides used in rapid prototyping and manufacturing. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, Foz do Iguaçu, 2006. **Anais**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências do Materiais, n.p.

SANCHEZ, E. M. S; SALGADO, C. L.; SILVA, J. V. L.; MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; ZAVAGLIA, C. A. C. Morphological and mechanical evaluation of polyamides used in rapid prototyping after accelerated aging. In: 15th WORLD FORUM ON ADVANCED MATERIALS, POLY CHAR, 15, Búzios, 2007. **Resumos**. Rio de Janeiro: Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, 2007. res. PP 27.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Motivação

O autor, durante os últimos 10 anos, vem trabalhando com tecnologias de Prototipagem Rápida (RP) em programas de difusão e desenvolvimento de aplicações com tecnologias 3D. Esses programas foram iniciados e está em operação no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – CTI (CenPRA 2007) e são denominados ProIND, ProMED e ProEXP , que significam, respectivamente, prototipagem rápida para a indústria, medicina e experimentos científicos. O autor, nesse período, teve como responsabilidade manter os equipamentos operacionais e responder pela produção das estruturas físicas 3D. Esta foi uma oportunidade para conhecer as tecnologias nos seus detalhes pó meio da prática e interação com desenvolvedores e fornecedores, podendo comparar o que é prometido em relação ao que é viável. O ProEXP, iniciado em meados de 2007, foi criado para organizar a demanda, gerada inicialmente no bojo do ProIND e do ProMED, pelos proponentes que tinham na pesquisa científica o estímulo para aplicações da PR. Com a criação do ProEXP e as ações que se sucederam para difundí-lo no meio acadêmico, essa demanda vem crescendo e vislumbra-se um forte crescimento para os anos vindouros. Essas ações consistiram, além da discussão dos projetos e da construção das estruturas 3D com PR, de apresentações de palestras em universidades, participação em congressos científicos, publicações de resumos e artigos, e demais atividades inerentes ao meio acadêmico. A principal motivação para redigir esta dissertação vem do desejo de aprimoramento pessoal e profissional para contribuir para o pleno aproveitamento dessas tecnologias.

Ao expor a experiência com as aplicações da PR em projetos de pesquisa, baseados em estudo de casos, o autor, com o apoio de todos os pesquisadores proponentes, espera contribuir para a difusão tecnológica, que é o pressuposto dos programas do CTI acima mencionados.

1.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar de forma qualitativa o emprego da PR em quarenta projetos de pesquisa, em diferentes áreas do conhecimento, a partir das informações fornecidas pelos proponentes dos projetos. O cumprimento do objetivo principal passa pelos seguintes objetivos secundários:

1. Propor e aplicar uma metodologia para a coleta e organização de dados;
2. Identificar os benefícios trazidos pela PR aos projetos de pesquisa;
3. Elencar itens de avaliação de desempenho dos materiais de PR;
4. Realizar a avaliação segundo os benefícios e desempenho dos materiais.

1.3. Justificativa

Atualmente as atividades do CTI empregando tecnologias de PR constituem-se num projeto-piloto de expansão da aplicação dessas tecnologias em projetos de pesquisa em diferentes áreas do conhecimento. A avaliação dos resultados desse projeto-piloto é o primeiro passo para a proposição de um planejamento estratégico para sua continuidade e disseminação no país.

A expansão da PR vem ocorrendo fortemente em todo mundo e o Brasil não está acompanhando essa expansão, situação esta que pode comprometer sua competitividade nos setores industrial, médico e acadêmico.

A presente dissertação expõe e analisa aplicações das tecnologias PR dentro de estudos de caso, realizados no Brasil. A difusão baseada em estudos de caso visa criar interesse nessas tecnologias.

A divulgação via uma dissertação de mestrado, dos benefícios e necessidades dos proponentes servirá para o desenvolvimento de programas de qualidade no atendimento aos projetos e, também, como auxílio à formulação de planejamentos estratégicos e elaboração de políticas públicas de apoio à inovação.

O presente trabalho está em plena conformidade com a missão institucional do CTI.

1.4. As Atividades de PR no CTI

O Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – CTI é uma unidade de pesquisa do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, criada em dezembro de 1982 com a finalidade de promover a pesquisa científica e o desenvolvimento de tecnologia da informação. O CTI, desde 1997, com a aquisição de um equipamento de prototipagem rápida SLS, que começou a operar em 1999, vem trabalhando para difundir, apoiar e criar planos de ações para o emprego da prototipagem rápida no Brasil como ferramenta para o desenvolvimento tecnológico. Colocado em operação o equipamento, a primeira atividade foi difundir a tecnologia entre as empresas através de apoio tecnológico no desenvolvimento de produtos, no que tange às primeiras etapas da cadeia desse desenvolvimento que é o uso de tecnologias 3D virtual para a concepção do projeto e a PR para comprovação das idéias na forma física. Quase que paralelamente e em sintonia com a tendência mundial na época, iniciou-se a construção de réplicas de partes ósseas do corpo humano. Este foi o início do projeto (hoje denominado programa) ProMED - Prototipagem Virtual 3D e Rápida para a Medicina que teve seu fortalecimento e cunho estratégico com o lançamento, pelo CTI, do *software* livre e público *InVesalius*, hoje em sua segunda versão (2.1).

O *software InVesalius* tem sido de grande importância não apenas para diagnóstico e planejamento cirúrgico virtuais 3D como, também, indutor do emprego dos biomodelos físicos construídos com prototipagem rápida. Com estes biomodelos físicos têm sido feitos treinamentos de osteotomias e parafusamento de implantes em biomodelos, modelagem personalizadas de placas de titânio e confecção de moldes para a geração de próteses de polimetilmetacrilato (PMMA), utilizados para reparação de perdas ósseas cranianas.

As biomodelagens virtual 3D e física no ProMED já são feitas em bases rotineiras e prontas para transferência ao Serviço Único de Saúde - SUS. Grande parte da demanda tem sido gerada por cirurgias bucomaxilofaciais para correções de graves anomalias crânio-faciais, o que resulta na inclusão social de milhares de portadores dessas anomalias. Desdobramentos do ProMED têm se dado nas áreas de cirurgia veterinária, medicina legal, antropologia e arqueologia.

À prototipagem rápida e ao *software InVesalius*, foram acrescentados outros dois projetos de pesquisa. O primeiro é o BioCAD, que viabiliza, através de simulações pelo método de elementos

finitos e ferramentas CAD, a confecção de implantes de alto desempenho anatômico e funcional. O segundo projeto trata da estruturação tridimensional de biomateriais e *scaffolds*, com estudos exploratórios utilizando máquinas comerciais e experimentais.

Ao longo da sua existência, o ProMED forneceu, gratuitamente, para hospitais particulares e públicos, aproximadamente 1300 biomodelos. A comunidade do *software* público *InVesalius* conta com mais de 1700 membros de 49 países. Cinquenta teses de pós-graduação foram finalizadas ou estão em andamento. Vislumbra-se para o futuro o início de atividades em bio-impressão de estruturas complexas como tecidos e órgãos. Com amplo leque de projetos e com serviço de apoio cirúrgico, o ProMED passou a ser denominado de programa (antes projeto) do CTI para a área de saúde.

No ano de 2006 dois acontecimentos marcaram as atividades do CTI em PR. O primeiro foi o reconhecimento dessas atividades como Projeto Estruturante do Plano Diretor do CTI 2006-2010. O segundo acontecimento foi o sucesso na busca de apoio para um projeto multiusuário de equipamentos (embora não aprovado), submetido pelo CTI à FINEP, intitulado “Prototipagem Rápida e Virtual para a Pesquisa Multidisciplinar em Grandes Áreas do Conhecimento”. Num período de três semanas, 230 doutores de diferentes instituições brasileiras, públicas e privadas, do setor industrial e acadêmico, de diferentes áreas do conhecimento e de diferentes estados brasileiros e do exterior assinaram declarações de apoio ao projeto multiusuário. Um terço destes pesquisadores signatários teve algum tipo de vínculo ou parceria com o CTI no tocante à prototipagem virtual e/ou rápida. Esta resposta mostrou uma demanda latente no Brasil para acesso à PR como ferramenta de auxílio a experimentos científicos.

Até o início de 2007, projetos de pesquisas fora da área médica estavam sendo apoiados no âmbito do ProIND com o fornecimento gratuito de protótipos. Um marco importante no uso da prototipagem rápida em experimentos científicos foi a sua utilização na construção de um sistema complexo, com diversas peças, algumas delas móveis, para realização de um experimento que ocorreu (03/2006) a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS). Esse experimento foi realizado no bojo da Missão Centenário, que levou o primeiro astronauta brasileiro – o tenente coronel Marcos Pontes – ao espaço. Assim, se a prototipagem rápida permitiu o sucesso do envio de um experimento ao espaço, vislumbrou-se que muito poderia ser feito em terra. Desta forma foi instituído o programa ProEXP – Prototipagem Rápida para apoio em experimentos científicos.

O programa ProEXP incorpora aplicações dessas tecnologias em todas as áreas do conhecimento, exceto aquelas que se encontram dentro do âmbito do ProMED. O ProEXP tem catalogados 40 projetos apoiados, dentre concluídos e em andamento, muitos deles originados recentemente, no ano de 2007. Esses projetos envolvem desde artes plásticas até aplicações em atividades aeroespaciais.

Finalmente, vale salientar que o ProIND, com recursos obtidos na prestação de serviços tecnológicos em PR para empresas, vem dando operacionalidade não somente a si mesmo como ao ProMED e ProEXP. Esse arranjo, combinando num mesmo espaço físico atividades de serviços e pesquisa, interagindo com profissionais da indústria, saúde e academia, convergindo medicina com engenharia, tem se revelado como um ambiente profícuo para o surgimento de novas linhas de pesquisa e inovação.

1.5. Escopo do Trabalho

Dois fatores foram determinantes para a realização deste estudo das aplicações da PR em projetos de pesquisa: os recursos - equipamentos e matéria-prima e a gestão desses recursos. O foco deste trabalho – estudo das aplicações de PR - está relacionado com o primeiro fator tendo em vista a dedicação do autor, nos últimos 10 anos, na operação dos equipamentos, desenvolvimento de novas aplicações, processos e materiais e formação técnica de pessoal. O desenvolvimento de processos e materiais é, também, um assunto de suma importância, inclusive, para novas aplicações. No entanto, assim como a gestão, foge do escopo desse trabalho, mas é abordado de forma sumária na secção 6.1 que trata de sugestões para próximos trabalhos.

Capítulo 2

2. Prototipagem Rápida – Conceitos, Aplicações e Tecnologias

2.1. Conceitos

A Prototipagem Rápida (PR) é uma expressão que designa um conjunto de tecnologias aditivas baseadas na construção, camada-a-camada, de estruturas tridimensionais físicas, a partir de seus respectivos modelos digitais. O modelo digital é, primeiramente, fatiado e as suas secções transversais são reproduzidas fisicamente por processos automatizados de construção camada-a-camada em matérias-primas na apresentação de pó, sólido ou líquido (Figura 1).

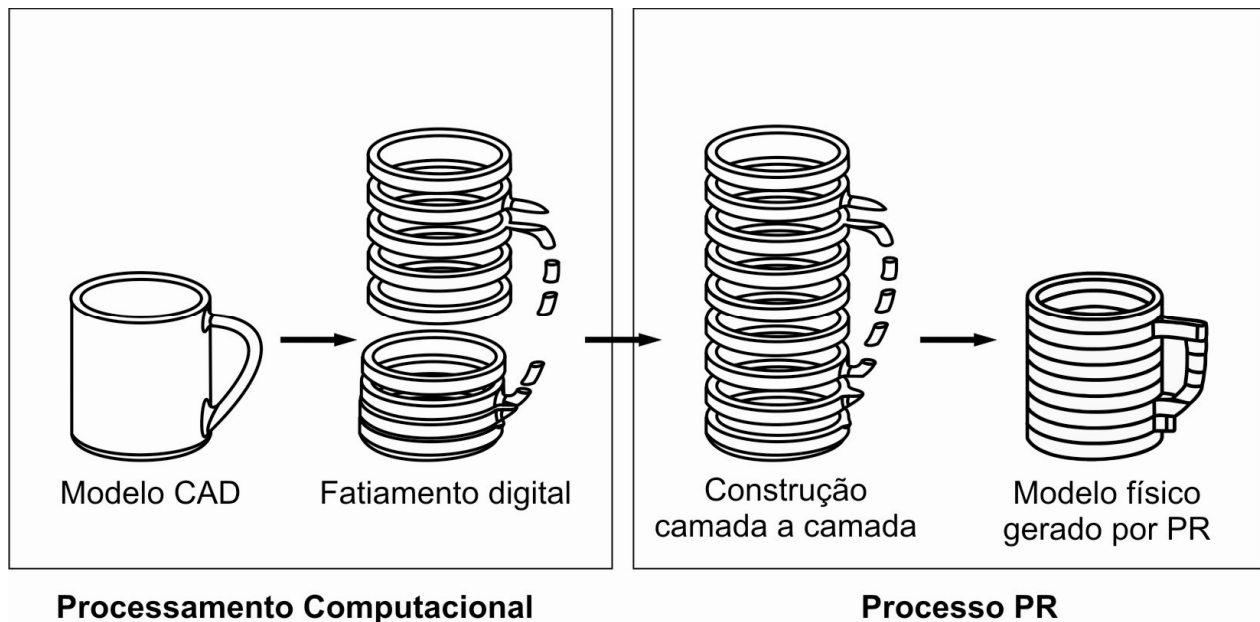


Figura 1 - Representação das principais etapas do processo de PR (Volpato, 2007).

As tecnologias PR permitem que essas estruturas físicas 3D, comumente conhecidas como protótipos rápidos, sejam construídas sem emendas, com geometrias complexas e contendo partes móveis (Figura 2), difíceis ou mesmo impossíveis de serem obtidas pelas tecnologias de construção estabelecidas há mais tempo.

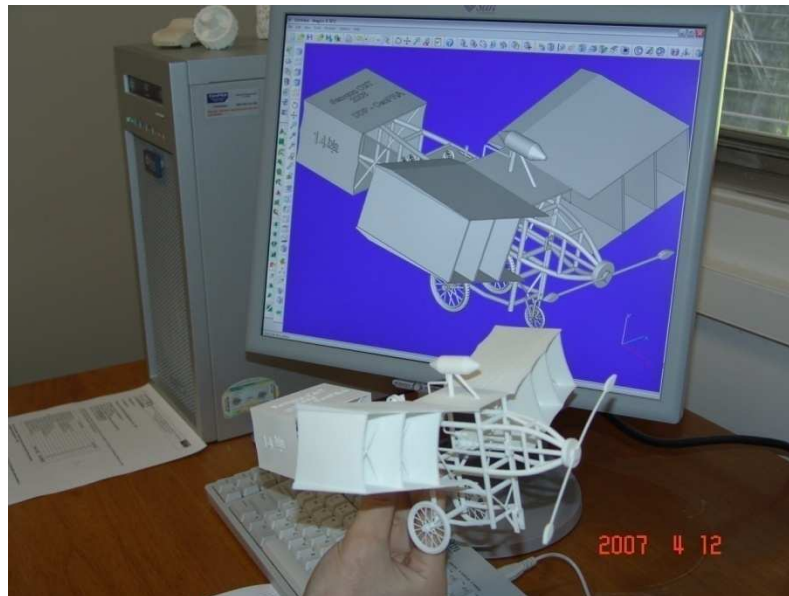


Figura 2 - Miniatura do 14-Bis. Peça monolítica, contendo partes móveis (hélice, rodas, e leme), construído no CTI.

A PR vem adquirindo crescente importância, com aplicações em diversos setores de atividades e áreas do conhecimento. Ao longo do tempo, outros nomes surgiram dado que tanto desenvolvedores das tecnologias quanto seus usuários buscaram expressões que consideravam mais apropriadas para melhor defini-las, traduzindo de forma sucinta toda a potencialidade que oferecem. Esses nomes podem ser divididos em dois grandes conjuntos. O primeiro conjunto refere-se a nomes que buscam expressar o modo de funcionamento dessas tecnologias e que são discutidos por Tay, Evans e Edirisinghe (2003). São eles: impressão tridimensional (*3D Printing*), fabricação por camadas (*layer fabrication*), manufatura por camadas (*layer manufacturing*), fabricação de formas livres (*freeform fabrication*) e o adotado por Tay, Evans e Edirisinghe (2003) – formação livre de sólido (*solid freeforming*). O segundo conjunto são nomes que se baseiam nas aplicações: ferramental rápido (*rapid tooling*) (Hilton e Jacobus, 2000), manufatura rápida (*rapid manufacturing*) (Hopkinson, Hague e Dickens, 2006; Pham e Dimov, 2001). Como a expressão prototipagem rápida já se estabeleceu como um nome geral (Volpato, 2007; Noorani, 2006; Kamrani e Nasr, 2006; Chua, Leong e Lim, 2003; Cooper 2001), iremos, igualmente, adotá-la aqui nas abordagens mais gerais quando não se pretende destacar qualquer especificidade das tecnologias, seja de princípio de funcionamento ou aplicação.

O ferramental rápido divide-se em indireto e direto. No ferramental indireto a estrutura 3D é a primeira de uma sequência de moldes utilizados para a construção de peças por tecnologias de moldagem – fundição, injeção, eletroformação, estamparia. No ferramental direto, apenas o molde primário, o produzido por PR, é utilizado. Em outras palavras, não há uma sequência de moldes mas um único molde. A manufatura rápida abandona o conceito de protótipo e molde e coloca a PR como um recurso para produção direta da peça, na sua forma e material final de uso.

As tecnologias de PR podem não ser suficientes para atender às aplicações e, desta forma, requerem pós-processamento que são tratamentos com tecnologias convencionais aplicados às peças para conferir-lhes algum tipo de propriedade adicional. Dentro do pós-processamento fazemos uma distinção entre acabamento e funcionalização. Acabamento é o tratamento que se dá para dotar a superfície com algum elemento estético - cor, textura e brilho. Na funcionalização, o que se busca é dotar a superfície com propriedades físico-químicas para aplicações diversas inclusive para acabamento.

2.2. Tecnologias Comerciais de PR

Até 2003, segundo Kai (2003), existiam mais de vinte tecnologias comerciais de PR. Essas tecnologias têm em comum (com exceções que serão destacadas na próxima seção) cinco elementos básicos que funcionam sincronamente sob o comando do computador:

1. Uma plataforma de construção que se desloca na direção vertical (eixo z);
2. Um sistema de alimentação da plataforma de construção com a matéria-prima;
3. Feixes aglutinantes - feixes para aglutinação da matéria prima - luz (laser, lâmpada UV), elétrons ou líquido;
4. Respective sistemas de controle e varredura horizontal (plano xy) dos feixes aglutinante - jogos de espelhos, jogos de magnetos e uma cabeça impressora;
5. Um computador munido de um *software* de fatiamento dos modelos virtuais e um software de controle automatizado do processo.

Do ponto de vista de matéria-prima, as tecnologias PR utilizam dois tipos básicos de material – o material de construção da peça e o material de suporte, também chamado de material de sacrifício, pois é utilizado apenas para sustentar a estrutura 3D enquanto ela está sendo construída, sendo assim, removido em etapa de pós-processo para liberar a peça. A potencialidade de uma tecnologia PR relativa aos fatores complexidade de forma e dimensões está relacionada à facilidade com que o material de suporte é retirado, sem comprometer a integridade física da peça.

A descrição detalhada dessas tecnologias, mostrando como os elementos básicos acima funcionam, está amplamente divulgada em sites na internet que tratam da PR, como no site dos fabricantes dos equipamentos (Anexo II). Diagramas mostrando o princípio de funcionamento dessas tecnologias, com explicações sucintas baseadas no trabalho de Volpato (2007) são apresentadas no Anexo I. A presente revisão bibliográfica, além de explicar os princípios gerais das tecnologias de PR, discute, na próxima seção, as suas potencialidades dentro de classificações baseadas na apresentação do fornecimento da matéria-prima. Esta abordagem é devido ao fato de que a apresentação e não a composição química da matéria-prima é que define a configuração geral das máquinas de PR. Isto é, uma máquina de PR pode trabalhar com matérias-primas na apresentação de pó, mas de composições químicas diferentes.

2.2.1. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas em pó

As tecnologias de PR que utilizam pó como matéria-prima (Tabela 1), têm quatro características básicas: (1) o suporte da peça é o próprio pó; (2) o pó é espalhado e comprimido por um rolo sobre uma plataforma de construção que vai ficando confinado num volume geralmente de secção quadrada; (3) a atmosfera de processo é inerte; (4) Temperaturas acima da ambiente são aplicadas em diferentes regiões dos equipamentos, exigindo condições especiais de controle devido aos compromissos térmicos que devem ser atendidos para evitar problemas como empenamento da peça e degradação de matéria-prima (caso especial de polímeros).

Tabela 1- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matérias-primas em pó

Pó (suporte: o próprio pó, camada formada e compactada por um rolo)				
Tecnologia PR	feixe de aglutinação	controle de varredura	atmosfera de processo	matéria-prima
SLS (SLSind, DMLS, SLM)	laser	espelhos	nitrogênio	polímero, compósito, metal, cerâmica
LENS*	laser	espelhos	nitrogênio	metal
EBM	elétrons	magnetos	vácuo	metal
3DP	adesivo liq.	IJP	ambiente	cerâmica
*Excessão. Na LENS o pó não é espalhado e comprimido por um rolo, mas dispensado por bicos injetores arranjados coaxialmente com o feixe de laser.				

A tecnologia PR a base de pó mais estabelecida é a SLS (*Selective Laser Sintering*), desenvolvida pela empresa DTM que posteriormente foi incorporada à empresa 3D Systems. A SLS se estabeleceu, inicialmente, pelo uso da poliamida (nylon), visando principalmente a prototipagem conceitual. Ao longo do tempo foram desenvolvidas outras matérias-primas, poliméricas ou compósitos, para conferir maior rigidez ou maior maleabilidade aos protótipos.

Visando aplicar a tecnologia dentro da cadeia de produção de manufaturados, um grande esforço foi e vem sendo feito em ferramental rápido a base de metal. Daí emergiram duas técnicas de produção de peças metálicas: SLS indireto e SLS direto, explicados a seguir. No primeiro, o pó consiste de grãos metálicos misturados ou revestidos com um polímero que serve como aglutinante (*binder*) do pó metálico. A estrutura 3D construída com este pó bi-componente é aquecida para vaporizar o polímero (*debinder*) deixando a estrutura porosa para, posteriormente, ser submetido a processo de densificação por sinterização ou por infiltração com outro metal de menor ponto de fusão. Segundo Shiomi et. al. (1999), as etapas de remoção do polímero tomavam muito tempo e as peças não tinham precisão dimensional, o que levou ao desenvolvimento da SLS direto em que a sinterização é feita diretamente com pó metálico (sem aglutinante). O desenvolvimento da técnica SLS direto foi feita pela empresa EOS GmbH que a denominou DMLS (Direct Metal Laser Sintering) (Khaing, Fuh, Lu, 2001). Com vistas ao aumento da densificação das estruturas 3D, foi desenvolvida a técnica SLM (*Selective Laser Melting*) em que o feixe de laser funde, ao invés de sinterizar, o pó metálico (Merçelis e Kruth, 2006). Dentro do âmbito das tecnologias que utilizam laser para fundir pó metálico se encontra a

tecnologia LENS (Laser Engineered Net Shaping, Optomec, Inc.) (Krishna, Bose e Bandyopadhyay et. al., 2007). A tecnologia LENS é exceção entre as que utilizam pó, pois não utiliza espalhamento e compressão do pó e o suporte, neste caso, é a própria peça em construção. Na LENS, o pó é suprido por bicos especiais dispostos coaxialmente com o feixe de laser. Do ponto de vista de aplicações, duas características da LENS não são encontradas nas demais tecnologias PR, são estas: a construção de peças ocas e reparos de peças já prontas.

Com a utilização intensiva de laser na sinterização/fundição de pó metálico foi cunhada a expressão *Laser Forming* (Dearden e Edwardson, 2003; Santos et. al., 2006). Uma tecnologia de PR baseada na fundição de pós metálicos que não utiliza laser é a EBM (Electron Beam Manufacturing) que funde metais seletivamente, utilizando feixe de elétrons o qual requer operação dentro de uma câmara de vácuo (Rännar, Glad e Gustafson, 2007).

Finalmente, dentro do escopo das tecnologias de PR que utilizam pó, tem-se a tecnologia 3DP. Se tomadas as características outras que o uso de pó como matéria-prima, ela poderia ser tratada como uma tecnologia a parte das demais. Isto porque, ao invés de um feixe de laser como agente aglutinador de pó, ela utiliza jatos de líquido, dispensados por uma cabeça jato-de-tinta. Também, ao invés de operar a temperatura elevada, ela opera a temperatura ambiente. No entanto, as peças, dependendo da sua geometria, são frágeis, podendo quebrar quando retiradas da máquina e, assim, elas precisam ser infiltradas com adesivo líquido. Se a fragilidade é grande devido à geometria da peça, o equipamento tem um recurso para a geração de suporte, geometricamente estruturado, com o próprio pó. A 3DP trabalha com pós cerâmicos e tem sido usada geralmente para prototipagem visual e ferramental rápido (Dimitrov et. al., 2006).

2.2.2. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas líquidas

Os líquidos utilizados como matérias-primas nessas tecnologias PR (Tabela 2) são resinas fotossensíveis. Uma vantagem dessas tecnologias, comparadas com as tecnologias baseadas em pó é que elas operam a temperatura e atmosfera ambientes, facilitando o controle de processo e dispensando instalações especiais. Outra vantagem é que, não utilizando pó, o ambiente ao redor não é contaminado por particulado, evitando, assim, gastos com higiene e segurança. Essas condições operacionais, somadas à oferta de resinas dentro de cartuchos que as protegem da fotodecomposição, e o operador de vapores tóxicos, estimulam os desenvolvedores dessas

tecnologias a produzirem equipamentos *benchtop* que podem ser usados em salas convencionais. Uma possível limitação para uso nessas salas está no pós-processamento para retirada do suporte. Na IJP-polyjet (Objet) o suporte é retirado com jatos de água enquanto que na IJP-Invision (3D systems) o suporte é retirado com aquecimento em forno. As duas tecnologias se enquadram dentro da família Multi-Jet Modeling (MJM).

Tabela 2- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matérias-primas líquidas

Líquido (fotopolímero) (usa suporte, temperatura e atmosfera ambiente)			
Tecnologia PR	Feixe de aglutinação	Sistema de controle do feixe aglutinante	Suporte
SLA	Luz (laser)	Espelhos	Matéria prima
IJP (PolyJet)	Luz (lâmpada.)	IJP	Outro material
IJP (InVision)	Luz (lâmpada)	IJP	Outro material

Como não é possível sustentar as peças em líquido, todas essas tecnologias geram suporte automática e simultaneamente à construção das peças. A diferença é que na SLA (*Sterolithography*, 3D system), o suporte (finas estacas) é construído com o mesmo material das peças, enquanto que nas demais tecnologias o suporte é construído com material diferente. As cabeças injetoras das tecnologias IJP são, diferentemente da cabeça injetora da tecnologia 3DP, utilizadas para injetar o material estrutural e de suporte. Na tecnologia 3DP, como visto anteriormente, o material estrutural e o suporte é o próprio pó. A cabeça injetora da 3DP libera apenas o aglutinante.

2.2.3. Tecnologias PR que utilizam matérias-primas sólidas

Pelo fato das matérias-primas sólidas terem apresentações variadas, implicando na concepção da tecnologia, elas foram agrupadas em duas categorias: (i) as que são fornecidas na forma de fio e são extrudadas por um bico injetor após serem fundidas com aquecedores a base de micro resistências elétricas (Tabela 3); e (ii) aquelas que são fornecidas na forma de folhas (Tabela 4). Dentro da categoria de material extrudado tem-se as duas formas de matérias-primas: em fio e em bloco. A tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*, Stratasys Inc.) utiliza fio como matéria-prima, que é suprido na forma de um carretel lacrado e que, portanto, apresenta riscos menores para o processo e manuseio que as matérias-primas na forma de pó ou líquido acima mencionado. Outra vantagem é que o fio é constituído por material que não se degrada

mesmo sob processo, com estabilidade termo-química maior que os materiais que constituem a matéria-prima em pó e líquido. Em consequência de sua segurança e praticidade a FDM é considerada uma tecnologia que pode ser utilizada em escritório.

Tabela 3- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matéria-prima sólida (bloco e fio)

Sólido: blocos ou fio de polímeros				
Tecnologia PR	Forma em que o material é dispensado	Forma da matéria-prima sólida	suporte	Natureza química da matéria prima
IJP (Thermojet)	sólido fundido	bloco	matéria-prima	cera, termopolímeros
IJP (benchtop)	sólido fundido	bloco	diferente	polímero
FDM	sólido fundido	fio	diferente	polímero

Diferentemente do que ocorre em todos os processos descritos anteriormente, nas tecnologias que utilizam folhas como matéria-prima, a definição da seção transversal da estrutura 3D, o empilhamento e a adesão das camadas não ocorrem em uma única etapa, isto é, na etapa da incidência do feixe aglutinante. Provavelmente, pelo fato de que tanto o empilhamento como a colagem são feitos mecanicamente (este último utilizando uma termoprensa), as superfícies não apresentam bom acabamento e, portanto, precisam ser lixadas e resinadas. A técnica de corte das folhas pode, também, influenciar no acabamento da superfície. Na tecnologia LOM (*Laminated Object Manufacturing*, Cubic Technology Inc.) o corte das folhas é feito com um feixe de laser enquanto que na tecnologia PLT (*Paper Lamination Technology*, Kira Corporation Ltd.) o corte é feito com estilete.

Tabela 4- Características gerais das tecnologias PR que utilizam matérias-primas sólidas (folhas)

Sólido: com forma de folha			
Tecnologia PR	Tecnologia de corte	Tecnologia de colagem	Matéria-prima
LOM	Laser	Adesivo seguido de termocompressão	Madeira, polímero, metal, papel
PLT	Estilete	Adesivo seguido de termocompressão	Madeira polímero, metal, papel

2.3. Aplicações

As áreas de aplicação da PR estão organizadas na Tabela 5 dentro de quatro grandes setores de atividades: acadêmico, saúde, indústria e serviços.

Tabela 5-Aplicações de PR em setores de atividades

Academia - P&D e ensino	Saúde - Cirurgias
Arqueologia Paleontologia Geologia Antropologia Biologia molecular Engenharia Matemática	Medicina Veterinária Odontologia Bioengenharia
Indústria - PDP	Serviços - Design
Automobilísticas Aeroespacial Eletrodoméstico Jóias e brindes Embalagens	Artes Arquitetura

O grande esforço de marketing das empresas desenvolvedoras das tecnologias de PR está centrado nos setores de maior e mais rápido retorno econômico que podem ser organizados nesta ordem: indústria, saúde, serviços e academia. A indústria utiliza a PR no bojo do processo de desenvolvimento de produto (PDP) e ferramentaria (construção de moldes com ferramental rápido) buscando redução de tempo e custos. Na área de saúde, a PR se destaca na produção de modelos físicos que são réplicas em tamanho real de partes do corpo de pessoas ou animais. Essas réplicas, chamadas de biomodelos, são utilizadas para diagnóstico, planejamento e treinamento cirúrgico e, também, para a construção de implantes personalizados ou *scaffolds* (Hollister 2005) para crescimento tecidual. Implantes personalizados e *scaffolds* são temas emergentes de pesquisa em bioengenharia. Na área de serviços, destaca-se a área do design, que inclui as artes e a arquitetura, com grandes implicações no processo de desenvolvimento de produto (PDP) das indústrias. Finalmente, tem-se a academia que, continuamente, busca novas ferramentas para aprimorar as suas atividades de P&D, gerando, em consequência, novas demandas para o aprimoramento tecnológico e, também, novas aplicações.

Essas novas aplicações, sob demanda ou não, constituem a força-motriz do desenvolvimento tecnológico. Em se tratando da PR, novos desenvolvimentos de materiais e processos vêm buscando atender às seguintes aplicações:

1. Maior integração com o ambiente industrial com crescente inserção da PR principalmente no PDP e em ferramental rápido - requisito para empresas voltadas para produção em massa de manufaturados.
2. Desenvolvimento da manufatura rápida para indústrias especializadas em peças customizadas ou no atendimento de pequenas quantidades de peças.
3. Desenvolvimento de máquinas portáteis, que utilizam materiais estáveis e sem grandes exigências ambientais para pós-processo. A oferta de máquinas com essas características amplia a base de consumo, diminuindo custos para acesso à tecnologia.
4. Maximização do aproveitamento que pode ser obtido com o pós-processo não apenas com acabamento para efeito estético como também para funcionalização das superfícies visando agregação de propriedades físico-químicas.
5. Expansão dos limites dimensionais das peças.

A expansão dos limites dimensionais (Figura 3) para além da mesoescala (1 a 1000 mm) é um grande desafio para os desenvolvedores das tecnologias de PR. Esse desafio vem, no entanto, sendo vencido com as pesquisas em novos processos e materiais. Para macro dimensões (acima de 1000 mm) o recurso de montagem tem sido utilizado, mostrando que as tecnologias atuais propiciam a precisão necessária para encaixes. Desenvolvedores de equipamentos vislumbram a construção de grandes estruturas 3D. Para tanto foi cunhado o termo *Freeform Construction* e foram feitos estudos de viabilidade da *Mega-scale Rapid Manufacturing for Construction*, cujas aplicações foram classificadas, a grosso modo, pela escala dos seguintes objetos: uma mesa, uma sala, um prédio inteiro (Buswell et. al., 2007, Khoshnevis, 2004).

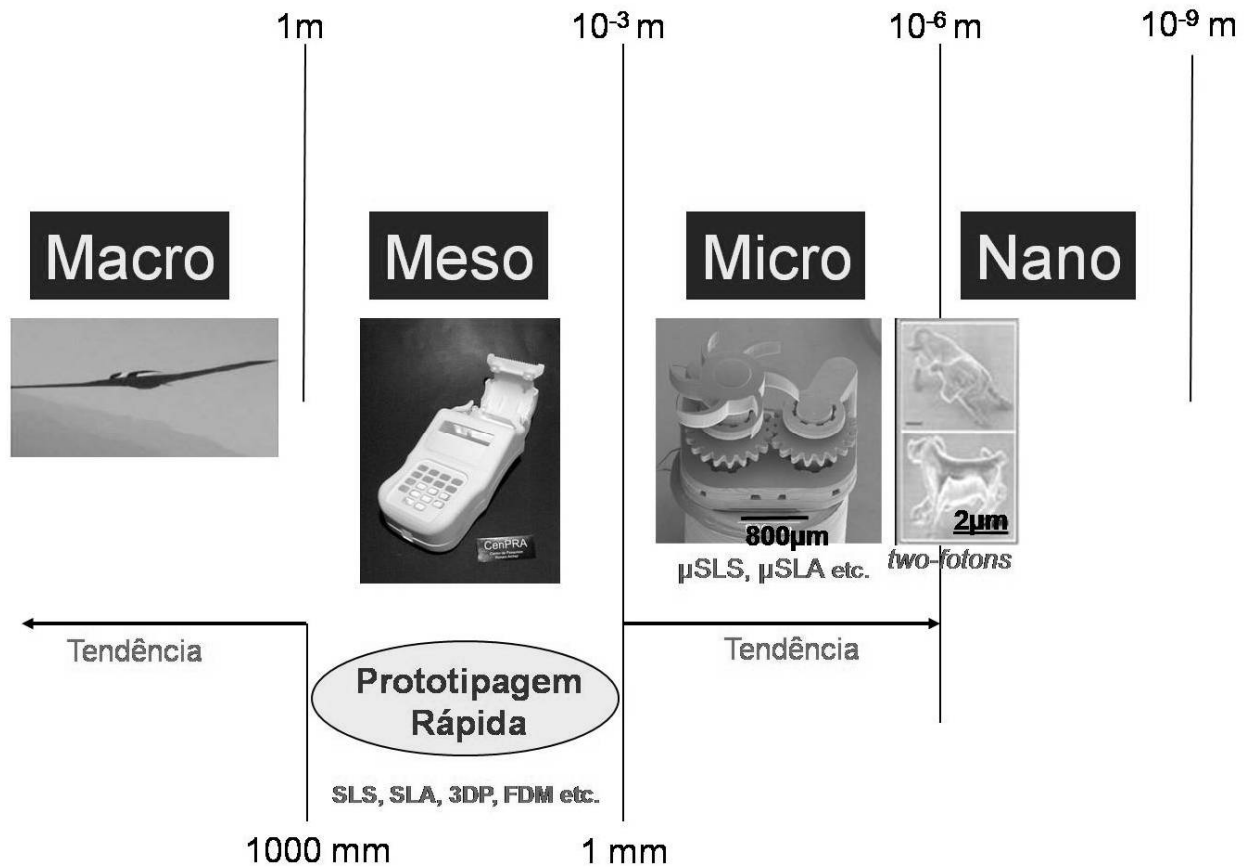


Figura 3 - Limites dimensionais atuais (escala meso) e futuro dimensional das tecnologias PR. Escala macro: um avião autônomo de 28 metros de envergadura com partes construídas em PR e, posteriormente, coladas (Integração da Lockheed Martin). Escala micro: um sistema mecânico com engrenagens menores que 1mm de diâmetro. Escala nano: uma peça na forma de boi com as dimensões de um glóbulo vermelho.

Modificações das tecnologias SLS e SLA têm levado à construção de peças com dimensões próximas e mesmo inferiores ao limite da escala meso. A expressão “micro-sintering” (Regenfuss et al. 2005; Jimin e Tiechuan, 2004) e micro-SLA emergiram para definir a integração da PR com MEMS (*Micro Electrical Mechanical Systems*) (Hsu, 2008). Do esforço dessa integração surgiram duas empresas 3D-Micromac (2008) e Microtec (2008). Esta última utiliza uma tecnologia denominada RMPD (*Rapid Micro Product Development*), desenvolvida no Centro de Pesquisas de Karlsruhe (Alemanha), e que permite obter peças com precisão de 5 micra e, por se tratar de ferramental rápido, visa a construção de moldes para fabricação paralela de vários micro-componentes (Knitter e Bauer 2002, 2003). Exemplos de micro peças fabricadas por micro-PR são: linhas com 12 μ m de largura e 28 μ m de espessura (Xu et. al. 2006), canais longos com seção transversal quadrada micrométrica (250 μ m de lado por 60 mm de comprimento)

(Ryan et. al., 2004), micro eletrodo cônico (600 μm de base) para implante (Kwon et. al. 2005), micro engrenagens (100 – 500 μm de diâmetro) (Bertsch, Lorenz e Renaud, 1999). O avanço da PR rumo à nanotecnologia foi iniciado com a polimerização *two-fotons* em que um laser com frequência de femtosegundos polimeriza uma resina líquida. Com a tecnologia *two-fotons* foi possível produzir um modelo da *Sidney Opera House* nas dimensões do diâmetro de um fio de cabelo - 100 μm (Straub et. al., 2004). Outro importante aspecto dessa tecnologia é que, mesmo em dimensões tão pequenas, foi possível construir estruturas 3D com partes móveis (Ostendorf, 2006). Espera-se que com a construção de dispositivos pequenos tendo partes móveis, possam ser construídos nanomanipuladores ou estimuladores mecânicos para uma única célula. Espera-se, também, manipular uma única macromolécula de DNA ou proteína (Maruo, 2003).

A convergência da PR com as tecnologias mais estabelecidas e com as mais emergentes como MEMS aumentará grandemente o leque de aplicações. Aplicações de PR em áreas de alto conteúdo tecnológico tais como exploração espacial (Rochus et. al., 2007), microeletrônica (Im et. al. 2007), robótica (Park et. al. 2007) e engenharia de tecidos biológicos (Hollister, 2005) se beneficiarão grandemente dessa convergência tecnológica.

Capítulo 3

3. Metodologia

3.1. Levantamento dos dados

Os dados foram obtidos a partir de duas fontes: (1) Os proponentes dos projetos, que responderam a um questionário escrito, que foi complementado por uma entrevista oral e (2) registros do CTI que contém o projeto do modelo digital e os dados de processo de construção das peças por PR.

As perguntas do questionário, no total de 15, (Anexo III) foram arranjadas em dois grupos: o primeiro tem questões relativas às contribuições da PR aos projetos de pesquisa e o segundo grupo questões relativas à área de gestão. Como o escopo do trabalho foi definido após a aplicação dos questionários, só foram consideradas as questões relativas ao primeiro grupo que é, por sua vez, dividido em três subgrupos que são:

1. Classificação do tema do projeto dentro de quatro classes de aplicações de PR aqui definidas em: prototipagem visual (PV), prototipagem funcional (PF), Ferramental Rápido (FR) e Manufatura Rápida (MR). Definições curtas dessas classes de aplicações foram dadas no próprio questionário para auxílio na escolha (1 questão).

2. Identificação dos benefícios trazidos pelo emprego da PR no projeto de pesquisa (1 questão).

3. Identificação das necessidades, isto é, de requisitos desejados e eventualmente não atendidos pela PR (7 questões).

O questionário foi enviado por correio eletrônico ou entregue pessoalmente aos proponentes do projeto. A entrevista oral serviu para esclarecer dúvidas e identificar falhas na aplicação do questionário, visando seu aperfeiçoamento em trabalho futuro.

Entre os respondentes estão: professores universitários, alunos de pós-graduação, alunos de graduação realizando seus Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), alunos de iniciação científica e profissionais liberais.

3.2. Apresentação dos dados

Os dados obtidos com os questionários foram organizados em fichas de formato padrão (Anexo IV), uma para cada projeto, contendo na região central, bem em destaque, uma foto da peça sendo aplicada conforme previsto no correspondente projeto de pesquisa. Acima dessa foto estão o título, o nome do proponente do projeto, o projetista do modelo digital (quando não for o mesmo nome do proponente do projeto), a área de aplicação, o material utilizado e a classe de aplicação. Abaixo da foto há campos para preenchimento dos benefícios trazidos pelo emprego da PR no correspondente projeto de pesquisa, seguido das necessidades não atendidas pela PR. O campo necessidade será preenchido com ajuda das 7 questões do sub-grupo 3, listado acima.

3.3. Análise dos dados

Como os benefícios relativos à aplicação da PR nos projetos de pesquisa foram identificados numa única questão, com múltipla escolha, a análise dos resultados foi direta. Com relação ao desempenho dos materiais, esta análise não foi direta devido ao grande número e variedade de projetos. Antes da análise de desempenho propriamente dita, os projetos foram distribuídos em quatro classes de aplicações para extração de informações gerais, não específicas de cada projeto. São estas informações gerais que serão úteis para a orientação de novos projetos de pesquisa que venham a utilizar PR. Embora essas quatro classes de aplicações estejam sucintamente descritas no questionário, elas são definidas abaixo, em maiores detalhes.

(1) Prototipagem Visual (PV). Uma peça que funciona como protótipo visual tem como papel ser admirada (caso de obras de arte) ou analisada com os olhos (caso dos biomodelos médicos). Precisa, no entanto, possuir uma resistência mecânica mínima para ser manipulada. A princípio, diferentemente da prototipagem funcional, ferramental e manufatura rápida, não

demanda grande controle dimensional. Por outro lado, características superficiais como rugosidade, cor e textura, ganham importância.

(2) Prototipagem Funcional (PF): Uma peça que seja um protótipo funcional deve ter desempenho ou propriedades representativas do produto final, possuindo a mesma geometria, mas sendo construída de material diferente ao da peça para uso final. A PF traz embutida no seu conceito a idéia de que o protótipo funcional falhará sob testes devido a esta característica. Caso contrário, não seria protótipo, mas a peça de uso final, como preconizado pela manufatura rápida. Em outras palavras, o tempo de vida do protótipo será menor do que o tempo de vida da peça final. Dos testes com o protótipo funcional são geradas informações para o desenvolvimento da peça final. Segundo Mueller (2002), é grande o interesse de fabricantes de equipamentos de PR em produzir materiais que simulem o comportamento dos materiais usados em injeção de plástico.

(3) Ferramental Rápido (FR): Pressupõe que a peça a ser feita com PR será usada como molde, portanto, o material que a constitui deve suportar o processo de moldagem sem qualquer tipo de deformação.

(4) Manufatura Rápida (MR). Pressupõe que o material com que a peça é feita é para uso final. Tradicionalmente associada à PR de metal, o conceito de MR adotado neste trabalho admite a construção em polímero, conquanto que a peça suporte o tempo necessário para a função para a qual foi projetada.

Um material é resultado da composição da matéria-prima com o processo de transformação dessa matéria-prima. Assim os materiais de PR, cujo desempenho serão analisados dentro das classes de aplicações, são identificados neste trabalho com o nome da matéria-prima seguido do nome da tecnologia de PR. A seguir, são apresentados a matéria-prima e o equipamento de PR (todos comerciais), utilizados para a construção dos materiais que constituem as peças dos projetos de pesquisa.

Nylon/SLS. Material: poliamida (Duraform PA, 3D System). Como o nylon é um tipo de poliamida e tem sido também empregado como um nome alternativo (comercial) para poliamida,

ele é também adotado aqui por ser mais conhecido. Equipamento: SLS - equipamentos modelos SinterStation 2000 (DTM Corporation) e SinterStation HiQ (3D Systems).

Gesso/3DP. Material: zp131 (Z Corp) com infiltrante cianocrilato (TekBond 721). Equipamento: 3DPrinter, modelo ZPrinter Z310 (Z Corp).

ABS/FDM. Material: ABS P400 (Stratasys). Equipamento: FDM, modelo Vantage i (Stratasys).

A avaliação dos materiais de PR, entregue aos proponentes dos 40 projetos, foi feita a partir de parâmetros relativos à superfície e ao corpo da peça, dentro das 4 classes de aplicação em que os projetos foram classificados. Esses parâmetros estão sistematizados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Parâmetros de avaliação dos materiais das peças

Classe de Aplicação	Parâmetros de avaliação dos materiais das peças	
	Superfície	Corpo da peça
PV	<ul style="list-style-type: none"> - Cor, textura, rugosidade. - Deve suportar lixamento e conservar a cor por longo período. 	<ul style="list-style-type: none"> - Transparência - resistência mecânica suficiente para manipulação. - Precisão dimensional tolerável.
PF	<ul style="list-style-type: none"> - Rugosidade, - Reatividade química. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência mecânica maior que PV para fixação nos sistemas de testes através de parafusamento, encaixe, colagem. - Suportar furação e desbaste. - Resistência mecânica para operação em sistemas dinâmicos, sujeitos à fricção e vibração. - Precisão dimensional acurada. - Resistência térmica. - Hermeticidade.
FR	<ul style="list-style-type: none"> - Reatividade química, - Rugosidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência mecânica suficiente para o processo de moldagem. - Precisão dimensional acurada.
MR	<ul style="list-style-type: none"> - Adequada dentro do tempo de vida esperado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adequado dentro do tempo de vida esperado.

Capítulo 4

4. Resultados

Os 40 projetos avaliados neste trabalho estão listados e classificados na Tabela 7. A classificação é feita em termos da classe de aplicação de PR, material e área do conhecimento.

Os resultados, obtidos através do questionário e entrevistas orais com os proponentes dos projetos sobre os benefícios e desempenho dos materiais nylon/SLS, gesso/3DP e ABS/FDM nos projetos, estão apresentados em 40 fichas, uma para cada projeto entre as páginas 25 a 64 e classificados dentro das quatro classes de aplicações – prototipagem visual (PV), prototipagem funcional (PF), ferramental rápido (FR) e manufatura rápida (MR).

Todos os proponentes dos projetos manifestaram ter tido algum tipo de benefício utilizando a PR, principalmente pela capacidade de produzir peças complexas como o maior deles.

Sobre o desempenho dos materiais empregados nas peças, a análise foi feita dentro das classes de aplicação em que os projetos foram classificados, e é apresentada no próximo Capítulo 5.

Tabela 7 - Atribuição aos projetos: código, título, classe de aplicação de PR, material e área do conhecimento

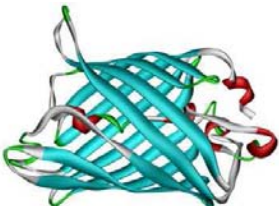
Código	Título	Classe de Aplicação	Material	Área do Conhecimento
PRJ. 1	Modelos Físicos de Macromoléculas	PV	Nylon/SLS	BIOQUÍMICA
PRJ. 2	Modelagem Física de Dentes	PV	Nylon/SLS ABS/FDM	ODONTOLOGIA
PRJ. 3	Maquete do Campus da Unicamp	PV	Nylon/SLS	ARQUITETURA
PRJ. 4	Esculturas 1	PV	Nylon/SLS	ARTES
PRJ. 5	Esculturas 2	PV	Gesso/3DP	ARTES
PRJ. 6	Maquete do Museu Guggenheim	PV	Gesso/3DP Nylon/SLS	ARQUITETURA
PRJ. 7	Reprodução de Obras de Arte em Escala Reduzida	PV	Gesso/3DP Nylon/SLS	ARQUITETURA
PRJ. 8	Biomodelo para Diagnóstico e Planejamento Cirúrgico	PV	Nylon/SLS	ODONTOLOGIA
PRJ. 9	Réplicas de Fósseis 1	PV	Nylon/SLS	PALEOZOOLOGIA
PRJ. 10	Réplicas de Fósseis 2	PV	Nylon/SLS ABS/FDM	PALEOZOOLOGIA
PRJ. 11	Análise dos Desvios Geométricos, de Biomodelos feitos por PR a partir de Tomografia Computadorizada	PV	Gesso/3DP Nylon/SLS ABS/FDM	ENGENHARIA
PRJ. 12	Análise Comparativa das dimensões em biomodelos fabricados por usinagem CNC e por PR	PV	Gesso/3DP Nylon/SLS ABS/FDM	ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
PRJ. 13	Design de Telefone Celular	PV	Nylon/SLS	DESENHO INDUSTRIAL
PRJ. 14	Mock-Up do projeto OLPC	PF	Gesso/3DP Nylon/SLS	ENGENHARIA MECÂNICA
PRJ. 15	Peças para um Dirigível Robótico Autônomo	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA MECÂNICA
PRJ. 16	Motor á Ar Comprimido	PF	ABS/FDM	ENGENHARIA MECÂNICA
PRJ. 17	Peças para Fixação de Filtros em Telescópio	PF	Nylon/SLS	ASTRONOMIA
PRJ. 18	Biomodelos de Mandíbula de Cão para Corpo de Prova	PF	Nylon/SLS	VETERINÁRIA
PRJ. 19	Órtese para Membro Inferior de Gavião	PF	ABS/FDM	VETERINÁRIA

Código	Título	Classe de Aplicação	Material	Área do Conhecimento
PRJ. 20	Cortador de Sachês	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA DE PRODUTO
PRJ. 21	Colimador de Raio X - Estelar	PF	Nylon/SLS	ASTROFÍSICA
PRJ. 22	Carro Experimental 1: Coletor de Admissão	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA AUTOMOTIVA
PRJ. 23	Carro Experimental 2: Conjunto Suspensão e Pedal Freio	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA AUTOMOTIVA
PRJ. 24	Dispositivo Háptico de Dedo	PF	Nylon/SLS	MECATRÔNICA
PRJ. 25	Carro Experimental 3: Engrenagem do Eixo de Comando	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA AUTOMOTIVA
PRJ. 26	Retentor de Saliva	PF	ABS/FDM	ENGENHARIA MECÂNICA
PRJ. 27	Aeromodelo: Conexões de Suporte	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA AERONÁUTICA
PRJ. 28	Treinamento Cirúrgico 1: Fixação de Prótese de Mandíbula	PF	Nylon/SLS	MEDICINA
PRJ. 29	Treinamento Cirúrgico 2: Fixação de Prótese de Mandíbula	PF	ABS/FDM	MEDICINA
PRJ. 30	Peça de Bomba Centrífuga Para Circulação Extracorpórea	PF	Nylon/SLS	BIOENGENHARIA
PRJ. 31	Microaspersores de Água	PF	Nylon/SLS	ENGENHARIA AGRÍCOLA
PRJ. 32	Microrobôs Móveis	PF	Nylon/SLS	MECATRÔNICA
PRJ. 33	Protése Expansível para Utilização em Cranioplastia	FR	Gesso/3DP Nylon/SLS ABS/FDM	MEDICINA
PRJ. 34	Protése de Nariz	FR	Gesso/3DP	MEDICINA
PRJ. 35	Sistema de Transmissão de Potência tipo CVT	FR	Nylon/SLS	ENGENHARIA MECÂNICA
PRJ. 36	Protése Ocular	FR	Nylon/SLS	ODONTOLOGIA
PRJ. 37	Maquete Táctil Para Biblioteca Da Unicamp	MR	Nylon/SLS	ARQUITETURA
PRJ. 38	Peça Guia para Instalação de Implantes e Prótese Fixa	MR	Nylon/SLS	ODONTOLOGIA
PRJ. 39	NIP – Nuvens de Interação Protéica	MR	Nylon/SLS	ESPACIAL
PRJ. 40	Peças Mecânicas para Equipamento de PR Portátil	MR	Nylon/SLS ABS/FDM	ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO

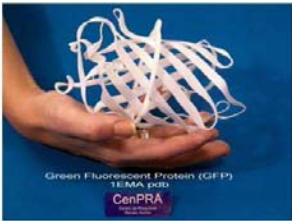
Legenda: **PV** – Protótipo Visual **PF** – Protótipo Funcional **FR** – Ferramental Rápido **MR** – Manufatura Rápida

Projeto: Modelos Físicos de Macromoléculas		<h1>PRJ.1</h1>
Proponente: Milton e Raquel Bugs, CTI/Campinas Projetista: Gustavo Paschoal, CTI/Campinas		
Área: Bioquímica	Material: Nylon/SLS	Classe: PV


Fotos da Aplicação:



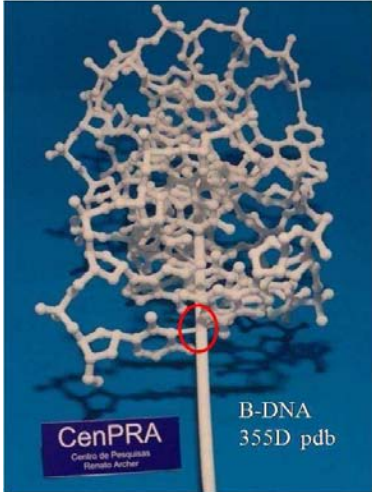
Modelo digital GFP 1EMA.pdb



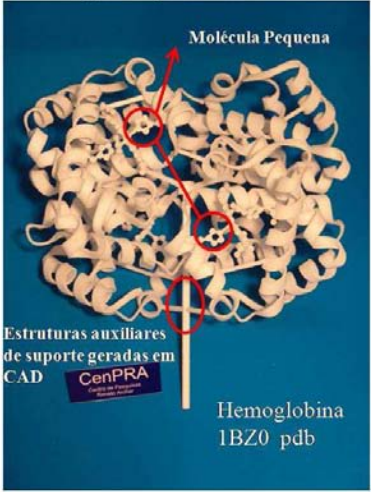
Peça em nylon/SLS



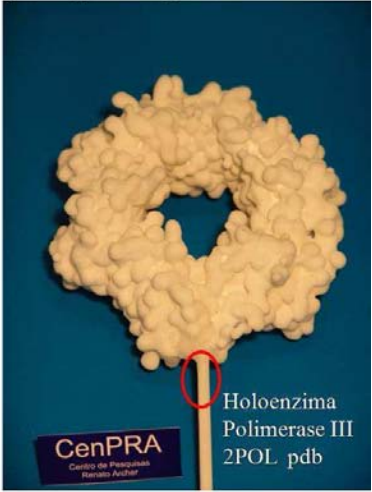
Peça em nylon/SLS pintada



Representação Primária



Representação Secundária



Representação Terciária

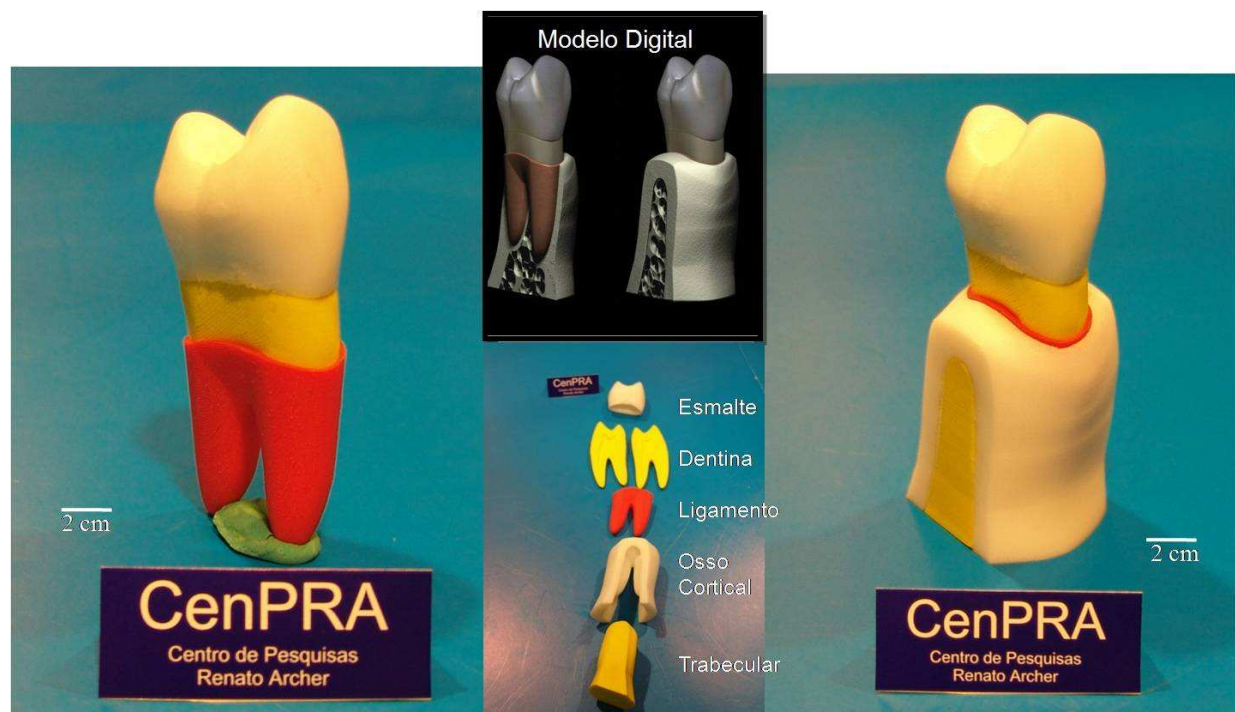
Descrição: O projeto visa a geração de um Kit de modelos físicos de macromoléculas gerados a partir de arquivos *pdb* (*Protein Data Bank*) disponível na internet. Os modelos servirão como objeto de estudo e educação em bioquímica e biofísica. Estruturas de sustentação foram incorporadas nos modelos primários e secundários para manter a geometria tal qual encontrada no modelo digital. Também foram incorporados modelos de pequenas moléculas.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas.

Necessidades: Resistência mecânica para estruturação e manipulação visual, superfície porosa para fixação de tinta, agregar estruturas de suporte em CAD.

Projeto: Modelagem Física de Dentes		<i>PRJ.2</i>
Proponente: Adriana Silva – UNESP/Araraquara, Apoio: Pedro Noritomi – CTI/Campinas		
Área: Odontologia	Material: ABS/FDM	Classe: PV

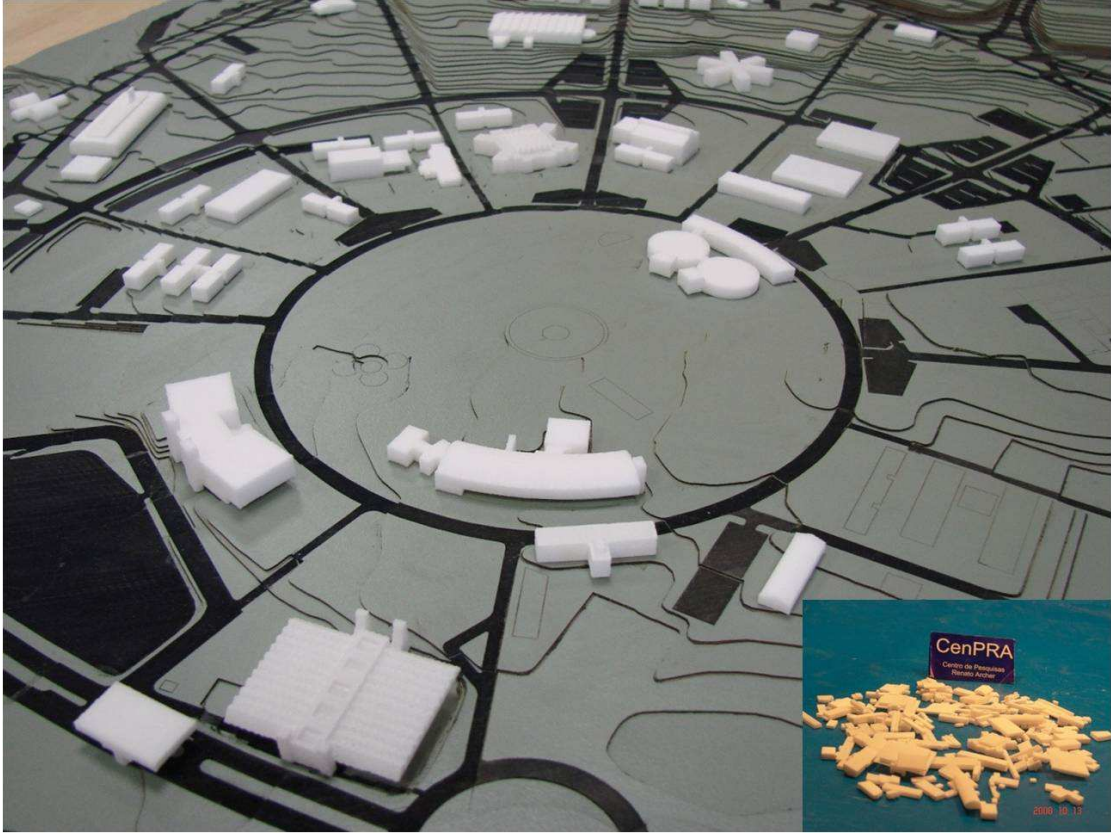
Fotos da Aplicação:



Descrição: Modelagem Física de Dentes, feita a partir de modelos virtuais criados com software CAD. (Silva, 2008)

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas.

Necessidades: Resistência à manipulação e aderência de sujeira ou gordura das mãos, cor e encaixes.

Projeto: Maquete do campus da UNICAMP Proponente: Gabriela Celani e Juliana Matsubara FEC/Unicamp		<i>PRJ.3</i>
Área: Arquitetura	Material: Nylon/SLS	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
		
Descrição: Modelos físicos em escala 1:2000, dos prédios que compõem o campus da UNICAMP.		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e durabilidade.		
Necessidades: Resistência mecânica e à exposição da luz, superfície lisa para evitar aderência de sujeira, cor e transparência.		

Projeto: Esculturas 1		<i>PRJ.4</i>
Proponente: Thiago José Coser – IA/Unicamp		
Área: Artes	Material: Nylon/SLS	Classe: PV


Fotos da Aplicação:




Descrição: Criar obras artísticas com o uso de ferramentas CAD e reproduzi-las através do emprego da PR, utilizando técnicas, tecnologias e materiais que podem contribuir com soluções, idéias, questionamentos e plasticidade neste intercâmbio de áreas.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, uso único na área de artes entre concepção e produção automática, sem uso de habilidade manual para obter a peça.

Necessidades: Resistência do material á exposição de luz, volume de construção, e também acabamento, cor, transparência, memória de forma (flexibilidade).

Projeto: Esculturas 2		PRJ.5
Proponente: Sônia Skoda – USP/SP		
Área: Artes	Material: Gesso/3DP	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
		
<p>Descrição: A escultura original nas dimensões 200x250x200mm foi digitalizada em scanner ótico 3D e construída fisicamente por PR. A superfície da peça reproduzida será trabalhada artisticamente.</p>		
<p>Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, sem uso de habilidade manual para obter a réplica da peça.</p>		
<p>Necessidades: Resistência do material ao pós-processo, à exposição de luz, volume de construção, e também acabamento, cor, transparência.</p>		

Projeto: Maquetes do Museu Guggenheim		PRJ.6
Proponente: Gabriela Celani e Érica Pinheiro- FEC/Unicamp		
Área: Arquitetura	Material: ABS/FDM	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
		
Descrição: Construção de maquetes nas dimensões 200x200x85mm para comparação do acabamento e textura do modelo construído em ABS/FDM com o gesso/3DP (construído na Unicamp pelo projetista). (Vieira, 2007)		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e durabilidade.		
Necessidades: Cor (para obter contrastes), transparência (para observação de interiores).		

Projeto: Reprodução de Obras de Arte em Escala Reduzida Proponente: Gabriela Celani e Regiane Pupo- FEC/Unicamp Apoio: André Jardini – FEQ/Unicamp, Marcelo Oliveira - CTI		<i>PRJ.7</i>
Área: Arquitetura	Material: Nylon/SLS e Gesso/3DP	

Fotos da Aplicação:

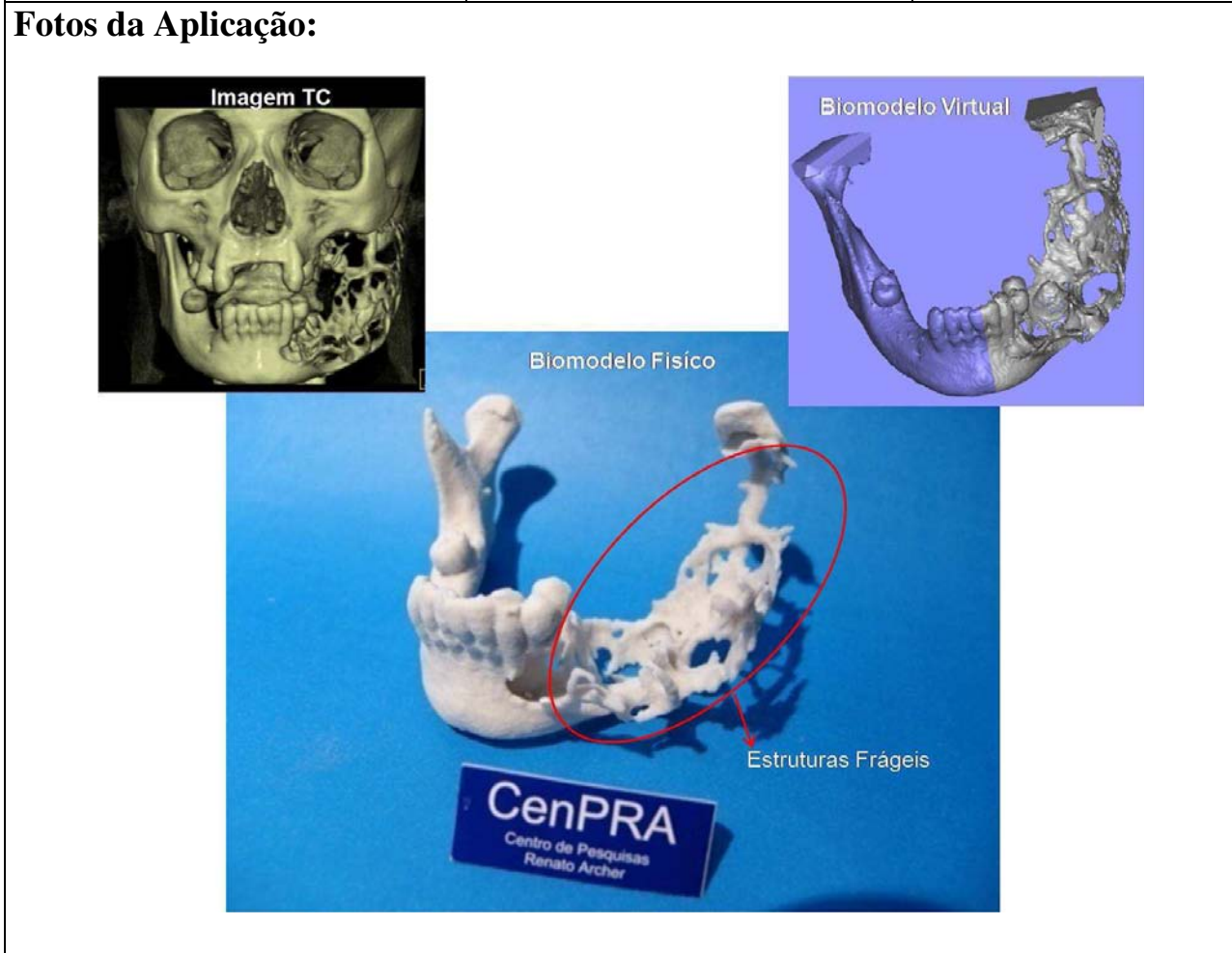


Descrição: Reproduzir em escala 1:25, esculturas e obras de arte, para planejar exposições de arte em museus, através do uso de maquetes dos ambientes. Projeto de colaboração entre a projetista e a Pinacoteca do Estado de São Paulo. (Celani et. al., 2008 e Celani, Pupo e Piccoli, 2008)

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência mecânica à manipulação, cor, transparência.

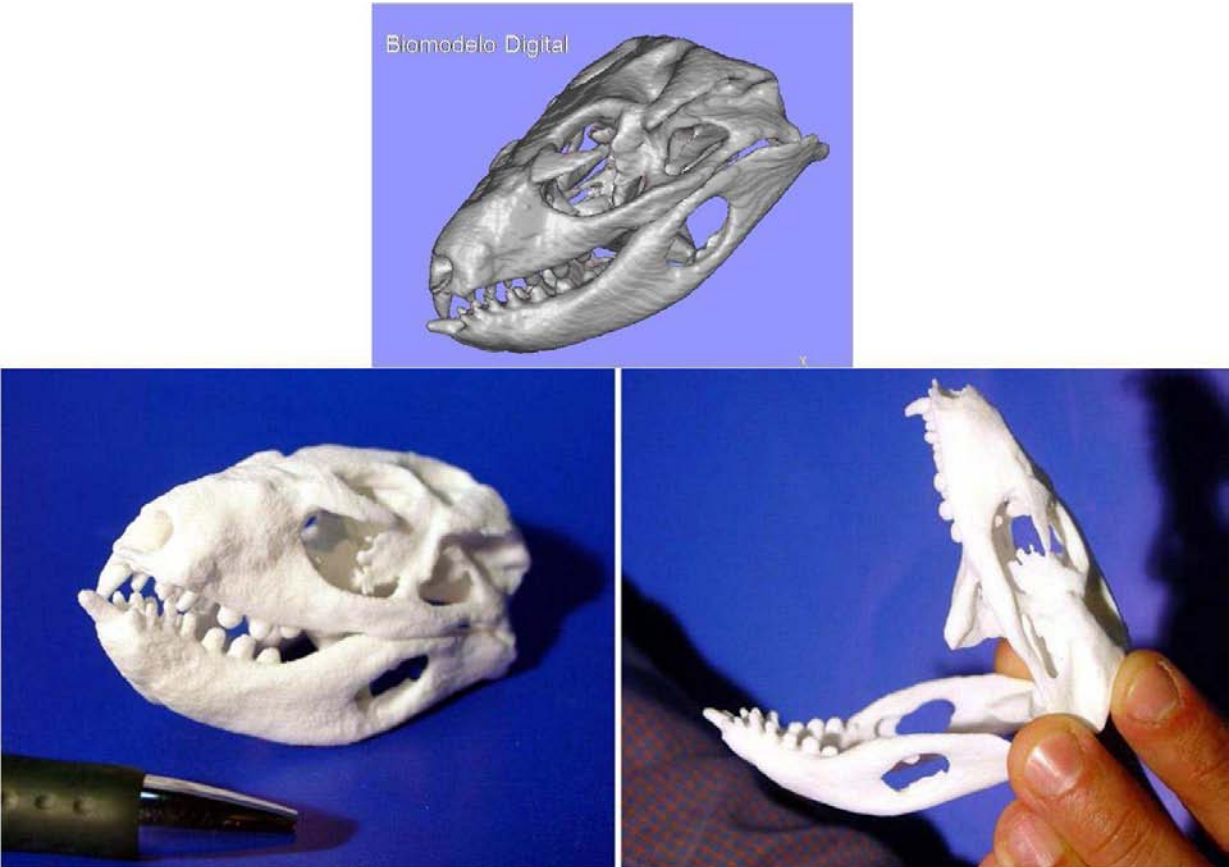
Projeto: Biomodelo para Diagnóstico e Planejamento Cirúrgico Proponente: Dr. Eduardo Sanomya - Univ. Metodista/SP Modelagem: Bruno Cassaro - CTI/Campinas		<h1>PRJ.8</h1>
Área: Odontologia -	Material: Nylon/SLS	Classe: PV




Descrição: Biomodelos Físicos construídos a partir de biomodelos virtuais, obtidos a partir de tomografia computadorizada (TC), e reconstrução com o *software InVesalius*, para diagnóstico e planejamento de cirurgia.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo de cirurgia e aumento da comunicação entre os membros da equipe.

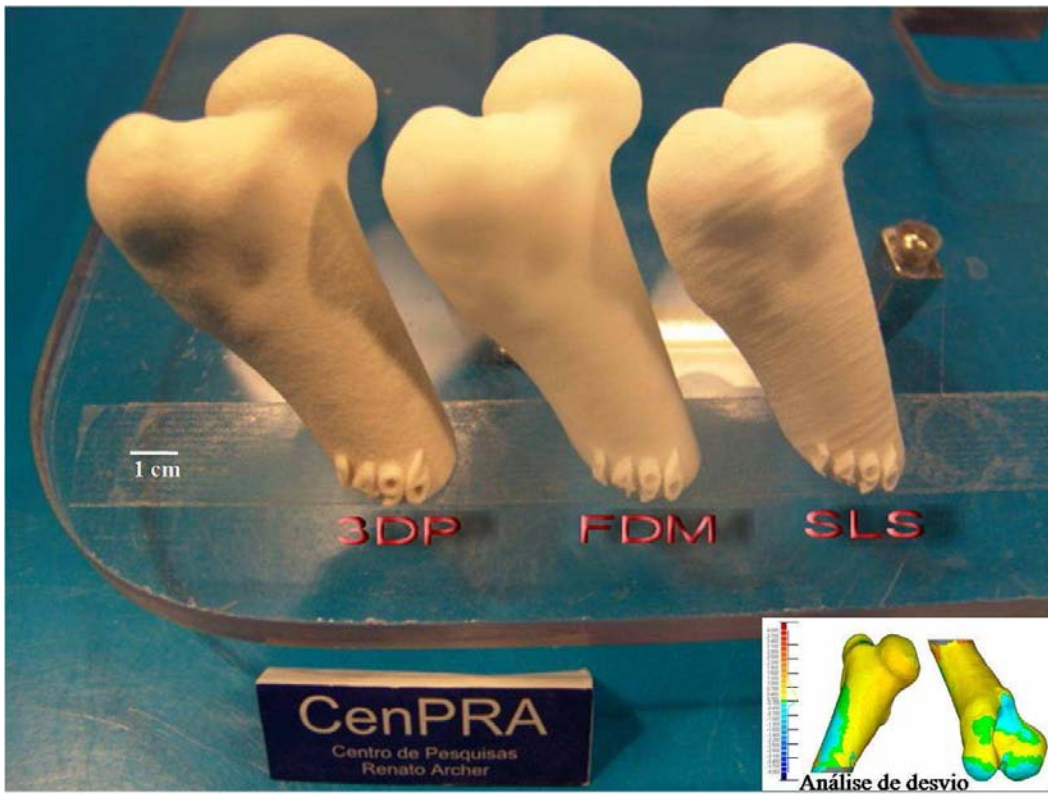
Necessidades: Resistência mecânica à manipulação.

Projeto: Réplicas de Fósseis 1		<i>PRJ.9</i>
Proponente: Dr. Sérgio Kugland - Museu Nacional/RJ, Modelagem: Bruno Cassaro – CTI/Campinas		
Área: Paleozoologia	Material: Nylon/SLS	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
		
Descrição: Construir Réplicas de Fósseis, a partir de tomografia computadorizada (TC) e reconstrução com o <i>software InVesalius</i> , para disponibilizar a vários pesquisadores, preservando o original.		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo e reconstituição fiel de ossos e cavidades ósseas.		
Necessidades: Resistência mecânica à manipulação e definição de detalhes.		

Projeto: Réplicas de Fósseis 2		PRJ.10
Proponente: Dr. Luciana de Carvalho - Museu Nacional/RJ, Modelagem: Airton M. Silva – CTI/Campinas		
Área: Paleozoologia	Material: Nylon/SLS e ABS/FDM	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
 <p>Destaque em Cor feito em ABS/FDM da Estrutura Intracraniana na Cavidade Óssea</p> <p>Estrutura Intracraniana Feita em nylon/SLS</p> <p>1 cm</p>		
Descrição: Construir réplicas de estruturas intracranianas de fósseis, a partir de tomografia computadorizada (TC) e reconstrução com o <i>software InVesalius</i> para estudo e análise. As réplicas permitem analisar pequenas estruturas, evitando a destruição do fóssil original. (Carvalho, 2007)		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo e reconstituição de cavidades ósseas.		
Necessidades: Resistência mecânica à manipulação e definição de detalhes.		

Projeto: Análise dos Desvios Geométricos de Biomodelos feitos por PR a partir de Tomografia Computadorizada Proponente: Regina Kunzler e Dr. Gustavo Donatelli-UFSC/SC, Modelagem: Airton M. Silva – CTI/Campinas		<h1>PRJ.11</h1>
Área: Metrologia	Material: Nylon/SLS, Gesso/3DP e ABS/FDM	Classe: PV

Fotos da Aplicação:



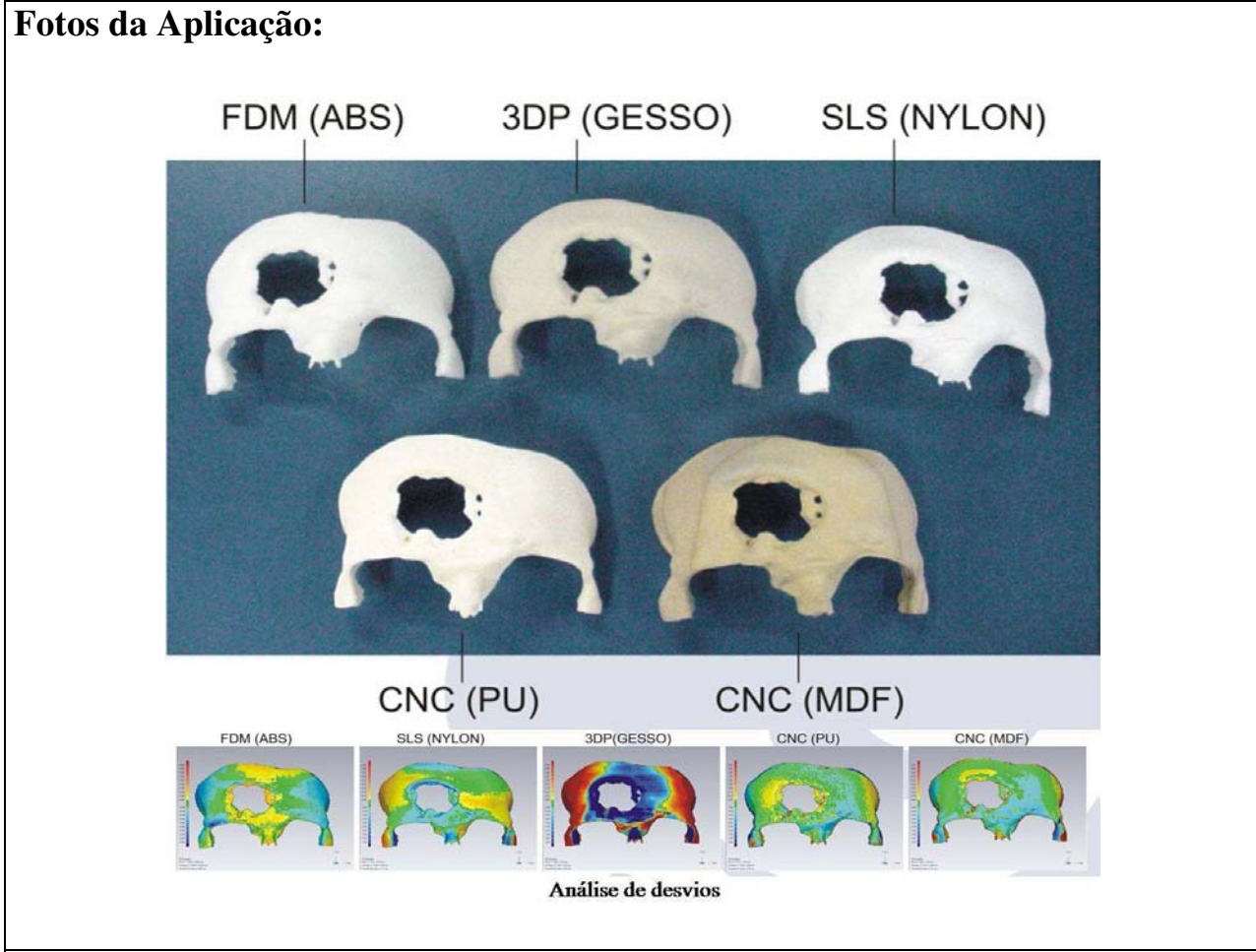
Descrição: Reproduzir modelos 3D em PR, da cabeça do fêmur de um cordeiro para análise dos desvios geométricos gerados desde a aquisição de imagens por tomografia computadorizada (TC) e reconstrução com o *software InVesalius*, até o protótipo gerado por PR nos materiais/tecnologia em estudo. (Kunzler, 2008)

Benefícios da PR: Disponibilidade de várias tecnologias para comparação.

Necessidades: Resistência mecânica à manipulação.

<p>Projeto: Análise Comparativa das Dimensões de Biomodelos Fabricados por Usinagem CNC e por PR</p> <p>Proponente: Liciane Bertol – LdSM/UFRGS</p>	<p><i>PRJ.12</i></p>
--	-----------------------------

<p>Área: Engenharia de Fabricação</p>	<p>Material: Nylon/SLS, Gesso/3DP,ABS/FDM</p>	<p>Classe: PV</p>
--	--	--------------------------



Descrição: Digitalização de biomodelos de crânio humano construídos por PR e usinagem CNC para análise dos desvios geométricos gerados entre os processos de fabricação.

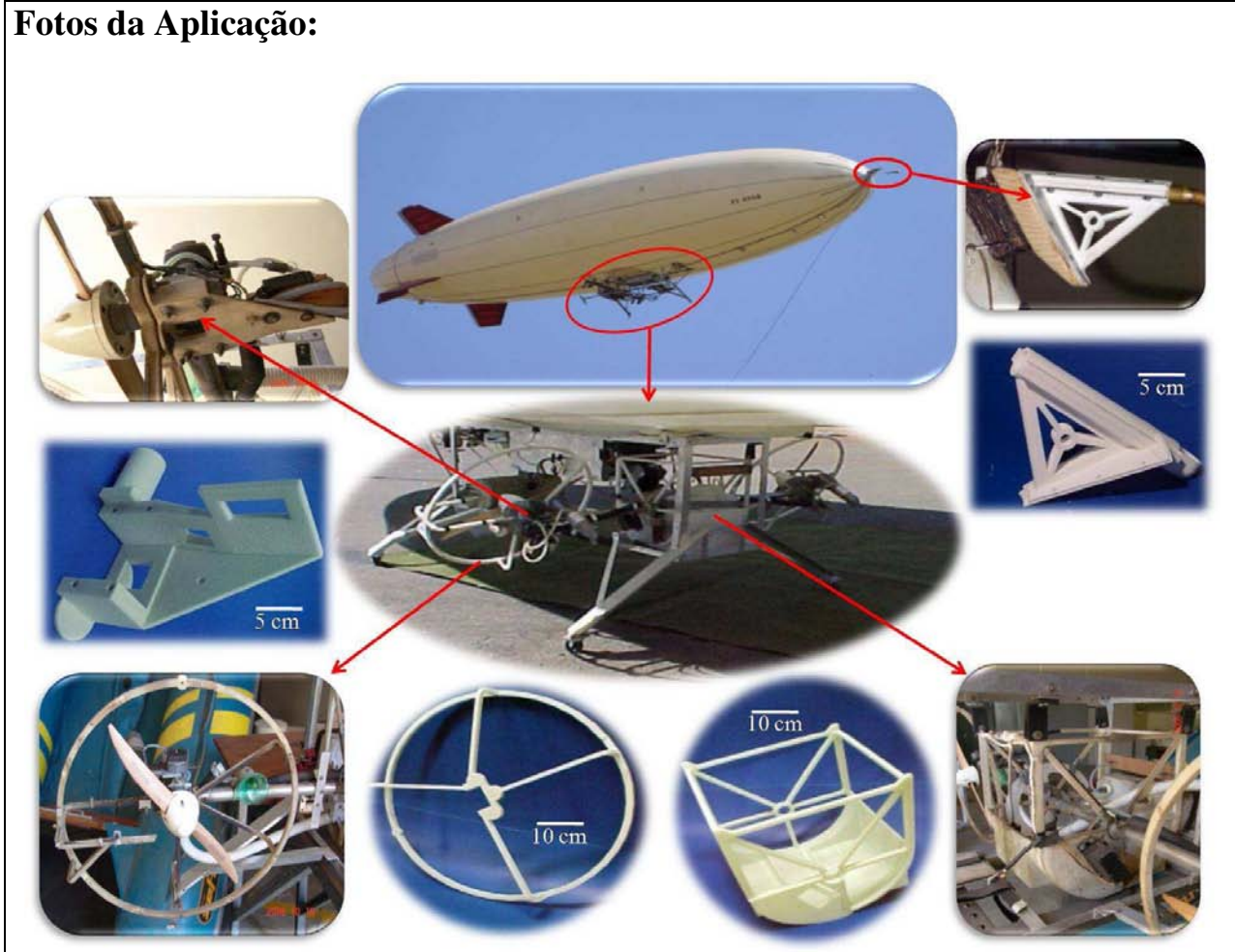
Benefícios da PR: Disponibilidade de várias tecnologias para comparação.

Necessidades: Resistência mecânica à manipulação.

Projeto: Design de Telefone Celular		PRJ.13
Proponente: Abel Chang – PUC/PR		
Área: Desenho Industrial	Material: Nylon/SLS	Classe: PV
Fotos da Aplicação:		
  		
Descrição: Avaliar design e projeto de produto para comunicação e interação móvel. Dimensões: 50x100x15mm.		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, comunicação, tempo.		
Necessidades: Resistência mecânica à manipulação, acabamento para pintura e precisão para encaixes.		

Projeto: Mock-up do Projeto OLPC		PRJ.14
Proponente: Victor Mammana – CTI/Campinas		
Área: Engenharia Mecânica	Material: Nylon/SLS	Classe: PF
Fotos da Aplicação:		
 <p>Peça em nylon/SLS, pintada e montada</p>		
Descrição: Construção de mock-up para avaliação de design e custo de produção no Projeto OLPC – One Laptop Per Child.		
Benefícios da PR: Redução de tempo na construção do mock-up.		
Necessidades: Resistência à manipulação por crianças, acabamento e cor.		

Projeto: Peças para um Dirigível Robótico Autônomo		PRJ.15
Proponente: Rodrigo Peixoto, Josué Ramos - CTI/ Campinas		
Área: Engenharia Mecânica	Material: Nylon/SLS	Classe: PF



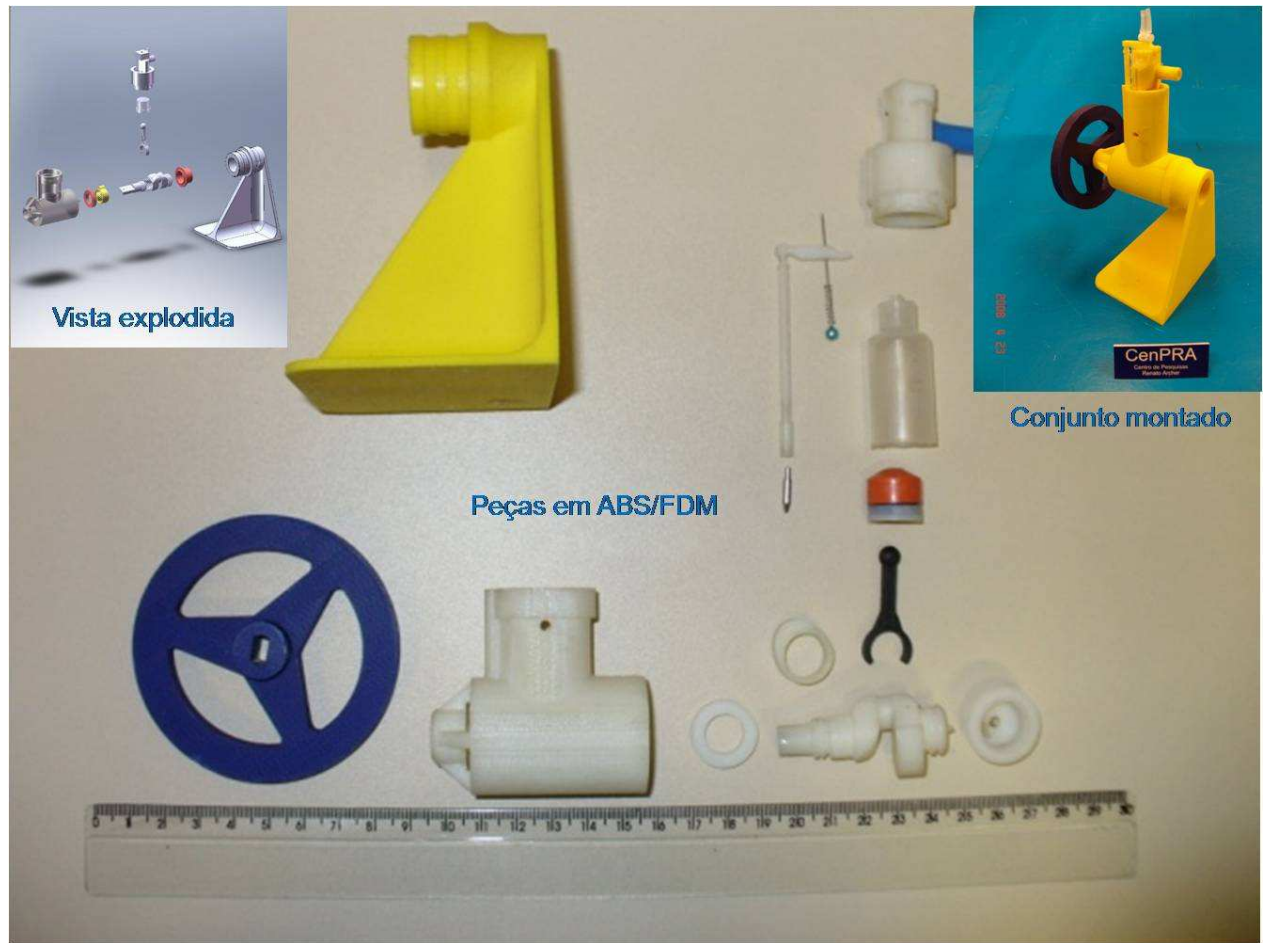
Descrição: Peças mecânicas integradas a estrutura de controle embarcado em dirigível robótico autônomo.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, alívio de peso, redução de tempo.

Necessidades: Resistência a vibração (mecânica), produtos químicos (combustível, lubrificantes), acabamento, furação.

Projeto: Motor à Ar Comprimido		PRJ.16
Proponente: Daniel Kemmoku, CTI/Campinas		
Área: Engenharia Mecânica	Material: ABS/FDM	Classe: PF

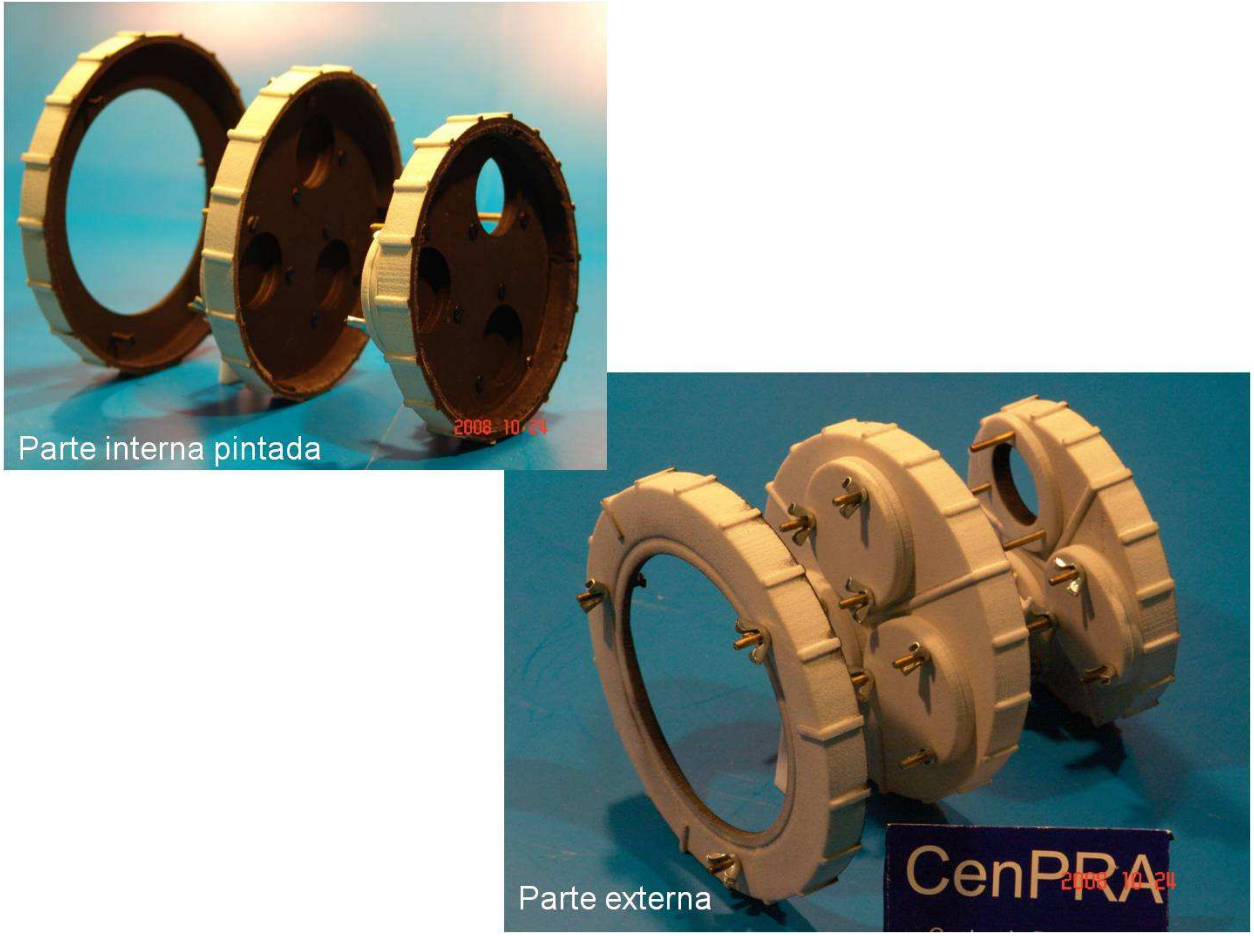
Fotos da Aplicação:



Descrição: O projeto consiste no desenvolvimento de peças, que integradas e submetidas à pressão hidrostática provocam o movimento de uma roda.

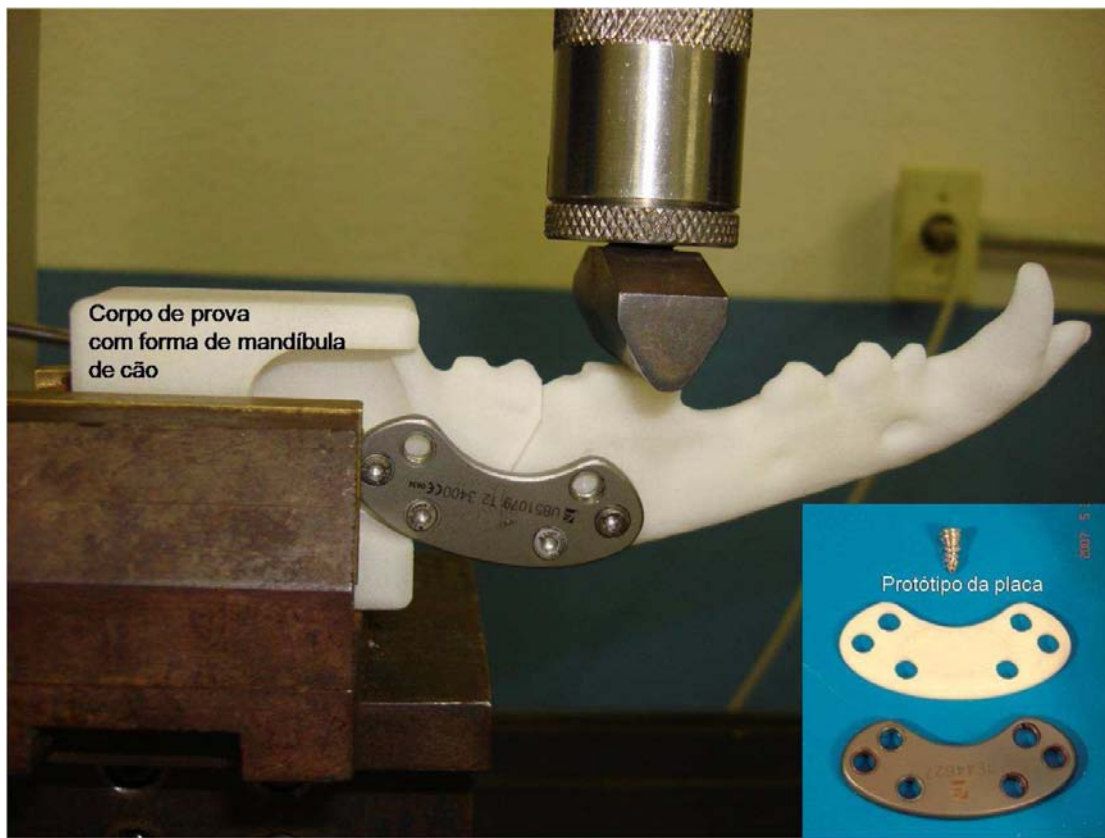
Benefícios da PR: viabilidade de formas complexas.

Necessidades: Estanqueidade, transparência, resistência mecânica.

Projeto: Peças para Fixação de Filtros em Telescópio Proponente: Sidney Cunha, CTI- Campinas		PRJ.17
Área: Astronomia	Material: Nylon/SLS	Classe: PF
Fotos da Aplicação:		
		
Descrição: Fixadores de filtros em telescópio, para observação do Sol. A não opacidade do material e rugosidade pode influenciar na qualidade da observação. A superfície deve ser lisa e preta. Dimensões 200x200x25mm		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas.		
Necessidades: Opacidade à luz, cor, acabamento.		

Projeto: Biomodelos de Mandíbula de Cão para Corpo de Prova Proponente: Elisângela de Freitas, UNESP/Botucatu Projetista: Pedro Noritomi, Gustavo Paschoal- CTI/Campinas		<h1>PRJ.18</h1>
Área: Veterinária	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



Descrição: O corpo de prova será utilizado em ensaios mecânicos. Os dados gerados serão utilizados para fazer uma correlação com os dados obtidos de simulações feitas pelo método de elementos finitos. (Freitas, 2008)

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e qualidade dos resultados obtidos, trabalho considerado inédito na área.

Necessidades: Resistência mecânica (tração) e fixação por parafusamento.

Projeto: Órtese para Membro Inferior de Ave		PRJ.19
Proponente: Elisângela de Freitas - UNESP/Botucatu Projetista: Gustavo Paschoal - CTI/Campinas		
Área: Veterinária	Material: ABS/FDM	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



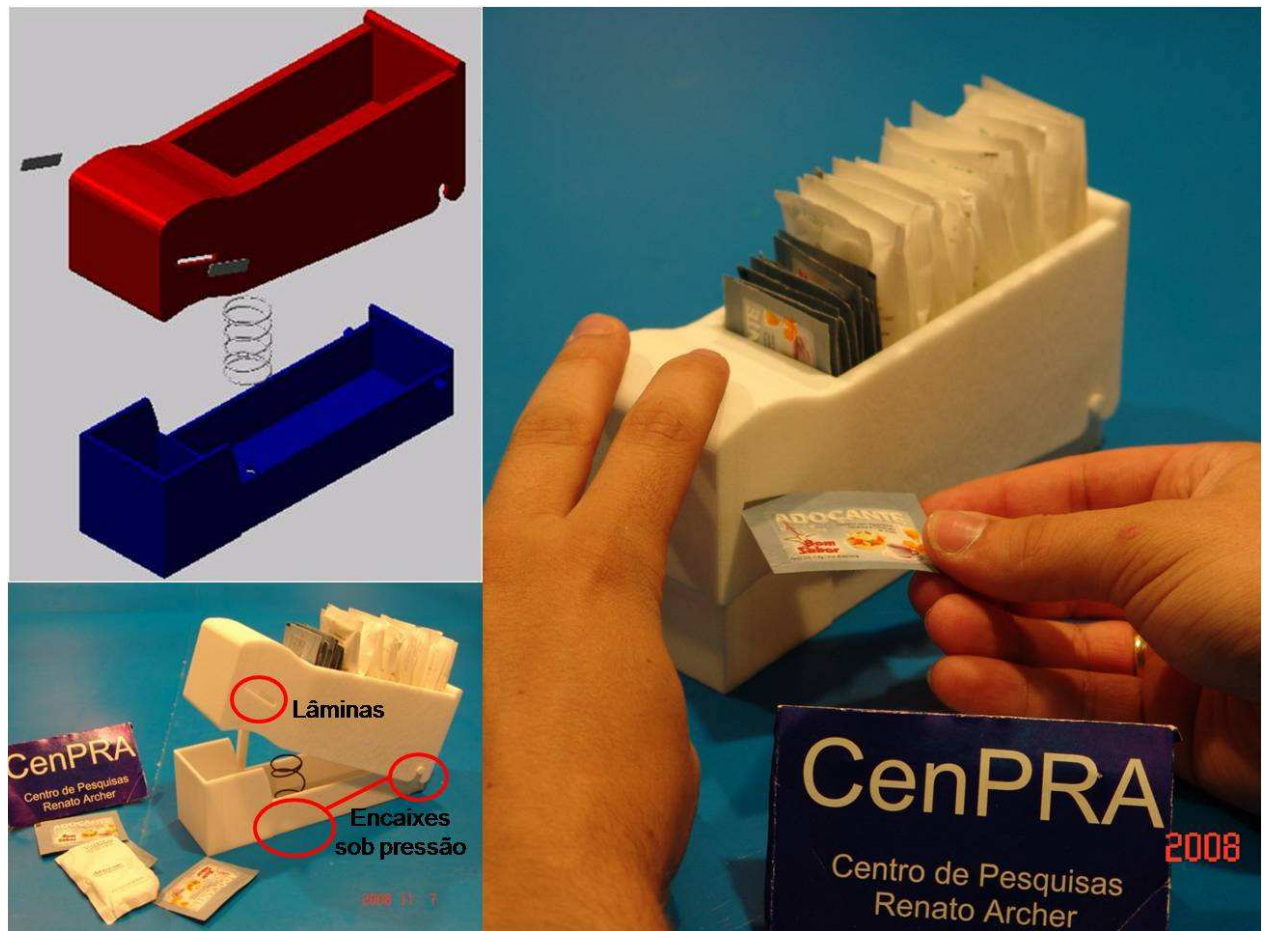
Descrição: Projeto de órtese anatômica e ajustável para membro inferior de Gavião, gerada por *software* CAD, em material leve, resistente ao impacto, e anti-corrosivo.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, alívio de peso.

Necessidades: Resistência ao impacto e ao desgaste, peças ajustáveis e resistentes ao stress mecânico.

Projeto: Cortador de saches		PRJ.20
Proponente: Bruno Bennheim - UNIP/SP		
Área: Engenharia de Produto	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



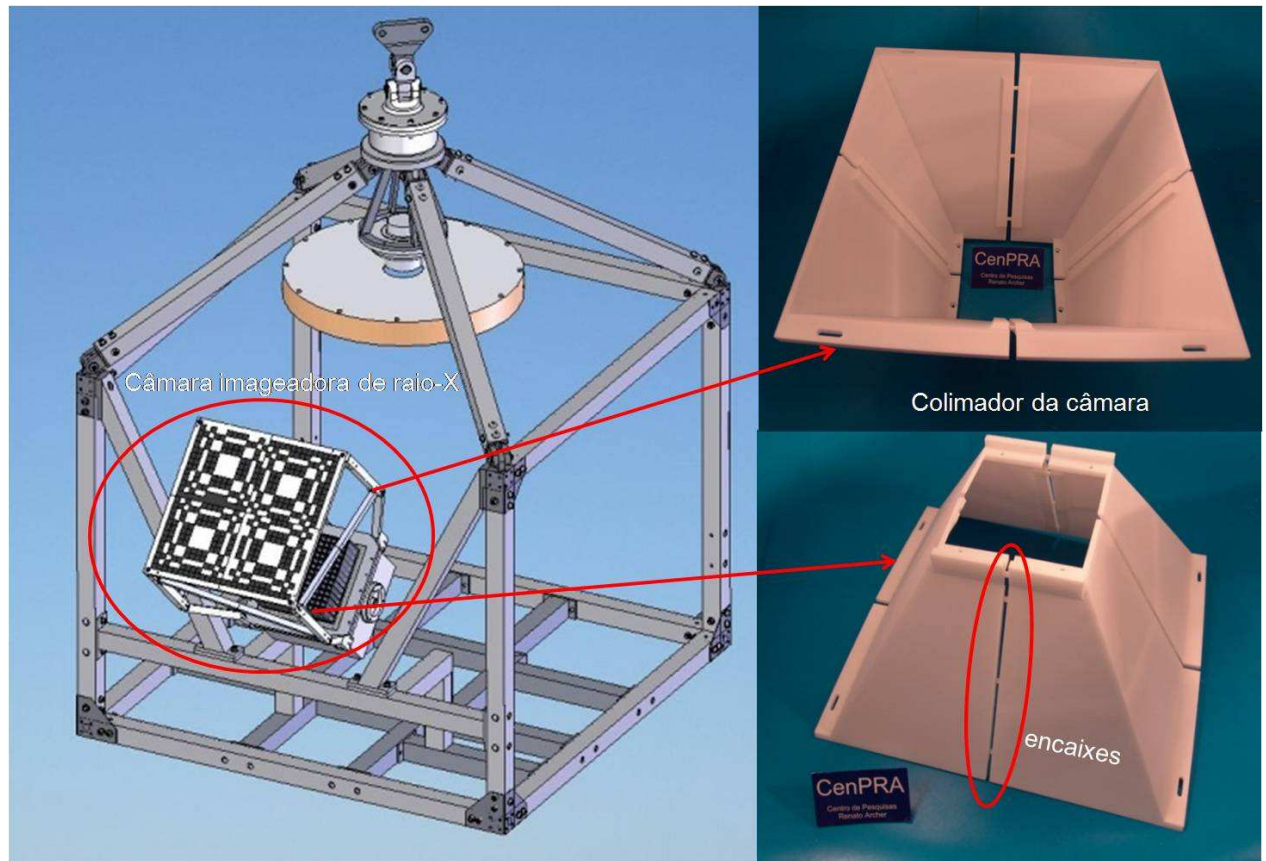
Descrição: Construção de um cortador de saches, para avaliação do projeto em pontos de encaixe sobre pressão, folgas e alojamento para inserto de mola.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e validação do projeto CAD.

Necessidades: precisão nas folgas e resistência mecânica dos encaixes sob pressão e do elemento de fixação da mola.

Projeto: Colimador de Raio-X Estelar Proponente: Dr. João Braga - INPE/SJC Projetista: Luis A. Reitano - INPE/SJC		<h1>PRJ.21</h1>
Área: Astrofísica	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



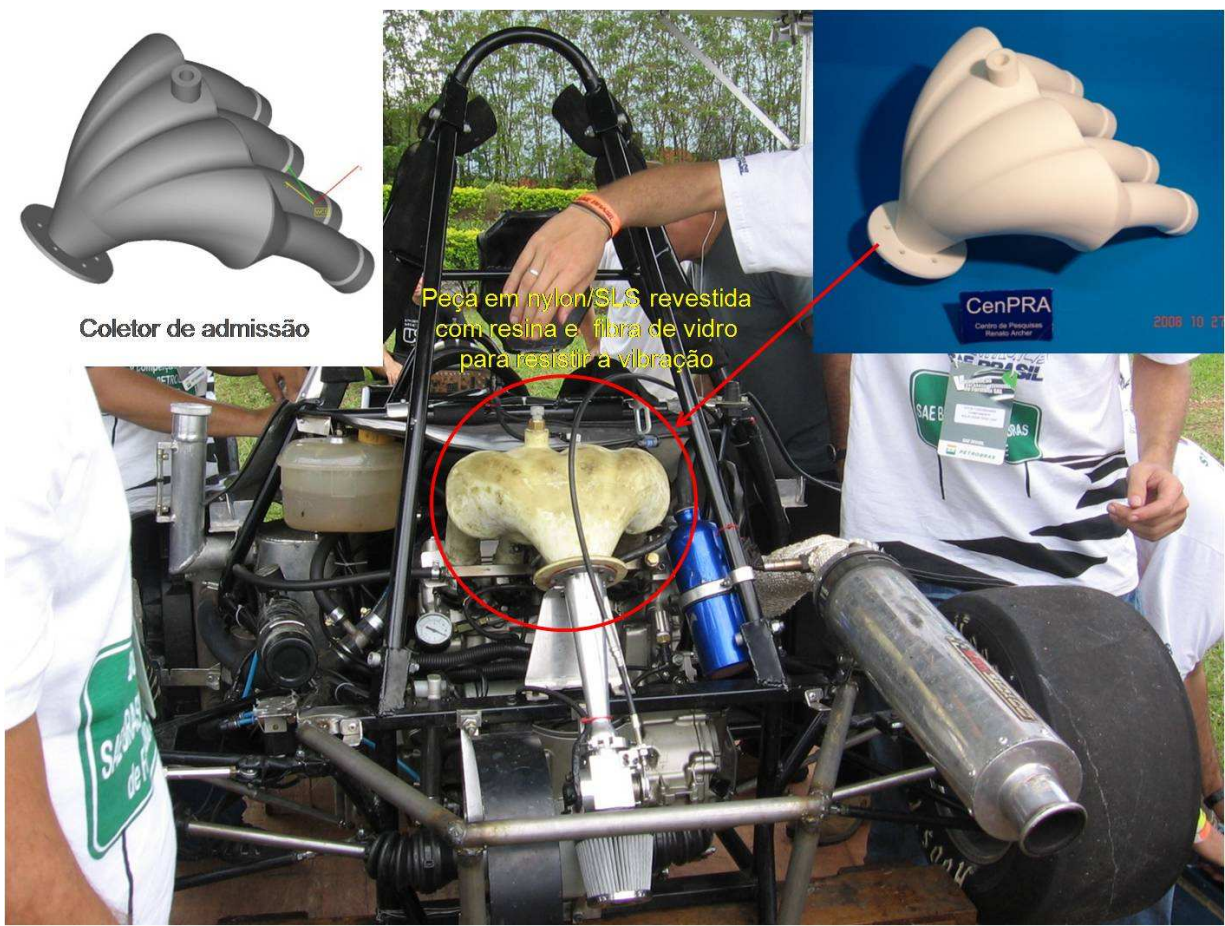
Descrição: Projeto de estrutura cúbica de 400x400x300 mm que foi reformulado em função dos recursos da PR. O projeto inicial consistia de um suporte cúbico em estrutura de alumínio, e atualmente em execução será utilizado um suporte trapezoidal e em nylon/SLS.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, alívio de peso.

Necessidades: Resistência mecânica, alívio de peso e volume.

Projeto: Carro Experimental 1: Coletor de admissão		PRJ.22
Proponente: Equipe Solid Edge – Fórmula SAE/EESC-USP		
Área: Engenharia Automotiva	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:

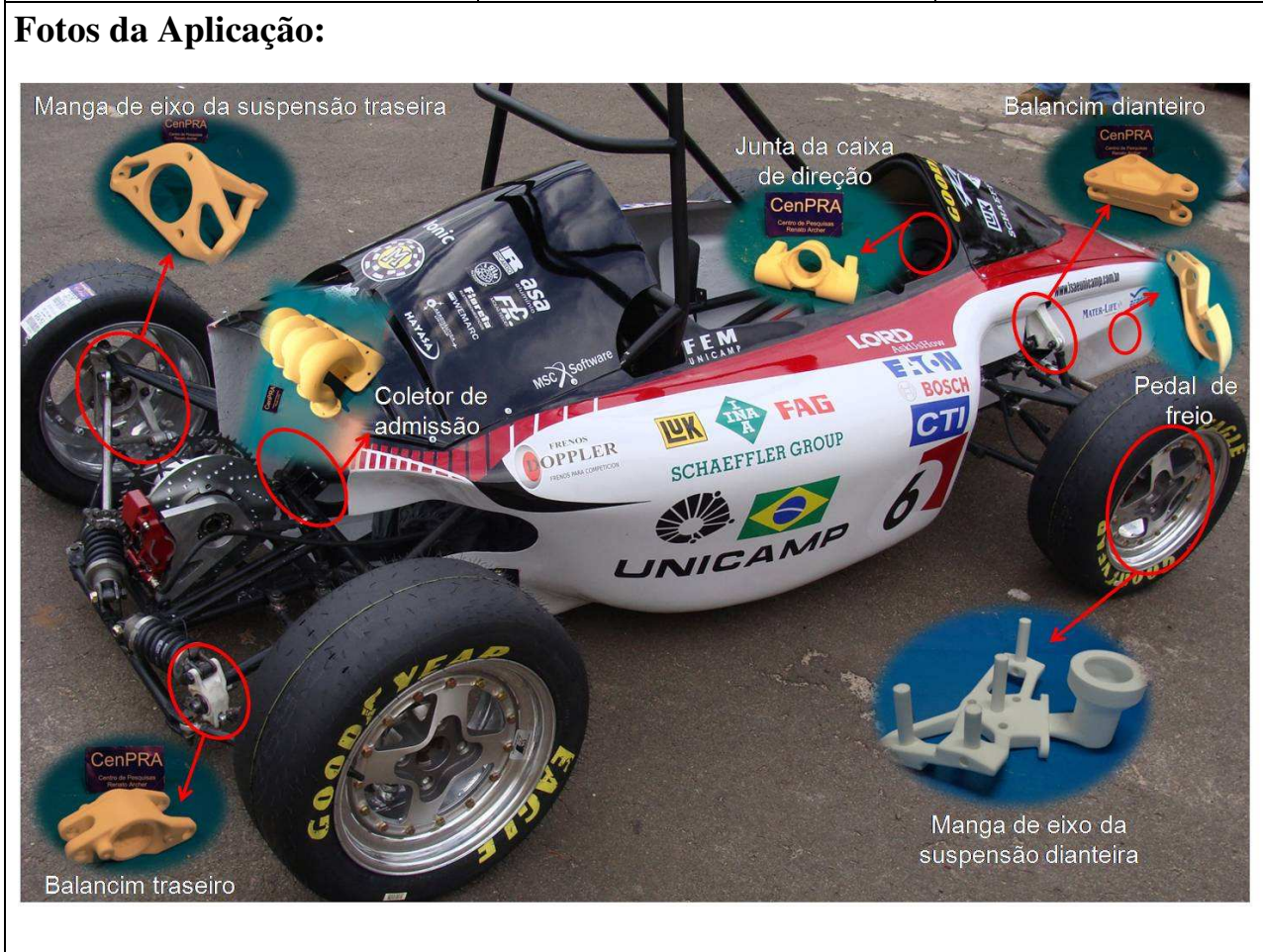


Descrição: O projeto consiste no emprego da PR em construção de peça para teste, integrada ao motor de um veículo experimental. Peça esta, um coletor de admissão de ar, parte integrante do sistema de mistura ar/combustível.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo de projeto e alívio de peso.

Necessidades: Resistência à vibração, à temperatura, produtos químicos, pressão (gases), e também alívio de peso e superfície interna com baixa rugosidade.

Projeto: Carro Experimental 2: Peças da Suspensão, Junta da Barra de Direção, Pedal do Freio e Coletor de Admissão Proponente: Equipe Fórmula SAE- FEM/UNICAMP		<h1>PRJ.23</h1>
Área: Engenharia Automotiva	Material: nylon/SLS	Classe: PF



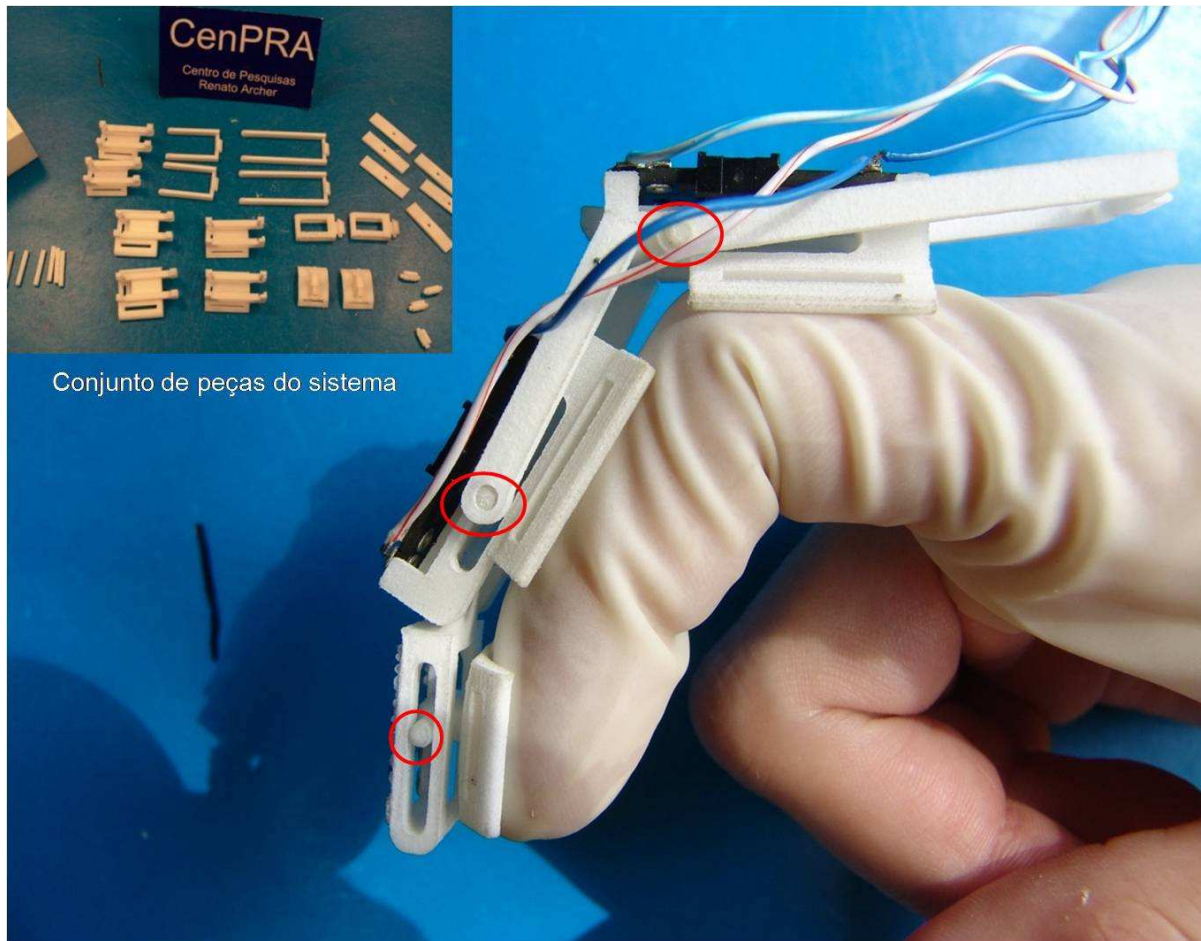
Descrição: Construção de peças em PR para avaliação do projeto e encaixes na estrutura do carro. Dentre estas, pedal de acionamento do freio, balancim e manga da suspensão, junta da barra de direção e coletor de admissão.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência mecânica (compressão e impacto), alívio de peso.

Projeto: Dispositivo Háptico de Dedo		<i>PRJ.24</i>
Proponente: Thiago Velho, FEM/DPM- Unicamp Apoio: Gustavo Paschoal, CTI/Campinas		
Área: Mecatrônica	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



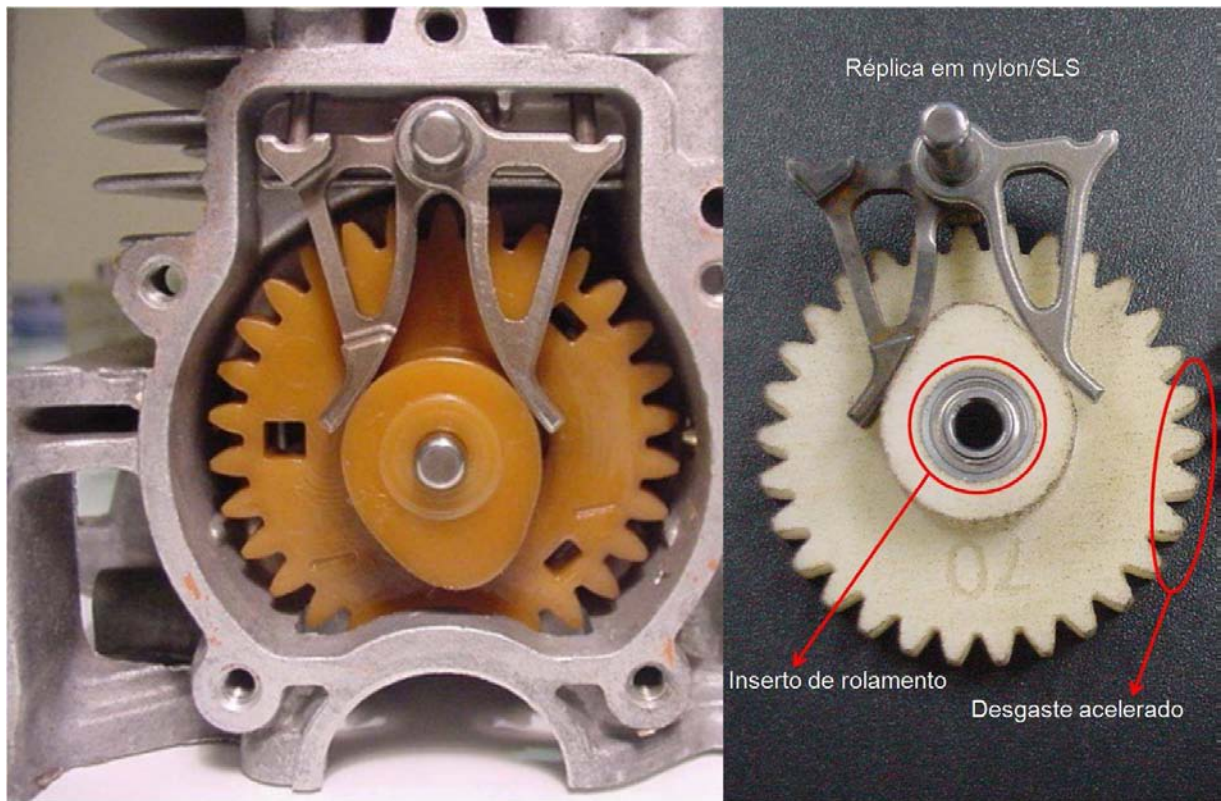
Descrição: O projeto consiste no desenvolvimento de um conjunto de peças móveis para um dispositivo háptico. (Velho, 2008)

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas.

Necessidades: Resistência mecânica, precisão, baixa rugosidade.

Projeto: Carro Experimental 3: Engrenagem do Eixo de Comando		PRJ.25
Proponente: Equipe Fórmula ECOCAR- FEM/UNICAMP		
Área: Engenharia Automotiva	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



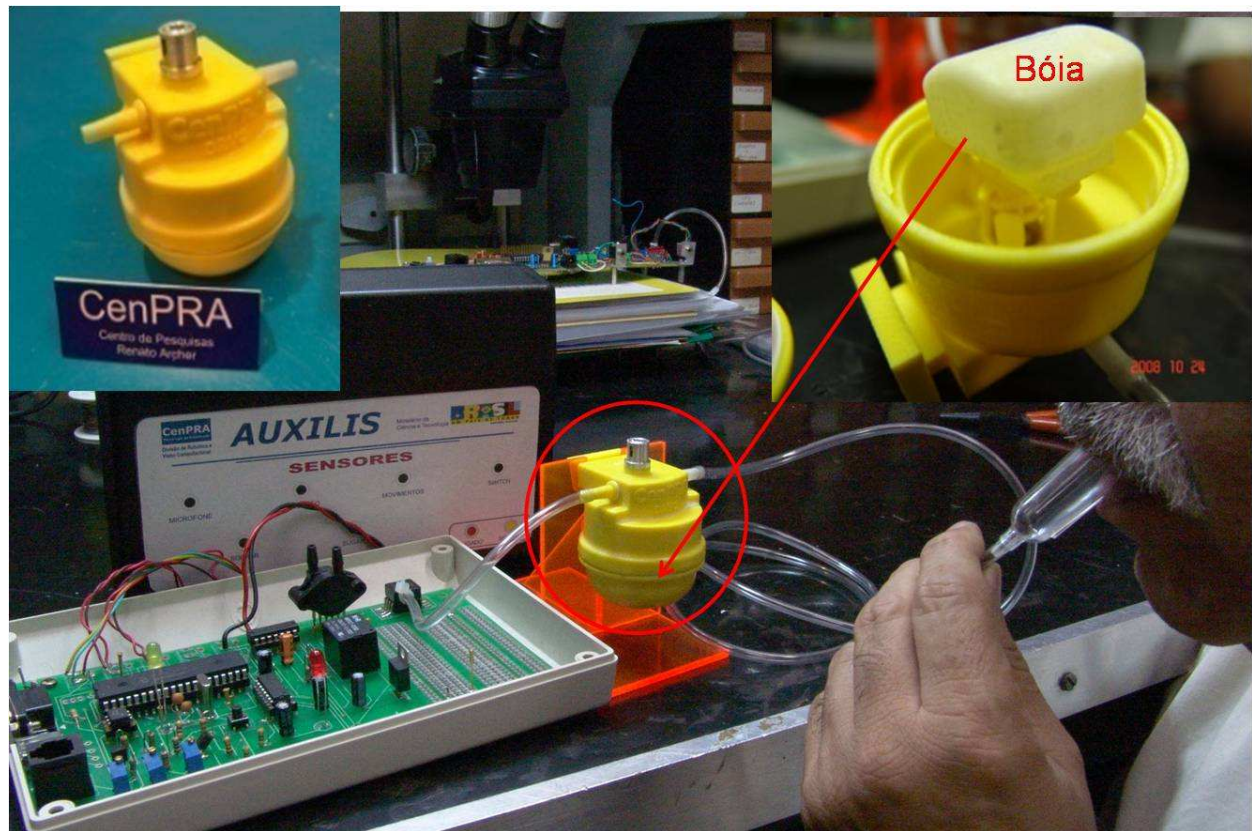
Descrição: O projeto consiste no desenvolvimento de engrenagem para o eixo de comando do motor de carro experimental super econômico.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência ao desgaste, pressão e temperatura.

Projeto: Retentor de Saliva		<i>PRJ.26</i>
Proponente: Eng. José Resende Beiral – CTI/ Campinas		
Área: Engenharia Mecânica	Material: ABS/FDM	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



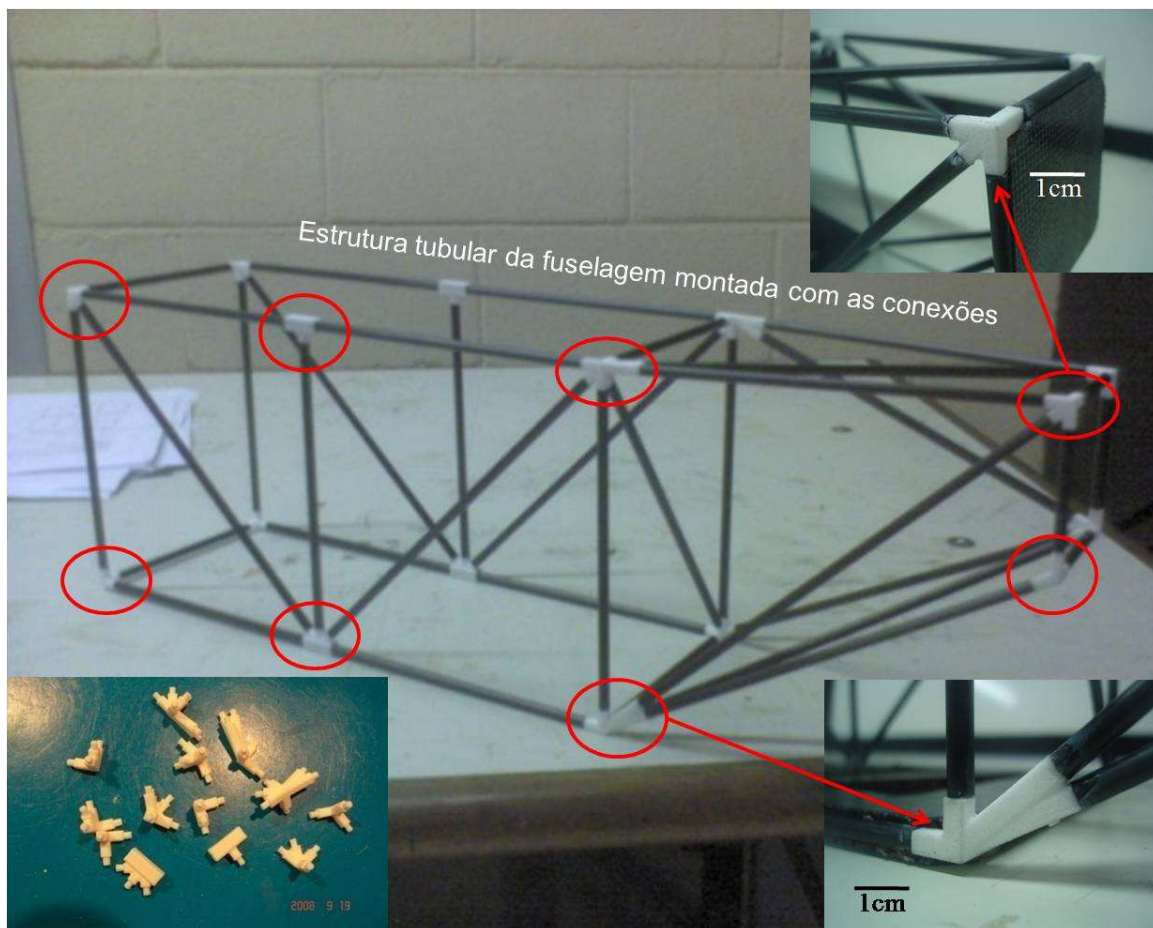
Descrição: Dispositivo para reter saliva e umidade, aplicado a sistema de controle de funções no computador, através de comandos por sopro e sucção de portadores de deficiência motora. A contribuição da PR está na construção desse retentor de saliva com bóia inteligente.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas.

Necessidades: Resistência á pressão, estanqueidade, precisão nos encaixes.

Projeto: Aeromodelo: conexões de suporte		PRJ.27
Proponente: Equipe Fórmula Aero Design - FEM / Unicamp		
Área: Engenharia-Aeronáutica	Material: Nylon/SLS	Classe: PF


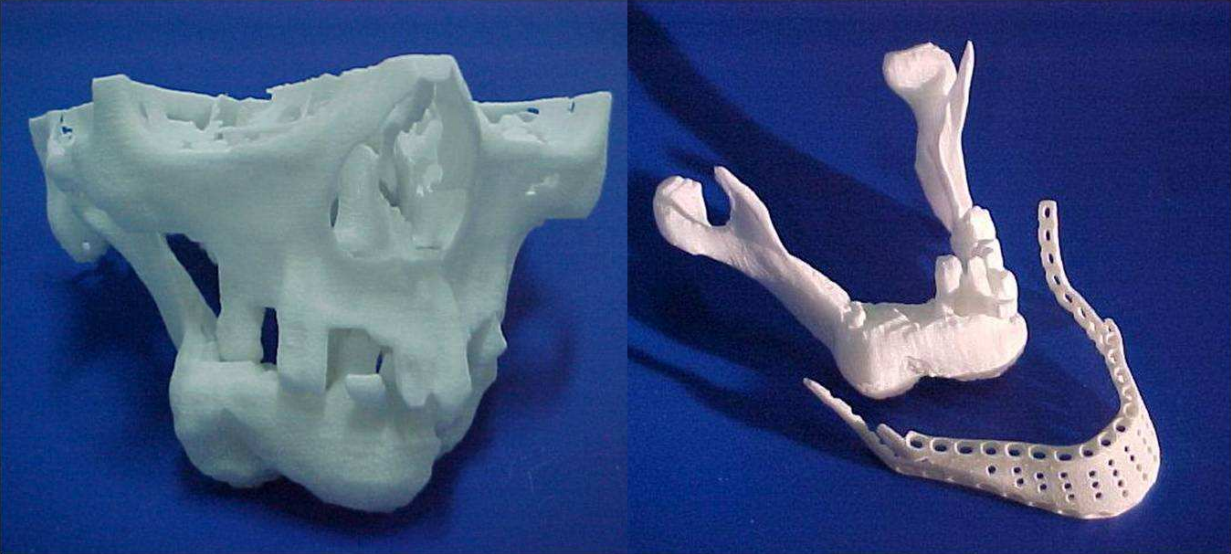
Fotos da Aplicação:



Descrição: Desenvolvimento de componente estrutural para montagem de fuselagem de Aeronave. As conexões são elos da estrutura tubular e tem encaixe sobre pressão.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, precisão dimensional, alívio de peso.

Necessidades: Resistência mecânica.

Projeto: Treinamento Cirúrgico 1: Fixação de Prótese de Mandíbula Proponente: Dr. César Oleskovicz – HBDF- Brasília		<i>PRJ.28</i>
Área: Medicina	Material: Nylon/SLS	Classe: PF
Fotos da Aplicação:		
		
		
Descrição: Construção de biomodelo físico em PR para ensaio de fixação de uma prótese de mandíbula em titânio. O biomodelo foi cortado e parafusado para ensaio do procedimento cirúrgico.		
Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.		
Necessidades: Resistência mecânica á manipulação, corte e fixação de parafusos.		

Projeto: Treinamento Cirúrgico 2: Fixação de Prótese de Mandíbula Proponente: Dr. Leandro Baccarin- HSPE/SP Modelagem: Airton M. Silva CTI/Campinas		<h1>PRJ.29</h1>
Área: Medicina	Material: ABS/FDM	Classe: PF

Fotos da Aplicação:

Biomodelo físico como ferramenta de treinamento

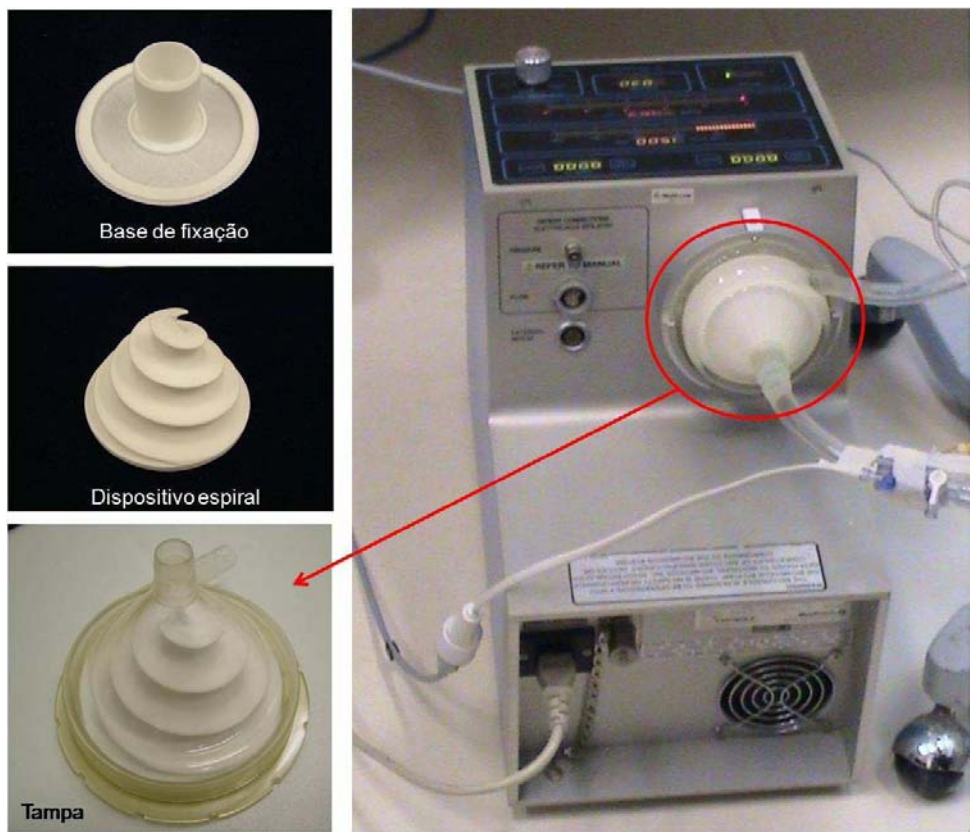
Descrição: Treinamento cirúrgico para implantação de prótese em portador de ATM. O treinamento consiste em desbaste do biomodelo e parafusamento da prótese no biomodelo construído em PR.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, relação custo benefício, melhoria do entendimento entre os membros da equipe de cirurgia.

Necessidades: Resistência mecânica à manipulação, desbaste e fixação de parafusos.

Projeto: Peça de Bomba Centrífuga de Circulação Extracorpórea Proponente: Dr. Aron Pazin de Andrade e Juliana Leme, Fundação Adib Jatene - Instituto Dante Pazzanese/São Paulo		<h1>PRJ.30</h1>
Área: Bioengenharia	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



Descrição: O sistema consiste de duas peças, uma base de fixação, outra em espiral feitas por PR e uma tampa transparente. O sistema foi submetido a ensaios para levantamento da curva de desempenho hidrodinâmico.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência mecânica à pressão, ambiente químico, impermeabilidade, baixa rugosidade e colagem.

Projeto: Microaspersor de Água		<i>PRJ.31</i>
Proponente: Dr. Alessandro C. S. Almeida e Dr. Tarlei A. Botrel, ESALQ-Piracicaba		
Área: Engenharia Agrícola	Material: Nylon/SLS	Classe: PF

Fotos da Aplicação:



Descrição: Estudo de geometrias de microaspersor com micro canais, para hortas agrícolas. O emprego da PR com a capacidade de gerar formas complexas viabilizou o estudo da geometria dos canais que vão impactar no desempenho do dispositivo, comparado ao mesmo modelo feito em usinagem CNC.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência mecânica á pressão, baixa rugosidade.

Projeto: Microrobôs Móveis

Proponente: Prof. Dr. Humberto Ferasoli, Unesp-Bauru

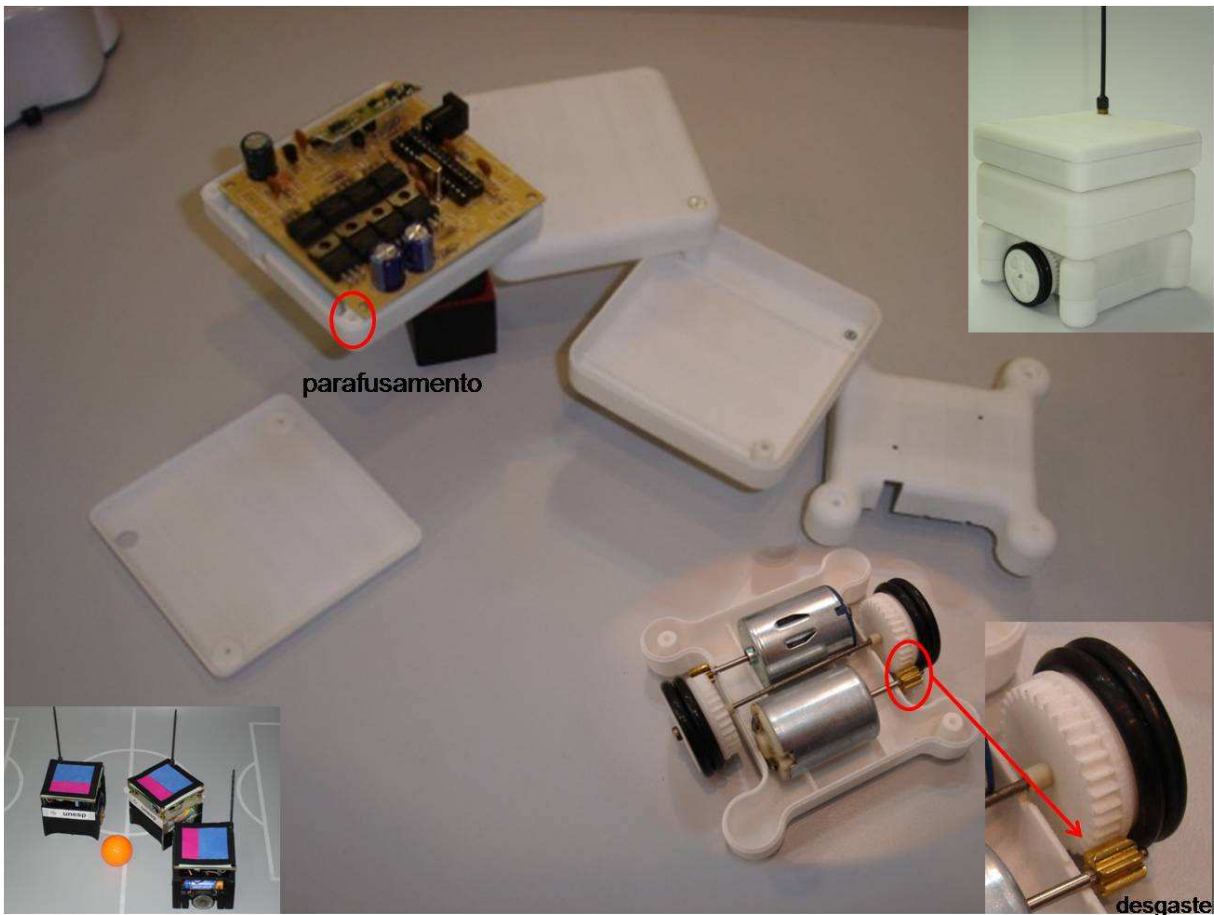
PRJ.32

Área: Mecatrônica

Material: Nylon/SLS

Classe: PF

Fotos da Aplicação:



Descrição: Confeção de estrutura 75x75x75 mm e conjunto mecânico de tração para robôs móveis em PR, direcionado á aplicações não convencionais em robótica, com ênfase no Ensino, Pesquisa e formação em Automação.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e redução de tempo.

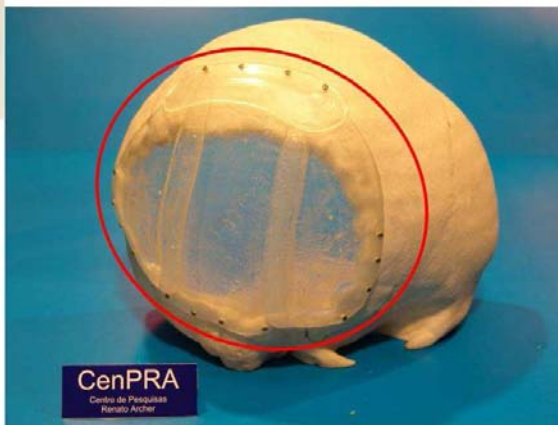
Necessidades: Resistência ao impacto, desgaste, parafusamento ,precisão e cor.

Projeto: Prótese Expansível para Utilização em Cranioplastia		PRJ.33
Proponente: Dr. Galvão Roland- Clinica Roland, Projetista: Pedro Noritomi, Gustavo Paschoal-CTI/Campinas		
Área: Medicina	Material: ABS/FDM	Classe: FR

Fotos da Aplicação:



Placas em ABS/FDM utilizadas para produzir molde de gesso



Placas em PMMA produzidas em molde de gesso gerado das placas de ABS/FDM

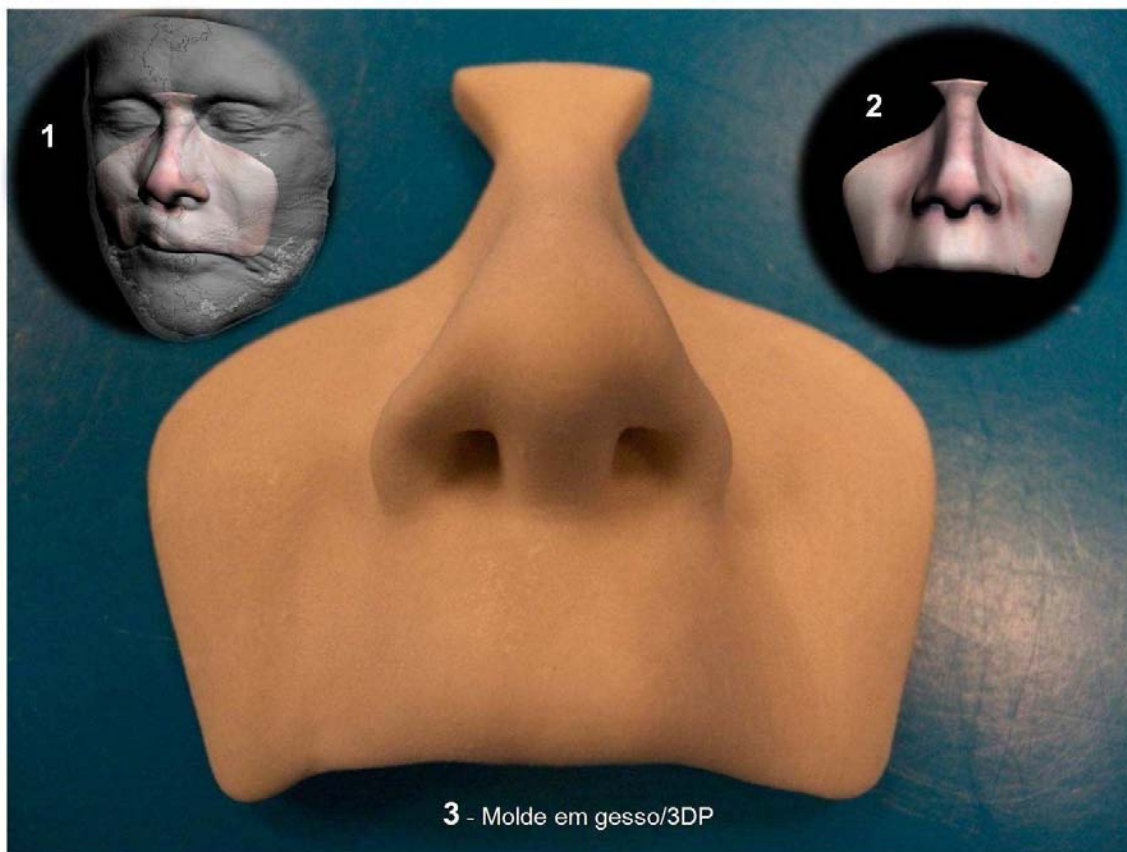
Descrição: Confeção de prótese expansível para utilização em cranioplastia, a partir de molde positivo feito em ABS/FDM. Para se chegar à prótese em material biomédico, fabricou-se um molde negativo em gesso a partir do molde positivo em ABS/FDM. Os modelos virtuais da prótese foram gerados em software CAD e o modelo do crânio em PR para teste de validação, a partir de tomografia computadorizada (TC) com reconstrução no *software InVesalius*.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, precisão.

Necessidades: Resistência mecânica à pressão, baixa rugosidade, parafusamento.

Projeto: Prótese de Nariz		<i>PRJ.34</i>
Proponente: Dr. Galvão Roland - Clínica Roland, Projetista: Adriana Silva e Airton M. Silva - CTI/Campinas		
Área: Medicina	Material: Gesso/3DP	Classe: FR

Fotos da Aplicação:



Descrição: O molde foi utilizado para a confecção de uma prótese de nariz em silicone. O molde virtual foi originado da modelagem CAD. O processo de obtenção da prótese foi por meio de molde negativo a partir do molde positivo.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e redução de tempo.

Necessidades: Resistência à pressão e ambiente químico, relativos à moldagem da prótese em silicone.

Projeto: Sistema de Transmissão de Potência - tipo CVT		PRJ.35
Proponente: Breno Raizer – FEM/Unicamp		
Área: Engenharia Mecânica	Material: Nylon/SLS	Classe: FR

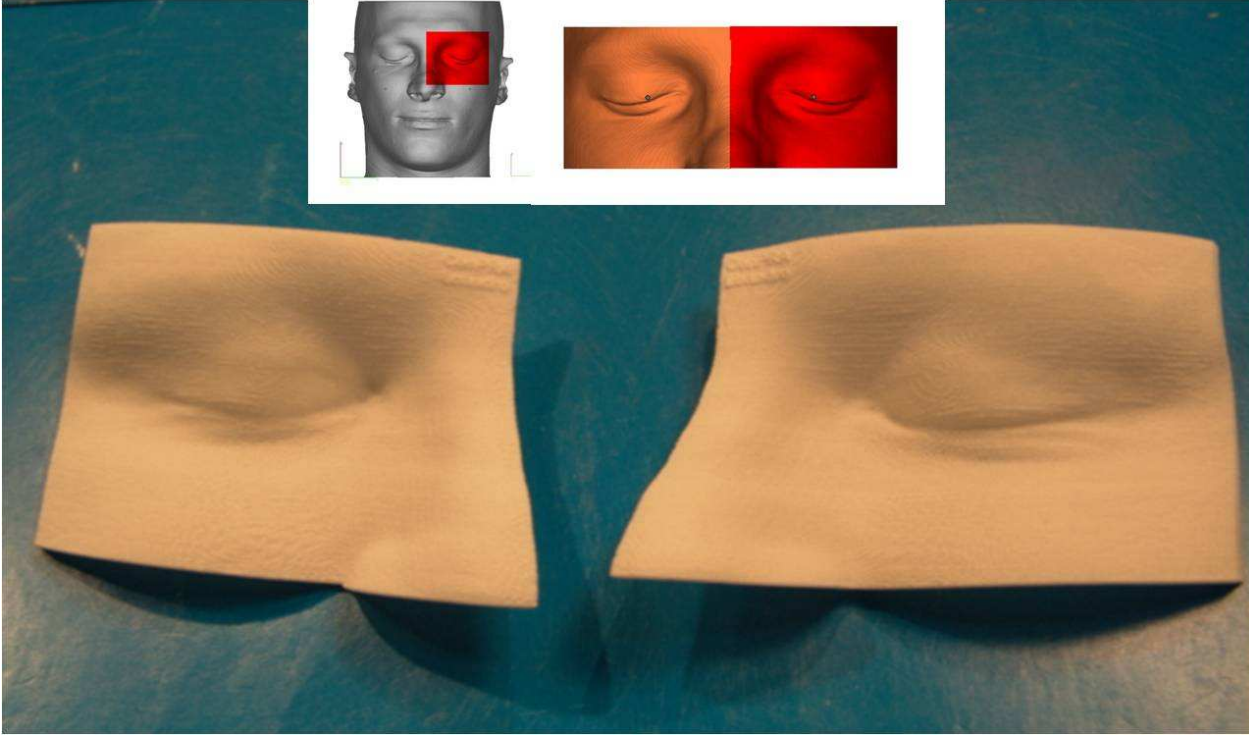
Fotos da Aplicação:



Descrição: O projeto consiste na construção de um modelo didático para avaliação do sistema e peças 200x200x130 mm que serão utilizadas para confecção de moldes para fundição em metal.

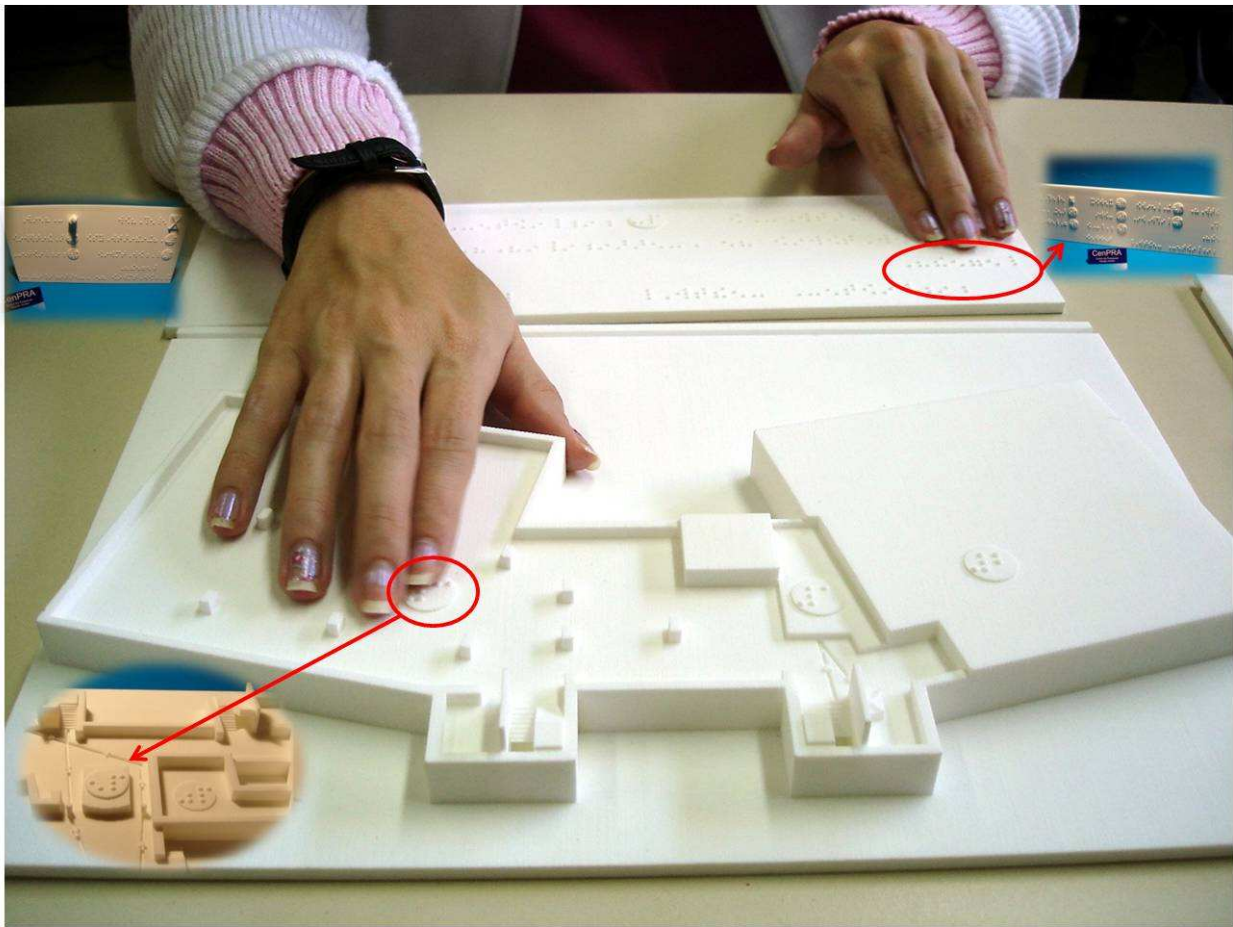
Benefícios da PR: Viabilidade formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência ao esforço mecânico e ambiente químico.

Projeto: Prótese Ocular		<i>PRJ.36</i>
Proponente: Priscila Marafon, FO-USP Modelagem: Pedro Noritomi e Airton Silva - CTI/Campinas		
Área: Odontologia	Material: Nylon/SLS	Classe: FR
Fotos da Aplicação:		
		
<p>Descrição: Reproduzir modelos 3D em PR, da região ocular, para avaliar a estabilidade dimensional em próteses confeccionada s por meio de molde negativo obtido a partir do molde positivo em PR. (Marafon, 2008)</p>		
<p>Benefícios da PR: Viabilidade formas complexas, redução de tempo.</p>		
<p>Necessidades: Resistência a temperatura e baixa rugosidade.</p>		

Projeto: Maquete Táctil da Biblioteca da Unicamp		PRJ.37
Proponente: Dr. Gabriela Celani e Luis Milan, FEC/Unicamp		
Área: Arquitetura	Material: Nylon/SLS	Classe: MR

Fotos da Aplicação:

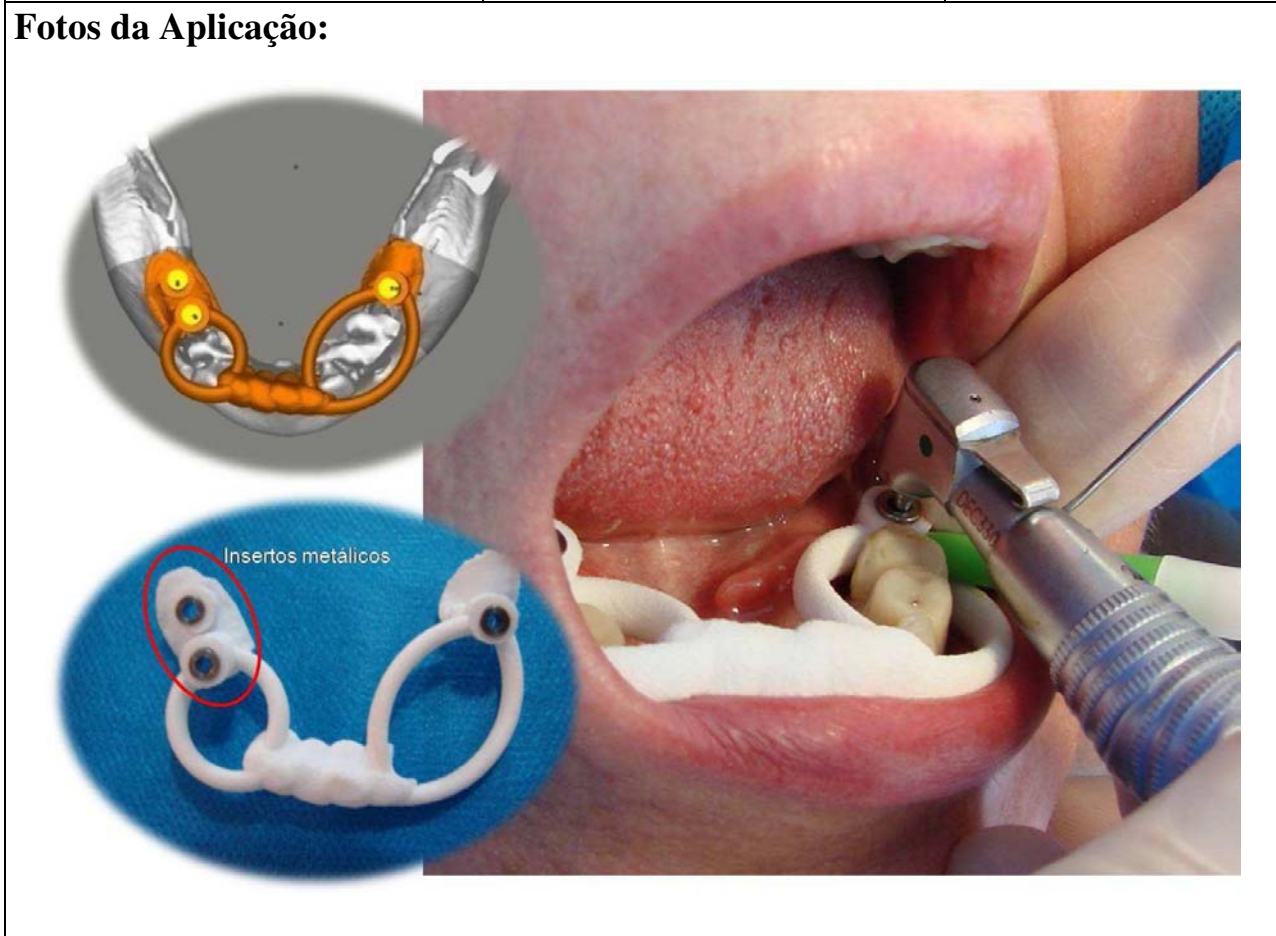


Descrição: Maquete táctil do layout dos pavimentos da biblioteca central da UNICAMP, para orientação de portadores de deficiência visual.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas e durabilidade.

Necessidades: Resistência a manipulação, baixa rugosidade.

Projeto: Peça Guia para Instalação de Implantes e Prótese Fixa Proponente: Dr. Giovani di Giacomo, UNIFESP Projetista: Gustavo Paschoal - CTI/Campinas		<h1>PRJ.38</h1>
Área: Odontologia	Material: Nylon/SLS	Classe: MR



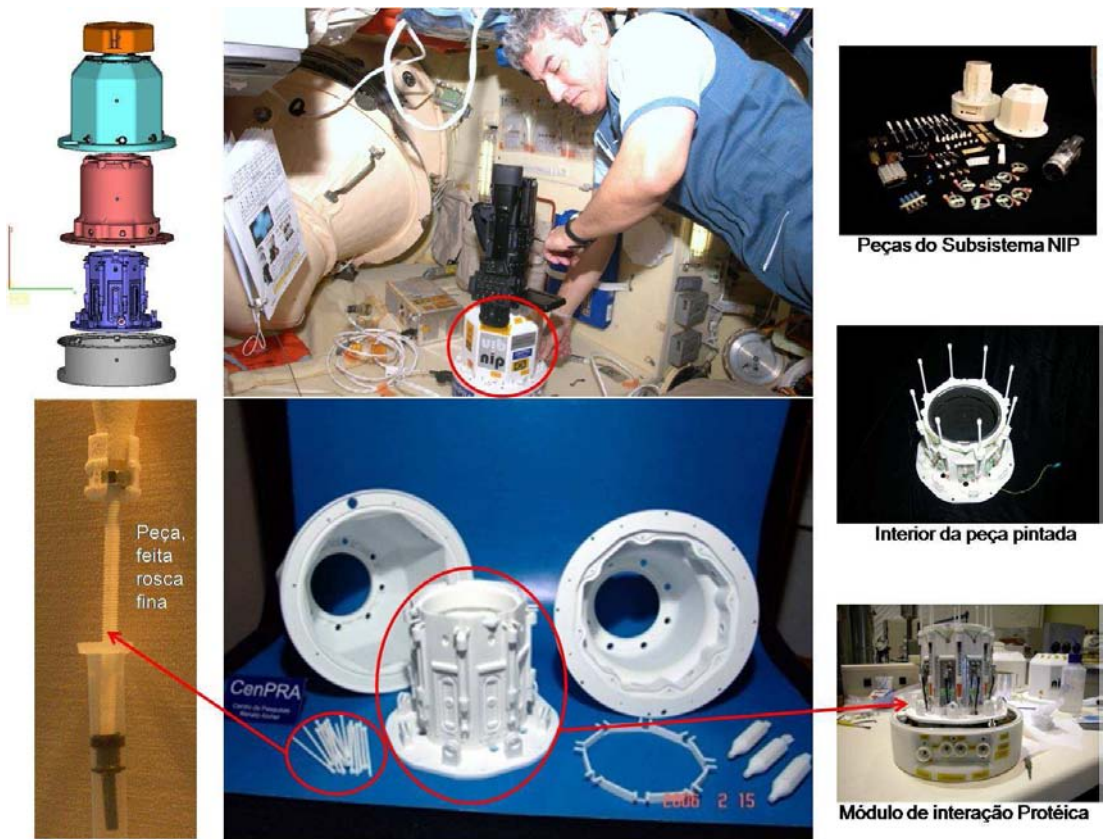
Descrição: Confeção de guia em PR para uso direto na instalação de implantes e prótese fixa imediata. A peça em PR recebe um inserto metálico para resistir á abrasão da ação da broca de furação. (Di Giacomo, 2003)

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, e uso de técnica pioneira no Brasil.

Necessidades: Hermeticidade (eliminação de porosidade), precisão em encaixes sob pressão e esterilização em meio químico.

Projeto: NIP - Nuvens de Interação Protéica		<h1>PRJ.39</h1>
Proponente: Aristides Pavani Filho, CTI/Campinas		
Área: Espacial	Material: Nylon/SLS	Classe: MR

Fotos da Aplicação:



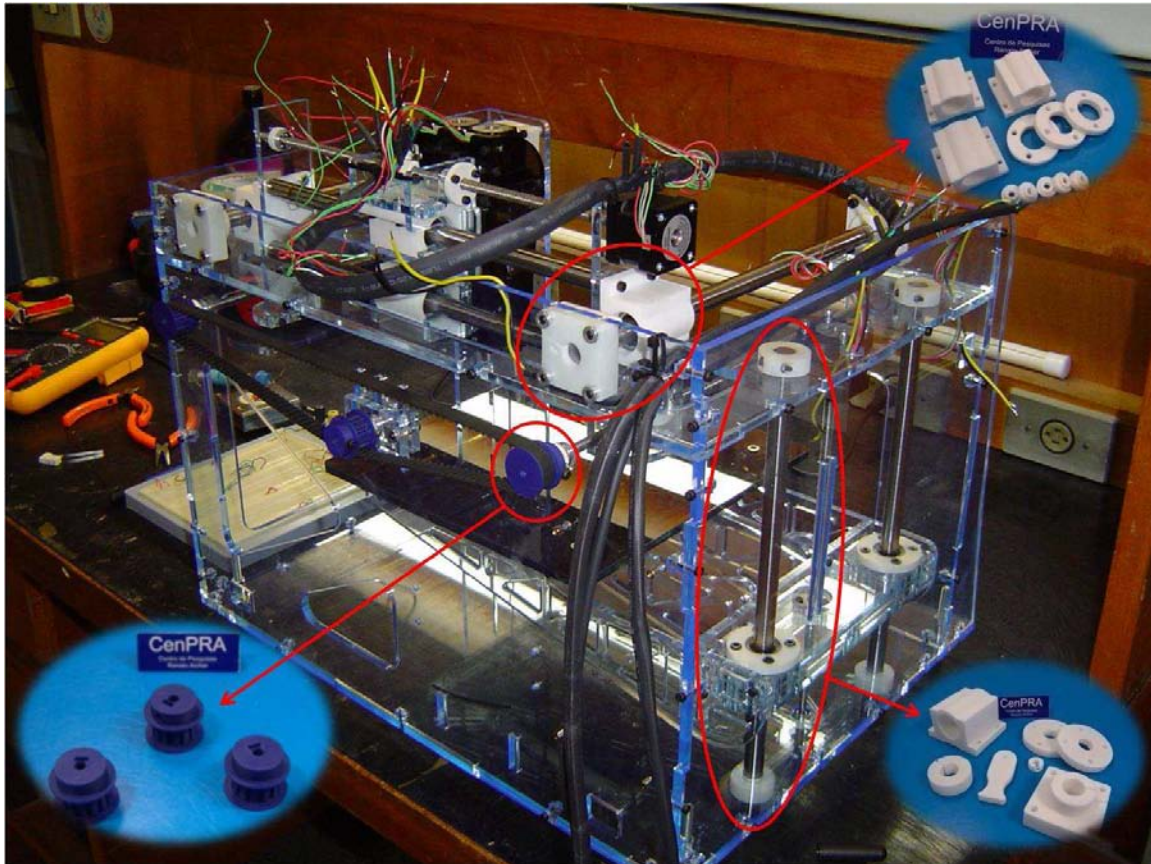
Descrição: Construção de um sistema complexo e hermético, para realização de experimento em ambiente de micro gravidade no interior da ISS. Dezenas de peças foram construídas em PR, e submetidas à testes rigorosos pela AEB (Agência Espacial Brasileira) e ROSCOSMOS (Agência Espacial Russa).

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo, peso.

Necessidades: Estanqueidade de gases, resistência mecânica á vibração, precisão, usinabilidade do material, parafusamento, peso e pintura.

Projeto: Peças Mecânicas para Equipamento de PR Portátil Proponente: Paulo Inforçatti - CTI/Campinas		PRJ.40
Área: Mecatrônica	Material: Nylon/SLS e ABS/FDM	Classe: MR

Fotos da Aplicação:



Descrição: O projeto consiste na construção de dispositivos mecânicos por PR de um equipamento de PR portátil com arquitetura de *hardware* e *software* abertas reproduzido de um projeto disponível na internet (Fab@Home), baseado na tecnologia de extrusão de material.

Benefícios da PR: Viabilidade de formas complexas, redução de tempo.

Necessidades: Resistência mecânica, precisão, peso e durabilidade.

Capítulo 5

5. Discussão

5.1. Prototipagem Visual (PV)

O projeto de modelagem física de macromoléculas (PRJ. 1) é muito representativo no que tange benefícios e necessidades dos protótipos dentro da classe PV. São mostrados neste trabalho os três tipos de representação de modelos de macromoléculas que são: primária, secundária e terciária. A primária mostra os átomos e suas ligações. A secundária mostra fitas referentes ao arranjo desses átomos e suas ligações, e finalmente, a terciária mostra um volume denso com protuberâncias arredondadas que representam a densidade eletrônica da superfície da macromolécula.

Os modelos de macromoléculas constituídos de fitas têm atraído a atenção de visitantes do CTI pela originalidade da forma, embora a sua função principal seja para estudos bioquímicos. Pelo fato de terem sido construídos com nylon/SLS degradado (não mais aplicado a área industrial por questões de aumento da rugosidade e porosidade), apresentam superfície rugosa que, no entanto, não compromete a visualização. Pelo contrário, a rugosidade, por contribuir para a fixação mais eficaz de resinas e tintas, permite colorir o modelo físico com as cores do seu análogo digital. O uso de pó degradado não comprometeu, também, as dimensões do modelo. Tanto as características espaciais (como comprimento, separação e largura das fitas) quanto as cores, têm significados químicos úteis para o estudo e o ensino bioquímicos. Perder dimensão e cor é perder informação. O pó degradado não comprometeu a estabilidade mecânica a ponto de não permitir o manuseio dos modelos. Inclusive, estruturas primárias de moléculas pequenas, não constantes nos arquivos *pdb* (*protein data bank*) das macromoléculas, foram inseridas nas estruturas de fitas. Como essas moléculas pequenas têm estruturas muito finas (relativas às ligações químicas) foi necessário aumentar o tamanho de toda a molécula, preservando as

proporções dimensionais. No entanto, segundo o projetista bioquímico, isto não traz problemas no estudo de inserção das moléculas pequenas nas macromoléculas. Ainda sobre a questão mecânica, é importante salientar que foi necessário agregar estruturas auxiliares de suporte no modelo em CAD das macromoléculas, particularmente na representação de fitas, para evitar o colapsamento da estrutura no modelo físico, mantendo assim, a forma original tal qual no modelo digital. O desafio na inserção dessas estruturas em CAD, é que elas tenham uma presença “discreta”, comprometendo ao mínimo a visualização e movimentação das regiões da macromolécula, visando a utilização de recursos táteis.

A exploração tátil dos modelos físicos de macromoléculas pode, eventualmente, ser um recurso a mais, além de forma e cores, na obtenção de informações bioquímicas. Esta, entre outras questões, é algo que se pretende inquirir a um maior número de bioquímicos que terão contato com essas estruturas dentro de um projeto piloto (Bugs et al. 2008; ProEXP 2008), em andamento. Da mesma forma que no projeto de maquetes táteis (PRJ. 3), a estrutura física de macromoléculas pode servir para o ensino de bioquímica a portadores de deficiências visuais.

O projeto de modelos de macromoléculas, pelo conjunto de características acima apresentadas, pode ser considerado como uma simbiose entre ciência, tecnologia, arte e cidadania. Este último se refere ao meio ambiente pelo aproveitamento de material que, de outra forma, seria descartado. Nesta mesma linha de convergência de assuntos técnico-científicos e consciência ecológica, ensaios de aproveitamento do nylon/SLS degradado têm, também, sido feitos, no âmbito do ProMED, para a construção de biomodelos para diagnóstico, planejamento e treinamento cirúrgico e, também, para a construção de moldes para próteses. No entanto, nenhum caso de biomodelagem com nylon/SLS degradado é apresentado no presente trabalho. Mesmo assim, os casos que foram feitos com material não degradado (PRJ. 8 e 28) podem ajudar na validação desses biomodelos feitos com nylon/SLS degradado, conforme discutido a seguir.

Requisitos para a avaliação dos biomodelos feitos com pó degradado podem ser levantados a partir dos projetos PV deste trabalho. Por exemplo, no projeto de cirurgia bucomaxilo de câncer (PRJ. 08), as estruturas do câncer são muito frágeis e uma fragilidade ainda maior poderia ser esperada usando pó nylon/SLS degradado, que cria maior porosidade do que o pó virgem. Assim, estando a peça mais enfraquecida, maior cuidado na remoção do protótipo da máquina SLS e na limpeza deveriam ser considerados, como também o uso de infiltrantes para reforço mecânico. Os

modelos de crânio e estruturas intracranianas de crocodilos pré-históricos (PRJ 9 e 10) apresentam requisitos dimensionais particulares para estruturas pequenas. Os pequenos detalhes dos fósseis são importantes para os estudos de paleozoologia. Esses detalhes não estavam bem resolvidos nos protótipos físicos. Deve-se, no entanto, levar em consideração que as aquisições tomográficas utilizadas na construção do biomodelo virtual foram obtidas no mesmo tipo convencional de tomógrafo aplicado para seres humanos o qual não oferece resolução suficiente para estruturas pequenas de um fóssil. Os equipamentos mais apropriados para modelos de pequenas dimensões são microtomógrafos, que têm resolução dimensional ao nível de escala micro e mesmo ao nível nanométrico (Skyscan 2008). No entanto para corresponder fisicamente a essas pequenas dimensões, teria-se que utilizar tecnologias de PR, SLA ou μ SLA, conforme citado no Capítulo 2.

As demandas relativas à superfície foram feitas nos projetos de arquitetura (PRJ. 3, 6 e 7) e artes (PRJ. 4 e 5). Maquetes e obras de arte foram construídas tanto em SLS/nylon como em gesso/3DP e ABS/FDM. Apesar da rugosidade menos acentuada nas maquetes feitas com nylon/SLS em relação ao gesso/3DP, o amarelamento do nylon/SLS, que dá um aspecto de sujeira, foi apresentado como um problema a ser resolvido. Esse amarelamento que ocorreu, também, na réplica do sistema para experimento espacial - NIP (PRJ. 39), não tem causa bem determinada. Ele ocorreu ao longo do tempo, em condições normais de uma sala de escritório. Quatro possíveis causas foram apontadas para seu surgimento que são: (a) acumulação de poeira e processo lento de degradação (b) térmica, (c) química ou (d) fotoquímica. Das quatro causas apontadas, a acumulação de poeira e a degradação térmica são as menos prováveis, visto que as peças de ABS/FDM brancas e gesso/3DP não infiltradas com cianocrilato (que também são brancas), não adquiriram a coloração amarelada. A temperatura ambiente está muito abaixo da temperatura de processo (~ 180 °C) o que reforça que a degradação não é de origem térmica exclusivamente. Por outro lado, a exposição ao oxigênio do ar, combinado com a temperatura ambiente, mesmo baixa, poderia resultar no amarelamento lento. Amarelamento acelerado é observado quando o aquecimento de protótipos dentro do equipamento SLS é feito exposto ao oxigênio, situação esta que ocorre quando há uma interrupção no fornecimento de nitrogênio, que é o gás utilizado para manter uma atmosfera inerte. Finalmente, a causa de degradação fotoquímica parece plausível pelo fato de que áreas protegidas da luz, por exemplo, guardadas em gavetas ou pertencentes a regiões internas das peças, sofrem um amarelamento menos intenso.

Sanchez et. al. (2007) em experimento de envelhecimento acelerado do nylon/SLS, utilizando radiação UV, não reportou amarelamento. No entanto observou diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova construídos ao longo da direção Z (orientação do empilhamento das camadas). Qualquer conclusão a respeito deve, no entanto, ser feita mediante estudos sistemáticos. No entanto, a despeito de qual seja o mecanismo de amarelamento, uma observação que emerge dessa questão é que tanto artistas quanto arquitetos apreciam a peça conforme ela foi entregue, isto é, com a brancura apresentada quando é retirada do equipamento SLS.

Arquitetos e artistas apontaram textura, cor e transparência como elementos a serem explorados em aplicações de PR nas suas áreas de atuação. Destas três, apenas a textura pode ser explorada com os equipamentos de PR existentes no CTI e utilizados no presente trabalho. Considera-se que o equipamento FDM, embora tenha o recurso de produzir modelos em cores diferentes da branca, não é uma solução para projetos desses profissionais, pois não é possível imprimir múltiplas cores em uma única camada ou peça. O equipamento permite trabalhar com uma cor de cada vez. No entanto, em caso específico (PRJ. 10), em que o cérebro de um fóssil de crocodilo tinha que ser destacado no biomodelo de crânio, o recurso de cor da FDM foi apreciado pelo proponente do projeto. Espera-se, conforme expresso por arquitetos e artistas, que uma possível aquisição de um equipamento 3DP com recursos de impressão em CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, black) será bem-vinda. Outros profissionais também serão beneficiados. É o caso de designers de bens de consumo como, por exemplo, aquele que projetou o aparelho celular (PRJ. 13). É o caso, também, de engenheiros mecânicos que poderiam imprimir seus diagramas coloridos de campo de tensão, gerados das simulações de comportamento pelo método de elementos finitos (PRJ. 02). Engenheiros que trabalham com metrologia (PRJ. 11 e 12) seriam beneficiados pela visualização dos desvios dimensionais. A aplicação de cores nas estruturas terciárias de macromoléculas é de fundamental importância para o estudo das densidades eletrônicas pelos bioquímicos.

Arquitetos, artistas e designers têm uma importante contribuição a dar no desenvolvimento de novas aplicações de PR, não utilizando apenas uma única tecnologia, mas todas as tecnologias de PR disponíveis no mercado. O projeto Pinacoteca do Estado de São Paulo (PRJ. 7) é um exemplo do uso intensivo e diversificado dessas tecnologias pois conta com esculturas opacas ou transparentes, coloridas ou de uma só cor, entre outros elementos variados. Neste projeto,

miniaturas de obras de arte, produzidas por PR, serão utilizadas para o planejamento de exposições (Celani et. al., 2008). Outro exemplo de projeto empregando várias tecnologias PR em maquetaria poderia ser o da maquete do campus da UNICAMP (PRJ. 3).

O projeto artístico (PRJ. 5), reúne elementos de tecnologia e artes manuais. Ele consiste na digitalização de uma obra de arte, sua impressão em gesso/3DP e, finalmente, sua finalização como obra de arte, feita por uma artista que é pintora. Tanto o trabalho da arquiteta como o da pintora poderão contribuir para o progresso das tecnologias de PR, avançando o estado-da-arte. O trabalho da artista que é pintora, por exemplo, pode gerar técnicas de pós-processamento que poderão ser usadas em protótipos funcionais. Artistas plásticos poderão propor formas mais complexas que, inclusive, desafiem a capacidade da PR em construí-las. Arquitetos poderão exigir mais das estruturas, explorando, inclusive, recursos de memória de forma dos materiais e partes móveis monolíticas, tudo isso para demonstrar princípios aplicados à estrutura arquitetônica da maquete (Bonaldo et. al., 2008). No projeto da maquete do museu Guggenghein da Espanha (PRJ. 6), a utilização de recursos de cor e transparência, foram necessidades apresentadas. Enfim, os limites tecnológicos da prototipagem virtual e física, com a capacidade da PR de produzir formas complexas, podem avançar tanto mais quanto esses profissionais da criação tiverem acesso a essas tecnologias.

5.2. Prototipagem Funcional (PF)

Os projetos cujas peças são acopladas dentro ou próximas a motores, como é o caso dos carros experimentais (PRJ 22, 23, 25), dirigível robótico autônomo (PRJ 15) e microrobôs (PRJ.32), sofrem solicitações mecânicas contínuas tais como vibração e fricção. Os proponentes desses projetos expressaram insatisfação com o desgaste rápido das peças que foram todas feitas em nylon/SLS. Desgaste de polímero sob solicitação mecânica contínua é esperado. Quando acrescido de porosidade (característica do processo de sinterização a laser), a resistência mecânica do polímero tende a ser ainda mais reduzida. Vibrações e fricções geram calor que é um agente agravante da degradação mecânica dos polímeros. Uma medida factível para a diminuição do desgaste por fricção e, também, do enfraquecimento do corpo da peça, seria a infiltração de outro material dentro da estrutura porosa dos materiais de PR. Os poros podem ser preenchidos, via efeito capilar, com um líquido que, posteriormente, já dentro dos poros, se solidifica conferindo maior densidade à peça. No entanto, esse aumento da resistência mecânica

não ocorreu com a infiltração de cianocrilato em nylon/SLS para o caso do projeto de carro experimental (PRJ. 25), provavelmente porque as condições de uso - dentro de um motor (embora lubrificado com óleo), são muito desgastantes. Além disso, a temperatura elevada contribui para a degradação do material. Outro exemplo onde a infiltração com cianocrilato não aumentou a resistência mecânica ao nível solicitado foi no projeto de microrobôs (PRJ. 32), onde engrenagens feitas em nylon/SLS eram acopladas com engrenagens de metal. Outro caso similar em que a infiltração com cianocrilato em ABS/FDM não melhorou a resistência mecânica foi no motor a ar comprimido (PRJ. 16). Embora tenha atendido à solicitação de hermeticidade do sistema, este não suportou a pressão requerida para a operação, rompendo as paredes da peça. Uma solução possível nesse caso específico seria a reformulação do projeto da estrutura, inserindo paredes mais espessas para suportar a pressão. Uma infiltração ou uma simples deposição de um material inorgânico com propriedades mecânicas melhores que o cianocrilato, como por exemplo, DLC (Diamond Like Carbon – DLC), é passível de render melhores resultados.

O cianocrilato, como adesivo para a junção de duas partes de uma peça de proteção da hélice do motor (PRJ. 15) em nylon/SLS, não resistiu à vibração a que foi submetida. A colagem foi necessária porque as dimensões do protetor de hélice excediam o volume de construção do equipamento SLS. Assim, ele foi dividido em três partes que foram, então, coladas com cianocrilato. A ruptura da peça, sob vibração do motor, ocorria, exatamente, nos três pontos de emenda. O problema da fadiga das emendas sob vibração constitui-se em um problema a espera de solução. Uma solução plausível ao nível de pós-processamento seria a substituição do cianocrilato por um polímero com propriedades mecânicas mais próximas às do nylon/SLS. Ao nível de projeto, soluções como o uso de estruturas de amortecimento das vibrações, construídas ao lado das emendas, poderiam ser contempladas. Encaixes móveis, absorvedores de vibrações também poderiam ser uma solução para a ruptura de emendas por vibração. Um algoritmo foi desenvolvido recentemente para a geração automática de dispositivos de montagem para peças cujo tamanho excede o volume de construção. (Delebecque et. al. 2008). Caso essas propostas de solução não funcionem, seria o caso de se construir um equipamento de soldagem de peças feitas de nylon/SLS, que utiliza o mesmo princípio de sinterização de nylon com laser. Uma alternativa que não evitaria, mas contornaria o problema de ruptura do nylon/SLS por vibração foi tentada pelo projetista do coletor de admissão do carro experimental (PRJ. 22), que aderiu (com resina

epóxi) uma manta de fibra de vidro ao coletor. Esta foi uma solução preventiva, pois, em caso de falha mecânica induzida pela vibração, a manta evitaria o vazamento de ar que alimenta o motor. Essa medida está, ainda, sob testes e avaliação.

O acoplamento do protótipo ao sistema de teste é crítico para a avaliação do seu desempenho. Os acoplamentos dos protótipos construídos em nylon/SLS foram feitos com parafusamento (PRJ. 14, 15, 18, 22, 28, 32,33) e encaixe sob pressão (PRJ. 13,20, 21, 23, 24, 25, 26, 30). Os parafusamentos utilizados foram de dois tipos: auto-atarrachante e passante. Neste último um furo já é previsto na etapa de projeto para a fixação usando porca e parafuso. Em todos os casos, exceto em dois (comentados a seguir), quer utilizando parafusamento ou encaixe, em nylon/SLS ou ABS/FDM, não houve, até o momento, insatisfação demonstrada pelos proponentes dos projetos. Isto vem ocorrendo mesmo no caso em que o protótipo era parafusado em sistemas dinâmicos como os que geram vibração e fricção. As duas exceções mencionadas são referentes a encaixes e são descritas a seguir.

A primeira exceção deve-se ao fato do encaixe, construído em nylon/SLS, ter paredes finas (PRJ. 27). A infiltração com cianocrilato propiciou reforço mecânico, tornando-o funcional. Vale lembrar que o bom desempenho mecânico neste caso difere dos citados anteriormente, onde as peças infiltradas não responderam a contento às solicitações mecânicas. Isto pode ser explicado pelo fato que as solicitações neste caso são estáticas enquanto que nos anteriores são dinâmicas. Em peças com paredes finas, o desempenho mecânico do nylon/SLS é melhor do que o do ABS/FDM. Este fato tem sido constatado pelo autor e também por Gibson et. al. (2001), comparando as tecnologias SLS, 3DP e FDM para aplicações em arquitetura. A segunda exceção deve-se ao fato do encaixe pertencer a uma órtese da perna de um gavião (PRJ.19). Segundo a proponente do projeto, o gavião bica a órtese, tentando removê-la, provavelmente por se sentir incomodado com o encaixe, apesar de a órtese ter uma almofada de silicone, feita com FR.

O material gesso/3DP é quebradiço, mas pode ser parafusado, embora com a restrição de que o parafusamento auto-atarrachante seja feito uma única vez, num mesmo local. Esta restrição foi a razão determinante para que os médicos, dentistas e veterinários requeressem biomodelos feitos com ABS/FDM (PRJ. 29) ou nylon/SLS (PRJ. 18, 28) que além de permitir reparafusamentos, podem ser cortados e desbastados sem liberação de pó que é uma característica do material gesso/3DP. Um importante ponto a destacar, como grande vantagem do ponto de

vista da relação custo- benefício do gesso/3DP, não está na prototipagem funcional, mas sim na prototipagem visual na qual os biomodelos são usados para diagnóstico e planejamento cirúrgico. No programa PROMED (Capítulo 1), a biomodelagem com gesso/3DP vem sendo usado em bases rotineiras para aplicações em diagnóstico e planejamento cirúrgico.

A rugosidade da superfície, além da resistência do corpo da peça, deve ser levada em consideração nos projetos de PF. É o caso dos projetos ligados a escoamento de fluídos (PRJ. 30 e 31) (Almeida et. al., 2008) e propriedades óticas (PRJ. 17). Nos dois primeiro, a rugosidade afeta o escoamento de fluído, afetando o desempenho hidrodinâmico, requerendo, obrigatoriamente, pós-processamento para planarização da superfície. Esta planarização é mais crítica para o projeto PRJ. 30, onde a peça entrará em contato com o sangue humano, quando acoplada a uma bomba de circulação extracorpórea, utilizada em cirurgias cardíacas. O material de planarização deverá ser, assim, um biomaterial.

A Funcionalidade ótica da superfície foi requerida no projeto de construção de dispositivos para fixação de filtros em telescópio (PRJ. 17). As superfícies internas desses fixadores devem ser polidas e de cor preta. Apesar de a rugosidade ser uma característica intrínseca do material nylon/SLS, não atendendo, portanto ao requisito de polimento, ela foi importante, nesse caso, para absorver e fixar tinta preta, dispensada na forma de spray. Com técnicas convencionais de acabamento - lixamento, resinamento e polimento – superfícies de PR podem adquirir qualidade ótica em qualquer cor, desde que pintadas.

O sistema para realização de experimento a bordo da Estação Espacial Internacional (PRJ.39), viabilizado com o emprego de nylon/SLS, poderia estar sendo enquadrado como prototipagem funcional caso ele terminasse nos testes. O fato de ter passado nos rigorosos testes das agências espaciais, brasileira (AEB) e russa (ROSCOSMOS), credenciou-o a passar da categoria de protótipo para manufatura rápida. É, assim, dentro da seção de manufatura rápida (Secção 5.4), que o referido sistema, em toda sua complexidade, é abordado em maiores detalhes.

5.3. Ferramental Rápido (FR)

O ferramental rápido é caracterizado pelo uso da PR na construção de moldes. Há dois tipos de ferramental rápido – o direto e o indireto. No ferramental rápido direto, o molde feito

com PR é utilizado uma única vez. Esse molde consiste de uma cavidade (molde negativo) dentro da qual a peça é moldada. No ferramental rápido indireto, o molde feito com PR (molde positivo) é usado como intermediário para se construir outro molde, em material diferente da PR, dentro do qual será, então, moldada a peça.

Moldes negativos, construídos com nylon/SLS, foram atacados por PMMA médico mesmo protegendo as superfícies das cavidades com vaselina ou filme de PVC que funcionam, também, como desmoldantes. Não foi, assim, possível construir, com esse material, uma prótese constituída por 4 partes, para reconstrução de uma grande falha óssea craniana (PRJ. 33). Não foi tentada a construção do mesmo molde negativo em ABS/ FDM, prevendo um ataque químico semelhante. Possíveis soluções para evitar o ataque químico do PMMA, seria o revestimento dos moldes com materiais inertes tais como cerâmica e metal ou, alternativamente, a transformação da superfície em DLC (Diamond Like Carbon). Como estas alternativas de proteção de superfície não estavam disponíveis, recorreu-se à moldagem indireta, com a construção de um molde intermediário de gesso odontológico. Foi, assim, adotado um novo método em que moldes positivos das quatro partes da prótese foram construídos por PR em ABS/FDM que, por sua vez, foram utilizados para a construção de moldes negativos em gesso odontológico (vaselina foi utilizada como desmoldante). Com os moldes em gesso odontológico, foram construídas as quatro partes do implante.

A prótese craniana do projeto PRJ. 33, construída em quatro partes, além de proteger o cérebro, permite a mobilidade dessas partes à medida que o crânio cresce. O crânio em questão é o de uma criança em idade de crescimento (10 anos de idade). Antes da cirurgia, o biomodelo do crânio da criança, construído em gesso/3DP foi utilizado em treinamento cirúrgico. Neste caso, o biomodelo assumiu a função de um protótipo funcional. O treinamento cirúrgico consistiu na fixação dos implantes com parafusos. As partes da prótese ficaram firmemente aderidas ao biomodelo. Este caso mostra que o gesso/3DP, quando parafusado uma única vez no mesmo local, não apresenta problemas de fixação. Assim, havendo um bom planejamento dos pontos de fixação, não haveria necessidade em construir biomodelos em materiais como nylon/SLS e ABS/FDM, que são mais caros.

Em cirurgias bucomaxilofaciais (PRJ. 34 e 36), assim como nas cirurgias cranianas, foi utilizado ferramental rápido indireto. Uma prótese de nariz (PRJ. 34), de silicone, pensada

inicialmente para ser provisória por ter seu molde positivo construído em gesso/3DP, passou a ser definitiva devido à sua boa qualidade dimensional e textural. O molde indireto foi construído em gesso odontológico. Numa outra aplicação de ferramental rápido indireto - uma prótese ocular (PRJ. 36) - o molde positivo, feito em gesso/3DP, não apresentou boa qualidade – detalhes de enrugamento não puderam ser resolvidos. Foi, então, utilizado um molde positivo de nylon/SLS. Esse molde positivo se adequou ao paciente porque o seu posicionamento dentro do volume de construção foi feito de tal forma que as rugas desejadas ficaram bem resolvidas. O acabamento da superfície e propriedades mecânicas (vide comentários na próxima seção) está relacionado com a orientação das peças dentro do volume de construção do equipamento PR.

Mesmo usando o ferramental rápido indireto, ao invés do direto, o cirurgião responsável pelo projeto PRJ. 33 apontou as seguintes vantagens do uso da PR em cirurgias de reconstrução de crânio: a PR elimina a antiga moldagem artesanal com a qual as próteses eram feitas, reduz o tempo de cirurgia em 50 por cento e reduz riscos de infecções.

Dentro das aplicações de ferramental rápido para a engenharia, voltadas para a indústria, está a construção de moldes para a fundição de peças metálicas. Moldes positivos de peças que são partes de um sistema de transmissão de potência foram construídas com nylon/SLS (PRJ. 35). Esse sistema, no entanto, não foi utilizado até o presente momento. Demandas para projetos de ferramental rápido indireto de metal aparecem com frequência, mas os resultados demoram a aparecer, por conta do fato de que, ao que parece, há dificuldades em conseguir um parceiro que trabalhe com fundição.

5.4. Manufatura Rápida (MR)

Quatro projetos constantes deste trabalho foram classificados como demandantes de manufatura rápida. Todos foram construídos em nylon/SLS e um deles utilizou, também, ABS/FDM. O fator tempo de uso foi crucial para alocar dois deles na classe de manufatura rápida. Um deles e o mais simples (PRJ. 38) trata de guias para implantes dentários e próteses fixas, com função e tempo de uso bem definidos – esse é o tempo de duração de furação do local onde o implante ou a prótese foi fixado.

O segundo e bem mais complexo, referido também na secção 5.2, trata do envio de um experimento à Estação Espacial Internacional (*International Space Station* - ISS). O projeto em questão (PRJ. 39), chamado NIP (Nuvens de Interação Protéica), utiliza um complexo sistema formado por invólucros concêntricos e diversas outras peças construídas em nylon/SLS para a realização de um experimento que consistia em filmar a interação física de nuvens de proteínas fluorescentes em ambiente de microgravidade, a bordo da Estação Espacial Internacional – ISS (Maia et. al., 2007). As paredes dos invólucros suportavam subsistemas elétrico, fluídico e ótico.

O experimento NIP foi reportado como bem sucedido pelo seu idealizador, o que evidencia que não apenas as estruturas 3D construídas em nylon/SLS funcionaram a contento, como também as montagens que foram feitas com parafusos diretamente rosqueados no material. Os parafusos não sofreram afrouxamento. Por outro lado, os dispositivos tiveram que sofrer pós-processamento para funcionamento adequado. É o caso dos dispositivos pertencentes ao subsistema fluídico - válvula e seringa. A válvula operava por estrangulamento de uma mangueira e a seringa operava através de um êmbolo que, ao ser rotacionado, transmitia um movimento linear dentro da seringa (sistema tipo rosca-cremalheira). O fio da rosca, por sinal muito fino, foi modelado com uma ferramenta para fazer rosca (cocinete), porque a SLS não tem resolução suficiente para construir roscas com fio muito pequeno. Quanto às válvulas, um bom acoplamento só foi conseguido por lixamento das paredes dos elementos macho e fêmea para acerto dimensional e diminuição do atrito.

O alto grau de integração desse projeto, reunindo subsistemas fluídicos, óticos e elétricos, foi conseguido com um subsistema mecânico construído em nylon/SLS, que funcionou como plataforma de suporte para os demais subsistemas que, inclusive, tiveram peças feitas, também, em nylon/SLS. Aqui se tem um exemplo de como um sistema acoplado em que se acreditava, chegaria ao seu melhor desempenho à condição de um protótipo funcional, surpreendentemente, foi elevado à condição de manufatura rápida. O momento que esse sistema deixou de ser um protótipo funcional para se tornar uma manufatura rápida foi quando ele passou nos rigorosos testes das agências espaciais, brasileira (AEB) e russa (ROSCOSMOS), tornando-se seguro para ser enviado à ISS.

Quatro protótipos do projeto NIP foram produzidos, seja para incorporar mudanças no projeto, seja para a melhoria das características mecânicas e dimensionais. Essas características

foram variadas, nos quatro protótipos, pela orientação espacial da peça dentro do volume de construção (conhecido como *build*). Essas variações dimensionais e mecânicas das peças em função das orientações em que são construídas no *build* constituem o que é conhecido como comportamento anisotrópico, o qual é intrínseco às tecnologias PR. Um exemplo típico da anisotropia é a ocorrência de fratura, mais facilmente, quando a peça é tensionada ao longo da direção de empilhamento das camadas - eixo z (Caulfield, McHugh e Lohfeld, 2007; Gibson e Shi, 1997; Xu, Loh e Wong, 1999). O comportamento da anisotropia mecânica do material nylon/SLS produzido no CTI foi estudado por Sanchez et. al. (2006), confirmando a maior fragilidade dos corpos de prova construídos ao longo da direção z pela grande dispersão de pontos na curva tensão/orientação de construção. Nesse mesmo estudo foi notada ausência de normas técnicas específicas para caracterização mecânica dos materiais de PR. Normas como essas são importantes não apenas para os materiais comerciais, como os estudados neste trabalho, mas também para o desenvolvimento de novos materiais, como é o caso de biomateriais estruturados tridimensionalmente em SLS por Salgado et. al (2008).

Os tempos de vida dos outros dois projetos não foram estabelecidos, mas foram considerados MR não apenas pelo autor, como também, pelos seus proponentes, deixando implícito que o tempo de duração do material está dentro do período estipulado para cumprimento da função final. O projeto da maquete tátil para deficientes visuais (PRJ. 37) está instalada no prédio da biblioteca central da UNICAMP, mas apresenta o problema não apenas de amarelamento com o tempo, mas também de incorporação de gordura da mão. O amarelamento, que ocorreu nesta maquete como também nas demais peças construídas em nylon/SLS e que foi apresentado como um problema a ser resolvido em PV, poderá ser resolvido com algum tipo de tratamento superficial que elimine os poros, a impregnação de gordura e, finalmente, facilite a limpeza.

Outro projeto de período de função indeterminado utiliza peças construídas em nylon/SLS e ABS/FDM integradas ao conjunto mecânico de uma máquina de prototipagem rápida experimental (PRJ. 40), cujo projeto está disponível na Internet (Fab@home, 2008). Por estar instalada dentro do CTI, o desempenho dessa máquina e de suas peças construídas por PR vem sendo acompanhados. Não foi identificado, após dois anos de uso (embora intermitente) qualquer problema a não ser o amarelamento das peças em nylon/SLS.

Capítulo 6

6. Conclusão

O objetivo geral deste trabalho, que é a avaliação qualitativa da aplicação de PR em projetos de pesquisa, foi cumprido. O sucesso da avaliação em termos dos benefícios para os projetos de pesquisa e o desempenho dos materiais, feitos a partir de quarenta estudos de casos, foi resultado da metodologia empregada. Essa metodologia consistiu de quatro etapas: (1) coleta de dados com os proponentes dos projetos; (2) organização desses dados em fichas - uma para cada projeto; (3) classificação dos projetos dentro das classes de aplicações PV, PF, FR e MR e, finalmente, (4) análise qualitativa do desempenho dentro de cada uma dessas classes.

Todos os proponentes dos projetos, representantes de 18 áreas e subáreas do conhecimento, foram beneficiados pelo uso da prototipagem rápida em seus projetos de pesquisa. O benefício maior dos projetos de pesquisa com o emprego da PR foi a construção de peças, independentemente da complexidade da geometria. O maior limitante das aplicações de PR é de ordem dimensional- para estruturas muito pequenas ou finas. A porosidade, que é uma propriedade intrínseca das três tecnologias de PR utilizadas, cresce em importância em pequenas dimensões, causando enfraquecimento mecânico das peças. Portanto, as considerações sobre o desempenho dos materiais de PR, feitas abaixo, são para peças de dimensões suficientemente grandes onde o papel da porosidade não afeta significativamente o desempenho mecânico. Como não houve manifestações em relação à fidelidade dimensional com relação ao modelo virtual, considera-se que todas as peças construídas com os três materiais - nylon/SLS, gesso/3DP ou ABS/FDM, satisfizeram os proponentes dos projetos. As peças que foram entregues a eles não foram submetidas a outro pós-processamento, além da limpeza e infiltração (caso específico do gesso/3DP). São dentro destas condições que os desempenhos dos materiais foram avaliados e cujas conclusões são dadas a seguir. Antes, no entanto, convém salientar que um ponto comum no uso desses três materiais é que, para o caso de ferramental rápido, eles puderam ser usados

apenas de forma indireta, devido à interação química do molde negativo com o material da moldagem.

Nylon/SLS. Para aplicações em PF, o material apresenta resistência mecânica aceitável quando acoplado em sistemas estáticos através de parafusamento auto-atarrachante e passante e, também, através de acoplamento por encaixes. Quando em sistemas dinâmicos com fricção, sofre desgaste nas regiões de contato, como é o caso de dentes de engrenagem. Resiste à vibração, conquanto não seja colado com resina cianocrilato. A resina cianocrilato, em sistemas estáticos, como em encaixes, ajuda no aumento da resistência mecânica do material. O nylon/SLS aceita usinagem como furação e construção de roscas. Mesmo quando preparado com matéria-prima degradada, tem utilidade em prototipagem visual, notadamente na construção de peças com muitos espaços vazios, como é caso dos modelos físicos de proteínas. A superfície branca e porosa não foi um limitante na aplicação em PV, ao contrário, foi bem aceita a ponto dos proponentes do projeto mostrarem desgasto com o amarelamento adquirido ao longo do tempo. Restrição do ponto de vista químico também ocorre em FR, devido à reatividade do PMMA com o nylon em processo de moldagem de próteses. A propriedade dimensional foi aceitável em todas as classes de aplicações, em função da ausência de manifestação de desgasto com relação a essa propriedade, exceto para eixos muito finos (diâmetros inferiores a 1 mm), que apresentam fragilidade mecânica. Folgas inferiores a 0.25 mm inviabilizam aplicações em peças com partes móveis monolíticas. É o caso do dispositivo háptico de dedo onde a dilatação do material, durante o processo, provoca a sinterização do mesmo dentro da folga impedindo sua remoção, e conseqüentemente, a liberação do movimento.

Gesso/3DP. A não cobrança financeira pelas peças aos proponentes dos projetos e a disponibilização do nylon/SLS e ABS/FDM, prejudicou a avaliação desse material que tem na razão custo/benefício sua grande vantagem sobre os outros dois materiais de estudo. No entanto, ele foi utilizado em PV, PF e FR. A fragilidade mecânica em relação aos demais é um fator limitante, mas não inibidor do seu uso em PV e PF. Apesar de suas limitações mecânicas e dimensionais, viabiliza, dentro da classe PV, o programa ProMED no suprimento de biomodelos para hospitais públicos. No entanto é preterido pela PF para treinamento cirúrgico, pois solta pó ao ser cortado e o parafusamento auto-atarrachante não permite a retirada e reposição do parafuso

no mesmo local, devido à degradação da rosca. No que concerne ao FR indireto, pode ser usado como molde positivo de prótese de rosto, em situações que não requeiram fino detalhamento.

ABS/FDM. A disponibilidade de cor, além da branca, é útil em PV, particularmente em situações onde se queira ressaltar a geometria de uma determinada peça em relação a outra, também construída com PR. Em PF, a limitação devido à porosidade em aplicações que requerem pressão ou contenção hidrodinâmica, são contornadas com a infiltração de resinas. Tanto como o nylon/SLS, tem resistência mecânica para fixação com parafusamento auto-atarrachante e usinabilidade para furação e desbaste. Em FR indireto, exibe boas características mecânicas e dimensionais como molde positivo para a fabricação de cavidades em gesso odontológico para moldagem final em PMMA.

6.1. Considerações finais e propostas para outros trabalhos.

As conclusões expressas acima, relativas ao desempenho dos materiais, devem ser tomadas mais como referência para o uso desses materiais em projetos de pesquisa do que certificações de desempenho. Essa precaução se deve a três razões: (1) os projetos de pesquisa, em boa parte, estão em andamento; (2) as habilidades dos proponentes dos projetos são diferentes no emprego das peças e (3) a escolha dos materiais foi determinada mais pela disponibilidade dos equipamentos de PR, num dado momento, do que numa escolha técnica, baseada, por exemplo, em uma matriz de decisão. Portanto, quanto mais projetos forem acrescentados aos quarenta apresentados, mais consolidados estarão as conclusões aqui apresentadas. É neste sentido que se propõe como continuação deste trabalho, o seu próprio refinamento, aproveitando a experiência adquirida para aperfeiçoar a interlocução com os proponentes, seja pelo refinamento do questionário e da entrevista verbal, seja estimulando-os a enviar, além de fotos, vídeos comentados. Uma base de dados precisará ser organizada para fácil acesso às informações.

Dentre os proponentes dos casos estudados, sete defenderam suas teses de pós-graduação (Anexo V) contando com os dados gerados dentro dos projetos realizados em cooperação com o CTI. Aumentar o número de trabalhos de pós-graduação levará a um amadurecimento mais rápido da utilização das tecnologias PR, como também de sua difusão no meio acadêmico. Continuar investimentos em Trabalhos de Conclusão de Curso – TCC é uma forma de colaborar

com os jovens finalistas dos cursos de graduação a aplicarem as tecnologias PR em seus projetos profissionais que podem, inclusive, ter continuidade na pós-graduação.

Referências Bibliográficas

3D-MICROMAC, **Site da empresa 3D-Micromac**. Disponível em: <http://www.3d-micromac.com/home.html>. Acesso em: 5 dezembro 2008.

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; SOUZA, W. J.; OLIVEIRA, M. F.; CAMARGO, A. P., Desenvolvimento de protótipos de microaspersores utilizando prototipagem rápida e torneamento mecânico. In: REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL, 2008. **Submetido**.

BAUER, W.; KNITTER, R. Ceramic microfabrication by rapid prototyping process chains. *Sadhana*, parts 1&2, v. 28, p.307-318, 2003.

BAUER, W.; KNITTER, R. Development of a rapid prototyping process chain for the production of ceramic microcomponents. *Journal of Materials Science*, v. 37, p.3127-3140, 2002.

BERTSCH, A.; LORENZ, H.; RENAUD, P. 3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography. *Sensors and Actuators*, v. 73, p.14-23, 1999.

BONALDO, T.; GRANJA, A. D.; CELANI, G.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, J. V. L. , Prototipagem rápida no processo de produção digital de edificações. In: WORKSHOP BRASILEIRO – GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETOS NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 8, São Paulo, 2008. **Anais**. São Paulo, Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura, n.p.

BUGS, R. K. B; OLIVEIRA, M. F.; PASCHOAL, G. H. L.; MAIA, I. A.; SILVA, J. V. L.; BUGS, M. R. Impressão 3D de macromoléculas biológicas por prototipagem rápida: uma ferramenta de inovação tecnológica para o ensino de bioquímica e o desenvolvimento de biotecnologia no país, *Biochemistry and Molecular Biology Education*. **Submetido**.

BUGS, R. K. B; SILVA, J. V. L.; BUGS, M. R.; MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; PASCHOAL, G. H. L.; MARTINS, T. A. C. P, Impressão 3D de Macromoléculas Biológicas por Prototipagem Rápida: uma ferramenta de inovação tecnológica para o ensino de bioquímica e o desenvolvimento de biotecnologia no país, 2008 **Projeto**: Brasília, XXIII Prêmio Jovem Cientista, Educação para Reduzir as Desigualdades Sociais, Popularização da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Submetido**

BUSWELL, R. A.; SOAR, R.C.; GIBB, A. G. F.; THORPE, A. Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction, *Automation in Construction*, v.16, p.224-231, 2007.

CARVALHO, L. B. **Análise de Estruturas Intracranianas em *Mariliasuchus amarali* (Crocodyliformes, Notosuchia) do Cretáceo Brasileiro.** Rio de Janeiro, 2007,125p. Tese de doutorado - Museu Nacional do Rio de Janeiro - Universidade de São Paulo.

CAULFIELD, B.; MCHUGH, P. E.; LOHFELD, S. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 182, p.477-488, 2007.

CELANI, G.; PUPO, R.; PICCOLI, V.; SILVA, J.V.L; OLIVEIRA, M. F.; JARDINI, A.; CANCHERINI, L.; MARQUES, R. Playing doll houses in the museum: the use of 3D scanning and rapid prototyping techniques for producing scale models of sculptures In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA, 14, Cyprus, 2008. **Anais.** Cyprus, International Society on Virtual systems and multimedia, 2008, p. 229-233.

CELANI, G.; PUPO, R.; PICCOLI, V. Digital fabrication and art-exhibition design: a case study. In: Al-Qawasmi, J.;Chiuini, M. A. e El-Hakim, S. – Digital media and its applications in cultural heritage. Aman: CSAAR Press, novembro 2008, 563p, p. 413-428.

CENTRO DE PESQUISAS RENATO ARCHER (Brasil). **Relatório sintetizado sobre as competências do CenPRA no tema: Aplicações da Tecnologia da Informação, 2007.** Campinas, 2007. 40p. Apresentado no Workshop de Avaliação e Definição de Prioridades de Atuação para o CenPRA, Campinas, São Paulo, 16 e 17 de agosto de 2007.

CHUA, C. K.,; LEONG, K. F.; LIM C. S. **Rapid Prototyping – Principles and Applications.** 2. Ed. Singapore, 2003. 420p.

COOPER, K. G. **Rapid Prototyping Technology.** New York, Basel, 2001. 226p.

DEARDEN, G.; EDWARDSON, S. P. Some recent developments in two- and three-dimensional laser forming for “macro” and micro applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, v.5, p.S8-S15, 2003.

DELEBECQUE, B.; HOUTMANN, Y.; LAUVAUX, G.; BARLIER, C. Automated generation on assembly features in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, v. 14, n.4, p.234-245, 2008.

Di GIACOMO, G. A. P. **Avaliação da Aplicação de Guias Cirúrgicas, Feitas a Partir da Técnica de Prototipagem Rápida, em Implantodontia,** São Paulo, 2003, 99p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Odontologia - Universidade de Santo Amaro.

DIMITROV, D.; WIJCK, W. van; SCHREVE, K., de BEER, N. Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing, *Rapid Prototyping Journal*, v.12, n.1, p.42, 2006.

FREITAS, E. P. **Placa Projetada e Otimizada por Elementos Finitos para Tratamento de Fratura Mandibular em Cães**. Botucatu, 2008, 76p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista.

GIBSON, I.; KVAN, T.; MING, L. W. Rapid prototyping for architectural models. In: ASSISES EUROPÉENNES DE PROTOTYPAGE RAPIDE, 9, EUROPEAN CONFERENCE ON RAPID PROTOTYPING AND MANUFACTURING, 10, 2001 **Anais** Paris, Paris Expo Porte de Versailles, n.p.

GIBSON, I.; SHI, D.; Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. In: RAPID PROTOTYPING JOURNAL, n.4, v.3, p.129-136.

HILTON, P. D (Ed.); JACOBUS, P. F. (Ed.) **Rapid Tooling – Technologies and Industrial Applications**. New York and Basel: Marcel Dekker, 2000. 270p.

HOLLISTER, S. J. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, v. 4, p.518-590, 2005.

HOME@FAB Disponível em: http://fabathome.org/wiki/index.php?title=Main_Page Acesso em 6 dezembro 2008.

HOPKINSON, N (Ed.); HAGUE, R. J. M. (Ed.); DICKENS, P. M. (Ed.). **Rapid Manufacturing – An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester: Wiley, 2006. 285p.

HSU, T. R., (Ed.) MEMS&Microsystems: Design, Manufacture and Nanoscale Engineering, 2. Ed. , Wiley2008. 576p.

IM, Y. G.; CHO, B. H., SEO, S. H; SON, J. H.; CHUNG, S. I.; JEONG, H. D. Functional prototype development of multi-layer board (MLB) using rapid prototyping technology. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187-188, p.619-622, 2007.

JIMIN, C.; TIECHUAN, Z. Laser microfabrication with metallic powder. *Journal of Laser Applications*, n. 4, v.16, p.258-260, 2004.

KAI, C.C., FAI, L. K., SING, L. C. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**, 2 Ed., World Scientific Pub. Co. 2003. 448p.

KAMRANI, A. K.; (Ed.), NASR, E. A. (Ed.) **Rapid Prototyping – Theory and Practice**. Springer, 2006. 323p.

KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Automation in construction*, n.2, v.13, p.05-19, 2004.

KNITTER, R.; BAUER, W.; GÖHRING, D.; RISTHAUS, P. RP process chains for ceramic microcomponents. *Rapid Prototyping Journal*, n.2, v.8, p.76-82, 2002.

KRISHNA, B. V., BOSE, S., BANDYOPADHYAY A. Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants. *Acta Biomaterialia*, v. 3, p. 997-1006, 2007.

KUNSLER, M.R. **Estudos dos Desvios Geométricos Gerados na Obtenção de Biomodelos a partir de Imagens Tomográficas**, Porto Alegre, 2008, 85p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial -Universidade Federal de Santa Catarina.

KWON, I. K.; MATSUDA, T. Photo-polymerized microarchitectural constructs prepared by microstereolithography (μ SL) using liquid acrylate-end-capped trimethylene carbonate-based prepolymers. *Biomaterials* v. 26, p.1675-1684, 2005.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; NORITOMI, P. Y.; SILVA, J. V. L., Application of rapid manufacturing to build artifacts for using in microgravity environment. An International Space Station case. In: VIRTUAL AND RAPID MANUFACTURING – VRAP, 3, Leiria, 2007. **Anais**. Leiria, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, p.559-562.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SAURA, C. E.; SILVA, J. V. L., NORITOMI, P. Y. Rapid Manufacturing – A tool to support experiments in the international space station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAD/CAM ROBOTICS AND FACTORIES OF THE FUTURE – ISPE, 23, Granada, 2008. **Anais**. Granada, International Society for Production Enhancement, n. p.

MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SAURA, C. E.; SILVA, J. V. L., NORITOMI, P. Y. Rapid manufacturing of a chamber utilized in a microgravity experiment aboard the international space station. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICS ENGINEERING - COBEM, 19, Brasília, 2007. **Anais**. Brasília, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, n.p.

MARAFON, P. G. **Estabilidade Dimensional em Prótese Óculo-Palpebral Confeccionada por meio de Modelo Reverso Obtido pelo Sistema CAD/CAM**. São Paulo, 2008, 100p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Odontologia - Universidade de São Paulo.

MARUO, S. et. al. *Appl. Phys. Lett* (Jan. 6), 2003.

MERCELIS, P., KRUTH J-P, Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, n. 12, v.5, p.254-265, 2006.

MICROTEC. Site da empresa Microtec. Disponível em: <http://www.microtec-d.com/>. Acesso em: 5 dezembro 2008.

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

NOORANI, R. **Rapid Prototyping – Principles and Applications**. Hoboken: Wiley, 2006. 377p.

OSTENDORF, A.; CHICHKOV, B. N. Two-photon polymerization: a new approach to micromachining. *Photonics Spectra*, p.72-80, 2006.

PARK, K.; KIM, Y. S.; KIM, C.S., PARK, H. J. Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187-188, p.609-613, 2007.

PHAM, D. T.; DIMOV, S. S. **Rapid Manufacturing – The Technologies & Applications of Rapid Prototyping & Rapid Tooling**, Springer, 2001. 214p.

PROEXP – Impressão 3D de macromoléculas biológicas por prototipagem rápida. Disponível em: <http://www.cti.gov.br/proexp> . Acesso em: 6 dezembro 2008.

RÄNNAR, L-E; GLAD, A.; GUSTAFSON, C-G. Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting, *Rapid Prototyping Journal*, v.13, p.128-135, 2007.

REGENFUSS, P.; HARTWING, L.; KLÖTZER, S.; EBERT, R.; BRABANT, Th., PETSCH, T.; EXNER, H. Industrial freeform generation of microtools by laser micro sintering. *Rapid Prototyping Journal*, n.11, v.1, p.18-25, 2005.

ROCHUS, P.; PLESSERIA, J, -Y; VAN EISEN, M.; KRUTH, J. -P; CARRUS, R.; DORMAL, T. New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing (RP/RM) technologies for space instrumentation, *Acts Astronautics*, v.61, p.352-359, 2007.

ROCKENBACK, M; BERTOL, L.; SILVA, F. P.; ROLDO, L.; Análise de biomodelos fabricados por usinagem e prototipagem rápida utilizando digitalização tridimensional a laser. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20, FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA URS, 17, Porto Alegre, 2008. **Resumos**: Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, res. 151

SALGADO, C. L; SANCHEZ, E. M.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, J. V. L., ZAVAGLIA, C. A. Evaluation of bioabsorbable polyprolactone used in rapid prototyping for medical application. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ÓRGÃOS ARTIFICIAIS E BIOMATERIAIS, 5, Ouro Preto, 2008. **Resumos**: Belo Horizonte, Sociedade Latino Americana de Biomateriais, Engenharia de Tecido e Órgãos Artificiais, Res C506.

SANCHEZ, A. C.; SANCHEZ, E.M.S., MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; SALGADO, C. L.; ZAVAGLIA, C. A. C. Caracterização da poliamida em função das características de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser. In, JORNADA DE INICIAÇÃO

CIENTÍFICA DO CENPRA, 9, Campinas, 2007. **Resumos**. Campinas, Centro de Pesquisas Renato Archer, 2008. p. 87-89.

SANCHEZ, E. M. S; SALGADO, C. L.; CAVANI, C. S. ; OLIVEIRA, M. F ; SILVA, J. V. L.; ZAVAGLIA, C. A. C. Evaluation of mechanical properties of polyamides used in rapid prototyping and manufacturing. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, Foz do Iguaçu, 2006. **Anais**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, n.p.

SANCHEZ, E. M. S; SALGADO, C. L.; SILVA, J. V. L.; MAIA, I. A.; OLIVEIRA, M. F.; ZAVAGLIA, C. A. C. Morphological and mechanical evaluation of polyamides used in rapid prototyping after accelerated aging. In: 15th WORLD FORUM ON ADVANCED MATERIALS, POLY CHAR, 15, Búzios, 2007. **Resumos**. Rio de Janeiro: Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, 2007. res. PP 27.

SANTOS, E. C; SHIOMI, M.; OSAKADA, K.; LAOUI, T., Rapid manufacturing of metal components by laser forming, v. 46, p.1459-1468, 2006.

SHIOMI, M.; YOSHIDOME, A.; ABE, F. OSAKADA, K. Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of mettalic powders. *International Journal of Machine & Manufacture*, v. 39, p.237-252, 1999.

SILVA, A. O. **Validação do Protocolo de Modelagem Tridimensional do Primeiro Pré-Molar Superior para a Metodologia dos Elementos Finitos pela Análise das Concentrações de Tensões na Região Cervical de Esmalte e Estudo dos Mecanismos Formadores de Lesões de Abfração**. Araraquara, 2008. Tese de doutorado – Faculdade de Odontologia de Araraquara - Universidade Estadual Paulista.

SKYSCAN Disponível em: <http://www.skyscan.be/home.htm> Acesso em: 6 dezembro 2008.

STRAUB, M.; NGUYEN, L. H.; FAZLIC A.; GU, M. Complex-shaped three-dimensional microstructures and photonic crystals generated in a polysiloxane polymer by two-photon microstereolithography. *Optical Materials*, v. 27, p.359-364, 2004.

TAY, B. Y.; EVANS, J. R. G.; EDIRISINGHE, M. J. Solid freeform fabrication of ceramics. *International Materials Reviews*, v. 48, n.6, p.341-370, 2003.

VELHO, T. R. D. **Uma Contribuição para o Desenvolvimento de um Dispositivo Háptico para a Mão para Interação com Objetos Tridimensionais**. Campinas, 2008, 105p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidades Estadual de Campinas.

VIEIRA, E. P. **Produção digital de maquetes arquitetônicas: um estudo exploratório**. Campinas, 2007, 110 p. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas.

VOLPATO, Neri (Ed.). **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Blücher, 2007. 244p.

WICKER R., RANADE, A. V., PALMER, J., MEDINA, F. Practical considerations for micro-stereolithography of embedded micro-channels. In: **RAPID PROTOTYPING & MANUFACTURING 2004**, 1, Dearborn, 2004. Anais. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, p.1-11.

Xu, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. In: **RAPID PROTOTYPING JOURNAL**, v. 5, n.2, p.54-60, 1999.

XU, G.; ZHAO, W.; TANG, Y., LU, B. Novel stereolithography system for small size objects. *Rapid Prototyping Journal*, n. 12, v.1, p.12-17, 2006.

Anexos

Anexo I. Definição das tecnologias (Volpato 2007)

SLA – 3D Systems

Princípio

Neste processo uma resina líquida fotocurável, que está acondicionada dentro de um tanque, é curada aplicando um laser com comprimento de onda específico, geralmente UV (ultravioleta). Neste tanque uma plataforma mergulhada se desloca para baixo a cada camada construída, como mostra o esquema da Figura 1.0. O feixe do laser é movimentado através de um conjunto óptico (espelhos) que reproduz a geometria 2D obtida no fatiamento transversal da peça orientada no sistema CAD. Quando exposto ao feixe de laser, a resina polimeriza mudando do estado líquido para sólido gerando uma camada, e assim sucessivamente o procedimento é repetido até que a peça seja construída por completo. Formas geométricas na qual tenham partes desconectadas ou em balanço requerem estruturas de suporte para evitar que estas se movam.

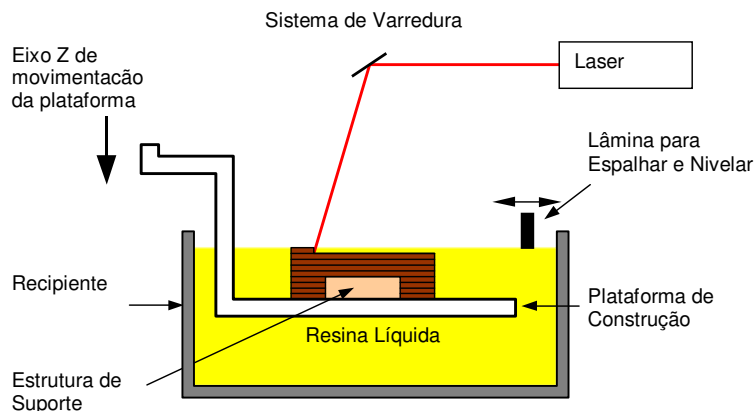


Figura 1.0 - Princípio do processo SLA

IJP – Polyjet da Objet

Princípio

Este processo utiliza um sistema tipo jato de tinta para depositar a resina em pequenas gotas sobre uma plataforma e, imediatamente após a deposição, emite uma luz UV para a cura da camada depositada. A Figura 1.1 mostra, esquematicamente, o princípio desta tecnologia. Esta tecnologia utiliza dois materiais diferentes para a fabricação, uma resina para a peça e um material tipo gel, também fotocurável, para o suporte. Após o término do processo, o material de suporte é facilmente removível com um jato d'água ou mesmo manualmente. A resina é totalmente curada durante o processo de deposição não sendo necessária pós-cura da peça.

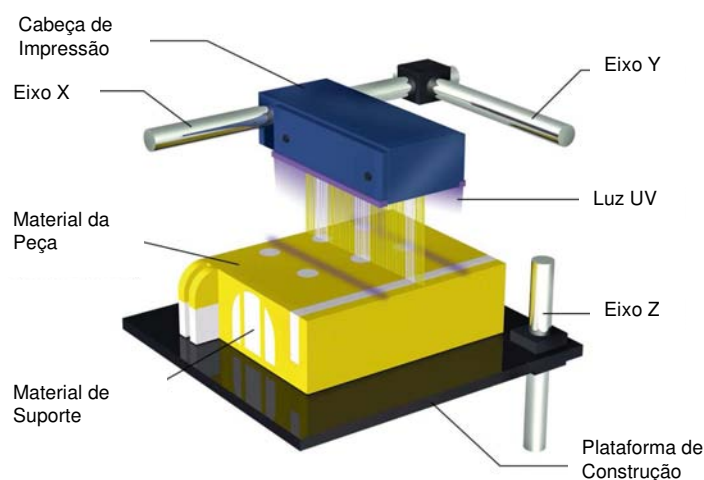


Figura 1.1 - Princípio da Tecnologia PolyJet [cortesia da empresa Objet Geometries Ltd]

Impressão a Jato de Tinta (IJP) - InVision da 3D Systems

Princípio

Neste processo o material utilizado é depositado em forma de pequenas gotas, similar ao que ocorre no processo de uma impressora jato de tinta. Após a deposição da camada sobre a plataforma onde a peça está sendo construída, uma luz ultravioleta é aplicada sobre a mesma realizando a sua cura. Neste processo também é necessário a criação de suporte para apoiar as

regiões desconectadas da peça. O material do suporte é diferente do material utilizado para a peça. Este princípio é esquematizado na Figura 1.2.

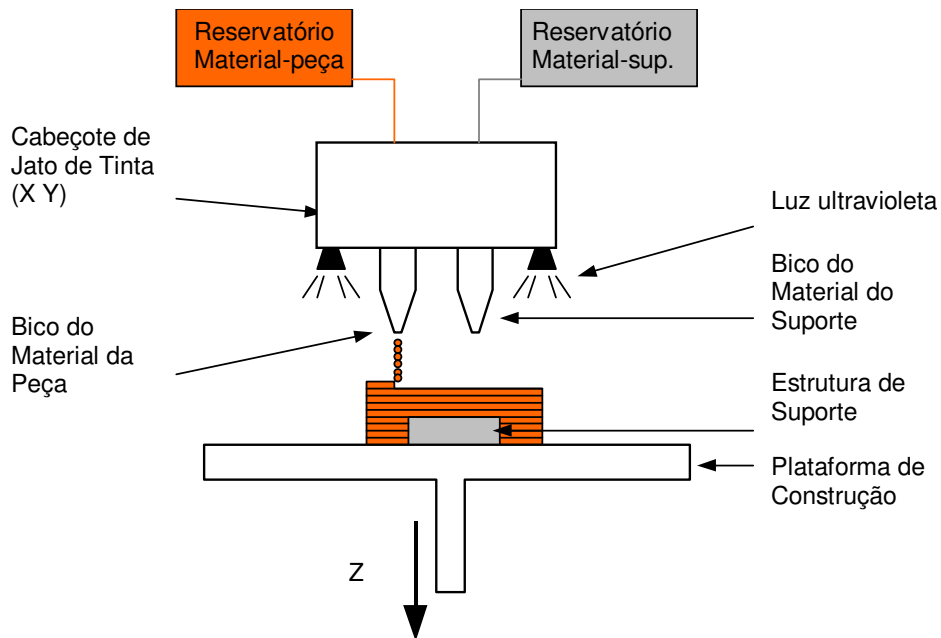


Figura 1.2 - Princípio de funcionamento do processo InVision

Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) da Stratasys

Princípio

O processo FDM constrói o protótipo por deposição de um material extrudado. A cabeça de extrusão com movimentos nos eixos X-Y, posicionada sobre uma plataforma com movimento no eixo Z, recebe continuamente o material na forma de um fio, aquecendo-o até o ponto semilíquido ou pastoso. O próprio filamento de material sendo tracionado funciona como êmbolo no início do sistema de extrusão para expulsar o material por um bico calibrado. Quando o filamento fino de material extrudado entra em contato com o material da superfície da peça ele se solidifica e adere a camada anterior e assim sucessivamente. A plataforma, que é constituída de um mecanismo elevador, desloca no eixo Z o valor referente à espessura de uma camada a ser depositada e o processo é repetido até que a peça seja construída. A Figura 1.3 apresenta o esquema de funcionamento desta tecnologia.

A tecnologia FDM necessita da criação de estrutura de suporte. Como mencionado anteriormente, o suporte é depositado simultaneamente com o material da peça por outro bico para possibilitar a construção de regiões que não estejam conectadas ao corpo da peça quando da fabricação das primeiras camadas ou em algum estágio do processo. Num sistema mais recente, o material de suporte permite a sua remoção por imersão em solução líquida aquecida.

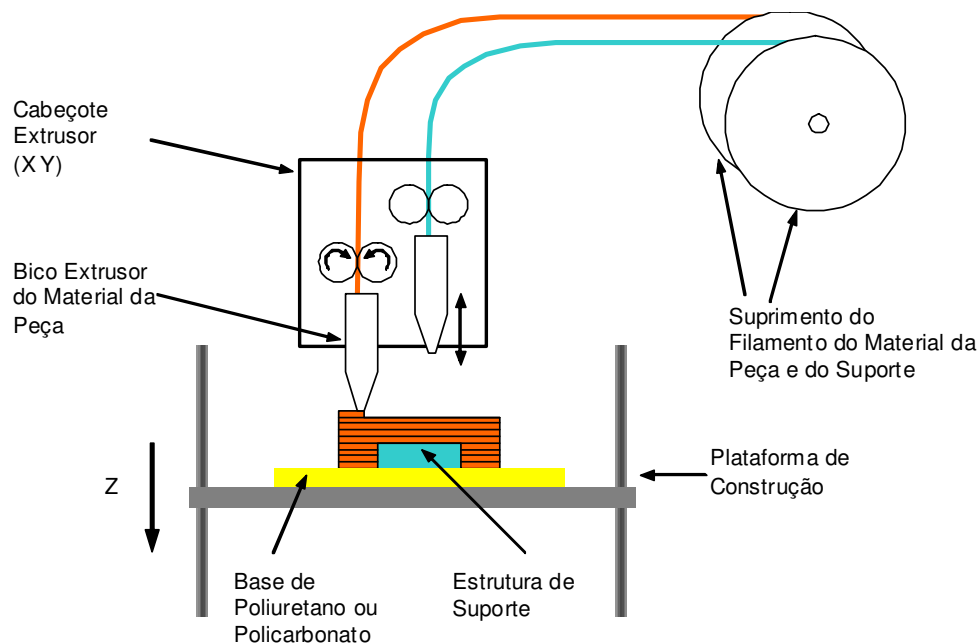


Figura 1.3 - Princípio do processo FDM da Stratasys, Inc.

Manufatura Laminar de Objetos (LOM) da Cubic Technology

Princípio

A Tecnologia LOM se baseia na deposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivo em um dos lados para construir a peça camada por camada. O material utilizado vem enrolado em uma bobina como mostra a Figura 1.4. Após a deposição de uma folha, um rolo aquecido é passado sobre a sua superfície ativando o adesivo da parte inferior da folha e unido-a a anterior. Um feixe de laser CO₂ (25 ou 50W), direcionado por um conjunto de espelhos controlados por um sistema de deslocamento X-Y, é utilizado para cortar o perfil da geometria da

peça na camada em questão. Adicionalmente, o laser também picota em pequenos retângulos o material que não faz parte da peça, facilitando assim, a sua posterior retirada. A plataforma desce em Z e uma nova seção de material avança. O processo continua até que a peça seja finalizada.

O material que não pertence à peça, ou seja, que fica ao seu redor, serve como suporte natural para a mesma durante a construção. Assim, torna-se desnecessário uma etapa de determinação das regiões que deveriam ter suporte durante o processamento da geometria da peça. Ao final do processo, tem-se um bloco retangular de material com a peça no seu interior que necessita ser extraída por uma operação manual.

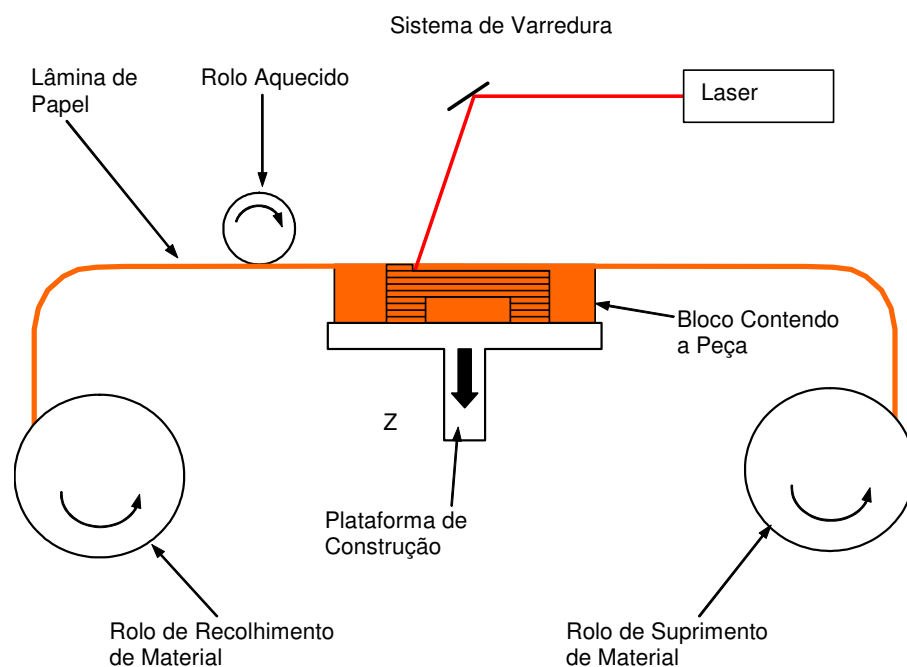


Figura 1.4 - Princípio do processo LOM

Tecnologia com Lâminas de Papel (PLT) da Kira

Princípio

A primeira etapa do processo corresponde a deposição ou impressão de um pó de resina na geometria 2D obtida pelo fatiamento do modelo CAD por um sistema de impressão semelhante a uma impressora laser. A folha é então depositada sobre a plataforma e orientada em relação a mesma. A plataforma se eleva e prensa a mesma contra uma placa plana que possui uma

superfície aquecida, ativando o adesivo da parte inferior da folha de papel e removendo qualquer bolha de ar entre as folhas. A folha então cola sobre a anterior, ou sobre a plataforma, somente na região em que o pó de resina foi impresso. Esta é mais uma diferença entre este processo e o LOM, onde, neste último, toda a superfície da folha adere a camada inferior. Isto facilita a retirada posterior do material que não faz parte da peça. A plataforma então desce e uma faca realiza o corte do perfil da peça sendo construída e picota o material restante da folha. O material que não compõe a peça serve como suporte natural, devendo ser retirado após o término do processo em uma operação manual. Uma nova folha é adicionada ao bloco que contém a peça e o processo se repete até a finalização da peça. A Figura 1.5 mostra o princípio do processo.

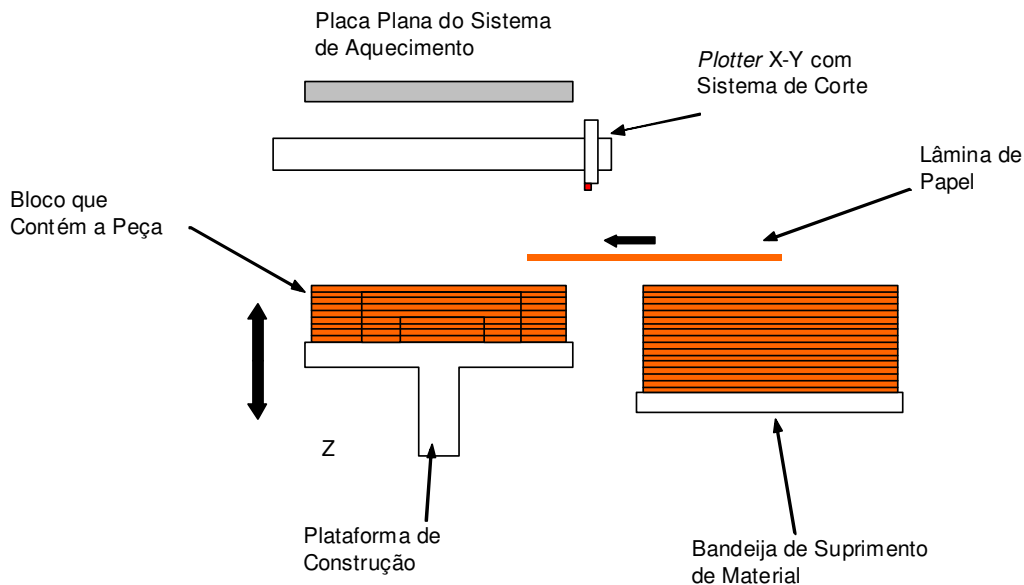


Figura 1.5 - Princípio de Funcionamento da tecnologia PLT

Impressão a Jato de Tinta (IJP) - ThermoJet da 3D Systems

Princípio

Neste processo o material utilizado é aquecido e depositado em forma de pequenas gotas, similar ao que ocorre no processo de uma impressora jato de tinta. Com o contato das gotas com a plataforma onde a peça vai ser construída, ou com as camadas já depositadas, o material se solidifica formando a camada. Para acelerar o processo de fabricação é utilizando um cabeçote com múltiplos jatos de impressão. A Figura 1.6 apresenta uma representação esquemática deste

processo. O material inicialmente utilizado neste processo era a cera, mas a empresa desenvolveu dois termopolímeros especiais que se adequam bem ao processo, com melhores propriedades⁷. O material do suporte é o mesmo utilizado na confecção da peça, sendo assim, o volume do suporte deve ser mantido mínimo.

Após a retirada da peça da máquina, torna-se necessário a remoção das estruturas criadas para suportes. Esta operação deve ser realizada com cuidado para não danificar o protótipo

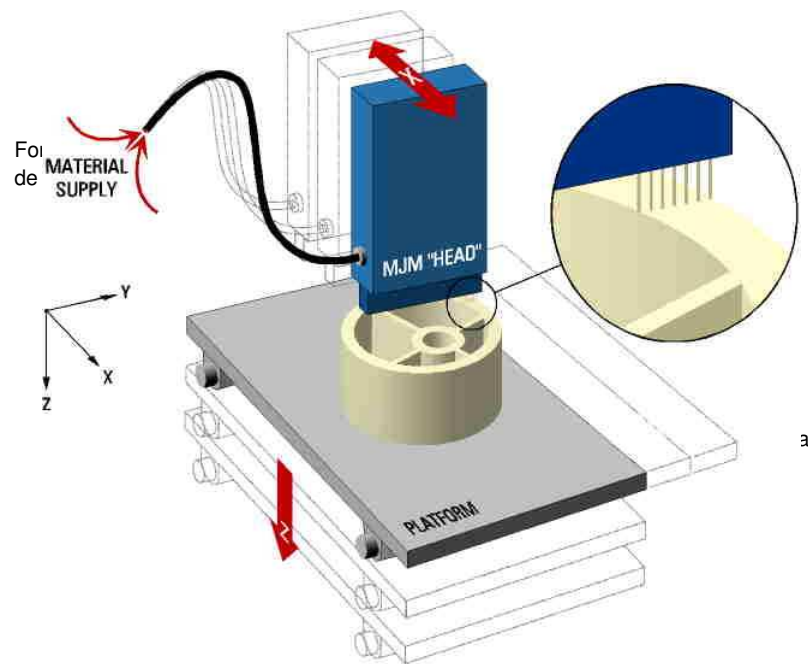


Figura 1.6 - Princípio do processo ThermoJet da 3Dsystems – *Multi-Jet Modeling*

Impressão a Jato de Tinta (IJP) - Benchtop da Solidscape

Princípio

O princípio de funcionamento é um pouco diferente do desenvolvido pela empresa 3D Systems. A diferença principal está no fato da tecnologia Benchtop utilizar dois cabeçotes de impressão tipo jato de tinta: um que deposita um material termoplástico da peça e o outro uma cera utilizada como material de suporte (Figura 1.7). O material da peça liquefeito é ejetado e se solidifica ao contato com o material da peça. O segundo cabeçote então ejeta a cera construindo o suporte nas regiões necessárias. Após a impressão de uma camada, uma ferramenta tipo fresa é

passada sobre a superfície depositada deixando-a suave e plana para a próxima camada. As partículas removidas são coletadas no filtro de um aspirador. Além das regiões que normalmente requerem estrutura de suporte, este material é depositado ao redor de toda a peça, aumentando assim, a sua resistência durante o fresamento.

Após a finalização da fabricação, o material de suporte é facilmente retirado pela imersão da peça num banho em óleo mineral a uma temperatura de 60 a 65°C.

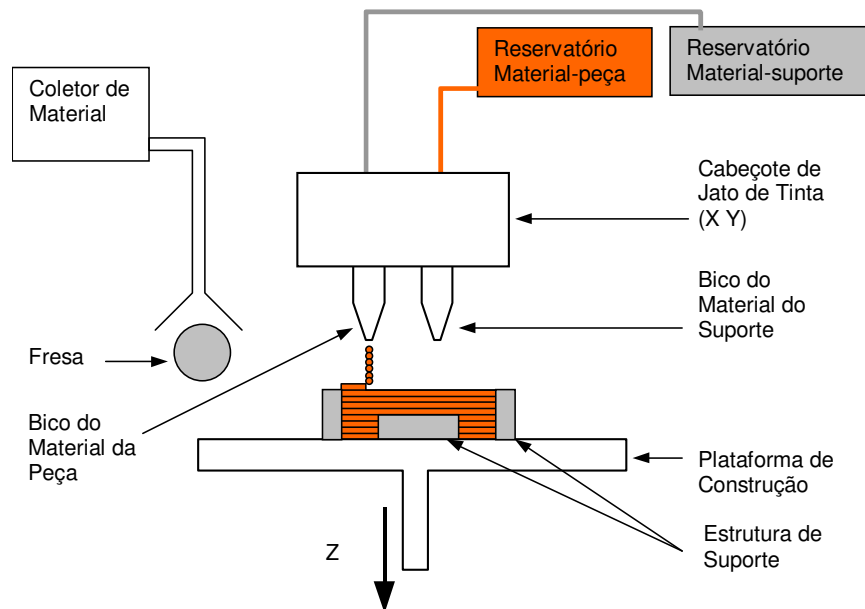


Figura 1.7 - Princípio do processo IJP da Solidscape – Benchtop

Sinterização Seletiva a Laser (SLS) da 3D Systems

Princípio

O processo SLS utiliza um laser CO₂ de média potência (25 a 100W) para sinterizar um material em forma de pó. A construção física da peça se inicia com o material sendo espalhado e nivelado por um rolo na câmara de construção do equipamento sobre uma plataforma. Esta câmara é aquecida a uma temperatura um pouco abaixo do ponto de fusão do material e mantida em atmosfera inerte, controlada usando nitrogênio, o que evita a oxidação e risco de explosão das partículas mais finas. Um sistema de varredura composto por dois espelhos (controlados por servo-motores) desloca o feixe do laser sobre a superfície formada pelo material espalhado,

fornecendo a energia restante para “sinterizar” as partículas de acordo com a geometria da camada 2D da peça. Na seqüência, a plataforma que suporta a peça desce na direção do eixo Z um incremento igual à espessura da camada fatiada no arquivo CAD e uma nova camada de material é espalhada sobre a anterior. Uma vez que a temperatura da nova camada atinja a temperatura de trabalho, o laser inicia novamente a varredura na superfície resultando em nova sinterização. O material de suprimento fica armazenado em reservatórios laterais a câmara de construção (Figura 1.8). Este ciclo é repetido até que todas as camadas sejam depositadas e a peça seja produzida.

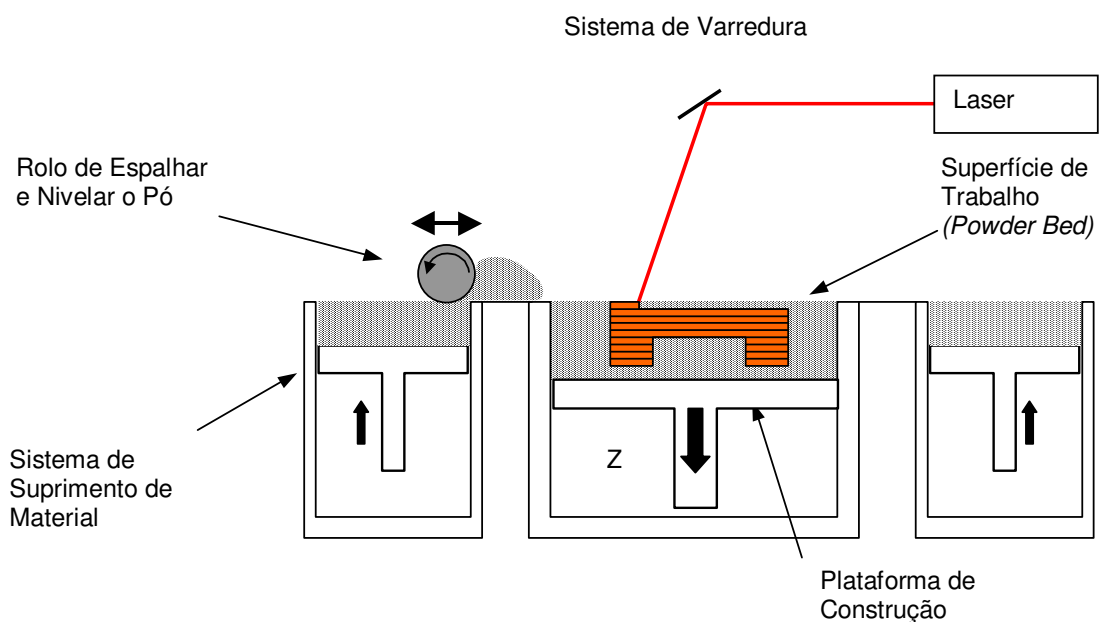


Figura 1.8 - Princípio do processo SLS

Sinterização a Laser - Sistemas EOSINT da EOS

Princípio

O princípio de funcionamento da tecnologia EOSINT é bastante similar ao da tecnologia SLS. O processo inicia com o material sendo espalhado e nivelado por um sistema de lâmina em uma câmara de trabalho (Figura 1.9). O material é suprido ao sistema de depositar e espalhar quando o mesmo finaliza o curso e alcança a lateral do equipamento. A câmara também se encontra a uma temperatura controlada e com uma atmosfera inerte através de gás nitrogênio que

é gerado por uma fonte na própria máquina, não necessitando suprimento externo como na SLS da 3D Systems. Um sistema de varredura por espelhos controla o feixe de laser CO₂, descrevendo a geometria da camada sobre a superfície do material espalhado. Com a incidência do laser, as partículas do material são aquecidas ao ponto de fusão, unindo-se umas as outras e também a camada anterior. Quando o laser terminar a sinterização da camada o sistema elevador desce em Z o valor referente a uma espessura de camada e o material é novamente espalhado. O processo então se repete até a última camada. A Figura 1.9 apresenta esquematicamente o princípio de funcionamento da tecnologia EOSINT. Ao final do processo o pó não processado é removido com o auxílio de uma escova, ar comprimido ou de um aspirador de pó.

Assim como no processo SLS, o material não sinterizado funciona como suporte natural à peça, tornando desnecessária a preparação de suporte durante o processamento do arquivo CAD.

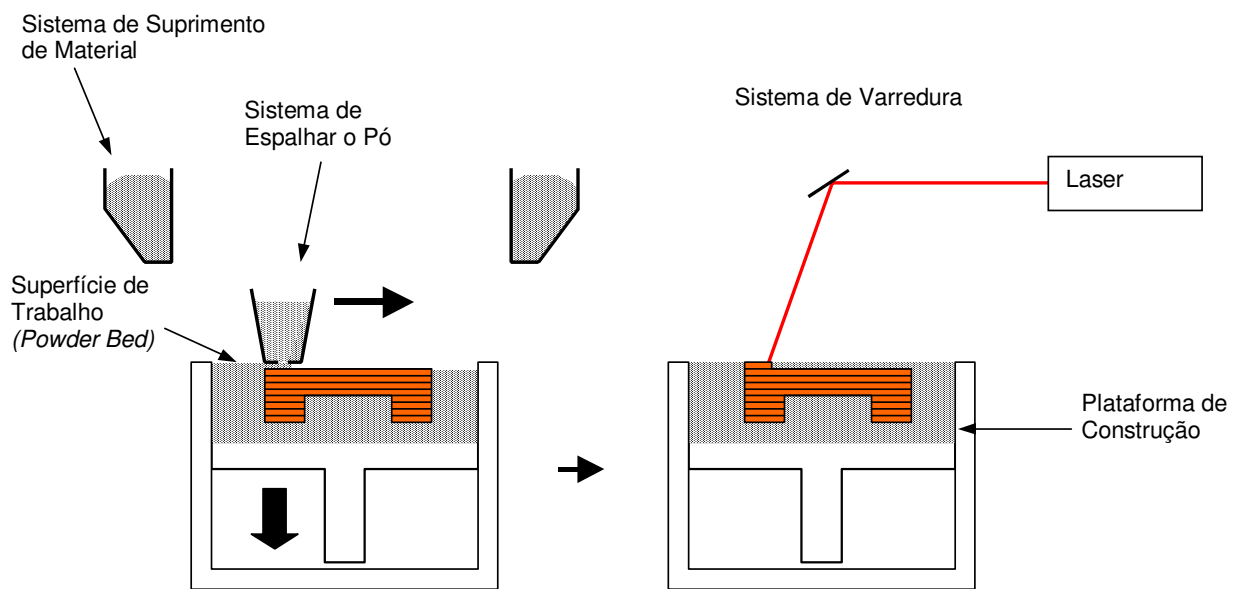


Figura 1.9 - Princípio de funcionamento da tecnologia EOSINT da EOS GmbH

Fabricação da Forma Final a Laser (LENS) da Optomec

Princípio

O princípio do processo é demonstrado esquematicamente pela Figura 1.10. O processo inicia com o laser de Nd:YAG, de alta potência (600 ou 1000W), focado sobre a superfície da

peça sendo fabricada, formando uma poça fundida. O pó metálico é então direcionado continuamente por um bico para o ponto focal do laser, fundindo-se e aumentando o volume da peça. O material é depositado em finas linhas com determinada largura e espessura. O bico de deposição movimenta-se nas direções X-Y-Z em relação à mesa e, em um modelo disponível, possui a possibilidade de inclinação de $\pm 90^\circ$ e rotação de $\pm 180^\circ$. Adicionalmente, a mesa da máquina permite rotação e inclinação. Esta característica de 5 eixos, permite que vários detalhes, que normalmente exigiriam suporte, possam ser fabricados sem os mesmos. O processo é realizado dentro de uma câmara com atmosfera controlada, utilizando gás argônio a baixa pressão, para evitar a ação do oxigênio. As peças geralmente necessitam de acabamento superficial após a fabricação. No entanto, são obtidas peças maciças com boa formação de grãos e, por isso, boas características de resistência mecânica. A formação dos grãos é fina devido à rápida solidificação da poça fundida.

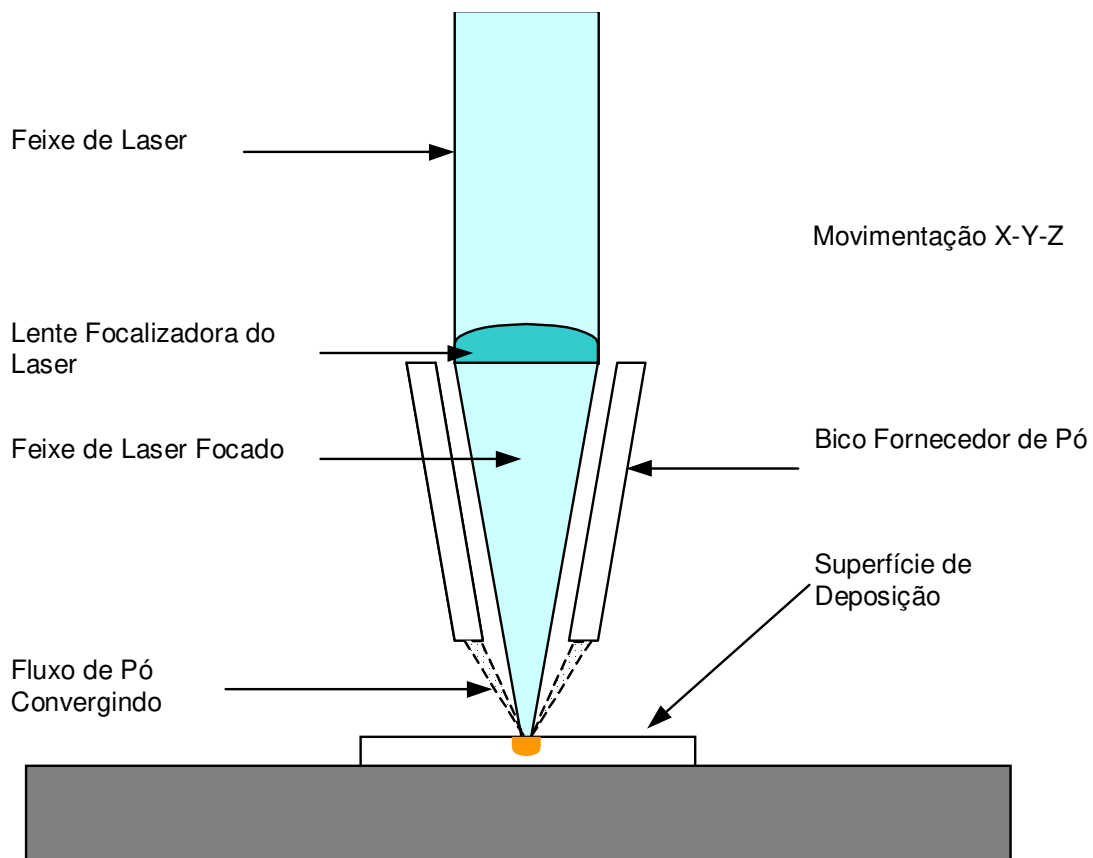


Figura 1.10 - Princípio do processo LENS da Optomec

Impressão Tridimensional (3DP) da Z Corporation

Princípio

Diferente das tecnologias anteriores, a tecnologia 3DP não utiliza laser para processar o material em forma de pó. Neste processo, o material é agregado por um aglutinante depositado por impressão tipo jato de tinta. Um rolo espalha e nivela o material e a cabeça de impressão deposita o aglutinante de acordo com a geometria 2D da camada sendo processada (Figura 1.11). Este processo também não requer estrutura de suporte, pois o material ao redor da peça não processado atua como um suporte natural. Adicionalmente, várias peças podem ser fabricadas empilhadas em uma operação. As peças fabricadas por este processo necessitam de uma etapa de pós-processamento para aumentar a resistência ou acabamento superficial. Este pós-processamento vai variar de acordo com o material sendo processado.

Com os materiais disponíveis, os protótipos obtidos são direcionados para verificação de projeto, comunicação e padrão para aplicações em fundição.

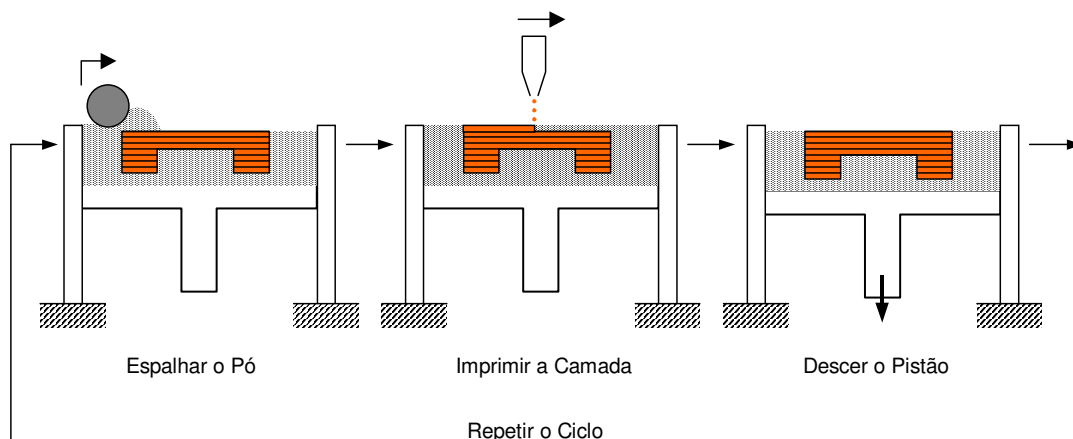


Figura 1.11 - Princípio do processo 3DP

Impressão Tridimensional (3DP) – ProMetal da Ex One Corporation

Princípio

A Figura 1.12 representa esquematicamente o princípio deste processo. O pó metálico é coletado do reservatório de suprimento, espalhado e nivelado por um rolo sobre a superfície do

pistão que conterá a peça fabricada. Este sistema de espalhar então recua para a posição inicial. O cabeçote de jato de tinta imprime um líquido aglutinante fotopolimérico, sobre as partículas do pó metálico descrevendo a geometria da camada. Em seguida, o sistema de espalhar coleta mais material e avança parcialmente, até que a lâmpada de luz UV utilizada para curar o ligante esteja posicionada sobre a camada impressa da peça. Após a cura do ligante, a plataforma desce em Z o incremento da espessura da camada e o sistema de espalhar continua o deslocamento depositando mais uma camada, recuando então para a posição original. Este ciclo é repetido até a finalização da peça. Ao final do processo, o pistão que contém a peça sobe e a peça verde é retirada do bolo formado. Esta peça verde não possui resistência suficiente para aplicação final, necessitando então de uma etapa de pós-processamento em um forno. Numa primeira etapa do pós-processamento, a peça é aquecida queimando o aglutinante e iniciando a sinterização metálica das partículas. Ao final desta etapa, tem-se uma peça com uma porosidade de 60%. A peça vai novamente ao forno a 1100°C onde, pela ação da capilaridade, uma liga de bronze é infiltrada obtendo-se uma peça completamente densa. Após esta última etapa, geralmente são necessárias operações de acabamento envolvendo usinagem, polimento e tratamento superficial.

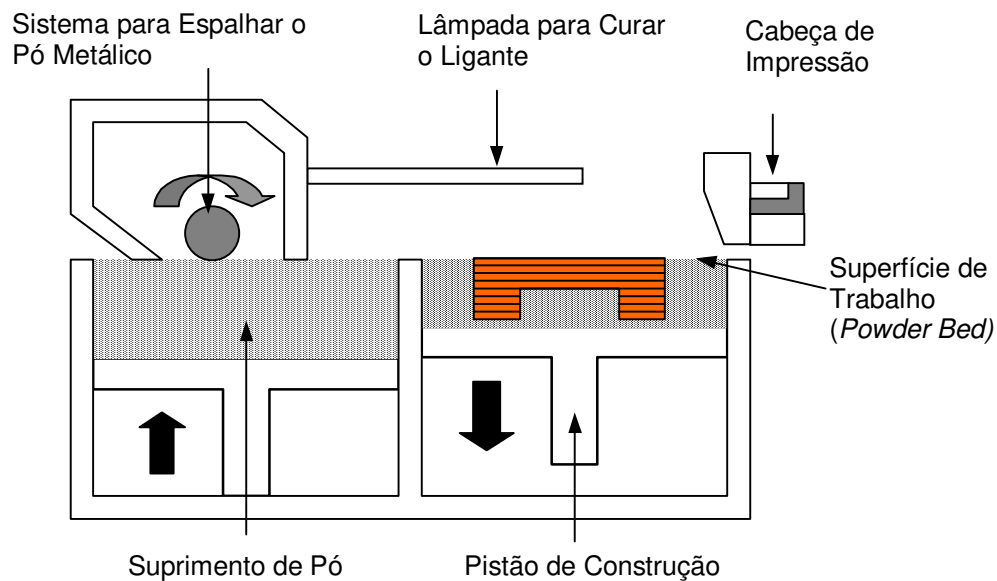


Figura 1.12 - O processo ProMetal da empresa Ex One Corporation

Anexo II. Endereço eletrônico dos fornecedores de equipamentos e materiais de PR

Tecnologias	Empresas	Endereços (acesso em dez/2008)
SL, IJP, SLS	3D systems, Inc.	http://www.3dsystems.com/
FDM	Stratasys, Inc.	http://stratasys.com/
3DP	Z Corporation	http://www.zcorp.com/
EOSINT	EOS GmbH	http://www.eos.info/
IJP - Polyjet	Objet Geometries Ltd.	http://www.objet.com/
3DP ProMetal	ExOne Corporation	http://www.exone.com/eng/technology/x1-prometal/
LOM	Cubic Technology Inc.	http://www.cubictكنولوجيات.com/
PLT	Kira Corporation Ltd.	http://www.kiracorp.co.jp/EG/pro/rp/RP_process.html
LENS	Optomec, Inc.	http://www.optomec.com/
IJP - Benchtop	SolidScape	http://www.solid-scape.com/index2.html
Site da Internet com informações sobre prototipagem rápida		
Castle Island's Worldwide Guide to Rapid Prototyping		http://home.att.net/~castleisland/

Anexo III. Questionário

Questionário de avaliação do uso da Prototipagem Rápida



Ministério da
Ciência e Tecnologia



Este questionário contribui para um estudo da importância e viabilidades que essa metodologia tem trazido para experimentos científicos nos projetos de pesquisa.

Nome do Projeto:
Aplicação:
Area:
Instituição/Depto.:
Pesquisador:
Tecnologia(s) em uso:

1. Qual a utilização que você faz da Prototipagem Rápida ?
 - Protótipo visual (design)
 - Protótipo funcional (propriedades representativas ou desempenho do produto final)
 - Ferramental rápido (molde para ferramenta)
 - Manufatura rápida (produto de uso final construído sem ferramental)

2. Como tomou conhecimento das potencialidades da Prototipagem Rápida para uso em experimentos científicos?

3. E das atividades do CTI nesta área?
4. Por que recorreu ao CTI na utilização dessas tecnologias para seu projeto de pesquisa?
5. Qual o benefício que essa utilização trouxe ao seu projeto?
- Redução de tempo
 - Redução de custo
 - Viabilidade de formas complexas
 - Relação custo/benefício
- Outros: _____
6. A que condições de uso foram submetidas o(s) protótipo(s)?
- Temperatura
 - Pressão
 - Ambiente químico
 - Esforço mecânico
- Outras: _____
7. Que aspecto(s) no protótipo não foi atendido segundo essas condições?
- Resistência mecânica
 - Acabamento
- Outros: _____
8. O material comercial atendeu a necessidade de uso?
- Sim

- Não

9. Utilizou algum tipo de pós-processamento?

- Tratamento de superfície
- Infiltração
- Colagem
- Polimento

Outros: _____

10. Submeteu a algum processo subtrativo? Que tipo?

- Fresamento
- Furação
- Embuchamento
- Corte

Outros: _____

11. Que outra(s) propriedade(s) considera importante que a peça apresente?

- Reforço mecânico
- Acabamento
- Cor
- Transparência
- Peso
- Volume
- Memória de forma (flexibilidade)
- Porosidade (hermeticidade)
- Partes móveis
- Surpresa de solução

12. Houve comunicação, publicação ou divulgação? Quais?

- Artigos
- Periódicos
- Revistas
- Congressos
- Feiras

Outros: _____

13. Você tem conhecimento de alguém que utilizou a Prototipagem Rápida na sua área de pesquisa?

14. Outras considerações que julgar importante para contribuir com o desenvolvimento dessas tecnologias.

15. Fotos da aplicação final

Anexo V. Teses e Dissertações Concluídas dos Proponentes dos Projetos

CARVALHO, L. B. **Análise de Estruturas Intracranianas em Mariliasuchus amarali (Crocodyliformes, Notosuchia) do Cretáceo Brasileiro.** Rio de Janeiro, 2007, 125p. Tese de doutorado - Museu Nacional do Rio de Janeiro - Universidade de São Paulo.

Di GIACOMO, G. A. P. **Avaliação da Aplicação de Guias Cirúrgicas, Feitas a Partir da Técnica de Prototipagem Rápida, em Implantodontia,** São Paulo, 2003, 99p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Odontologia - Universidade de Santo Amaro.

FREITAS, E. P. **Placa Projetada e Otimizada por Elementos Finitos para Tratamento de Fratura Mandibular em Cães.** Botucatu, 2008, 76p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista.

KUNSLER, M.R. **Estudos dos Desvios Geométricos Gerados na Obtenção de Biomodelos a partir de Imagens Tomográficas,** Porto Alegre, 2008, 85p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial - Universidade Federal de Santa Catarina.

MARAFON, P. G. **Estabilidade Dimensional em Prótese Óculo-Palpebral Confeccionada por meio de Modelo Reverso Obtido pelo Sistema CAD/CAM.** São Paulo, 2008, 100p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Odontologia - Universidade de São Paulo.

PUPO, R. T. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura.** Campinas, Tese de doutorado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas. **A ser defendida em janeiro de 2009.**

SILVA, A. O. **Validação do Protocolo de Modelagem Tridimensional do Primeiro Pré-Molar Superior para a Metodologia dos Elementos Finitos pela Análise das Concentrações de Tensões na Região Cervical de Esmalte e Estudo dos Mecanismos Formadores de Lesões de Abfração.** Araraquara, 2008, . Tese de doutorado – Faculdade de Odontologia de Araraquara - Universidade Estadual Paulista.

VELHO, T. R. D. **Uma Contribuição para o Desenvolvimento de um Dispositivo Háptico para a Mão para Interação com Objetos Tridimensionais.** Campinas, 2008, 105p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas.

VIEIRA, E. P. **Produção digital de maquetes arquitetônicas: um estudo exploratório.** Campinas, 2007, 110 p. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas.