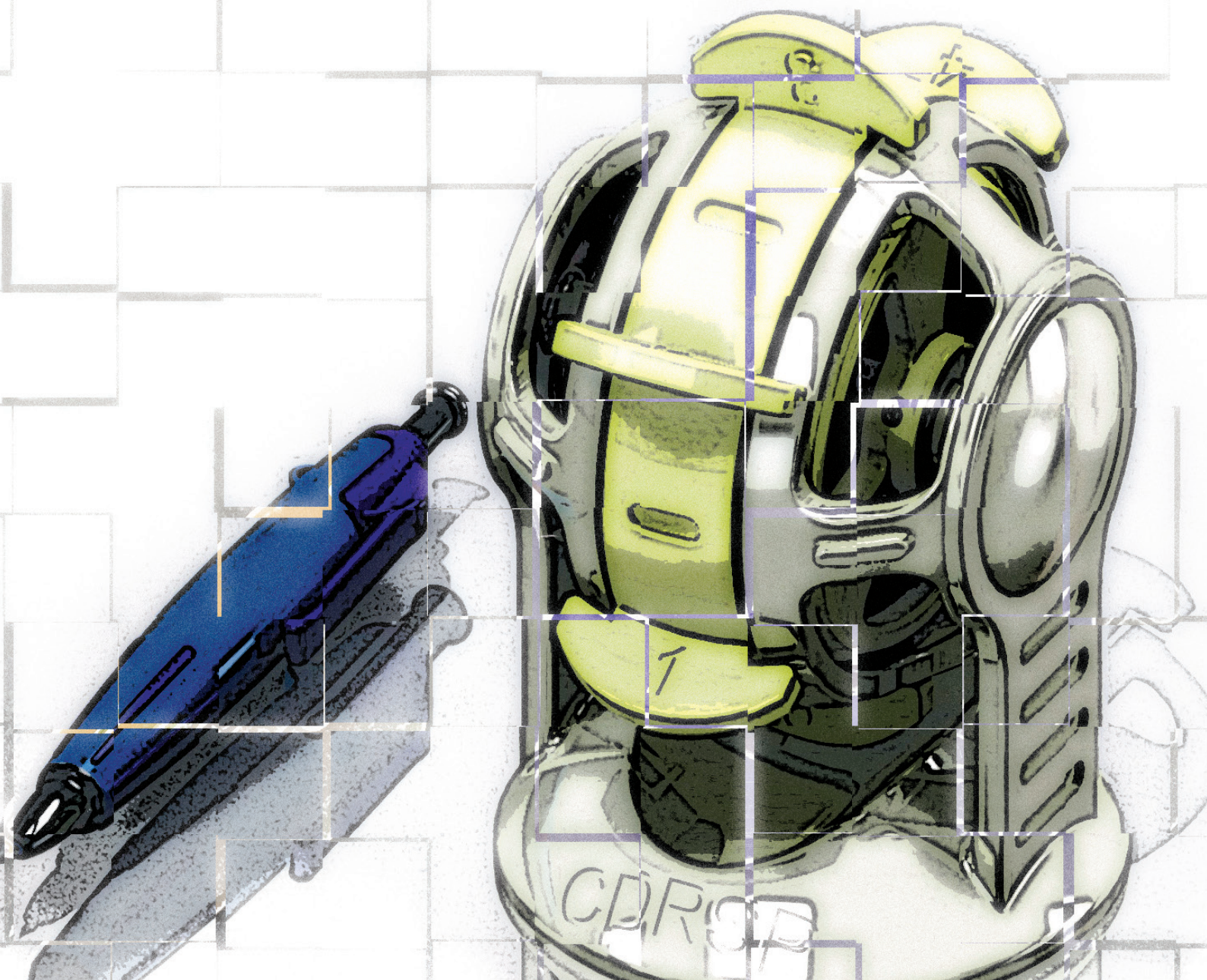


Francisco de Alencar
Paulo Jorge Bártolo



A PROTOTIPAGEM RÁPIDA E A DIGITALIZAÇÃO ÓTICA NO DESIGN

Este artigo representa uma síntese do pós-doutorado realizado no CDRsp-Centro para o Desenvolvimento Rápido Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria-Portugal, onde foi realizado o trabalho de investigação sobre as tecnologias de Prototipagem Rápida, denominadas também de Processos Aditivos de Fabricação, e o emprego do sistema de Digitalização Ótica para a inspeção dimensional de produtos. Tem como objetivo auxiliar a compreensão destas recentes inovações tecnológicas, suas características técnicas e o importante papel complementar no cenário do desenvolvimento de produto em Design.

(...)

O DESIGN E A PROTOTIPAGEM RÁPIDA

O desenvolvimento de produto em design e engenharia sempre foi uma atividade do projeto complexa envolta a altos índices de riscos, decorrente das incertezas inerentes ao processo de inovação almejado. Nas últimas décadas grande esforço teórico foi desenvolvido em ofertar abordagens metodológicas, processos e procedimentos a otimizar os empreendimentos direcionados à inovação. Simultaneamente a esses suportes de gerência do projeto desenvolveram-se também grandes recursos tecnológicos amparando e apoiando o projeto. É incomparável as vantagens e benefícios que os recursos tecnológicos proporcionaram ao ambiente projetivo e produtivo.

Assim como outras áreas do conhecimento, o Design de Produto foi profundamente influenciado pela revolução tecnológica dos últimos anos, quando surgiram novas tecnologias e novos processos produtivos, e aliado a eles, novas metodologias de design adaptadas a esse novo contexto. Além disso, pelo fato do desenvolvimento de produtos industriais fazer parte de um universo tecnológico complexo e competitivo, onde a qualidade e a eficiência são requisitos primordiais, há um apelo para que designers utilizem essas tecnologias e linguagens computacionais a fim de minimizar os riscos envolvidos no processo. (ALCOFORADO, 2008)

Os designers na sua atividade ocupam-se com três diferentes tipos de tarefas; utilizam desenhos e modelos para comunicar com outros elementos da equipe de trabalho. Fazem previsões sobre o desenvolvimento e execução do projeto que irão executar. E repartem-se por um conjunto de atividades paralelas ao processo de concepção, procurando gerar novas idéias, testar e avaliar novas alternativas do design, otimizando a comunicação entre profissionais e clientes. (GROSS E YI-LUEN, 2004)

Para atingir tais objetivos, o designer lança mão de uma série de técnicas de representação, e linguagens de projeto, predominantemente desenhos e tecnologias digitais, que transmitem informações em forma de síntese.

As representações utilizadas nos projetos visam facilitar a comunicação de informações entre os envolvidos (equipe de projeto, fornecedores e clientes), integrar conhecimentos envolvidos no processo, auxiliar nas tomadas de decisões, facilitando a condução do desenvolvimento do produto e sanar ao máximo as dúvidas no processo de desenvolvimento, e por isso, pode-se utilizar várias formas de representação do produto. (VOLPATO et al, 2007)

Todos os tipos de representação são importantes, entretanto, a representação tridimensional permite mais facilmente que o objeto do projeto seja estudado, e as eventuais

falhas sejam diagnosticadas antes do produto ir para a serialização. Esta representação pode ser um modelo, um mockup ou um protótipo, uma vez que cada qual possui sua utilidade em determinada fase do projeto. (BARBOSA, 2009)

Segundo Volpato et al (2007), a maioria dos profissionais, independentemente da idade, sexo ou classe social, tende a assimilar a informação projetual de forma mais rápida se ela for transmitida através de um modelo físico ao invés de desenhos ou ilustrações bidimensionais no papel ou computador. Isto acontece porque o modelo físico permite uma interação sinestésica, reduzindo o esforço cognitivo de se interpretar palavras e imagens bidimensionais para imaginar a forma final do produto. (Figura 1)

Mais recentemente um dos aplicativos mais revolucionários direcionados para a produção de modelos físicos, é a Prototipagem Rápida. O termo relaciona-se a uma classe de tecnologias digitais que podem automaticamente construir modelos físicos tridimensionais, onde basicamente um computador interpreta a informação desenvolvida no ambiente CAD da geometria do objeto, convertendo as informações para o ambiente CAM, onde uma máquina de prototipagem rápida constrói fisicamente o objeto. (BARBOSA, 2009)

Prototipagem rápida é uma tecnologia notável e poderosa que revolucionou os processos de design, de engenharia e de manufatura em segmentos tão distintos como aeroespacial, automotivo, bens de consumo e educacional. Primeiramente dedicada à construção de modelos nas diferentes fases do desenvolvimento do produto, hoje é usada em todo o processo de design, e estendeu seu alcance de aplicação com soluções para ferramentaria e produção.

É útil também na obtenção de modelos para validação conceitual com rapidez e baixo custo, tornando palpável aquilo que os projetistas só têm no papel ou na tela de um computador. É, portanto, um recurso para materializar idéias, que facilita a visualização do produto e favorece a comunicação de informações sobre o objeto, permitindo a conferência de encaixes, interferências com componentes diversos ou partes internas, dimensões e ergonomia. (Figura 2)

Outra aplicação para prototipagem rápida tem sido a produção de modelos para marketing visual, teste e simulação.

Existe uma série de termos para prototipagem rápida, como fabricação de formato livre, fabricação de sólido de forma livre, autofabricação, fabricação automatizada de forma livre, fabricação digital, impressão 3D, prototipagem a laser, manufatura por camada, manufatura de adição e visualização sólida. A multiplicidade dos termos e definições pode confundir uma discussão ou descrição da tecnologia referente.

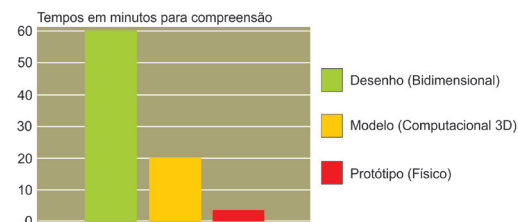


Figura 1 Interpretação espacial de uma peça.
Fonte: Volpato et al, 2007. Adaptado pelo autor.



Figura 2 Protótipos aditivos e detalhes constitutivos. Imagens cedidas pela empresa CODI/Leiria/Portugal.

Atualmente, o termo tradicional de prototipagem rápida vem se tornando mais usual e correto a todo tipo de prototipagem rápida de execução, independentemente do processo de adição ou remoção de material, ou ainda sobre o uso de tecnologias que envolvam hardware e software. (DVORAK, 2004)

O DESIGN E A MANUFATURA RÁPIDA

O desenvolvimento de um produto visando sua produção imediata é conhecido como Design para a manufatura (DFM-Design for Manufacturing), que é uma filosofia de projeto aplicada desde os estágios iniciais do desenvolvimento de um produto, na busca de se desenhar peças e produtos que possam ser produzidos de maneira mais fácil e econômica. (HAGUE et al, 2003)

O direcionamento do Design para a manufatura rápida já se manifesta em alguns casos, como possibilidade real no nível que se encontra o desenvolvimento das atuais tecnologias aditivas e seus insumos, embora ainda haja enormes restrições, seja por motivos tecnológicos ou econômicos.

A manufatura rápida ainda é emergente, mas há fortes indícios de que muitos líderes, e grandes fabricantes estão usando tecnologias aditivas para manufatura de peças ou componentes necessários para suas aplicações específicas.

Com estas definições, pode-se entender que há uma ordenação para o processo de desenvolvimento de um produto e nesta sequência, as tecnologias de prototipagem rápida podem fazer a diferença entre o que pode se tornar um produto ou apenas um conceito dele. Portanto, a manufatura rápida, pode ser aplicada nestas duas instâncias do processo de desenvolvimento de um produto, hora para a análise conceitual desse produto, hora para compreensão do produto projetado (SELHORST, 2008).

O avanço das tecnologias e dos materiais empregados atualmente nas tecnologias rápidas, denominadas a partir de agora neste trabalho como aditivas, tem permitido a obtenção de peças customizadas e de desenhos diversos, que não seriam possíveis empregando os recursos convencionais de fabricação, em especial os processos de injeção de materiais poliméricos. Diferentemente dos objetivos e finalidades que caracterizam a prototipagem rápida, a preocupação atual sobre a manufatura rápida reside no fato de ir além da confecção de modelos físicos visuais, mas também, e de forma importante, a possível confecção de modelos com a finalidade de aplicação direta num sistema de produto.

As tecnologias aditivas para a manufatura rápida dispensam estratégias e requisitos de projeto para obtenção de objetos com alto grau de complexidade geométrica, diferentemente dos objetos produzidos por processos de injeção onde os moldes necessários obtidos por sistemas convencionais de ferramentaria, requerem soluções construtivas complexas demandando grande esforço técnico para sua obtenção.

A PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA

A estrutura constituinte em todos os processos aditivos compreende as transformações do modelo CAD (Computer Aided Design) num modelo intermediário em que as superfícies são descritas por uma rede de elementos triangulares no formato STL (STL-Stereo-lithography). Uma vez definido o modelo CAD, este deve em seguida ser convertido num modelo formato STL em que as superfícies são descritas através de uma malha envolvente de triângulos, que constituem do ponto de vista matemático, a forma polinomial mais simples para descrição de uma superfície.

Este formato, desenvolvido pela empresa 3D Systems em 1987, rapidamente se transformou no formato padrão para os diferentes processos aditivos.

O arquivo STL consiste de uma lista com os dados das faces triangulares, no qual cada face é unicamente identificada por uma normal unitária (um vetor perpendicular ao triângulo) e por três pontos representando os vértices do triângulo. Tanto a normal como cada vértice são especificados por três coordenadas (x, y, z), somando-se assim, 12 valores para cada face. As faces definem a superfície de um objeto tridimensional. (Figura 3)

Cada face faz parte do limite entre o interior e o exterior do objeto, e sua orientação é especificada de duas formas: a direção da normal de cada triângulo é para fora, tal que a orientação das faces no modelo proposto esteja voltada para o lado de fora da peça (o lado que não possui material na peça), e os vértices são listados na direção anti-horária quando o objeto é visualizado a partir do lado de fora. (JÓIA FILHO, 2008)

Quanto maior for o número de triângulos utilizados no formato STL e quanto menor for a espessura de cada camada, maior será a precisão obtida. A este respeito devemos considerar um importante parâmetro designado por dimensão do problema que quantifica a influência do número de triângulos e do número de camadas no tempo de criação dos referidos arquivos. Quanto maior for a dimensão do problema maior será o tempo necessário para a geração do arquivo SLI. (BÁRTOLO; MATEUS, 2002)

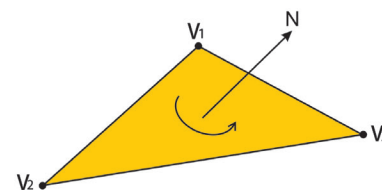


Figura 3 Representação dos dados do formato STL. Fonte: JÓIA FILHO, 2008



Figura 4 As diferentes etapas para obtenção de modelos empregando tecnologias aditivas.

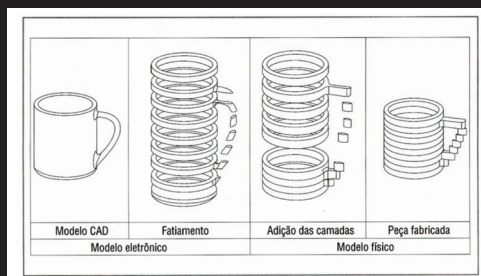


Figura 5 Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada.
Fonte: Volpato *et al*, 2007

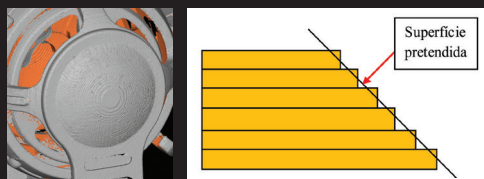


Figura 6 Efeito escada na definição de uma superfície inclinada ou curva.

Além disso, o desenvolvimento de ferramentas para converter imagens de ultra-sonografia, tomografia computadorizada e tomografia por ressonância magnética em formato STL propiciaram a integração entre estas imagens com máquinas de prototipagem aditivas, abrindo um novo campo de aplicações.

Finalmente o modelo STL é seccionado em finas camadas representando diferentes secções transversais e que constituem o chamado arquivo formato SLI. A informação contida neste tipo de arquivo irá posteriormente possibilitar a construção do modelo final. Essas camadas planas de material serão então empilhadas sequencialmente, iniciando na base e indo até o topo, gerando assim o modelo. (Figura 5)

Todo processo de construção por camadas, está associado a uma estrutura tipo escada, quanto maior a sua espessura maior será também os degraus formados, o contrário, oferece superfícies com melhor acabamento, a um custo de processamento e construção maiores. (Figura 6 e 7)

Em aplicações práticas de produção de modelos físicos, minimiza-se a rugosidade através de operações posteriores de acabamento. Desta forma é importante ter material em excesso para remover. Para tal produz-se um modelo com dimensões superiores às do CAD, como se observa na figura 8. A dimensão final da peça é obtida através da aplicação de diversas técnicas de acabamento superficial tais como, jateamento de areia, polimento, pintura etc. Este acabamento irá suavizar os degraus produzidos pelo processo aditivo. (Bártolo, Mateus, 2002)

Desta forma o modelo deve ser orientado na zona de trabalho do equipamento, por meio dos eixos x, y, z. A orientação constitui uma importante operação uma vez que influenciará a qualidade superficial do modelo final, o tempo de construção, a necessidade de suportes estruturais e alguns problemas associados ao processo de fabricação como sendo as distorções e empenos. (BÁRTOLO; MATEUS 2002)

Dessa forma, os processos aditivos existentes podem ser classificados de acordo com o estado inicial da matéria-prima utilizada, onde, os principais processos foram separados em três grupos: os baseados em Líquido, os baseados em Sólido e os que utilizam material na forma de Pó, conforme figura 9. (VOLPATO *et al*, 2007)

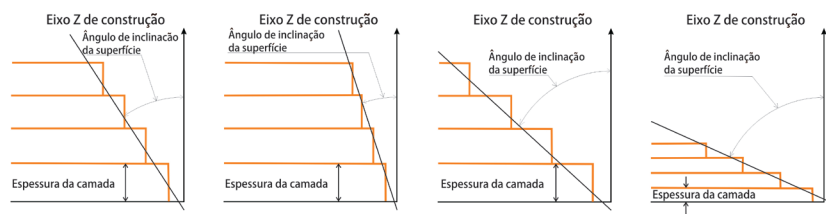


Figura 7 Efeito degrau ou escada em função do ângulo de inclinação da superfície e espessura da camada. Fonte: Volpato et al, 2007

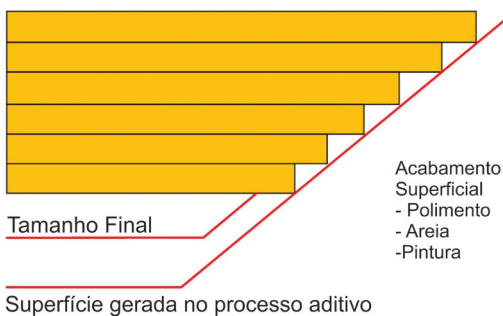


Figura 8 Efeito escada é eliminado/reduzido manualmente através da utilização de técnicas de acabamento superficial.

Baseado em Líquido	Baseado em sólido	Baseado em pó
Estereolitografia – SL (Stereolithography)	Modelagem por Fusão e Deposição– FDM (Fused Deposition Modeling)	Sinterização a laser – SLS (Selective Laser Sintering)
Impressão a jato de Tinta IJP (Ink Jet Printing)- Polyjet	Manufatura Laminar de Objetos – LOM (laminated Object Manufacturing)	Sinterização a Laser (Laser Sintering)- EOSINT
IJP - InVision	Tecnologia comLâminasde Papel – PLT (Paper Lamination Technology)	Impressão Tridimensional 3DP (3 Dimensional Printing)
	IJP - Thermojet	Fabricação da Forma Final a Laser– LENS (Laser Engineered Net Shaping)
	IJP - Benchtop	3DP - Prometal

Figura 9 Classificação dos processos de ARP, baseada no estado inicial da matéria-prima. Fonte: Volpato et al, 2007. Adaptado pelo autor.

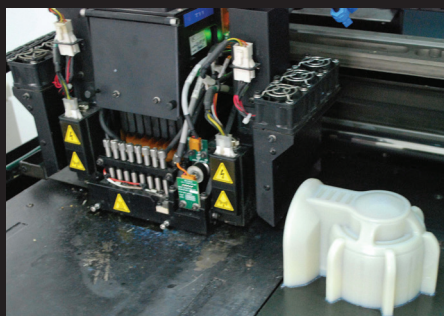


Figura 10 Detalhe da cabeça de impressão da Polyjet.



Figura 11 Detalhe da remoção dos suportes por jateamento d'água.



Figura 12 Instalações do CENTIMFE/Marinha Grande/Portugal, com a tecnologia Polyjet Objet/Eden 330.

A TECNOLOGIA ADITIVA POLYJET

A tecnologia aditiva Polyjet permite construir rapidamente um modelo físico com elevado detalhe e rigor dimensional, a partir de um desenho CAD-3D, constituindo-se em processo aditivo de camadas de resina acrílica fotopolimerizável, sem necessidade de qualquer tipo de pós-processamento. Possui características construtivas de um equipamento desktop.

O arquivo STL, é virtualmente seccionado transversalmente em camadas de 16µm de espessura, através de software próprio da máquina. Uma cabeça de impressão, constituída por centenas de micro-difusores, injeta uma camada de 20µm de resina sobre a plataforma de construção (com uma definição de 600x300x1270dpi), apenas nas áreas correspondentes ao perfil do corte transversal efetuado previamente, deixando a área restante da bancada isenta de resina. A resina é consolidada (polimerizada) por ação de radiação ultravioleta, durante o próprio processo de injeção, sendo cada camada retificada a 16µm por passagem de um cilindro logo após a deposição. (Figura 10)

A adição repetida de camadas de resina e a sua solidificação pela presença de radiação ultravioleta resultam na obtenção de um modelo tridimensional sólido em acrílico. Visto que em toda a área de construção está isenta de material, é necessário produzir uma estrutura de suporte para o modelo, evitando o seu colapso durante a produção. Uma resina de suporte solúvel em água é injetada em simultâneo com a resina acrílica do modelo, criando uma “cama” de suporte. (CENTIMFE, 2010)

Terminando a construção, é necessário apenas remover a resina de suporte através de uma simples lavagem conforme figura 11. A cura da resina é realizada inteiramente durante o processo de produção do modelo.

Apresenta um bom nível de detalhe e qualidade superficial de acabamento. No entanto, pode receber vários tipos de pintura e revestimentos, resultando excelentes modelos visuais ou masters para processos de conversão indiretos (moldes em silicone, resina epoxy, etc.).

Vantagens:

- Modelo com elevado detalhe e rigor dimensional
- Não necessita de pós-processamento
- Remoção dos suportes através de uma simples lavagem com água
- Os modelos apresentam um excelente acabamento superficial.
- Equipamento com utilização desktop

Desvantagens:

- Custo de produção é o mais elevado entre as tecnologias comparadas.
- Emprega grande quantidade de material de suporte se comparado.

A TECNOLOGIA ADITIVA SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)

Trata-se de uma tecnologia empregada através de processo aditivo por sinterização seletiva de laser sobre material poliamida em forma de pó. No fatiamento do arquivo STL a espessura da camada pode variar entre 0.07 e 0.25 mm de espessura. O material em pó é consolidado por sinterização no interior da câmara de processamento, em ambiente inerte e termicamente controlado, através do varrimento de um feixe de laser de CO₂. Este varrimento promove a solidificação das áreas correspondentes ao corte transversal da geometria a construir, em cada uma das secções efetuadas previamente pelo software. A sucessiva acumulação de camadas de pó, contendo cada uma, uma secção da peça solidificada, resulta num modelo tridimensional sólido em poliamida, envolto por um volume de pó solto (não processado pelo laser). Visto toda a área de construção ser recoberta por pó, não há necessidade da construção de suportes para os modelos nesta tecnologia. (CENTIMFE, 2010)

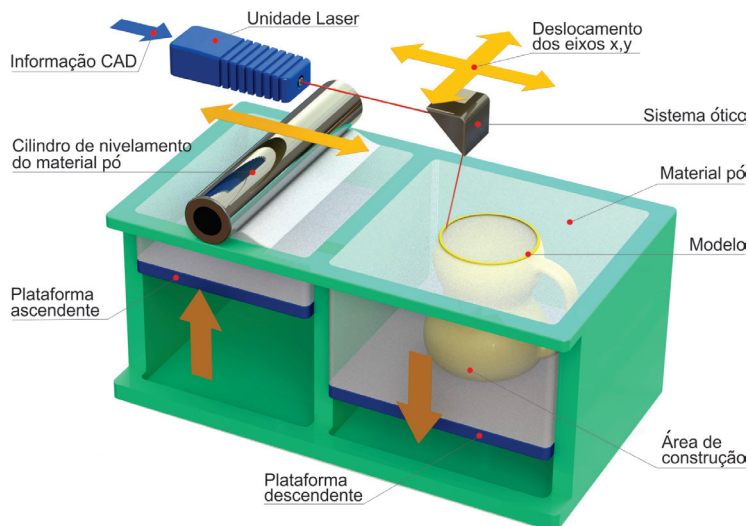


Figura 13 Representação esquemática do processo aditivo SLS.

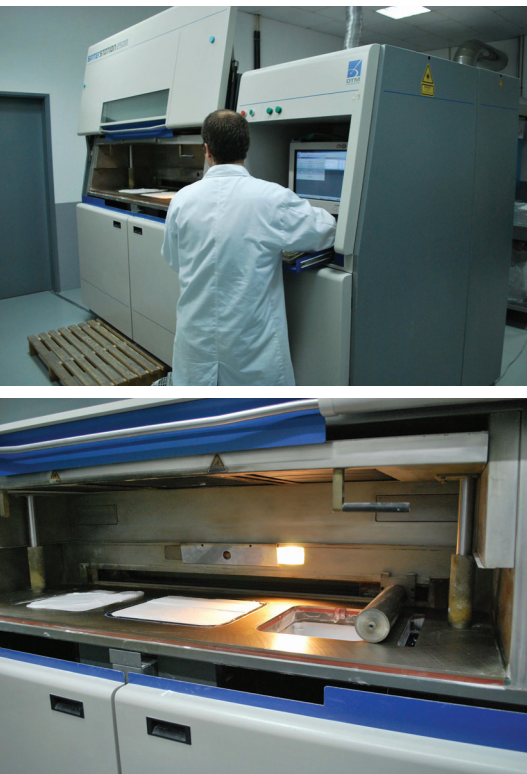


Figura 14 Instalações do CENTIMFE/Marinha Grande/Portugal, com a tecnologia SLS.

Após o arrefecimento, os modelos são retirados do pó envolvente e limpos com projeção de granalha e lixamento. Os modelos obtidos podem ser pintados, impermeabilizados e colados. Antes da pintura da cor desejada, é aplicado um primer primário para eliminar a porosidade e irregularidades superficiais conferindo aos modelos um aspecto limpo e suave.

Devido às propriedades intrínsecas do material utilizado (poliamida), os protótipos assim obtidos possuem excelente resistência mecânica e flexibilidade, sendo apropriados para modelos funcionais.

Quando empregado pó metálico (inox), após o arrefecimento, os modelos são então preparados para serem submetidos a um ciclo térmico, onde se irá promover a carbonização completa do ligante polimérico e infiltração posterior do modelo, com uma liga de bronze fundida. Os modelos assim obtidos são assim constituídos por uma liga 60-40 de aço inox e bronze, são indicados para a produção de insertos moldantes para pequenas séries ou de peças cuja complexidade geométrica seja tais que, por processos de usinagem convencional, a produção da ferramenta se torne excessivamente complexa e onerosa, satisfazendo prazos extremamente apertados de resposta. (CENTIMFE, 2010)

A utilização desta tecnologia para produção direta, com um elevado interesse de aplicação, permite a obtenção de series de peças, prontas à aplicação direta, num reduzido espaço de tempo e sem custos adicionais de fabricação e ferramentas.

Vantagens:

- Não é necessário processo de pós-cura
- Vários materiais podem ser utilizados
- Não há necessidade de criação de suportes
- Os modelos apresentam boas propriedades mecânicas
- Capacidade de produzir modelos para aplicação direta

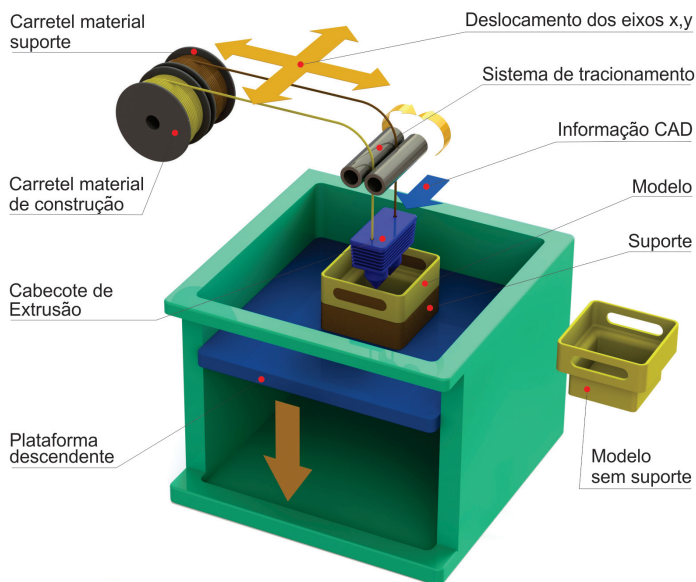
Desvantagens:

- Muito tempo é necessário para aquecer o sistema
- Modelos com muita porosidade
- Superfície final rugosa
- Emissão de gases tóxicos no processo de sinterização, exigindo cuidados especiais.
- Alto consumo energético comparado com as demais tecnologias analisadas.

A TECNOLOGIA ADITIVA FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

O processo aditivo FDM, constrói modelos por extrusão de filamentos de polímeros como ABS e Poliamida, aquecidos num cabeçote com movimentação nas coordenadas X, Y, além de uma plataforma movimentando-se no sentido vertical coordenada Z. No cabeçote, fios do material termoplástico são direcionados, por guias rotativas, a atravessar dois bicos extrusores aquecidos. Um bico recebe material para a construção do modelo enquanto o outro recebe material para ser utilizado como suporte necessário para sustentar, quando necessário, partes da geometria. (Figura 15)

Ao final de cada camada a plataforma se desloca para baixo, com uma distancia igual à espessura de camada, formando camadas superpostas de filamento até formar o modelo desejado.



Vantagens:

- Existe uma boa variedade de materiais
- Não há exposição de materiais tóxicos ou lasers

Figura 15 Esquema ilustrativo da tecnologia FDM.

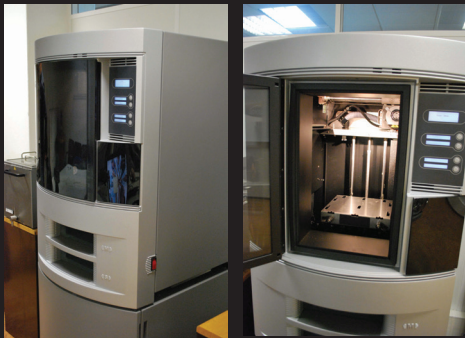


Figura 16 Tecnologia FDM-Dimension Elite. Instalações CODI Industrial/Leiria

- Os modelos apresentam boas propriedades mecânicas
- Suportes removidos empregando somente água.
- Equipamento pode ser facilmente configurado e utilizado como desktop

Desvantagens:

- Tempo demasiado para processamento
- É a tecnologia com o segundo maior custo de produção entre as tecnologias analisadas.

A TECNOLOGIA ADITIVA 3D PRINTER ZCORP

Este processo aditivo utiliza o conceito de impressão de jato de tinta, similar as impressoras de computadores, e ao invés de utilizar tinta, emprega um agente aglutinante. Em um reservatório contendo pó cerâmico ou polimérico, uma plataforma se movimenta no eixo Z de coordenadas, onde o pó é aglutinado formando as camadas do modelo, na medida em que a plataforma desce, um rolo carrega nova camada vinda de outra plataforma ascendente conforme figura 17.

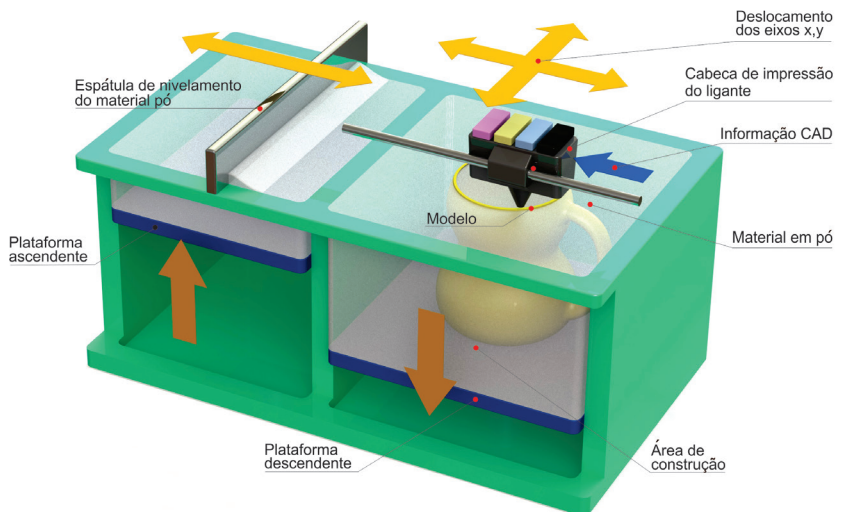


Figura 17 Representação esquemática do processo aditivo 3DPrinter. ZCORP.

A movimentação do cabeçote com o aglutinante, nas coordenadas x e y, constrói o desenho das camadas do modelo sucessivamente, quando finalizado o mesmo é retirado do interior do pó excedente. Como o modelo resultante é frágil, necessário se torna realizar a infiltração de elemento químico colante (Cianoacrilato) através da porosidade do modelo obtido, com o objetivo de endurecê-lo. (CURTIS, 2006) apud (SELHORST, 2008)

Vantagens:

- Equipamento pode ser facilmente configurado e utilizado como desktop
- Materiais tóxicos não são utilizados e nem produzidos
- Não é necessário o emprego de suportes

Desvantagens:

- Modelos com fragilidade estrutural
- Superfície com qualidade porosa
- Pós-cura é exigida por método de imersão em resina colante
- Modelos razoavelmente pesados

PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

Para a produção dos modelos físicos, foi necessário desenvolver o Design do modelo CAD explorando os recursos construtivos próprios da prototipagem aditiva em especial aqueles obtidos no ambiente de montagem. Optou-se por um design constituído de dois componentes em movimento caracterizados pela impossibilidade de obtenção empregando manufatura convencional. (Figura 19)

Utilizou-se para tanto o software SolidWorks 2010, onde foram modelados os componentes constitutivos (A e B) e posteriormente posicionados no modo montagem, possibilitando o movimento rotativo do componente B.

Por se tratar de dois componentes em movimento, o dimensionamento necessário dos diâmetros do eixo e do furo, foi definido com uma margem razoável, procurando evitar o aprisionamento do material suporte nessas áreas/superfícies, em especial naquelas tecnologias que empregam o suporte em forma de pó.

Após a modelagem no sistema CAD e objetivando uma maior facilidade na captura das nuvens de pontos durante o procedimento da digitalização ótica, as dimensões



Figura 18 Instalações do Laboratório de Prototipagem da ESAD/IPL/Caldas da Rainha/Portugal, com a Tecnologia 3D Printer ZCorp 450.



Figura 19 Vista Ilustrativa do modelo e comparação volumétrica

originais do CAD sofreram um aumento de 50% em escala (Centroid-Uniform Scaling). Cabe ressaltar que por conta deste fator de escala as dimensões analisadas apresentam frações de milímetros. Assim o modelo CAD possui no seu eixo longitudinal/altura a dimensão de 123,53 milímetros.

Os dois componentes constitutivos do modelo, foram convertidos em arquivos STL, totalizando 285.328 triângulos e 14.266.484 Bytes.

A CONSTRUÇÃO DOS MODELOS EMPREGANDO AS TECNOLOGIAS ADITIVAS.

Após a conversão do arquivo CAD para a extensão STL, o mesmo foi encaminhado para confecção dos modelos físicos empregando as tecnologias aditivas Polyjet, SLS, FDM e 3D Printer/Zcorp, conforme figura 20. Para tanto foi solicitado que os modelos físicos utilizassem à configuração máxima de qualidade em cada tecnologia aditiva, e que não recebessem nenhuma forma de acabamento superficial, apenas aquelas necessárias para a remoção dos materiais de suporte.

Para padronizar a orientação e o fatiamento das camadas, o eixo de rotação do modelo CAD ficou alinhado paralelamente ao eixo Z de construção em cada equipamento aditivo conforme figura 21. Para mensuração das características de cada tecnologia foi elaborada uma matriz para preenchimento dos dados relativos às variáveis constituintes e posterior comparação e análise. (Figura 22)

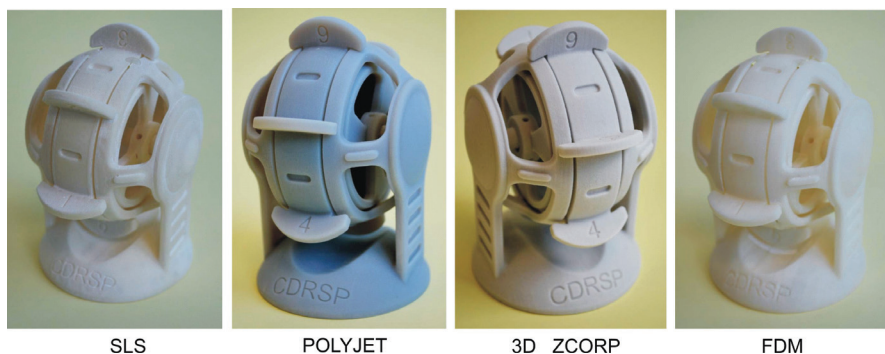


Figura 20 Modelos físicos obtidos pelos processos aditivos empregados.

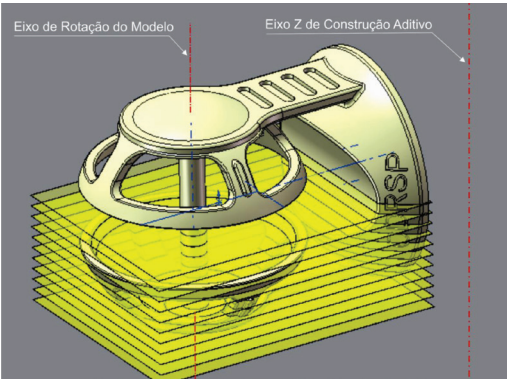


Figura 21 Ilustração da orientação e fatiamento. O eixo de rotação do modelo está paralelo ao eixo Z de construção aditiva.

MODELO CAD	SLS	POLYJET	3D PRINTER	FDM
02 Componentes em Montagem. Arquivo STL- 285.328 triângulos. 14.266.484 bytes. Volume = 159,27cm3.	SINTERSTATION 2500 CENTIMFE MARINHA GRANDE Portugal	OBJET/EDEN 330 CENTIMFE MARINHA GRANDE Portugal	Z PRINTER 450 IPL/ESAD CALDAS RAINHA Portugal	DIMENSION ELITE CODI INDUSTRIAL MARINHA GRANDE Portugal
Material Empregado para Construção do Modelo	Poliamida Duraform Similar Poliamida 12	Resina Acrílica Full Cure 850	ZP 150 Plastes	ABSplus
Custo Produção do Modelo	285,00 € *	550,00 € *	250,00 € *	330,00 € *
Espessura da Camada	100 µm	16µm	100 µm	178 µm
Número de Camadas	854	5988	812	479
Tempo Construção do Modelo	7 horas e 37 minutos	17 horas e 54 minutos	4 horas e 4 minutos	31 horas e 50 Minutos
Tempo Remoção dos Suportes	5 Minutos Jateamento granalha plástica-Norblast	30 Minutos Jateamento d'água	30 Minutos Jateamento de ar	1 Hora e 45 Minutos Tanque uBasic 10
Plataforma de Construção (mm)	X=300 y= 280 z=300	X=340 y=330 z=200	X=200 y=250 z=200	X=203 y=203 z=305
Consumo energético (Watts)	9 kW/h	3 kW/h	1,7 kW/h	2,2 kW/h
Peso	122,52 gramas	196,42 gramas	265,10 gramas	92,06 gramas

*Custo em Euros. Modelos produzidos em Portugal.

Figura 22 Quadro demonstrativo das variáveis construtivas nos processos Aditivos.

A MENSURAÇÃO DOS ERROS E DESVIOS DAS TECNOLOGIAS ADITIVAS.

Foram realizados os procedimentos de verificação de quais possíveis erros e desvios dimensionais foram provocados pelos processos aditivos de fabricação. Sabemos que os processos aditivos são do ponto de vista da precisão dimensional, menos precisos que os processos subtrativos convencionais. Alguns dos erros inerentes ao processo são:

- Erros de resolução;
- Erros devido à existência de um número insuficiente de triângulos;
- Erros associados à existência de uma malha inadequada de triângulos;
- Erros associados ao processo de fabricação (empenos, contrações, distorções etc.)
- Erros devido à espessura das camadas. (BÁRTOLO, MATEUS, 2002)

Melhoramentos tecnológicos, novos materiais, estão surgindo constantemente, mas ainda há um longo caminho a ser percorrido permitindo que os processos aditivos se aperfeiçoem principalmente no cenário da manufatura rápida.

Com o emprego da Digitalização Ótica, os modelos físicos foram processados e posteriormente, forneceram informações comparativas entre o modelo CAD e a nuvem triangular de pontos gerada em cada modelo.

A DIGITALIZAÇÃO ÓTICA

A Digitalização Ótica é uma tecnologia recentemente desenvolvida, que tem por finalidade capturar a superfície de um objeto físico, convertendo-a numa nuvem triangular de pontos para o ambiente digital. Uma vez capturada a superfície do objeto, é possível realizar uma série de procedimentos de metrologia, além de editar e alterar a forma do objeto, pelo uso de softwares específicos. Neste processo de conversão do modelo físico para o digital, surgiu o termo engenharia reversa.

Para a digitalização utilizou-se o Laboratório do CDRsp/IPL/Portugal e o equipamento COMET5 da empresa STEINBICHLER, e a análise dimensional foi realizada pelo emprego do software COMET Inspect 4.5 também da mesma empresa. (Figura 23)

O COMET5 é um sistema de digitalização por luz estruturada que combina desempenho e manuseio interativo, tornando-se uma solução para situações de grande exi-



Figura 23 Equipamento digitalizador COMET5 CDRsp/IPL.

gência dimensional na produção industrial, desenvolvimento de produto e requisitos de controle de qualidade. Este sistema utiliza uma única câmera e um projetor juntamente com uma fonte de luz branca. A combinação dessas e de outras características fornece ao sistema alta estabilidade dimensional, precisão e repetibilidade.

Anterior à digitalização ótica observou-se que no sistema CAD, a relação geométrica de concentricidade entre os componentes A e B, revelou-se impossível a sua permanência. Na remoção dos materiais de suporte, por menor que fossem as dimensões existentes, inevitavelmente haveria deslocamento de posicionamento do componente B, e na digitalização provocaria um erro na mesma proporção. (Figura 24)

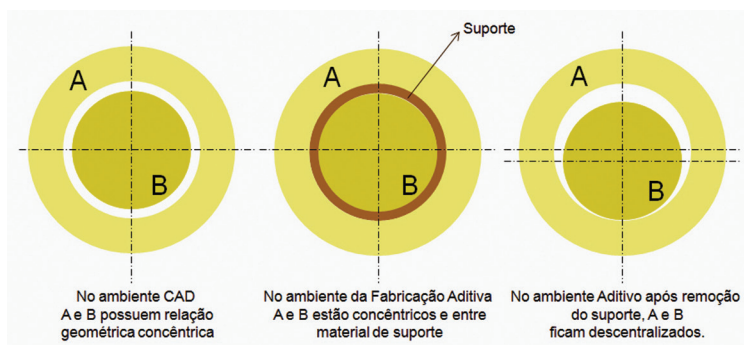


Figura 24 Vistas ilustrativas da descentralização dos componentes após a remoção dos suportes no ambiente montagem.

Para efeito de digitalização, necessário se fez fixar ambos os componentes (A e B) para que a captura das nuvens de pontos, se efetivassem adequadamente. Entretanto o componente denominado B, por ter-se deslocado, não foi objeto de análise pelo recurso de correspondência entre os modelos STL/CAD e STL/Digitalizado. Vale lembrar que além do recurso de análise por correspondência, são também disponibilizadas pelo respectivo software, outras formas de mensuração dimensional, que foram utilizadas nesta investigação.

Cada modelo físico exigiu procedimentos de digitalização rotativa em cinco movimentos de 72 graus, e a interpolação com outras digitalizações fixas, constituindo a nuvem triangular de pontos.(Figura 25)

Todos os modelos físicos apresentaram em suas superfícies algum brilho, não permitindo a captura adequada pelo sistema, assim foi necessária a aplicação muito discreta de spray próprio para este fim, favorecendo uma superfície apta para captura.

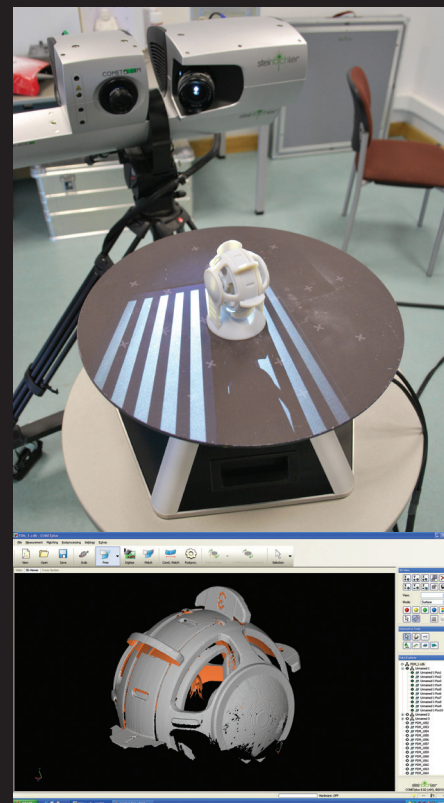


Figura 25 Equipamento e a mesa rotativa para a digitalização.

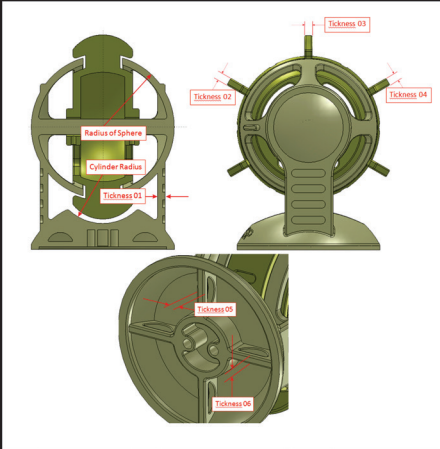


Figura 26 Vista ilustrativa indicando as construções analisadas.

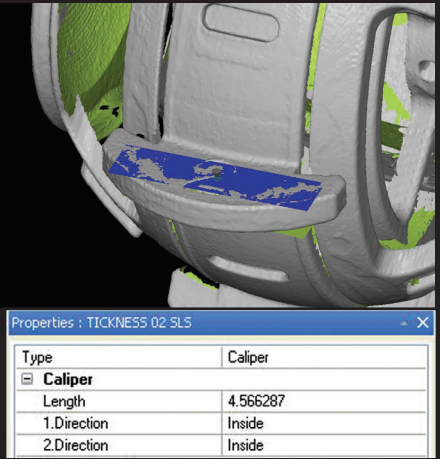


Figura 27 Exemplo de criação de planos na superfície STL/Actual e seu dimensionamento com o recurso Caliper. Modelo SLS.

Por se tratar de uma análise comparativa, desconsiderou-se o aumento dimensional decorrente da aplicação deste material, já que todos os modelos receberam tratamento idêntico.

AS ANÁLISES DIMENSIONAIS

Para a análise dimensional o software Inspect, necessita que seja importado no primeiro momento o arquivo CAD/STL denominado de Nominal, posteriormente é necessário a importação do arquivo STL/Digitalizado, agora denominado Actual.

A figura 26 indica as construções analisadas dimensionalmente, representam suficiente interpretação do comportamento das tecnologias no tocante aos seus sistemas de construção, na medida em que a forma do modelo se caracteriza simetricamente.

As construções denominadas por Tickness de 1 a 6 representam a dimensão linear das espessuras, e não foram obtidas por correspondência entre Nominal e Actual, mas pela inserção de pontos na malha STL/Actual formando planos colineares às superfícies, posteriormente esses planos gerados (superfície azul), foram dimensionados entre si pelo uso do recurso Caliper. (Figura 27)

Na figura 29, está demonstrada a análise do desvio obtida pela correspondência entre o modelo Nominal e Actual. O padrão cromático indica os desvios ocorridos no modelo Actual. Nessa correspondência o fator de escala utilizado, tanto para mais quanto para menos, foi de 0.8 mm, já que valores menores do que este, inicialmente definido em 0.3mm, apresentava na tecnologia SLS nenhuma indicação, ou seja, somente poucas áreas no modelo eram atingidas pela análise do desvio impossibilitando mensurar as diferenças importantes ocorridas.

	CAD/ SolidWorks	SLS	Polyjet	3D Zcorp	FDM
Tickness 01	4.500 mm	4.260 mm	4.561 mm	4.673 mm	4.487 mm
Tickness 02	4.500 mm	4.566 mm	4.671 mm	4.415 mm	4.498 mm
Tickness 03	4.500 mm	4.516 mm	4.561 mm	4.481 mm	4.477 mm
Tickness 04	4.500 mm	4.555 mm	4.681 mm	4.459 mm	4.470 mm
Tickness 05	3.750 mm	3.627 mm	3.856 mm	3.969 mm	3.759 mm
Tickness 06	3.750 mm	3.847 mm	3.937 mm	3.848 mm	3.817 mm

Figura 28 Quadro comparativo das Tickness indicadas na figura 26.

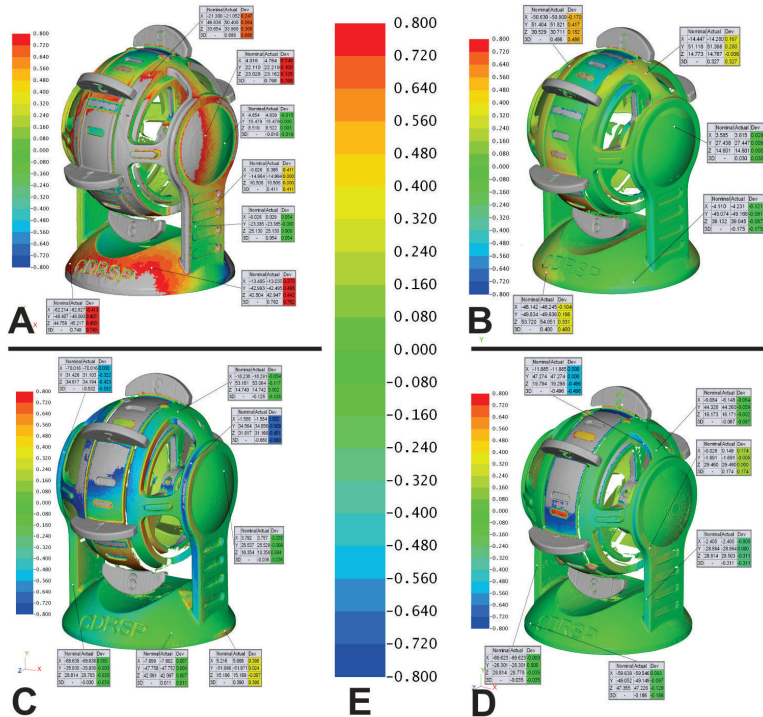


Figura 29 A= Vista do modelo SLS, B= Vista do modelo Polyjet, C= Vista do modelo 3D Printer ZCorp, D= Vista do modelo FDM, E= Legenda da escala dos desvios em milímetros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Importante observar que as diferentes tecnologias aditivas empregadas, estão representadas por equipamentos em versões não necessariamente atuais. Somente a tecnologia FDM empregou um modelo mais recente disponível, a Zcorp 450 já foi superada pelo modelo 650, o mesmo ocorre com o equipamento SLS e Polyjet utilizados que já possuem alguns anos de fabricação.

Analisando as informações resultantes da digitalização e o emprego do software Inspect em todos os modelos, a tecnologia FDM apresentou os menores desvios, seguida pela Polyjet, ZCorp e SLS. Esse desempenho superior pela FDM está demonstrado no quadro comparativo realizado (Figura 22), observa-se que não é a tecnologia de maior custo em termos de produção, e nem nos custos de material base e material de suporte

necessário. Por outro lado é crítico o tempo consumido para produção caracterizando baixa produtividade exigindo o máximo de ocupação da área de trabalho.

Embora a tecnologia FDM tenha apresentado o menor número de camadas (479) com espessuras de 178 μm , necessitou mais de 34 horas de processamento. O que leva a conclusão de ser a tecnologia menos veloz às analisadas, contudo superando o reduzido número de camadas, muito provavelmente, por um design construtivo mais eficiente quanto à forma de deposição do material base e suporte.

Este tempo de processamento poderia ter sido maior, já que algumas paredes/espessuras do modelo FDM foi aplicado colméias/vazios reduzindo o tempo de produção. Seus suportes são gerados diferentemente e em menor quantidade do que a tecnologia Polyjet por exemplo. Foi a segunda tecnologia a apresentar o menor índice de consumo energético.

A tecnologia Polyjet com 5988 camadas e espessura de 16 μm necessitou da metade do tempo gasto pela FDM, mas não o suficiente para apresentar resultados superiores a ela, o que é possível concluir a partir dos dados da análise dos desvios, existem concentração de calor e tensões, ainda que pouco expressivas, já que não foi possível a aplicação de colméias/vazios em suas paredes como aplicadas na SLS e em parte na FDM, resultando em paredes espessas podendo acarretar maiores tensões e empenamentos.

O sistema construtivo Polyjet com excessivo processamento no fatiamento de camadas e materiais empregados justifica de forma importante, o seu alto custo para produção de modelos.

Quanto à tecnologia Zcorp, a mesma apresentou o menor custo comercial entre todas, e o menor índice de consumo energético. Com o número de camadas de 812 e espessura de 100 μm , necessitou o menor tempo de processamento, cerca de 4 horas, tempo extremamente expressivo para o cenário da manufatura rápida.

Sem haver perda considerável da qualidade superficial e dimensional, constata-se que essa condição pode ser consequência, entre outras coisas, de ser o único processo que não envolve calor para constituição do modelo.

Entretanto o pós processamento aplicado nesta investigação, resultou num modelo com fragilidade peculiar que lhe impede ampla aplicação direta em sistemas de produtos. Apresenta também outro inconveniente, o razoável peso, contudo demonstra ser um processo com possibilidades muito adequadas para produção de masters para confecção de tipos de moldes destinados a pequenas séries. Nesta tecnologia o pós processamento utilizado consistiu exclusivamente no mergulho do modelo no elemento químico colante denominado Cianoacrilato.

A tecnologia SLS embora muito utilizada para aplicações industriais direta de seus modelos, não apresentou os melhores resultados. Foram observados visualmente em suas superfícies, irregulares em forma de escavações e depressões que se confirmaram na análise dos desvios. As irregularidades observadas, muito provavelmente, são decorrentes da concentração de calor e reaproveitamento do pó constituinte, o que leva necessariamente a correção das mesmas com aplicação de material de enchimento e posterior acabamento por lixamento, ambas manualmente.

Como nesse experimento, todos os modelos nas diversas tecnologias empregadas, não receberam nenhuma forma de acabamento, ficaram evidentes os desvios importantes no modelo SLS.

Investigações sobre o comportamento dimensional de modelos obtidos em tecnologias aditivas devem ser amplamente estudadas a permitir melhor compreensão sob os fenômenos no âmbito da montagem, principalmente o comportamento dos suportes existentes entre os componentes interferirem ou não, na precisão requerida.

Assim esta hipótese, não foi verificada, decorrente da perda da concentricidade rotativa entre os componentes. Portanto será sempre necessário que os componentes montados possuam complementos estruturais temporários unindo-os, permitindo assim o posicionamento idêntico aquele previsto no ambiente CAD. Posterior a digitalização ótica, os respectivos complementos temporários podem ser removidos sem comprometimento funcional do conjunto produzido.

E por fim, mas não menos importante, necessário disponibilizar os recursos aditivos de fabricação, a permitir que as metodologias e rotinas de projeto em design, compreendam e se beneficiem das suas vantagens, potencializando o design e inserindo-o no cenário da manufatura rápida com liberdade para enfrentar os desafios da atividade projetual, prospectados inevitavelmente em futuro próximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOFORADO, M. G. **Design Interativo: O Poder Comunicativo dos Protótipos**. In: 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2008, SENAC, São Paulo, Anais Eletrônicos. 2008, SENAC, São Paulo.
- BARBOSA, R. T. **Design e Prototipagem: Conhecimento e Uso da Prototipagem Rápida no Design Brasileiro**. 2009. 198p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Bauru, 2009.

- BÁRTOLO, P.J.; MATEUS, A. *O Estado da Arte dos Processos Aditivos de Prototipagem Rápida*. Portugal. Revista O MOLDE, 2002.
- CENTIMFE, *Centro Tecnológico da Indústria de Moldes e Ferramentas*. <http://www.cemtimfe.com>. Leiria-Portugal.
- CURTIS, Will. *Rapid Prototyping: Trully Functional Prototype*. March/April, 2006. Disponível em: <http://www.timecompress.com>
- DVORAK, P. *Best Practices for Using Rapid Prototypes*. *Machine Design*. In: *ProQuest Science Journals*, 2004. Disponível em <http://www.proquest.com> acesso em 02 de abril de 2010.
- GROSS, Mark; YI-LUEN DO, Ellen. *The Three R's of Drawing and Design Computation, First International Conference on Design Computing and Cognition*. Kluwer, at MIT, July 19-21, 2004.
- HAGUE, R.; MANSOUR,S.; SALEH, N. *Design Opportunities with Rapid Manufacturing*. *Assembly Automation*; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global pg.346.
- JÓIA FILHO, P. *Reconstrução e Geração de Malhas em Estruturas Biomecânicas Tridimensionais para Análise por Elementos Finitos*. 2008. 135f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Bauru, 2008.
- VOLPATO, N., FERREIRA, C. V., SANTOS, J. R. L. dos. *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
- VOLPATO, Néri. *Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações*. São Paulo. Edgard Blücher, 2007.
- SELHORST, A. Jr. *Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: um estudo de caso para a determinação do processo mais indicado*. 2008. 125f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.



FRANCISCO DE ALENCAR

É professor doutor da Faculdade de Arquitetura Artes e Comunicação da UNESP - Universidade Estadual Paulista, na cidade de Bauru/Brasil. Desenvolveu atividades de coordenação de curso e chefia no Departamento de Design, lecionando as cadeiras de Metodologia do Projeto, Metodologia Científica, Modelagem, Modelos e Protótipos Digitais, para o curso de Design. Professor credenciado junto ao programa de pós-graduação da UNESP/FAAC/Bauru. Nos últimos anos desenvolveu projetos de design de equipamentos industriais e médicos odontológicos. Desenvolve atualmente o estudo das metodologias do projeto no ensino do Design, e as interfaces entre as tecnologias de fabricação rápida e o desenvolvimento do produto. Concentra investigação nas tecnologias aditivas de fabricação para geração de modelos e protótipos nos mais distintos setores industriais. Desenvolveu Pós-Doutorado no CDRsp-Centro de Desenvolvimento Rápido Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria em Portugal, mensurando suas ações e investigando as tecnologias aditivas e digitalização ótica aplicadas na produção de protótipos, manufatura rápida, e engenharia reversa.

CO-AUTOR

Paulo Jorge Bártolo

É professor do IPL-Instituto Politécnico de Leiria/Portugal, e diretor do CDRsp-Centro de Desenvolvimento Rápido Sustentado de Produto do IPL.