

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS**

EDUARDO HENRIQUE DOS SANTOS

**LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE
COMPARATIVA ENTRE AS PRINCIPAIS FERRAMENTAS DE
PROTOTIPAGEM VIRTUAL E MANUFATURA ADITIVA
(PROTOTIPAGEM RÁPIDA) UTILIZADAS COMO APOIO AO
PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS COM
APRESENTAÇÃO DE ESTUDOS DE CASO**

**CURITIBA
2016**

EDUARDO HENRIQUE DOS SANTOS

**LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE
COMPARATIVA ENTRE AS PRINCIPAIS FERRAMENTAS DE
PROTOTIPAGEM VIRTUAL E MANUFATURA ADITIVA
(PROTOTIPAGEM RÁPIDA) UTILIZADAS COMO APOIO AO
PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS COM
APRESENTAÇÃO DE ESTUDOS DE CASO**

Monografia apresentada como requisito parcial
para obtenção de Conceito no Curso de
Especialização em Gestão de Desenvolvimento
de Produto, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná, Campus de Curitiba.

Orientador: Prof. Tiago Rodrigues Weller

**CURITIBA
2016**

RESUMO

Os projetos de produtos industriais necessitam cada vez mais da utilização de protótipos virtuais e protótipos rápidos, principalmente os projetos de produtos de lotes unitários e produtos que necessitam de ferramental de alto custo, desta forma, o conhecimento das ferramentas de análise de protótipos virtuais e prototipagem rápida são fundamentais para o projetista de máquinas e produtos. Este trabalho tem como objetivo apresentar as principais ferramentas para análise de protótipos virtuais, bem como mostrar as principais características de cada ferramenta e dos sistemas CAD/CAE/CAM, bem como as principais ferramentas de prototipagem rápida. Utilizando-se das informações levantadas será realizada uma comparação entre estas ferramentas e ao final são apresentados alguns estudos de caso dessas técnicas.

Palavra-chave: Protótipo Virtual; Prototipagem Rápida; CAD; CAE; Simulação.

ABSTRACT

Industrial product designs increasingly require the use of virtual prototyping and rapid prototyping, especially the product designs of unit lots and products that require expensive tooling, thus the knowledge of analysis tools of virtual prototypes and prototyping fast they are fundamental to the designer of machines and products. This paper aims to present the main tools for analysis of virtual prototypes, and show the main features of each tool and CAD / CAE / CAM systems as well as the main rapid prototyping tools. a comparison between these tools and the end are some case studies of these techniques using the information gathered will be held.

Keywords: Virtual Prototype; Rapid Prototype; CAD; CAE; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolução no uso de técnicas de prototipagem.....	10
Figura 2 - Comunicação entre sistemas CAx	15
Figura 3 Análise de Elementos Finitos	22
Figura 4 Análise aerodinâmica através de CFD	23
Figura 5 Análise cinemática de um trem de pouso com o uso de PV.	25
Figura 6 Fábrica virtual desenvolvida pela Ford.....	27
Figura 7 Simulação de disparo de airbag.....	28
Figura 8 Processo de fatiamento do modelo virtual.	31
Figura 9 Esquema de funcionamento do processo de SLA	34
Figura 10 Esquema de funcionamento do processo de LOM	35
Figura 11 Esquema de funcionamento do processo de SLS	36
Figura 12 Esquema de funcionamento do processo de FDM	37
Figura 13 Esquema de funcionamento do processo de SGC	37
Figura 14 Esquema de funcionamento do processo de MJT	38
Figura 15 Esquema de funcionamento do processo de LENS.....	39
Figura 16 Equipamento projetado pela empresa Atlas Copco Brasil Ltda.	40
Figura 17 Simulação do processo de injeção de um componente de refrigerador....	41
Figura 18 Simulação de crashtest virtual.	42
Figura 19 Models 3D CAD das duas concepções do lacre	43
Figura 20 Resultado de distribuição de pressão realizada em sistema CAE	44
Figura 21 Protótipo resultante da moldagem nos moldes SL	44
Figura 22 Modelo CAD simplificado	45
Figura 23 Simulação do deslocamento em sistema CAE.....	46
Figura 24 Simulação da pressão de injeção em sistema CAE	46
Figura 25 Teste do produto com auxílio de protótipos rápidos.....	47
Figura 26 Peças prototipadas do telefone.....	48
Figura 27 Torre de parafuso quebrada durante os testes de montagem	48
Figura 28 Produto original e seus protótipos.....	49
Figura 29 Visualização de cores do produto.	50
Figura 30 Produto com produtos de higiene.....	50
Figura 31 Modelo 3D do produto, projeto do molde e ensaio FEA.....	51
Figura 32 Modelo 3D do fecho e peças em RP.....	52
Figura 33 Exemplos de joias desenvolvidas com RP.....	53
Figura 34 Peças produzidas em RP	53
Figura 35 Montagem de conjunto de peças de RP	54
Figura 36 Análise FEA de componente mecânico	54
Figura 37 Peça de um carro com seu modelo CAD sobreposto.....	55
Figura 38 Frente virtual de uma van sobreposta sobre um modelo real.	55
Figura 39 Representação de um painel virtual dentro de um carro real.....	56
Figura 40 Prototipagem virtual e física de item de vestuário	57

LISTA DE SIGLAS

BPM	<i>Ballistic Particle Manufacturing</i> (Impressão por Jato de Tinta)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Auxiliada por Computador)
CAI	<i>Computer Aided Inspection</i> (Inspeção Auxiliada por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i> (Plano de Processo Auxiliado por Computador)
CAT	<i>Computer Aided Testing</i> (Testes Auxiliado por Computador)
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacionais
CIM	<i>Computer Integrate Manufacturing</i> (Manufatura Integrada por Computador)
CNC	Comando Numérico Controlado
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Deposição de Material Fundido)
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise de Elementos Finitos)
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i> (Conformação Próxima ao Formato Final via Laser)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Manufatura de Objetos em Lâminas)
MJT	<i>Multi Jet Modeling</i> (Impressão por Jato de Tinta)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
RP	Prototipagem Rápida
SGC	<i>Solid Ground Curing</i> (Cura Sólida na Base)
SLA	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
STL	Formato de arquivo STereoLithography
VP	Prototipagem Virtual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2 PROTOTIPAGEM	10
2.1 DEFINIÇÃO DE PROTOTIPAGEM VIRTUAL (VP) E PROTOTIPAGEM RÁPIDA (RP).....	11
2.2 MÉTODOS DE PROTOTIPAGEM	13
2.3 PROTOTIPAGEM VIRTUAL	13
2.3.1 FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE PROTÓTIPOS VIRTUAIS .17	
2.3.1.1 MODELOS PARA VISUALIZAÇÃO.....	18
2.3.1.2 VERIFICAÇÃO DE AJUSTES E INTERFERÊNCIA.....	19
2.3.1.3 TESTES E VERIFICAÇÕES DE FUNÇÕES E DESEMPENHO	19
2.3.1.4 ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS.....	20
2.3.1.5 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAIS (CFD)	22
2.3.1.6 A ANÁLISE DE MOVIMENTO.....	23
2.3.1.7 MANUFATURA VIRTUAL	25
2.3.1.8 ANÁLISE DO FATOR HUMANO.....	27
2.3.1.9 REALIDADE AUMENTADA.....	28
2.3.1.10 REALIDADE VIRTUAL.....	29
2.4 PROTOTIPAGEM RÁPIDA	29
2.4.1 ESTEREOLITOGRAFIA (SLA, <i>STEREOLITHOGRAPHY</i>).....	34
2.4.2 MANUFATURA DE OBJETOS EM LÂMINAS (LOM, <i>LAMINATED OBJECT MANUFACTURING</i>).....	34
2.4.3 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS, <i>SELECTIVE LASER SINTERING</i>).....	35
2.4.4 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (FDM, <i>FUSED DEPOSITION MODELING</i>).....	36
2.4.5 CURA SÓLIDA DA BASE (SGC, <i>SOLID GROUND CURING</i>).....	37
2.4.6 IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA (MJT, <i>MULTI JET MODELING</i> ; BPM, <i>BALLISTIC PARTICLE MANUFACTURING</i>)	38
2.4.7 CONFORMAÇÃO PRÓXIMA AO FORMATO FINAL VIA LASER (LENS, <i>LASER ENGINEERED NET SHAPING</i>)	38
3 ESTUDOS DE CASO.....	40
3.1 CASO 1: ATLAS COPCO BRASIL LTDA.....	40
3.2 CASO 2: WHIRPOOL ELETRODOMÉSTICOS	40
3.3 CASO 3: USO DE CRASHTEST VIRTUAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA...41	
3.4 CASO 4: PROJETO DE LACRE PARA CLIENTE DA CIMJECT	43
3.5 CASO 5: PROJETO DE PRENDEDOR DE ROUPA PELA CIMJECT	45
3.6 CASO 6: PROTOTIPAGEM DE UM TELEFONE	47
3.7 CASO 7: AVALIAÇÃO DE PV E PR DE PRODUTOS PELO USUÁRIO.....	49
3.8 CASO 8: PROTOTIPAGEM DE ORGANIZADOR MULTIUSO EMPILHÁVEL...50	
3.9 CASO 9: VP E RP DE UTENSÍLIO DE COZINHA	51
3.10 CASO 10: PROTOTIPAGEM DE FECHO CREMONA.....	52
3.11 CASO 11: PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA JOALHERIA	52
3.12 CASO 12: ANÁLISE DE MONTAGEM E INTERFERÊNCIA DE MECANISMO COM RP.....	53

3.13 CASO 13: REDUÇÃO DE MASSA COM A UTILIZAÇÃO DE FEA	54
3.14 CASO 14: REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	55
3.15 COMPARAÇÃO ENTRE PROTÓTIPOS VIRTUAIS E FÍSICOS NA INDÚSTRIA DO VESTUÁRIO	56
3.16 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASO E COMPARAÇÃO EM VP E RP.....	57
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Modelos e processos de desenvolvimento de produtos (PDP) têm se tornado uma unanimidade dentro das grandes indústrias, seja para desenvolvimento de produtos seriados ou de produtos de lotes unitários.

Uma das etapas desse processo é o Projeto Preliminar, podendo encontrar outras denominações dependendo da literatura, essa etapa consiste da elaboração de um modelo 3D do produto e dos desenhos para a fabricação, a grande importância dessa etapa é que nela o produto ganha forma, onde são realizados todos os cálculos dimensionais e definidas as formas, dimensões e integração dos componentes para posteriormente ser desenvolvido um protótipo do produto. Esse é o cenário ideal e normalmente acontece principalmente em produtos seriados, no entanto, muitas empresas trabalham com produtos de lotes unitários ou produtos que necessitam de ferramental para sua produção, como por exemplo, dispositivos de solda e usinagem, máquinas especiais e produtos injetados entre outros. Nesses casos não é possível o desenvolvimento de um protótipo físico idêntico ao projeto, pois o custo para fabricação do produto ou de seu ferramental é muito alto. No entanto, comumente, são desenvolvidos modelos 3D desses produtos através de softwares de modelagem, 3D CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*), os quais podem ser considerados protótipos virtuais (VP), ou então esses modelos 3D são utilizados para fabricação de peças utilizando técnicas de prototipagem rápida (RP). Esses VP e RP podem ser avaliados e testados, simulando a utilização real de modo a garantir o sucesso de projeto.

A modelagem virtual faz parte da rotina do PDP, no entanto um modelo 3D não garante o sucesso do produto, se faz necessário uma análise criteriosa do modelo para garantir que o produto não possua falhas (DA SILVA, 2013). Conhecer as ferramentas de análise de modelos 3D facilita o trabalho do projetista, pois garante uma rotina de avaliação, buscando prever possíveis falhas no desenvolvimento do produto antes da sua produção.

Além de conhecer as ferramentas de VP, o projetista deve estar atento a crescente utilização de RP para o desenvolvimento de produtos. Conhecer essa

tecnologia e saber escolher a melhor maneira de produzir RP é fundamental para o bom desenvolvimento do projeto.

Cabe ressaltar que este trabalho abordará somente os métodos de prototipagem rápida (RP) pelo método aditivo onde camadas de material são sobrepostas de forma a criar o objeto físico e a prototipagem virtual (VP) onde os protótipos são criados com o uso de ferramentas computacionais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Levantar o estado da arte entre as principais ferramentas de prototipagem virtual e manufatura aditiva (prototipagem rápida) utilizadas como apoio ao processo de desenvolvimento de produtos com apresentação de estudos de caso.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar pesquisa literária sobre prototipagem virtual;
- Realizar pesquisa literária sobre prototipagem rápida;
- Apresentar estudos de caso sobre prototipagem virtual e prototipagem rápida;
- Realizar uma análise comparativa entre o uso de prototipagem rápida e prototipagem virtual.

2 PROTOTIPAGEM

O termo protótipo é utilizado para denominar um produto que está em desenvolvimento. Um protótipo pode ser utilizado para avaliação de forma, ergonomia, funcionamento e processo de fabricação para qualquer tipo de produto.

A realização da prototipagem é imprescindível no processo de desenvolvimento de produto, pois permite realizar análises antes da confecção do ferramental definitivo. Chua *et al.* (1999) descreve que a prototipagem física de produtos é realizada desde a antiguidade com a construção manual de modelos, passando para protótipos virtuais nos anos 70 a partir do uso de sistemas CAD 3D, e mais recentemente com os protótipos rápidos como mostra a figura 1.

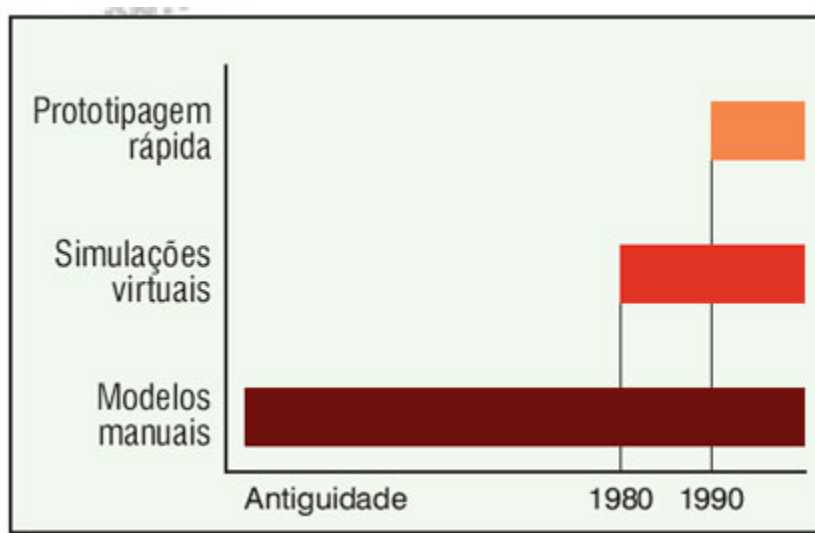


Figura 1 Evolução no uso de técnicas de prototipagem
Fonte: adaptado de Chua *et al.* (1999)

Os protótipos podem ser divididos em físicos e virtuais. Protótipos físicos são objetos tangíveis de forma que possibilitam avaliar aspectos como ergonomia e estabilidade, enquanto os protótipos virtuais representam o produto de maneira intangível. Estes são aplicados em situações nas quais a prototipagem física é impraticável, impossível ou ineficiente (GRIMM, 2004).

Os fins para os quais são utilizados protótipos são inúmeros, independentemente de o protótipo ser físico ou virtual. Em geral, os protótipos são

necessários para três propósitos principais: comunicação, desenvolvimento do design e testes de verificação. Baxter (1995) classifica os protótipos desenvolvidos durante o processo de design em três categorias:

- protótipos estruturais (principalmente utilizados para avaliar forma, aparência e ajustes);
- protótipos funcionais para verificação do funcionamento;
- protótipos estruturais e funcionais criados para examinar potenciais problemas de pré-produção e produção.

Já a VDI 3404 (2009) caracteriza os protótipos como: protótipo conceitual; protótipo geométrico; protótipo funcional; protótipo técnico e protótipo final.

Os protótipos conceituais são a primeira idealização do conceito do produto ou da fabricação.

Os protótipos geométricos são aplicados na avaliação do tamanho, na forma, na avaliação das sensações provocadas pelo tato com o produto e/ou com a fabricação.

Já os protótipos funcionais incorporam as funções definidas do produto, nesse tipo de protótipo algumas ou todas as funções podem ser testadas e a geometria pode ser diferente da forma final do produto.

Os protótipos técnicos não diferem significativamente do produto, contudo, a tecnologia utilizada para a fabricação do produto pode variar comparada com a utilizada na produção final.

Por fim, os protótipos finais são utilizados para um propósito determinado, por exemplo, na fabricação de pequenos lotes do produto, utiliza os materiais e o ferramental final de produção. Em alguns casos pode ainda ser comercializado.

2.1 DEFINIÇÃO DE PROTOTIPAGEM VIRTUAL (VP) E PROTOTIPAGEM RÁPIDA (RP)

Segundo Chua *et al.* (1999) RP é um termo amplamente utilizado na engenharia para caracterizar a construção de protótipos físicos, utilizando modelos digitais tridimensionais através de processos que se utilizam da sobreposição de camadas de qualquer material, como por exemplo, utilizando um pó ou líquido num período de tempo curto, quando comparado aos métodos de usinagem por remoção

"tradicionais". Esta tecnologia também foi por diversas vezes referida como manufatura aditiva, fabricação por depósito de material, fabricação por adição de material, fabricação de forma livre sólida e impressão tridimensional. Desde suas primeiras aplicações o termo Prototipagem Rápida é associado a economia de tempo, a não utilização da mão de obra humana ou de qualquer ferramenta para criar o protótipo.

Segundo Saura (2003) o termo "rápido" é relativo, variando muito entre as diversas tecnologias existentes no mercado, podendo o protótipo levar de minutos até muitas horas para ser construído, dependendo do equipamento, tecnologia e software utilizado. Quando comparados aos métodos tradicionais de produção, os novos métodos garantem ganhos em termos de tempo de produção, contando em alguns casos de baixa tiragem com a possibilidade de serem utilizados como produtos finais.

Chua *et al.* (1999) define VP como sendo a criação de um modelo em computador, muitas vezes referida como CAD / CAM / CAE. Prototipagem virtual ou computacional é geralmente entendida como sendo a construção de modelos computacionais para fins de simulação numérica.

No entanto, existem algumas áreas das ciências que utilizam esta tecnologia onde a diferenciação entre os sistemas não fica tão clara. Partindo do princípio que a RP depende dos modelos 3D para gerar o protótipo, parece que a RP é um processo posterior da VP no produto ou no ciclo de desenvolvimento de peças. Como de fato o termo VP é usado amplamente na engenharia, Chua *et al.* (1999) julga ser necessário definir claramente ambos os termos:

Prototipagem rápida é a produção de um modelo físico a partir de um modelo computacional 3D sem a necessidade de uso de qualquer dispositivo de fixação ou de programação CNC como nos processos tradicionais de usinagem de materiais.

Da mesma forma, VP é definida como a manipulação de um modelo CAD 3D usado como um substituto para um protótipo físico para os fins de simulação e análise, não incluindo a etapa de construção do modelo 3D. VP inclui as seguintes funções:

1. Análise de elementos finitos.
2. Forma mecânica, ajuste e verificação de interferências.

3. Simulação mecânica.
4. Aplicações de realidade virtual.
5. Modelagem cosmética.
6. Análise de montabilidade.

Os protótipos virtuais geralmente apresentam maior facilidade para ajustes do que os protótipos físicos, pois permitem que as alterações sejam efetuadas rapidamente e com menor custo. As alterações em protótipos físicos necessitam da execução de um novo protótipo, o que normalmente é mais caro e demorado. Na prática do desenvolvimento de produtos a VP antecede a RP, mas não necessariamente a elimina, sendo que ocorre uma complementaridade entre ambas.

2.2 MÉTODOS DE PROTOTIPAGEM

Na prototipagem tradicional os materiais de confecção de protótipos reais tais como madeira, argila, espuma ou metal são usados frequentemente para fazer protótipos físicos, embora eles não possuam necessariamente as mesmas propriedades que o produto acabado deverá possuir. Estes protótipos podem ser classificados em quatro grandes grupos de acordo com a tecnologia e técnicas empregadas na sua fabricação:

- 1 - Prototipagem virtual (VP)
- 2 - Prototipagem rápida por deposição de material (RP)
- 3 - Prototipagem rápida por subtração de material (SRP)
- 4 - Protótipos híbridos a partir da deposição e remoção de material

2.3 PROTOTIPAGEM VIRTUAL

A utilização de protótipos virtuais tem se mostrado uma das mais eficazes ferramentas no desenvolvimento de produto, possibilitando uma melhoria significativa no processo (DE SORDI, 2006).

Os VP são criados através de geometrias tridimensionais, cores e texturas de superfícies geradas por sistemas computadorizados integrando o ser humano com o sistema (ZORRIASSATINE, *et al.*, 2003; BERNARD, 2005; CECIL; KANCHANAPIBOON, 2007)

Segundo Zorriassatine *et al.* (2003) a disponibilidade e acessibilidade de tecnologias avançadas de computação liberam o caminho para uma utilização cada vez maior de protótipos digitais, ao invés de físicos. Segundo Black (1998) os protótipos são utilizados para três finalidades principais: visualização do produto, desenvolvimento de desenhos e testes do produto.

O VP oferece recursos inovadores que qualificam todo o processo produtivo e geram significativa redução de tempo e custo (FORTI, 2005).

Para Souza (2009) os processos produtivos de produtos podem ser auxiliados por diferentes sistemas CAx. Destacando-se:

CAD (*Computer Aided Design/Drafting*). Softwares para auxílio de desenhos, modelos 3D e desing industrial.

CAE (*Computer Aided Engineering*). Softwares para auxílio de simulação de solicitações mecânicas.

CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Softwares para auxílio da fabricação.

CAI (*Computer Aided Inspection*). Softwares para auxílio de inspeção dimensional.

CAPP (*Computer Aided Process Planning*). Softwares para auxílio do planejamento de produção.

CAT (*Computer Aided Testing*). Softwares para auxílio de testes.

Ainda segundo Souza (2009) a integração dos diversos sistemas CAx possibilitam a *Computer Integrate Manufacturing* (CIM).

A Figura 2 mostra o modelo de CIM descrito por Souza (2003) onde o sistema CAD fica no centro do processo e é responsável pela integração dos sistemas CAx.

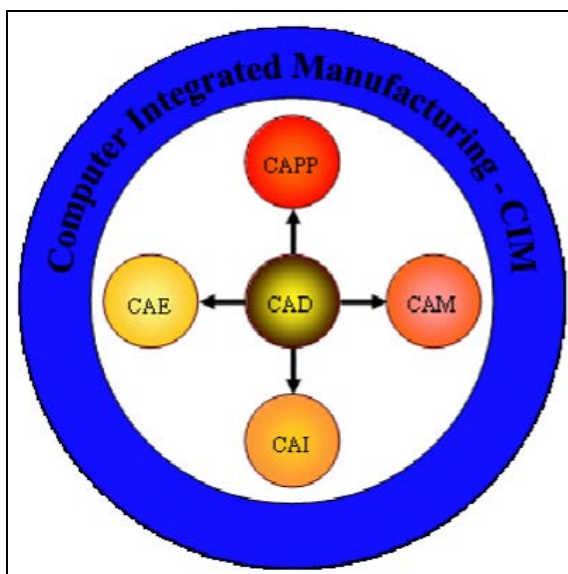


Figura 2 - Comunicação entre sistemas CAx
Fonte: Souza (2003)

Os sistemas CAD/CAE apresentam a maior evolução; mais ampla e diferentes capacidades de análises, fundamentais para a prototipagem virtual, possibilitando análises térmicas, de tensão, de fluxo de material, de montagem entre outros. (ROZENFELD *et al*, 2006).

Segundo Rozenfeld *et al*, (2006) o desenvolvimento de um modelo 3D pode ser avaliado de forma qualitativa, analítica ou experimental. As avaliações analíticas utilizam equações e regras para analisar o desempenho do produto quando submetido a situações específicas, já a avaliação qualitativa é feita por um grupo multidisciplinar que realiza uma análise de falhas potenciais do produto, por fim, a avaliação experimental estuda o comportamento do produto, nesse caso a utilização de sistemas CAT são fundamentais. A VP inclui as seguintes funções:

1. Análise de elementos finitos.
2. Forma mecânica, ajuste e verificação de interferências.
3. Simulação mecânica.
4. Aplicações de realidade virtual.
5. Modelagem cosmética.
6. Análise de montabilidade.

VP vem sendo desenvolvida constantemente desde a década de 1970. Ela fornece a capacidade para testar o comportamento de um componente ou produto

utilizando um contexto simulado sem a necessidade de fabricar a peça primeiro (CHUA *et al*, 1999).

Segundo Muller e Saffaro (2011) os benefícios da prototipagem virtual apresentados na literatura são:

- Inovação: a inovação é incentivada a medida que os experimentos realizados com recursos disponíveis podem reduzir o custo e tempo de desenvolvimento;
- Aprendizagem: os protótipos tornam-se formas de aprendizagem na medida em que são utilizados para responder as questões técnicas e funcionais do produto;
- Comunicação e colaboração: o uso da VP facilita o intercâmbio de dados e consequente colaboração entre os envolvidos no projeto. Dessa forma, uma equipe multidisciplinar de projeto composta por pessoas com diferentes conhecimentos técnicos, como clientes, usuários e projetistas, podem interagir durante o desenvolvimento;
- Visualização e compreensão: o uso de tecnologias 3D aumenta a capacidade de visualização dos protótipos virtuais permitindo analisar a forma, estética, folgas e requisitos de montagem de maneira mais clara. A facilidade de visualização pode levar a minimização de modificações de projeto, pois permite que todos os atores envolvidos no desenvolvimento tenham uma fácil compreensão das diferentes soluções possíveis e suas implicações;
- Integração: a VP permite detectar interferências geométricas, falhas de projeto ou conflitos entre partes do produto, evitando que esses erros sejam descobertos tardiamente já no momento da fabricação (NETO e VOLPATO, 2006);
- Gerenciamento das informações: os protótipos virtuais devem ser usados como meio de extração, registro, troca de dados, controle, retroalimentação e reutilização das informações geradas no processo do PDP;
- Testes, simulações, análises e avaliações: os protótipos virtuais permitem analisar diferentes soluções para o produto que podem envolver a análise de propriedades físicas, mecânicas, térmicas e elétricas. Além disso, podem ser efetuados testes funcionais, testes de forma e encaixe, testes ergonômicos, testes de montagem/desmontagem e análises de operação e manutenção (OLIVEIRA,

2001). Os protótipos virtuais também possibilitam a execução de testes impossíveis ou inviáveis de serem realizados com protótipos físicos, devido ao custo elevado ou ao risco à vida (FORTI, 2005);

- Flexibilidade, redução do tempo e custos do PDP: em um ambiente de desenvolvimento de produto rápido e com mudanças repentinas, o protótipo virtual pode ser mais prático e eficiente, oferecendo maior liberdade de criação e exploração de diferentes concepções com baixo ou nenhum custo adicional reduzindo a necessidade de protótipos físicos;

- Incremento da qualidade: a melhora da qualidade do produto ocorre a partir do momento em que existe a possibilidade de se detectar erros nas etapas iniciais do projeto, investigar diferentes soluções e facilitar a customização do produto segundo as necessidades do cliente.

Apesar da grande quantidade de benefícios da crescente utilização nos processos de desenvolvimento de produto, a aplicação da VP ainda possui algumas limitações como a seguir:

- Questões culturais: relutância de algumas empresas em inovar, eliminando os protótipos físicos devido à crença de que produzir um modelo em 3D é mais caro e demorado;

- Custo: a aquisição de equipamentos, softwares e treinamento aumenta investimento nos estágios preliminares do processo de desenvolvimento do produto para melhorar a qualidade, produtividade e redução de perdas.

- Questões técnicas: incapacidade de simular determinadas condições específicas ou condições de contorno complexas.

- Tátil: ausência do contato tátil com o produto, por exemplo para avaliar ergonomia.

2.3.1 FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE PROTÓTIPOS VIRTUAIS

O poder da computação e sofisticação dos métodos computacionais, bem como os modelos de fenômenos físicos e a capacidade para o transporte de resultados entre vários modelos estão crescendo de modo muito rápido, desta forma, otimizando o alcance das aplicações, robustez, precisão, realismo e custo da

tecnologia de VP. Atualmente, existe uma grande quantidade de softwares para simulação que são ou podem ser incorporados aos sistemas CAD. Outros exemplos comuns de VP incluem animações geradas digitalmente de mecanismos, análise de elementos finitos (FEA) comumente utilizando sistemas CAE e dinâmica computacional dos fluidos.

Segundo Zorriassatine *et al*, (2003) uma das maneiras de determinar as diferentes classes de ferramentas de prototipagem virtual é analisar os produtos comercialmente disponíveis. As principais categorias de ferramentas de VP em oferta no mercado dizem respeito a:

- Projeto mecânico: elaboração de desenhos e modelos 2D/3D;
- Projeto da forma e estilo: para abordar formas inovadoras e formas complexas, tais como curvas de forma livre;
- Soluções de análise e simulação: análise de esforço, otimização do projeto em termos de massa, simulação cinemática e dinâmica.

2.3.1.1 MODELOS PARA VISUALIZAÇÃO

Para Da Silva (2013) os sistemas CAD geram modelos que são utilizados para definição e verificação da geometria de componentes mecânicos, de uma estrutura, de um layout, entre outros itens do projeto do produto e do processo de fabricação. Para Lee (1999) a geometria tem um papel fundamental nas atividades subsequentes do processo de desenvolvimento de produto, pois estes modelos facilitam a transferência de informações entre diferentes usuários, incluindo pessoas de marketing, clientes, gerentes, equipes de desenvolvimento e engenharia. O aspecto visual também serve como um fator de atração.

Segundo Chua *et al.*, (2003) os modelos CAD tridimensionais, que formam o centro da PV, descendem da tecnologia CAD 2D. A partir da década de 70, com a disponibilidade de curvas tridimensionais e modelos de superfície, tornou-se possível adicionar mais detalhes, forma e complexidade nos protótipos digitais, permitindo cada vez mais realismo e complexidade com a computação gráfica. Os softwares CAD comerciais utilizam modelos sólidos tridimensionais para fornecer imagens realistas de fotos ou animações que satisfazem todos os requisitos de aparência.

Percepção visual e apelo podem ser avaliados por modelos digitais com uma variedade de formas sobre o layout do produto, descrevendo os componentes gerais de produtos e subconjuntos, suas cores associadas e texturas de superfície e acabamentos.

2.3.1.2 VERIFICAÇÃO DE AJUSTES E INTERFERÊNCIA

De acordo com Zorriassatine *et al.* (2003) em qualquer sistema mecânico deve estar claro onde e como cada peça e subconjunto se ajusta com os demais componentes. Sendo assim, as tolerâncias dimensionais devem ser incluídas nos modelos. Estudos de ajustes e montagem contribuem na redução do retrabalho e também no descarte de produtos por problemas de montagem. Para Terreo (2007) esses modelos são chamados de protótipo de prova de produto, nos quais se enquadram os modelos desenvolvidos para verificação de folgas, interferências e acesso de ferramentas. A inspeção visual de um conjunto tridimensional digital pode ser realizada por uma série de ferramentas disponíveis nos softwares CAD, como por exemplo uma visualização dinâmica. Também é possível analisar a capacidade de deslize ou o acoplamento de peças em cada nível de valores dimensionais, dentro das zonas de tolerância. Usando novas ferramentas, tais como detecção de interferência dinâmica, a animação de mecanismos deslizantes deixará em destaque quaisquer áreas de interferência, permitindo identificar previamente possíveis problemas.

2.3.1.3 TESTES E VERIFICAÇÕES DE FUNÇÕES E DESEMPENHO

Protótipos são usados com frequência para verificar a funcionalidade e o desempenho de várias características de um novo produto durante a sua fase de desenvolvimento. Os modelos sólidos precisam ser completos, abrangendo detalhamentos geométricos (centro de gravidade, superfície, volume...) e não geométricos (propriedades como densidade, rigidez, entre outras). Os resultados dos testes dependem destas informações, portanto em alguns casos é importante alimentar o sistema com dados de testes físicos realizados anteriormente, fornecendo mais confiança sobre os resultados. Portanto, um híbrido de dados reais

e simulados podem ser uma alternativa mais eficaz. Segundo Terra (2007) esses modelos geram as informações básicas para a Análise de Elementos Finitos (FEA)

2.3.1.4 ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Zorriassatine *et al.* (2003) a análise de elemento finito (FEA) é a mais aceita e amplamente utilizada ferramenta VP. Ela calcula as relações entre as propriedades dos materiais e do desempenho estrutural para simular e prever o comportamento de uma estrutura com relação aos esforços às quais será submetida. Usando software FEA durante o projeto e o desenvolvimento de sistemas estruturais complexos e sua análise detalhada pode ser realizada com nenhum ou muito poucos protótipos físicos antes da produção. Segundo Da Silva (2013) o processo de formulação, análise e solução do problema de engenharia, passa pela transformação de um modelo físico em um modelo matemático capaz de representar, parâmetros e termos forçantes, o comportamento e as características deste modelo físico. Sem a utilização de FEA os desenvolvimentos dos conjuntos devem ser baseados em cálculos manuais, onde as hipóteses simplificadoras podem levar a projetos conservadores e pesados, qualquer alteração substancial em projetos será arriscada e projetos exigirão construção de protótipos para testes não destrutivos e destrutivos primeiro, o que pode também envolver aplicação de sistemas de coleta de dados como sensores de deformação.

As principais aplicações de FEA compreendem as seguintes áreas:

- Análise estrutural: fadiga sob várias condições de carga, análise de rigidez estática e dinâmica e transitória e análise de vibração;
- A análise acústica: prever e evitar problemas acústicos, como por exemplo, a eliminação do ruído gerado por engrenagens na transmissão de um automóvel;
- Análise dos fenômenos elétricos e magnéticos, entre outros.

Segundo Zorriassatine *et al.* (2003) a ferramenta de FEA realiza a solução de um conjunto de elementos finitos através do uso de equações algébricas, o que permite realizar aproximações entre a situação real e a virtual. Chapra e Canale (2008) definem FEA como sendo a transformação do modelo físico em um modelo lógico dividido em regiões ou elementos. Para cada elemento, uma solução das

equações é desenvolvida e a solução total para o modelo é obtida pela união de todas as soluções individuais, com cuidado para garantir a continuidade das soluções nas fronteiras entre os elementos. Os exemplos mais simples são vigas e chapas triangulares. Sistema mais completos de FEA permitem a simulação de deformações plásticas e outros fenômenos não-lineares aplicadas para a simulação de fenômenos como a conformação de metais, acidentes e análise de impacto.

Geralmente, um sistema FEA requer três módulos (ZORRIASSATINE *et al.*, 2003):

- Um modelador de elementos finitos (também conhecido como gerador de malha ou pré-processador). Ele gera uma malha de elementos de forma totalmente automática, ou manualmente usando um híbrido dos dois.
- Algoritmo de cálculos (*solvers*) de elementos finitos. São os motores da FEA utilizando os elementos gerados, condições de contorno e cargas como entrada, a fim de produzir uma solução contendo todas as informações necessárias para analisar e entender os resultados. Agentes de resolução podem ser divididos em duas categorias: linear e não-linear. A análise linear é diferenciada porque assume que as condições de contorno e propriedades dos materiais não se alteram durante a simulação.
- Pós-processadores ou visualizadores. Estes módulos utilizam os dados gerados pelo *solver* para criar gráficos e relatórios que possam ser facilmente compreendidos.

Embora as ferramentas de software FEA melhorem continuamente, é importante estar ciente de alguns dos problemas de seu uso:

- Normalmente são desenvolvidos para analisar materiais homogêneos, de forma que a análise de materiais não homogêneos ou multifases exige grande entrada de dados e experiência do usuário.
- Avaliação de falhas são altamente dependentes da habilidade do usuário e seus conhecimentos para realizar modificação no protótipo virtual.
- A eficácia e o custo do FEA dependem fortemente da geração da malha e da supervisão humana necessária no processo.

- É fortemente dependente da malha do processo, uma vez que a grande maioria do tempo humano envolvido na FEA pode ser passado sobre a criação de um modelo adequado para a análise.
- A geração da malha nem sempre é livre de erros, de maneira que se pode necessitar de intervenção humana para repará-los.
- A geração da malha pode consumir muito tempo no caso de elementos de grandes dimensões ou geometrias muito complexas.
- O poder computacional do sistema de informática deve ser elevado, de forma a agilizar o processo, tornando os equipamentos caros.

Como exemplificação de análise de elementos finitos realizada na indústria, a figura 3 apresenta um conjunto mecânico, onde através da representação visual se pode observar as áreas com concentração de tensões e propícias a falhas por fadiga. Dessa forma o projeto de estruturas é facilitado, acarretando uma maior precisão nos cálculos, otimização do processo de produção e melhoria da qualidade.

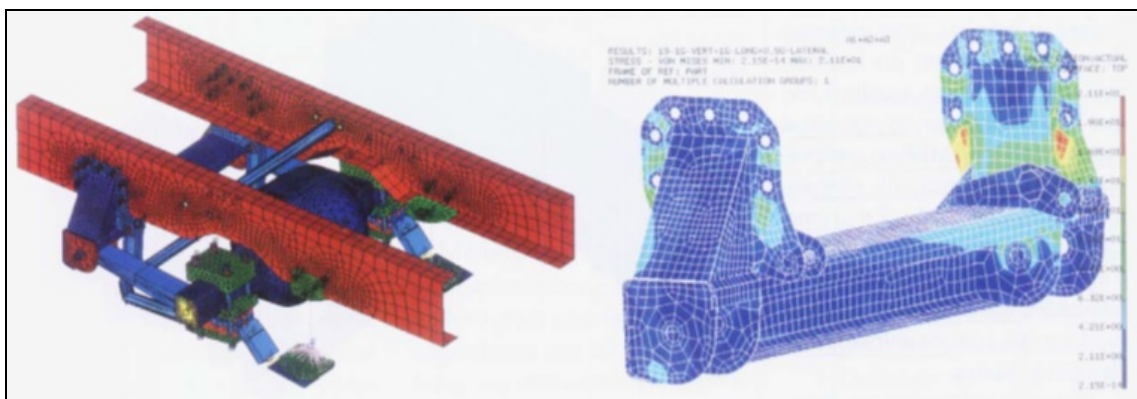


Figura 3 Análise de Elementos Finitos
Fonte: FILHO e MÜLLER (2003).

2.3.1.5 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAIS (CFD)

A CFD foi desenvolvida inicialmente para as indústrias automotiva, aeroespacial e nuclear e como uma ferramenta de VP para simular fluxos e/ou transferência de calor nos fluídos (líquidos e gasosos) e nos sólidos (homogêneos ou porosos).

A tecnologia de CFD consegue através de equações como a conservação da massa e energia, para dadas situações de contorno, realizar uma simulação

numérica do comportamento dos fluidos no que tange ao escoamento, pressão, temperatura, transferência de calor, etc.

Em geral, usando-se CFD permite-se que o projeto seja funcionalmente correto em mais aspectos do que apenas no domínio mecânico. O uso da CFD é uma forma eficaz, rápida e de baixo custo aplicada na descoberta de fenômenos dos fluidos ou transferência de calor sem depender somente de experimentos físicos.

Algumas das carências CFD incluem:

- A necessidade de reduzir o número total de graus de liberdade de turbulência, quando representando sistemas muito complexos (como na simulação de aviões e navios);
- Outro ponto, são as condições de contorno muito complexas, como as simulações de fluido multi-fases ou que sofrem mudanças de fases durante o uso, situação na qual o sistema tem que ser bastante simplificado, aumentando a chance de erro na simulação.

A figura 4 apresenta um exemplo de aplicação de CFD na indústria automobilística:

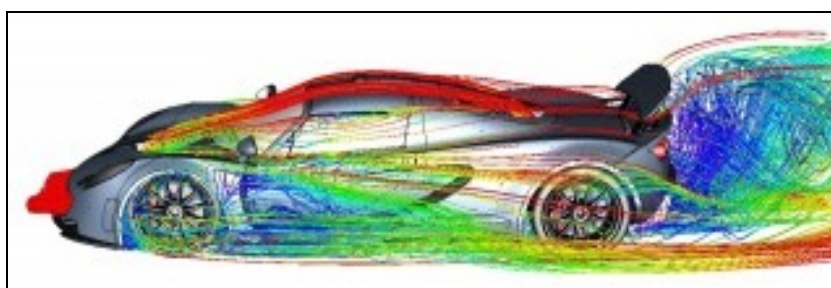


Figura 4 Análise aerodinâmica através de CFD

Fonte: John Hennessey, disponível em <http://lotusenthusiast.net/2009/09/hennessey-venom-gt-cfd-renderings.html>

2.3.1.6 A ANÁLISE DE MOVIMENTO

Zorriassatine *et al.* (2003) cita que as análises dos movimentos em qualquer montagem mecânica podem ser modeladas, avaliadas e otimizadas em duas ou três dimensões. Os resultados podem ser gravados utilizando ferramentas de animação e reproduzidos posteriormente.

Os dois principais tipos de simulação de movimento são:

- **Análise cinemática:** o objetivo principal é verificar se a geometria modelada permite os movimentos previstos para o projeto. Velocidade, aceleração, posição, deslocamento e rotação são determinadas sem considerar a massa ou propriedades de força. Permite, também, a identificação de possíveis interferências e colisões entre os vários componentes de uma montagem. Pode ser utilizada durante a análise de tolerância para proporcionar a integração com testes de necessidade de espaço, o que de outro modo só pode ser conseguida através de protótipos físicos caros.
- **Análise dinâmica:** a principal diferença é que esta considera além dos movimentos, tanto a massa como as forças (de gravidade, resistência e eletrostáticas) associados aos elementos constitutivos de uma montagem. Assim, podem ser obtidas informações detalhadas como a potência necessária para impulsionar um mecanismo, a rigidez, a carga segura de operação e outras.

O método utilizado para a simulação é o numérico através da resolução de equações diferenciais que descrevem o movimento de sistemas mecânicos. O problema FEA é subdividido em pequenos intervalos de tempo discretos, onde a solução é obtida em cada passo temporal. Quanto menor o passo de tempo, mais preciso e mais lento, o cálculo do movimento se tornará. Combinando a capacidade de simulação de movimento dinâmico, com FEA e outras ferramentas de PV obtém-se simulações de carregamento dinâmico que fornecem comportamento estrutural (tais como o stress, a vibração e ruído), a deformação geométrica e detecção de falhas. As aplicações típicas em design automotivo incluem o projeto de suspensão, a análise dinâmica do veículo, os estudos de frenagem, a previsão do comportamento do chassi em aceleração, avaliação da durabilidade, concepção corrente de distribuição e simulação de *crash tests*, entre outras aplicações.

A figura 5 apresenta um exemplo de análise cinemática de um trem de pouso com o uso de VP:

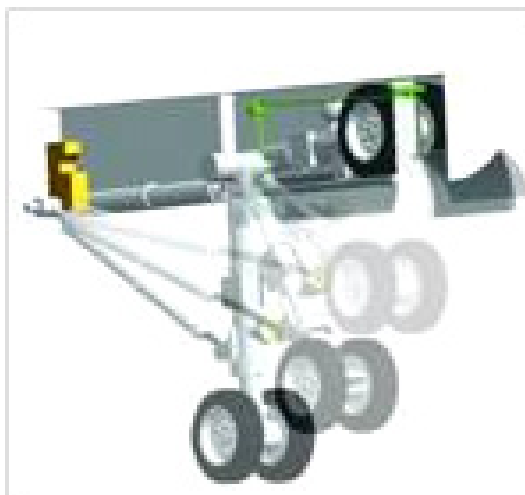


Figura 5 Análise cinemática de um trem de pouso com o uso de PV.
Fonte: Solid Edge Classic (UGS). Disponível em http://www.cadtresd.pt/solid_edge.htm.

2.3.1.7 MANUFATURA VIRTUAL

A prototipagem virtual visa permitir a exploração simultânea do produto e colaboração por várias equipes de engenharia. Avaliação do protótipo deve incluir a previsão e simulação de processos de fabricação e planejamento de produção, tanto durante o projeto conceitual, quando os dados ainda são incompletos, e durante as fases posteriores, quando ele já amadureceu após várias interações. A factibilidade é uma condição que deve ser satisfeita antes de um projeto ser validado. A falta de qualquer protótipo na fase de fabricação aumenta os riscos de se ter que realizar mudanças no projeto logo após a construção das ferramentas e outros equipamentos de produção.

Planejamento de processos envolve a seleção do tipo e da sequência das operações de fabricação que são necessárias para criar um componente de forma eficiente. Uma vez que o desenho do produto é definido, entra em ação o planejamento do processo de produção para identificar a melhor sequência e tipos de processos de fabricação, de forma que utilizem os materiais mais adequados possibilitando uma manufatura com o menor custo possível. Zorriassatine *et al.* (2003) relata que o uso da VP no projeto permite por meio de captura e utilização da

informação gerada durante a fase de elaboração, que os dados de planejamento da produção sejam gerados de forma automática.

As ferramentas de VP podem auxiliar na montagem principalmente das seguintes maneiras:

1. Geração do plano de montagem. O método de montagem como alimentação, forma de pegar, orientação e inserção de todos os elementos podem ser determinados com o uso de protótipos virtuais. Dessa forma pode-se estabelecer a ordem das operações através das quais os componentes e subconjuntos podem ser montados.

2. Desenho do sistema de montagem. Facilidade de manutenção, qualidade, verificações de controle, *layout* do posto de trabalho nas diversas fases de montagem são avaliados e contribuem para a geração de um plano de montagem.

Dessa forma, usando CAD e Realidade Virtual (VR), operações de montagem envolvendo o uso de software podem auxiliar nos testes de montagem ou desmontagem de produto, incluindo até mesmo situações onde pode-se definir o esforço realizado pelo operador para encaixar determinada peça. Mesmo com toda a capacidade existente de ferramentas de VP comerciais para simulação de montagem e desmontagem, não se garante necessariamente que a operação seja bem-sucedida, ou seja, também depende de um engenheiro com muita experiência nesta operação para determinar se os resultados das simulações são factíveis.

O uso da VP de sistemas de manufatura pode auxiliar ainda na gestão, pois pode-se gerar sistemas virtuais completos. Um dos objetivos durante a fase de concepção e desenvolvimento é de atingir uma produção de baixo custo. Ferramentas de simulação de gestão de manufatura podem identificar todos os custos associados a um novo produto para permitir que as equipes de projeto identifiquem designs ineficientes. A VP fornece uma avaliação rápida e eficiente do impacto das decisões sobre as mudanças de design. Um exemplo dessa aplicação é apresentado na figura 6:



Figura 6 Fábrica virtual desenvolvida pela Ford.

Fonte: Parísio, disponível em <http://carplace.uol.com.br/nova-tecnologia-ford-desenvolve-fabrica-virtual/>

2.3.1.8 ANÁLISE DO FATOR HUMANO

Existem ferramentas de VP que usam uma variedade de técnicas incluindo manipulação e animação de manequins biomecânicos virtuais. Essas ferramentas podem ser utilizadas para avaliar designs alternativos, como por exemplo, a avaliação de um centro de trabalho com base em critérios comuns, incluindo a taxa de produção, custo unitário, saúde e riscos de segurança, eficiência, medidas de qualidade, facilidade de utilização, procedimentos de manutenção e acessibilidade aos componentes. Na indústria automotiva, exemplos de aplicação da VP para avaliar os aspectos de segurança de usuário incluem desenhos de cinto de segurança, simulação de acionamento de *airbag*, simulação de acidente com os ocupantes do veículo, visibilidade, manobrabilidade, ergonomia entre outros.

Integração da VP com VR está permitindo interações do usuário com modelos tridimensionais que são mais realistas. Assim, pode-se melhorar a representação do comportamento de objetos físicos em condições simuladas do mundo real e as leis físicas, tais como gravidade, fricção, rigidez, etc,

Dessa forma a avaliação de aspectos de fatores humanos pode descobrir falhas que seriam propagadas ao longo do projeto. A figura 7 mostra o ensaio virtual de disparo de *airbag*.

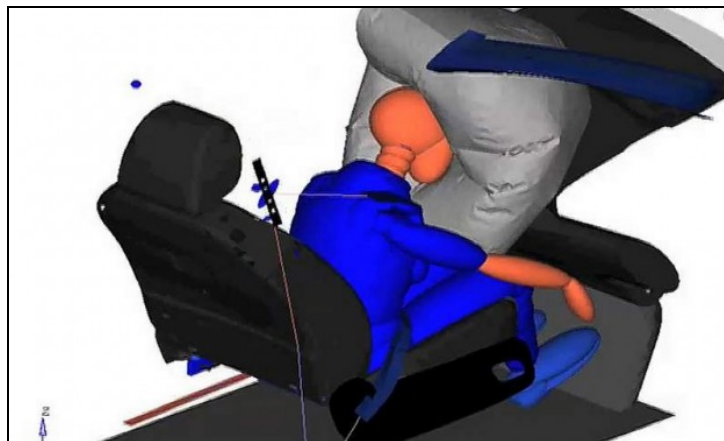


Figura 7 Simulação de disparo de airbag.

Fonte: Davis disponível em <http://www.caradvice.com.au/113848/ford-developing-virtual-six-year-old-crash-test-dummy/>.

2.3.1.9 REALIDADE AUMENTADA

Segundo Bezerra (2015) a Realidade Aumentada refere-se a tecnologia que projeta, em tempo real, elementos virtuais em um ambiente real, aumentando assim a percepção do usuário sobre o produto em questão.

De acordo com Azuma *et al.* (2001), as propriedades que caracterizam a realidade aumentada são:

- Combinação do real e virtual, em um ambiente real;
- Interatividade em tempo real;
- Registrado em 3D (refere-se ao alinhamento preciso entre objetos reais e virtuais)

Os dispositivos utilizados para a visualização de artefatos virtuais sobrepostos ao ambiente real podem ser divididos em três principais categorias: vestível, manual e projetável. Os dispositivos vestíveis são aqueles que o usuário deve prender ao corpo, geralmente a cabeça, com uma tela de vidro posicionada a frente do olho do observador, na qual o ambiente virtual é projetado. Essa é a tecnologia utilizada em artefatos como o *GoogleGlass*.

Dispositivos manuais, como celulares e tablets, capturam a imagem do ambiente real, mesclando-a, em tempo real, ao mundo virtual, com auxílio de software. Devido a sua fácil adaptação a câmeras e celulares, além da portabilidade, esta se mostra como a tecnologia mais acessível e promessa de primeiro sucesso

comercial dentre as tecnologias disponíveis para realidade aumentada. O dispositivo projetor, que pode ser estacionário ou móvel, projeta as informações digitais sobre o ambiente real. Este dispositivo não depende de manuseio do usuário, sendo bastante indicado para uso de grupos, por permitir a colaboração entre usuários.

2.3.1.10 REALIDADE VIRTUAL

Bezerra (2015), define realidade virtual como sendo uma simulação gerada por computador de uma imagem ou ambiente tridimensional, que pode ser interagido de uma maneira aparentemente real ou física por uma pessoa usando o equipamento eletrônico especial, como um capacete com tela dentro, ou luvas equipadas com sensores.

A realidade virtual permite, por meio de representação em três dimensões, a percepção de tempo, espaço, textura, dentre outros, a partir de movimentos naturais do corpo, representados nesse espaço virtual. Empresas como BOEING, EMBRAER, FIAT, VOLVO e FORD já utilizam essa tecnologia durante seu processo de desenvolvimento, eliminando protótipos físicos em algumas etapas do processo. O avanço tecnológico permitiu o barateamento dessa tecnologia, antes acessível apenas para grandes empresas, fazendo com que seu uso seja largamente divulgado.

Para Sherman e Craig (2003) a realidade virtual está baseada em quatro pilares: ambiente virtual, imersão, feedback sensorial e interatividade.

A realidade virtual vem sendo largamente utilizada nos mais diversos campos de atuação, desde centros de treinamento, simulação de situações de risco, marketing e desenvolvimento de produtos. Desde as áreas de ensino, treinamento, médica, preventiva até o marketing podem se beneficiar desta tecnologia. E é de interesse da indústria que a tecnologia alcance cada vez mais áreas, diminuindo o custo do investimento e fazendo com que a mesma avance mais rapidamente.

2.4 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Chua *et al.* (1999) afirma que a prototipagem rápida representa a produção de um modelo físico a partir de um modelo computacional, sem necessidade de qualquer dispositivo de fixação ou gabarito ou numericamente controlado de

programação (CNC). Esta tecnologia também tem sido referida como a fabricação de camada, fabricação depósito de material, fabricação de adição de material, fabricação de forma livre sólida e impressão tridimensional. Silva (2008) corrobora dizendo que a RP é um sistema composto por um conjunto de técnicas e tecnologias que utilizam o princípio de sobreposição de camadas de um determinado material, a partir das informações de um modelo gerado em um sistema CAD, de forma a compor o protótipo físico. Alguns autores citam ainda como o processo de prototipagem rápida, não apenas os processos de adição de materiais por camadas, como também os processos de remoção de materiais a partir de um modelo tridimensional com o objetivo de realizar a construção de protótipos rápidos.

De acordo com Chua *et al.* (1999) a RP surgiu como tecnologia relativamente nova em meados dos anos 80 e mostrou-se imprescindível na construção de protótipos rápidos tendo a capacidade de produzir peças complexas em algumas horas e sem supervisão constante de um operador. Dessa forma os designers de produto ganham liberdade de criação e encurtam o processo de desenvolvimento. O indicador claro do advento desta tecnologia é a inclusão do algoritmo gerador de arquivos de estereolitografia (STL) na grande maioria dos sistemas CAD 3D de hoje. O arquivo STL tornou-se então o que se pode denominar como padrão de fato ao utilizado por sistemas de RP na representação dos modelos CAD 3D sólidos.

Inicialmente, o processo começa a partir de um modelo CAD 3D criado. Em seguida, o modelo ou superfície a ser construída é convertido para um formato digital referido como STL. Depois, um programa de computador analisa o STL e o fatia em camadas para controlar a máquina de RP durante a construção do modelo conforme mostra a figura 8 (KAMRANI; NARS,2010).

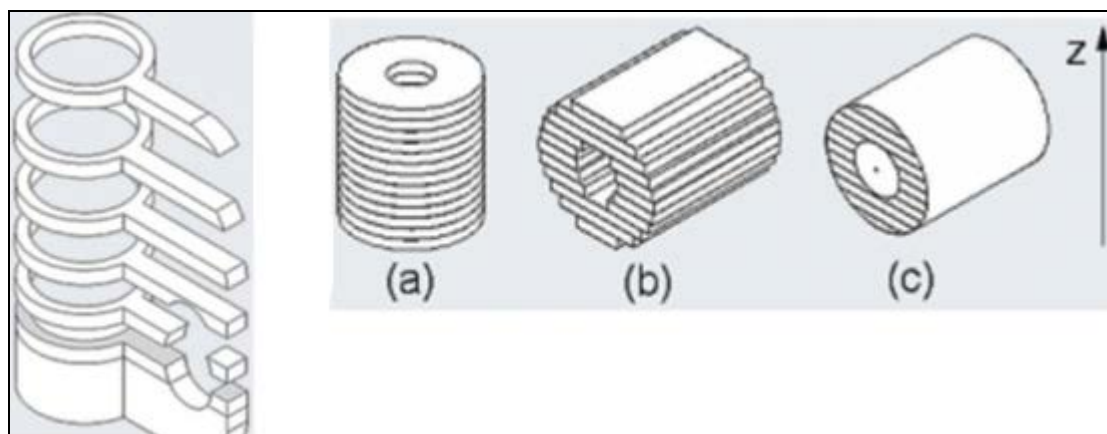


Figura 8 Processo de fatiamento do modelo virtual.
Fonte: Volpato, (2007)

O processo de fabricação é realizado pela adição de fatias do modelo original, gerado a partir do STL, camada após camada, até que um modelo físico que se assemelha ao design original é obtido. No entanto, dependendo do processo de PR em utilização, várias funções de pós-processamento podem ser necessárias a fim de dar acabamento ao modelo prototipado. Estas tarefas consistem de uma variedade de processos secundários que incluem a remoção de qualquer excesso de material e/ou suportes. A precisão desses modelos pode ser afetada pelas operações de pós-processamento, especialmente se feito manualmente. Chua *et al.* (1999) descreve que apesar de toda a tecnologia empregada na construção do modelo, o resultado depende e muito das habilidades manuais dos operadores em todas as tarefas de pós processamento.

Atualmente há pelo menos sete diferentes técnicas de prototipagem rápida disponíveis comercialmente. Uma vez que tais tecnologias estão sendo cada vez mais usadas em aplicações não relacionadas diretamente com prototipagem, é preferível designá-las pelas expressões fabricação sólida com forma livre, manufatura automatizada por computador ou manufatura em camadas. Este último termo descreve particularmente o processo de manufatura usado por todas as técnicas comerciais atuais. Um pacote de software "fatia" o modelo do componente em CAD em várias camadas finas, com aproximadamente 0,1 mm de espessura, as quais são dispostas umas sobre as outras. O processo de prototipagem rápida é um processo "aditivo", combinando camadas de papel, cera ou plástico para se criar um objeto sólido. A natureza aditiva deste processo permite a criação de objetos com

características internas complicadas que não podem ser obtidas através de processos de usinagem (fresamento, furação, torneamento, etc.), que são processos "subtrativos", ou seja, removem material a partir de um bloco sólido (ZORRIASSATINE *et al.*,2003 e CHUA *et al.*,1999).

Podemos citar como limitações o volume do protótipo geralmente limitado a 0,125 m³ ou até menos, dependendo do equipamento disponível. Protótipos metálicos ainda são mais difíceis de se obter. No momento as técnicas convencionais de manufatura ainda são mais econômicas que as de prototipagem rápida em se tratando de modelos de metal.

Todos os processos de prototipagem rápida atualmente existentes são constituídos por cinco etapas básicas:

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

Segundo Volpato (2007) e Chua *et al.* (2003) podemos citar como vantagens da prototipagem rápida:

- Capacidade de produzir formas tridimensionais complexas e detalhadas;
- Capacidade de prototipar conjuntos já montados;
- Redução de *lead times* para peças únicas;
- Os processos ocorrem em um compartimento fechado, com baixa geração de ruídos ou desperdícios;
- Redução substancial do tempo de lançamento do novo produto no mercado;
- Melhoria na manufaturabilidade e redução de custos no projeto de produtos.
- Não requer dispositivos ou ferramental especial para a fixação. Quando houver a necessidade de suportes, esses são criados pela própria tecnologia da máquina;
- Geralmente, não é necessária troca de ferramenta de trabalho;

- O componente é fabricado em uma única etapa de processo;
- Não são necessários cálculos complexos de trajetórias de ferramentas.

Como desvantagens Chua *et al.* (2003) cita:

- A velocidade de produção do protótipo é lenta. Dependendo do nível de precisão requerido e do tamanho do objeto, o processo pode levar algumas horas ou alguns dias;
- A maioria dos equipamentos somente pode fabricar itens de pequeno volume;
- A qualidade final da superfície do protótipo rápido gerado normalmente necessita de um acabamento. Os materiais e suas propriedades mecânicas não são as mesmas dos metais e plásticos geralmente usados no produto final;
 - A precisão e o acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por usinagem;
 - A montagem do conjunto de peças de RP tem de ser realizada de forma rápida, pois é inerente ao processo que ocorram problemas como o encolhimento e empenamento ao longo do tempo. Esses problemas são acentuados em função da tecnologia empregada, da geometria da peça e ainda do material utilizado.

Segundo Cansiglieri *et al.* (2007), os principais sistemas de prototipagem rápida usados na fabricação de modelos são:

- Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*)
- Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, *Laminated Object Manufacturing*)
 - Sinterização Seletiva a Laser (SLS, *Selective Laser Sintering*)
 - Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*)
 - Cura Sólida na Base (SGC, *Solid Ground Curing*)
 - Impressão por Jato de Tinta (MJT, *Multi Jet Modeling*; BPM, *Ballistic Particle Manufacturing*)
 - Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, *Laser Engineered Net Shaping*)
 - Vazamento a vácuo

2.4.1 ESTEREOLITOGRAFIA (SLA, *STEREOLITHOGRAPHY*)

Este processo foi o pioneiro, introduzido no mercado em 1988. Ele constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis a luz, que se solidificam quando expostos a radiação ultravioleta. Atualmente aproximadamente 60% dos processos de RP utilizam SLA (UPCRAFT; FLETCHER, 2003; KAMRANI; NASR, 2010)

O modelo é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. De acordo com o desenho criado em CAD, os raios laser solidificam camadas de resina fotossensível, camada a camada dos contornos do objeto pretendido sobre uma plataforma, até completar a formação da peça. A peça completa é removida do equipamento e a resina restante, dentro dos contornos, é curada por meio de aquecimento em forno UV (GRIMM, 2005). As geometrias com partes desconectadas ou salientes requerem estruturas de suporte para evitar que o objeto se movimente durante o processo, como ilustrado na figura 9.

Uma vez que a estereolitografia foi a primeira técnica bem-sucedida de prototipagem rápida ela se tornou um padrão de avaliação (*benchmarking*) para as demais, que surgiram (e continuam surgindo) posteriormente.

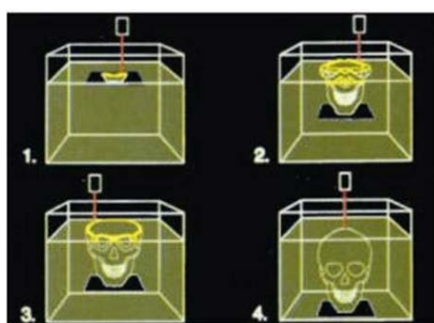


Figura 9 Esquema de funcionamento do processo de SLA
Fonte: Cansiglieri *et al.* (2007)

2.4.2 MANUFATURA DE OBJETOS EM LÂMINAS (LOM, *LAMINATED OBJECT MANUFACTURING*)

Nesta técnica camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo, são grudadas umas as outras formando-se o protótipo. O material original consiste de bobinas de papel laminado com cola ativada pelo calor. Assim, o processo inicia-se com o desenrolar de um rolo de papel impregnado de cola termoplástica na sua

superfície inferior. Seguidamente um rolo pré-aquecido comprime o papel sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada. O corte do contorno da peça na camada é feito por um laser (CANCIGLIERI *et al.* 2007).

Existe um equipamento que executa este corte com uma lâmina de metal, entretanto é um processo não muito difundido. O processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias para construir a peça, a qual apresentará textura similar a de madeira. Uma vez que os modelos são feitos de papel, eles devem ser selados e revestidos com tinta ou verniz para se evitar eventuais danos provocados pela umidade. Os mais recentes desenvolvimentos deste processo permitem o uso de novos tipos de materiais, incluindo plástico, papel hidrófobo e pós cerâmicos e metálicos. Estes materiais pulverulentos geram no final do processo uma peça "verde" que deve ser posteriormente sinterizada para que se alcance máxima resistência mecânica. A figura 10 representa o processo de maneira esquemática.

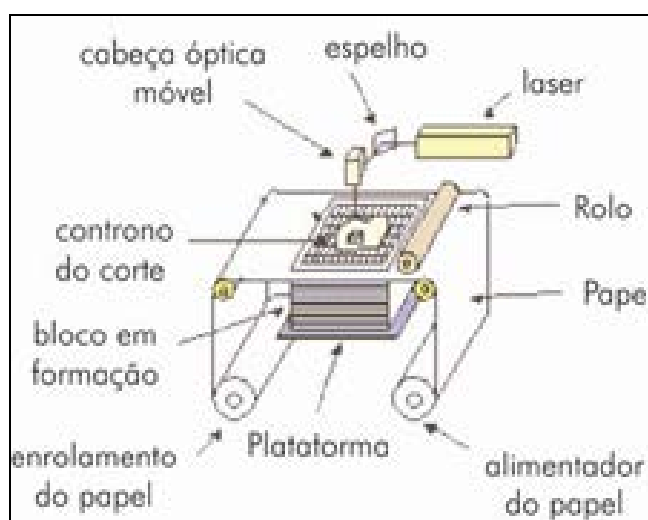


Figura 10 Esquema de funcionamento do processo de LOM
Fonte: Cansiglieri *et al.* (2007)

2.4.3 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS, *SELECTIVE LASER SINTERING*)

Esta técnica, patenteada em 1989, usa um raio de laser para fundir, de forma seletiva, materiais em pó. O equipamento do processo SLS constrói objetos tridimensionais pela superposição de camadas, homogêneas em pó, entre eles o

mais utilizado é a poliamida. Com o processo iniciado, uma fina camada do pó, que se solidifica por ação do laser, é depositada dentro em uma cuba de formação do objeto. Sequencialmente, camadas adicionais do pó são depositadas através de roletes sobre a camada já sinterizada para sofrer a ação do laser, repetindo-se o processo até a formação final do objeto conformem mostra a figura 11. O pó não sinterizado pela ação do laser é removido quando a peça estiver completa, servindo também como suporte durante a fabricação do protótipo. Alguns materiais disponíveis para SLS são: poliamida, elastômeros, cerâmica e metal com polímeros aglutinantes para aplicações em ferramental leve (GRIMM, 2005).

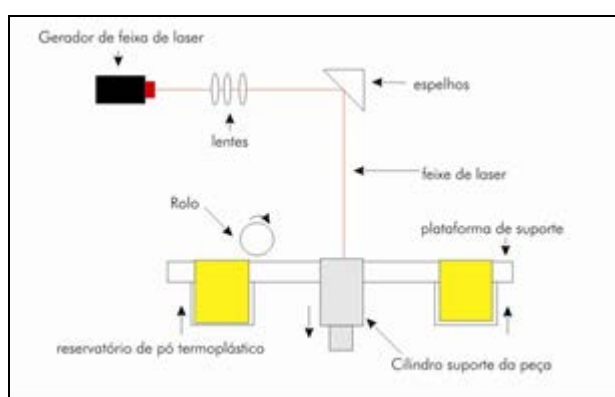


Figura 11 Esquema de funcionamento do processo de SLS
Fonte: Cansiglieri et al. (2007)

2.4.4 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (FDM, *FUSED DEPOSITION MODELING*)

Segundo Cansiglieri *et al.*, (2007) os filamentos de resina termoplástica aquecida são extrudadas a partir de um cabeçote que se move num plano X-Y. O cabeçote de extrusão controlada deposita filetes de material muito fino sobre a plataforma de construção, formando a primeira camada do componente. São construídos suportes durante a fabricação para segurar o protótipo durante sua fabricação. Um bico recebe material para a construção do objeto 3D enquanto outro recebe material para ser utilizado como suporte para a fabricação. Ao final de cada camada a plataforma se desloca para baixo, com uma distância igual a espessura da camada, formando camadas superpostas de filamento até formar o objeto pretendido (GRIMM, 2005). As resinas termoplásticas adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida. A figura 12 exemplifica esse processo.

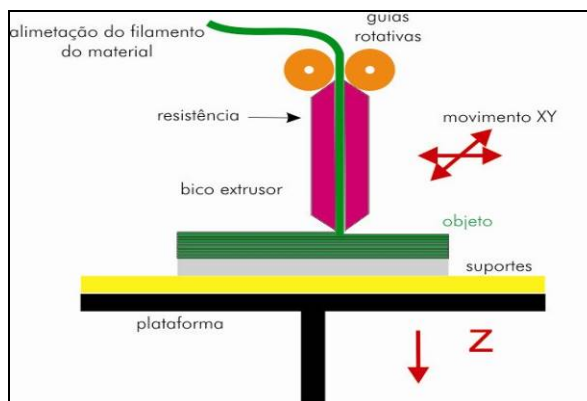


Figura 12 Esquema de funcionamento do processo de FDM
Fonte: Cansiglieri *et al.*(2007)

2.4.5 CURA SÓLIDA DA BASE (SGC, *SOLID GROUND CURING*)

É um processo similar a estereolitografia, que usa radiação UV para curar de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. A diferença é que este processo cura uma camada inteira de uma vez. Em primeiro lugar, a resina fotossensível é espalhada sobre a plataforma de construção. A seguir, a máquina gera uma foto-máscara correspondente a camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro similar a um display LCD. Então a máscara é submetida a radiação ultravioleta deixando-a passar apenas nas regiões transparentes, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero. Essas máquinas são de grande porte e podem produzir modelos de grande tamanho (CANCIGLIERI *et al.*, 2007). A figura 13 mostra o esquema de funcionamento do processo.

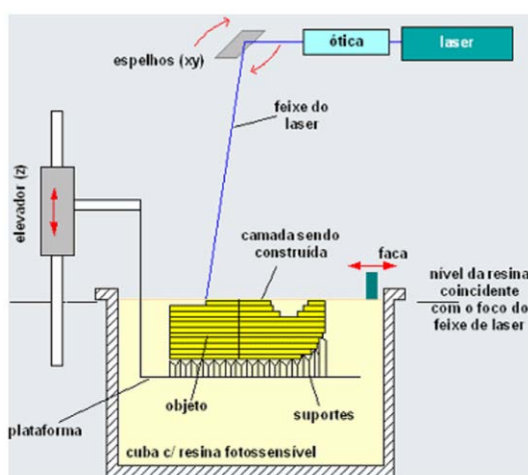


Figura 13 Esquema de funcionamento do processo de SGC
Fonte: HOTZA (2009)

2.4.6 IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA (MJT, *MULTI JET MODELING*; BPM, *BALLISTIC PARTICLE MANUFACTURING*)

Os protótipos são construídos sobre uma plataforma que fica em uma cuba preenchida com material em pó. Um cabeçote de impressão por jato de tinta pulveriza de forma seletiva uma cola que funde e aglomera os grãos de pó nas áreas desejadas. O pó não aglutinado serve como suporte para o modelo. Ao se terminar o processo o pó que sobrou é removido com jato de ar e a peça recebe um banho selante de material aglutinante ou passa por sinterização. Podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (PHAM e GAULT, 1998; VOLPATO *et al.*, 2007). A figura 14 mostra o esquema de funcionamento do processo.

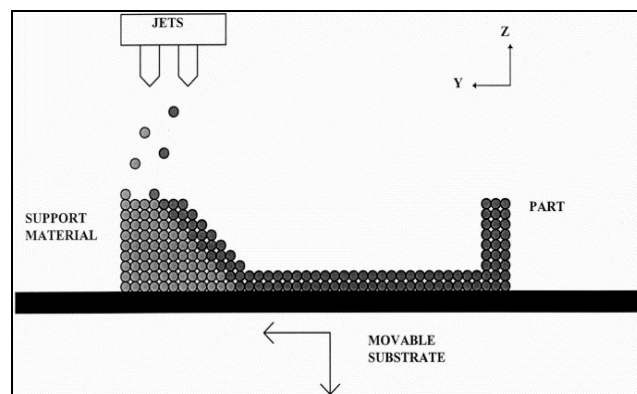


Figura 14 Esquema de funcionamento do processo de MJT
Fonte: Pham e Gault (1998)

2.4.7 CONFORMAÇÃO PRÓXIMA AO FORMATO FINAL VIA LASER (LENS, *LASER ENGINEERED NET SHAPING*)

Produz protótipos de metal com boa densidade e com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção. Um laser de alta potência é usado para fundir pó de metal que é pulverizado com auxílio de gás inerte sobre a região de foco do laser, onde ocorre a fusão e deposição deste metal. Uma mesa X-Y se desloca de forma a gerar cada camada do objeto. Podem ser usados pós de diversas ligas metálicas, tais como aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio. Os

protótipos produzidos requerem usinagem para acabamento, apresentando densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional (CANCIGLIERI *et al.*, 2007.). A figura 15 mostra o esquema de funcionamento do processo.

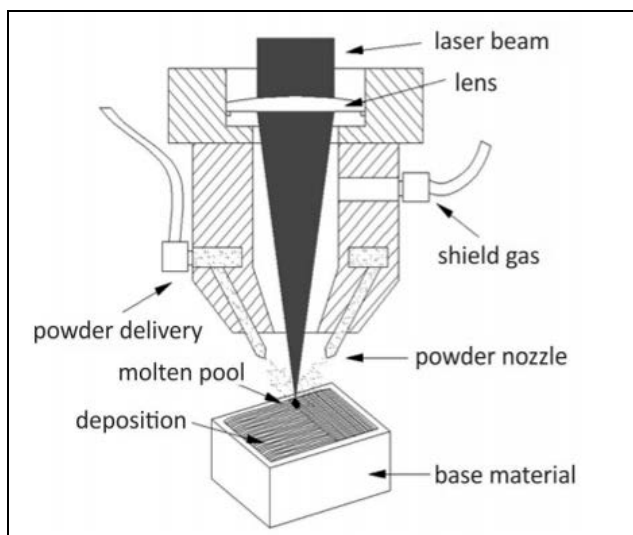


Figura 15 Esquema de funcionamento do processo de LENS
Fonte: Articek et al (2013)

3 ESTUDOS DE CASO

3.1 CASO 1: ATLAS COPCO BRASIL LTDA.

Kanitar (2005) apresenta o exemplo da empresa Atlas Copco, cuja sede se encontra na Suécia e possui uma filial no Brasil que fabrica compressores de ar e grupos geradores. Os produtos fabricados na unidade brasileira atendem toda a América do Sul. No início da produção na década de 90 a empresa utilizava softwares de projeto bidimensional, naquela época o objetivo da empresa era passar os projetos do papel para o computador visando aprimorar a qualidade e produtividade. A Criação e revisão dos projetos ficou mais rápida e os projetos mais precisos. (MOREIRA,2002)

Segundo Moreira (2002) atualmente a empresa utiliza ferramentas avançadas de CAD 3D que possibilita a troca de informações do produto por intermédio da visualização por equipes de projetos e funcionários de vários setores e unidades da Atlas pelo mundo. A figura 16 ilustra um dos desenhos desenvolvidos pela empresa.



**Figura 16 Equipamento projetado pela empresa Atlas Copco Brasil Ltda.
Fonte: Moreira 2002**

3.2 CASO 2: WHIRPOOL ELETRODOMÉSTICOS

Segundo Kanitar (2005) a empresa possui quatro unidades no Brasil e é responsável pela fabricação de duas marcas de eletrodomésticos. O uso de simulações CAE como forma de melhorar os produtos ocorre desde 1993, sendo usado para analisar resistência mecânica e movimento dos mecanismos e componentes de refrigeradores, fogões, máquinas de lavar roupas, de lavar louças,

entre outros. Conforme a equipe de desenvolvimento da empresa, as simulações possibilitam a redução da quantidade de protótipos físicos e são realizadas em várias fases do processo de desenvolvimento, para o refinamento do projeto.

No início do projeto a prototipagem virtual é aplicada na validação de conceitos e posteriormente na evolução do produto. A empresa cita com sucesso o uso de simulação do processo de injeção plástica analisando vários parâmetros de injeção, simulando espessura das paredes dos modelos, temperaturas, tempo de processos, pontos de injeção, etc. Esse trabalho fornece mais segurança na definição dos modelos dos produtos, impedindo o surgimento de problemas na injeção, e procurando a minimização do consumo de materiais sem perder a robustez dos produtos (MOREIRA, 2003). A figura 17 apresenta um resultado da simulação de injeção.

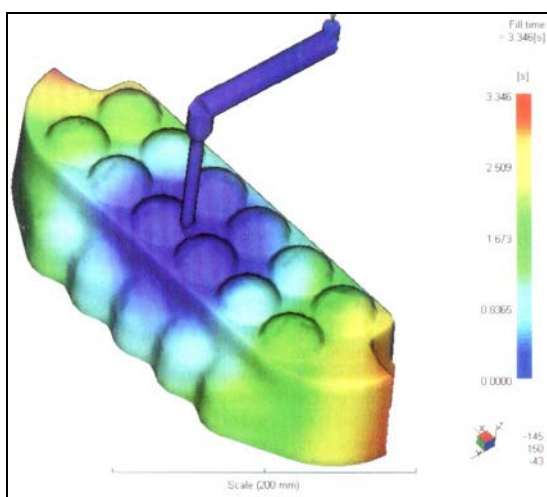


Figura 17 Simulação do processo de injeção de um componente de refrigerador.
Fonte: Kanitar, 2005

3.3 CASO 3: USO DE CRASHTEST VIRTUAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Segundo Kanitar (2005) a Ford Brasil e a General Motors (GM) do Brasil são exemplos de aplicação do sistema CAE para simular processos como aerodinâmica, vibração, durabilidade, *crash* e capacidade de isolamento dos automóveis, entre outros. A resistência dos veículos a impactos e suas consequências aos passageiros são analisados no processo de *crash* pelos softwares de CAE (D'ISSY, 2003).

Kanitar (2005) afirma que a Ford Brasil conseguiu economizar milhares de dólares com os estes estudos e outras análises de CAE para simular o

comportamento físico, real, dos veículos em campo. O protótipo físico, se não apresentar o resultado esperado, tem que ser todo refeito, até mesmo as ferramentas utilizadas para produzi-lo, enquanto o protótipo virtual possibilita a interação e alterações instantâneas. No desenvolvimento do modelo EcoSport em 1999, e do Fiesta em 2002, a Ford aplicou o CAE para análise de crash virtual, que simula como a estrutura do veículo irá se comportar quando estiver em campo (D'ISSY, 2003).

Segundo Kanitar (2005) a GM do Brasil utiliza desde 1997 o sistema CAE para estudos do crash virtual, considerando às necessidades de análise do modelo Celta. Dessa forma são realizadas simulações das lesões nos ocupantes do veículo e da ancoragem de bancos e cintos, assim como análises de danos em impactos de baixa velocidade para classificação de seguro. Os engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de projetos usam softwares de CAE para analisar por intermédio da simulação o comportamento dos automóveis prontos, simulações como durabilidade do automóvel, ruído e vibração, performance estrutural, rigidez, flambagem de painéis, acústica, dinâmica veicular, manobrabilidade, etc. Pelo uso do CAE a GM aumentou a qualidade dos carros, atingiu a redução da quantidade de protótipos físicos e do tempo no desenvolvimento do produto, e em decorrência diminuiu os custos de desenvolvimento. (D'ISSY, 2003). Na figura 18 é apresentada uma simulação de *crashtest* em modelos virtuais e após as evoluções realizadas baseadas nos dados obtidos foi construído um modelo de protótipo físico para homologação do veículo:

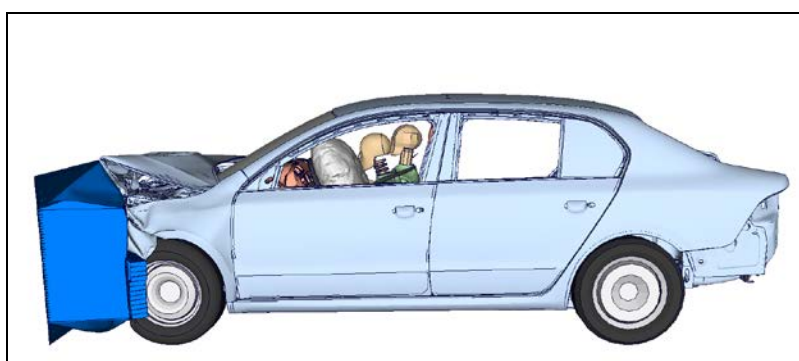


Figura 18 Simulação de crashtest virtual.

Fonte: Virtual Crash Testing – Disponível em <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-performance/virtual-performance-solution/virtual-crash-testing>

Cabe ressaltar que por experiência do autor, o uso de *dummies* (manequins de testes) e protótipos físicos para ensaios na indústria automobilística para situações onde poderiam ser substituídos por protótipos virtuais torna o processo de desenvolvimento de um automóvel mais demorado e caro, pois o custo de um *crashtest* físico pode variar entre US\$ 50.000 e US\$1.000.000 dependendo do nível de detalhamento dos dados que se deseja obter.

3.4 CASO 4: PROJETO DE LACRE PARA CLIENTE DA CIMJECT

Sabino Netto (2003) apresenta um estudo de caso de uma empresa que procurou a Cimject para a realização de protótipos rápidos para um lacre que se encontrava em fase de projeto preliminar e estavam trabalhando com duas concepções simultaneamente e necessitavam determinar qual seria a escolhida.

O projeto consiste de um lacre de segurança que na posição fechado, adquire o formato circular com regiões de dobra nos quadrantes deste círculo, conforme mostra a figura 19. O intuito do projeto era evidenciar uma possível ruptura das áreas de dobra.

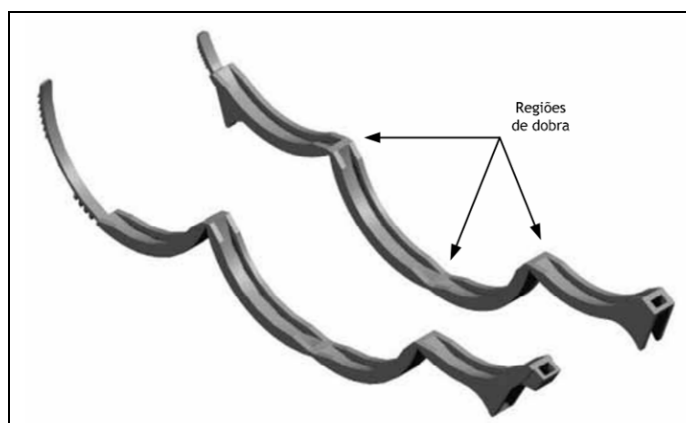


Figura 19 Models 3D CAD das duas concepções do lacre
Fonte: Sabino Netto, 2003

A partir do modelo 3D CAD constatou-se que a geometria de um dos lacres poderia ser modificada facilitando a fabricação do inserto sem alterar sua função.

Algumas simulações CAE do processo de moldagem por injeção foram realizados para determinar a localização do ponto de injeção para o balanceamento

do molde (figura 20), possibilitando determinar alguns parâmetros de processamento como velocidade, pressão e volume de injeção.

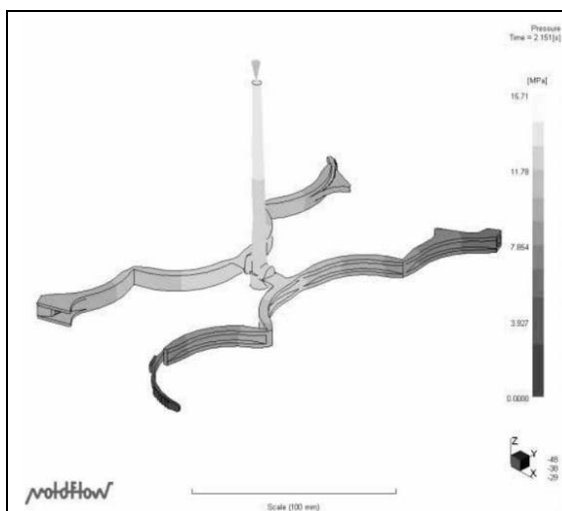


Figura 20 Resultado de distribuição de pressão realizada em sistema CAE
Fonte: Sabino Netto, 2003

Devido a simulação CAE a condição de regime foi atingida rapidamente. Os lacres foram moldados em PP, a figura 21 apresenta a peça obtida na injeção. Terminado o processo de injeção, as peças foram enviadas para o cliente que ficou responsável pelos testes funcionais.

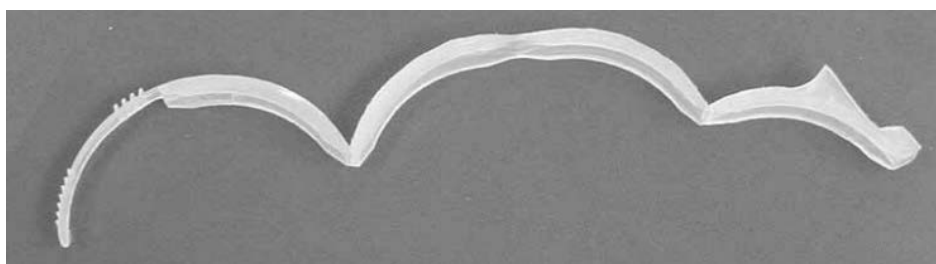


Figura 21 Protótipo resultante da moldagem nos moldes SL
Fonte: Sabino Netto, 2003

Sabino Netto (2003) relata que após alguns dias o cliente novamente entrou em contato, pois havia se decidido por uma nova concepção que mesclava as duas

anteriores e pretendia realizar os mesmos testes feitos anteriormente. Desta forma validando o projeto.

Sabino Netto (2003) conclui que os protótipos forneceram subsídios suficientes para as tomadas de decisão da empresa, já que o responsável pelo projeto salientou que permitiram a antecipação de problemas e melhoria da qualidade do seu produto, porém não soube precisar se houve redução no tempo de desenvolvimento. Poucos dados foram repassados pela empresa com respeito aos testes realizados.

Com relação a fabricação rápida adotada, Sabino Netto (2003) julga que foi adequado pois atingiu o número de peças e o prazo estipulado pelo cliente.

3.5 CASO 5: PROJETO DE PRENDEDOR DE ROUPA PELA CIMJECT

Sabino Netto (2003) apresenta o desenvolvimento de um prendedor de roupa desde as fases iniciais do processo de desenvolvimento de produto até a elaboração de um protótipo funcional.

Após toda a fase inicial foi desenvolvido um modelo CAD 3D (figura 22) da geometria do produto para ser utilizado nas simulações CAE. O modelo inicial foi concebido com algumas simplificações (ausência de arredondamentos) para agilizar a execução das análises e diminuir os problemas de convergência, com pequeno comprometimento em relação a precisão dos resultados. Em seguida o modelo foi submetido a ensaios em softwares CAE, a figura 23 apresenta o resultado de uma simulação de deslocamento de toda a região interna.

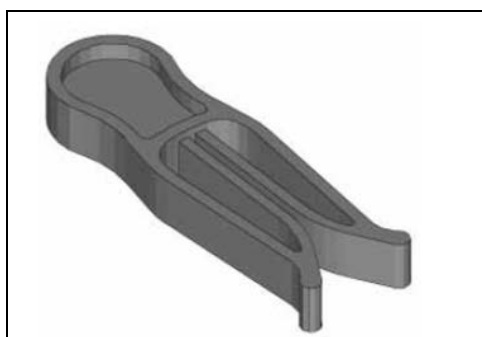


Figura 22 Modelo CAD simplificado
Fonte: Sabino Netto, 2003

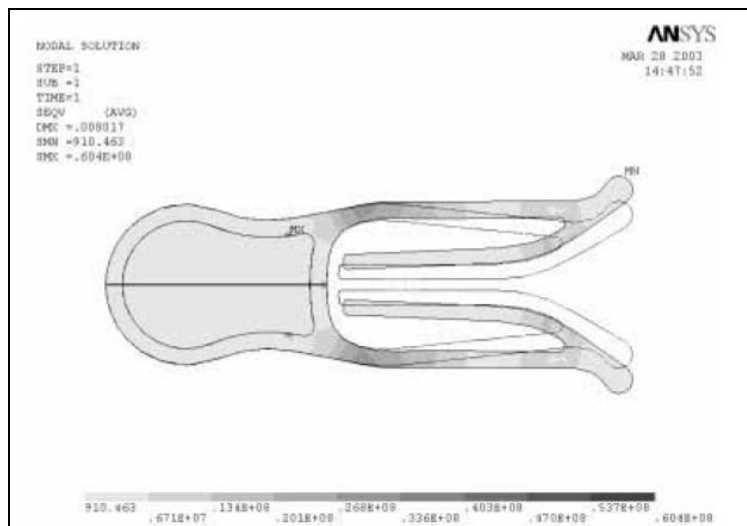


Figura 23 Simulação do deslocamento em sistema CAE
Fonte: Sabino Netto, 2003

Em seguida foram simulados os parâmetros para o processo de fabricação e das estimativas dos principais parâmetros de processamento. A figura 24 mostra a simulação do processo de fabricação.

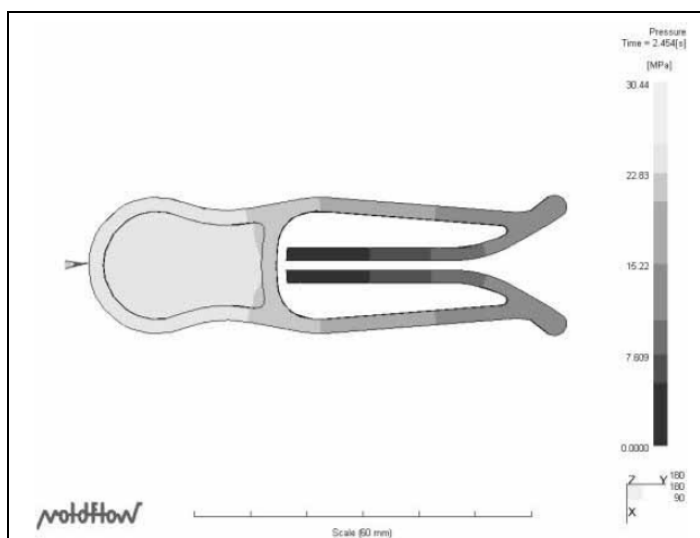


Figura 24 Simulação da pressão de injeção em sistema CAE
Fonte: Sabino Netto, 2003

A partir dos resultados das simulações, foi elaborado o modelo CAD final do produto, esse por sua vez serviu como base para elaboração de protótipos rápidos no sentido de avaliar o funcionamento e a usabilidade do produto. A figura 25 apresenta um destes testes.

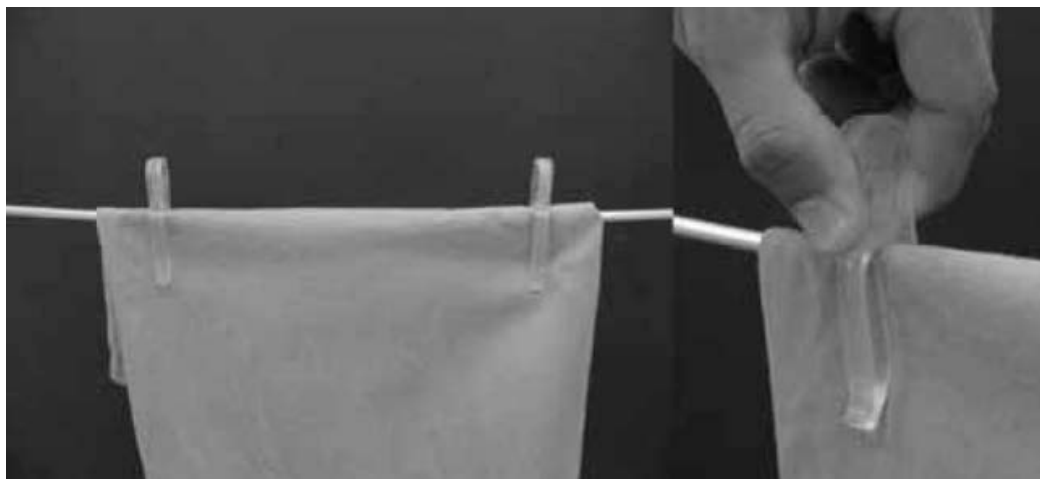


Figura 25 Teste do produto com auxílio de protótipos rápidos
Fonte: Sabino Netto, 2003

Após os testes a equipe de projeto desenvolveu um novo modelo 3D com as modificações propostas durante a fase de testes.

Sabino Netto (2003) conclui que os diferentes tipos de protótipos utilizados no decorrer do projeto foram muito importantes para o aprimoramento do produto. Apesar dos protótipos rápidos não serem do mesmo material que o produto final, Sabino Netto (2003) relata que foi possível fazer uma análise dos aspectos estéticos, ergonômicos e técnicos que só seriam detectados após a fabricação dos moldes.

3.6 CASO 6: PROTOTIPAGEM DE UM TELEFONE

Este estudo de caso apresenta a prototipagem de um aparelho telefônico através da tecnologia de estereolitografia (SLA). De acordo com Chua *et al.* (1999), a empresa optou por realizar a prototipagem com o objetivo de criar um modelo de avaliação e passar aos designers uma estimativa de tamanho do produto, pois esta noção fica difícil de ser percebida apenas nos modelos virtuais. Outro motivo pelo qual realizou a prototipagem foi a realização de uma análise ergonômica, ou seja, desde a forma como o telefone fica ajustado sobre a mão do usuário até a força com que se deve pressionar os botões desejados pelo usuário.

Chua *et al.* (1999) apresenta como problemas verificados inicialmente que o acabamento das peças prototipadas mostrava-se pobre, e estas ainda sofriam com empenamentos, conforme mostrado na figura 26.

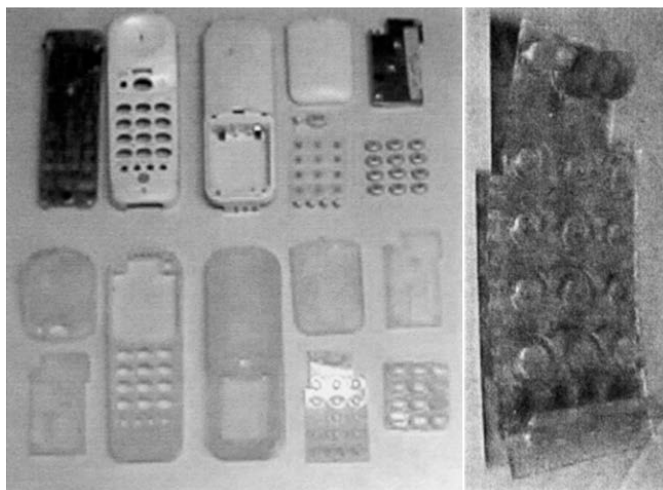


Figura 26 Peças prototipadas do telefone
Fonte: Chua et al., 1999

Durante a montagem do protótipo verificou-se o empenamento e contração dos protótipos, o que é inerente ao processo. Isso pode se tornar um problema a partir do momento em que se demora a realiza a montagem do conjunto. Uma vantagem apontada pela empresa é a possibilidade de se testar diferentes sequencias de montagem. Um problema apontado durante a realização dos testes foi a fragilidade dos protótipos, que acabaram quebrando durante os testes de parafusamento, conforme mostra a figura 27.

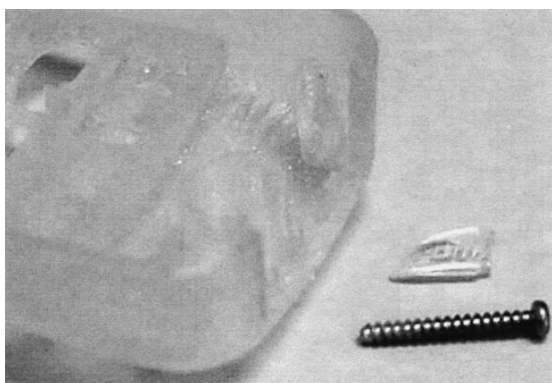


Figura 27 Torre de parafuso quebrada durante os testes de montagem
Fonte: Chua et al., 1999

A análise de possíveis interferências tornou-se um tanto limitada na montagem dos protótipos devido aos problemas de empenamento e encolhimento. Dessa forma Chua et al. (1999) aponta que principalmente para conjuntos mais complexos, a VP torna-se mais eficiente e agiliza as correções no modelo.

3.7 CASO 7: AVALIAÇÃO DE PV E PR DE PRODUTOS PELO USUÁRIO.

Bezzera (2015) apresenta um estudo sobre a percepção do usuário com relação os protótipos físicos e virtuais dos produtos.

Para realização do estudo foi utilizado um rádio-relógio de modelo Sony a partir do qual foram desenvolvidos modelos virtuais e posteriormente gerado um modelo físico usando prototipagem rápida. A figura 28 mostra o modelo original e os protótipos virtuais e físicos do produto.



Figura 28 Produto original e seus protótipos
Fonte: Bezzera, 2015

Em seguida os modelos foram apresentados a grupos de usuários de forma separada e realizado um questionário sobre as percepções que o usuário tinha sobre o produto, e por fim o produto original era apresentado.

Segundo Bezzera (2015), ficou claro que os participantes que entraram em contato com o protótipo virtual compreenderam com maior facilidade questões referentes ao acabamento do produto e elementos presentes no mesmo. O grupo que analisou inicialmente o protótipo físico teve dificuldade em compreender que o objeto se tratava de uma representação, e não algo acabado, assinalando muitas vezes respostas referentes ao protótipo, e não ao rádio relógio real. Entretanto, o grupo apresentou maior facilidade para identificar relações entre os elementos, apesar de analisar apenas o posicionamento dos botões.

Por fim os sujeitos foram apresentados ao produto real, com o objetivo de confrontar opiniões já formadas sobre o produto, bem como questionar qual a ferramenta mais se aproximou, na opinião dos participantes, ao rádio relógio. Apenas um sujeito, não especialista, afirmou que o produto era exatamente como ele esperava, enquanto os outros sujeitos citaram, principalmente, o funcionamento dos botões como diferente do esperado, além de peso e presença ou ausência de elementos. Todos os sujeitos não especialistas escolheram o protótipo virtual como

melhor representação do produto, principalmente devido a fidelidade de textura e visibilidade das legendas. Em uma análise mais aprofundada dos comentários dos profissionais é possível identificar uma preferência pelo protótipo físico como opinião preconcebida, reflexo da experiência dos mesmos. Os sujeitos que optaram pelo protótipo físico afirmaram que o contato físico com o artefato permite uma melhor compreensão do mesmo, apesar de reconhecer que o protótipo virtual possuía uma maior proximidade estética com o rádio relógio em questão.

3.8 CASO 8: PROTOTIPAGEM DE ORGANIZADOR MULTIUSO EMPILHÁVEL

Viaro *et al.* (2014), apresenta um estudo de prototipagem de um organizador multiuso empilhável para banheiro, onde foi desenvolvido um conceito através de um modelo CAD 3D e foram realizados testes virtuais para analisar o design e das cores do produto como mostra a figura 29 e um teste simulando o encaixe de vários itens no produto, conforme mostra a figura 30.



Figura 29 Visualização de cores do produto.
Fonte: Viaro *et al.*, 2014



Figura 30 Produto com produtos de higiene.
Fonte: Viaro *et al.*, 2014

Posteriormente o produto foi submetido a uma prototipagem física utilizando um processo de corte e dobra CNC, devido ao auto custo para desenvolvimento de um protótipo injetado ou por manufatura aditiva, para validação do projeto. Notou-se que o resultado obtido foi similar ao da prototipagem virtual.

3.9 CASO 9: VP E RP DE UTENSÍLIO DE COZINHA

Mandić e Ćosić (2011) apresentam um caso de prototipagem de um utensílio de cozinha. Em seu estudo, inicialmente, uma peça em chapa fina planificada é escaneada através de processo de engenharia reversa, em seguida gerado um modelo CAD 3D que serviu como base para o projeto do molde e para estudos de FEA do processo de estampagem, para definir os esforços realizados na peça durante o processo de estampagem. Por fim é gerado um modelo por prototipagem rápida afim de ser realizados testes ergonômicos com o produto. A figura 31 mostra o modelo 3D do produto, o projeto do molde e estudo de FEA do processo.

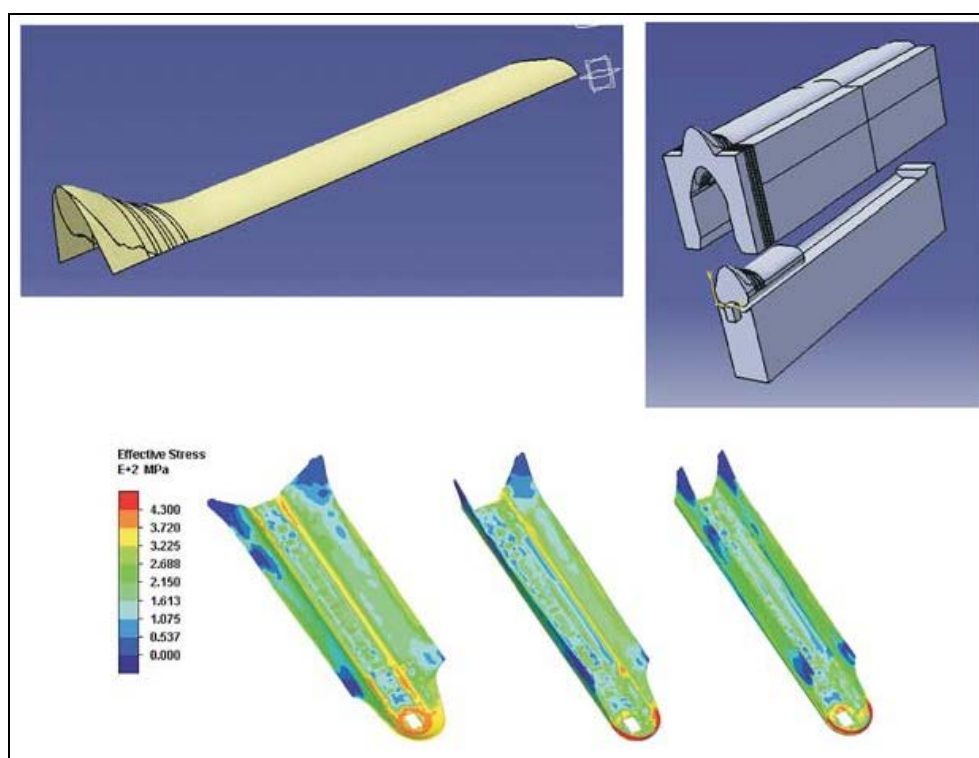


Figura 31 Modelo 3D do produto, projeto do molde e ensaio FEA
Fonte: Mandić e Ćosić, 2011

3.10 CASO 10: PROTOTIPAGEM DE FECHO CREMONA

Ferreira (2006) apresenta um estudo de prototipagem de um fecho tipo cremona. Foi desenvolvido um modelo CAD 3D para uma análise da geometria do produto. Aprovado o modelo, foi realizada uma prototipagem rápida do produto para análise da montagem do conjunto. Os modelos CAD serviram como base para os estudos FEA do projeto. Foram realizados vários ensaios em ferramenta CAE para determinar e testar as características mecânicas do produto. A figura 32 mostra o modelo CAD e as peças em RP.

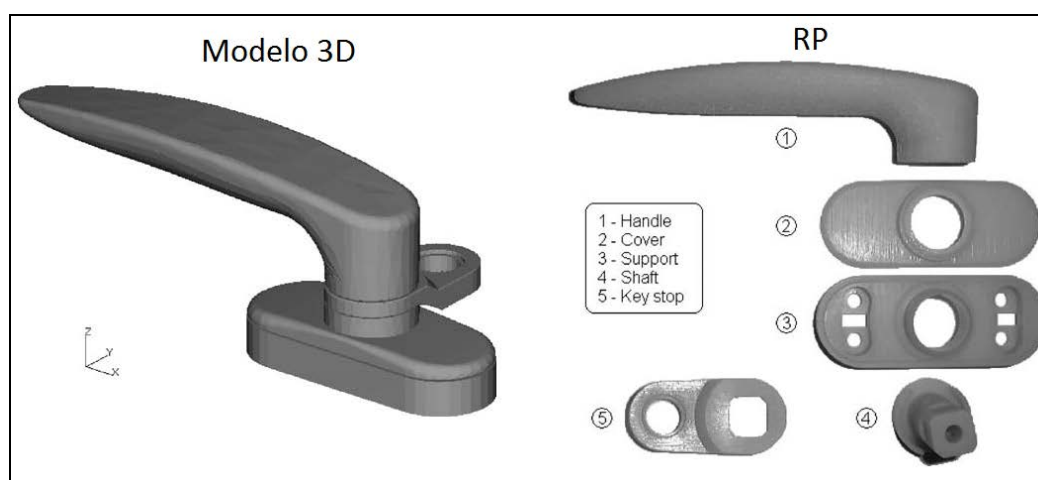


Figura 32 Modelo 3D do fecho e peças em RP
Fonte: Ferreira, 2006

3.11 CASO 11: PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA JOALHERIA

Guilgem e Ferro (2015) apresentam a prototipagem rápida como uma maneira eficaz de desenvolver joias, o estudo mostra que os modelos gerados através de modelos CAD 3D têm seu design verificado e aprovado através do modelo virtual e a partir deste é gerado um modelo em RP para confecção do molde de fundição, ganhando assim tempo de desenvolvimento e de confecção de peças em argila para confecção dos moldes. A figura 33 apresenta exemplos de joias desenvolvidas através da RP.



Figura 33 Exemplos de joias desenvolvidas com RP
Fonte: Ferreira, 2006

3.12 CASO 12: ANÁLISE DE MONTAGEM E INTERFERÊNCIA DE MECANISMO COM RP.

Ahmad *et al.*, (2015), apresenta um estudo de montagem e de interferência de um conjunto de engrenagens através de prototipagem rápida. Após a modelagem CAD do conjunto as peças foram submetidas ao processo de RP (figura 34).

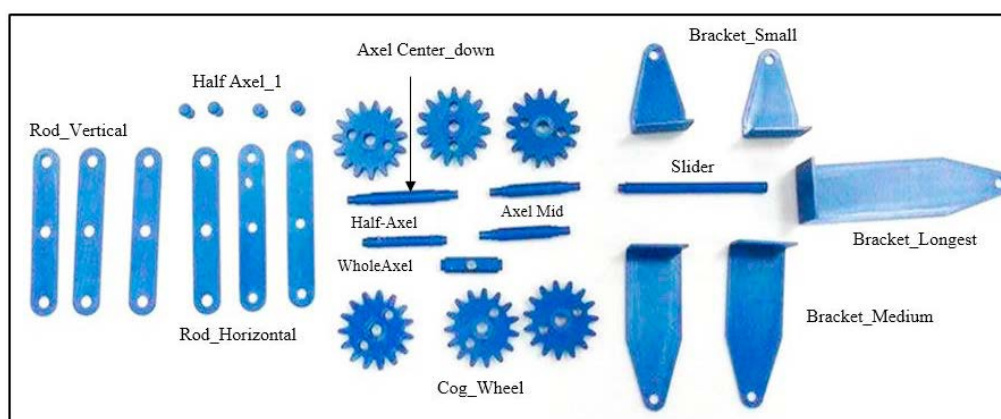


Figura 34 Peças produzidas em RP
Fonte: Ahmad *et al.*, 2015

Com as peças produzidas separadamente, o próximo passo foi a montagem do conjunto para a realização das análises. O conjunto foi montado com o auxílio da visualização do projeto em sistema CAD. A figura 35 mostra o conjunto final montado para análise.



Figura 35 Montagem de conjunto de peças de RP
Fonte: Ahmad *et al.*, 2015

3.13 CASO 13: REDUÇÃO DE MASSA COM A UTILIZAÇÃO DE FEA

Balistrero Junior (2010) apresenta um estudo de redução de massa de componentes mecânicos com o auxílio de análises FEA. As análises facilitaram a identificação dos pontos onde poderia ser realizada a redução de material. E após a redução final detectou-se que o coeficiente de segurança permaneceu acima do especificado. A figura 36 ilustra um dos componentes onde foi aplicada a análise de tensão para redução de massa.

Balistrero Junior (2010) conclui que a utilização de FEA tornou as atividades de projetos e desenvolvimento de produtos mais produtivas, reduzindo o tempo destinado ao ciclo de projeto e desenvolvimento. O custo final dos produtos, também é minimizado com a diminuição da matéria prima empregada, redução de volume transportado, logística de armazenagem e redução do tempo de manufatura.

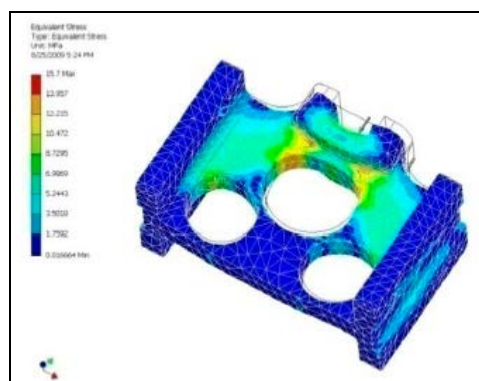


Figura 36 Análise FEA de componente mecânico
Fonte: Balistrero Junior, 2015

3.14 CASO 14: REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Nölle e Klinker (2006) afirmam que a realidade virtual pode ser utilizada na indústria automotiva para comparar as peças reais de um carro com os seus dados de projeto. É preciso verificar se as peças reais correspondem a última versão do projeto e se foram fabricadas com a precisão adequada. Com a realidade aumentada, os dados do projeto CAD podem ser sobrepostos sobre as peças reais numa tentativa de se obter o máximo de precisão. Ambas as peças, real e virtual, devem ser visíveis ao mesmo tempo e no mesmo local, como mostra a figura 37.

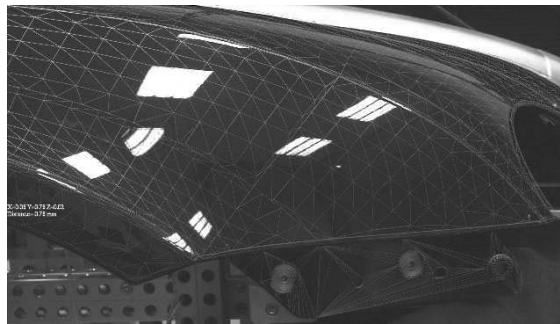


Figura 37 Peça de um carro com seu modelo CAD sobreposto.
Fonte: Nölle e Klinker, 2006

Já nas fases iniciais de um projeto, peças como a carroceria podem ser virtualmente montadas sobre a plataforma correspondente usando realidade virtual (FRÜND *et al*,2003). O uso da realidade virtual nesse campo de aplicação reduz de forma significativa o número de protótipos físicos para uma plataforma porque variantes do carro podem ser “montadas” sobre a plataforma real. Mudanças rápidas de componentes podem ser feitas usando apenas o sistema CAD 3D. A figura 38 mostra a frente de uma van montada em realidade virtual.

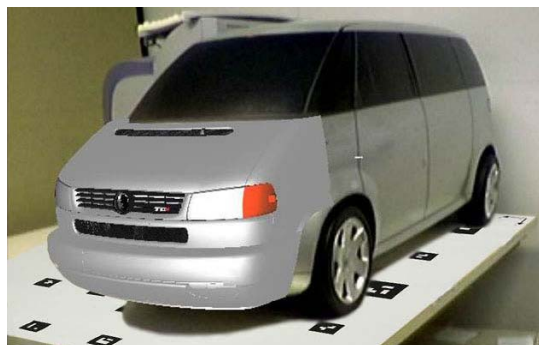


Figura 38 Frente virtual de uma van sobreposta sobre um modelo real.
Fonte: Fründ *et al*, 2006

Segundo Fründ *et al*, (2003), a indústria automotiva utiliza uma variedade de métodos para análise ergonômica de interiores e um desses métodos é a realidade virtual, onde o novo interior é sobreposto em um carro convencional permitindo a análise de uma grande variedade de interiores dentro de um carro real. A figura 39 mostra um painel virtual dentro de um carro real.



Figura 39 Representação de um painel virtual dentro de um carro real.
Fonte: Fründ *et al*, 2006

3.15 COMPARAÇÃO ENTRE PROTÓTIPOS VIRTUAIS E FÍSICOS NA INDÚSTRIA DO VESTUÁRIO

Pires (2015) apresenta um estudo comparativo entre protótipos virtuais e físicos de várias peças de vestuário, os modelos foram desenvolvidos e submetidos a avaliação de alunas de design a fim de identificarem qual era o modelo virtual e a semelhança entre eles.

Pires (2015) conclui em seu estudo que os protótipos desenvolvidos virtualmente apresentam características visuais muito próximas dos protótipos físicos. A figura 40 mostra um dos modelos analisados.



Figura 40 Prototipagem virtual e física de item de vestuário
Fonte:Pires, 2015

3.16 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASO E COMPARAÇÃO EM VP E RP

Após analisar os estudos de caso é possível levantar vantagens e desvantagens em ambos os processos.

Uma das vantagens da prototipagem virtual é a antecipação de possíveis problemas de projeto como interferências entre peças e conjuntos, como visto nos casos 2 e 4. Outra vantagem é redução de tempo de desenvolvimento de produto como nos é mostrado no caso 1.

Os mecanismos mecânicos podem ser facilmente simulados como apresentado nos casos 5 e 10, bem como a otimização da matéria prima utilizada no componente como vemos nos casos 2 e 13.

Uma unanimidade em todos os casos é a facilidade na visualização do conceito dos componentes, essa é uma das principais utilizações da prototipagem virtual.

Por fim a facilidade de transferência de informação, como demonstrado no primeiro caso, é outra das vantagens da prototipagem virtual.

No entanto os protótipos virtuais apresentam uma grande desvantagem que é a impossibilidade do contato físico com a peça, o que nos casos de prototipagem rápida se torna uma vantagem, e por serem peças físicas elas podem ser montadas

e testadas, verificando seu funcionamento e integração entre peças, como visto nos casos 4, 6, 7 e 12.

Outra vantagem da prototipagem rápida é que pode ser utilizada como produção final do item como no caso 4.

A possibilidade de utilizar diferentes tipos de materiais também é uma vantagem da prototipagem rápida, o caso 5 mostra essa utilização.

Apesar das vantagens, a RP apresenta algumas desvantagens como a necessidade de um modelo CAD, a diferença de material entre a peça final e a peça prototipada como mostra o caso 6 e a fragilidade das peças, o que pode causar a fissura das peças produzidas como visto no caso 6.

Desta forma devemos saber escolher qual é a melhor técnica para cada tipo de produto.

Para projetos que necessitam de análises visuais do produto e estudos de resistência, os protótipos virtuais são mais adequados, no entanto, projetos que necessitam de um contato físico com o usuário como testes de ergonomia e de montagem e interferência, os protótipos rápidos apresentam melhor resultado. Existem também casos em que ambos os processos são importantes, cada um com suas características. Em geral a RP é um processo subsequente a VP devido a necessidade de um modelo CAD para produção de uma peça em RP.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando a literatura e os estudos de caso, podemos verificar que a Prototipagem Virtual é uma ferramenta eficaz que auxilia muito o desenvolvimento de produtos. Utilizando as ferramentas apresentadas o projetista pode visualizar previamente os problemas e corrigi-los antes da fabricação das peças. Os principais resultados obtidos com simulações virtuais são os obtidos através de simulações CAE.

Já a prototipagem rápida deve ser priorizada com relação a prototipagem virtual para simulações de montagem, ajustes e verificação de interferências. Como é uma peça física, a PR permite uma avaliação ergonômica e tátil do produto.

Na prática a maioria das peças de prototipagem rápida sofrem com problemas nas propriedades mecânicas que não são iguais as dos produtos finais. Outro problema encontrado nesta tecnologia são os empenamentos, acabamento deficiente e ainda para algumas geometrias a necessidade de construção de suportes durante o processo de confecção do protótipo.

O contraponto para o uso dessas ferramentas é o alto custo inicial em softwares e estações de trabalho, além de treinamento para o uso correto dessas tecnologias.

Após analisar os estudos de caso, pode-se concluir que a PR é um processo subsequente a PV, no entanto é possível desenvolver produtos usando apenas PV. Isso se comprova pela constante busca da indústria em substituir protótipos físicos por virtuais.

Por fim, o uso da prototipagem virtual e protótipos rápidos estão cada vez mais no dia a dia dos projetistas, seja para projetos mais simples como para os mais robustos e complexos. A escolha do método para avaliação ou a combinação de dois ou mais métodos devem incluir considerações físicas, operacionais, tempo, custo, precisão e fidelidade da modelagem, a qualidade e o nível de detalhamento.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Ali et al. Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation. IFAC-PapersOnLine, v. 48, n. 3, p. 412-417, 2015.

ARTICEK, U.; MILFELNER, M.; ANZEL, I. Synthesis of functionally graded material H13/Cu by LENS technology; Advances in Production Engineering & Management; Volume 8; Number 3; September 2013; pp 169–176; Disponível em <http://dx.doi.org/10.14743/apem2013.3.164> acesso em 20 de maio de 2016.

AZUMA, R. et al. Recent Advances in Augmented Reality. Computer & Graphics, 2001.

BALASTRERO JUNIOR, J. O., Modelagem e organização de componentes mecânicos em sistemas CAD 3D com emprego de geometrias paramétricas. 2010. Monografia de mestrado apresentada a Universidade de Taubaté.

BAXTER, Mike. Product design. CRC Press, 1995.

BAXTER, M. Projeto de Produto: Guia prático para o desenvolvimento de novos produtos. São Paulo. Edgar Blucher, 1998

BERNARD, A. Virtual engineering: methods and tools. Journal of Engineering Manufacture, v.219, n.5, p413-421, 2005.

BEZERRA, Mariana Pereira. Avaliação de projetos de produto sob a ótica do usuário: protótipos físicos x virtuais e sua validade de uso. 2015. Monografia de mestrado apresentada na Universidade Federal de Pernambuco.

BLACK, R. Design and Manufacture-An Integrated Approach. London: Macmillan Press, 1998.

CANCIGLIERI JÚNIOR, O. et al. Processos de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos—uma abordagem comparativa. Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2007.

CECIL, J.; KANCHANAPIBOON, A. Virtual engineering approaches in product and process desing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.31, n.9-10, p.846-856, 2007

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Métodos numéricos para engenharia. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CHUA, C. K., Leong, K. F. and Lim, C.S. (2003), Rapid Prototyping: Principles and Applications (2nd edition), World Scientific Pub Co, March, 448p.

CHUA, C. K., THE, S. H. and GAY, R. K. L. Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing. Int J Adv Manuf Technol (1999) 15:597–6031999 Springer-Verlag.

DA SILVA, G. C.: Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Produto Automotivo e Diretrizes para Seleção de Protótipos Virtuais e Físicos, 2013. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

D'ISSY, M. D., “Softwares para todas as necessidades da indústria”, Revista CADesign, Ano 9, n. 96, pp. 28-32, Novembro 2003.

DAVIS, B. Ford developing virtual six year-old crash test dummy. Disponível em <http://www.caradvice.com.au/113848/ford-developing-virtual-six-year-old-crash-test-dummy/>. Acesso em: 10 de Maio de 2016

DE SORDI, José O.; VALDAMBRINI, Antoninho C. Aplicabilidade da realidade virtual no desenvolvimento de protótipos: análise de sua utilização na Volkswagen do Brasil. In: XXVI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2006, Fortaleza.

FERREIRA, José Carvalho. A study of advanced die-casting technology integrating CAD/ RP/ FEA for Zn castings. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 31, n. 3-4, p. 235-243, 2006.

FILHO, A. A., MÜLLER, A. C.; “Lucre mais com a aplicação do Método dos Elementos Finitos”, Revista CADesign, Ano 8, n. 90, pp.32-35, Maio 2003.

FORTI, F. S. D: Uma Avaliação do Ensino da Prototipagem Virtual nas Graduações de Design de Produto do Estado do Rio de Janeiro. 2005. 105p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRÜND, J., GAUSEMEIER, J., MATYSCZOK, C., RADKOWSKI, R. Cooperative Design Support within Automobile Advance Development Using Augmented Reality Technology. The 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design Proceedings, 2003.

GRIMM, Todd. User's guide to rapid prototyping. Society of Manufacturing Engineers, 2004.

GRIMM, Todd. Choosing the Right RP System. A study of seven RP systems, 2005.

GUILGEN, Carolina Araujo; FERRO, Gláucia Salles. Design de joias: cerâmica avançada e a prototipagem rápida na joalheria. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN-1983-1838, v. 1, n. 1, p. 141-156, 2015.

HENNESSEY, J: Hennessey Venom GT CFD renderings. Disponível em <http://lotusenthusiast.net/2009/09/hennessey-venom-gt-cfd-renderings.html>. Acesso em: 10 de Maio de 2016.

HOTZA, D. Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido. *Matéria* (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 1101-1113, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v14n4/a03v14n4.pdf>. Acesso em 20 de Maio de 2016.

KAMRANI, A. K.; NASR, E. A. *Engineering design and rapid prototyping*: Springer Science + Business Media, LLC, 2010.

KANITAR, P. F. *Análise do desenvolvimento dos sistemas CAD/CAE/CAM no Brasil nos diversos setores do conhecimento sob a ótica da propriedade industrial*. Dissertação de mestrado, Centro Federal de educação Tecnológica do Rio de Janeiro, 2005.

LEE, K. *Principles of CAD/CAM/CAE system*. Addison Wesley Longman, Inc., 1999.

MANDIĆ, Vesna; ĆOSIĆ, Predrag. Integrated product and process development in collaborative virtual engineering environment. *Tehnički vjesnik*, v. 18, n. 3, p. 369-378, 2011.

MOREIRA, M.E.; “Soluções que vão da concepção à produção final”, *Revista CADesign*, Ano 8, n. 85, pp. 16-23, Dezembro 2002.

MULLER, A.L. e SAFFARO, F.M. A prototipagem virtual para o detalhamento de projetos na construção civil. *Revista Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 105-121, jan./mar. 2011.

NETO, I. M.; VOLPATO, N. Um Estudo de Caso Sobre o Papel do Protótipo no Desenvolvimento de Produto. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 9., Curitiba, 2004. Anais... Curitiba: CEFET-PR, 2004. v. 1, p. 106-109.

NÖLLE, S., KLINKER, G. Augmented Reality as a Comparison Tool in Automotive Industry. IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2006.

OLIVEIRA, J. H. A. Avaliação das Mudanças Ocorridas no Desenvolvimento de Produtos Devidas à Utilização de Modelos Produzidos por Prototipagem Rápida. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PARÍZIO, T. Nova tecnologia: Ford desenvolve fábrica virtual. Disponível em <http://carplace.uol.com.br/nova-tecnologia-ford-desenvolve-fabrica-virtual/>. Acesso em: 10 de Maio de 2016.

PIRES, Gisely Andressa. O CAD 3D aplicado na validação de protótipos na indústria do vestuário. 2015. Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Design da Universidade Estadual Paulista.

PHAM, D.T e GAULT, R. S. A comparison of rapid prototyping Technologies. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 38, Issues 10–11, October 1998, Pages 1257–1287.

ROZENFELD, Henrique et. al. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo. Saraiva, 2006.

SABINO NETTO, A da C, Proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto de componentes moldados por injeção auxiliada por protótipos

físicos, 2003, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SAURA, C., “Aplicação da prototipagem rápida na melhoria do processo de desenvolvimento de produtos em pequenas e médias empresas”, Dissertação, Dep. Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de São Paulo, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2003.

SHERMAN, W., CRAIG, A. Understanding Virtual Reality: interface, application, and design, 2003.

Solid Edge Classic (UGS). Disponível em http://www.cadtresd.pt/solid_edge.htm. Acesso em 10 de Maio de 2016.

SOUZA, Adriano F. de. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações. São Paulo: Artliber, 2009.

SOUZA, Adriano F.de; COELHO, Reginaldo T. Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. In. XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto.

TERREO, M. O Uso De Protótipos Virtuais Na Validação De Projetos Mecânicos Complexos: Um Estudo De Caso No Setor Automobilístico. Artigo extraído da tese de mestrado de mesmo nome; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. *Rapid Prototyping Journal*, v.23, n.4, p.318-330, 2003.

VDI 3404. Generative fertigungsverfahren. *Rapid-Technologien (Rapid Prototyping)*. Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Düsseldorf, 2009, 48p.

VIARO, Felipe Schneider et al. Projeto De Produto Utilizando Processos De Modelagem Paramétrica, Prototipagem E Fabricação Digital. Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 4, p. 2375-2386, 2014.

Virtual Crash Testing. Disponível em <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-performance/virtual-performance-solution/virtual-crash-testing>
Acesso em 10 de Maio de 2016.

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J.R.L. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

ZORRIASSATINE, F.; WYKES, C.; PARKIN, R.; GINDY, N. A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. London: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2003.