

## 2. Panorama

### 2.1. O Design Assistido Por Computador

#### 2.1.1. A computação gráfica e o design assistido por computador – breve histórico

Segundo CUNHA [et al.] (1987) define-se Computação Gráfica (CG) como o conjunto de algoritmos, técnicas e metodologias aplicados com o intuito de tratamento e representação gráfica de informações por meio de criação, armazenamento e manipulação de figuras através de computadores e dispositivos periféricos gráficos.

O CAD, *computer aided design* ou design assistido por computador, corresponde à execução da atividade de projetar (concepção, análise e especificação detalhada de sistemas físicos a serem realizados), através da criação, manipulação e representação de modelos, através do uso de computadores (CUNHA, G. J. et al., 1987). Este sistema utiliza-se da computação gráfica como forma de tornar sua interface com o usuário mais dinâmica e intuitiva, facilitando e agilizando a relação homem-máquina, bem como o trabalho a ser executado.

As primeiras aplicações do computador como facilitador das etapas do projeto de engenharia, iniciaram-se no Instituto Tecnológico de *Massachusetts* – MIT – na década de 50, quando, pela primeira vez um *display* fora controlado pelo computador *Whirlwind I*, porém, se limitava à descrição de entidades geométricas em duas dimensões, à criação e manipulação de desenhos em terminais gráficos monocromáticos. Nesta mesma década a Força Aérea dos Estados Unidos também implementou um sistema de controle e comando de voo baseado em computação gráfica.

Em 1962, Ivan E. Sutherland apresenta sua tese de doutorado no MIT: *Sketchpad: a man-machine graphical communication system*, o que lhe deu a alcunha de “pai da moderna computação gráfica”. Neste trabalho, Sutherland descreve um sistema gráfico e prova a viabilidade da utilização do computador para desenvolvimento de projetos e desenhos (inclusive tridimensionais). Também neste ano foram introduzidos os primeiros terminais gráficos coloridos.

A década de 70 marcou-se pelo surgimento de uma nova geração de sistemas CG/CAD: baseados nos conceitos de Sutherland surgem os primeiros sistemas computacionais para a representação de objetos em três dimensões, era o início da modelagem virtual, o que trás inúmeras vantagens ao desenvolvimento de produtos como, por

exemplo: realizar a análise de forma geométrica para auxiliar a manufatura; realizar análise de interferências entre peças; definir volume e centro de massa do produto, entre outras.

Os anos 80, para suprir necessidades da engenharia, nos levaram a uma integração dos processos de manufatura por sistemas computacionais, integração denominada *Computer Integrated Manufacturing* – CIM. O CIM consiste na integração de cinco sistemas computacionais: planejamento de processos auxiliado por computador – CAPP; manufatura auxiliada por computador – CAM; inspeção auxiliada por computador – CAI; análise de engenharia auxiliada por computador – CAE; e o CAD, sendo este o ponto central, como visto na figura 8.

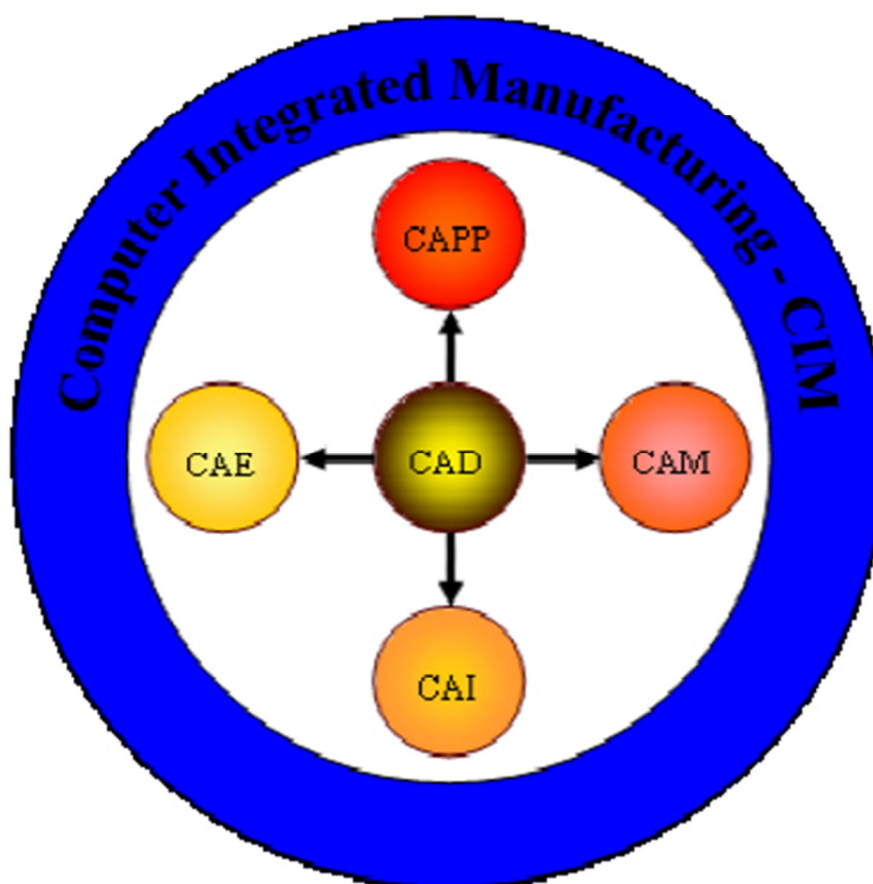


Figura 8 - Comunicação entre sistemas de auxílio às etapas produtivas por um software CAD (SOUZA & COELHO, 2003).

A febre do micro computador, principalmente, a partir da década de 90, trouxe grandes avanços, principalmente em relação à utilização, dos sistemas CAD. Antes explorado apenas por grandes indústrias, - como a automobilística e a aeroespacial - o desenvolvimento de softwares para o sistema UNIX, resultou na redução de custos e

necessidade de um usuário extremamente especializado, o que possibilitou a difusão do CAD nas pequenas e médias empresas.

Atualmente, com a constante miniaturização de componentes, a internet, e o constante desenvolvimento de softwares com código aberto, o CAD vem se espalhando entre o grande público. Um exemplo é o software *Google SketchUp* (figura 9). Comprado pela *Google* e distribuído gratuitamente na grande rede, este software é bastante simples e intuitivo além de comunicar-se muito bem com outros programas da *Google*, como, por exemplo, o *Google Earth*, possibilitando qualquer usuário modelar seus locais favoritos e publicá-los neste mundo virtual. A cidade de Nova Iorque, por exemplo, já tem grande parte de seus prédios e pontos turísticos modelados, possibilitando um “ passeio virtual” por suas ruas (figura 10).

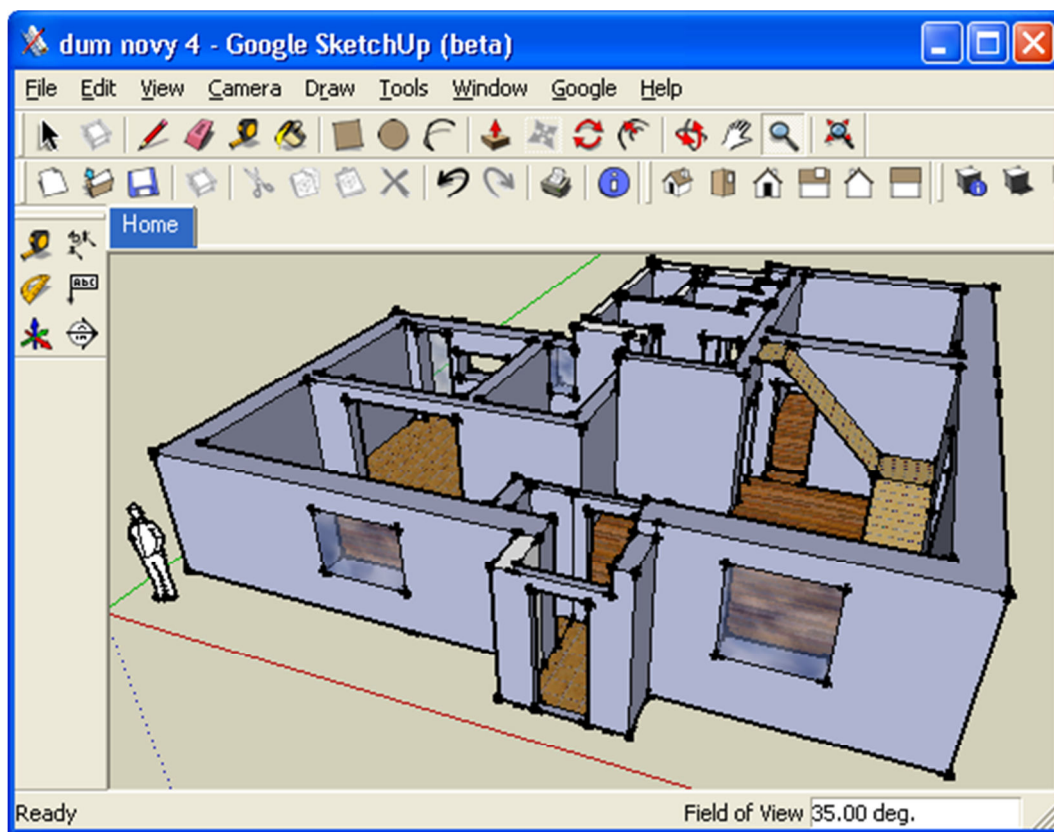


Figura 9 - Tela principal do software Google SketchUp

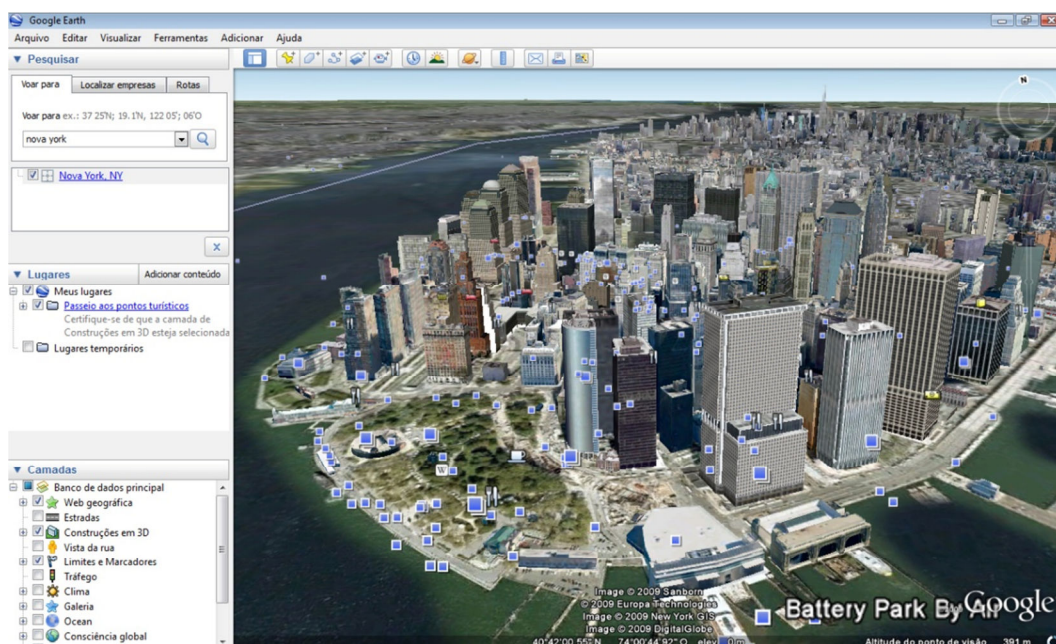


Figura 10 – Nova Iorque no Google Earth (Google Earth)

### 2.1.2. Principais características dos softwares CAD

Hoje em dia existem inúmeros softwares CAD com recursos tridimensionais no mercado. Podemos caracterizá-los, principalmente, pela forma utilizada para gerar as geometrias que é o núcleo do software. Define-se esses núcleos como (SOUZA & COELHO, 2003):

- a) *Modeladores de sólidos*: geram objetos tridimensionais sólidos que possuem centro de gravidade e volume. A modelagem baseia-se nas operações booleanas – soma, subtração, e intersecção (figura 11). Deste modo a peça final apresenta um histórico de ações executadas, denominado árvore topológica, facilitando alterações no objeto modelado, ao modificar as ações desta árvore. Modeladores sólidos não são adequados para modelagem de formas geométricas complexas. Baixo custo;

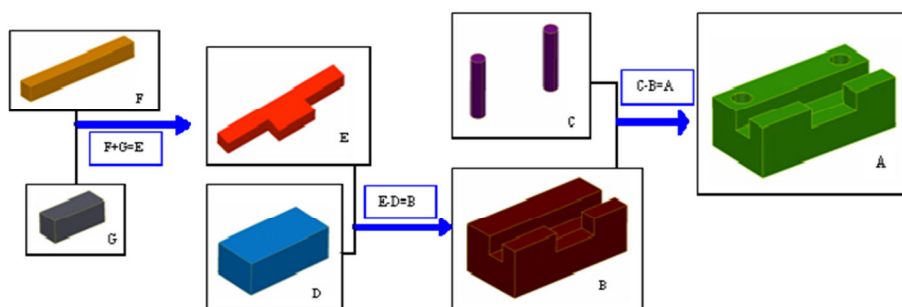


Figura 11 - Operações Booleanas (SOUZA & COELHO, 2003).

- b) *Modeladores de superfície*: Estes sistemas CAD fazem uso de formulações matemáticas complexas, conhecidas como funções *Spline*. Isto permite a modelagem tridimensional de formas geométricas complexas, que é a característica principal desta classe de sistemas CAD. As geometrias criadas são superfícies e não possuem espessura, e qualquer ponto desta superfície pode ser editado. As posições (direções X, Y, Z) de cada ponto, podem ser alteradas, mantendo o objeto tridimensional (Figura 12). Isto possibilita a modelagem de formas complexas. Cada ponto selecionado possui quatro vetores, laterais e longitudinais à superfície. As edições ainda podem ser realizadas por estes vetores, com duas possibilidades: alterações da magnitude do vetor (Figura 13a) alterações angulares do vetor (Figura 13b).

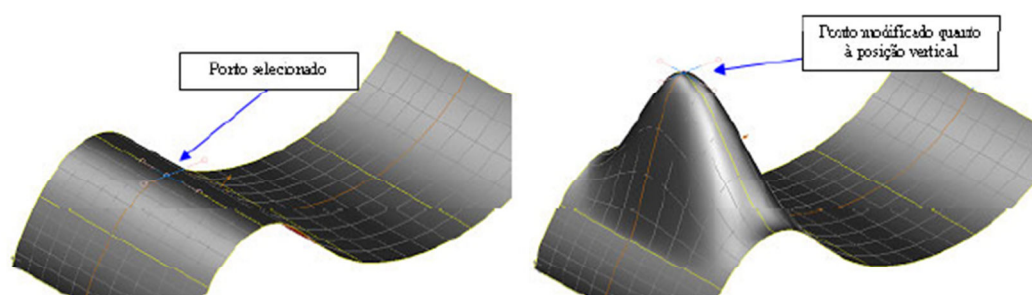


Figura 12 - Superfície editada pela alteração da coordenada Z de um ponto. (SOUZA & COELHO, 2003)

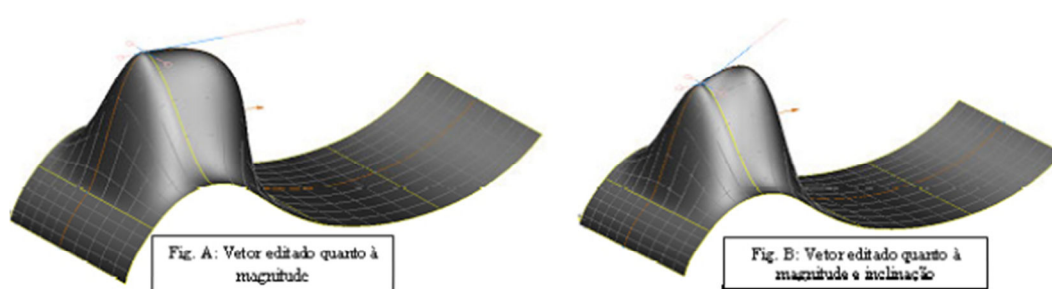


Figura 13 - Modificação da superfície através de vetores adjacentes a seus pontos. (SOUZA & COELHO, 2003)

- c) *Modeladores Híbridos*: São sistemas CAD robustos tendo como principal característica, a utilização de complexos algoritmos matemáticos, o possibilita a utilização de recursos das duas classes anteriores, de forma direta e integrada, apli-



cando a modelagem mais adequada para cada situação específica. Em geral, são sistemas de maior custo e requerem usuários mais treinados.

### 2.1.3. Classificação de Softwares CAD

Devido a variadas demandas de utilização de softwares CAD, os fabricantes desenvolvem diversos tipos de programas capazes de atender uma gama ampla de tarefas, no entanto, cada sistema CAD se adequa, ou foi desenvolvido especificadamente, para atender determinada aplicação com maior ênfase. Desta forma, SOUZA & COELHO (2003) classificam os sistemas CAD da seguinte forma:

a) *Low-end*:

- Representações geométricas em duas dimensões.
- Baixo custo de software e hardware;
- Aplicação genérica: Mecânica, elétrica, civil, arquitetura, etc.;
- Comunicação de baixa ordem com outros sistemas.

Exemplo: *Qcad* (figura 14)

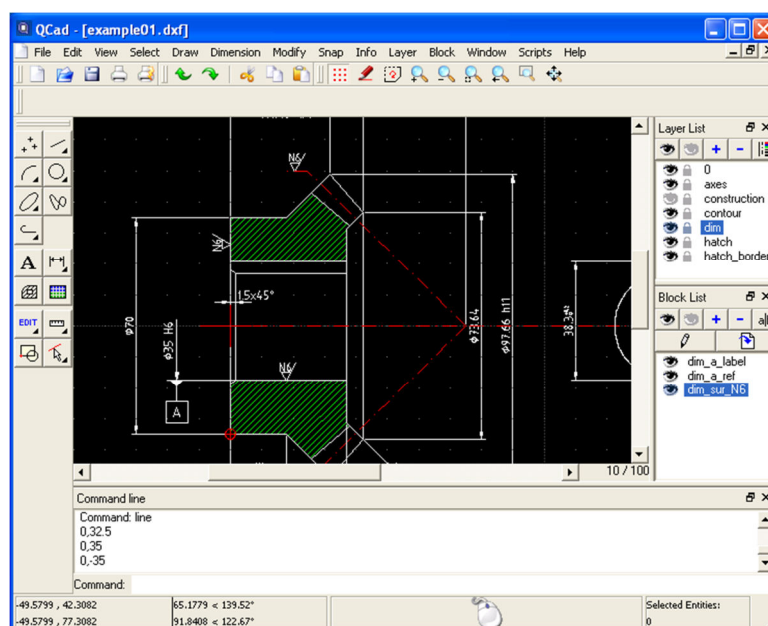


Figura 14 – Tela Principal do Qcad mostrando um desenho bidimensional genérico

b) *Middle-end*:

- Modelagem tridimensional – Em geral Sólidos ou superfícies;
- Objetos com volume, massa, centro de gravidade;
- Possibilidade de comunicação com outros sistemas;

- Geração de desenhos 2D diretamente do modelo 3D.

Exemplo: *Rhinoceros 3d*, *AutoCAD* (figura 15).

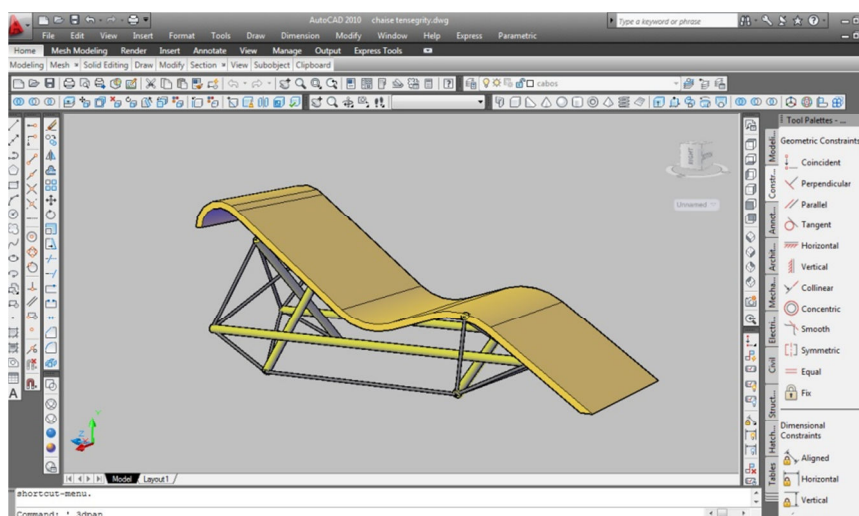


Figura 15 – Tela Principal do AutoCAD

c) *High-end*:

- Capacidade de modelagem híbrida;
- Recursos de visualização fotográfica;
- Integrados com diversos módulos, CAM, CAE, CAI, etc., em um único software.

Exemplo: *CATIA*, *SolidWorks* (figura 16).

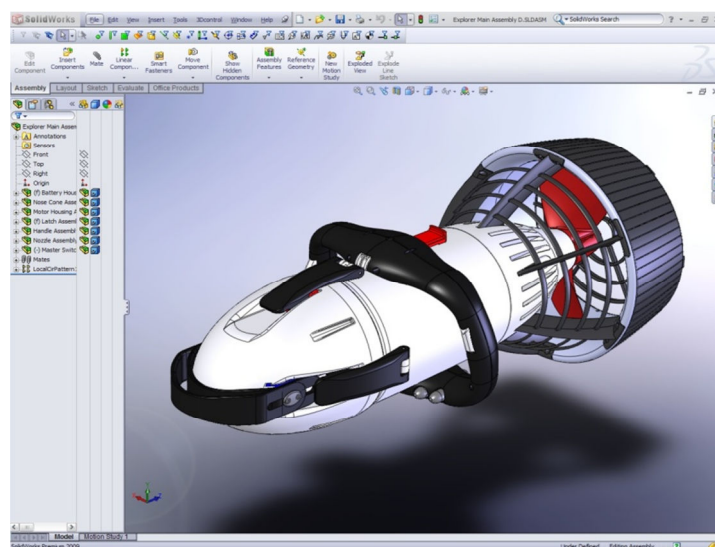


Figura 16 – Tela principal do SolidWorks

#### 2.1.4. A Aplicação do CAD no Desenvolvimento de Objetos

Como já explanado, os sistemas CAD, há muito, vem auxiliando no desenvolvimento de objetos. Em um primeiro momento, apenas indústrias de grande porte – como automobilística, aeroespacial, e naval - se utilizavam desta ferramenta como forma de facilitar e integrar sua produção. Com o surgimento da microinformática e a padronização de linguagens eletrônicas, as indústrias menores conseguiram acesso a esta tecnologia, sendo, hoje, ferramenta básica no processo de desenvolvimento de objetos na grande maioria das manufaturas dos grandes centros, e já se espalha para áreas e produtores de menor expressividade.

As vantagens da utilização de sistemas CAD são inúmeras (Tabela 1), principalmente no que diz respeito à redução de custos por protótipo e aceleração do ciclo de projeto, fazendo com que o produto seja lançado em um tempo reduzido, retornando investimentos mais rapidamente. Além disso, a armazenagem, a troca de informações entre equipes, e as alterações no projeto, se tornam muito mais rápidas, eficientes e precisas.

Por outro lado esta ferramenta ainda apresenta dificuldades de implementação (Tabela 1) - principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. Entre outros fatores o custo elevado de aquisição tanto de software como de hardware, tem sido o principal entrave do industrial brasileiro à adesão dos sistemas CAD, além disso, a mão-de-obra ainda é muito especializada e, conseqüentemente, custosa.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade na geração de imagens, principal meio de comunicação em áreas de projeto.</li> <li>- Facilidade de alteração de imagens previamente geradas</li> <li>- Produção de desenhos de melhor qualidade e em menor tempo</li> <li>- Antevisão de problemas que só seriam notados quando da construção do protótipo</li> <li>- Substituição de extensos relató-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Softwares e Hardwares</i> muito caros</li> <li>- Mão-de-obra muito especializada</li> <li>- Resistência natural a mudanças por parte da equipe</li> </ul>



<p>rios e desenhos em papel, por arquivos eletrônicos, facilitando armazenamento, distribuição e comunicação dentro da equipe.</p> <p>- Integração de todo o sistema produtivo incluindo envio direto do modelo virtual para a fabricação através de controle numérico computacional</p>	
--	--

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas CAD.

## 2.2. Experiência na aplicação do CAD em desenvolvimento de produtos

### 2.2.1. Experiência profissional em CAD I

A primeira experiência que tive na utilização da ferramenta CAD foi em uma fábrica de móveis de pequeno porte situada em Duque de Caxias, RJ, que tem como matéria-prima principal a madeira. Ingressando na empresa em 2005, fui o responsável pela implementação de tal tecnologia no desenvolvimento de novos produtos. Permanecendo até 2007, pude observar durante este período alguns acontecimentos bastante interessantes relacionados à utilização do CAD.

O primeiro foi relacionado ao desenvolvimento de conceitos de novos produtos. Anteriormente à utilização do sistema CAD, esse desenvolvimento era um tanto arcaico. A partir do primeiro *sketch*, normalmente disponibilizado em um quadro negro, este era fotografado, ou redesenhado – à mão livre -, e então cotado e enviado à produção do primeiro protótipo. A partir de então modificações iam sendo propostas e alterações iam sendo executadas no protótipo. Em média o desenvolvimento de um novo produto levava cerca de um a dois anos, e em torno de três protótipos eram executados até o modelo piloto. Após a aplicação da nova ferramenta, aquele mesmo primeiro *sketch*, era digitalizado e cotado. Após este passo o primeiro modelo virtual era executado, analisado, e alterado de acordo com as exigências do projeto. Após definidos os principais parâmetros dentro de âmbito virtual, projeto então seguia – através de plantas, vistas, perspectivas e desenhos esquemáticos - para a confecção do primeiro protótipo. Este protótipo já era, basicamente, o modelo piloto, pois pouquíssimas alterações eram necessárias.

Com isso, conseguiu-se reduzir o ciclo de projeto para algo em torno de seis meses, além da redução drástica no consumo de matéria-prima e mão-de-obra na confecção de protótipos.



Figura 17 – Modelo eletrônico



Figura 18 – Produto em uso

Outro fato bastante interessante observado nesta empresa após a introdução do CAD, foi a previsão de gasto de material em cada produto da linha. Através de análises oferecidas pelo programa – como massa e área do objeto – e análise do modelo eletrônico, conseguiu-se aferir precisamente o gasto de insumos como madeira, parafusos, vernizes, entre outros. Isto, na época, fez com que a diretoria percebesse um grande erro nos cálculos de custo unitário de cada produto, assim como na previsão de compra de matéria-prima.

Um terceiro acontecimento foi em relação à visualização dos produtos antes de sua fabricação, seja o protótipo, sejam modelos de linha. Inúmeras vezes renderizações dos modelos virtuais foram empregadas na publicação de novos produtos para imprensa, e na confecção de *layouts* para que os clientes pudessem visualizar como ficariam os móveis em seus ambientes.



Figura 19 – Layout eletrônico



Figura 20 – Layout de uso

### 2.2.2. Experiência profissional em CAD II

A segunda experiência que tive na utilização da ferramenta CAD foi em outra indústria de móveis de pequeno porte também situada em Duque de Caxias, RJ, que tem como matérias-primas principais madeira, bambu, junco, taboa, e aço. Ingressei na empresa em 2008 e permaneci durante um ano. Como no caso anterior, por ter uma utilização de CAD um tanto quanto primária, pude observar alguns acontecimentos quando da implementação mais objetiva desta ferramenta.

O método de concepção era muito parecido com o da outra fábrica, porém, nesse caso já era aplicada a ferramenta CAD em desenhos bidimensionais, o que aumentava a precisão e clareza quando do envio para a confecção do primeiro protótipo. Com a introdução do CAD tridimensional, houve a possibilidade de gerar mais desenhos, inclusive esquemáticos como perspectivas explodidas, o que possibilita a distribuição dos diversos componentes para os setores de sua fabricação – serralheria, marcenaria, bambu e estofaria - em um mesmo momento, além de tornar a documentação de fabricação muito mais didática e compreensiva, agilizando assim o processo de fabricação e montagem. Um fato bastante interessante foi a geração de desenhos de peças complexas em escala real, facilitando e aumentando a precisão do produto final.



Figura 21 – Modelo eletrônico



Figura 22 – Produto em uso

## 2.3. Tecnologia CAD no LILD e sua Pré-sistemática

### 2.3.1. A Metodologia do LILD

No LILD – Laboratório de Investigação em Living Design – os estudantes são estimulados principalmente a desenvolverem uma atitude experimental em relação ao problema colocado. Para isso, recorre-se a concretização de modelos físicos do problema proposto, durante todo o percurso de desenvolvimento do projeto. Ao invés do estudante utilizar somente conceitos já formulados, na captura de novos entendimentos do fenômeno amparados por imagens computadorizadas ou não, joga-se principalmente com a materialidade do mundo, com os materiais que serão informados pelas ações técnicas e intenções do designer.

Desse modo, perfaz-se uma continuidade na ação projetiva, não resultando o objeto de simples projeção de “*types*” que povoam a mente emissora. Ao contrário, a materialidade em transformação, participa com suas singularidades geométricas e físico-químicas, sob a ação dos campos eletromagnéticos e gravitacionais do entorno, no experimento particular que acontece, permitindo que se solidarizem as hipóteses consideradas, à natureza dos elementos em jogo.

Nesse caso, a discordância de alguma hipótese, no percurso do experimento, nunca é malvista, pois parte-se do princípio de que nas surpresas reside o aprendizado. Por outro lado, outras manifestações relevantes, são também exclusivas de experimentos, pois surgem das infinitas informações da fonte, ainda não oportunamente comunicadas por nenhum outro observador.

Catalogando imagens e explicitando-as na língua, pode o pesquisador tornar manifestas novas relações, ampliando o estado de segmentação do problema e o entendimento do objeto de estudos.

Nesse processo, o objeto, como meio organizador de um campo organizador, enquanto jogo de unidades observadas circunstancialmente, permite ao estudante-observador, uma apreensão fenomenológica e existencial, impossível de ser descrita, senão apenas vivenciada.

A produção do genérico, a partir dos experimentos particulares, constitui-se, para o LILD, na menos enganosa das maneiras de apreensão da realidade. Se o objeto em uso deve ser nosso leal companheiro, muitas vezes sujeito da situação, da qual nos tor-

namos objetos, nenhuma relação aproxima tanto o objeto projetado, da sua condição final de uso, quanto o experimento imediato com modelos físicos.

Esses modelos físicos, depois de confeccionados, passam a integrar o acervo do laboratório. Esta exposição permanente, para ALVARES (2008), serve de referência nas novas pesquisas, visto que os objetos não estão “fechados” às funções as quais foram projetados, assim, outras especificidades podem ser geradas para atender novas demandas. É, portanto, importante despir os objetos de seus significados previamente atribuídos, para, dessa maneira resignificá-los, atribuindo-lhe novos significados e funções. O seja, o modelo físico permite a concretização de ideias e possibilita o surgimento de outras.

Outra característica marcante do LILD está ligada a sua estrutura física. Como explicitado por RIPPER & MOREIRA (2004) e reafirmado por ALVARES (2008), o laboratório não apresenta divisórias internas ou qualquer tipo de repartição, o que torna a circulação de informações e a integração entre as pesquisas muito mais rica e fluída. Derruba-se o mito da autoria, afinal, “hoje, ninguém faz mais nada sozinho, as coisas são desenvolvidas por muitos, a partir de inúmeros dados” (RIPPER & MOREIRA, 2004, p. 6).

### **2.3.2. Cúpula Catenária de “Fibrobarro”**

Apesar de já utilizado em outras aplicações dentro do LILD, uma das primeiras utilizações do CAD registrada em uma pesquisa do laboratório nos é explicitada por Luciano Álvares em sua dissertação de mestrado – “Cúpula Catenária de ‘Fibrobarro’ estruturado com bambu - Concepção e Processo Construtivo” –, mais precisamente, em seu sétimo experimento (ver ALVARES, 2008, p. 81).

Partindo de premissas desenvolvidas em experimentos anteriores, principalmente no estudo com modelo em gesso, o pesquisador se utiliza do *software Rhinoceros* para gerar a geometria do objeto em estudo – cúpula catenária. Após modelar tal geometria, através de hiperboloides de revolução em sentidos opostos, as linhas destas entidades foram, então, projetadas sobre a superfície do sólido, o que pode comprovar que a geometria era formada por parábolas inclinadas e descentradas em relação a um eixo vertical (figura 23).



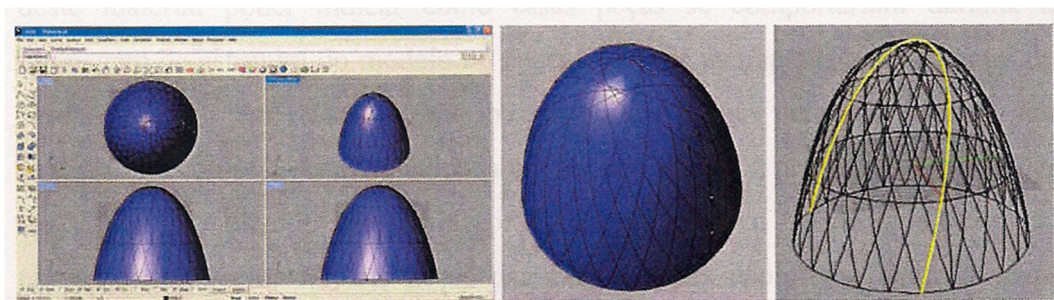


Figura 23 - Estudo no software *Rhinoceros* - 28 divisões - e a parábola geratriz da forma – (ALVARES, 2008)

Com esses dados em mãos, pode-se constatar que para gerar o modelo físico eram necessárias peças de apenas um tamanho. O passo seguinte foi a definição das medidas dos segmentos da curva, definidos pelo cruzamento das peças subsequentes. Esses tamanhos serviram de base para o desenho eletrônico da peça que foi enviado para corte em uma plotadora laser em papel Kraft 180g (Figura 24), facilitando e agilizando, e muito, a construção física do experimento sete (Figura 25).

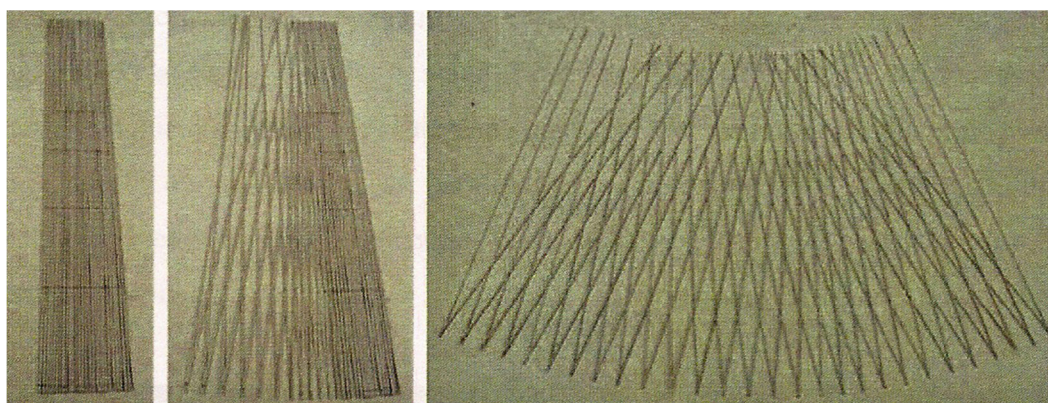


Figura 24 - modelo da estrutura pantográfica em papel *Kraft* 180g – (ALVARES, 2008).

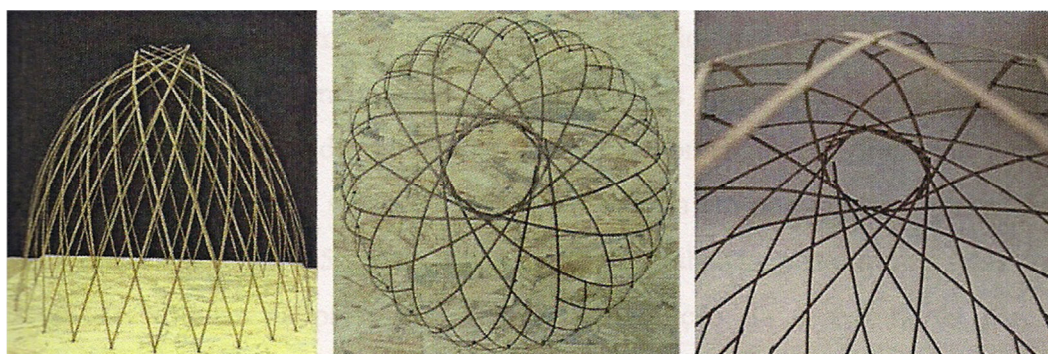


Figura 25 - Vistas do sétimo experimento finalizado - (ALVARES, 2008).



Portanto, conforme as palavras do próprio autor:

Um fato muito importante a ser destacado é que o desenho da estrutura não nasceu no computador, sua utilização deu-se pelo fato desta ferramenta possuir um grau de aferição perfeito, não podendo ser alcançado de maneira simples com modelos muito reduzidos. Quando de sua elaboração, todo o entendimento da forma e o partido adotado para a estrutura pantográfica já estava lançado, a grande vantagem foi a confirmação de algumas suposições e a possibilidade de fazer rearranjos muito rápidos. (ALVARES, 2008)

### 2.3.3. A Arquitetura das Bolhas

Posterior ao trabalho de Luciano Álvares, a pesquisa de Daniel Malaguti Campos - explanada em sua dissertação de mestrado “Design de estruturas reticuladas de bambu geradas a partir de superfícies mínimas” – é a que até o momento mais se utilizou do sistema CAD. Uma grande diferença em relação ao trabalho de Álvares, é que Campos, ainda que de forma embrionária, começa a aproveitar esta nova ferramenta como auxílio na concepção formal de novos objetos.

Devido à necessidade de reutilização de parte dos elementos estruturais do antigo laboratório para a confecção do novo espaço (ver CAMPOS, 2009), surge a demanda por estudos de organização desses elementos. Uma vez encontrada a nova disposição preliminar das barras para a montagem da estrutura do novo LILD (concretizada em modelo pelo pesquisador João Bina), Campos inicia uma série de desenhos esquemáticos eletrônicos dessa forma básica inicial, como visto nas figuras 26 e 27.

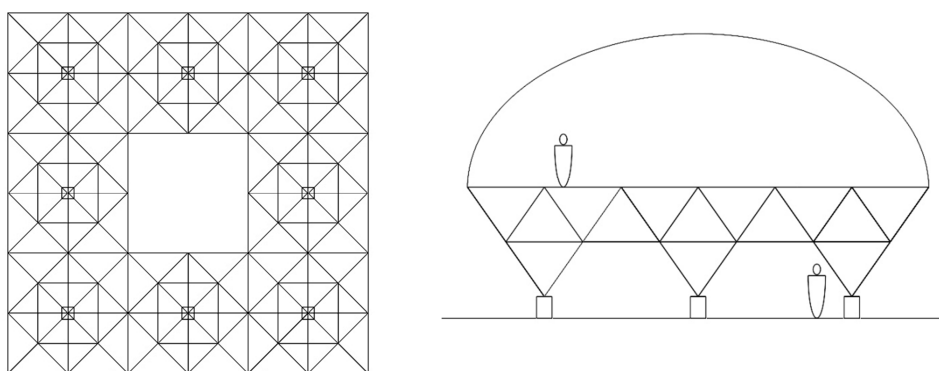


Figura 26 – Desenho eletrônico em planta e vista dos estudos do novo laboratório – (CAMPOS, 2009).

Tais desenhos foram de deveras importância para o início e desenvolvimento dos estudos sobre a cobertura desse novo espaço a ser montado. Utilizado em paralelo aos modelos físicos, auxiliou na elaboração de novas alternativas da utilização dos elemen-

tos modulares do laboratório anterior, assim como, no estudo esquemático dos parâmetros a serem utilizados nos estudos para a determinação da nova cobertura (figura 28).

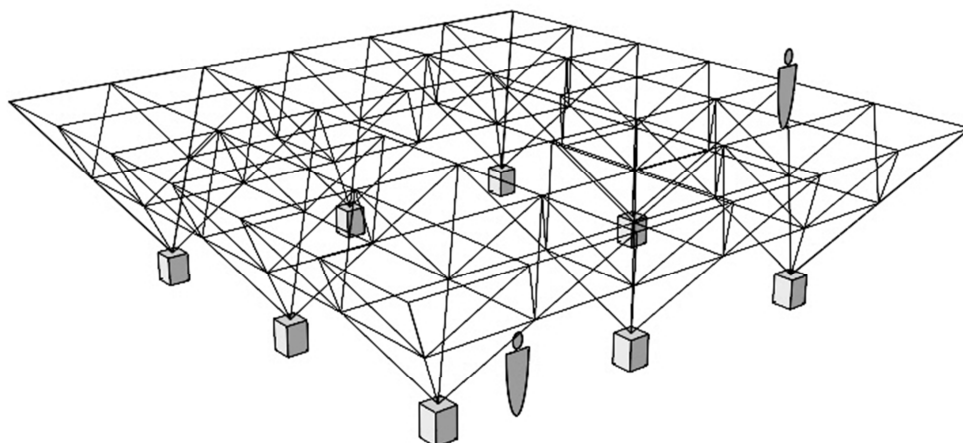


Figura 27 – Desenho eletrônico em perspectiva dos estudos do novo laboratório - (CAMPOS, 2009).

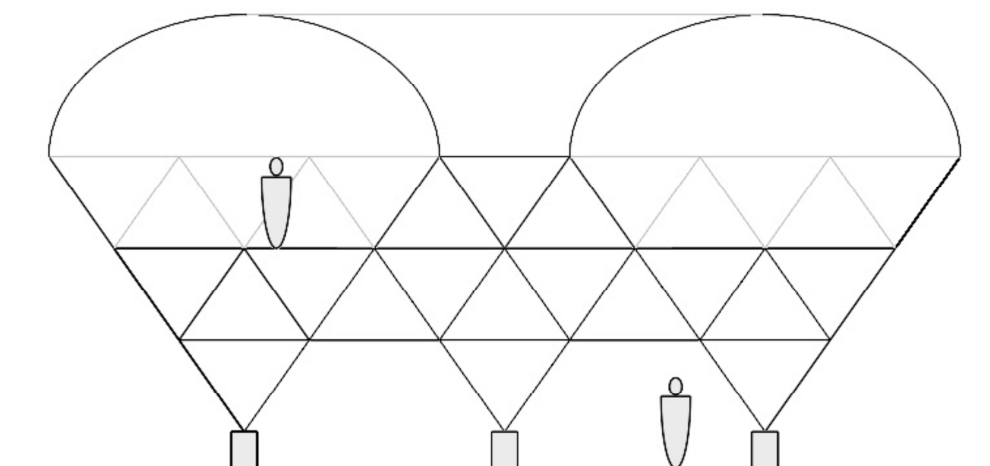


Figura 28 – Vista esquemática da nova cobertura e nova disposição dos elementos modulares – (CAMPOS, 2009).

Outra novidade mostrada por Campos foi a utilização do sistema CAM, saída em CNC (controle numérico computacional), e escaneamento 3D. Com dificuldades para obter um modelo físico estável das geometrias derivadas das bolhas de sabão, o pesquisador levou então imagens dos experimentos, modelos preliminares, e os parâmetros de projeto ao *Centro de Design Rio*, no *Instituto Nacional de Tecnologia*, com o intuito de gerar um modelo virtual que pudesse ser fresado em CNC. Este processo iniciou-se com

o escaneamento do modelo em gesso apresentado na figura 29, resultado dos estudos das superfícies mínimas em látex.



Figura 29 – Modelo em gesso escaneado para a geração de modelo eletrônico – (CAMPOS, 2009).

Como resultado gerou-se uma série de modelos eletrônicos, que como dito, buscavam solucionar a estabilidade da geometria dos modelos baseados nas bolhas de sabão. Dessa forma, em seu experimento dezessete, Campos demonstra a ferramenta CAD/CAM com saída em CNC. Novamente trazendo o modelo virtual como auxílio na concepção formal do objeto – visto que a principal concepção baseou na geometria das superfícies mínimas -, Campos gera algumas alternativas formais da cobertura, detendo-se em duas: uma com curvas mais suaves (Figura 30); e outra com curvas exageradas (Figura 31).

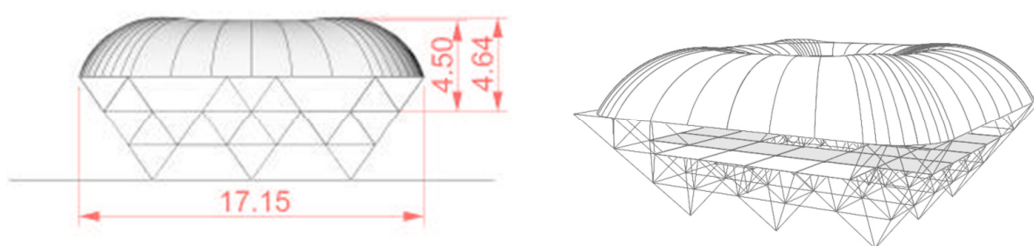


Figura 30 – Modelo virtual com curvas suaves na cobertura – (CAMPOS, 2009).

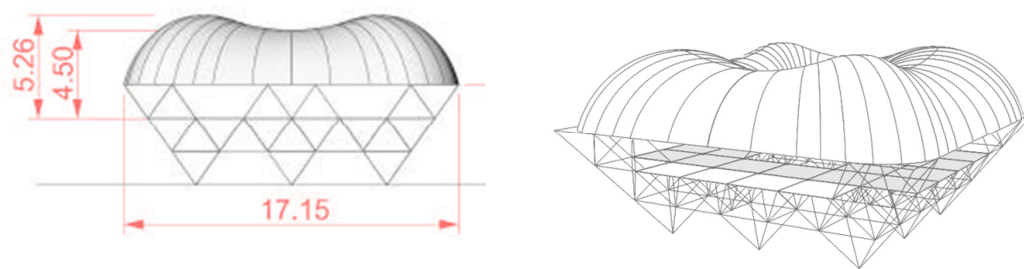


Figura 31 – Modelo virtual com curvas exageradas na cobertura – (CAMPOS, 2009).

Desse modo, opta pela concretização do modelo com formas mais exageradas, pois se a cobertura funcionasse nesta forma, funcionaria na mais suave também. O modelo virtual foi então levado ao Laboratório de Volumes do Departamento de Artes e Design PUC - Rio, onde, através de CNC, fresou-se o modelo físico em poliuretano para posterior confecção de molde negativo em gesso (Figura 32), a fim de gerar estudos de retículas em bambu para a cobertura do novo LILD (Figura 33).



Figura 32 – Modelo confeccionado em fresa CNC e molde negativo em gesso – (CAMPOS, 2009).

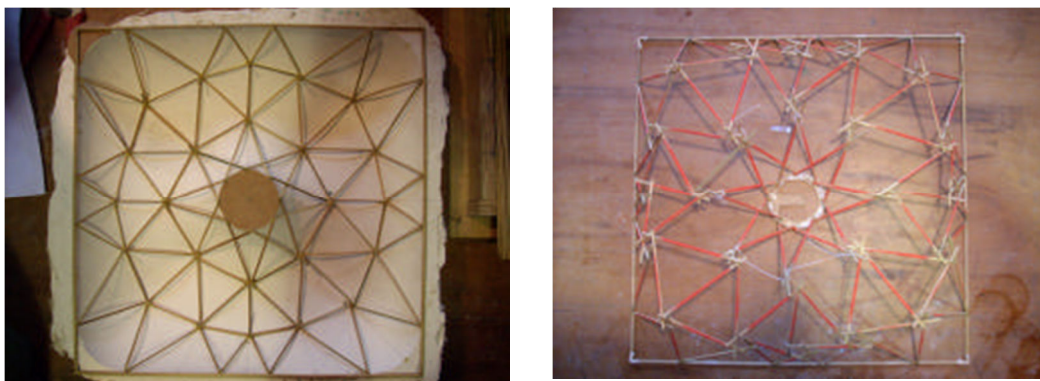


Figura 33 – estudos de retículas em bambu para a cobertura do novo LILD – (CAMPOS, 2009).

Sobre a utilização do CAD e dos modelos virtuais Campos, então, destaca:

(...) nos modelos virtuais utilizamos principalmente sua precisão, seja para gerar desenhos, plantas, vistas e cortes ou mesmo para nos fornecer medidas ou coordenadas que nos auxiliaram na confecção dos modelos físicos, que em alguns casos derivaram diretamente de modelos virtuais transformados em modelos físicos via Controle Numérico Computadorizado (CNC). (CAMPOS, Design de estruturas reticuladas de bambu geradas a partir de superfícies mínimas, 2009)