

Helen Rachel Aguiar Morais

**COMPLEXIDADE E CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA NA ARQUITETURA
CONTEMPORÂNEA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Linha de pesquisa: Técnicas e Processos de Produção do Ambiente Construído

Orientador: Professor Doutor Neander Furtado Silva

Universidade de Brasília

Dezembro 2010.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Arquiteta Helen Rachel Aguiar Morais

Dissertação de Mestrado defendida em 23 de dezembro de 2010 às 17h perante a comissão julgadora da faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura & Urbanismo, área de concentração Técnicas e Processos de Produção do Ambiente Construído.

Professor Doutor Neanter Furtado Silva (Orientador)

Professor Doutor David Rodney Lionel Pennington (Examinador)

Professor Doutor Gustavo Alexandre Cardoso Cantuária (Examinador)

Morais, Helen Rachel Aguiar.
Complexidade e customização em massa na arquitetura contemporânea./ Helen
Rachel Aguiar Moraes.
Brasília, 2010.
111 p.il.

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo, Universidade de Brasília.

I. Customização em massa – Fabricação Digital – Arquitetura Contemporânea.
Universidade de Brasília. CDS
II. Título.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Helen Rachel Aguiar Moraes

DEDICATÓRIA

Dedico a minha Mãe Francy e aos meus irmãos: Cinthya, Márcia, Mauro, Edineis e Raici e ao meu pai Raimundo, *in memoriam*. Estas são as pessoas que me apóiam diariamente e me ajudam a seguir.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a minha família.

Agradeço também ao Neander Furtado Silva e a Ecilamar Maciel Lima pela paciência, por me ajudarem a perseguir os caminhos corretos da ciência. Nos momentos de pressão me ajudaram a seguir e a superar todas as dificuldades. São grandes Mestres educadores, persistentes e visionários. Aos meus amigos, Ivonete, Luizinho, Fatinha e Larissinha, sempre estiveram presentes me fazendo companhia e com palavras de apoio, me lembrando que é bom seguir sorrindo e sempre feliz! A Ancar, empresa que trabalho atualmente, por permitir que conciliasse minhas inúmeras atribuições com a dedicação à ciência, em especial ao Hélio Ribeiro, Francisco Carpóforo e ao Venâncio, meu grande e fiel amigo! Agradeço ainda aos arquitetos Carlos Magalhães e Fernando Andrade que se dispuseram a contribuir gentilmente com esta dissertação. A todos os professores que tive durante ao período de estudos na Universidade de Brasília pela competência admirável. Ao Daniel e sua família pelas vezes que estive com vocês, e pude produzir muito deste trabalho em meio a muita alegria. Serão sempre queridos! Ao arquitetos e urbanistas Igor Monteiro e Félix Alves da Silva Junior pela preciosa ajuda neste trabalho. Aos Professores Doutores David Pennington e Gustavo Cantuária pelas preciosas contribuições. E por fim a empresa Gravia e ao Senhor Antonio Leite pela disponibilidade de contribuir com o experimento.

“(...) restaura-me o vigor.
Guia-me nas veredas da justiça por amor do seu nome.”
Salmos 23:3.

RESUMO

A arquitetura contemporânea em diversas partes do mundo tem sido produzida com recursos computacionais, o que tem permitido a construção de edifícios com formas complexas. O uso de tecnologia CAD/CAM permite obter menores custos na fabricação de componentes únicos e diferenciados na construção de edificações, com maior rapidez, precisão e controle. De um modo geral o uso de CAD na elaboração de projetos é amplamente conhecido entre os arquitetos e engenheiros. Sabemos que CAD/CAM na fabricação de componentes é utilizado há mais tempo nas indústrias naval, aeronáutica e automobilística. No entanto o uso de CAD/CAM para fabricação digital de elementos únicos e diferenciados na construção dos edifícios ainda é pouco comum entre os arquitetos(as) em Brasília, além da tecnologia BIM que também ainda é incipiente. Esta dissertação tem como objetivo demonstrar que a fabricação digital é economicamente promissora para a construção civil. Analisamos o papel do arquiteto ao longo da história, desde a época em que era mestre construtor.

Com base na revisão de literatura apresentamos exemplos de edifícios complexos projetados e construídos com uso de CAD/CAM. A seguir definimos como objeto do nosso experimento prático um pilar da Catedral de Brasília, devido ao fato de possuir forma complexa. Analisamos o processo através do qual a Catedral foi projetada e construída e elaboramos um modelo computacional tridimensional o qual foi fabricado manualmente por um serralheiro e digitalmente com uso de máquina CNC. Comparamos os resultados da fabricação manual e digital do pilar da Catedral em relação aos custos, tempo gasto e precisão, nesta ordem, o que demonstrou que os benefícios de CAD/CAM são bastante promissores.

Palavras-chaves: CAD/CAM, CNC, arquitetura contemporânea, geometria não-Euclidiana, construção, fabricação digital, mestre-construtor, novo papel do arquiteto.

ABSTRACT

Contemporary architecture in several parts of the world has been produced with computer resources which have allowed the construction of buildings with complex forms. The use of CAD/CAM technology allows obtaining lower costs than the serial ones in the fabrication of unique components in the construction of buildings faster, with more precision and control. In general the use of CAD in design is widely known among architects and engineers. It is known that CAD/CAM in the fabrication of components is used for long time in the naval, aerospace and car industries. However, the use of CAD/CAM in the digital fabrication of unique elements in building construction is yet rare among architects in Brasília. Also, in this context, BIM technology is not very common. This Dissertation aims to demonstrate that digital fabrication is economically promising for the construction industry. We analyzed the role played by architects along history since the time of master builders. Based on the literature review we presented examples of complex buildings designed and built with the aid of CAD/CAM systems. Following that we defined as an object for our research experiment one column of Brasilia's Cathedral because of its complex form. We analyzed the process through which this Cathedral was designed and built. This column was computer modeled and then it was fabricated manually by a blacksmith and also by CNC machine. We compared the results of the manually and digitally fabricated columns in relation to costs, production time and precision, and its potential for mass customization. This comparison showed that the benefits of the use of CAD/CAM are promising ones.

Key words: CAD/CAM, CNC, contemporary architecture, non-Euclidian geometry, construction, digital fabrication, master-builder, architect's new role.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Nível de influência das fases do processo de produção sobre os custos	7
Figura 3.1. Elevação Sansedoni	11
Figura 3.2: Detalhe externo do edifício Walt Disney Concert Hall.	16
Figura 3.3. NURBS.....	22
Figura 3.4. Curva Hermite.....	23
Figura 3.5. Curva Bézier.	24
Figura 3.6. Pontos de controle de NURBS.	25
Figura 3.7. Computador PDP-11.....	28
Figura 3.8. Primeiros exemplos com uso de CNC.....	31
Figura 3.9. A geometria do edifício Ópera de Sydney	36
Figura 3.10. Modelo digital do Peixe de Barcelona.....	37
Figura 3.11. Modelo aramado digital do Walt Disney Concert Hall	39
Figura 3.12. Exemplo de modelo sólido tridimensional digital	40
Figura 3.13. Detalhe modelo sólido com interferências das instalações	43
Figura 3.14: Parede de pedra fabricada com CAD/CAM.....	54
Figura 3.15. Estudos em modelo sólido tridimensional digital das estampas da superfície do material.....	55
Figura 3.16. Elemento gráfico de geometria Euclidiana	56
Figura 3.17. Concretagem dos Pilares da Catedral de Brasília	56
Figura 3.18. análises Gaussiana do Walt Disney Concert Hall, Sala dos Fundadores	58
Figura 3.19. Superfície NURB	59
Figura: 3.20. Junção de superfícies em um modelo sólido	60
Figura 3.21. Divisão de superfície.....	61
Figura 3.22. Subdivisões de definições paramétricas	62
Figura 4.1. “Bubble”, Pavilhão de exibição da BMW no Salão do Automóvel, Frankfurt, 1999 .	64
Figura 4.2. “Dynaform”, Pavilhão do Salão do Automóvel, Frankfurt, 2001	64
Figura 4.3. Processo de Estéreo-litografia.....	67
Figura: 4.5. Modelo tridimensional digital do “Dynaform”	70
Figura: 4.6. Fabricação de moldes para os vidros do “Bubble”	72
Figura 4.7. Montagem da estrutura e do vidro do “Bubble”	73
Figura 4.8a: Vista externa do edifício Walt Disney Concert Hall	74
Figura 4.8b: À esquerda Walt Disney Concert Hall e à direita o Pavilhão Dorothy Chandler	75
Figura 4.9: Modelos físicos desenvolvidos pela equipe de Gehry para auxiliar na escolha da acústica da sala de concerto.....	76
Figura 4.10: À esquerda estudo dos raios acústicos e à direita Dr. Toyota aferindo medidas no modelo físico	77
Figura 4.11. Modelo em escala real de parede de pedra, Bienal de Veneza	78
Figura 4.12. Modelo em escala reduzida, usado nos testes acústicos.....	79

Figura 4.13. Braço digitalizador usado para marcar os pontos racionais	79
Figura 4.14. Modelo elaborado em CATIA para a fachada em pedra do WDCH	80
Figura 4.15. Estrutura do “Peixe” de Barcelona e o modelo digital gerado em CATIA	82
Figura 4.16. maquete do edifício <i>Nationale Nederlanden</i> , Praga	82
Figura 4.17. usinagem dos blocos pré-moldados das Torres Düsseldorf e as torres	83
Figura 4.18 detalhe das Torres Düsseldorf	84
Figura 4.19. Estrutura do Museu Guggenheim em Bilbao, Espanha.....	85
Figura 4.20. Pavilhão BMW em Frankfurt, Alemanha.....	89
Figura 4.21. Mini Pavilhão BMW em Frankfurt, Alemanha	89
Figura 5.1. Ilustração de Lúcio Costa para o concurso do Plano Diretor de Brasília, DF	92
Figura 5.2. Croqui de Lúcio Costa do Eixo Monumental, Brasília, DF.....	93
Figura 5.3. Croqui de Oscar Niemeyer para Catedral de Brasília	95
Figura 5.4. Croqui de Oscar Niemeyer para Catedral de Brasília	95
Figura 5.5: Formas dos caixões perdidos	97
Figura 5.6. Concretagem dos pilares da Catedral de Brasília.	97
Figura 5.7: Escoramento dos pilares da Catedral de Brasília.....	98
Figura 5.8. Modelo tridimensional gerado para análise da estrutura.....	98
Figura 5.9. Detalhe de um pilar típico da Catedral de Brasília	100
Figura 5.10. Vista aérea do canteiro de obras da construção da Catedral de Brasília	101
Figura 5.11. Galpão onde foi desenhada a forma, em tamanho real, de um pilar da Catedral	102
Figura 5.12. Escoramento dos pilares da Catedral de Brasília	102
Figura 5.13. Escoramento dos Pilares da Catedral de Brasília.	102
Figura 7.1. Modelo tridimensional usado para o trabalho experimental.	108
Figura 7.2. Detalhe do modelo tridimensional do Pilar da Catedral de Brasília, modelado em 3D Studio Max.....	109
Figura 7.3. Vistas e seções bidimensionais do Pilar da Catedral de Brasília.....	110
Figura 7.4. Marcação de pontos de referência para fabricação manual.....	111
Figura 7.5. Corte na chapa para a fabricação manual.....	112
Figura 8.1. Modelo fabricado digitalmente, à direita e modelo fabricado manualmente, à esquerda.....	113

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. PROBLEMÁTICA	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	9
3.1 Geometria Euclidiana	17
3.2 Geometria não-Euclidiana	19
3.2.1 NURBS.....	21
3.2.2 Curvas Hermite e Bézier	23
3.3 Breve História da Tecnologia CAD (<i>Computer-Aided Design</i>).....	26
3.4 A Tecnologia CNC (<i>Computer Numerical Control</i>)	31
3.5 Tipos de modelagem: <i>Wireframe</i> e de Superfícies.....	39
3.5.1 Modelagem Wireframe – estrutura aramada	39
3.5.2 Modelagem de Superfícies	39
3.6 Visão geral do uso das tecnologias CAD/CAM e BIM	42
3.6.1 A história da tecnologia BIM (<i>Building Modeling Information</i>).....	46
3.6.2 Desenvolvimento de projetos em ambientes digitais, fabricação digital ..	52
3.6.3 As superfícies curvas: modelagem e análises avançadas	52
4. ESTUDOS DE CASO: PROJETOS COM USO DE TECNOLOGIAS CAD/CAM	63
4.1 Bernhard Franken - Pavilhões de exposições da Bmw, Frankfurt, Alemanha	63
4.2 Frank Gehry - Projeto Walt Disney Concert Hall, Los Angeles, Califórnia, EUA	72
5. A ESTRUTURA DA CATEDRAL DE BRASÍLIA	90
6. HIPÓTESE	103
7. TRABALHO EXPERIMENTAL	106
8. RESULTADOS OBTIDOS	112
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
10. SITES VISITADOS	121
11. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	122
12. ANEXOS	

1. INTRODUÇÃO

Pretendemos com este trabalho investigar os benefícios para o projeto de arquitetura provenientes do uso do computador como ferramenta auxiliar, cuja abordagem é denominada CAD (*“Computer-Aided Design”*). Estudaremos especialmente a projeção arquitetônica através da modelagem computacional tridimensional, a prototipagem rápida (*“RP – Rapid Prototyping”*) e o uso de tecnologia de Controle Numérico por Computador - CNC (*“Computer Numerical Control”*) para a fabricação digital em ambiente industrial por meio das tecnologias CAM (*“Computer-Aided Manufacturing”*).

A problemática envolve a necessidade de produzir formas complexas, singulares, não seriadas com precisão, rapidez e baixo custo em substituição àquelas produzidas em série. O uso da tecnologia CAD associada a CNC tem permitido ampliar as possibilidades projetuais e construtivas existentes nas edificações contemporâneas. Essas possibilidades têm como objetivo buscar atender os diversos requerimentos do mercado, como menor custo, rapidez na construção, o desenvolvimento de novas formas complexas e diferenciadas, além dos aspectos relacionados ao uso racional dos recursos naturais e aos resíduos gerados na construção dos edifícios. Neste contexto a projeção de uma edificação está diretamente relacionada à sua construção. Ao observarmos as construções e as compararmos com as práticas arquitetônicas dos profissionais projetistas, percebemos a existência de diversas lacunas importantes tais como: a necessidade de ampliar o controle das mudanças feitas no canteiro de obras durante a construção, o que gera edificações que divergem do que foi projetado; a antecipação das divergências nas instalações dos edifícios e sua arquitetura; melhor compreensão da forma projetada permitindo edifícios com novas formas complexas; rapidez na produção de informações claras, precisas e confiáveis para viabilizar a construção. Diante destas lacunas entendemos que os recursos computacionais permitem melhor desempenho do projeto para a construção porque permitem um grande número de análises a partir dos dados gerados no modelo sólido tridimensional.

A verificação de nossa hipótese teve como base a realização de dois experimentos, sendo um executado manualmente por um serralheiro e outro por meio de fabricação digital, conforme os procedimentos apresentados no capítulo seis. O objetivo dos experimentos foi verificar a possibilidade de obter melhores resultados com o uso de CNC em relação à precisão, rapidez e custo comparados com a execução manual do modelo pelo serralheiro. Ambos os experimentos tiveram por base o mesmo modelo digital tridimensional de um pilar da Catedral de Brasília. A forma do pilar possui geometria hiperbólica e nos permitiu analisar a complexidade da sua fabricação uma vez que possui curvatura sem centro de raios definidos, como um arco de circunferência teria.

Na revisão da literatura apresentamos uma breve análise retrospectiva da evolução do papel do arquiteto ao longo da história, enquanto detentor de amplo conhecimento da construção e sua posterior redefinição após o estabelecimento da prática de desenho arquitetônico. A partir do desenvolvimento do método de desenho através de projeções ortográficas, observou-se o afastamento do arquiteto da obra. Este passou a se dedicar mais ao ofício da projeção e representação gráfica. O advento das ferramentas computacionais tem permitido a integração das mesmas no ofício do arquiteto. Além do uso dos sistemas CAD abordamos o uso da tecnologia BIM e da fabricação digital por meio de CNC. No capítulo da revisão da literatura relatamos também, a título de exemplo, o desenvolvimento de alguns projetos elaborados e construídos digitalmente, apresentando obras dos arquitetos Bernhard Franken e Frank Gehry.

Afirmamos em nossa hipótese que o uso das tecnologias CAD/CAM permite obter custos menores na fabricação de componentes construtivos, tanto singulares quanto seriais, com mais rapidez, mais precisão e maior controle. O edifício pode ser construído com formas complexas com a mesma facilidade que usando formas geométricas simples. Os projetos dos edifícios contemporâneos, de um modo geral, são feitos em programas CAD, que possibilitam diversas análises, como por exemplo, estrutural e de conforto térmico. A tecnologia CAM há algumas décadas vem sendo amplamente usada pelas indústrias naval, automobilística e aeronáutica. Essas indústrias estão em estágio avançado no uso da fabricação digital se comparadas à construção civil. A verificação de

nossa hipótese resulta em indicação promissora dos benefícios das tecnologias CAD/CAM disponíveis para a construção civil.

Decidimos proceder a verificação de nossa hipótese com base na fabricação de um pilar estrutural da Catedral de Brasília através de método manual e outro digital associado ao uso de CNC. Escolhemos utilizar o modelo da Catedral de Brasília devido ao fato de possuir uma geometria complexa e apresentar maiores desafios em sua fabricação. No sentido de identificar os desenvolvimentos atuais com o uso das tecnologias CAD e CNC estudamos como exemplos os edifícios de Frank Gehry e Bernhard Franken. Os pilares da Catedral de Brasília têm em comum com essas obras citadas o aspecto de complexidade embora em níveis e formatos diferentes. Os dezesseis pilares estruturais da Catedral foram construídos quarenta anos antes e com muito menos recursos tecnológicos, mesmo assim resultaram em uma série de elementos hiperbólicos de difícil execução. Considerando esse contexto utilizamos um modelo digital tridimensional do pilar para executar dois experimentos distintos. Decidimos que um dos pilares seria fabricado pelo serralheiro manualmente e o outro digitalmente. Pretendíamos com a comparação destes dois métodos de fabricação verificar como se comportavam as seguintes variáveis: tempo de execução, custo e precisão em cada um dos métodos adotados. O modelo manual foi decomposto em desenhos bidimensionais dos quais foi gerada uma prancha impressa em papel apresentada ao serralheiro para a fabricação. O outro modelo digital foi enviado por meio eletrônico direto para a fábrica, que usou os seus dados para o corte em máquina CNC. Por fim comparamos os resultados encontrados. O modelo fabricado manualmente precisou de mais tempo para ser feito. O modelo fabricado na indústria com uso de CNC foi feito em um dia e o modelo manual foi feito em nove dias, com maior custo. Enquanto o modelo manual custou quatrocentos reais, o digital custou setenta e seis reais. Sendo que este último obteve menor precisão, quando o comparamos com o modelo digital tridimensional. Por exemplo, a base do triângulo do artefato cortado manualmente ficou menor cinco centímetros em relação às medidas de projeto, dos desdobramentos ou implicações a partir da análise dos dados. Devem ser ressaltados os ganhos da fabricação digital em comparação com a fabricação manual aos se considerar os custos desta última que requer

impressão e entrega dos projetos, para os quais geralmente são contratadas copiadoras terceirizadas e o volume é expressivo em obras de grande porte como shopping centers e aeroportos. Há também outras vantagens da fabricação digital tais como: maior controle e precisão dos recursos usados e dos objetos produzidos, evitando inconsistências, possíveis erros e melhor aproveitamento de materiais; melhora as condições de cumprimento dos prazos; apresenta benefícios ao meio-ambiente mediante redução de perda de materiais, bem como ganhos em relação aos custos também considerando que os componentes pré-fabricados digitalmente são enviados para o canteiro de obras no momento da execução, evitando desperdícios e custos gerados com a estocagem (transporte e aluguel de equipamentos); por fim mas não menos importante, a incorporação de novas ferramentas de projeto e fabricação digital que implica em adicionar novas e variadas possibilidades, na complexidade da forma, nas análises estruturais e no conforto do ambiente. No entanto a fabricação digital requer treinamento dos envolvidos no processo de construção de edifícios, dos operários e aos arquitetos(as), de forma a permitir-lhes utilizar o potencial das tecnologias CAD/CAM na construção civil.

2. PROBLEMÁTICA

A necessidade de produzir formas complexas, singulares, não seriadas com precisão, rapidez e baixo custo em comparação àquelas produzidas em série está se tornando realidade também para a área de arquitetura. Um dos paradigmas fundamentais da arquitetura moderna, predominante durante a maior parte do Século XX e especialmente difundido pela Bauhaus, consistia na adoção do anonimato como um princípio inerente da industrialização e da produção em série. Embora não haja consenso, certas tendências marcantes puderam ser observadas no movimento moderno, expressas particularmente através da Carta de Atenas, como por exemplo: não ornamentação, coberturas planas, formas retangulares, paredes brancas, janelas amplas (NUTTGENS, 1992, p. 167). Durante os anos setenta qualquer consenso mínimo sobre o significado de arquitetura moderna deixou de existir e esta passou a ser vista apenas como mais um estilo, aquele que predominou de 1920 a 1970 (NUTTGENS, 1992, p. 183). A arquitetura contemporânea, atual, particularmente o período a partir de 1990, é diretamente influenciada pelo uso da computação gráfica e fabricação digital. Os projetos desenvolvidos nos dias atuais são ousados e desafiam a gravidade.

Nos projetos desenvolvidos na atualidade, entendemos nesta dissertação, que incorporar novas ferramentas significa incorporar novas e inúmeras possibilidades. Os recursos computacionais permitem a fabricação computadorizada de artefatos a partir de desenhos e modelos virtuais. A indústria aeronáutica, naval e automobilística há vários anos têm usado este tipo de fabricação de modo rotineiro. Estes recursos digitais, se incorporados ao processo de produção do espaço edificado, possibilitam uma mudança fundamental de paradigma na arquitetura contemporânea. A indústria da construção tem se baseado, até agora, na produção em massa de componentes padronizados. Os elementos são produzidos como material genérico que será personalizado mais tarde em outra fase da vida do produto. Os componentes produzidos em massa são classificados em categorias definidas e produzidos em uma gama limitada de formas e tamanhos e armazenados e catalogados até

que venham, se vendidos, resultar em uma combinação de elementos em uma fábrica ou transformados em parte do edifício no canteiro de obras.

Como um novo paradigma utilizamos como conceito de customização em massa neste trabalho, a relação direta entre a tecnologia computacional CAD e a fabricação digital com uso de CAM por meio da tecnologia CNC. Desta forma é possível permitir que os elementos construtivos sejam produzidos para propósitos específicos, a fim de se tornarem elementos singulares em cada edifício. A economia obtida na automatização do processo significa que os custos de componentes singulares não são superiores aos componentes padronizados. Frequentemente eles podem até custar menos (FRANKEN 2005, p. 138.). Na produção seriada há consideráveis custos com estocagem de material, com os resíduos e excedente de produção que requerem gerenciamento e manejo específicos, os quais acarretam mais custos e desperdícios para a obra.

O projeto tem um elevado impacto sobre os custos diretos decorrentes da aquisição dos componentes (ou insumos), sobre o tempo de execução da obra e sobre a manutenção do edifício. O grau de influência do projeto sobre a produtividade e os custos de execução é na verdade decisivo para o patamar de custos que se deverá atingir. A gestão do projeto detém um potencial de controle dos custos determinados no projeto, com potencial para torná-los mais altos ou mais baixos. Nesta fase a possibilidade de influência sobre eles é elevada e os custos incorridos ainda são baixos se comparados com os custos globais e o ciclo de vida de um edifício (manutenção). A figura 2.1 abaixo demonstra que o desenvolvimento do projeto é uma fase do processo de produção com elevado potencial de determinação dos custos globais da obra até a manutenção do edifício.

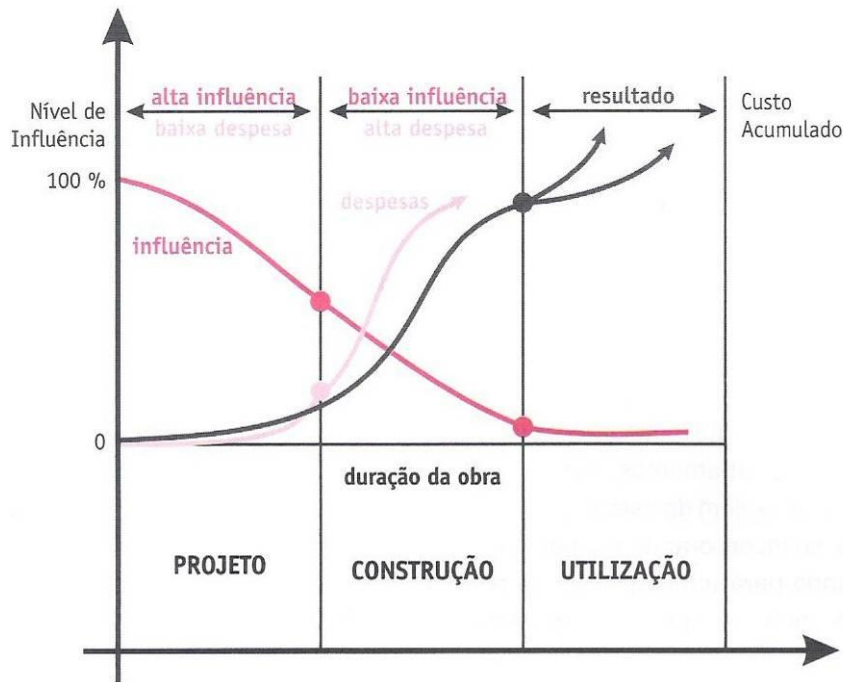


Figura 2.1 – Nível de influência das fases do processo de produção sobre os custos.
(BARRIE & PAULSON apud SILVA, 2003, p. 27)

No entanto a pouca informação do arquiteto quanto à existência de ferramentas de fabricação digital e seu uso distanciam a indústria da construção civil dos benefícios do processo de produção e fabricação digital. O potencial das ferramentas computacionais CAD, importantes no desenvolvimento de projetos, ainda é pouco explorado diante do que a indústria digital tem desenvolvido. A grande maioria dos profissionais usa as ferramentas computacionais (CAD) apenas para representação gráfica bidimensional de seus projetos. Poucos a utilizam, na indústria da construção civil, como ferramenta de fabricação e construção aliada à representação gráfica tridimensional com informação construtiva. A citação abaixo apresenta resumidamente informações atuais sobre o quadro da fabricação digital no país.

“Segundo o III Inventário do Parque de Máquinas para Corte e Conformação de metais o número global de equipamentos nesta área aumentou em 2,7% no período de 2006 a 2008. No mesmo período, o número de máquinas do tipo CNC aumentou em 44,4% (Cunha et al, 2008, p. 70-91), o que sugere um potencial tecnológico em rápida expansão e que deve a ser melhor explorado. (Artigo A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa sobre um caso brasileiro”. (SILVA, 2009, p. 3 e 4).

Segundo Silva a tecnologia CNC se mostra disponível e em crescimento. Este potencial mostra um aumento rápido em um prazo de dois anos no que diz respeito ao número de máquinas. “A maior parte dos dados do referido inventário (96,5%) foi coletada nas regiões sudeste e sul do Brasil” (SILVA, 2009, p. 4), o que evidencia maior disponibilidade dessa tecnologia nestas regiões brasileiras.

Considerando a lacuna sobre o conhecimento da existência da fabricação digital e seu potencial para aplicação ao projeto de arquitetura, de um lado, e a possibilidade de preenchimento da mesma através da utilização do CAD tridimensional associado ao CNC, de outro, poder-se-ia alcançar os benefícios relacionados a liberdade de formas, maior controle, precisão, rapidez, menores custos e “customização em massa” que afirmamos ser possível e queremos comprovar em nosso presente projeto de pesquisa.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O papel do arquiteto analisado pelos primeiros profissionais reconhecidos ao longo da história é muito debatido entre os autores no que se refere às evidências encontradas em seus desenhos. Na citação abaixo o autor argumenta que os antigos arquitetos gregos se concentravam nos aspectos práticos do trabalho embora tivessem responsabilidade pelo projeto.

“Há considerável debate sobre as técnicas usadas pelos arquitetos ancestrais gregos. Coulton argumenta que a maioria do trabalho dos arquitetos gregos envolvia aspectos práticos da edificação durante a construção; ‘no entanto, esta ênfase nos aspectos práticos do trabalho dos arquitetos gregos não significava que eles não tinham responsabilidade pelo projeto.’ (COULTON apud ROBBINS, 1997, p.10).

Mas este não é um argumento aceito completamente por Vitruvius. O desenho, segundo ele, não era um instrumento dominante, mas uma técnica associada a diversas outras “no ofício do projeto para a construção de edifícios pelos quais eram responsáveis” (ROBBINS, 1997, p.11). Além disso, convém ressaltar que a geometria tinha uso muito específico na solução dos problemas considerados difíceis.

Na idade média, segundo SHELBY, “o mestre de obras medieval combinava em si o equivalente ao arquiteto moderno, pedreiro, e supervisor de obra”, (SHELBY apud ROBBINS, 1997, p.12). Desta forma o desenho servia apenas para orientar os pedreiros na construção – apesar dos pedreiros ingleses terem desenvolvido grandes habilidades no desenho arquitetônico. Neste período houve grande proliferação de termos técnicos mais precisos usados para descrever os diversos componentes do edifício e sugere outro significado que servia ainda para comunicar com outros que estavam trabalhando na edificação. As orientações eram verbais e o ‘mestre construtor’ permanecia no canteiro de obras até o término das mesmas. “François Bucher havia sugerido, no entanto, que cada passo do projeto Gótico era concisamente e rigorosamente planejado e que desenhos de todos os tipos desempenharam um papel significativo nesse planejamento” (ROBBINS, 1997, p.11 e 12). Isto, se correto, coloca o projeto Gótico mais próximo ao desenho arquitetônico de hoje.

No século XIV, Franklin Toker descobriu um desenho, chamado de Elevação Sansedoni, que se assemelha a elevação como aquelas que o arquiteto desenha nos dias de hoje. Abaixo o autor descreve detalhes da geometria do desenho.

“A elevação de Sansedoni (...), descoberta por Franklin Toker, com este desenho anexado, sugere uma mudança na forma que os arquitetos trabalham concomitante com a mudança nos usos do desenho. (Ver Toker, 1985) Ele é ortogonal, desenhado na escala, provido de medidas dimensionais, acompanhado por anotações escritas para guiar a execução.” (ROBBINS, 1997, p. 13).

A argumentação acima de ROBBINS descreve um desenho chamado Elevação de Sansedoni. Este desenho, ilustrado a seguir na figura 3.1, mostra além da visualização gráfica da ‘fachada’ a existência e uso de técnicas de representação de projeto com o objetivo de instruir a construção. Os desenhos eram capazes de guiar a execução e de comunicar a obra com todos os envolvidos, o arquiteto passa a se dedicar mais ao ofício de projeção. Isto implica em um gradual distanciamento do arquiteto no exercício de atividades de projeção em relação à construção.

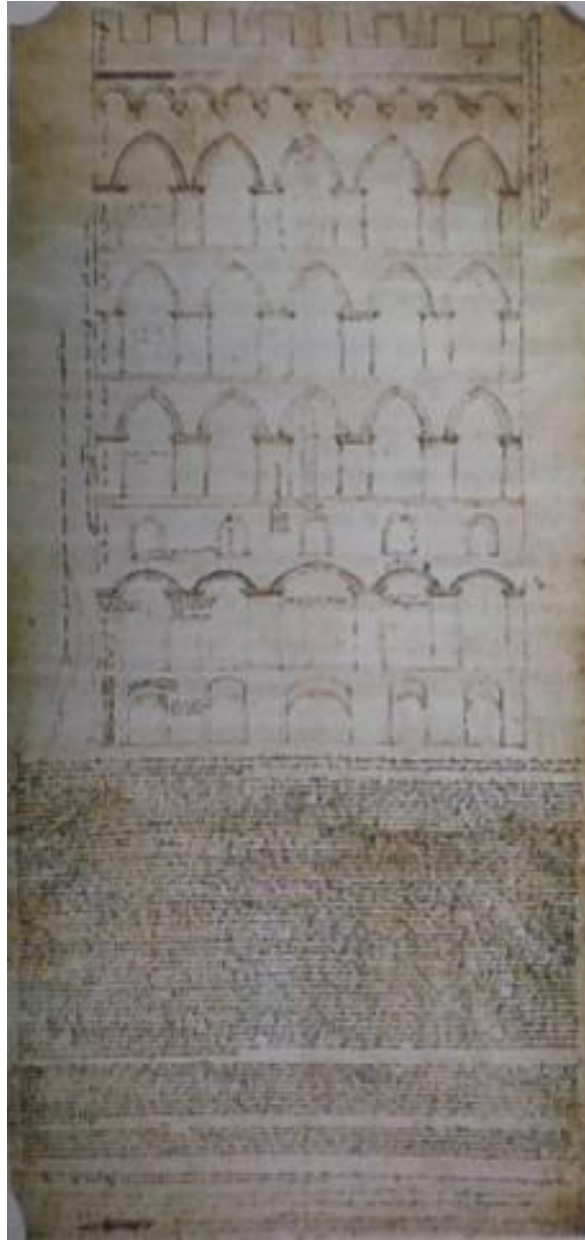


Figura 3.1. Elevação Sansedoni. Fonte: <http://www.mps.it/NR/rdonlyres/BFF3536D-82E7-445B-98D3-75C58E9E93B6/4807/002.jpg>, acessado em 28/03/2010.

A figura 3.1 acima ilustra uma seção da fachada do Palácio de Sansedoni, uma obra executada entre o século XIII e XIV. Ainda que com poucos detalhes, se considerarmos as atuais representações bidimensionais, o registro da elevação de Sansedoni, segundo Toker, testemunha uma tentativa inicial do arquiteto escapar das limitações profissionais da época. No entanto o objetivo não era retirar o arquiteto da obra.

“Ao mesmo tempo, a elevação de Sansedoni guarda o testemunho das tentativas iniciais do arquiteto para escapar das limitações tradicionais de sua prática. Como Toker declara “os relativamente primitivos

trabalhos de projetos usados pelos mestres Góticos incentivaram a especialização profissional, mas impedia firmar um distanciamento entre arquitetos e construtores. Esse distanciamento viria apenas com a perfeição do desenho técnico depois do meio do século dezesseis.” (TOKER apud ROBBINS, 1997, p. 16).

Na renascença os desenhos dos arquitetos tornaram-se mais artísticos. Eles passaram a experimentar, com expressividade, aspectos estéticos das construções, caracterizando o estilo, o tom, materiais empregados, além de medidas. Desta forma, desenvolviam “um meio de representação a que ambos, os arquitetos e leigos, pudessem responder.” (LOTZ apud ROBBINS, 1997, p. 18). Segundo Philibert Delorme, “o desenho foi essencial neste período para dar instruções aos pedreiros sobre a natureza do desenho e que deste modo seriam capazes de entender competentemente os projetos (...)” (WILKINSON apud ROBBINS, 1997, p. 19). Apesar desta observação, outros autores encontraram evidências de que Delorme considerou os pedreiros naquele período inferiores intelectual e socialmente, devido ao fato de estarem envolvidos com o trabalho manual.

O uso do desenho para representação da construção trouxe o que Raphael chama de ‘projetista independente’. Este novo profissional sem a devida formação nas técnicas construtivas passa a representar graficamente as idéias do arquiteto. A documentação gerada passa a ser a principal comunicação entre o arquiteto e o operário, ou seja, entre a concepção do projeto e a obra.

“Raphael: ‘com o aparecimento e emprego de projetistas independentes, às vezes, sem o treinamento nos ofícios construtivos, desenhos se tornariam o principal recurso de comunicação entre eles (arquitetos e operários) da edificação – uma ligação essencial entre a concepção e o entendimento do projeto, o que de fato permanecem até hoje.’” (JENKINS apud ROBBINS, 1997, p. 19).

Esta distinção social do papel do arquiteto, mencionada acima, começa a ser testemunhada nos finais da idade média e floresce na renascença, marcada com maior ênfase no desenho. Agora há efetivamente um distanciamento do arquiteto no canteiro de obras. O desenho passa a ser o elemento que distingue o construtor do arquiteto e redefine o papel de cada um de modo particular. O arquiteto que antes estava presente na obra e orientava os pedreiros ao mesmo tempo em que criava suas construções, passa a desenvolvê-las fora do canteiro

de obras. O arquiteto assume seu papel se concentrando nos ofícios projetuais, conforme citado abaixo.

“A transformação do papel e status dos arquitetos que começamos a testemunhar nos finais da idade média e que floresceu na renascença seria associada com muito maior ênfase ao desenho. Nos séculos seguintes, os arquitetos, tornaram-se mais e mais, profissionais distintos com status próprio e papel particular. Devido as mudanças na prática arquitetônica, primeiro empreendidas na renascença, o desenho fixou-se como o instrumento dominante do projeto.” (ROBBINS, 1997, p. 19).

Segundo ROBBINS, mais concentrados na representação de suas idéias, os arquitetos passaram a desenvolver o desenho ortogonal de representação geométrica criando planos, seções, elevações e os diversos recursos gráficos como conhecemos atualmente. Cada uma destas projeções ortográficas promovem diferentes tipos de informação sobre o objeto ou edifício que está sendo projetado e permitem ao arquiteto manipular diferentes aspectos do projeto.

“Os ‘Planos’ (...), “vistas presentes de uma fatia horizontal de uma parte do projeto podem representar os padrões e relacionamentos dimensionais de um piso ou planta baixa.” As ‘Seções’ (...) “são como planos exceto que eles apresentam uma visão de uma seção vertical.” Elevações (...) são como planos e seções exceto que elas concordam com a superfície do objeto sólido (representado).” (ROBBINS, 1997, p. 20)

O uso dessas representações ortogonais se torna a base a ser usada pelos construtores para concretizar o projeto dos arquitetos. Cada uma dessas técnicas de desenho pode ser feita em escalas, promover diferentes sombras, texturas e tonalidades para o uso de cor e linha, e variar de acordo com o interesse geral e amplo ao extremamente detalhado. O potencial de variação na abordagem do arquiteto para projetar torna-se aparente. (ROBBINS, 1997, p. 20 e 21).

Ainda, as perspectivas, em termos simples, são desenhos de objetos sólidos numa superfície bidimensional feita de tal forma que sugere suas posições relativas e dimensões quanto as vistas escolhidas de um ponto particular. Em termos geométricos, a perspectiva é uma projeção cônica em que as linhas de um objeto convergem para um ou mais pontos. A imagem é criada pela interseção da projeção das linhas convergentes com uma pintura plana

transparente. (DAIDALOS, 1985, p. 13). As perspectivas podem ser desenhadas de um número de pontos de vistas chamados de “a posição”, “ponto de vista”, “pontos de fuga”.

Apresentamos, a seguir, o argumento de ZEVI sobre as limitações da projeção bidimensional. Embora em sua época os recursos tridimensionais ainda não estivessem disponíveis ele apresentava a necessidade fundamental de projetar tridimensionalmente e também explorar a variável tempo.

“(…) a arquitetura não provém de um conjunto de larguras, comprimentos e alturas dos elementos construtivos que encerram o espaço, mas precisamente do vazio, do espaço encerrado, do espaço interior em que os homens andam e vivem. Em outras palavras, utilizamos como representação da arquitetura a transferência prática que o arquiteto faz das medidas (ortogonais) que a definem para uso do construtor.” (ZEVI, 2009, p. 18).

A citação acima apresenta uma contraposição que ZEVI faz em relação ao conceito de representação ortogonal das medidas da arquitetura. Ele apresenta de um lado as informações de altura, largura e profundidade que compõem a planta de uma edificação e de outro o espaço interior da mesma. Zevi argumenta que o objetivo da planta da edificação deve ser apenas para informar o construtor, isto é, para ele, ela não constitui a arquitetura.

“(…) Em arquitetura – raciocinou-se – existe o elemento “tempo”, ou melhor, esse elemento é indispensável à atividade de construção: (...), todas as obras de arquitetura, para serem compreendidas e vividas, requerem o tempo da nossa caminhada, a quarta dimensão.” (ZEVI, 2009, p. 23).

A citação acima ressalta que a experiência vivenciada através do elemento “tempo”, o percurso que pode ser feito no interior e exterior da edificação, proporciona inúmeros pontos de vistas, uma quantidade muito maior de informações do que aquelas medidas ortogonais, e uma muito maior compreensão do espaço projetado.

Um dos principais estudiosos na área de projeto auxiliado por computador e fabricação digital, o professor Loukas Kalisperis da Universidade Penn State, na Pensilvânia EUA complementa. Há várias vantagens, “as técnicas de visualização tridimensionais permitem aos estudantes (...) compreender o espaço e a forma, bem como texturas, contrastes, e cores, enquanto eles exploram o movimento temporal e espacial.” (KALISPERIS, 1996, p. 22).

KALISPERIS em seus estudos explora a sofisticação dos recursos contidos nos programas CAD. O desenho tridimensional digital como é descrito pelo professor da Penn State é tomado como instrumento sofisticado de trabalho e de produção. Resultado de diversos momentos da concepção do projeto que irá ao final do processo servir de meio de comunicação para aqueles que irão executar a obra. Não se trata mais apenas de uma representação da concepção de uma idéia. Os testes, análises e simulações vão além disso. Antecipam um profundo entendimento do projeto considerando a complexidade específica de cada edificação. Desta forma há um controle maior do objeto projetado no que se refere às constantes revisões e possíveis alterações, mesmo depois do projeto em fase de construção.

Segundo a citação abaixo, JODIDIO argumenta que o uso do computador na elaboração de projetos tem passado por um processo de maturidade. O que possibilita muito mais que uma mera representação gráfica permitindo transformar não só o processo de concepção, mas também de produção. A ortogonalidade da geometria Euclidiana é ampliada dando margem à liberdade da forma projetada para a construção. Ou seja, as tecnologias CAD/CAM dão condições, por exemplo, de se fazer mil peças de madeira únicas a baixo custo.

“O computador abriu novos horizontes que não são forçosamente aqueles que imaginávamos originalmente. Usado, como partida, por alguns como uma forma de visualização de estruturas cada vez mais extravagantes, a tecnologia digital aproxima-se rapidamente de uma espécie de maturidade que tem um efeito muito mais profundo e duradouro na arquitetura (...). A nova liberdade sugerida pelo computador é capaz de desembaraçar a arquitetura da sua caixa Euclidiana (...).” (JODIDIO, 2008, p. 14.).

Sobre o uso das tecnologias CAD na construção de formas não-Euclidianas, KOLAREVIC argumenta abaixo, que com as ferramentas computacionais os edifícios ganham maior liberdade na sua forma. As geometrias complexas curvilíneas podem ser produzidas com a mesma facilidade que a Geometria Euclidiana. Assim, o projeto de linhas ortogonais não é mais uma imposição das limitações da representação bidimensional, suplantado agora pela liberdade projetual e construtiva das formas complexas.

“A relação previsível entre projeto e representação tem sido abandonada em favor das complexidades computacionalmente geradas. Modelos de projetos capazes de consistentes, contínuas e dinâmicas transformações estão substituindo as normas estáticas do

processo convencional. Complexas geometrias curvilineares são produzidas com a mesma facilidade da Geometria Euclidiana das formas planares e cilíndricas, esféricas ou cônicas. (KOLAREVIC, 2003, p. 13.)

O método projetual representado por planos e seções assume um papel puramente analítico. Isto é, requer uma compreensão dos dados contidos e conseqüentemente a interpretação das informações de plantas e seções. Muitas vezes estas interpretações geram dúvidas e divergências de entendimento, além de impossibilitar a fabricação direta do arquivo digital. Ao contrário das representações tridimensionais que atendem ao requisito primordial de orientar a obra e ainda permite uma variação ilimitada na modulação. Condição importante para a fabricação de itens diferenciados produzidos em alta escala.

“O plano não mais “gera” o projeto; seções obtêm papel puramente analítico. Grades, representações e simetrias perdem sua antiga mola mestra, como variabilidade infinita tornando-se tanto factível, quanto modularidade, e a customização em massa apresentam-se como alternativa para a produção em massa.” (KOLAREVIC, 2003, p. 13)

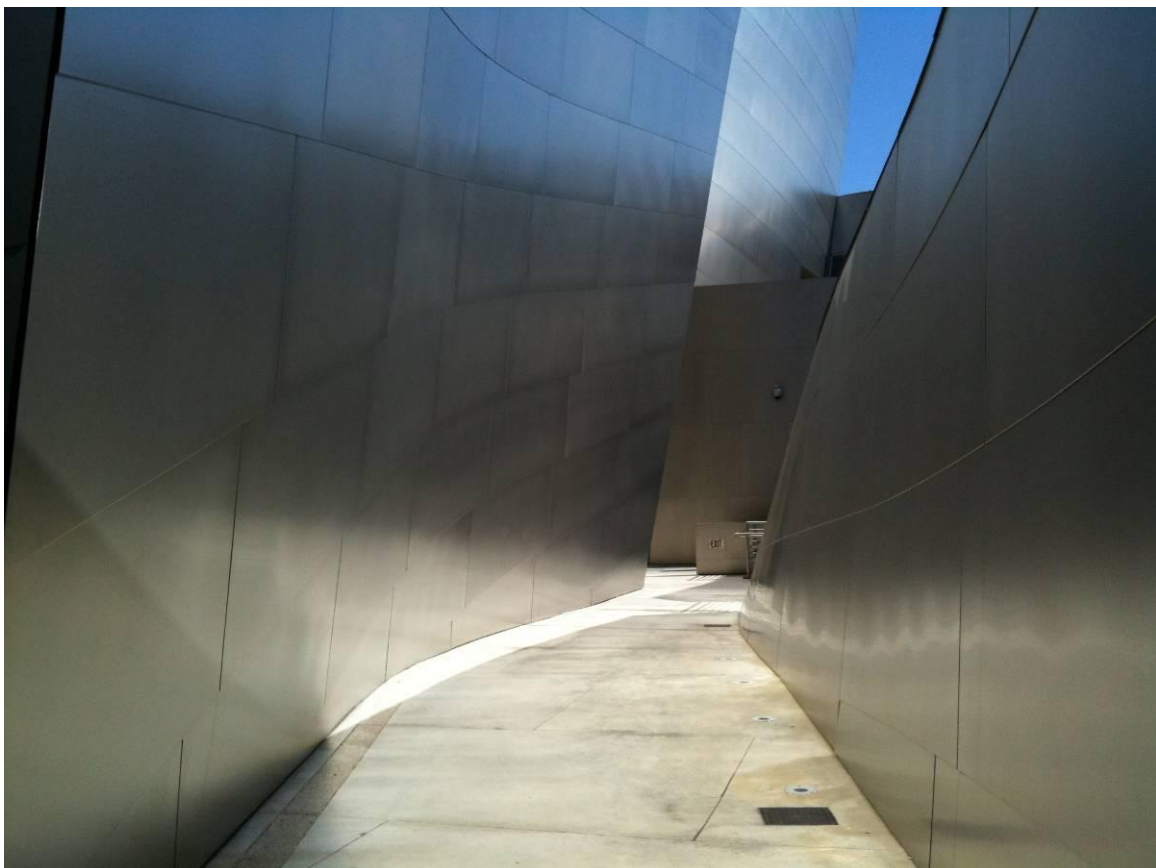


Figura 3.2: Detalhe externo do edifício Walt Disney Concert Hall. (MORAIS, H. R. A., 2010.).

A figura 3.2 acima mostra parte da fachada do edifício Walt Disney Concert Hall, em Los Angeles, cada peça possui dimensão e curvatura única. Serão apresentados mais detalhes deste edifício, bem como todo o processo de projeção e construção com uso de tecnologia CAD/CAM na seção 4.2 deste trabalho.

O projeto concebido em meio digital, segundo SHODECK, a exemplo do modelo CATIA desenvolvido para o WDCH pode ter suas partes fabricadas diretamente a partir dos dados digitais (SHODECK, 2005, p. 65). A citação abaixo descreve brevemente o relacionamento entre o projeto e a fabricação, ambos digitais, reforçando o novo paradigma da construção digital, com uso de tecnologia CNC. O projeto de arquitetura segundo KOLAREVIC agora poderá ser enviado do escritório do projetista direto para a fábrica e construído com propriedades mecânicas e digitais.

“A era digital tem re-configurado radicalmente o relacionamento entre concepção e produção, criando um *“link”* entre o que pode ser concebido e o que pode ser construído. Hoje o projeto dos edifícios não apenas nascem digitalmente, mas eles são também executados digitalmente diretamente do *“arquivo-para-fábrica”* através do processo de fabricação com uso de tecnologia CNC.” (KOLAREVIC, 2003, p. 31)

O uso de tecnologia CNC amplia as possibilidades criativas dos arquitetos. A forma não se limita mais ao que pode ser representado bidimensionalmente em projeto. O *“arquivo-para-fábrica”* como citado acima possui todas as informações necessárias para a produção e até montagem no canteiro de obras. Não há limite para o desenvolvimento de formas não-Euclidianas. Os projetos podem ser concebidos com grande liberdade porque a construção lhes garante fidelidade.

3.1. Geometria Euclidiana

A geometria planar (bidimensional), como nós conhecemos, foi inicialmente organizada no livro Os Elementos de Euclides. Este livro se tornou ao longo dos tempos a mais importante publicação, depois da Bíblia, em números de edição. Deu a Euclides o posto de mais importante autor sobre matemática (GILLISPIE,

2007, p. 706). O trabalho de Euclides foi considerado o mais excepcional por reunir em um único volume todos os manuscritos até sua época, como citado pelo filósofo Immanuel Kant, que escreveu em 1783: “Se quiserdes conhecer o que é matemática, basta olhardes os *Elementos* de Euclides.” (BICUDO, 2009, p. 16.). Como ocorre com outros grandes matemáticos, não há registros precisos quanto ao lugar e data de nascimento e morte do geômetra. BICUDO, o mais recente tradutor de *Os Elementos*, após dez anos de uma profunda pesquisa histórica traça uma possível cronologia:

- (1) Arquimedes viveu imediatamente após o primeiro Ptolomeu;
 - (2) Arquimedes menciona Euclides;
 - (3) Há uma história sobre algum Ptolomeu e Euclides;
- logo
- (I) Euclides viveu no tempo do primeiro Ptolomeu.
 - (4) Euclides medeia entre os primeiros discípulos de Platão e Arquimedes;
 - (5) Platão morreu em 347/a.C.;
 - (6) Arquimedes viveu de 287 a 217 a.C.;
- logo
- (II) Euclides deve ter atingido o seu acúmen por volta de 300 a.C. (o que acorda bem com o fato de que o primeiro Ptolomeu reinara de 306 a 283 a.C).
 - (7) Atenas era, à época, o mais importante centro de matemática existente;
 - (8) Os que escreveram *Elementos* antes de Euclides viveram e ensinaram em Atenas;
 - (9) O mesmo vale para os outros matemáticos de cujos trabalhos os *Elementos* de Euclides dependiam;
- logo
- (III) Euclides recebeu o seu treinamento matemático dos discípulos de Platão em Atenas. (BICUDO, 2009, p. 42)

Em seu livro *Os Elementos*, Euclides deduziu toda a sua geometria 372 teoremas e noventa e três construções a partir de cinco postulados, que aparecem acompanhados de vinte e três definições e cinco noções comuns. O assunto dos primeiros seis livros dos *Elementos* é a geometria plana. Euclides supõe a existência de pontos, retas e círculos como sendo os elementos básicos de sua geometria. (GILLISPIE, 2007, p. 709 e 710.). Com estes elementos básicos formatados, Euclides “teria posto em forma tudo o que fora adquirido à sua época, com mãos de grande sistematizador”. Estruturou toda a base matemática dos elementos geométricos básicos que compõe o que chamamos de Geometria Euclidiana. (BICUDO, 2009, p. 58.).

Um dos capítulos mais importantes da história cultural, apesar de pouco conhecido, é a transformação do primitivo conhecimento matemático empírico de egípcios e babilônios na ciência matemática grega. Segundo BICUDO, “quem se achegue descuidadamente a essa história terá a impressão de a geometria ter nascido inteiramente da cabeça de Euclides.” (BICUDO, 2009, p. 58.). O êxito do livro *Os Elementos* se deu no resumir, corrigir, dar base sólida e ampliar os resultados até então conhecidos que apagou, quase que completamente, os registros dos que o precederam. Um exemplo do modo como o trabalho de Euclides foi escrito, é a citação abaixo extraída do Livro I. Há um trecho de “Definições”, de *Os Elementos*.

1. “Ponto é aquilo de que nada é parte.
2. E linha é comprimento sem largura.
3. E extremidades de uma linha são pontos.
4. E linha reta é a que está posta por igual com os pontos sobre si mesma.
(...)
15. Círculo é uma figura plana contida por uma linha [que é chamada circunferência], em relação à qual todas as retas que a encontram [até a circunferência do círculo], a partir de um ponto dos postos no interior da figura, são iguais entre si.” (BICUDO, 2009, p. 97.).

Euclides abre os *Elementos* relacionando três tipos de princípios matemáticos: definições, postulados e noções comuns ou axiomas. Essa estruturação matemática em conceitos primitivos e derivados, axiomas e teoremas que são, na verdade, “a arquitetura” da nossa ciência. Para a época o trabalho de Euclides possui sofisticação que os historiadores remetem a influência dos filósofos gregos. A geometria de Euclides era, para a sua época, suficientemente ampla e descrevia os possíveis elementos geométricos entendidos pelos estudiosos.

3.2. Geometria não-Euclidiana

Em 1733 Giovanni Girolano Saccheri (1667 – 1733) escreveu o livro *Euclides ab omni naevo vindicatus* (Euclides libertado de todos os sinais maternos). Neste livro Saccheri questiona pela primeira vez as possíveis consequências de hipóteses diferentes das de Euclides. Diante disto viu a possibilidade da

existência da geometria não-Euclidiana. Até o século XIX, os filósofos de um modo geral, não acreditavam haver uma geometria além da delineada por Euclides. Saccheri também não estava convencido de seu feito, na sua época.

Johann Carl Friederich Gauss (1777 – 1855) foi o primeiro a entender as idéias modernas de Saccheri. Mas Bernhard Reimann (1826 – 1866) quem desenvolveu primeiramente a geometria não-Euclidiana ao demonstrar a não evidência do quinto postulado (“paralelismo”).

A evolução de Reimann foi lenta e sua vida, curta, mas o que falta em sua obra em termos de quantidade é mais que compensado pela grande qualidade. Um dos mais profundos e criativos matemáticos tinha fortes inclinações para a filosofia. Seu estilo era conceitual, não algorítmico, em um grau muito maior do que o de qualquer matemático precedente. Não tentava omitir suas idéias sob o amontoado de fórmulas. Mais de um século depois, seus artigos ainda continuam tão atuais que qualquer pesquisador da área pode tê-los sem precisar fazer comentários históricos e com intenso prazer.

Eugênio Beltrami com a publicação *Essay on an interpretation of non-Euclidian Geometry* (Ensaio numa interpretação de geometria não-Euclidiana) em 1868 transformou completamente o mundo da física e astronomia. Demonstrou que linhas curvas poderiam aproximar-se. Mostrou, também, que a geometria esférica poderia parecer a planar, e que espaços curvados poderiam se assemelhar ao Euclidiano, ou seja, superfície plana.

“O trabalho de Gauss, Lobachevsky, Reimann, von Helmholtz, e outros matemáticos e físicos mais tarde, mostraram que o espaço não é apenas curvo, mas também multidimensional.” (KOLAREVIC, 2003, p. 14) Este espaço multidimensional, define uma geometria complexa com diversas abordagens. A partir desta nova compreensão espacial emergida das geometrias não-Euclidianas novas possibilidades e potencialidades também se abrem na arquitetura. Uma nova arquitetura, de espaços deformados possível de ser concebida tridimensionalmente no espaço cartesiano e experimentada com movimento (tempo e espaço).

“Como concepções arquitetônicas espaciais se movem a partir de três dimensões do espaço Cartesiano para a quarta-dimensão contínua da interação entre espaço e tempo, outras dimensões, outras concepções de espaço começam a abrir possibilidades intrigantes, que podem ou não oferecer novas potencialidades através da arquitetura. Uma arquitetura de espaços deformados multidimensionais movidos além da mera manipulação de volumes e formas no domínio dos eventos, influências e relacionamentos de múltiplas dimensões”. (KOLAREVIC, 2003, p. 15)

O entendimento das concepções arquitetônicas se amplia com experimentações geradas da interação espaço e tempo. KOLAREVIC cita acima que o projeto desenvolvido tridimensionalmente permite a criação de cenas por meio do movimento “dentro” do espaço arquitetônico ainda em projeto. A quarta-dimensão, tempo, proporciona experiências diferentes durante o “passeio” na arquitetura. Uma nova arquitetura dinâmica de formas deformadas livremente. A experiência “vivenciada” pela concepção arquitetônica de formas livres passa a ser não mais estática, mas ganha uma compreensão multidimensional.

3.2.1 NURBS

NURBS é uma equivalente digital dos rascunhos *splines* usados para desenhar curvas complexas nas seções transversais dos cascos de navios e fuselagem de aviões. No passado, construtores de embarcações construíram modelos reais ou próximos das dimensões reais, utilizando longas e estreitas ripas flexíveis de madeira (*Spline*). Estas ripas permitiam a flexão para se atingir a forma geométrica desejada. Os artesões deformavam esta *Spline* amarrando pesos, chamados por eles de *ducks*, em pontos específicos. A forma geométrica obtida por este processo resultava em uma curvatura suave, obedecendo ao posicionamento e ao peso dos *ducks*. (SOUZA, 2004, p. 45-46.).

Estas superfícies com curvaturas complexas, descritas matematicamente como NURBS (Curvas Racionais Não-Uniformes) são definidas como a razão de duas equações polinomiais, isto é, duas funções básicas. Cada função básica afeta uma única seção curva na proximidade do ponto de controle associado, e estas

seções são delimitadas por nós. Abaixo as figuras 3.3 ilustram a definição de NURBS.

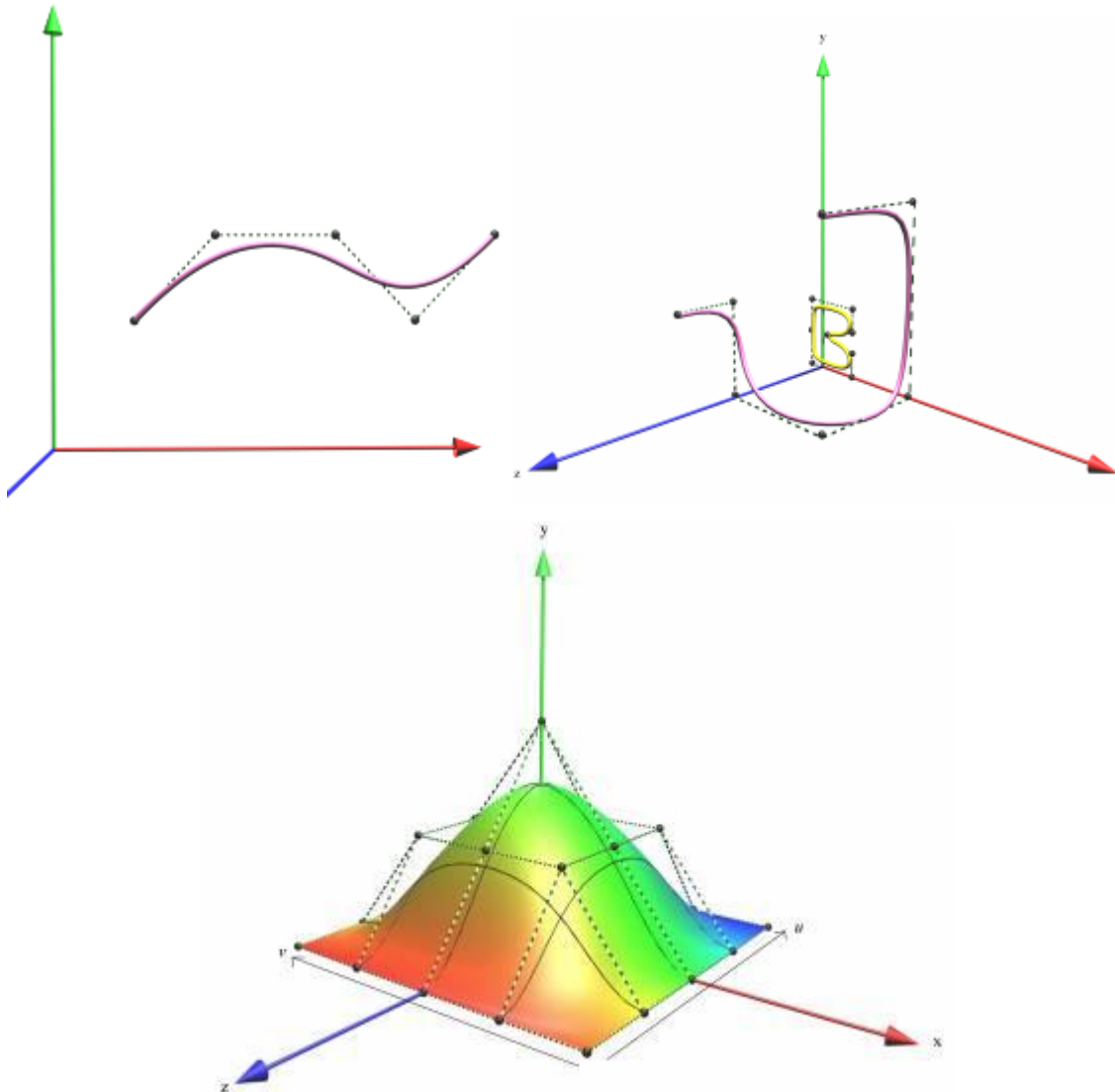


Figura 3.3. NURBS. Fonte: http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/x3d/spec/ISO-IEC-19775-X3DAbstractSpecification_Revision1_to_Part1/Part01/components/nurbs.html, acessado em

A introdução dos softwares de modelagem digital no projeto de arquitetura permitiu uma nova abordagem. A geometria Euclidiana dos discretos volumes representados no plano Cartesiano cede espaço ao atual uso de “topologias”, “plano de borracha”, geometria de curvas contínuas e superfícies que são características proeminentemente da arquitetura contemporânea. (KOLAREVIC, 2003, p. 16).

Outra curva *spline*, como subcategorias de NURBS, é tipicamente avaliada na modelagem de software. Curvas *Bézier*, nomeadas por Pierre Bézier engenheiro

francês automobilístico, quem as inventou. O objetivo de Bézier era auxiliar a fabricação de painéis de automóvel, produzido pela empresa na qual trabalhava, a *Renault*. Esta foi a primeira utilização de sistemas computacionais para modelagem de superfícies em projetos mecânicos. (SOUZA, 2004, p. 52.).

3.2.2 Curvas Hermite e Bézier

Esta é uma das primeiras representações matemáticas de curvas não-planares finitas, o matemático francês Charles Hermite, que desenvolveu seus trabalhos no século XVII, definiu a curva utilizando uma equação polinomial. Há dois pontos e dois vetores que determinam sua forma, como ilustra a figura 3.4 abaixo (SOUZA, 2004, p. 48):

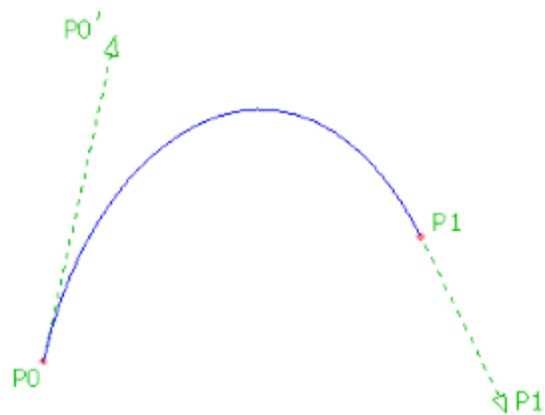


Figura 3.4. Curva Hermite. Fonte: SOUZA, 2004, p. 48.

A geometria proposta por Hermite utiliza um interpolador controlado por quatro fatores, a cada intervalo de dois pontos, representados pelos próprios pontos de início e final da curva (P_0 , P_1), e os vetores tangentes à curva nestes pontos, definidos como (P_0' , P_1'). Estes fatores representam as condições de controle da curva, através de um polinômio de terceiro grau.

O controle preciso das tangentes de entrada e de saída da curva é essencial para a “suavização” da curva total. Para manter a continuidade de uma curva, suas respectivas tangentes de saída e entrada devem possuir a mesma direção. A utilização e edição dos pontos e dos vetores tangentes são úteis para a

modelagem de formas complexas. No entanto, utilizando a metodologia de Hermite, os valores dos pontos e de suas derivadas dificultam a utilização prática desta técnica.

Para suprir as carências da metodologia de Hermite, Bézier utilizou um polígono de controle em substituição às condições de contorno (P_0 , P_1 , P_0' e P_1') utilizadas por Hermite. O polígono é aproximado por um polinômio cujo grau é o número dos vértices do polígono (pontos de controle) menos um. A figura 3.5 abaixo ilustra a curva de Bézier em azul e o polígono de controle de quatro pontos que a descreve. (SOUZA, 2004, p. 50 e 51)

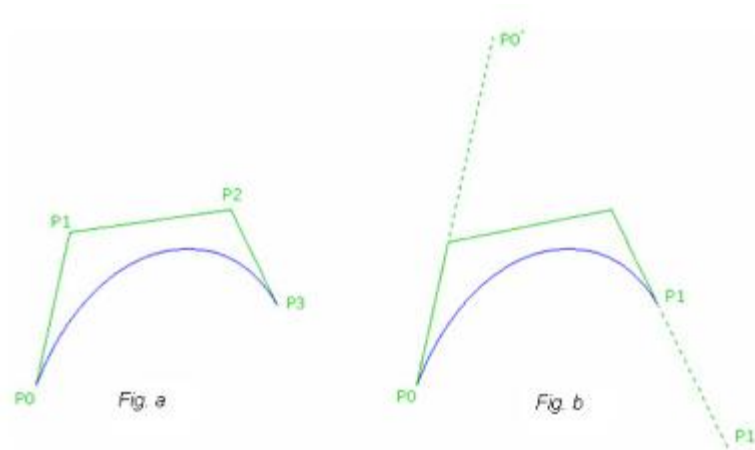


Figura 3.5. Curva Bézier. Fonte: SOUZA, 2004, p. 51.

O polígono de controle de Bézier propicia melhor controle da curva gerada, se comparado ao método desenvolvido por Hermite. Alterações da curva são realizadas pela edição dos pontos que definem o polígono de controle. A curva passa pelo primeiro e pelo último ponto e são tangentes ao primeiro e ao último segmento do polígono de controle. Há inconvenientes nas metodologias desenvolvidas por Hermite e Bézier. Apenas modificações globais na curva são possíveis de realizar. (SOUZA, 2004, p. 52)

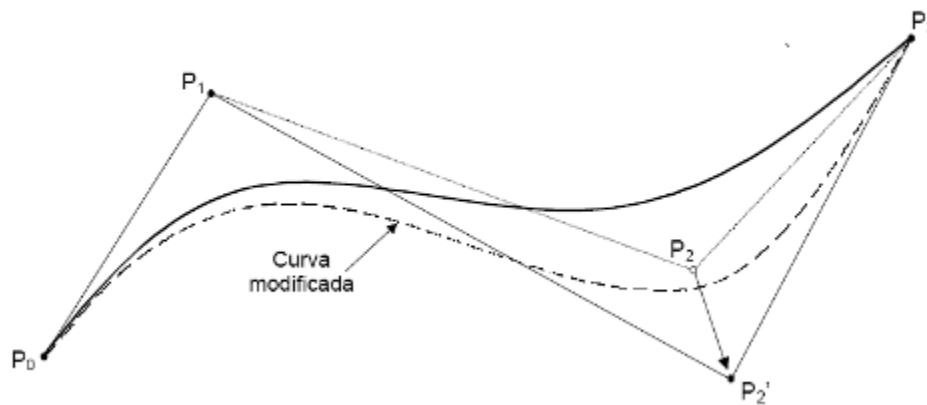


Figura 3.6. Pontos de controle de NURBS. Fonte: SOUZA, 2004, p. 53.

Como demonstrado na figura 3.6 acima, movendo-se o ponto P_2 do polígono de controle para a posição P_2' , toda a curva é alterada. Outro inconveniente do método de Bézier é o fato do grau do polinômio estar atrelado ao número de pontos de controle. Um polinômio de grau elevado representa maior esforço computacional. Outras formulações matemáticas baseadas no método de Bézier continuam em desenvolvimento pela indústria de programas gráficos tridimensionais. O objetivo é aperfeiçoar os cálculos e representação gráfica de curvas e superfícies em sistemas computacionais.

O uso da geometria não-Euclidiana com a facilidade dos recursos computacionais permite a construção de formas livres. Como citado abaixo por KOLAREVIC, usando uma quantidade mínima de informação e com 'poucos passos' as formas complexas podem ser desenvolvidas com eficiência. A maioria dos atuais programas de modelagem digital possui NURBS.

Do ponto de vista computacional, NURBS fornece representação eficiente de dados das formas geométricas, usando uma quantidade mínima de informações e relativamente poucos passos para modelar a forma computacional, que é a razão pela qual a maioria dos atuais programas de modelagem digital se vale de NURBS como um método computacional de construção de superfícies complexas e, em alguns modelos, inclusive modelos sólidos. (KOLAREVIC, 2003, p. 15)

Os recursos computacionais possibilitam maior agilidade na geração das geometrias complexas. Os programas CAD atualmente disponíveis no mercado, possuem cada vez mais recursos para um cálculo preciso de linhas e planos livres, sem que isto represente muito tempo na geração do modelo

tridimensional. As superfícies são desenhadas e simulam modelos sólidos de modo a gerar os dados necessários para o perfeito entendimento. Não se trata apenas de planos ociosos, o modelo tridimensional carrega dados suficientes para a perfeita execução.

A seguir um breve histórico da tecnologia CAD e suas aplicações ao longo da própria evolução desta tecnologia. Desde as primeiras aplicações com usos militares até o desenvolvimento de modelos sofisticados utilizados nos dias de hoje voltados para a construção civil, que é o foco deste trabalho.

3.3. Breve história da tecnologia CAD (*Computer-Aided Design*)

Há aproximadamente 28 anos o projeto desenvolvido pela maioria dos escritórios de arquitetura era feito com lápis ou tinta no papel. Pequenas alterações significavam apagar, redesenhar e compatibilizar todas as pranchas, enquanto grandes mudanças muitas vezes significavam refazer o desenho a partir do zero. Se uma mudança em um desenho afetava outros documentos que eram dependentes, alguém teria que manualmente identificar a necessidade de fazer as alterações nos desenhos e efetivamente refazê-los. Neste sentido, inicialmente, o uso do CAD mudou fundamentalmente a maneira de projetar automatizando tediosas tarefas manuais repetitivas.

O primeiro sistema gráfico usado para auxiliar o desenvolvimento das etapas de engenharia surgiu em meados de 1950. A Força Aérea dos Estados Unidos utilizava o SAGE (*Semi Automatic Ground Environment*), sistema de defesa aérea. Desenvolvido no MIT (*Massachusetts Institute of Technology's*) – *Lincoln Laboratory* pesquisava o uso de monitores de computador para mostrar os dados de radar processados e outras informações. (Fonte: <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm>, acessado em 28/03/2010).

Dr. Patrick J. Hanratty conhecido como o "Pai da CADD / CAM" por suas contribuições pioneiras para o campo de projeto e fabricação auxiliados por

computador, desenvolveu em 1957 o PRONTO, o primeiro sistema comercial de programação de controle numérico. (Fonte: <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm> acessado em 28/03/2010).

Durante a década de 1960 várias empresas estadunidenses como Auto-trol, I-TEK, McAuto, entre outras, se dedicaram a desenvolver equipamentos e sistemas CAD/CAM. Foram desenvolvidos digitalizadores, computadores com dispositivos de memória em disco para atualização e exibição gráfica. Estas tecnologias permitiam comandos de entrada de dados feitos com caneta eletrônica de luz. Mesmo aparentemente sofisticados, naquela época, “os sistemas CAD se limitavam a descrever entidades geométricas em duas dimensões.” (SOUZA, 2004, p. 29). Os terminais de visualização e os vetores de desenvolvimento de programas de computador eram feitos em linguagem de montagem e se restringiam aos grandes laboratórios de pesquisas. A figura abaixo ilustra a Série PDP-11, uma das mais vendidas de sua época e uma das primeiras a executar o Sistema Operacional Unix, desenvolvido nos Laboratórios Bell.



Figura 3.7. Computador PDP-11. Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/PDP-11> acessado em 24/03/2010.

A figura 3.7 acima ilustra a PDP-11 uma das séries de minicomputadores mais vendidas de sua época e uma das primeiras a executar o Sistema Operacional Unix, desenvolvido nos Laboratórios Bell. Foi neste modelo que, em 1965, Donald Welbourn, então diretor de Cooperação Industrial de Cambridge iniciou estudos para solucionar problemas difíceis de geometria complexa em modelagem tridimensional. Ele estava entusiasmado com o precoce trabalho do MIT em CAD e acreditava que precisava iniciar estudos em Cambridge. Com investimentos da indústria automobilística foi possível desenvolver o trabalho em CAD para ser expandido em CAM.

O trabalho não foi fácil. De um lado o Conselho de Pesquisa em Ciência fez críticas duras aos métodos de investigação utilizados. De outro, a indústria estava exigindo muito mais desenvolvimento. A partir daí Welbourn reviu todos os dados coletados e a elaborou um manual de qualidade com instruções claras possíveis de ser compreendidas pela indústria automobilística.

Com o sucesso do primeiro trabalho, em 1972, o Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge pôde obter duas máquinas de controle numérico de três eixos, financiadas através de uma bolsa modalidade Desenvolvimento Tecnológico e Industrial. Isto permitiu o trabalho em CAD ser expandido em CAM. Uma dessas máquinas, a fresadora Hayes, foi exibida na Feira de Máquinas e Ferramentas em Olímpia. Um objeto semelhante a um jarro foi cortado no stand. Esta foi provavelmente a primeira demonstração pública tridimensional em CAD/CAM feita numa exposição de máquinas e ferramentas.

Nos anos 1980 mini computadores mais poderosos e mais baratos começaram a ser comercializados. Este foi um importante passo que permitiu maior acesso à tecnologia. Por muitos anos aeronaves e automóveis foram concebidos usando computadores, mas agora eles estavam se tornando economicamente viáveis para projetar objetos simples de uso doméstico, e de formas complexas tridimensionais. (Fonte: <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm> acessado em 28/03/2010).

Em 1982 foi fundada a empresa Autodesk com a promessa de vender um programa CAD por um preço de mil dólares americanos que poderia ser executado até mesmo por um computador pessoal. Surgiu então o AutoCAD. Em 1983 foram vendidas as primeiras versões. O sucesso da primeira versão possibilitou o lançamento de novas versões nos dois anos seguintes. Atualmente possui uma grande variedade de programas para modelagem tridimensional. (Fonte: <http://usa.autodesk.com>, acessado em 22/03/2010.)

Em 1985 Keith Bentley funda a Bentley System e lança o programa de CAD MicroStation. Começou como um clone de outro pacote CAD. Atualmente o MicroStation é um dos mais reconhecidos programas para modelagem tridimensional e possui uma ampla variedade de recursos de análises e avaliações para a construção civil. (Fonte: <http://www.bentley.com/en-US>, acessado em 22/03/2010.)

Ainda nos anos 1980 a empresa Dassault Systems anuncia o lançamento do programa CATIA na versão 2. Trata-se de um programa CAD totalmente integrado ao desenho de sólidos e às funções de robótica. O CATIA se torna o líder para aplicações aeronáuticas. Em 1987 é anunciada a versão 3 do CATIA e se torna líder também para aplicações automobilísticas. No início dos anos 1990 a partir de uma associação da IBM à Dassault Systems é anunciada a versão 4 do CATIA-CADAM Solutions. Trata-se de uma família de programas que permite ao usuário a realização de várias operações ao mesmo tempo, tais como o projeto em três dimensões, criar desenhos de engenharia, analisar um produto ou montagem como uma imagem processada e a aceleração dos processos de fabricação.

Durante todo o decênio dos anos 1990 os programas de CAD/CAM se desenvolveram sensivelmente incluindo sua aplicação na construção civil. As diversas empresas desenvolvedoras dos programas se estabeleceram no mercado e isso favoreceu sua ampla difusão. O desenvolvimento de um sistema operacional mais 'robusto' para aplicação em computadores pessoais (o Windows NT) provocou uma migração das empresas que desenvolviam seus sistemas CAD/CAM baseados no sistema operacional UNIX. "Este fato, além de

reduzir o custo de equipamento, reduziu, também, a necessidade de usuários extremamente especializados.” (SOUZA, 2004, p. 29) A interface padrão é interativa, tornando mais intuitiva a utilização desses sistemas. Abaixo uma citação de SOUZA, sobre o atual quadro da tecnologia CAD/CAM na indústria.

“Atualmente, a tecnologia CAD/CAM está exercendo uma influência cada vez mais decisiva na competição industrial, propiciando um aprimoramento na qualidade dos produtos, aumento de produtividade, rapidez na introdução de novos produtos e diminuição considerável de custos. Com o desenvolvimento desta tecnologia, tornou-se viável a fabricação de produtos contendo formas geométricas complexas. Anteriormente, estes tipos de geometrias eram apenas utilizados em casos especiais. Para este tipo de fabricação, o sistema CAM necessita de um modelo geométrico tridimensional da superfície a ser usinada”. (SOUZA, 2004, p. 30)

A citação acima ressalta além do quadro atual de desenvolvimento da indústria CAD/CAM, como alguns dos vários motivos que definem a necessidade da integração destes sistemas. O resultado é uma geometria complexa fabricada com a mesma facilidade que geometrias elementares (Euclidianas). Partindo de uma modelo digital criado tridimensionalmente.

O advento da internet especialmente nos anos 2000, possibilitou que empresas iniciassem a venda de novas licenças e as atualizações das novas versões dos programas pudessem ser compradas “*on-line*”. Os computadores se tornaram cada vez menores e mais rápidos. Os sistemas operacionais cujas interfaces são desenvolvidas com foco no usuário tornaram os programas CAD muito comuns no desenvolvimento de projetos voltados para a construção civil e permanecem em constante aprimoramento. Além de continuarem comuns nas indústrias pioneiras nessa área tais como a aeroespacial, automobilística, e naval.

3.4. A tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*)

A tecnologia CNC se desenvolveu paralelamente com as tecnologias computacionais durante os anos 1950, sendo que desde então os mecanismos utilizados de controle numérico (*Numerical Control – NC*) apresentaram contribuição importante. (SCHODEK, 2008, p. 237).



Figura 3.8. Primeiros exemplos com uso de CNC. Fonte: SCHODEK, 2008, p. 238.

Mostramos na Figura 3.8 acima da esquerda para direita: porta de bronze da Catedral de Los Angeles fabricada numa fresadora grande; inscrição em pedra criada por jateamento direto, um componente de madeira começando a ser cortado numa fresadora CNC rotacionável de três eixos, molde de cera descartado, chapas de revestimento de metal e formas complexas em *foam*. É importante ressaltar que as ferramentas CNC “podem ser mais precisas, rápidas e de custo mais baixo em relação às ferramentas convencionais por controle manual” (SCHODEK, 2008, p. 237).

As geometrias proposta no modernismo do século XX foram, em grande parte, impulsionadas pelos paradigmas fordistas de produção industrial. Impregnando a construção civil com a lógica da pré-fabricação, padronização e instalação no local. Além de racionalidades ditadas na produção de geometrias simples sobre as complexas e o uso repetitivo de componentes produzidos em massa de baixo custo. Mas essa rigidez da produção não é mais necessária. Como as máquinas controladas digitalmente pode-se fabricar formas complexas de componentes únicos a um custo que não mais exorbitantes. Variedade, em outras palavras, não compromete a eficiência e economia de produção.

A habilidade de produção em massa de componentes irregulares do edifício com a mesma facilidade que peças padronizadas, introduziu a noção da “customização em massa” no projeto e na produção do edifício. É tão fácil e

rentável para uma fresadora CNC produzir mil objetos únicos como mil idênticos. “Customização em massa”, se contrapõe ao paradigma ‘pós-Fordiano’ para a economia da primeira parte século vinte. É referido às vezes como a personalização sistemática, ou seja, a produção em massa de produtos e serviços individualmente personalizados, oferecendo um aumento considerável na variedade e a personalização sem um aumento correspondente nos custos.

Com o poderoso desenvolvimento da computação e dos sofisticados programas de CAD disponíveis no mercado os processos de fabricação e construção têm sido potencializados. Associadas às tecnologias CAM, em especial a tecnologia CNC, têm aumentado consideravelmente o potencial gerador na elaboração, fabricação de componentes arquitetônicos e construção dos edifícios. Os elementos fabricados podem ser desenvolvidos a luz dos recursos digitais que permitem grande liberdade ao projetista.

“Integração da concepção assistida por computador para a fabricação e construção [...] basicamente redefine a relação entre a concepção e a produção. Ela elimina muitas restrições geométricas impostas pelos processos tradicionais de desenho e de produção, tornando formas curvas complexas muito mais fáceis de lidar, por exemplo, e reduzindo a dependência de componentes do padrão produzidos em massa”. (KOLAREVIC, 2003, p. 117).

Segundo a citação acima a nova arquitetura com formas complexas através do uso da geometria não-Euclidiana se baseia em um novo paradigma de fabricação e construção. Neste paradigma os componentes irregulares do edifício podem ser fabricados com a mesma facilidade e economia, semelhante àqueles produzidos em série. Isto é decorrente dos avanços do sistema CAD/CAM que possibilitam o envio de dados digitais diretamente às máquinas para a fabricação dos componentes, resultando em economias em relação ao transporte e depósitos que não são mais necessários e evitando desperdício de materiais no canteiro de obras.

O uso de tecnologias de projeto e construção auxiliados por computador (CAD/CAM) na arquitetura e no *design* é muito mais que uma área emergente em ascensão. Estas tecnologias constituem uma nova opção construtiva. Elas possibilitam a criação de novos vocabulários da forma e apresentam mudanças substanciais que auxiliam em um melhor desempenho na construção dos

edifícios. Tais como eficiência, precisão, rapidez, menores custos etc., e possibilidades de produção de formas arquitetônicas de geometria complexa, como os exemplos descritos na seção quatro desta dissertação, que trata dos “Estudos de caso: projetos com uso de tecnologia CAD/CAM”. Além disso, deve-se observar que os computadores e o maquinário CNC não são usados separadamente. Há uma relação direta entre a concepção e produção. Fundamentalmente, o cerne de um sistema de projeto e construção auxiliados por computador possui três componentes principais:

1. A existência de um projeto feito em ambiente digital cujas análises são interativas. Isto torna possível que o modelo geométrico do objeto projetado seja produzido através de um sistema CAM;
2. um *software* de fabricação auxiliada por computador (CAM) em que o usuário especifica como o modelo digital projetado deve ser realmente construído e criado;
3. uma série de instruções digitais para controlar máquinas específicas, além de uma ou mais máquinas controladas numericamente por computador (CNC) e ferramentas relacionadas à conversão das instruções enviadas e processadas operacionalmente na máquina que constrói o objeto. (SCHODEK, 2005, p. 179; 239-253).

Muitos sistemas CAD/CAM incluem também tecnologias para a realização rápida dos protótipos de avaliação diretamente do modelo computacional. Estas tecnologias são conhecidas como ‘impressão tridimensional’ ou Prototipagem Rápida (RP – *Rapid Prototyping*). Alguns são baseados no processo “aditivo” que consiste na acumulação de material camada sobre camada até o objeto todo ser formado tridimensionalmente.

“Todas as técnicas de fabricação por adição compartilham o mesmo princípio em que o modelo digital (sólido) é cortado em camadas bidimensionais. A informação de cada camada é transferida então à cabeça de processamento da máquina de fabricação e o produto físico é gerado gradualmente, camada por camada.” (Fonte: KOLAREVIC, 2005, p. 36).

A citação acima descreve de um modo geral o princípio fundamental do funcionamento das máquinas CNC na fabricação por adição. Como descrito acima o modelo sólido fabricado neste tipo de equipamento é construído através da adição sucessiva de camadas bidimensionais. Estas camadas são

acumuladas uma sobre a outra até formarem gradualmente o modelo tridimensional projetado.

“Desde que o primeiro sistema comercial baseado em estereolitografia foi introduzido por 3D Systems em 1988... um número maior de tecnologias em competição surgiu no mercado. Eles utilizam uma variedade de materiais e diversos processos de cura baseados na luz, calor, ou produtos químicos.” (KOLAREVIC, 2005, p. 36).

As possibilidades e diversidade de materiais usados têm crescido em relação ao uso de fabricação por adição em máquinas CNC, segundo a citação acima. Assim é possível experimentar o uso de diferentes máquinas de CNC com uma variedade de materiais, sendo que cada tecnologia disponibiliza um tempo de manuseio diferenciado a partir do processo de cura.

Há ainda o processo “subtrativo” que envolve a remoção de volume especificado de material dos sólidos (o que dá origem a esse nome) usando processos elétricos, químicos ou mecânicos de redução (KOLAREVIC, 2005, p. 34). Em CNC a o processo de subtração ocorre através do uso de sistema computacional dedicado que executa as funções de controle básico sobre o movimento de uma ‘máquina-instrumento’ usando uma série de instruções codificadas.

Podemos afirmar que o grande poder das tecnologias CAD/CAM é grandemente aproveitado quando se trabalha com um modelo único de projeto. Isto põe em evidência os diferentes participantes envolvidos fundamentalmente no planejamento, projeto, fornecimento, produção, instalação, comercialização, distribuição, utilização e uso de qualquer produto. A troca de informações é crucial nestes relacionamentos. O papel do arquiteto necessariamente requer abordagem ampla e compreensão de diversas disciplinas. Segundo MITCHELL “com a moderna divisão entre o criador e o executor de um projeto veio o uso do desenho para armazenar e transferir informação”. (MITCHELL, 1995, p. 439). Além disso, tarefas repetitivas podem ser automatizadas e com isso reduz o tempo de execução. Com maior variedade de informações da construção e a redução de tempo na manipulação destes dados, é possível que os projetistas prevejam custos estimados da construção.

“Integrando o projeto assistido por computador com a fabricação assistida por computador, desta forma, não apenas reduzimos tempo e dinheiro investidos através da eliminação de fases intermediárias da

produção do desenho, como também redefinimos fundamentalmente o relacionamento entre projeto e produção. (...) Em suma, preenche a lacuna entre a concepção e produção que se abriu quando os *designers* começaram a fazer desenhos.” (MITCHELL, 1995, p. 439).

MITCHELL argumenta ainda que o uso de CAD/CAM pode reduzir de modo significativo o ciclo de produção. Os projetistas podem experimentar por meio de prototipagem rápida as formas, materiais e processos construtivos antes de tomar qualquer decisão. Este novo modo de conceber o projeto permite ainda a produção de componentes e estruturas arquitetônicas através de maquinário utilizado na fabricação industrial, com uso de tecnologia CNC. A informação digital gerada pelo arquiteto nos projetos é central em todas as fases inclusive na construção.

“A tecnologia digital tem produzido uma profunda mudança nos modos de produção arquitetônica. Enquanto mudanças tecnológicas sempre promoveram novas idéias na arquitetura, hoje, a informação tecnológica digital é o agente essencial da inovação em todo o processo da arquitetura. A exigência central é a precisão, confiabilidade e troca de informação consistente entre todas as partes envolvidas na criação e execução de um dado projeto (...). Como resultado, as análises, simulações, fabricação e informação de montagem são reveladas nos primeiros estágios no processo da concepção arquitetônica”. (KOLAREVIC & KLINGER, 2008, p. 26.)

KOLAREVIC & KLINGER argumentam na citação acima que a tecnologia digital é ferramenta central da inovação em todo o processo da arquitetura, e tem permitido gerar mudanças profundas na produção arquitetônica. Esta tecnologia possibilita maior precisão dos dados requeridos para a produção arquitetônica, confiabilidade e consistência na troca de informações entre todas as partes envolvidas, maior rapidez, além de permitir executar projetos que contêm formas complexas.

Os primeiros projetos elaborados em ambiente digital com análises estruturais, e detalhamento da montagem para construção, realizados com tecnologia CAD/CAM, demandaram um tempo excessivamente demorado, se comparadas com as tecnologias disponíveis atualmente. Um exemplo disto foi o projeto Opera de Sydney do Arquiteto Jørn Utzon, executado pelo Arquiteto Jack Zuns e os engenheiros da *Ove Arup and Partners*, na Austrália, cuja construção decorreu de 1956 a 1973 (SCHODEK, 2005, p. 29).



Figura 3.9 – A geometria final das cascas foi resultado da colaboração entre arquitetos e engenheiros. (SCHODEK, 2005, p. 30)

Diferentemente do tempo gasto na Ópera de Sydney, figura 3.9, quase duas décadas depois, a obra da Vila Olímpica, o grandioso peixe de Barcelona, foi construído entre 1989-1992, projeto do arquiteto Frank O. Gehry que desenvolveu e utilizou um sistema CAD com base em tecnologia encontrada na indústria aeroespacial. Esse sistema permitiu projetar uma forma extremamente complexa, permitindo construí-la de modo rápido e eficiente. O período de execução desta obra foi muito rápido, de apenas seis meses, compreendendo desde a elaboração do projeto preliminar até o projeto executivo. E, além disto, o projeto estava dentro do orçamento. (SCHODEK, 2005, p. 42).

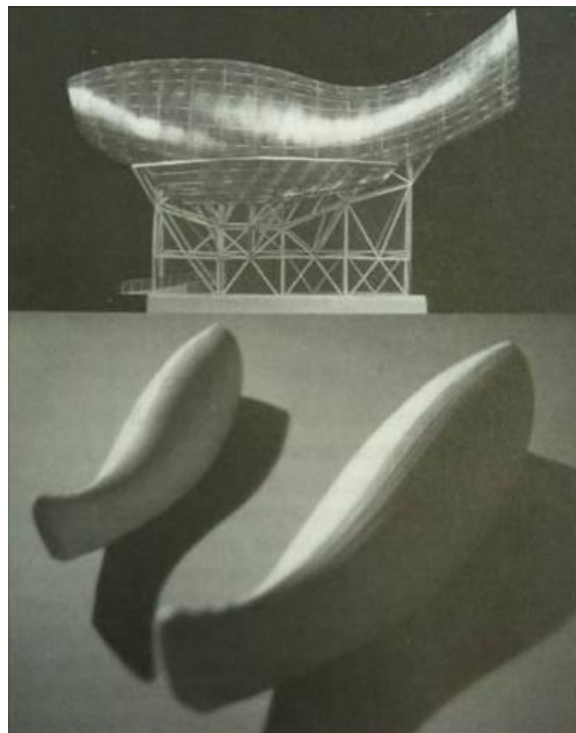


Figura 3.10 – Modelo digital do Peixe de Barcelona. (SCHODEK, 2005, p. 41).

A figura 3.10 acima ilustra o modelo tridimensional digital da forma conceitual construída, usando um novo modelo digital para as análises do projeto até sua construção. Segundo MITCHELL, “o modelo CAD foi utilizado diretamente para controlar fabricação e montagem no canteiro de obras dos componentes de curvas de aço. Desenhos tradicionais de construção foram virtualmente eliminados” (MITCHELL, WILLIAM & MCCULLOUGH, 1995, p. 437.)

O sistema interativo permite ao projetista criar modelos digitais tridimensionais sofisticados sem que os mesmos tenham custos, no mínimo, iguais aos praticados na construção civil. Estes sistemas são hierarquizados e possibilitam todo o histórico do projeto ser recuperado e as etapas modificadas. Sistemas CAD/CAM mais abrangentes podem incluir um ou mais pacotes de análises (por exemplo, estrutural, térmica, acúmulo de tolerância) que normalmente são encontrados na engenharia mecânica e no desenho industrial. Alguns sistemas são particularmente bem adaptados à avaliação de projeto, incluindo análises de ergonomia, análises de custos e assim por diante. Inclui também o uso de engenharia reversa em que um modelo físico existente é digitalizado e convertido em modelo digital para facilitar a manipulação do modelo CAD.

3.5. Tipos de modelagem: *Wireframe*, de Superfícies e de Sólidos

3.5.1. Modelagem *Wireframe* – ‘estrutura aramada’

Os modelos em *wireframe*, ou como nos referimos neste trabalho, modelo de estrutura aramada, consistem em elementos gráficos primitivos definidos num espaço tridimensional. Estes modelos representam desenhos de objetos em três dimensões apenas com seus vértices e linhas das bordas. As linhas das bordas podem ser retas ou curvas. A construção destes modelos tridimensionais válidos é considerada um processo longo e difícil. Há um grande volume de dados que devem ser informados e ao número de seqüências de comandos que devem ser

procedidas para sua criação. Entretanto, os modelos *wireframe* podem ser facilmente armazenados em base de dados de engenharia, pois apenas uma pequena parte da memória do computador é requerida e os dados podem ser recuperados, editados ou atualizados rapidamente. O principal propósito dos modelos *wireframe* é proporcionar a criação de documentação e, em alguns casos, servir de dado inicial para várias análises dos elementos que estão em estudo. Utilizando estes modelos, várias projeções do objeto tridimensional podem ser criadas aplicando-se transformações geométricas nos elementos gráficos primitivos. Abaixo a figura 3.11 mostra o modelo *wireframe* desenvolvido para o projeto do Walt Disney Concert Hall.

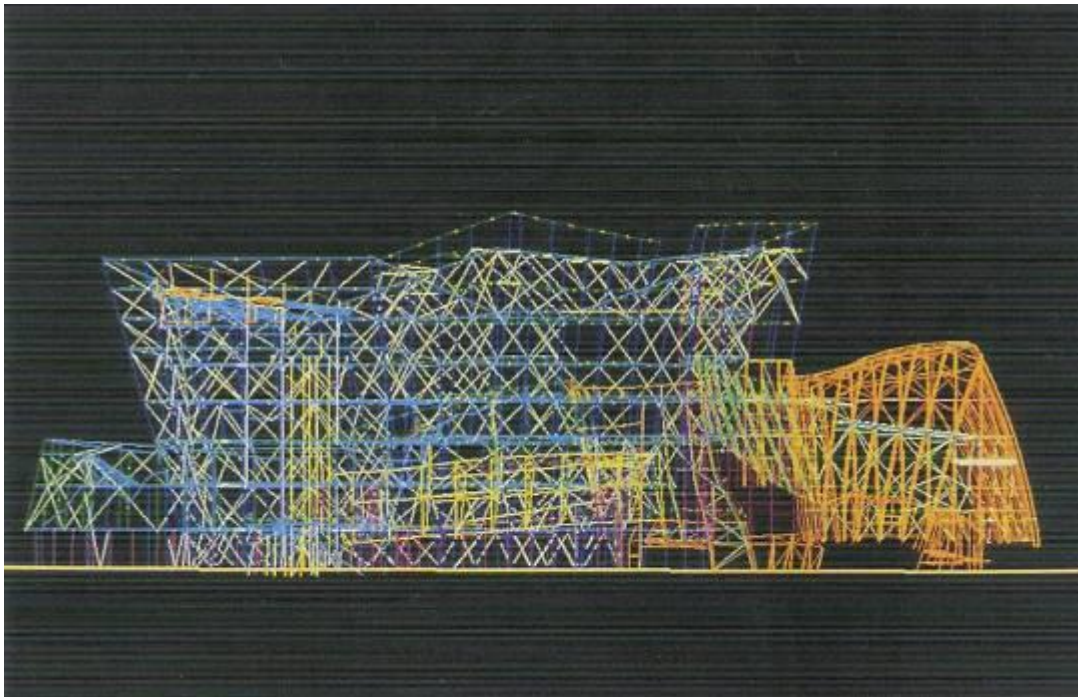


Figura 3.11. Modelo aramado digital do Walt Disney Concert Hall. Fonte: GERACE, 2009, p. 124.

Como mostra a figura acima o desenho tridimensional representado por modelos *wireframe* pode ser de difícil interpretação individualmente. Podendo muitas vezes tornar modelos de objetos complexos impossíveis de se identificar. Por causa das dificuldades com a interpretação os modelos em *wireframe* são comumente utilizados apenas com suas funções bidimensionais.

3.5.2. Modelagem de superfícies

Modelos em superfícies são representações mais completas e menos ambíguas do que modelos em *wireframe*. A base de dados geométrica é mais rica e fornece informações para a concepção de ligações entre as linhas de borda dos modelos. Os modelos de superfície definem apenas a geometria dos objetos, sem armazenar informações sobre sua topologia e podem apenas ser utilizados como ferramentas para adaptar uma série de superfícies pertencentes a um objeto. Por isso, se uma borda é comum a duas superfícies esta informação não é computada no modelo. Isto gera uma série de brechas entre as superfícies que resulta em um modelo que não define volumes fechados. Consiste em um método de modelagem tridimensional que descreve a geometria de um objeto através da identificação de suas superfícies. Este método é utilizado quando a visualização da forma da superfície é crucial, por exemplo, para satisfazer requerimentos aerodinâmicos ou estéticos. A modelagem de superfícies permite o desenho de formas livres sem seguir os parâmetros que são disponibilizados na aplicação da modelagem de sólidos. A figura 3.12 abaixo mostra um exemplo de modelagem de superfície.



Figura 3.12. Exemplo de modelo sólido tridimensional digital. Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 188.

Um modelo sólido é um modelo tridimensional, habitualmente representado matematicamente de maneira a tornar possível a distinção entre o interior e o exterior do objeto, seus pontos de superfície e sua propriedade, como mostra a figura 3.12 acima. Os modelos sólidos fornecem uma ampla representação gráfica tridimensional dos objetos. Esta amplitude se deve à informação armazenada na base de dados dos programas computacionais para este tipo de modelagem. Após a construção de uma parte do objeto, o programa de modelagem de sólidos converte os dados fornecidos em uma estrutura de dados que mantém a geometria e a topologia do objeto. Em contraste com as técnicas de modelagem em *wireframe* e em superfícies, que armazenam somente dados geométricos, os sistemas de modelagem de sólidos são dotados de parâmetros que descrevem os materiais aplicados neste tipo de representação. Vários esquemas de armazenagem de informações do processo de modelagem de sólidos estão disponíveis, mas os dois mais populares são geometria sólida construtiva (CSG – *Constructive Solid Geometry*) e representação por delimitação (B-Rep – *Boundary Representation*). *Constructive Solid Geometry* – CSG, é um método de modelagem de sólidos que combina formas sólidas simples chamadas de primitivas, para construir modelos mais complexos, utilizando as operações booleanas (união, diferença e intersecção). O modelo resultante é um modelo processual, ou seja, uma base de dados aonde o processo de modelagem é arquivado, armazenado na forma matemática de uma árvore binária, aonde os nós são as primitivas corretamente dimensionadas e posicionadas, e cada ramo é uma operação booleana.

A representação B-Rep é uma técnica de modelagem de sólidos na qual cada superfície geométrica do objeto é representada por bordas, faces e vértices. O objetivo do modelo obtido é construir uma completa representação do sólido tridimensional como uma coleção organizada de superfícies. O sólido pode ser representado como a união de faces (*surfaces*) ligadas por bordas (*curves*), as quais são ligadas por vértices (*points*). Uma face é uma região interligada de uma superfície ainda mais extensa; uma borda é um segmento de uma curva não interligada e os vértices são os pontos que caracterizam o fim das bordas.

Um modelo *B-Rep* consiste na reunião dos dados matemáticos definidores da geometria da superfície aonde cada face se localiza; da geometria curva de cada borda (um circuito fechado de cada ligação a cada face) e do ponto geométrico (coordenadas) dos vértices. A forma mais simples de um *B-Rep* é um modelo poligonal, que é um método de construção de modelos tridimensionais aonde as superfícies são definidas ou aproximadas por uma malha poligonal (uma armação em forma de malha de polígonos cobrindo uma superfície). Na maioria dos programas de modelagem de sólidos mais de uma representação *B-Rep* são suportadas. A modelagem de sólidos é reconhecida como um elemento chave na integração do desenho com a produção. Seu uso abrangente é possível devido ao grande desenvolvimento da força computacional nas últimas décadas. A modelagem de sólidos é atualmente considerada a forma mais produtiva de criar modelos tridimensionais para fins de fabricação digital. Abaixo a figura 3.13 ilustra um modelo sólido com geometria complexa do projeto do edifício Walt Disney Concert Hall, cujas coordenadas serviram para orientar a construção. (ALMEIDA, 2003, p. 24)

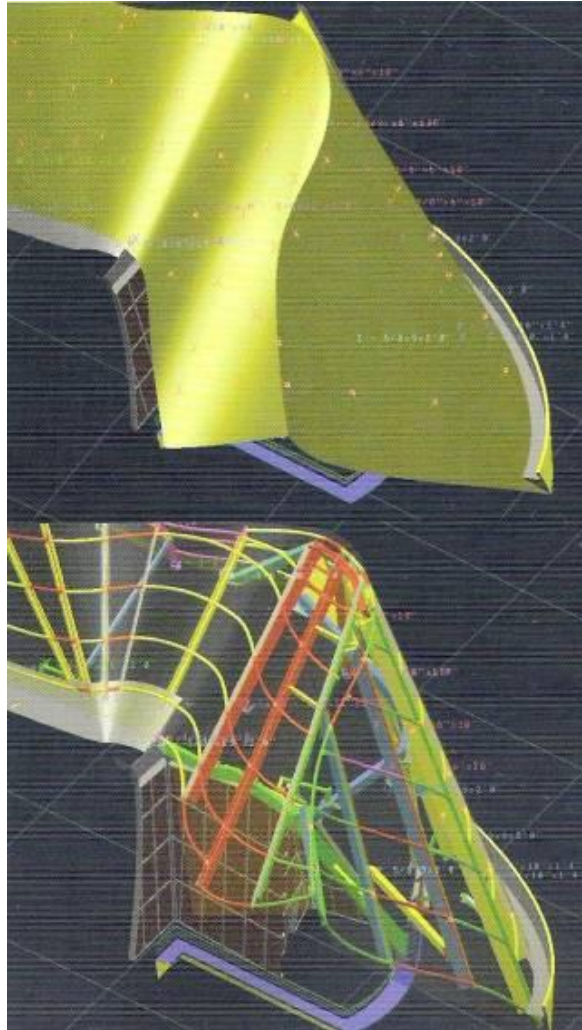


Figura 3.13. Detalhe modelo sólido com interferências das instalações. Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 115.

Seguindo o entendimento das tecnologias CAD/CAM e BIM para projeto e construção, a seguir, uma rápida e geral visão dos desafios e práticas dirigidas à construção civil. O principal foco são os benefícios alcançados quando os requerimentos necessários são seguidos de modo coordenado.

3.6. Visão geral do uso das tecnologias CAD/CAM e BIM

As tecnologias da 'Era da informação digital', estão "desafiando não apenas a maneira como nós projetamos os edifícios, mas também como nós os construímos e os produzimos" (KOLAREVIC, 2003, p. 3). Essas tecnologias têm influenciado profundamente os processos de projeção dos arquitetos, seu produto estético final e a relação com a indústria da construção civil. A aplicação

das tecnologias CAD/CAM (amplamente utilizadas na indústria naval, aeroespacial e automobilística), aliadas a uma maior compreensão e domínio pelo profissional de arquitetura na construção civil abrem novas e promissoras possibilidades. Essas tecnologias possibilitam o entendimento necessário para a elaboração de um produto final com maior precisão e controle por parte do arquiteto, sem mencionar, a possibilidade de utilização de geometrias não-Euclidianas.

Diante da complexidade de formas projetuais que a era digital nos permite desenvolver, as representações bidimensionais de altura, largura e profundidade dos objetos arquitetônicos são claramente limitadas para compreender a arquitetura, não permitindo coordenação e integração dos inúmeros componentes e elementos construtivos. Além disto, abrem margem para interpretações equivocadas das informações durante a construção. Outra dificuldade gerada pelos métodos convencionais é o retrabalho devido às correções ou alterações frequentemente necessárias.

O processo projetual através das representações ortográficas exige o conhecimento e domínio da simbologia arquitetônica. Além disso, raciocínio espacial elaborado e atenção para detalhes que são fundamentais na tomada de decisão no processo de projeção em Arquitetura. Porém, quando se percebe a necessidade de alguma modificação no projeto, toda e qualquer alteração obrigará o projetista a refazê-lo totalmente, prancha por prancha, causando perdas devido à grande quantidade de tempo necessário para execução das correções exigidas. Muitas vezes estas constantes modificações geram diversos transtornos como divergências na obra entre o executado versus o projetado e atrasos no cronograma.

O trabalho projetual arquitetônico a partir do modelo tridimensional constitui a base para novas formas de simulação que podem ser feitas durante todo o desenvolvimento do projeto, pois as simulações anteriores feitas com a utilização de técnicas tradicionais de representação gráfica satisfazem timidamente os aspectos formais tradicionais e estéticos e as análises das relações funcionais.

No entanto os modelos tridimensionais permitem inúmeras simulações que facilitam prováveis novas decisões do arquiteto. Ele tem a possibilidade de antecipar um maior número de respostas com base nos requerimentos do empreendedor e inferir análises mais complexas, se considerarmos as representações técnicas tradicionais bidimensionais.

Estes modelos tridimensionais digitais permitem a "customização em massa", isto é, a possibilidade de elaboração e fabricação de projetos diferenciados pelo mesmo custo dos produzidos em larga escala. Os processos de produção controlados numericamente por computador (CNC) garantem a fabricação de componentes não-padronizados diretamente a partir de dados digitais.

“No domínio conceitual, computacional, das topologias arquitetônicas digitais, geometria espacial não-Euclidianas, sistemas cinéticos e dinâmicos e algoritmos genéticos, estão suplantando as tecnologias arquitetônicas. Os processos de projetos dirigidos digitalmente, caracterizados por dinâmicas, abertas e imprevisíveis, mas consistentes transformações das estruturas tridimensionais estão proporcionando o surgimento de novas possibilidades arquitetônicas”. (KOLAREVIC, 2003, p. 3)

Na era da informação digital formas complexas e várias possibilidades de simulações e análises emergem. Para isso são necessários métodos mais eficientes do que as representações e estudos bidimensionais. Os arquitetos que usam modelagem da informação de edificação (*Building Information Modeling – BIM*) se beneficiam de análises de todo o contexto integrado do projeto, possibilitando simulações térmicas, lumínicas, acústicas e até as variáveis mecânicas, cinéticas, de tempo, gravidade, força e movimento, orçamentárias e financeiras. EASTMAN et al afirma:

“... nós definimos BIM como uma tecnologia de modelagem associada a uma série de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de edificações que reúnem as seguintes características:

- A representação dos componentes da edificação é feita através de formas digitais inteligentes em que eles “sabem” o que são e podem ser associados com a computação gráfica e dados referentes aos atributos e regras paramétricas.
- Os componentes incluem dados que descrevem como eles se “comportam”, cuja informação é necessária para análises e processos de trabalho, como por exemplo “*takeoff*”, especificação e análise energética.
- Os dados contidos no modelo são consistentes e, não repetitivos, como, por exemplo, as informações referentes aos elementos arquitetônicos são representadas (automaticamente) em todas as vistas dos mesmos.

- As informações do modelo são coordenadas de forma que todas as vistas dos mesmos são representadas de maneira coordenada”.

A citação acima apresenta o conceito de BIM, em que o modelo computacional reúne um conjunto de dados, organizados, conectados, consistentes, precisos e coordenados de forma a permitir informar as características de cada elemento. Além de suas associações e comportamento dos seus materiais, criando condições para a realização das diversas análises desde a concepção tridimensional do projeto. Os dados são inseridos de modo a tornar o arquivo computacional ‘inteligente’, isto é, vinculando informações gráficas, dados analíticos e atributos dos componentes de forma que cada alteração feita em uma vista de um elemento arquitetônico resulta em reajustamento automático em todo o modelo.

Com o uso da tecnologia BIM o projeto arquitetônico abre maiores perspectivas que aquelas puramente técnicas. As informações inseridas são arquivadas e organizadas em modelos gerados no sistema CAD, abaixo KOLAREVIC descreve estes domínios.

“Nesta nova abordagem de informação – e simulação baseada no contexto do projeto, o paradigma emergido da performance baseada no projeto é entendida muito generalizadamente – o seu significado abrange múltiplos domínios, do financeiro (as perspectivas do investidor), espacial, social e cultural ao puramente técnico (estrutural, térmico, acústico, etc.). A ênfase na performance construtiva (novamente, amplamente compreendida das perspectivas financeira, espacial, social, cultural, ecológica e técnica) está redefinindo expectativas do projeto do edifício, seus processos e práticas. (KOLAREVIC, 2003, p. 24 e 25) .

Na citação acima KOLAREVIC apresenta os múltiplos domínios que essa nova abordagem de informação denominada BIM permite participar na modelagem do projeto. O projeto não é apenas um desenho para informar como deve ser construído. Possui informações de análise para uma melhor tomada de decisão de modo amplo, considerando inúmeras variáveis de ordem projetual, financeira, social entre outras, além de permitir definir os parâmetros que definem a conexão entre as diversas variáveis e o comportamento das mesmas.

3.6.1. A história da tecnologia BIM (*Building Information Modeling*)

A modelagem da geometria tridimensional constituiu uma ampla pesquisa cujo objetivo tinha muitos potenciais usos, incluindo filmes, projetos e eventualmente jogos (EASTMAN, 2008, p. 26). Mesmo que inicialmente, as formas poliédricas complexas tivessem o objetivo de produzir imagens, no entanto não atendiam ao objetivo de desenhar formas complexas enquanto ‘sólidos’ tridimensionais como conhecemos atualmente.

“Em 1973 uma criação e edição “amigável” de formas tridimensionais arbitrarias foram desenvolvidas separadamente por três grupos, Ian Braid na Universidade de Cambridge, Bruce Baumgart em Stanford, e Ari Requicha e Herb Voelcker na Universidade de Rocheste. Conhecidos como *modelagem de sólidos*, estes esforços produziram a primeira geração de ferramentas práticas de projeto com modelagem tridimensional.” (EASTMAN, 2008, p. 26)

Estes três grupos, descritos acima, competiam pela supremacia com duas formas de modelagem de sólidos: O “*boundary representation approach*” (*B-rep* ou abordagem por representação de fronteira) que definia as formas usando operações de união, intersecção e subtração entre outras como *chanfrar*, fatiar ou mover uma cavidade. Sofisticados sistemas de edição desenvolvidos a partir da combinação de formas primárias permitiam a geração de um conjunto de superfícies que juntas possibilitavam incluir valor, como o volume. (EASTMAN, 2008, p. 26). E em contraste o “*Constructive Solid Geometry*” (*CSG* ou Geometria Sólida Construtiva) possuía uma estrutura tipo raiz, e os dados eram avaliados. Mais tarde estes dois métodos foram mesclados permitindo a edição por meio da estrutura em raiz e os ‘sólidos’ podiam ser editados e regenerados conforme a necessidade. (EASTMAN, 2008, p. 27)

“A primeira geração de ferramentas suportava a modelagem de objetos tridimensionais facetados e cilíndricos, com associação de atributos aos quais permitiam que objetos fossem compostos em montadoras de engenharia, tais como motores, plantas de processos ou construções. Esta abordagem mesclada à modelagem foi um importante precursor da moderna modelagem paramétrica.” (EASTMAN, 2008, p. 27)

A modelagem para construção baseada em sólido tridimensional foi primeiro desenvolvida nos finais dos anos 1970 e início dos anos 1980 (EASTMAN, 2008, p. 27). Universidades dos Estados Unidos como Carnegie-Mellon, e Universidade de Michigan desenvolveram capacidades básicas dos sistemas CAD a partir dos primeiros sistemas gráficos desenvolvidos nos anos 1950 no

MIT (*Massachusetts Institute of Technology's*). Como mencionado anteriormente na história da tecnologia CAD. “A modelagem sólida em sistemas CAD era funcionalmente poderosa, mas frequentemente sua capacidade de processamento dos computadores era limitada.”

A própria limitação dos sistemas tornava tarefas como geração de relatórios difíceis de ser desenvolvidas. Além do que desenhos de objetos tridimensionais eram também conceitualmente desconhecidos pela maioria dos projetistas, que se sentiam mais confortáveis para trabalhar bidimensionalmente. Outro problema que possivelmente distanciava a indústria da construção civil dos novos recursos seria o custo dos programas. Apesar dos benefícios divulgados pela indústria aeroespacial das capacidades projetuais e construtivas das modelagens tridimensionais, na construção civil estes benefícios permaneciam desconhecidos. Na citação abaixo o autor descreve um quadro que mudou muito, especialmente no que se refere ao uso dos programas de computador para desenho arquitetônico.

“Além disso, os sistemas eram caros custando cada atualização U\$ 35.000 por licença. A indústria e fabricação aeroespacial informavam os benefícios potenciais em termos das capacidades integradas de análises, redução de erros e se moviam em direção à automação fabril. A maior parte da indústria da construção civil desconhecia estes benefícios, ao invés disso eles adotavam os editores de desenho arquitetônico, tais como AutoCAD e Microstation para melhorar seus métodos rotineiros de trabalho e como suporte a geração de documentos convencionais bidimensionais de construção.” (EASTMAN, 2008, p. 27, 28 e 29)

Muita coisa melhorou em termos de equipamento, e o custo das atualizações dos programas reduziu muito. A indústria automobilística que utiliza modelos tridimensionais e formas não-Euclidianas para a fabricação em grandes escala, também se abriu às novas abordagens do desenho parametrizado. Segundo EASTMAN isto tem ganhado força, também na construção civil em que “o modelo parametrizado enviado para a fabricação mecânica, tem chegado a um alto grau de maturidade em comparação ao modelo gerado para a construção (...).” (Eastman, 2008, p. 325). É percebido que o aprofundamento contínuo com o uso da tecnologia BIM pode proporcionar maiores avanços na construção civil.

EASTMAN defende ainda alguns objetivos necessários para o êxito no uso de BIM, a partir da experiência adquirida em um projeto bem sucedido, o do Distrito de Lansing Delta, no estado de Michigan, nos Estados Unidos (LDT – *Lansing Delta Township*). Trata-se de um complexo da empresa GM que foi construído mais rápido que o tempo previsto. Esta experiência permitiu a equipe técnica da GM e da empresa contratada para os projetos, a Ghafari, uma compreensão maior no uso de BIM na construção civil. Abaixo apresentamos os principais objetivos e condições estabelecidos pelos técnicos das duas empresas, GM e Ghafari, como premissas básicas para garantir desempenho satisfatório no uso de BIM:

- “Todos os membros do grupo de projeto precisam estar comprometidos em usar modelos digitais para otimizar os benefícios da abordagem BIM. Os ganhos de eficiência associados para melhorar as interfaces entre parceiros ou processos ocorrem somente se todos os participantes do projeto utilizarem ferramentas BIM.
- Sub-contratados para todos os negócios precisam continuamente fornecer entradas para o modelo tridimensional e refinar esses seus modelos, desde a fabricação até a instalação em campo.
- Onde houver necessidade, *Ghafari* atuaria como consultora para empresas com menos experiência para facilitar a produção de modelos tridimensionais de todas as especialidades.” (EASTMAN, 2008, p. 325 e 326).

No sentido de garantir que os resultados sejam alcançados é fundamental que os requisitos tecnológicos dos sistemas BIM sejam corretamente utilizados. Na citação acima o autor destaca as recomendações mais importantes extraídas das experiências vivenciadas. Todos os envolvidos no projeto precisam utilizar ferramentas BIM desde a fase inicial até a instalação. Neste caso, a Ghafari atuava como facilitadora no processo e tinha o papel de distribuir o modelo de construção que serviria de base para todos os envolvidos. Foi a exigência de usar uma plataforma única. Foi exigido explicitamente que cada sub-contratado continuamente alimentassem o modelo único com os seus dados e aperfeiçoar seus modelos em todo o processo desde a projeção, fabricação e instalação no canteiro de obras. Com todos os participantes no processo de projeto e construção muito bem alinhados através do uso do modelo tridimensional único, as dificuldades encontradas puderam ser solucionadas mais rapidamente.

A capacidade de geração de dados dos sistemas BIM vai além da informação gráfica. Como, por exemplo, auxiliando a integração do uso de CAD/CAM, como na indústria aeroespacial, em que os benefícios são amplamente explorados

com foco na fabricação. Muitos projetistas da construção civil desconheciam (e acredita-se que ainda desconhecem) o potencial gerador da tecnologia BIM. Este é talvez um motivo que os impeça de utilizar as poderosas capacidades de análises e até mesmo fabricação disponíveis nos sistemas BIM. Muitos programas, segundo a citação abaixo disponibilizam recursos paramétricos. EASTMAN menciona vários que, inclusive, são bem conhecidos no mercado brasileiro, como por exemplo, os programas da Autodesk, Graphisoft e Bentley.

“A atual geração de ferramentas BIM para projetos arquitetônicos, incluindo Autodesk Revit Arquitetura e Estrutura, Bentley Arquitetura e sua série associada de produtos, a família Graphisoft ArchiCAD e Tecnologia de Projeto Digital Gehry bem como as ferramentas em nível de fabricação assim como a Tekla Estruturas, SDS/2 e Structureworks todos cresceram fora do objetivo base em recursos de modelagem paramétrica desenvolvida para a concepção de sistemas mecânicos. Estes conceitos emergem como uma extensão do CSG e tecnologias B-rep, uma mistura das pesquisas universitárias e o intenso desenvolvimento industrial, particularmente pela empresa Corporação Tecnologias Paramétricas (PTC – *Parametric Technologies Corporation*) nos anos 1980” (EASTMAN, 2008, p. 27, 28 e 29).

O autor menciona, na citação acima, que o desenvolvimento da tecnologia BIM voltada para a construção civil se deu basicamente graças a dois fatores que se mesclaram: as pesquisas universitárias e o intenso desenvolvimento industrial no decorrer dos anos da década de 1980. O modelo paramétrico que usamos hoje é provido de recursos com os quais o projetista pode criar exemplos de elementos construtivos como porta ou janela em que um conjunto de relações e regras controla os seus parâmetros (exemplo: altura da parede, largura, comprimento, material e posição no projeto, entre outros). (EASTMAN, 2008, p. 29). Os parâmetros contêm as características físicas dos elementos e sua posição e podem ser editados conforme as necessidades do projeto definidas pelo projetista. Estas relações permitem cada exemplo de uma classe de elementos variar de acordo com seus próprios conjuntos de parâmetros e relações contextuais. (EASTMAN, 2008, p. 29.)

“Usando modelagem paramétrica, as empresas costumam definir como suas famílias de objeto devem ser concebidas e estruturadas, como eles podem ser variados parametricamente e definidos afins em relação ao conjunto e funcionamento, incluindo os critérios de produção. Nestes casos, as empresas estão incorporando conhecimento corporativo baseado em esforços anteriores na concepção, produção, montagem, manutenção e sobre o que funciona e o que não funciona. Isto é especialmente útil quando uma empresa produz muitas variações de um produto. Esta é a prática padrão na

grande indústria aeroespacial, manufatura e empresas de eletrônicos”. (EASTMAN, 2008, p. 29.)

Muito mais que informações com a estrita finalidade construtiva, segundo o autor, as empresas incorporam conhecimentos importantes para o planejamento dos investimentos. Assim permite aos empreendedores planejarem desde a implantação de um empreendimento como um todo até seu funcionamento e operação.

O uso de tecnologias digitais para a fabricação por meio da tecnologia BIM é largamente feito na indústria automobilística, naval e aeronáutica. Nestas indústrias o foco é especialmente na execução de projetos com prazos muito apertados, orçamentos limitados e que requerem maior precisão. Os impressos e registros finais do projeto requerem uma representação idêntica e fiel (ao mesmo tempo) da construção eliminando as ambigüidades e divergências de interpretação que, por muitas vezes, resultam em que o objeto executado se distancie daquele projetado, além de impossibilitar a produção em massa de elementos distintos.

“As implicações da customização em massa para a arquitetura e para a indústria da construção civil em geral são profundas. Como observado por Catherine Slessor, ‘a noção de que agora singularidade pode ser alcançada com a mesma facilidade e economia como a repetição, desafia as questões simplificadas do modernismo e sugere o potencial do novo paradigma pós-industrial baseado na aumentada capacidade criativa dos eletrônicos ao invés dos mecânicos”. (KOLAREVIC, 2003, p. 53.)

Na citação acima KOLAREVIC argumenta que “na estética modernista a casa era considerada um item de fabricação, ou seja, ‘máquina para morar’. A premissa era de que projetos planejados com itens padronizados levassem a construção da casa a um conceito de produção em massa para um mercado amplo. “Desta forma o projeto poderia atender não apenas as elites.” (KOLAREVIC, 2003, p. 53). No entanto as tecnologias digitais vão além da fabricação de itens idênticos. Agora, segundo KOLAREVIC, a fabricação de itens singulares pode ser alcançada com a facilidade e economia como no caso da fabricação de itens repetidos.

No entanto o objetivo permanece apesar de reinterpretado, como argumentado abaixo. Criar edificações únicas ou iguais não significa mais tempo e mais

custos na construção. A produção em massa para KOLAREVIC não deve representar construções iguais. E este novo paradigma proposto é possível a partir do controle desta variação pelos meios digitais.

“O objetivo permanece, embora reinterpretado. A produção industrial não significa a produção em massa de um produto padrão para todos os fins, ou seja, um tamanho único para todos. A tecnologia e os métodos da customização em massa permitem a criação e produção de edificações únicas ou idênticas e construção de componentes construtivos diferenciados por meio da variação controlada digitalmente.” (KOLAREVIC, 2003, p. 53)

O uso do BIM na construção civil tem semelhanças às outras indústrias, segundo EASTMAN, como a citada indústria naval e a aeroespacial. Os edifícios possuem um número grande de partes singulares e suas dependências são mais previsíveis do que em sistemas de mecânicas. Devido a própria condição estática que os edifícios têm. Além disso, um recurso importante e que dá vazão às muitas idéias apresentadas pelos arquitetos contemporâneos é a possibilidade das empresas produzirem muitas variações de um mesmo produto, como acontece de modo corriqueiro na indústria aeroespacial e outras. Customização em massa.

“Há muitas diferenças específicas entre as ferramentas de modelagens usadas no BIM especialmente desenvolvidas e aquelas usadas por outras indústrias. Os edifícios são compostos por um grande número de partes únicas. As dependências de suas regenerações são mais previsíveis do que dos sistemas gerais de projetos de mecânica. No entanto, a quantidade de informação de um edifício médio em construção em nível de detalhe pode causar problemas de desempenho mesmo nos computadores pessoais de ponta.” (EASTMAN, 2008, p. 34)

Apesar de certas indústrias terem os sistemas BIM incorporados em seus processos de projeto e fabricação, entendemos através da citação acima que há diferenças específicas na sua aplicação na construção civil. As relações de níveis de dependências dos objetos e elementos construtivos geram um volume muito grande de dados. Esses dados poderão interferir diretamente no desempenho até dos mais poderosos computadores pessoais.

3.6.2. Desenvolvimento de projetos em ambientes digitais, fabricação digital.

Apresentaremos nesta seção um breve estudo dos ambientes gráficos de projeto digital, em especial o desenvolvimento do projeto para a produção ou construção de edifícios – em que entendemos constituir um subconjunto particular de todo o processo de projeto. Nesses ambientes de desenvolvimento de projeto digital, há programas, como o CATIA, SolidWorks, Unigraphics, ou Pro/ENGINEER, entre outros. Estes programas se destinam entre algumas atribuições como, por exemplo, mera ilustração, visualização em movimento e análises ambientais, a auxiliar o projeto detalhado como deve ser construído e suas configurações em relação à montagem final no canteiro de obras. Como consequência desta orientação, auxiliam na construção da forma de maneira precisa e na sua manipulação. O projetista deve, inicialmente, ter uma compreensão clara do desenho projetado antes de desenvolvê-lo no ambiente digital. Geralmente apresentam importante base que regem as características do objeto inteiro e deve ser conscientemente pré-selecionados. Após a construção do modelo e da definição de dimensões-chave é comum a necessidade de antecipar as mudanças de projeto que inevitavelmente ocorrem durante o processo de desenvolvimento. Depois de uma compreensão básica de como a estrutura de modelagem dos ambientes digitais é adquirida, o seu potencial se torna bastante evidente. Neste capítulo analisaremos sucintamente a importância da tecnologia no que se refere a modelagem paramétrica, concepção baseada nos recursos computacionais digitais e projeto orientado por coordenadas.

3.6.3. As superfícies curvas: modelagem e análise avançadas

O advento de sofisticados sistemas de modelagem digital vem permitindo projetistas criar, controlar e manipular formas geométricas complexas com grande precisão. Os programas CAD/CAM disponíveis no mercado possuem recursos especiais desenvolvidos para projetar e construir, respectivamente, superfícies curvas complexas em edifícios. As inúmeras técnicas básicas de

modelagem tridimensional, como extrusão, varredura e *feedback*, são utilizadas para a modelagem de superfícies. Muitas vezes, os projetistas começam com um modelo de superfície e depois o convertem em um modelo sólido num segundo momento. Alguns pacotes de modelagem de superfície, como por exemplo, o SketchUp da Google, permitem aos usuários criar superfícies altamente complexas, mas ao que se sabe não é possível ainda gerar modelos sólidos com base nessas mesmas superfícies. Há várias técnicas disponíveis para converter uma superfície complexa em um sólido – e assim permitir o cálculo de propriedades, tais como volume, peso, além de pontos de referência e controle. O modo é definido diferentemente em cada programa. Gerar um modelo sólido é importante no contexto da modelagem de desenvolvimento de projeto de edifícios, porque o objetivo final é obter uma descrição precisa geométrica de uma peça que pode ser usada para vários tipos de análises e de fabricação. Para o projeto arquitetônico, uma superfície espessada pode ser parte da descrição da fachada ou de um revestimento específico do edifício, o que representa materiais reais e processos de fabricação como a prensagem ou estampa. (SCHODEK, 2005, p. 194.) Abaixo a figura 3.14 ilustra um painel de madeira que foi inicialmente projetado com ferramentas básicas para fabricação com CNC.

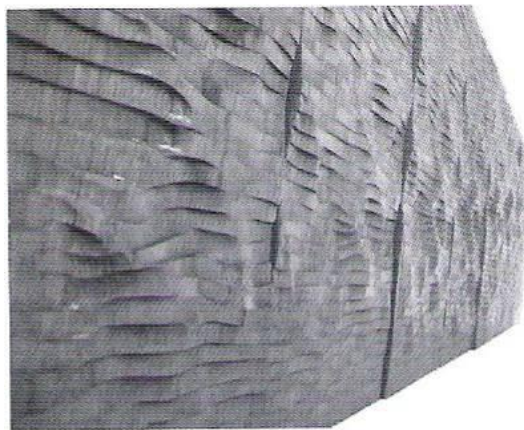


Figura 3.14: Parede de pedra fabricada com CAD/CAM. Fonte KOLAREVIC & KLINGER, 2008, p. 26.

Para fabricação os projetistas usaram o programa Maya – programa de animação tridimensional. As curvas do painel de madeira foram geradas com uso de parâmetros como dimensões e processo de alimentação das peças etc. A partir de um modelo sólido digital os projetistas desenvolveram uma ‘estampa’ em alto relevo capaz de ser executada diferenciadamente pelos parâmetros

enviados à máquina CNC. (KOLAREVIC & KLINGER, 2008, p. 124.). A figura 3.15 abaixo ilustra parte da sequência de análises do modelo gerado no Maya para fabricação. Foi possível experimentar diversas interações do modelo sólido.

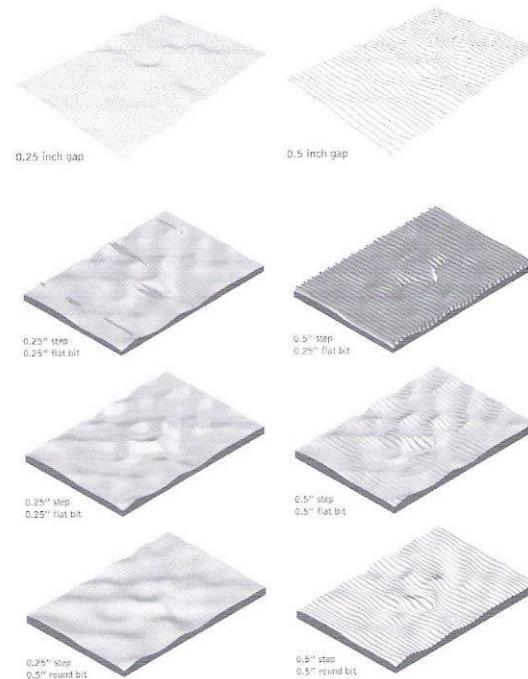


Figura 3.15. Estudos em modelo sólido tridimensional digital das estampas da superfície do material. Fonte KOLAREVIC & KLINGER, 2008, p. 124.

A geração de superfícies complexas pode ser fácil ou difícil, dependendo da natureza da superfície e as ferramentas de modelagem de um pacote de software específico. Se o objetivo é a fabricação de uma superfície curva a partir do modelo digital, é muito importante que a natureza exata das curvaturas presentes em superfícies seja bem entendida. Este entendimento influencia diretamente na escolha de materiais e processo de fabricação, ou, a situação inversa, a escolha de materiais e processos a serem utilizados, pode ditar o tipo de superfícies de formas e curvaturas que são permitidos.

O entendimento da geometria euclidiana abordado neste trabalho é que se trata da base da geometria de muitas superfícies curvas, e é simples e direta. Para curvas cônicas são frequentemente utilizadas as formas resultantes – muitas das quais podem ser geradas com caneta e papel, utilizando a geometria descritiva clássica – são bem compreendidas matematicamente e intuitivamente apreensíveis. O ponto importante no contexto desta discussão é que as formas resultantes e curvaturas são relativamente fáceis de compreender, sem recorrer

a ferramentas de análise da curvatura. Um exemplo desta afirmativa é a figura 3.16 abaixo de cones de bases iguais extraída do Livro XII dos Elementos de Euclides.

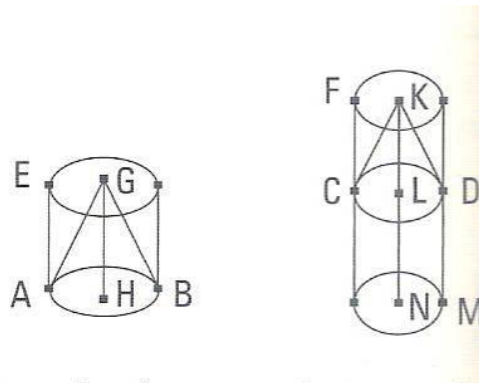


Figura 3.16. Elemento gráfico de geometria Euclidiana. Fonte: BICUDO, 2009, p. 554.

Segundo SHODECK “qualquer superfície que pode ser gerada pela tradução ou rotação de linhas retas é chamada de superfície regrada. Superfícies regradas são importantes na arquitetura, porque são simples para representar e facilmente construídas.” (SCHODEK, 2005, p. 195.). Moldagem para formas complexas de concreto podem ser construídas, por exemplo, seguindo a orientação das linhas dominantes, com bordas retas e pranchas de madeira, como a concretagem dos pilares da Catedral de Brasília, objeto de estudo deste trabalho. Abaixo figura 3.17 mostra a concretagem dos pilares da Catedral por meio de pranchas retas de madeira que são curvadas para permitir a moldagem conforme o projeto.

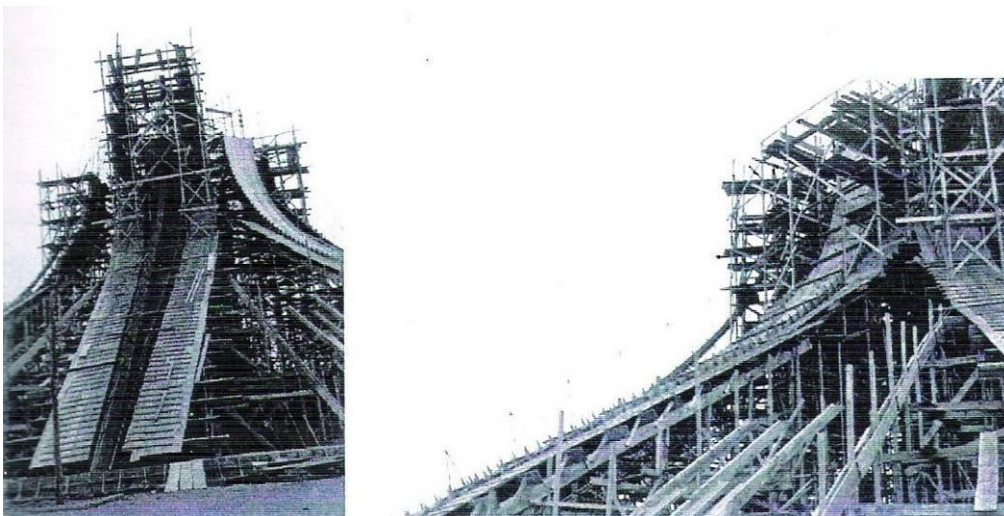


Figura 3.17. Concretagem dos Pilares da Catedral de Brasília. Fonte MAGALHÃES, 1959, p. 17.

Ambientes digitais de modelagem de superfície mais avançados permitem análises numéricas da curvatura da superfície. Um tipo de análise mais comum é a Gaussiana. Esta análise descreve uma série de fenômenos físicos. Serve de aproximação para o cálculo de outras distribuições matemáticas quando o número de observações fica grande. Pelo seu grande potencial analítico é muito utilizada em programas de modelagem tridimensional para o cálculo de curvas complexas. É possível visualizar a curvatura mediana e/ou curvatura Gaussiana de modo que diferentes tonalidades de cores representem os valores de curvatura, incluindo os valores negativos e positivos destas análises. (http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal, acessado em 30/01/2011).

Alguns programas permitem a definição de uma cor para determinados valores de curvatura, uma vez que o intervalo pode ser bastante elevado. Há ainda a opção dos projetistas estarem interessados em uma determinada zona da superfície. Os usuários podem ver normalmente por codificação de cores para valores de curvatura se uma superfície segue a forma desejada, ou se todos os recursos de forma não intencional ocorrem. Esta análise quantitativa da curvatura é complementada por técnicas de visualização qualitativas, como o de exibição de *wireframe* ou visualização de sombreamento. Por muitas vezes rotacionar o modelo, o projetista pode obter algum grau de julgamento como a forma aproximada do objeto. Quando a curvatura da superfície, no que diz respeito aos processos de fabricação é analisada, a curvatura Gaussiana e mediana é freqüentemente adequada para as peças fabricadas a partir de materiais como os metais.

Para os materiais tais como madeira ou plástico reforçado, os projetistas também utilizam curvatura normal para uma determinada finalidade. Alguns ambientes digitais de projeto, especialmente aqueles originalmente concebidos para campos como a indústria naval, permitem a visualização direta da curvatura da superfície para um uso especificado pelo usuário. A Figura 3.18 abaixo ilustra um exemplo de análise Gaussiana do interior da sala dos fundadores do edifício Walt Disney Concert Hall, em Los Angeles. Neste caso com um modelo digital

tridimensional do CATIA foi possível realizar análises Gaussianas usadas para a compreensão e construção das curvas complexas.



Figura 3.18. Análises Gaussianas do Walt Disney Concert Hall, Sala dos Fundadores.
Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 114.

Uma vez que a superfície tenha sido criada, pode ser submetida a uma série de manipulações. Durante estas operações, é fundamental permanecer no controle da forma, ou, em termos mais quantitativos, da curvatura da superfície. Projetos de ambientes para modelagem de superfícies avançadas são normalmente baseados em representação da superfície paramétrica, tais como NURBS. A forma de tais correções poderá ser editada, alterando as curvas de delimitação – normalmente as curvas *spline* que constituem perfis e modelagem traduzida como, por exemplo, *lofting* – técnica usada na transferência de medidas e curvas na modelagem de madeira para confecção de barcos. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Lofting>, acessado em 17/12/2010). Alguns ambientes permitem aos usuários mover pontos de controle individual da própria superfície, quer através da redefinição da sua posição de uma forma puramente qualitativa (arrastando pontos na tela) ou através de uma definição mais precisa numérica que concede um maior grau de controle de forma quantitativa. Abaixo a figura 3.17 ilustra uma superfície NURB e os pontos usados para o controle na manipulação da superfície.

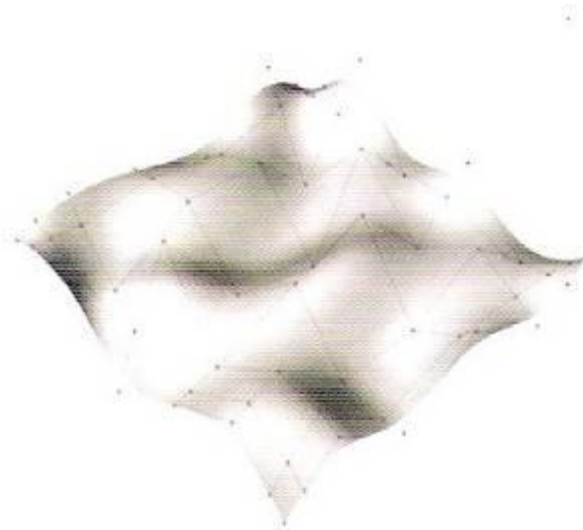


Figura 3.19. Superfície NURB. Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 17.

As arestas tangentes que foram definidas na criação da superfície são geralmente mantidas durante as manipulações. Como ilustrado na figura 3.19 acima esses tipos de superfícies, NURBS, podem ser manipuladas com um nível de controle por movimento de seções da malha ou segmentos de malha ou, ainda, de pontos para alterar a forma de malha. A forma resultante, no entanto, muitas vezes não é uma superfície lisa e contínua.

Como no edifício Walt Disney Concert Hall muitos projetos contêm superfícies múltiplas, que podem necessitar de ser conectadas a outras superfícies. Existem várias técnicas para superfícies de ligação, incluindo 'expansão' e 'fragmentação'. Quando uma superfície é expandida a sua forma é extrapolada por uma quantidade definida de uma forma semelhante à extrusão. Normalmente, uma superfície pode ser expandida até tocar uma superfície em um segundo ponto de controle. Esta técnica normalmente depende da superfície que excede para alcançar plenamente a superfície de controle que formam o seu limite. O melhor caminho, entendido neste trabalho para o controle da forma, pode ser através da criação de superfícies grandes o suficiente para gerar sobreposições, e usando funções como aparar ou cortar para remover as partes que não são necessárias. Durante a operação de remoção de uma intersecção a curva é calculada pela primeira vez, e então se torna uma nova curva de bordas do fragmento da superfície cortada. Esta operação contribui para a geração do

modelo final enviado para máquinas de fabricação digital. Em alguns ambientes as superfícies originais são mantidas e um novo fragmento de superfícies é criado. Outros ambientes mesclam a superfície original em uma única superfície e permitem que os usuários convertam o modelo de superfície em um modelo sólido. A figura 3.20 ilustra o modelo gerado a partir da junção de várias superfícies e o modelo sólido é gerado em seguida, a direita.

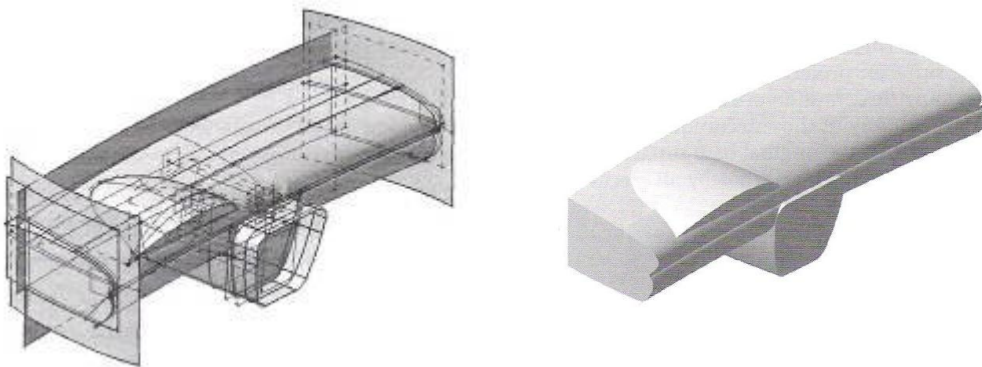


Figura: 3.20. Junção de superfícies em um modelo sólido. Fonte: SHODECK, 2005, p. 199.

Nestas manipulações, é importante lembrar que as superfícies em ambientes digitais avançados são superfícies paramétricas de padrões definidos por suas curvas de delimitação e pontos de controle. Ao remover ou adicionar uma parte de um remendo de superfície, os algoritmos paramétricos, que inicialmente descreviam a forma não podem mais ser validados. Alguns sistemas permitem a reconstrução de fragmentos, o que efetivamente resulta em uma redefinição do contorno de curvas e de redistribuição dos controles regulares em pontos de acordo com certos algoritmos. Esses fragmentos são, então, mais uma vez plenamente definidos parametricamente.

A maioria das indústrias tem necessidade de subdividir extensas superfícies. É comum fachadas de edifícios serem montadas a partir de pequenas partes painéis semelhantemente aos projetos de carros, aviões e navios. Estas subdivisões consistem em folhas individuais ou placas derivadas de um modelo digital de superfície maior. Subdividindo uma superfície plana é uma tarefa simples e que na maioria dos ambientes de desenvolvimento de projeto é possível através de funções padrão ou das técnicas de modelagem orientada. No entanto para a subdivisão de uma superfície curva complexa os projetistas

precisam de uma série de etapas que podem ou não conduzir a resultados úteis. Existem três técnicas básicas de subdivisão de superfícies: projeções, interseções, e a definição direta paramétrica de curvas. Estas técnicas usam caminhos geralmente resultantes da divisão da superfície na base original – uma subdivisão em partes individuais em que todas as peças são mantidas como fragmentos superficiais distintos.

Técnicas de projeção normalmente contam com as linhas curvas projetadas ou a ser modeladas em desenho separado ou em planos de construção. O caminho de projeção pode, muitas vezes, ser especificado pelos projetistas, incluindo caminhos ortogonais em um plano de construção selecionado. Técnicas de interseções dependem das subdivisões a serem geradas pela acuidade em relação à superfície. Superfícies planares ou curvadas são modeladas e, em seguida, a interseção das curvas se torna o limite dos fragmentos menores da superfície na forma subdividida. Ambas as técnicas de cruzamento e de projeção podem ser facilmente usadas para subdividir superfícies planas. A figura 3.21 abaixo mostra à direita uma subdivisão por projeção e à esquerda uma superfície é subdividida por interseção.

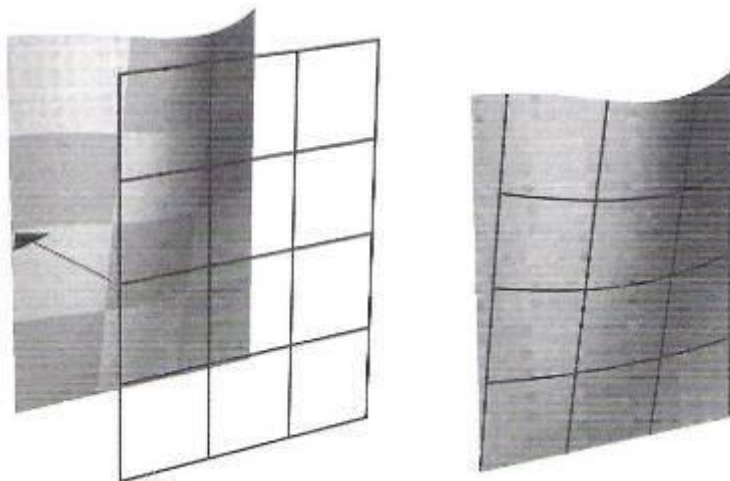


Figura 3.21. Divisão de superfície. Fonte: SHODECK, 2005, p. 200.

A subdivisão de superfícies é uma tarefa comum para aplicações de arquitetura, como o revestimento de edifícios de formas complexas. O tamanho das subdivisões é difícil de ser determinar de antemão, por causa dos ângulos de mudança entre a superfície curva e o caminho de projeção ou as superfícies de interseção. Uma maneira conceitualmente diferente de subdivisão de uma

superfície é definir curvas paramétricas diretamente sobre a superfície. Uma curva de *spline* na superfície pode ser definida pela localização de uma série de coordenadas. Essas coordenadas orientam a curva em todo o fragmento de superfície que interpola a forma das arestas. Embora a definição paramétrica de curvas possa gerar subdivisões regulares, não se pode facilmente gerar regularidade em termos absolutos. Para esse efeito, é necessário – e possível em alguns ambientes – especificar valores absolutos em vez de valores relativos de deslocamento da curva. Estruturas hierárquicas complexas podem ser configuradas com múltiplas relações entre as entidades de condução e a geometria das subdivisões. A figura 3.22 abaixo ilustra uma subdivisão de definições paramétricas.

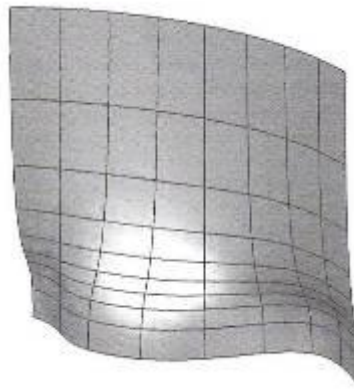


Figura 3.22. Subdivisões de definições paramétricas. Fonte: SHODECK, 2005, p. 201.

As funções automatizadas regularmente para subdividir superfícies complexas ainda são raras. Profissionais como Frank Gehry, que dependem de técnicas de subdivisão, tem desenvolvido e programado macros no CATIA que complementam essas funções.

As diversas variáveis e abordagens que compõem a tecnologia CAD/CAM para a construção excede aos tradicionais processos usados pelos arquitetos atualmente. Neste capítulo está ainda mais evidente que a era da informação digital está, de fato, reconfigurando o modo como são projetados e construídos os edifícios. Os meios convencionais não precisam ceder espaço para as novas tecnologias. Ao contrário, o processo natural de evolução do papel do arquiteto enquanto o participante ativo do projeto até a construção requer um resgate permanente da figura do arquiteto como ‘mestre-construtor’. As ferramentas

disponíveis nos atuais programas CAD permitem a construção de formas geométricas simples e complexas com a mesma facilidade e agilidade. No caso das geometrias complexas, não-Euclidianas, há ainda um enorme ganho de produtividade e de precisão, obtido na construção de edifícios por meio do uso de tecnologia CAM. Desde o projeto até a montagem no canteiro de obras.

A próxima seção trata dos estudos de caso identificados neste trabalho, através do uso de tecnologia CAD/CAM e BIM desde o desenvolvimento do projeto até a construção e montagem no canteiro de obras. Os edifícios apresentados são do escritório alemão Bernhard Franken e Associados e do escritório estadunidense do arquiteto Frank Gehry.

4. ESTUDOS DE CASO: PROJETOS COM USO DE TECNOLOGIA CAD/CAM

4.1 Pavilhões de Exposição da BMW, Frankfurt, Alemanha

Este capítulo trata da compreensão, desafios, benefícios e oportunidades dos processos de projeto e construção por meio de tecnologia CAD/CAM. Apresentaremos os projetos: “*Bubble*” um Pavilhão de exibição da BMW no Salão do Automóvel em Frankfurt em 1999 (figura 4.1) e o “*Dynaform*” outro Pavilhão construído para o Salão do Automóvel em Frankfurt em 2001 (figura 4.2). Ambos os projetos foram feitos pelo arquiteto Bernhard Franken na Alemanha relatando de modo breve o sucesso destes projetos no que diz respeito ao custo, precisão entre o projetado e o construído e o prazo de execução.



Figura 4.1. “*Bubble*”, Pavilhão de exibição da BMW no Salão do Automóvel, Frankfurt, 1999. Fonte: <http://www.franken-architekten.de>, acessado em 18/12/10.



Figura 4.2. “*Dynaform*”, Pavilhão do Salão do Automóvel, Frankfurt, 2001. Fonte: <http://www.franken-architekten.de>, acessado em 18/12/10.

Considerando indústrias como a naval, a automobilística e a aeroespacial, a construção civil em geral ainda é arcaica. Enquanto as tecnologias digitais têm revolucionado outras indústrias, o impacto no projeto e construção de edifícios é no mínimo distante. Essas indústrias introduziram ao mesmo tempo nos seus respectivos processos de projetos e produção tecnologias digitais, embora em diferentes âmbitos e fins. A mudança de processos não ocorreu nas mesmas proporções na construção civil. Contudo há diferenças significativas entre o projeto e produção de edifícios e o projeto e fabricação de navios ou aviões, no entanto há algumas similaridades interessantes que merecem uma análise profunda por parte dos arquitetos. Segundo FRANKEN: “Temos muito a aprender observando o que os outros têm sido feito, especialmente nas indústrias naval e aeroespacial” (FRANKEN apud KOLAREVIC, 2003, p. 123). Neste sentido apresentamos a citação abaixo, através da qual MITCHELL afirma que o uso de técnicas para dobrar placas de modo a produzir formas curvas têm sido praticadas há muito tempo pelos construtores navais, além de mencionar as práticas de fabricação de componentes para a indústria aeroespacial e automobilística.

“Construtores navais têm confiado por muito tempo na técnica de dobrar as placas ao redor de estruturas de suporte de forma a produzir formas de casco de curvaturas suaves. Além dessas técnicas, fuselagens de aviões e automóveis são produzidas a partir de folhas prensadas, dobradas e moldadas. Curvas planas podem ser fabricadas dobrando finas varetas, tubos ou tiras de material elástico, como o aço ou madeira, em torno de pontos de apoio.” (MITCHELL, 1995, p. 431 e 432.).

O projeto arquitetônico dos pavilhões da BMW apresentados nesta seção tem certa semelhança com a construção de iates de competição ou de um avião, assim como a produção de um carro. No entanto, no caso dos edifícios esses podem ser caracterizados como únicos – na grande maioria dos casos. Os projetos de edifícios são construções exclusivas sem quaisquer antecedentes, diferentemente da produção de automóveis. Nos projetos dos Pavilhões de Exposição da BMW em Frankfurt, Alemanha, tanto em 1999 quanto em 2001, optou-se pelo uso de tecnologia CAD/CAM nos processos de produção, que se parecem mais com os métodos de produção da *Boeing* do que com o processo de construção tradicional. A proposta de trabalho dos arquitetos foi no sentido de usar a estrutura de aço sobre a qual a membrana esticada seria o resultado dos

enquadramentos obtidos do modelo desenvolvido em Maya. Os planos foram criados de acordo com a linha matriz definida neste modelo digital. (SCHODECK, 2005, p. 73).

O projeto do Pavilhão de 2001, “*Dynaform*” teve o programa de necessidades como o ponto de partida, como ocorre na maioria dos projetos arquitetônicos. A empresa BMW, a cliente, elencou as demandas necessárias que foram traduzidas no processo que gerou a forma usando um modelo tridimensional digital. Por se tratar de um edifício com uso exclusivamente comercial o projeto deveria atender primeiramente as demandas comerciais ao invés das construtivas. Havia uma expectativa de receber em dez dias cerca de um milhão de pessoas que iriam visitar a edificação. A média de tempo de visitação era de quinze minutos. Os arquitetos entenderam que a principal tarefa não era projetar um programa espacial, mas preferencialmente uma cenografia que funcionasse como um filme rápido. A partir da compreensão de que o projeto deveria ser fundamentado em uma experiência sensorial marcante, os projetistas tomaram como partido a forma do edifício, não apenas tendo por base influências reais, mas além do contexto físico.

O arquiteto Bernahrd Franken entendeu que os modelos físicos em escala são indispensáveis nas apresenta es. Devido à complexidade das formas   difícil compreendê-las através de desenhos e imagens apenas. Uma alternativa foi usar os métodos de fabrica o altamente especializados na produ o dos modelos, tais como as técnicas de prototipagem rápida. Os arquitetos constr iram o modelo usando *laser sintering* ou estéreo-litografia para a constru o de protótipo da BMW, por exemplo, para criar a ‘estrutura aramada’ do projeto “Wave”. Na cita o abaixo, MITCHELL explica como funciona esse processo de estéreo-litografia que veio a ser utilizado mais tarde na BMW.

“As máquinas estereolitogr ficas exploram as propriedades dos líquidos fotossensíveis que se solidificam quando expostos à luz laser (figura 4.3). Um raio laser controlado por computador forma uma camada sólida traçando-a em um padrão de linhas sequenciais, então o tanque cheio com o líquido fotossensível   abaixado pela espessura de uma camada antes da camada seguinte ser traçada. Este ciclo é repetido até que o objeto completo é formado.” (MITCHELL, 1995, p. 427.).

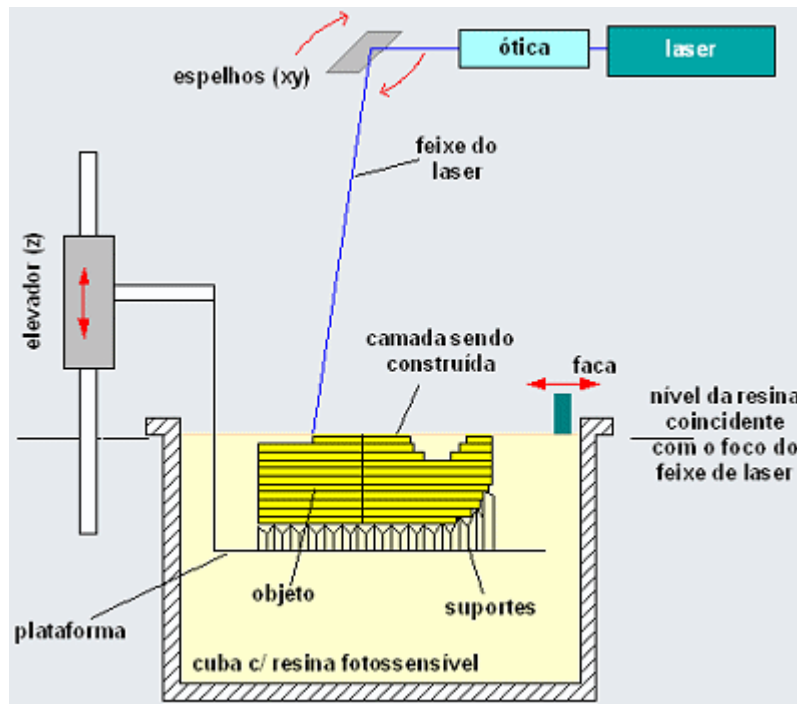


Figura 4.3: Figura 4.3. Processo de Estéreo-litografia. Fonte: http://www.cimject.ufsc.br/knowledge/03_knowledge_RP_estereo.htm, acessado em 07/03/11.

Os arquitetos tiveram que primeiro analisar se as técnicas de produção CAD/CAM empregadas eram viáveis e em seguida tratar com os dados em conformidade. O modelo físico, neste caso, serviu para verificações e análises da forma do edifício, além de fornecer informações e soluções úteis para a efetiva construção. A figura 4.4 abaixo ilustra o protótipo fabricado digitalmente em fresadora CNC.

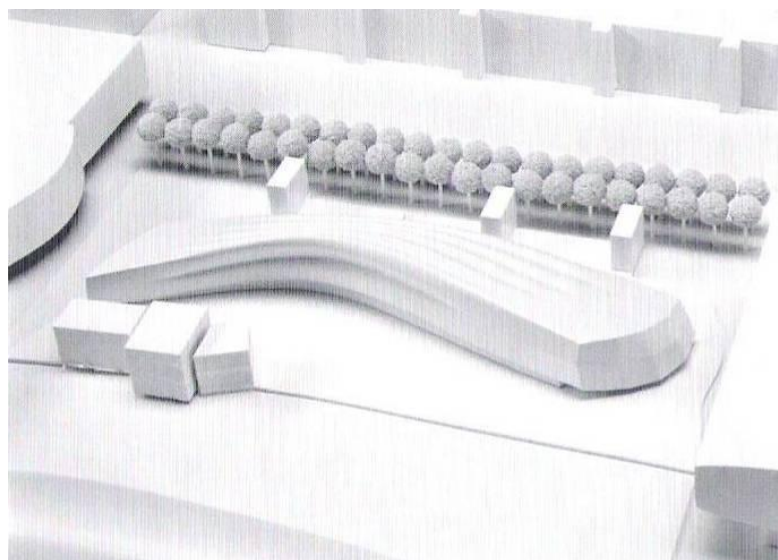


Figura 4.4. Protótipo feito em fresadora CNC. Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 128.

O modelo digital tridimensional CAD serviu para projetar detalhadamente cada componente do edifício. Através deste modelo foi possível produzir o protótipo de modo rápido através do uso de tecnologia CAM. O que auxiliou os arquitetos na antecipação de limitações importantes geralmente vistas apenas no decorrer da construção, como por exemplo, a interferência das instalações prediais na arquitetura. Além disso, análises da proporção e escala do edifício em relação ao entorno puderam ser melhor compreendidas.

O projeto *Dynaform* era uma proposta diferente para as tradicionais técnicas de produção na construção civil. Os arquitetos tiveram que desenvolver o projeto de modo associado aos novos métodos de produção digitais e delinear uma aproximação maior com os fabricantes e especialistas em produção. Como os principais projetistas os arquitetos estavam intrinsecamente envolvidos em todo o processo de produção, das decisões iniciais sobre questões fundamentais, desde a escolha de materiais, o processamento da informação, as oficinas de preparação, escolha dos fornecedores e construtores até ao planejamento da montagem. As contratações deveriam atender às especificações quanto ao material obrigatório, padrões de superfícies e processamento, deixando espaço para soluções inovadoras. Na construção deste edifício, o *Dynaform*, a linha que dividia projeto e produção deixou de existir. Este era um projeto no qual os fornecedores precisavam trabalhar em cooperação como co-responsáveis diretos no resultado final. Empreiteiros com vícios de construção, aqueles voltados exclusivamente a extrair maiores lucros, não eram uma boa alternativa. Havia a necessidade de que todos absorvessem as novas tarefas que possivelmente não estavam visíveis no escopo inicial da contratação.

O modelo de informação geométrica tridimensional constituiu a base para os documentos licitatórios, à parte dos desenhos que descreviam os detalhes. Esta condição reduzia o número de possíveis parceiros para uma seleção de poucas empresas hábeis para processar os dados. Foi registrado que as informações tridimensionais digitais e os modelos sólidos em escala deveriam compor juridicamente a documentação técnica necessária de projeto até a construção do edifício. A partir desta formalização, toda e qualquer troca futura de informação

CAD/CAM estava juridicamente respaldada. (FRANKEN apud KOLAREVIC, 2003, p. 131.)

Geralmente o modelo físico em escala não compõe os registros técnicos formais de construção. O cliente eventualmente paga por este trabalho nos estudos preliminares para efeito de compreensão do partido arquitetônico. Segundo FRANKEN “esta abordagem está fora do quadro legal convencional, que tem como base o conjunto de desenhos assinados pelos arquitetos” (FRANKEN, apud KOLAREVIC, 2003, p. 132.). Uma das preocupações que levaram a equipe de projetistas a estabelecer este novo procedimento contratual, seria a hipótese de uma disputa legal relativa a dúvidas projetuais e construtivas. Possivelmente os tribunais teriam considerável dificuldade para verificar com segurança o processo básico de trabalho utilizado pelos arquitetos. Não foi fácil contratar empresas nestes termos, apenas empresas ousadas e inovadoras aceitaram os desafios e tornaram-se parceiras na exploração de novos processos de projeto e produção.

Os arquitetos assumiram a gerência do projeto e coordenavam uma equipe formada por setenta e cinco profissionais entre arquitetos, engenheiros estruturais, engenheiros mecânicos, especialistas em comunicação, ‘Luminotécnicos’, e especialistas em áudio visual de mídia digital. Este número de profissionais trabalhando em conjunto no mesmo projeto é comum em projetos de proporções como no caso do projeto *Dynaform*. Não significa que isto represente um aumento nos custos. Ao contrário, entendemos nesta dissertação que o trabalho colaborativo entre as disciplinas antecipa diversos constrangimentos das instalações, da estrutura e da arquitetura do edifício. O que torna a construção e a vida útil do edifício menos dispendiosa. (EASTMAN, 2008, p. 118.).

Cada especialidade foi trabalhada em programas específicos. Era importante para o resultado final planejar de modo detalhado todas as interfaces do processo de construção no curto e intenso cronograma básico de construção. A apresentação do projeto ao cliente os arquitetos foi feita utilizando os recursos de animação de filmes no programa Maya. Os cálculos estruturais e testes foram

realizados no Ansys e R-Stub. Desktop Mechanical, aplicativo de engenharia mecânica para o AutoCAD e o Rhinoceros, foi usado para desenvolver as cargas estruturais. Alguns elementos estruturais, no entanto, foram trabalhados no CATIA, o programa de modelagem usado por Frank Gehry. Os *designers* de interiores trabalharam a comunicação visual, iluminação e arquitetura de interiores com o programa VectorWorks. Os dados para as máquinas CNC tiveram que ser programados em separado. Cada máquina possuía sua própria tecnologia de leitura dos dados. (FRANKEN, apud KOLAREVIC, 2003, p. 132.).

No sentido de gerenciar a variedade de programas e sistemas operacionais usados e facilitar a troca de dados decidiram por definir um protocolo com o qual os programas específicos pudessem se comunicar, e um *browser* (um programa de computador que habilita seus usuários a interagirem com documentos virtuais da Internet, também conhecidos como páginas da web) (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Navegador> acessado em 18/12/10.). Neste *browser* todos podiam ver os dados. Os protocolos usados foram o IGES (um formato padrão na indústria) para todos os dados tridimensionais e para todos os desenhos, DWG, além de formatos de arquivos de impressão e o formato PDF. Baseados em experiências passadas, os arquitetos compilaram um manual de CAD, para orientar a nomenclatura dos arquivos, um quadro de referência, e a organização das camadas de hierarquia do desenho. O projeto “*Dynaform*”. Abaixo a imagem ilustra um modelo tridimensional usado no estudo deste projeto.

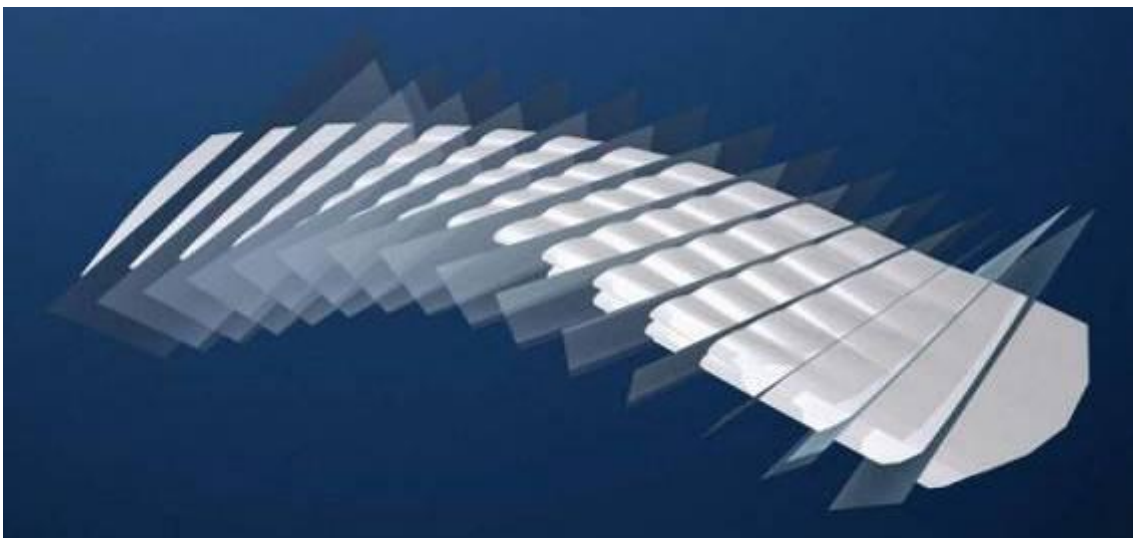


Figura: 4.5. Modelo tridimensional digital do “*Dynaform*”. Fonte: <http://www.franken-architekten.de>, acessado em 26/09/2010.

O modelo digital ilustrado na figura 4.5 acima foi utilizado para os estudos da forma e a dinâmica da estrutura. Os projetistas simularam o pavilhão em seções de modo a definir entre outros aspectos a compreensão da estrutura. Inicialmente o modelo de superfície possuía informações básicas para a compreensão da geometria. (SCHODECK, 2005, p. 73.).

Um projeto do porte do “*Dynaform*”, com mais de setenta e cinco projetistas e engenheiros e inúmeras empresas colaboradoras, só foi possível porque todos aderiam aos protocolos de dados mencionados anteriormente. Este padrão foi usado também pelos parceiros externos. Os dados foram compilados, supervisionados e mantidos em servidor de Internet para armazenamento. Por causa da simultaneidade dos muitos passos do projeto, e para evitar redundância, cada participante teve que ter acesso e trabalhar com o conjunto mais recente de dados. O servidor (funcionando como um espaço de projeto digital) registrava os dados de entrada automaticamente na pasta correta, de acordo com a nomenclatura definida pelo manual de CAD, reduzindo retrabalho. Os arquivos ficavam disponíveis eletronicamente a todo tempo e informava automaticamente aos participantes por fax ou e-mail que os novos dados estavam disponíveis. Um modelo tridimensional completo foi armazenado no servidor. Este modelo foi desenvolvido por todos os participantes que trabalhavam juntos e era arquivado pelos arquitetos em nível local e na *web*, em paralelo. Toda a estrutura metálica foi completada e modelada tridimensionalmente (até o último parafuso). A instalação sanitária, sistemas de ventilação e iluminação foram detalhados em modelo tridimensional para facilitar a solução de conflitos potenciais e o completo desenvolvimento dos detalhes com rapidez. Como a resultante do modelo global tridimensional geralmente tem muitos *gigabytes* é comum que não possa ser carregado completamente por um único computador. Para solucionar este problema foi desenvolvida uma nomenclatura exata do modelo de “partes”, com referências definidas para garantir total confiabilidade durante o desenvolvimento do projeto. (FRANKEN, apud KOLAREVIC, 2003, p. 133.)

No caso do Pavilhão de Frankfurt de 1999, “*Bubble*”, o processo de projeto e construção incluiu representações bidimensionais e tridimensionais para

executar as superfícies de forma livre. Esta seção irá descrever os aspectos relativos à fabricação digital que é o foco deste trabalho.

O edifício, “Bubble” foi projetado em forma de duas “bolhas” de geometria não-Euclidiana que se conectam, uma maior que a outra, unificadas formando uma grande superfície de curvas livres (figura 4.1). A modelagem desta superfície foi feita com uso de NURBS. O invólucro do edifício era de vidro e para viabilizar a execução os projetistas o sub-dividiram em trezentos e cinco placas de vidro acrílico distintas umas das outras, forjadas a quente e depois recortadas em blocos de espuma por meio de fresadora CNC. A figura 4.6 abaixo ilustra o processo como descrito acima. A sequência da direita pra esquerda a espuma sendo cortada em fresadora CNC, seguida de um molde curvo em espuma, o vidro sendo manipulado sobre o molde e por último as várias unidades de vidro sobre blocos distintos de espuma. (SCHODECK, 2005, p. 72.)



Figura: 4.6. Fabricação de moldes para os vidros do “Bubble”. Fonte: KOLAREVIC, 2003, p.

O processo como ilustrado acima garantiu precisão entre o modelo tridimensional digital e as placas de vidro em tamanho real. Este não foi um processo construtivo barato se comparado aos processos construtivos tradicionais.

A estrutura foi baseada no conjunto ortogonal de seções seqüenciais feitas de chapas de alumínio. O corte das partes de alumínio foi feito usando cortadoras CNC de jato d’água em sete fábricas diferentes. Aproximadamente três mil e quinhentos elementos de alumínio foram fabricados desta forma, incluindo perfuração de furos e marcação da montagem, para que o trabalho manual no canteiro pudesse ser reduzido ao mínimo. A figura 4.7 abaixo ilustra a malha ortogonal da estrutura e a montagem das placas diferenciadas de vidro.



Figura 4.7. Montagem da estrutura e do vidro do “Bubble”. Fonte: http://www.era21.cz/index.asp?page_id=96, acessado em 18/12/10.

A arquitetura gerada por computador, não é necessariamente mais cara do que a de edifícios convencionais construídos por meio de pranchas de desenhos bidimensionais consultados no canteiro de obras. Certamente e apesar de todas as dificuldades, Bernhard Franken e os arquitetos da ABB Architekten alteraram a estrutura do processo industrial de construção de edifícios. Segundo FRANKEN, num futuro próximo, mais “arquitetos usarão a customização em massa”. (FRANKEN, apud KOLAREVIC, 2003, p. 138.). O fator decisivo não é a manipulação do volume de peças diferenciadas, mas a capacidade de auxiliar o processo digital de projeto realizar a produção e conduzir a montagem no canteiro de obras. Uma cortadora plasma pode produzir uma centena de peças idênticas ou diferentes pelo mesmo preço. Na customização em massa uma única informação digital é suficiente para todas as peças.

4.2. Projeto Walt Disney Concert Hall, Los Angeles, Califórnia, EUA.

Nesta seção abordaremos o processo de projeto e construção do Walt Disney Concert Hall (WDCH) em Los Angeles, Califórnia nos Estados Unidos. Um projeto que foi iniciado de uma competição em 1987 com inicialmente oitenta arquitetos inscritos. Destes foram reduzidos ao número de seis candidatos: Goffried Böhm de Colonia; Harry Cobb de Nova York; Frank Gehry da Califórnia;

Hans Hollein de Viena; Renzo Piano de Gênova James Stirling de Londres (GERACE; GEHRY; WHITE; MUDFORD, 2009, p. 40.). A proposta era construir uma nova sala de concertos no Centro de Música de Los Angeles próximo ao Pavilhão Dorothy Chandler (Figura 4.8a-b) e deveria ser o principal teatro de ópera usado pela Filarmônica de Los Angeles. Lilian Disney, esposa de Walt Disney, fez uma doação de cinquenta milhões de dólares para financiar o projeto. O escopo geral do projeto consistiu: na sala de concerto em si, nos bastidores e espaços de apoio, escritórios administrativos para a Filarmônica, uma câmara de música e um espaço público para abrigar, em um grande pavilhão de vidro, o que seria uma “sala de estar” para a cidade.

O vencedor foi o escritório de Frank Gehry. Semelhantemente ao que ocorre na maioria das competições, ao final o proprietário e os empreendedores se reuniram para o planejamento da obra e analisar a viabilidade econômica. Logo perceberam que mesmo com a doação de Lilian Disney faltava cerca de cem milhões de dólares para construir uma sala de concertos de qualquer tipo. No sentido de captar recursos para viabilizar o projeto, foi adicionado ainda nos estudos iniciais do projeto a proposta de um hotel. De modo que pudesse abrir espaço para investidores e assim pudesse ser financiada a obra.



Figura 4.8a: Vista externa do edifício Walt Disney Concert Hall.
Fonte: (MORAIS, H. R. A., 2010.).



Figura 4.8b: À esquerda Walt Disney Concert Hall e à direita o Pavilhão Dorothy Chandler.
Fonte: <http://www.flickr.com/photos/ccmonty/1305336071/>, acessado em 13/11/10.

Havia na equipe de trabalho de Gehry para este projeto um especialista em acústica, Dr. Toyota. A seleção deste especialista influenciou diretamente no desenvolvimento de todo o projeto especialmente na definição da forma do edifício. A equipe de Gehry estudou um grande número de configurações de salas de concertos, de modo a compreender a melhor alternativa para o projeto da sala sinfônica. Foi desenvolvida uma série de modelos físicos que serviam de exemplos de salas existentes e a partir destes modelos foi criado o projeto figura 4.9. A hipótese no concurso era que a sala de concerto seria configurada com o palco numa configuração “circular”. A clássica “caixa de sapato” é a melhor para ser executada, embora de modo diferente.

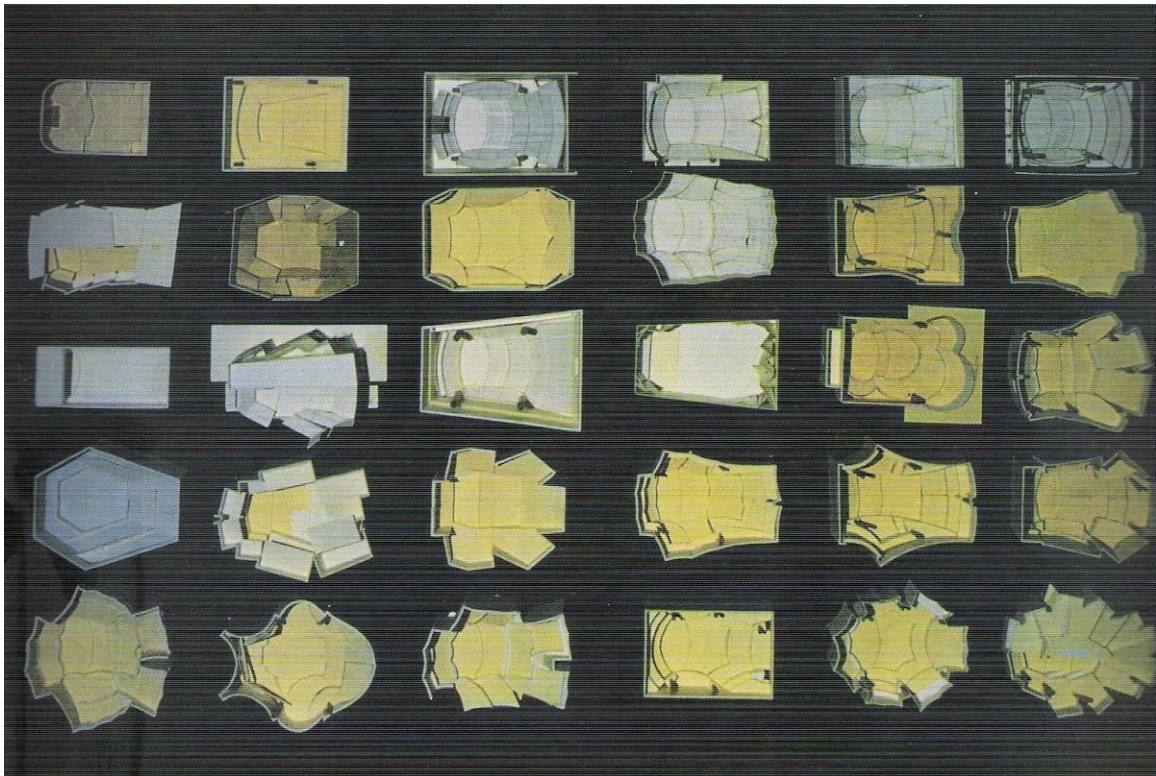


Figura 4.9. Modelos físicos desenvolvidos pela equipe de Gehry para auxiliar na escolha da acústica da sala de concerto. Fonte: (GERACE; GEHRY; WHITE; MUDFORD, 2009, p. 114.).

A figura 4.9 acima mostra os trinta estudos de modelos físicos em escala reduzida feitos pela equipe de Gehry. Estes estudos comparavam salas de teatro existentes com as novas propostas sugeridas pelo escritório de Gehry. O objetivo era criar uma sala em condições de acústica perfeita. (GERACE; GEHRY; WHITE; MUDFORD, 2009, p. 116.).

Os modeladores CAD tridimensionais estavam disponíveis no mercado desde 1985, mas Frank Ghery preferia trabalhar com maquetes manuais que seriam posteriormente transferidas para o computador através do uso de “scanner”. O modelo foi fundamental para a compreensão rápida de como o prédio deveria ser organizado. O especialista em acústica, Dr. Toyota, estava fazendo estudos de traçado de raios e analisando para o que chamamos de uma modificação da “caixa de sapato”. A figura 4.9 abaixo ilustra o processo de análise da acústica do edifício, à esquerda o modelo digital que calculava os raios acústicos e à direita as modificações feitas pelo especialista no modelo físico de escala reduzida. (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2005, p. 105.)



Figura 4.10. À esquerda estudo dos raios acústicos e à direita Dr. Toyota aferindo medidas no modelo físico. Fonte: (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2005, p. 105.)

Havia um desafio a ser superado, em termos de volumetria, era preciso acomodar duas mil e quinhentas pessoas. Considerando que uma sala sinfônica clássica acomoda cerca de duas mil pessoas. Seria necessário ampliar as dimensões da sala sem que comprometesse a qualidade acústica da sala. A solução dada pela equipe de Frank Gehry foi desenvolver paredes inclinadas na sala. O projeto estava em sua fase inicial da programação de rastreamento de raios acústicos. Devido à grande preocupação com a acústica da sala o especialista, Dr. Toyota, aferia medidas reais a partir dos modelos físicos com uso de medidores a laser e enviava os dados coletados para o modelo digital. Durante os estudos, instalavam superfícies reflexivas no modelo físico para simular de modo mais aproximado possível as condições acústicas que o edifício deveria ter depois de construído. Uma vez definidas as formas curvas internas da sala, Gehry começou a tratar a fachada. As curvas eram inicialmente geradas dentro do edifício e tornaram-se reflexo no seu exterior.

Em 1989, as formas do edifício se definiam e conseqüentemente as dúvidas sobre a construção. Neste momento percebeu-se que o hotel poderia ser excluído do projeto e, por conseqüente, era preciso re-projetar todo o layout do edifício. Após essa decisão foi definido o custo final da obra e comparado com a realidade dos recursos financeiros levantados até aquele momento. O projeto estava na quarta revisão, quando veio o convite para apresentar o projeto na Bienal de Veneza. Os investidores queriam que a fachada do WDCH fosse revestida de pedra. As superfícies de pedra foram modeladas tridimensionalmente em CAD com pontos de inserção racionais para criar curvas

e arcos que seriam cortadas em fresadoras CNC. Foi desenvolvido um padrão de tamanhos de blocos de pedra e então discutido com fabricantes na Itália como desenvolver o corte diretamente do modelo de computador. O objetivo era cortar as pedras com precisão utilizando recursos CAD/CAM.

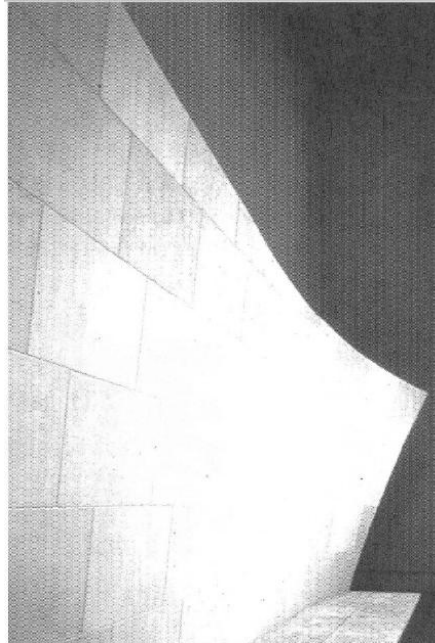


Figura 4.11. Modelo em escala real de parede de pedra, Bienal de Veneza. (MITCHELL, 1995, p. 426.).

Em Veneza havia um muro de pedra fabricado com tecnologia CAD/CAM como mostra a figura 4.11 acima, naquela ocasião o projeto básico do interior da sala de teatro estava em fase de conclusão. Com esta nova experiência obtida na Bienal os projetistas do escritório de Gehry repensaram no modo como projetavam o WDCH e um novo modelo em escala reduzida foi construído para iniciar a troca de dados entre o modelo físico e o modelo digital. O processo de geração de modelos, por digitalização de estudos físicos auxiliou no desenvolvimento de um modelo computacional refinado. A figura 4.12 abaixo mostra os ajustes sendo feitos manualmente pelo especialista em acústica. (KOLAREVIC, 2003, p. 106.)



Figura 4.12: Modelo em escala reduzida, usado nos testes acústicos. (GERACE; GEHRY; WHITE; MUDFORD, 2009, p. 123.).

Além do modelo acústico, no escritório de Gehry foram produzidos modelos interativos usando um digitalizador tridimensional (figura 4.13). As superfícies de formas complexas tanto de interior quanto de exterior foram construídas manualmente, e em seguida digitalizados os modelos físicos, e as modificações eram feitas no modelo tridimensional digital. Estas modificações digitais na forma serviam exclusivamente para ajustar as funções dos sistemas acústicos. Enquanto as alterações estéticas eram todas feitas nos modelos físicos. A equipe de projeto compreendeu a partir de suas experiências que a geometria realmente não era o mais importante, porque “os custos de fabricação, de triagem e de entrega permaneciam os mesmos, independentemente se as curvas eram mais complexas ou se estávamos fazendo curvas geométricas simples.” (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2003, p. 106.)



Figura 4.13. Braço digitalizador usado para marcar os pontos racionais. (KOLAREVIC, 2003, p. 106.)

Acima a figura 4.12 ilustra a digitalização de um dos primeiros modelos do WDCH. Os pontos das curvas eram racionalizados até certo ponto sem que perdesse a liberdade da superfície livre. Os projetistas acreditavam que poderiam construir digitalmente o edifício e isto lhes dava mais liberdade, isto é, o modelo tridimensional CAD gerado para a concepção do projeto poderia ser enviado direto para a fábrica. O programa CAD usado por Gehry foi o CATIA

O WDCH seria construído em Los Angeles, uma cidade localizada numa zona sísmica. Isto foi levando em consideração e as juntas de dilatação foram posicionadas horizontalmente. Foi desenvolvido um padrão de pedra e de sistema de ligação de alvenaria em que cada pedra fosse apoiada de forma independente, de modo que cada conjunto seria um movimento comum. Desta maneira Gehry definia a forma que poderia permitir o movimento de uma parede inteira sem ter de criar grandes articulações para quebrar a superfície contínua. Esta solução foi testada e então o modelo final foi desenvolvido. Abaixo a figura 4.14 ilustra um dos primeiros modelos do CATIA, gerado para estudo da fachada em pedra.

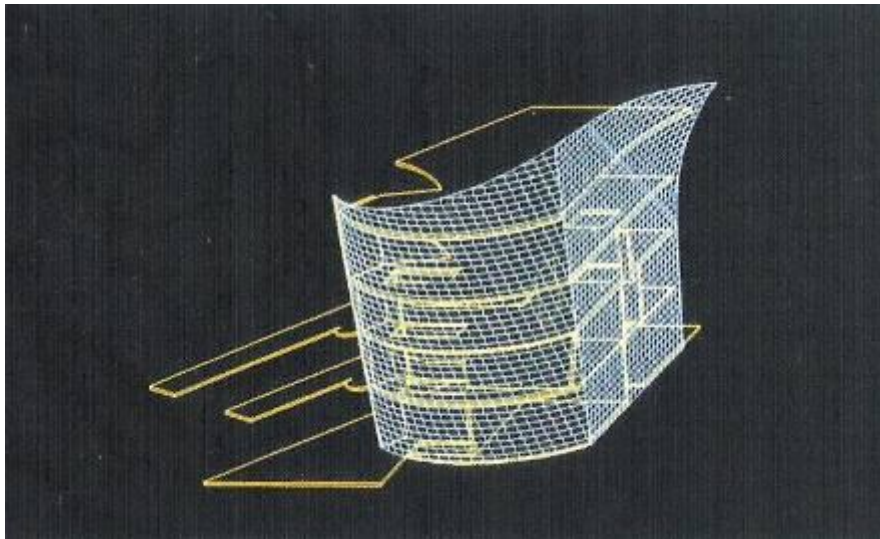


Figura 4.14. Modelo elaborado em CATIA para a fachada em pedra do WDCH. Fonte: (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2005, p. 107.)

Foi realizada uma seleção de fabricantes, a maioria deles na Itália, que trabalhassem a partir de dados fornecidos pelo computador. Diversos protótipos foram produzidos, de modo a compreender como as inúmeras e altamente complexas peças deveriam ser cortadas por tecnologia CAD/CAM. Os padrões gerados pelos modelos de superfície foram desenvolvidos pelos arquitetos. O

uso do modelo tridimensional para Gehry ainda era incipiente e havia um arquiteto na época responsável pelo desenvolvimento básico da construção e trabalhando com métodos tradicionais bidimensionais. Faltava muito a ser detalhado e a equipe começou a perceber que os desenhos não seriam concluídos em tempo hábil usando métodos tradicionais. Havia uma combinação de preocupações com a viabilidade da construção: a capacidade para concluir a documentação de todos os elementos do projeto; os custos sobre os elementos mais tradicionais da construção e a lenta captação de recursos.

Foi um processo difícil o de selecionar profissionais para a execução de um projeto complexo apesar de ter sido considerado conceituado em 1991. O desafio era contratar arquitetos e engenheiros experientes. Estes profissionais deveriam trabalhar com ambiente tridimensional com dados digitais e retroalimentações de modelos físicos. Esse foi um momento muito difícil para Gehry. Foi um *tabu* a ser quebrado conseguir alguém que acreditasse no projeto. Apesar do fato de que, com a pedra algo havia sido provado, mas tratava-se apenas de uma das muitas fases de coordenação no processo conduzido inicialmente com desenho bidimensional – um grande risco percebido. Neste momento a obra do WDCH foi paralisada e Gehry desenvolvia uma série de projetos fora de Los Angeles que o fazia acreditar que estava no caminho certo.

Em meio a este cenário iniciou o projeto O “Peixe de Barcelona” (figura 4.15). Gehry possuía experiência suficiente para iniciar o projeto no CATIA. E tudo foi modelado e coordenado através do computador, também utilizado para rastreamento de peças para a montagem. Através desse projeto, a equipe de Gehry foi se especializando com a transferência de informação para cortadores a laser a partir de um modelo tridimensional. Todos trabalharam com um único banco de dados. Abaixo a figura 4.14 à direita ilustra a estrutura construída na entrada do complexo da Vila Olímpica, Barcelona e à esquerda o modelo digital tridimensional gerado no CATIA.

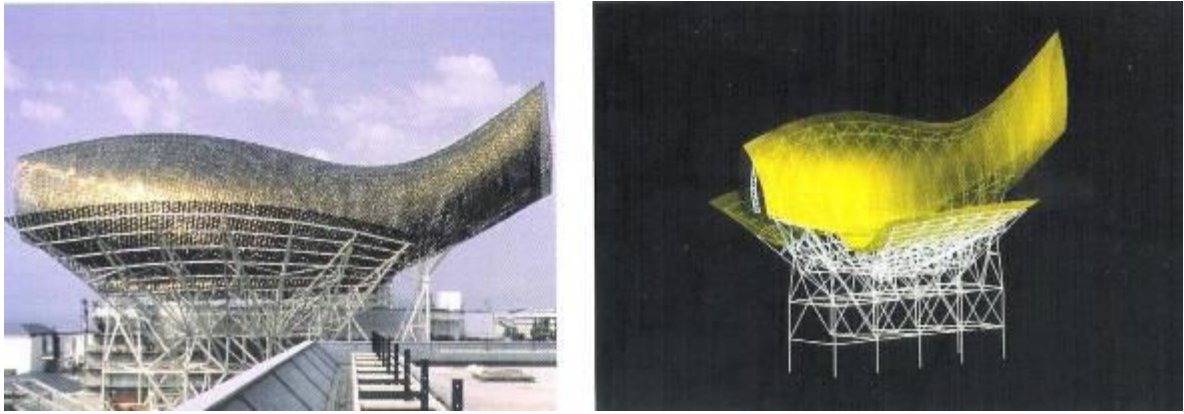


Figura 4.15. Estrutura do “Peixe” de Barcelona e o modelo digital gerado em CATIA. Fonte: (KOLAREVIC, 2005, p. 107.)

Enquanto o projeto do Walt Disney Concert Hall foi interrompido, a equipe de Frank Gehry também fez um projeto em Praga (figura 4.16). Optaram por criar modelos diretamente do computador para fabricação manual. Estas novas experiências deram a noção de que poderiam produzir em massa peças individuais, utilizando um sistema CAD/CAM. Foram desenvolvidos painéis pré-fabricados diferenciados de muro de concreto, mas a mão-de-obra *checa* não era adequada. Construíram formas de madeira e assim completaram o muro. A figura 4.15 abaixo ilustra a Maquete do edifício *Nationale Nederlanden* em Praga.



Figura 4.16. Maquete do edifício *Nationale Nederlanden*, Praga. Fonte: (KOLAREVIC, 2005, p. 108.)

A tecnologia estava evoluindo rapidamente. Naquele momento, os arquitetos do escritório de Gehry experimentavam a tecnologia CAD/CAM com corte a laser e fresadoras CNC. Sentiam-se mais familiarizados com as técnicas que interagem diretamente do modelo físico com o computador e o desenvolvimento de modelos digitais sofisticados. A tecnologia CAD/CAM permite ir além da fabricação direta do modelo digital na indústria, segundo MITCHELL, na citação abaixo, é possível produzir moldes de objetos ou elementos arquitetônicos com outros materiais, ou de acordo com o objetivo do projeto, permite fazer múltiplas cópias.

“As máquinas de prototipagem rápida podem ser usadas não apenas para transformação direta de modelos CAD em objetos fabricados, mas também para a produção de moldes e matrizes necessárias para reproduzir os objetos em outros materiais ou em múltiplas cópias.” (MITCHELL, 1995, p. 427.).

Além do projeto em Praga, havia um conjunto de torres em Düsseldorf, Alemanha. Neste projeto Gehry encontrou um contratante que decidiu investir em equipamentos CAD/CAM. Foi construída uma máquina para usinar grandes blocos de espuma (figuras 4.17) usados como moldes na fundição de peças únicas de concreto. Estas peças depois de fundidas foram montadas no canteiro de obras (figuras 4.18). Todo o material para a moldagem foi reaproveitado. O processo foi considerado pela equipe extremamente eficiente. (GERACE; GEHRY; WHITE; MUDFORD, 2009, p. 122.). A figura 4.16 abaixo mostra à esquerda a fresadora para usinar grandes blocos de espuma e à direita molde de concreto para concretagem dos pré-moldados no canteiro.



Figura 4.17. Usinagem dos blocos pré-moldados das Torres Düsseldorf. Fonte: (KOLAREVIC, 2005, p. 108.)



Figura 4.17. detalhe das Torres Düsseldorf e as torres. Fonte: (KOLAREVIC, 2005, p. 108.)

Acima figura 4.18 mostra à esquerda os painéis de concreto pré-fabricados das Torres Zollhof, Düsseldorf, Alemanha no momento da montagem no canteiro. E à direita o edifício depois de construído.

Outro projeto importante que teve muito a ver com a retomada do projeto de Los Angeles foi o Museu Guggenheim, em Bilbao. Alguns fatos importantes ocorreram que contribuíram diretamente para a viabilidade do projeto: a disponibilidade da tecnologia em surgimento na região e havia um sentimento de orgulho regional, todos os contratados trabalharam em harmonia por esse motivo. O projeto foi um sucesso. Especialmente porque todos queriam provar que era viável, e assumiram total controle do que estavam fazendo. Houve ainda, na época, uma recessão na Europa, que manteve os preços baixos. Conseqüentemente a indústria russa fez uma grande oferta de titânio no mercado, o que contribuiu para reduzir o preço. Tendo em vista esses aspectos o custo do edifício não foi elevado, o que redefiniu a maneira como toda a equipe de Gehry usaria as ferramentas computacionais, em vez das tradicionais. Além de como todos os envolvidos colaboraram com as ferramentas. (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2003, p. 109.) A figura 4.19 abaixo ilustra à esquerda estrutura metálica do Museu Guggenheim modelado no CATIA e à direita imagem da estrutura sendo montada em Bilbao, Espanha.

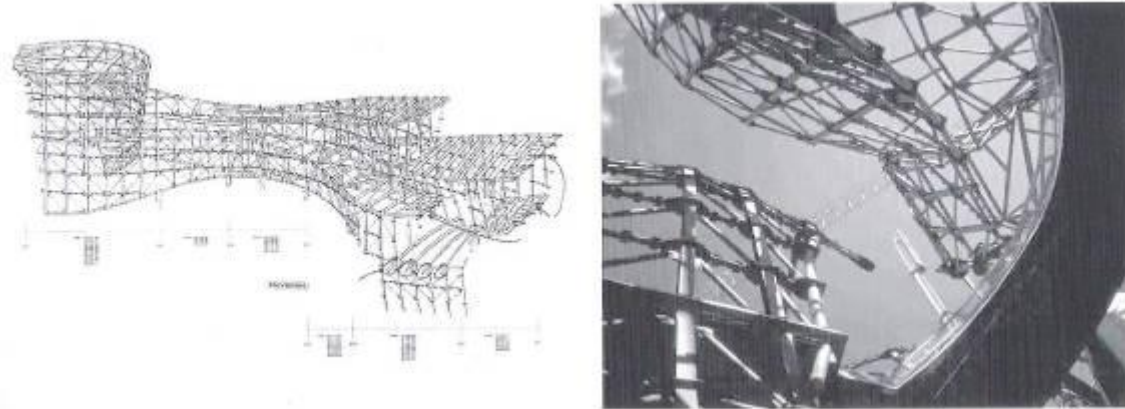


Figura 4.19. Estrutura do Museu Guggenheim em Bilbao, Espanha. Fonte: (KOLAREVIC, 2005, p. 108.)

Após a conclusão bem sucedida do Museu Guggenheim, Gehry retorna aos Estados Unidos, e os investidores o procuram pois queriam retomar o projeto WDCH e construí-lo. Agora, todos acreditavam que esse projeto seria construível, mas um terremoto rachou algumas das estruturas do teatro e alguns engenheiros foram retirados da equipe. Toda a equipe estava empenhada em realizar o projeto e o começaram novamente. Havia novos critérios sísmicos completamente diferentes para trabalhar e uma grande dose de incerteza sobre as condições da estrutura do momento. A garagem havia sido construída e os empreendedores continuavam contrários ao uso de metal na fachada, mesmo depois do bem sucedido Museu Guggenheim. (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2003, p. 110.). Nesse ínterim, os custos de construção só tinham aumentado e os projetista argumentavam que seria mais fácil trabalhar com superfícies metálicas, pois seria relativamente mais simples. E finalmente os projetistas conseguiram convencer os investidores que esta seria a melhor alternativa para o revestimento exterior do edifício.

Retornando aos trabalhos do projeto de Los Angeles a equipe de Gehry decidiu mudar as formas em muitos aspectos. Tiveram que racionalizar o projeto para conseguirem lidar com a forma e o modo como o metal se comportaria na superfície complexa. O interior da sala manteve-se inalterado no novo desenho. Tudo o que Gehry tinha que fazer era projetar uma nova estrutura, entre um interior inalterado e um exterior ligeiramente modificado.

Gehry estava usando um processo diferente para o WDCH daquele usado em Bilbao. No Museu Guggenheim foram fornecidas menos informações para os empreiteiros espanhóis, que desenvolveram a estrutura de aço no programa de computador Bocad. Nos Estados Unidos, para o WDCH, foram passadas muitas informações para os projetistas de aço. Os empreiteiros cogitaram usar o fabricante de aço espanhol que havia sido contratado em Bilbao, mas Gehry optou por uma estrutura operacional americana. Assim, projetistas americanos desenvolveram detalhes de conexão no program Xsteel da empresa Tekla (<http://www.tekla.com/>, acessado em 19/12/10) para a cobertura usando o modelo aramado original do CATIA. O objetivo era executar o detalhamento diretamente do modelo de computador usando tecnologia CAD/CAM em todas as ligações de modo que auxiliasse a montagem no canteiro de obras.

A execução da montagem de um modelo arquitetônico complexo requer que seja marcada a localização de encaixe de cada componente, que pode ser feita através de códigos de barra, e em seguida, mover o componente para o local determinado e, finalmente, fixá-lo no lugar planejado. Este ciclo de atividades no sentido de “determinar, mover, estabelecer” é repetido quantas vezes forem necessárias até que o modelo esteja montado por completo. Esses procedimentos de construção são feitos em escala real porque a modelagem tridimensional ocorre na escala de 1:1. (MITCHELL, 1995, p. 434.). Na citação abaixo MITCHELL, ressalta a importância crucial do planejamento de montagem no processo de fabricação ou construção.

“A determinação de uma sequência de montagem adequada é um passo muito importante no planejamento de um processo de fabricação ou construção e os projetistas, que por vezes têm que considerar os efeitos de decisões de projeto sobre o caso ou a dificuldade de montagem.” (MITCHELL, 1995, p. 434.).

É possível, de um modo geral, prever todas as etapas da montagem no canteiro de obras a partir do modelo digital. No entanto, nem todas serão exatamente como o previsto. Algumas das sequências podem ser mais fáceis de executar que outras, porque permitem posicionamento simples e rápido de novos componentes em relação àqueles já em posição, por exemplo. Além disso,

algumas sequências podem ser mais fáceis de serem estabelecidas que outras, porque precisam de menos movimento dos componentes.

No projeto do WDCH a equipe de Gehry definiu que as paredes de aço seriam montadas sem utilizar informações manuais, mas através de levantamentos a partir de dispositivos baseados em pontos de controle extraídos do modelo CATIA. O padrão de elevação para os painéis e os padrões de montagem no seqüenciamento da construção de todas essas peças foi feita em um modelo de programação de quatro dimensões (incluindo a variável de controle de tempo). O empreiteiro também usou do modelo CATIA original. A equipe de Gehry tinha ganhado experiência com diversos outros projetos com a mesma complexidade o que beneficiou projeto do WDCH. Em 2001, quando a estrutura de aço foi finalmente concluída, o projeto de sala de concertos estava atrasado. Enquanto o aço era feito, um construtor da Itália, chamado Permasteelisa, trabalhava no revestimento. Era um fornecedor que estava acostumado a trabalhar com os projetos de Gehry na Europa. Ambos estavam confiantes sobre como trabalhar com dados digitais. O modelo de aço estrutural aprovado feito em Xsteel foi importado para o CATIA. A premissa era que a estrutura fosse forte o bastante para desempenhar o seu papel estrutural e suficientemente leve para ser dobrada em formas *spline*.

Cada peça do revestimento foi detalhada no modelo tridimensional do CATIA. Os pontos de conexão foram identificados diretamente na laje de concreto para ser posicionados. Todas as barras horizontais possuíam um quadro em volta possibilitando o revestimento, que eram pré-cortados e numerados individualmente com código de barras. Os painéis metálicos exteriores foram também pré-cortados, mesmo os que possuíam bordas. A empresa Permasteelisa estava montando os painéis tão rapidamente na maioria das áreas, que, em alguns casos, precisou antecipar o cronograma. Sua taxa de produtividade na instalação foi melhor do que o esperado. (JIM GLYMPH, apud KOLAREVIC, 2003, p. 111.)

Havia algo comum nos projetos e programas usados pela equipe de Gehry e seus parceiros. A parametrização fazia parte da programação de todos os

programas usados nos edifícios. O CATIA estava naquele momento na versão cinco. Os modelos digitais gerados nesta nova versão tinham como premissa desenvolver desenhos tridimensionais parametrizados. A empresa Zahner, fabricante de metal, quando trabalhou no projeto EMP, usou dados paramétricos no programa ProEngineer para desenvolver a engenharia dos painéis de metal e seu *layout*. A definição paramétrica permitiu a todos os profissionais envolvidos modificar e regenerar a geometria e reestruturar o enquadramento conforme a necessidade, e a saída das quantidades de material de construção, os desenhos técnicos ou instruções de máquina CNC.

Este capítulo mostra várias influências da evolução da informática no trabalho do arquiteto Frank Gehry, no que diz respeito ao projeto e construção. A equipe do arquiteto trabalhou ao longo das últimas três décadas com cerca de quatorze projetos – alguns citados neste capítulo – usando modelagem computacional tridimensional, em grande parte com o programa CATIA. Os projetos foram construídos nos Estados Unidos e na Europa. Há uma diferença real entre arquitetos e empreiteiros e como eles trabalham tanto nos Estados Unidos quanto na Europa. Em muitas culturas Européias, artesãos e subempreiteiros, são muitas vezes profissionais respeitados, assim como os arquitetos. O progresso tecnológico é rápido e intenso, mas como em tantos outros domínios, as mudanças culturais evoluem muito mais lentamente do que a tecnologia. As lições aprendidas sobre os projetos de Gehry, especialmente no Walt Disney Concert Hall ressaltadas nesse trabalho, não diz respeito apenas à computação e ao projeto. Verificamos também o planejamento, a contratação e a comunicação na construção civil porque entendemos resultar diretamente no custo final do edifício. Um exemplo disso é o estudo de caso do Pavilhão *Dynaform* que foi um terço menor comparado ao um edifício de geometria simples localizado imediatamente ao lado, chamado Mini Pavilhão. A figura 4.20 abaixo é vista geral do *Dynaform* localizado no Pavilhão da BMW.



Figura 4.20. Pavilhão BMW em Frankfurt, Alemanha. Fonte: (KOLAREVIC, 2003, p. 138.).

Abaixo a figura 4.21 ilustra em detalhe o Mini Pavilhão em vidro e geometria ortogonal que exibia uma pequena mostra aberta ao público.



Figura 4.21. Mini Pavilhão BMW. Fonte: (KOLAREVIC, 2003, p. 138.).

Este exemplo demonstra que a arquitetura gerada por computador, não é no final, necessariamente mais cara do que a dos edifícios convencionais. O Mini Pavilhão, figura 4.21, construído como uma caixa de vidro ortogonal próximo ao “*Dynaform*” custou um terço a mais por metro quadrado do que o Pavilhão “*Dynaform*”. Como mostra este exemplo, a arquitetura gerada por computador não tem um custo maior – podendo custar menos. Outro exemplo é a Boeing que introduziu originalmente o projeto digital e processo de produção digital especificamente por ter verificado na fabricação dos seus aviões que é possível

alcançar uma economia financeira de 20% em comparação aos antigos métodos de produção mecânicos. (FRANKEN, 2005, p. 138.).

Sob a ótica do projeto de arquitetura elaborado para a construção, nesta dissertação apresentaremos no capítulo sete um trabalho experimental para avaliar, ainda que sucintamente, o uso das tecnologias CAD/CAM na fabricação de formas complexas. O artefato escolhido foi o pilar estrutural da Catedral de Brasília. Para um maior entendimento do artefato o capítulo seguinte faz uma breve explanação da Catedral de Brasília e seus aspectos construtivos. O objetivo principal é analisar a geometria que compõe o pilar e os aspectos construtivos da época. A Catedral de Brasília é um edifício de grande importância para a arquitetura por diversos aspectos. Desde a concepção da forma com uso de geometria não-Euclidiana nos pilares ao método construtivo que requereu alternativas inovadoras para a época.

5. A ESTRUTURA DA CATEDRAL DE BRASÍLIA:

Neste capítulo temos como objetivo apresentar um histórico da concepção, projeto e execução da estrutura da Catedral de Brasília. Parte da história organizada para este trabalho foi obtida de depoimentos relatados com detalhes na dissertação de mestrado de Diogo Pessoa, conversas diretas com o arquiteto Carlos Magalhães responsável pela construção da Catedral, livros e publicações relativas ao monumento e no site <http://doc.brazilia.jor.br/>, acessado até 19/12/10.

Em setembro de 1956 foi publicado o edital do concurso público para o Plano Piloto da nova capital. O edital contemplava: projeto básico da cidade, onde figurassem a localização dos elementos principais da estrutura urbana, os diversos elementos principais e serviços, bem como suas interconexões, distribuição dos espaços livres e das vias de comunicação e memorial descritivo. Em março de 1957 foi divulgado o projeto apresentado pelo arquiteto e urbanista Lúcio Costa como o vencedor. Foi escolhido entre vinte e seis propostas concorrentes. Houve muita polêmica entre os que não venceram o concurso. O júri foi firme e em nota pública destacou: “Seus elementos podem ser prontamente apreendidos; o plano é claro, direto e fundamentalmente simples. Tem o espírito do século XX; é novo; é livre e aberto; é disciplinado sem ser rígido”. (JÚNIOR, 2004, p. 25).

O projeto, segundo Lúcio Costa, “nasceu do gesto primário de quem assinala um lugar ou dele toma posse: dois eixos cruzando em ângulo reto, ou seja, o próprio sinal da cruz” (PESSOA, 2002, p. 9). A simplicidade evidenciada pelo próprio urbanista e reconhecida pelo júri, é na verdade, segundo GIEDION, a introdução de “uma grandeza de linhas e de formas em fachadas fulgurantes e projetos de imponência surpreendente” (GIEDION, 2004, p. 9).

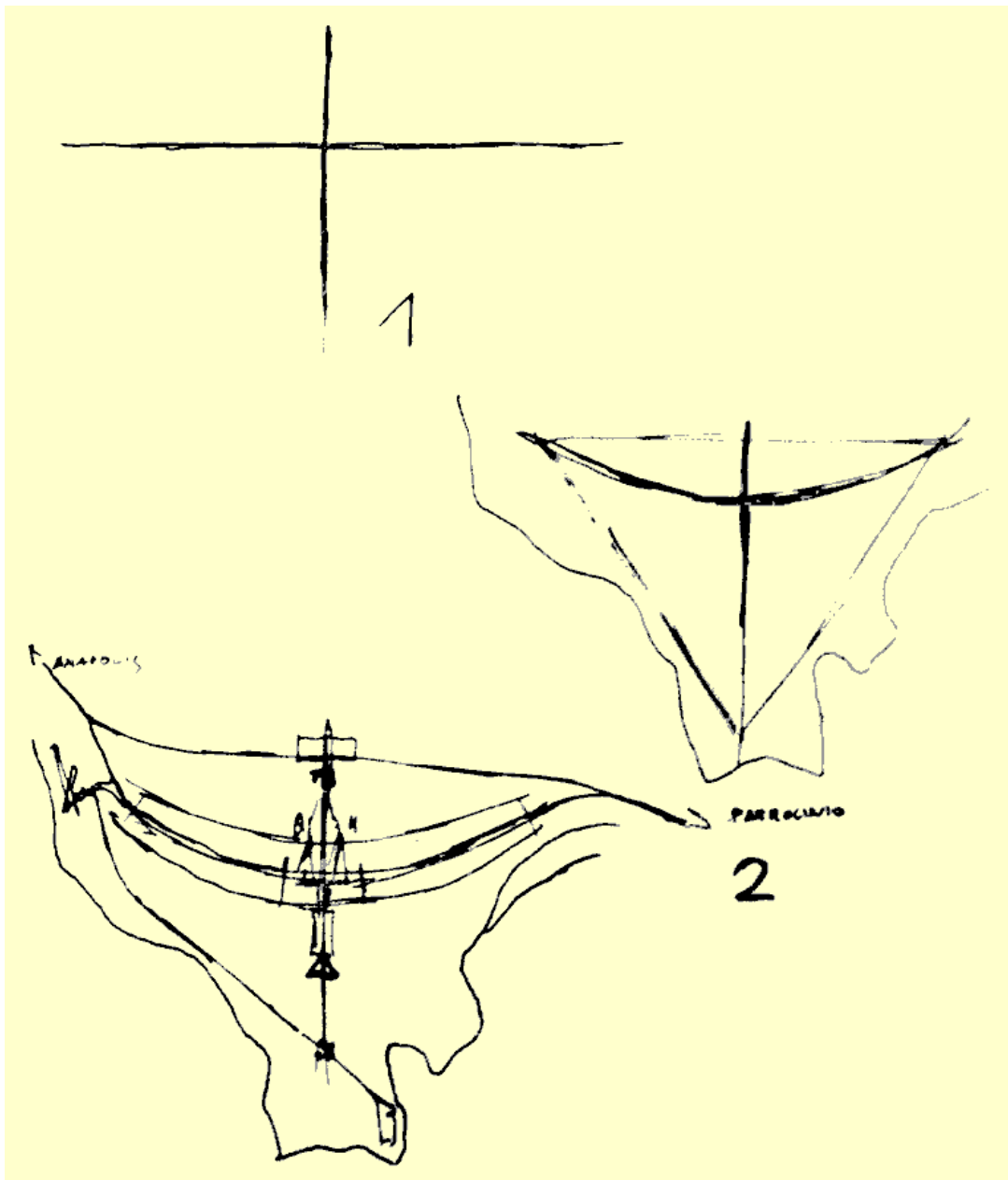


Figura 5.1. Ilustração de Lúcio Costa para o concurso do Plano Diretor de Brasília – Fonte: <http://doc.brazilia.jor.br/ppb/RelatorioLucioCosta01e02.htm>, acessado em 19/12/10.

O projeto de Lúcio Costa é concebido de linhas ortogonais como mostra a figura 5.1 acima. Abaixo uma breve descrição do projeto do Plano Piloto relativa a área em que está situada a Catedral de Brasília. As linhas definidas por Lúcio Costa são descritas abaixo no que se refere a ortogonalidade. É sugerida monumentalidade e destacados os edifícios administrativos.

“O traçado urbanístico de Brasília tem a forma estilizada de um avião; daí os nomes Plano Piloto, Eixo monumental, Asa Norte, Asa Sul. (...) O eixo transversal leste-oeste do Plano Piloto, denominado “Monumental”, recebeu os centros cívico e administrativo, o setor cultural, os centros comerciais e de diversões e o setor administrativo municipal ou distrital. Destacam-se nesse conjunto os edifícios

autônomos destinados aos poderes fundamentais da República – Legislativo, Executivo e Judiciário, que formam um triângulo que configura a Praça dos Três Poderes.” (<http://doc.brazilia.jor.br/ppb/RelatorioLucioCosta.htm>, acessado em 19/12/10.).

A seguir “croquis” feitos por Lúcio Costa demonstram a configuração do Eixo Monumental. A sequência é primeiramente a planta baixa da Praça dos Três poderes, seguida da perspectiva livre desta mesma Praça. Por último, na mesma ilustração, uma perspectiva geral de todo o Eixo Monumental.

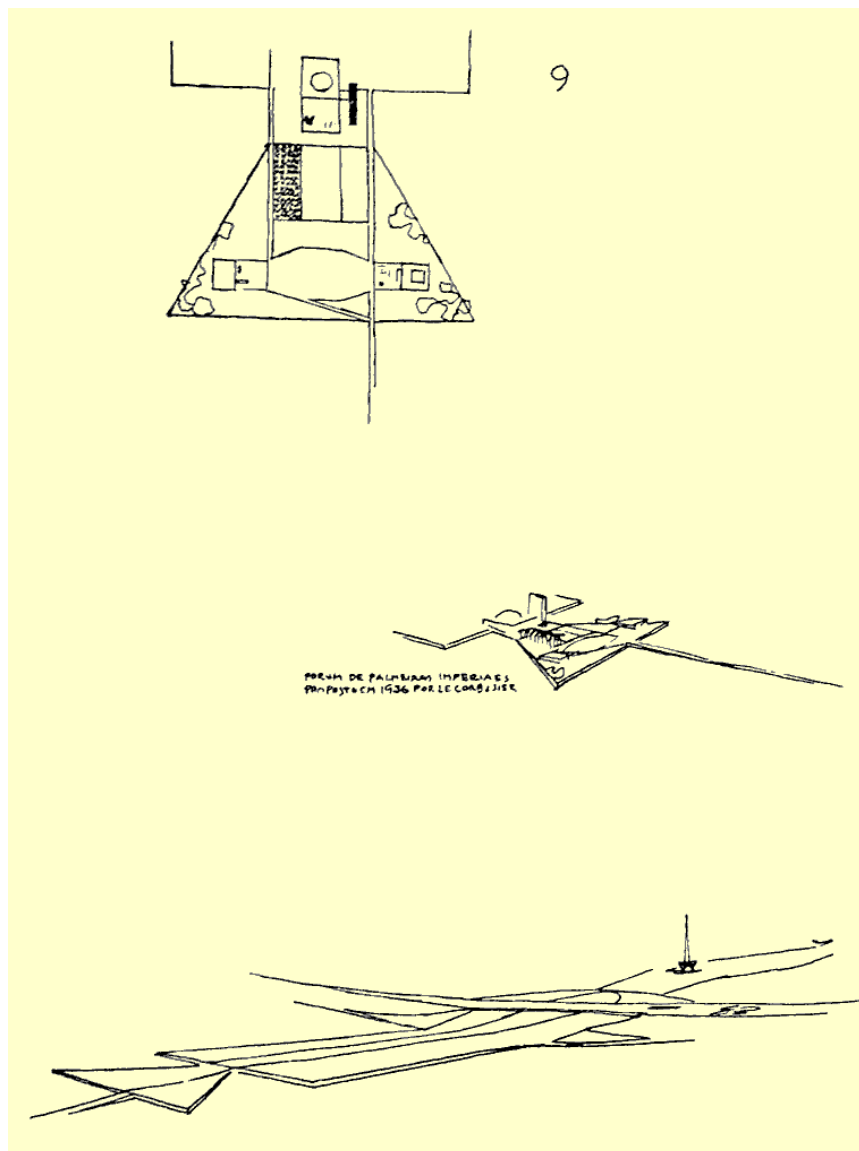


Figura 5.2. Croqui de Lúcio Costa do Eixo Monumental. Fonte: <http://doc.brazilia.jor.br/ppb/RelatorioLucioCosta09.htm> , acessado em 19/12/10

Em um ângulo da Praça dos Três Poderes localiza-se a sede do Governo Executivo, em outro o Supremo Tribunal na base e a do Congresso no vértice. Ao longo da esplanada foram dispostos os ministérios e autarquias que o

urbanista alude como o 'Mall dos ingleses', há extenso gramado destinado a pedestres, a paradas e a desfiles.

A Catedral está localizada nessa esplanada, mas numa praça autônoma em posição lateral. Lúcio Costa optou por posicioná-la desta maneira não só por uma questão de protocolo, uma vez que a Igreja é separada do Estado. Deu-se também por uma questão de escala, para valorizar o monumento, e ainda, principalmente, por questão de ordem arquitetônica: “a perspectiva de conjunto da esplanada deve prosseguir desimpedida até além da plataforma, onde os dois eixos urbanísticos se cruzam.” (<http://doc.brazilia.jor.br/ppb/RelatorioLucioCosta.htm>, acessado em 19/12/10.)

Neste contexto outro arquiteto, desenvolve os principais monumentos da nova capital, Brasília: Oscar Niemeyer. Existe uma relação entre o Plano Piloto de Lúcio Costa e os projetos de Arquitetura de Oscar Niemeyer. “O uso das estruturas em concreto armado, em formas curvas ou em casca e com explorações inéditas das possibilidades estéticas da linha reta” (MEYER, 2002; GUIMARÃES, 2002 apud. PESSOA, 2002, p. 6)

A edificação é um volume único, capaz de surgir com a mesma pureza, seja qual for o ângulo de visão. Niemeyer procurou uma forma compacta e limpa que é composta por dezesseis montantes de concreto que “se opõem” através de um “gesto violento de tensão, como o de duas mãos estendidas com os dedos abertos num espasmo de súplica” (MAGALHÃES, 2010.). Assim, o autor pensou a planta circular e teve a idéia de lançar para o céu uma estrutura construída por uma série de elementos hiperbólicos. Abaixo a figura 5.3 e 5.4 ilustram os “croquis” do arquiteto Oscar Niemeyer para Catedral de Brasília cujo partido arquitetônico valoriza a forma escultórica, destacando-se como marco visual.

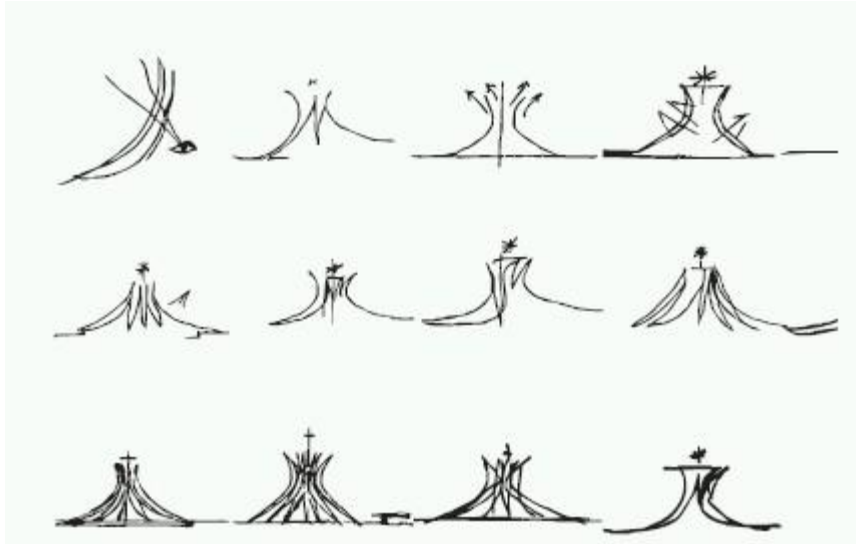


Figura 5.3. Croqui de Oscar Niemeyer para Catedral de Brasília – Fonte: http://www.dc.mre.gov.br/box-02/exponiemeyer.jpg/image_view_fullscreen, acessado em 19/12/10.

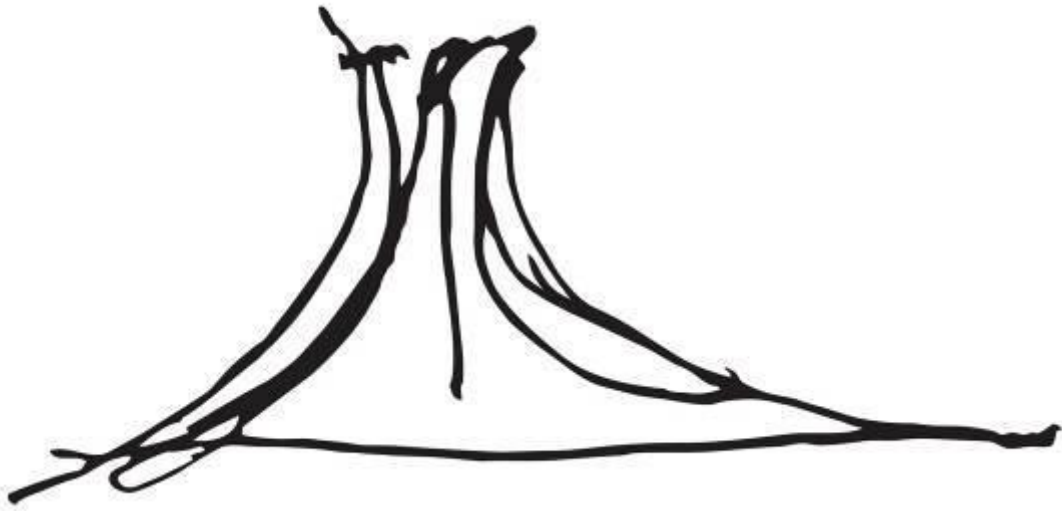


Figura 5.4. Croqui de Oscar Niemeyer para Catedral de Brasília – Fonte: http://architetur.wordpress.com/2009/10/09/catedral-de-brasilia/3_catedral_de_brasilia-4/, acessado em 19/12/10.

A Catedral de Brasília foi construída no período de 1959 e 1970, em dois períodos distintos: fase inicial (1959 a 1960), em que se deu a construção da estrutura da nave da Catedral; e a fase final (1969 a 1970) que foram construídas as estruturas do espelho d'água, o Batistério e o Campanário. (Fundação O. Niemeyer apud. PESSOA, 2002, p. 8).

O edifício é destacado pela escala monumental do local onde está implantada, e pela homogeneidade do conjunto dos edifícios dos Ministérios. A edificação emerge do chão como um novo tipo de cúpula, pousada suavemente sobre uma catedral parcialmente subterrânea. Assim, o arranjo interno não prejudica a

perfeição da forma externa, apesar da transparência, resultante do preenchimento dos vazios com placas de vidro refratário, que atenuam o excesso de luz solar, criando uma atmosfera favorável ao recolhimento. Niemeyer tinha confiança nas possibilidades da técnica contemporânea e contava com o engenheiro Joaquim Cardozo para os cálculos da estrutura da obra. O arquiteto propôs inicialmente o uso de vinte e uma hiperbolóides e altura de quarenta metros. Posteriormente, por razões estéticas, Niemeyer reduziu o número de pilares e a altura para trinta metros. A previsão era que a Catedral tivesse capacidade para quatro mil pessoas e um conjunto anexo, com cerca de dez mil metros quadrados de construção. (MAGALHÃES, 2010.).

A concepção dos pilares é especialmente inovadora para a época. A seção ao longo do seu comprimento é toda variável e com uma geometria particular, que se assemelha a um triângulo vazado. Para criar o vazio interno no pilar a execução se deu em fôrmas caixão perdido (figura 5.5). Segundo o responsável técnico, as fôrmas das peças estruturais de concreto foram verdadeiras “obras de arte”, devido à dificuldade de concepção, pois a geometria das seções era muito complexa, especialmente para os meios de projeção e construção da época. Abaixo citação de PESSOA descreve os detalhes construtivos da geometria dos pilares.

“Para que as fôrmas das colunas pudessem ser construídas, foi necessário desenhar nos canteiros de obras, com as dimensões reais, uma das colunas e a partir daí, montar aproximadamente vinte ‘cortes transversais’ a fim de que fosse possível transferir para o concreto a forma projetada pelo arquiteto. Sobre escoramento foi montado o fundo das colunas, depois a armação, caixões perdidos e o complemento das armações. As fôrmas eram fechadas de maneira a permitir que as concretagens fossem feitas por etapas e que as colunas recebessem o mesmo volume de concreto a cada etapa de concretagem.” (MAGALHÃES apud PESSOA, 2002, p. 16 e 17).

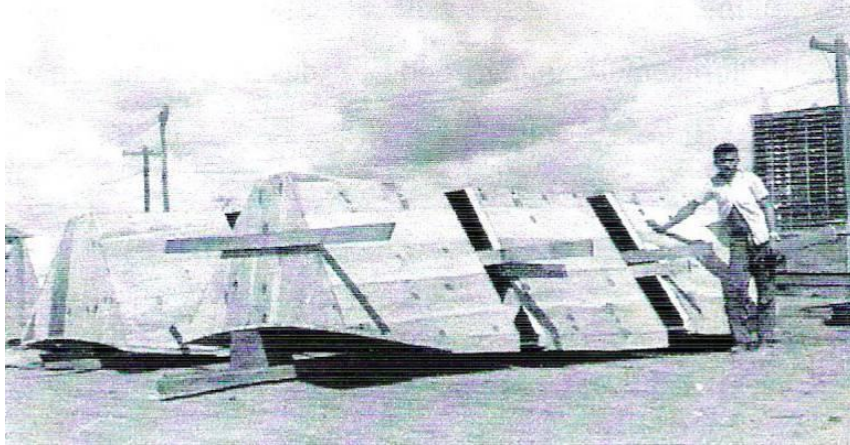


Figura 5.5: Formas dos caixões perdidos. (MAGALHÃES, 1959.)

As formas da estrutura de concreto foram produzidas em madeira. No caso dos pilares, primeiramente a parte inferior; depois foi colocada a armadura e por fim as faces laterais e a superior das formas. A figura 5.6 abaixo mostra a concretagem dos pilares no canteiro de obras.



Figura 5.6. Concretagem dos pilares da Catedral de Brasília. Fonte: <http://www.band.com.br/jornalismo/galeria.asp?ID=2899#>, acessado em 19/12/10.

O escoramento da estrutura da Catedral foi montado com tubos Mills, em forma de 'leques', apoiando cada coluna. Para a montagem dos 'leques' foi necessário construir um bloco de fundação para cada um deles, apoiado em cinco estacas inclinadas tipo Franki, para resistir ao esforço horizontal naquele ponto. A figura 5.7 abaixo é uma ilustração que descreve a construção dos pilares.

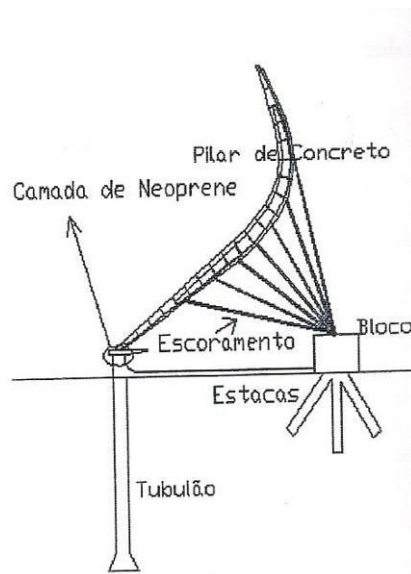


Figura 5.7. Escoramento dos pilares da Catedral de Brasília. (MAGALHÃES apud PESSOA, 2002, p. 16.)

A figura 5.7 acima mostra as estacas de sustentação do escoramento que foram cortadas na altura do piso inferior e permanecem, até hoje, no terraço da Catedral. A cobertura da nave principal da Catedral é sustentada por uma estrutura auto-equilibrada, composta por 16 pilares dispostos circunferencialmente com relação a planta, como mostra a figura abaixo. (MAGALHÃES, 2010.).

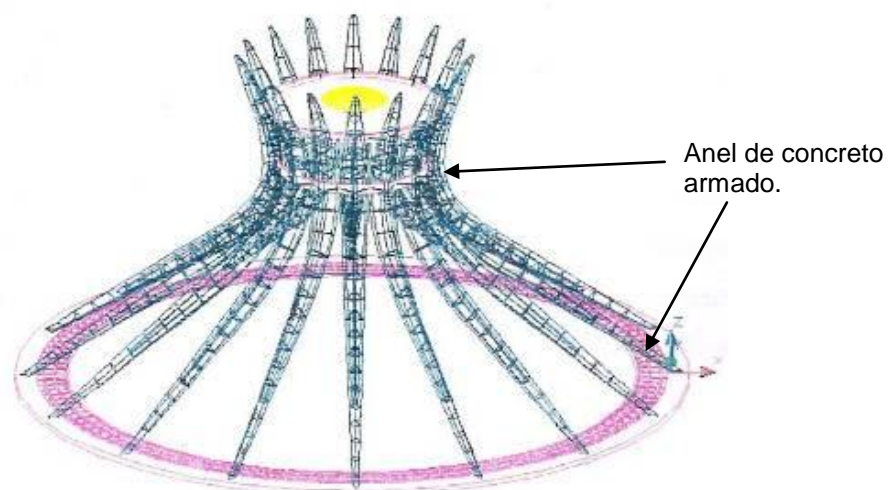


Figura 5.8. Modelo tridimensional gerado para análise da estrutura. Fonte: PESSOA, 2002, p. 11.

A estabilidade da super-estrutura é garantida por dois anéis de concreto armado como mostra a figura 5.8 acima. O anel superior está localizado a, aproximadamente, 10 m do topo dos pilares, absorvendo os esforços de

compressão. Esse anel apresenta uma seção transversal retangular de 22 cm de base e 90 cm de altura, passando por dentro dos pilares, sendo imperceptível aos olhos do observador. O anel inferior, ao nível do piso, absorve os esforços de tração, funcionando como um tirante, reduzindo a carga das fundações, as quais recebem apenas os esforços verticais. Esse elemento estrutural é composto de quatro anéis, unidos por vigas laterais, formando uma grelha. (MAGALHÃES, 2010)

O anel principal, no combate aos esforços de tração, mais externo, é caracterizado por uma seção transversal retangular de 50 cm de altura e 200 cm de largura. Os demais anéis absorvem parcelas menos significativas dos esforços de tração, advindos dos pilares, e são dispostos distantes uns dos outros aproximadamente 2 m. A grelha composta por esses anéis funciona como uma marquise, que invade o interior da Catedral. As seções desses anéis são variáveis, e as vigas (transversinas) que formam a grelha acompanham essas variações. O anel mais próximo ao anel principal apresenta uma seção de base igual a 20 cm e altura variável de 42 a 40 cm. O anel seguinte também apresenta uma seção variável, com base igual a 20 cm e altura variando de 32 a 30 cm. O anel mais interno apresenta uma seção de 20 cm de base e uma altura que varia de 22 a 20 cm. Como as vigas que formam a grelha são perpendiculares aos anéis, suas seções acompanham as variações das alturas dos mesmos (42 a 20 cm), com uma base de 20 cm. Duas lajes, uma na parte superior, com 5 cm de espessura, e outra na parte inferior, com 3 cm de espessura, vedam esse conjunto estrutural formado por uma grelha composta por quatro anéis e 128 vigas, com execução em fôrmas em caixão perdido. Esse anel só é visível no interior da Catedral. (MAGALHÃES, 2010.)

A laje de cobertura não tem função estrutural de sustentação, apenas de vedação. Em seu perímetro externo, um anel liga a laje de cobertura aos pilares. Esse anel apresenta uma seção com características peculiares, pois a mesma acompanha o formato dos pilares, caracterizada por um losango variável de base igual a 35 cm e altura de 50 cm. A laje é circular com uma abertura no centro. Além disso, sua espessura é variável ao longo de seu comprimento, sendo de 15 cm próximo ao anel e 22 cm da abertura. A laje de cobertura pode

ser comparada a um prato vazado. A abertura existente na laje, apenas com função de ventilação, é coberta por uma casca circular de 6 m de diâmetro e 12 cm de espessura. (MAGALHÃES, 2010.) A concepção dos pilares possui seção variável ao longo do seu comprimento toda e com uma geometria particular, que se assemelha a um triângulo vazado. A figura 5.9 mostra um pilar típico da Catedral, redesenhado em programa CAD (Ansys), descreve as vinte e duas seções contidas nas plantas de formas. Algumas seções são vazadas como mostra a figura 5.9 e outras são cheias. (PESSOA, 2002, p. 14.)

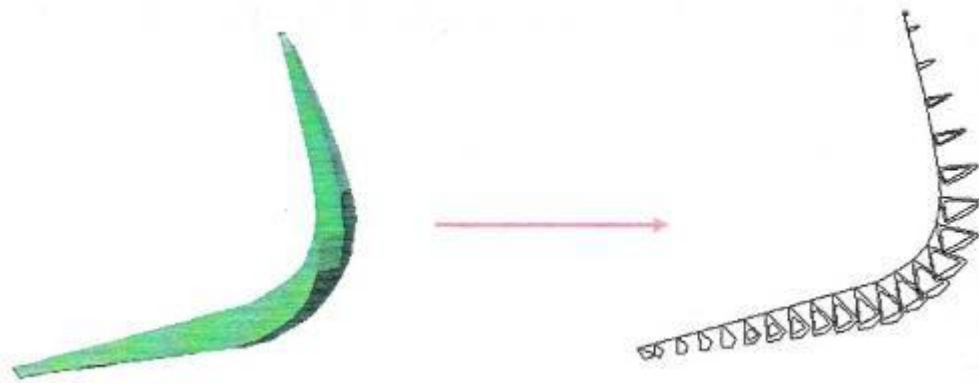


Figura 5.9. Detalhe de um pilar típico da Catedral de Brasília. Fonte: PESSOA, 2002, p. 14.

A estrutura dos vitrais é composta por treliças tridimensionais, em aço, que são ligadas à estrutura através de barras de ferro, presas ao longo dos pilares. O conjunto arquitetônico da Catedral abrange outros elementos, como o espelho d'água, o Batistério e o Campanário. A estrutura do espelho d'água é em concreto protendido e só foi realizada dez anos depois do início das obras. As fundações são descritas por Magalhães (2002): “Tubulões escavados a céu aberto com diâmetro de 0,70 m e profundidade de aproximadamente 28 m, com as bases alargadas. São dezesseis blocos ligados através de cintamento, apoiados em dezesseis grupos de tubulões”. (MAGALHÃES apud PESSOA, 2002, p. 15)

Apesar da importância desse monumento, não foi obtido nenhum documento, memória de cálculo ou registro da concepção estrutural do feito pelo calculista da obra Joaquim Cardozo. Por meio do depoimento de Magalhães, obteve-se a informação de que o modelo de Cardozo incluía, além do cálculo estrutural, para o peso próprio e sobrecargas, uma análise que considerava, inclusive, o efeito de carregamento do vento na estrutura dos vitrais, interagindo com os pilares e o

efeito da variação da temperatura na estrutura, o que, mesmo para os modelos atuais, é uma consideração sofisticada.

Para que as formas das colunas pudessem ser construídas, foi necessário desenhar nos canteiros de obras, nas dimensões reais, uma das colunas e a partir daí, montar aproximadamente vinte “cortes transversais” a fim de que fosse possível, transferir para o concreto a forma projetada pelo arquiteto. Sobre escoramento foi montado o fundo das colunas, depois a armação, caixões perdidos e o complemento das armações. As formas eram fechadas de maneira a permitir que as concretagens fossem feitas por etapas e que as colunas recebessem o mesmo volume de concreto a cada etapa de concretagem (MAGALHÃES, 2010.). A figura 5.10, abaixo, mostra o galpão onde foi desenhada a forma de um pilar da Catedral, no tablado de madeira do piso, em tamanho real.



Figura 5.10. Vista aérea do canteiro de obras da construção da Catedral de Brasília. Fonte: <http://www.band.com.br/jornalismo/galeria.asp?ID=2899>, acessado em 02/11/10.

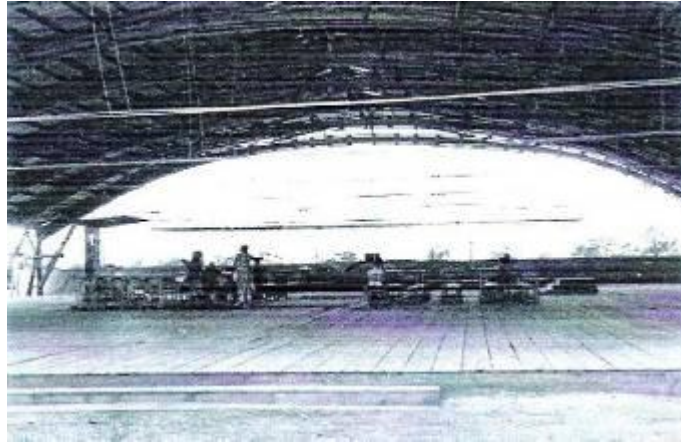


Figura 5.11. Galpão onde foi desenhada a forma, em tamanho real, de um pilar da Catedral. Fonte: Magalhães, 1959 apud PESSOA, 2002, p. 17.

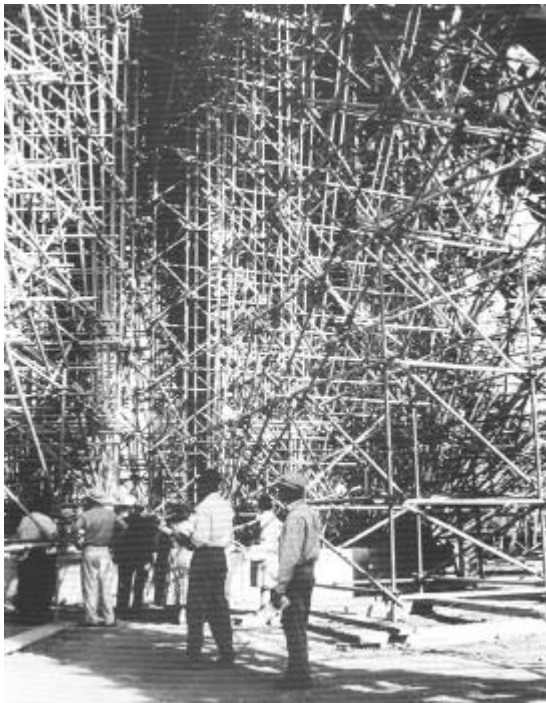


Figura 5.12. Escoramento dos pilares da Catedral de Brasília. Fonte: http://www.eca.usp.br/pjbr/arquivos/especial_mural-008.htm, acessado em 02/11/10.



Figura 5.13. Escoramento dos Pilares da Catedral de Brasília. Fonte: Magalhães, 1959 apud PESSOA, 2002, p. 18.

A quantidade de escoramento para sustentação das formas era impressionante, como a vista geral do escoramento da Catedral mostrada nas Figuras 5.12 e 5.13 acima, que permite ver um pouco do suporte interno para a construção do monumento. Deve ser ressaltado que as estacas de sustentação do escoramento foram cortadas na altura do piso inferior e permanecem, até hoje, no terreno da Catedral.

Segundo Magalhães a concretagem dos pilares foi realizada em seguimentos de quatro metros. O concreto era lançado através de guindastes e dosado na própria obra. Existiam três turnos de trabalho, proporcionando uma execução acelerada do monumento. A desforma foi realizada cerca de vinte e oito dias após a concretagem do último trecho de cada pilar. A cura do concreto foi feita através da molhagem das formas. A retirada do escoramento foi realizada de cima para baixo, de forma circular. Era previsto que a estrutura tivesse um deslocamento vertical máximo de aproximadamente 17 cm. Após a retirada de parte do escoramento, a força gerada pela estrutura foi tão intensa que empenou as peças do escoramento. (MAGALHÃES, 2010.)

As obras da construção da Catedral de Brasília foram retomadas em 1969. Foi construído o espelho d'água, colocados os vitrais e os anjos. Além de construído o campanário, o batistério e realizado o acabamento interno da edificação. Desta forma foi finalizada a construção de todos os elementos projetados para compor o edifício.

6. HIPÓTESE

O uso da tecnologia CNC permite obter custos menores na fabricação de componentes construtivos a exemplo da produção industrial padronizada (produzida em série) com mais precisão e controle na construção de formas complexas.

O projeto de arquitetura que é elaborado através do computador utilizando um dos diversos programas CAD tridimensionais disponível no mercado pode ser construído através da tecnologia CNC. Este método permite a construção de formas geométricas não-Euclidianas, complexas, maior controle, precisão, entendimento, além de viabilizar sua construção com maior rapidez do que nas construções convencionais e com custos menores ou iguais a essas. Estes são alguns dos inúmeros benefícios que se espera alcançar. Além de "personalização em massa", ou seja, a tecnologia CNC garante a fabricação de componentes não-padronizados diretamente a partir de dados digitais.

A customização em massa permite maior liberdade na definição da forma e viabilidade financeira, através de preços iguais ou inferiores em comparação com a produção em massa de elementos idênticos (KOLAREVIC, 2003, p. 52). Este novo paradigma de produção em grande escala de componentes singulares é possível devido aos recursos eletrônicos utilizados hoje que apóiam a indústria mecanizada. Elementos singulares podem ser desenvolvidos digitalmente e enviados para a fabricação mecanizada sem que isto exceda nos custos finais de produção e atendam amplamente inclusive a elite, ao contrário do conceito preconizado pelo modernismo. De acordo com o conceito do movimento Modernista apenas a elite teria acesso a edificação singular ou diferenciada. A variabilidade das formas dos elementos agora é possível para todos.

É importante ressaltar que para alcançar melhores resultados com os recursos das tecnologias CAD/CAM é necessário que todos os envolvidos no processo de projeto e fabricação trabalhem com modelos tridimensionais digitais. Isto possibilita antever o maior número de possíveis inconsistências,

incompatibilidades e erros de projeto que podem ser eliminados antes da construção.

“A capacidade de produzir em larga quantidade componentes de geometria irregular de edifícios com a mesma facilidade de peças padronizadas introduziu a noção de *personalização em larga escala* (...). Por vezes esta personalização sistemática pode ser definida como a produção em massa de bens e serviços individualmente personalizados (...), oferecendo assim um tremendo aumento na variedade e personalização sem um correspondente aumento dos custos.” (KOLAREVIC, 2001, p. 122).

Uma provável resposta para a pouca utilização das novas tecnologias digitais na indústria da construção civil (em Brasília, e possivelmente no Brasil) é a baixa demanda de solicitações por parte dos arquitetos, os quais muitas vezes, limitam sua própria capacidade criativa em benefício do que eles conhecem como exeqüibilidade de seus projetos. Em decorrência disto a indústria, ainda que detentora da tecnologia limita-se a execução de projetos elaborados a partir de informação bidimensional sem usufruir da maior complexidade que os modelos tridimensionais permitem e sem um *input* direto a partir de dados digitais.

7. TRABALHO EXPERIMENTAL: MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO

Adotamos os procedimentos descritos abaixo em nosso método de investigação para verificar a nossa hipótese de trabalho de que o uso da tecnologia CNC permite obter custos menores e tempo de fabricação mais curto na fabricação de componentes construtivos, com mais precisão e controle na construção de formas complexas do que a produção manual:

- Desenvolvemos um experimento que permitiu a comparação entre uma simulação do processo de projeto e fabricação digital de modelo reduzido de um lado; e o processo de elaboração de projeto bidimensional e produção do mesmo com o mesmo objeto produzido manualmente por um artesão, de outro. Modelamos em tamanho reduzido de 54 cm um dos pilares estruturais da Catedral de Brasília-DF em chapa metálica. O primeiro modelo foi feito diretamente a partir de informações digitais tridimensionais, com vistas à compreensão da interação entre o projeto e a fabricação digital. E o segundo detalhamos e o encaminhamos a um artesão para orçamento e execução. A seguir será apresentado cada experimento.

A parte experimental teve como base a confecção de um pilar da Catedral de Brasília em escala reduzida. O pilar foi fabricado em chapa metálica. O objetivo era compreender quais seriam os resultados obtidos em termos de: liberdade das formas; controle e melhor entendimento do objeto; precisão em relação ao projetado; custo e tempo de execução. No sentido de mensurar tais parâmetros, nosso experimento foi realizado de duas maneiras e com a participação de duas empresas diferentes. Uma que utiliza equipamento CNC, corte plasma; e outra que adota o método de trabalho manual de um serralheiro experiente.

Primeiramente contatamos cada uma das empresas e solicitamos um orçamento detalhado de cada uma, assegurando que ambas recebessem a mesma informação originada de uma mesma base de dados (Anexo 1). Após o recebimento dos orçamentos autorizamos no mesmo dia o início dos serviços.

A empresa Gravia, denominada neste trabalho como Empresa 1, está situada na Quadra Interna 06 lotes 18/27 Setor de Indústria, Taguatinga Norte, DF. Os irmãos Carlos e José Gravia chegaram de São Paulo acreditando no crescimento da nova capital e estabeleceram no Distrito Federal em 1961 uma pequena serralheria. Aos poucos foram ampliando suas atividades de forma que hoje o Grupo Gravia atua na fabricação de portas e janelas, indústria de perfilados, postes e braços, além das lojas para venda de peças no varejo. (http://www.gravia.com/g/pt/gr/inst_historico.php, acessado em 19/12/10.).

A empresa possui uma máquina de corte plasma, comprada pela empresa Oxipira (<http://www.oxipira.com.br/>, conforme acessado em 19/12/10), cujo modelo é a EDGE II Hypertherm. No Anexo 2 desta Dissertação, há um prospecto resumido da empresa Oxipira, e abaixo apresentamos um quadro com as especificações padronizadas do equipamento Hypertherm.

Série Master Padrão Oxipira - Modelos 20 a 95		
Largura máxima de corte (A)	mm	1500 a 9000
Vel. máx. de movimentação	m/min.	12/16, 24
Velocidade máxima de corte (motorização simples/dupla)	m/min.	8/12, 16
Trilho longitudinal	-	Pares de 3 metros
Guia transversal	-	Dupla guia linear
Comprimento total do trilho	mm	3000
Largura total (C)	mm	3500 a 10500
Altura total (D)	mm	1800

No sentido de executar o experimento realizado pela Empresa 1 e Empresa 2, foi utilizado o mesmo modelo tridimensional do programa 3D Studio Max (3DS) da Catedral de Brasília. A figura 7.1 abaixo ilustra o modelo usado, cujos pilares foram modelados a partir de curvas do tipo *spline*. Foi utilizado o modelador de

sólidos 3D Studio Max. Os pilares foram modelados como sólido, usamos NURBS como método de modelagem de cada pilar. Para extrair as faces do pilar foi utilizado o comando 'desdobramento' (*unfold*) para extrair as três faces do pilar de forma planificada. As faces foram exportadas em formato DWG e este arquivo foi manipulado no programa utilizado pela máquina de corte CNC, SigmaNEST.

Conforme descrito no capítulo anterior os pilares da Catedral de Brasília possuem geometria hiperbólica. A escolha do pilar como elemento a ser usado na verificação da hipótese desta dissertação se justifica uma vez que o recorte dado a este trabalho de pesquisa é referente a fabricação de geometrias complexas e seus respectivos custos, tempo e precisão necessários para produção e a diferença em comparação entre o método digital e manual. Além disto, os resultados desta pesquisa têm como objetivo secundário a indicação da existência de recursos de fabricação digital disponíveis no mercado de Brasília. Tivemos especial interesse em analisar os aspectos relacionados ao tempo, custo, precisão e controle na produção digital e manual da forma projetada.

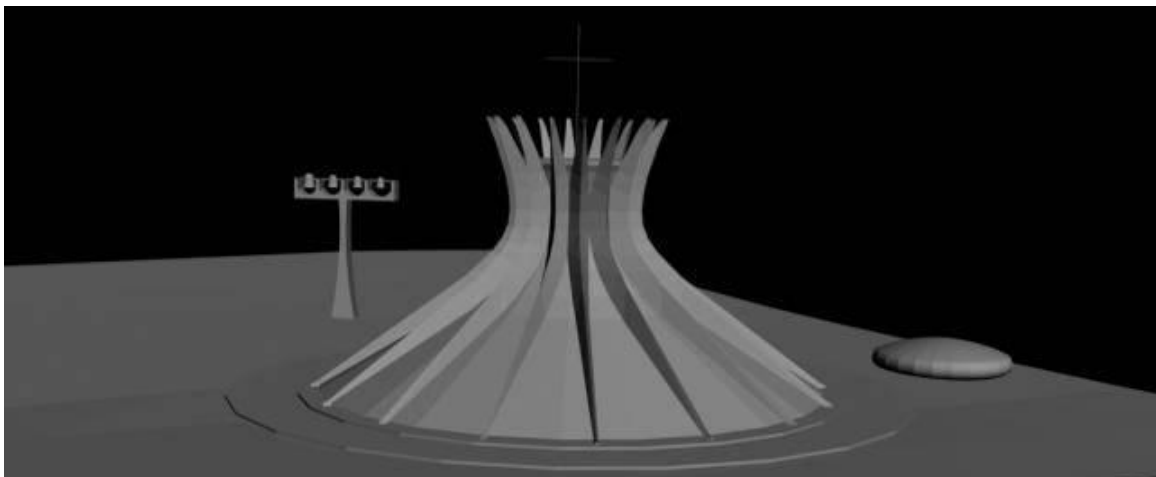


Figura 7.1. Modelo tridimensional usado para o trabalho experimental. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010.

No sentido de produzir uma coluna da Catedral, através da fabricação digital, o operador de máquina da Empresa 1 (Gravia), o senhor Pablo Cruz, solicitou que lhe fosse enviado o arquivo em formato DWG ou DXF. Por isso foi primeiramente isolado o pilar do arquivo digital (3DS) da Catedral de Brasília,

ilustrado na figura 7.1 acima. No Anexo 3 registramos o passo-a-passo da transferência de dados para o corte computadorizado.

Depois de isolado o pilar o técnico da Empresa 1, o responsável pela preparação do arquivo decompôs as partes do pilar em três no programa AutoCAD, preservando a originalidade das curvas *spline*. Abaixo as figuras 7.2 ilustra o pilar em dois ângulos distintos, um em perspectiva e outro em vista frontal do modelo sólido gerado no programa 3D Studio Max.

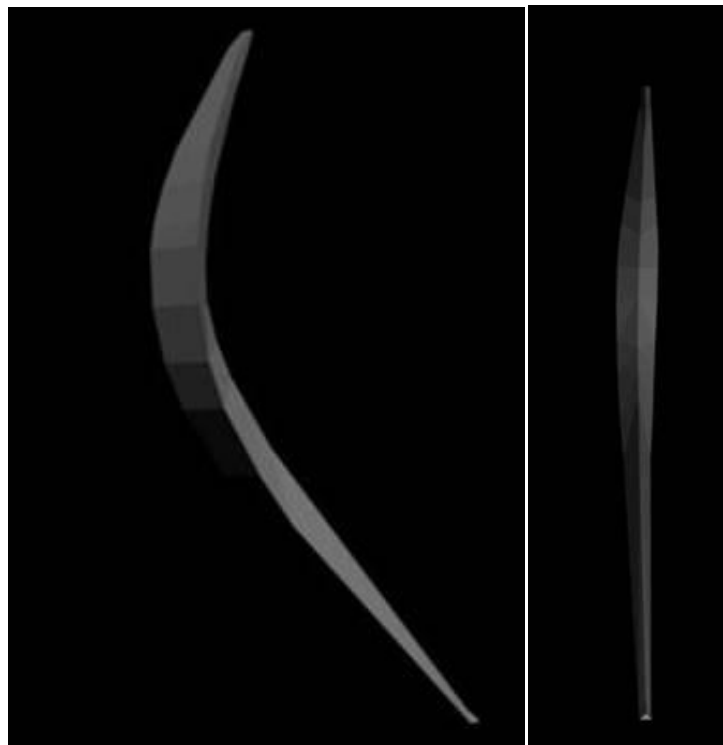


Figura 7.2. Detalhe do modelo tridimensional do Pilar da Catedral de Brasília, modelado em 3D Studio Max. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010.

O pilar da Catedral de Brasília além de possuir uma curvatura hiperbólica, a geometria da seção transversal é triangular em toda a sua extensão, como mostra a figura 7.2 acima. A seção triangular é menor na extremidade inicial, que aumenta ao longo da curvatura e volta a reduzir na extremidade final. Esta geometria torna o elemento estrutural, aparentemente simples, muito complexo e difícil de ser construído.

O programa usado na Empresa 1 (Gravia), para o envio dos dados CAD para a cortadora plasma CNC é o SigmaNEST. Trata-se de um programa que é adquirido juntamente com essa máquina. Segundo informação do senhor Pablo

Cruz, o sistema computacional possui as configurações necessárias para o trabalho em CAD/CAM e atende às funções requeridas pelo equipamento CNC.

A Empresa 2, American Soluções Inteligentes, na qual trabalha o serralheiro que produziu o artefato manualmente, situa-se no Setor de Oficinas Estrutural QD 05, lote 06 em Brasília-DF. Não há dados precisos sobre o tempo do estabelecimento desta empresa em Brasília. No entanto seu proprietário e gerente técnico, o senhor Antônio Leite Pereira Júnior, informou que esta empresa está em atividade há mais de doze anos em Brasília. Também não há registros dos produtos e serviços realizados pela mesma. Sabe-se que é conhecida por realizar diversos trabalhos para empresas públicas e particulares em Brasília, nas cidades satélites e no Estado de Goiás.

Utilizamos o mesmo projeto tridimensional modelado no programa 3D Studio Max que havíamos usado para executar a fabricação digital, para gerarmos projeções ortográficas com vistas e seções bidimensionais do pilar da Catedral de Brasília. Devido ao fato do pilar se constituir em elemento geométrico complexo, suas curvas não possuem raios e pontos de referência como aqueles encontrados em circunferências. Neste caso foram definidos os ângulos e medidas dos segmentos de retas para referenciar o desenho na fabricação manual. A ilustração abaixo, figura 7.5, mostra as projeções ortográficas apresentadas e explicadas ao serralheiro para a fabricação da peça.

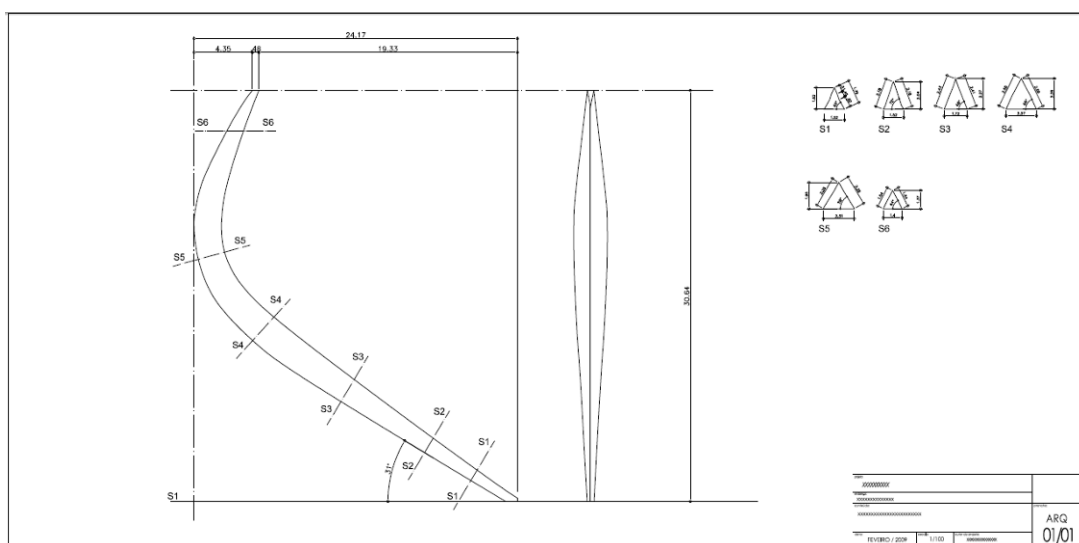


Figura 7.3. Vistas e seções bidimensionais do Pilar da Catedral de Brasília. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010.

As projeções ortográficas apresentadas acima, na figura 7.3, resultaram da importação do modelo tridimensional do 3D Studio Max para o programa FormZ, que possibilitou gerar as vistas. Depois das vistas geradas no FormZ, as mesmas foram exportadas para o AutoCAD, através do qual as cotas foram incluídas. A partir destas projeções ortográficas impressas foi possível informar ao serralheiro, senhor Antônio Leite, a geometria do pilar da Catedral e manter as mesmas informações constantes do projeto original enviado para fabricação digital pela Empresa 1. Segundo o senhor Antônio, foi necessário encontrar os pontos de referência na representação bidimensional da curva hiperbólica do pilar da Catedral para que os mesmos fossem transferidos para a chapa a ser cortada, como mostra a figura 7.4 abaixo.

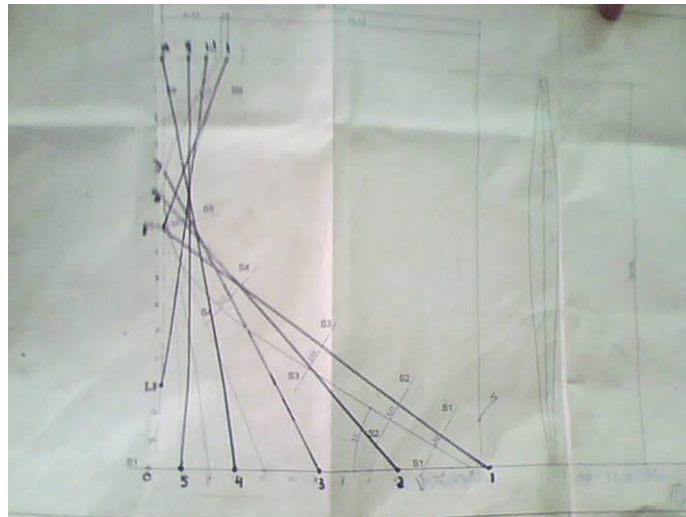


Figura 7.4. Marcação de pontos de referência para fabricação manual. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010.

Depois de localizados os pontos na planta, foi repetida a operação em chapa metálica e redesenhada a curva hiperbólica, uma vez que esta não possuía raios concêntricos. A figura 7.5, abaixo, ilustra o recorte feito na chapa para a montagem das partes. Esta operação resultou em diferenças no tamanho final da peça. O senhor Antônio informou que gastou cerca de três horas em cada uma das três faces do pilar para realizar o corte.



Figura 7.5. Corte na chapa para a fabricação manual. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010.

A partir do esboço dos pontos de referência marcados na chapa metálica, como mostra a figura 7.5 acima, o senhor Antônio Leite repetiu a operação nas outras duas faces do artefato que formam a seção triangular do pilar. O corte foi realizado com ferramenta manual em todas as faces do artefato.

8. RESULTADOS OBTIDOS

Foram analisados principalmente os custos e tempo envolvidos na fabricação digital e manual, além das demais variáveis apresentadas nesta dissertação desde a seção da problemática, tais como precisão, controle na construção de formas complexas e rapidez. Dessa forma, utilizamos para fins comparativos, tanto o projeto bidimensional para a fabricação manual pelo serralheiro, quanto o projeto tridimensional elaborado para a fabricação digital com tecnologia CNC. Os principais aspectos analisados dizem respeito às variáveis custos e tempo de fabricação. Comparamos também a precisão e o nível de controle na execução. A figura 8.1 abaixo apresenta as duas peças concluídas, das quais uma foi fabricada digitalmente e a outra manualmente. O artefato da esquerda foi fabricado através de tecnologia CNC e o da direita manualmente pelo serralheiro.



Figura 8.1. Modelo fabricado digitalmente, à direita e modelo fabricado manualmente, à esquerda. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010

O artefato cortado em máquina CNC apresentado na imagem 8.1 seguiu rigorosamente as informações contidas originalmente no projeto. As suas dimensões e curvatura seguem precisamente os dados constantes do projeto. O acabamento pós-montagem é regular, ou seja, não possui saliências. O artefato cortado manualmente precisou ser reduzido na sua base. O serralheiro, senhor Antônio Leite, informou que não possui ferramentas para a junção das peças com o nível de precisão requerido. O artefato foi então alterado pelo próprio serralheiro, o que resultou na redução do tamanho do pilar de um metro e vinte centímetros, conforme havia sido contratado, para cinquenta e quatro centímetros, quando foi executado. Há diferença na seção triangular do pilar em relação ao projeto original no experimento manual. A base do triângulo do artefato cortado manualmente ficou menor cinco centímetros em relação a do projeto. O artefato cortado em CNC segue precisamente as medidas do projeto. As diferenças consideradas mais marcantes encontradas entre os dois artefatos foram em relação ao custo, tempo e precisão, nesta ordem. Também destacamos que as emendas e polimentos nas apresentações finais dos artefatos demonstram que aquele fabricado possui menos irregularidades.

O quadro comparativo abaixo apresenta o resultado final da fabricação do pilar através de cada uma das duas empresas contratadas em termos de tempo de execução e custo final. Não dispúnhamos de ferramentas de precisão devidamente calibradas no momento do planejamento e execução dos artefatos e por isto não apresentaremos os dados relativos à precisão, embora possamos fazer uma análise visual das diferenças de resultados encontrados entre os dois métodos mencionados. Destacamos, além das diferenças de tamanho, curvatura e acabamento, as dimensões aferidas na base da seção triangular como informado no parágrafo anterior.

O artefato cortado em máquina CNC permitiu maior controle de todo o processo, desde o envio por e-mails das informações de projeto. Através de e-mail enviamos o arquivo eletrônico contendo os dados do projeto através de programas CAD e as informações sobre material a ser usado. Este arquivo não foi alterado e serviu de base para o envio de dados à máquina de corte CNC. Não foi possível realizar um controle rigoroso na fabricação manual do artefato.

Por conseguinte o tamanho final e a espessura da chapa foram alterados, além do prazo de entrega que foi mudado. O serralheiro prometeu entrega imediata, que seria de um dia, mas entregou nove dias depois e decorridas várias cobranças.

Empresa	Descrição dos serviços	Método de fabricação	Prazo de entrega	Custo final
1	Confecção de peça em chapa cortada no plasma conforme desenho em Dxf com 540mm de altura # 14 com solda MIG.	CNC	01 dia	R\$ 76,00
2	Fabricação de coluna estrutural em escala reduzida para 540mm utilizando o método de fabricação manual, com desenvolvimento em escala. A coluna foi fabricada em chapa de aço carbono #14, com solda em MIG, contendo três faces em ângulos de linha livre e retas. As faces foram apresentadas e transferidas para a matriz, com os pontos referentes às secções e medidas das mesmas.	Manual	09 dias	R\$ 400,00

Quadro 1. Resumo da cotação. Fonte: MORAIS, H. R. A., 2010

O Quadro 1 acima apresenta as condições de fabricação das duas empresas, Gravia (Empresa 1) e American Soluções Inteligentes (Empresa 2). A Empresa 1 usou uma cortadora plasma para corte das peças que formariam o artefato tridimensionalmente. A Empresa 2 realizou o corte manualmente. Considerando sua prática administrativa de gerenciamento de serviços, a Empresa 1 solicitou cinco dias de prazo no ato do pedido para proceder a fabricação digital. Este é um procedimento administrativo padrão da empresa. No entanto o artefato foi confeccionado em um dia. Segundo informações do operador responsável pelo envio dos dados à máquina, o corte foi realizado em menos de uma hora. Em suma a Empresa 1 apresentou o melhor preço e maior rapidez, através do uso de tecnologia de fabricação digital. O custo final da Empresa 1 é cerca de um quinto em relação a Empresa 2. O prazo de entrega do artefato da Empresa 1 é nove vezes mais rápido em relação a Empresa 2.

Considerando as condições estabelecidas e seguidas neste trabalho, podemos afirmar que nossa hipótese é promissora e aponta alguns desdobramentos importantes, que se seguem:

A fabricação digital de um elemento de projeto de geometria complexa hiperbólica na empresa 1 em Brasília foi mais rápida e mais barata, em comparação à fabricação do mesmo elemento produzido pela empresa 2. Considerando as mesmas condições e metodologia empregadas neste trabalho, conforme descrito na seção “7. Trabalho experimental: método de investigação” da página 101 a 107, alcançamos os seguintes resultados:

1. Não foi necessário emitir desenhos ortográficos ou perspectivas em papel para a realização do experimento digital. Observamos também que nosso experimento aponta para a existência de outros benefícios além do baixo custo e tempo reduzido na fabricação digital do artefato propriamente dito. Tais benefícios são a redução do uso de papel para fabricação de componentes arquitetônicos, bem como a eliminação de itens tais como: tempo relativo a impressão em si do projeto e suas dobras e entrega, custo do papel, custo da tinta de impressora, energia elétrica e transporte para a entrega dos projetos impressos. Estes itens são considerados desprezíveis em projetos de pequeno porte. No entanto, são de grande relevância em caso de projetos de grandes edifícios tais como, por exemplo, shopping centers e aeroportos com repercussões consideráveis em relação aos custos e ao meio ambiente.
2. Assim como no modo manual, na fabricação digital é necessário que haja cooperação entre o projetista e o executor. No caso da fabricação digital, é importante a comunicação com operador da máquina CNC na manipulação dos requerimentos do programa de envio de dados do computador e nas configurações básicas da máquina. Esta comunicação define o modo em que será produzido o artefato. No nosso experimento os dados foram transferidos diretamente do programa CAD para o programa que enviou os dados à máquina de

corte. Esta transferência de dados permitiu controlar um grande número de variáveis para o melhor aproveitamento das tecnologias e da matéria prima. Citamos, por exemplo, que, devido ao uso do programa da máquina CNC foi possível gerar um plano de corte e sugerir o melhor posicionamento com menor perda de matéria prima.

3. A experiência do serralheiro manual, senhor Antônio, foi decisiva para o entendimento do trabalho. Ficou evidente durante o experimento que, mesmo tendo maior dificuldade de fabricar o artefato devido à complexidade de sua geometria, a visão e nível de maturidade profissional do artesão foram determinantes na execução do artefato. Em uma reunião de cerca de trinta minutos o senhor Antônio Leite compreendeu com profundidade as informações transmitidas mesmo sendo através de um projeto bidimensional. No entanto, por se tratar de geometria complexa o prazo foi prorrogado três vezes. O senhor Antônio informou que devido ao fato da curva não possuir um raio único ele estava tendo muita dificuldade de executar a forma contratada. A solução encontrada pelo serralheiro manual foi diminuir o tamanho do pilar, que inicialmente teria um metro e vinte centímetros. Segundo o senhor Antonio Leite, ao diminuir o tamanho encontraria as linhas de referências, definidas por ele próprio, de modo mais fácil. Isto, no entanto, é discutível porque a alteração de escala não modifica o problema relacionado a definição da curvatura do pilar. De qualquer forma, devido a dificuldade encontrada pelo senhor Antônio Leite, o tamanho do experimento realizado na empresa Gravia foi alterado para que ambos fossem facilmente comparados. A empresa Gravia foi informada sobre esta decisão no último dia do prazo contratado para fabricação do artefato em CNC, mas isto não alterou o prazo de entrega pela mesma.
4. O projeto feito através do uso de fabricação digital, CNC, auxilia na redução de perdas de materiais a serem utilizados. Os artefatos projetados podem ser produzidos digitalmente na quantidade, tamanho

e formas exatas definidas pelo arquiteto, utilizando com eficiência os materiais, isto é, reduzindo as sobras. Este método de fabricação também reduz custos decorrentes de áreas de estocagem, principalmente se forem produzidos à medida em que precisam ser montados no canteiro de obras, o que é feito de forma organizada. Este método permite também evitar as perdas frequentemente advindas nos casos de fabricação em série de produtos idênticos que não são vendidos em sua totalidade.

5. A tecnologia CAM requer do setor de construção civil maior aprofundamento no uso da fabricação digital. Isto implicaria em maiores investimentos na fabricação digital no setor, de modo a ampliar as atuais condições da prestação de serviços de toda a cadeia produtiva, desde os projetistas (arquitetos e engenheiros) até às empresas construtoras. Além disso, é necessário que haja operários treinados quanto ao manuseio de máquinas de CNC.

6. Conforme mencionamos no capítulo dois, página quatro, que trata da Problemática desta dissertação, reafirmamos que ao incorporarmos novas ferramentas ao projeto e fabricação significa também adicionar novas e variadas possibilidades. Os recursos computacionais não vieram para substituir a criatividade do arquiteto(a) ou mesmo sua capacidade analítica de pensar o projeto e desenvolver soluções. Ao contrário, entendemos que as tecnologias CAD/CAM e BIM estão disponíveis como um conjunto de ferramentas para auxiliar no processo de construção dos edifícios. O computador contendo os programas de auxílio à projeção e à fabricação constitui-se em uma ferramenta para a concepção e desenvolvimento de projetos, dotada de grandes e numerosos recursos que serão bem utilizados se o arquiteto(a) que os utiliza possuir competência e habilidade para isto.

A liberdade de projetar de modo inovador é uma atribuição inerente ao papel do(a) arquiteto(a). O projeto precisa ser construído e requer instruções para que

aqueles que vão torná-lo realidade consigam executar as idéias do(a) arquiteto(a) com fidelidade. É importante que por mais ousado que o projeto seja, por mais poético, por mais inovador ou por mais complexo, trata-se de investimento financeiro. A arquitetura a que nos referimos neste trabalho precisa possuir atributos para surpreender, emocionar, organizar e tantos outros que compõem um edifício e os fazem serem vistos como monumentos, por exemplo. E ressaltamos que viabilizar um investimento quer seja de grande ou pequeno porte, é também papel do arquiteto. O(a) arquiteto(a) é um criador, organizador e facilitador desde a concepção até a construção.

O uso de tecnologias CAD/CAM é uma opção real de fabricação disponível também na construção civil de Brasília-DF, como por exemplo, na fabricação de componentes estruturais de importantes obras na cidade. A título de exemplo poderíamos citar a passarela de pedestres de acesso ao Metrô, a estrutura de ampliação do Terminal de Passageiros do Aeroporto de Juscelino Kubistchek e o Centro de Convenções Ulisses Guimarães, executados pela empresa CPC Estruturas, com sede no Setor de Armazenamento e Abastecimento Norte (SAAN), Brasília. Não poderíamos deixar de mencionar a Ponte JK, cuja complexidade da geometria dos seus arcos, seria muito difícil de ser calculada manualmente, ou resultaria em aumento do tempo de construção dessa obra em muitos anos. (Fonte: <http://www.cpcestruturas.com.br/Entidade/12/DadosPortifolio/?sIP=19>, acessado em 10/03/2011).

É necessário que haja maior divulgação das tecnologias digitais de modelagem e de fabricação junto aos arquitetos sobre a disponibilidade das mesmas, além das condições mínimas necessárias para o êxito em seu uso. Este trabalho de dissertação pretendia apresentar, e como de fato o fez, mais um método de fabricação, o digital, disponível em Brasília e seus benefícios para a edificação e meio ambiente. Ambos os métodos, digital e manual são usados na construção civil, mas os primeiros apresentam benefícios inquestionáveis. É importante conhecer suas especificidades e definir o projeto a partir desta compreensão. O sentimento de cooperação entre os envolvidos, projetista e fabricante, contribuem sem dúvida para o êxito, mas o uso de tecnologia digital associada à

fabricação de elementos projetuais é determinante. O método de projeção e fabricação digital não está em oposição às relações de cooperação entre os envolvidos (a adoção de um não exclui o outro, no entanto requer treinamento).

O papel do arquiteto abordado neste trabalho começa a mudar, no sentido de retomar as antigas funções de mestre-construtor perdidas após a Alta Idade Média. Naquela época, além de projetar coordenava e controlava ativamente todas as decisões da obra do seu início ao fim. Através das novas tecnologias digitais de projeção e fabricação disponíveis, o elenco de possibilidades se expandiu, pois o(a) arquiteto(o) pode produzir objetos ou edificações diferenciadas e até complexas com custos não superiores às formas ortogonais e seriadas, com maior controle, precisão e rapidez.

9. Referencias Bibliográficas:

EASTMAN, C.; Teicholz, P.; SACKS, R.; LISTON, K.: **“BIM Handbook. A guide to Building Information Modeling for owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors.”**/ EASTMAN, Chuck et. al., Editora John Wiley & Sons, Inc., 2008.

ALMEIDA, Maria E. V., Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações, Brasília, 2003.

EUCLIDES, **Os Elementos/Euclides**; tradução e introdução de Irineu Bicudo. – São Paulo; Editora UNESP, 2009.

GIEDION, Sigfried, (1888-1968). Espaço tempo e arquitetura: o desenvolvimento de uma nova tradição / Sigfried Giedion; tradução Alvamar Lamparelli; revisão técnica e da tradução Ana Luiza Nobre e Denise Chini Solot. – São Paulo: Martins Fontes, 2004.

GERACE, Gloria; GEHRY, Frank; WHITE, Garret; MUDFORD, Grant: **Symphony: Frank Gehry’s Walt Disney Concert Hall**. Los Angeles; Fiveties, 2009.

JODIDIO, Philip, **Architecture now!**, Taschen, 2008.

JÚNIOR, C. Roberto, **Do imaginário ao concreto. Brasília uma narrativa da construção civil**. Brasília: Sinduscon, 2004.

KALISPERIS, Loukas N.: **“Cad in Education, Pennsylvania”**. ACADIA Quartely: Volume 15, nº 3. pág. 22-25, 1996.

KOLAREVIC, Branko: **“Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age”**, in ACADIA 2001, Buffalo, New York, 2001.

KOLAREVIC, Branko: **“Architecture in the digital age: design and manufacturing / edited by Branko Kolarevic”**, Editora Taylor & Francis, New York, 2003.

KOLAREVIC, Branko & KINGLER, Kevin: **“Manufacturing material effects. Rethinking design and making in architecture / edited by Branko Kolarevic”**, Editora Taylor & Francis, New York, 2003.

NUTTGENS, Patrick **“Architecture”**, Mitchell Beazley International Ltd., Londres, 1992.

PESSOA, Diogo Fagundes: **A estrutura da Catedral de Brasília: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenção e proposta de manutenção**, Distrito Federal, 2002.

SCHODEK, D.; BECHTHOLD, M.; GRIGGS, K.; KAO, K. M. & STEINBERG, M.: **“Digital Design and Manufacturing – CAD/CAM Applications in Architecture and Design”**, Editora John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

SILVA, Maria A. C.: **Gestão do processo de projeto de edificações** / Maria Angélica Covelo Silva, Roberto de Souza. – São Paulo: O nome da rosa, 2003.

SILVA, Neander F.: **“A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa sobre um caso brasileiro”**, ACADIA 2009.

SOUZA, Adriano F.: **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagens com altas velocidades**. São Carlos, 2004

SQUARISI, Dad: **Escrever melhor: guia para passar os textos a limpo**, 1ª Ed., 3ª reimpressão. – São Paulo: Editora Contexto, 2009.

ZEVI, Bruno: **“Saber ver a arquitetura”**; tradução Maria Isabel Gaspar, Gaëtan Martins de Oliveira. – 6ª ed. – São Paulo: Editora WMF Martins Fontes de Oliveira, 2009.

10. SITES VISITADOS

http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/x3d/spec/ISO-IEC-19775-X3DAbstractSpecification_Revision1_to_Part1/Part01/components/nurbs.html
cessado em 19/08/2010.

<http://lecomp.fau.unb.br/moodle> acessado em 20/08/2010.

<http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm> acessado em 28/03/2010.

<http://darlanrosa.com/portu/jk.htm>, acessado em 28/03/2010.

<http://darlanrosa.com/portu/jk.htm>, acessado em 28/03/2010.

11. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR:

ABBAGNANO, Nicola, (1901-1990): **Dicionário de Filosofia / Nicola Abbagnano**; tradução da 1ª edição brasileira coordenada e revisada por Alfredo Bossi; revisão da tradução e tradução dos novos textos Ivone Castilho Benedetti. – 5ª ed. – São Paulo: Martins Fontes, 2007.

BENJAMIN, César. **Euclides e a Geometria**. Folha de São Paulo, São Paulo, 1º de Ago. de 2010, Ilustríssima, p. 4.

CAPRA, F. **A Teia da Vida**. São Paulo. 14ª edição, Editora Cultrix, 2008.

COHEN, Jean-Louis, **Le Corbusier 1887 – 1965**, Lirismo da Arquitetura da Era da Máquina, Taschen, 2007.

DROSTE, Magdalena, **Bauhaus 1919 – 1933 Reforma e Vanguarda**, Taschen, 2006.

FERRAZ, Marcelo C.: **João Figueiras Lima – Lelé**, Editorial Blau, Instituto Lina Bo e P. M. Bardi, 2000.

OHTAKE R., FRAGELI M., REIS F. A., FAYET C., **Arquitetura Brasileira após Brasília / Depoimentos**. IAB-RJ, 1978.

PFEIFFER, Bruce B., **Frank Lloyd Wright 1867 – 1959, Construir para a democracia**, Paisagem Taschen, 2006.

RAMOS NETO, Ageu C.: **Incorporação Imobiliária: Roteiro para avaliação de projetos**. – Brasília: Lettera Editora, 2002.

SERRAINO, Pierluigi, **Eero Saarinen**, Taschen 2006.

VITRÚVIO: Tratado de Arquitetura; tradução, introdução e notas M. Justino Maciel. – São Paulo: Editora Martins Fontes, 2007. (Coleção de todas as artes).

WINES, James, **Green Architecture**, Taschen, 2000.

ANEXO 1

(Cópia do orçamento da empresa American Soluções Inteligentes. Cópia de pedido, requisição de perfis e nota fiscal da empresa Irmãos Gravia)



AMERICAN



Soluções Inteligentes

SOF ESTRUTURAL QDA 05 LOTE 06 - DF.

TEL. (61) 3363-1091 CEL. 8415-9929. CNPJ: 07.515.589/0001-00 INSCR. ESTADUAL: 07.469.348/001-06

Visite nosso site: [clique aqui](http://www.americanportas.com) Site: www.americanportas.com

Nº Proposta:

1205

Local da obra:

BRASILIA

Data da Proposta:

07/12/2010

Identificação do cliente

Empresa:

helen rachel

Email:

helen.rachel@uol.com.br

Solicitado por:

helen rachel

Telefones:

98166424

Prezados Senhores

A American Soluções Inteligentes tem a satisfação de submeter para vossa apreciação nossa proposta abaixo discriminada:

1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS:

Quant	Und	Descrição	Vr.unit	Vr. Total
1	vb	Fabricação de coluna estrutural em escala reduzida para 540mm utilizando o método de fabricação de forma artesanal, com desenvolvimento em escala. Fabricada em chapa de aço carbono #14 solda em MIG. Contendo três faces em ângulos de linha livre e retas. Encontradas em ampliação e transferidas para matriz, tendo os pontos referentes às secções e medidas de secções.	R\$ 400,00	R\$ 400,00
TOTAL				400,00

Valor total da proposta:

R\$ 400,00

quatrocentos reais

Valor total com desconto:

R\$ 376,00

trezentos e setenta e seis reais

2 - CONDIÇÕES GERAIS:

2.1 OBRIGAÇÕES DA CONTRATANTE:

- Desobstrução do local da instalação (elétrico hidráulico, esgoto, telefone, etc..)
- É de inteira responsabilidade do cliente, remoção e verificação de eventuais interferências com redes elétricas, hidráulicas e esgoto no local da instalação.
- Fornecimento dos projetos que se fizerem necessários
- Acompanhamento técnico da contratante durante o processo de instalação
- Se no momento do início da execução dos serviços não houver uma pessoa co-responsável da contratante no local da obra, bem como, faltar condições adequadas para execução dos serviços, os mesmos serão programados por mais 05 (cinco) dias úteis para o seu reinício, sendo cobrada a despesa de mobilização

sendo cobrada despesas de mobilização.

• Será prorrogada a data de entrega dos produtos ora discriminados, por motivo de força maior tais como, fenômenos naturais, incidentes no transporte do mesmo ou paralização de órgãos públicos que possam afetar na entrega ou manipulação os mesmos.

2.2 OBRIGAÇÕES DA CONTRATADA:

- Fornecimento no canteiro de obra dos materiais necessário para a perfeita montagem e instalação
- Fornecimento de mão-de-obra especializada
- Acompanhamento Técnico
- Fornecimento da roldana em polipropileno compacta com rolamento interno blindado.
- Garantia
- Garantia de 6 (seis) meses na mão de obra
- Leis Sociais.

Prazo de execução:

imediatamente

Forma de pagamento:

15 dias no boleto

Validade desta proposta:

30 dias

2.3 Para aprovação da execução dos serviços propostos, deve ser dado o "**DE ACORDO**" em cópia a ser devolvida à **AMERICAN PORTAS**, ou seja, assinado por ambas as partes doravante, elegendo desde já o Fórum de Brasília, para dirimir quaisquer dúvidas ou alegações que vierem a ser necessárias.

2.7 De acordo:

Assinatura

Atenciosamente,

Antonio Leite Pereira Júnior
Gerente Técnico

GRAVIA
GRAVIA IND. PERF. DE AÇO LTDA
 Q1 06 LOTE 18/27 - TAGUATINGA
 BRASÍLIA - DF CEP 72135-901 - 061 3355-9090 -

DANFE
 DOCUMENTO AUXILIAR DA
 NOTA FISCAL ELETRÔNICA
 0 - ENTRADA 1
 1 - SAÍDA
 Nº. 0022994 FL 1 / 1
 SÉRIE 3 - Loja 07

CHAVE DE ACESSO
5310 1226 4877 4400 0257 5500 3000 0229 9499 4719 3976

NATUREZA DA OPERAÇÃO
VENDA DE PRODUÇÃO DO ESTABELECIMENTO
 INSCRIÇÃO ESTADUAL 07.317.248/003-06 INSCR. EST. SUBS. TRIBUTARIO CNPJ 26.487.744/0002-57
 PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 353100019223389 17/12/2010 16:35:43

DESTINATÁRIO/REMETENTE
 NOME / RAZÃO SOCIAL **HELEN RACHEL AGUIAR MORAIS** CNPJ / CPF **855.915.561-91** DATA DA EMISSÃO **17/12/2010**
 ENDEREÇO **SCLRN 709BL G ENT 10 APTO 201** BAIRRO / DISTRITO **ASA NORTE** CEP **70750517** DATA DA ENTRADA/SAÍDA
 MUNICÍPIO **BRASÍLIA** FONE / FAX **3201-9442** UF **DF** INSCRIÇÃO ESTADUAL **ISENTO** HORA DE SAÍDA

FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR	FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR	FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR
0022994/1	17/12/2010	76,02						

BASE DE CÁLCULO DO ICMS		VALOR DO ICMS	BASE DE CÁLCULO DO ICMS ST	VALOR DO ICMS SUBSTITUTO	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS
76,02	9,12	0,00	0,00	0,00	76,02
VALOR DO FRETE	VALOR DO SEGURO	VALOR DO DESCONTO	OUTRAS DESPESAS	VALOR DO IPI	VALOR TOTAL DA NOTA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,02

TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS
 NOME / RAZÃO SOCIAL **O PROPRIO** FRETE POR CONTA 0 - EMITENTE 1 - DESTINATÁRIO **1** CÓDIGO ANTT PLACA DO VEICULO UF CNPJ
 ENDEREÇO **SIA SUL TECHO 02** MUNICÍPIO **BRASÍLIA** UF **DF** INSCRIÇÃO ESTADUAL
 QUANTIDADE **0,00** ESPÉCIE **PERFILADOS** MARCA **PERFILADOS** NÚMERO PESO BRUTO **3,000** PESO LÍQUIDO **3,000**

DADOS DOS PRODUTOS / SERVIÇOS												
COD. PRODUTO	DESCRIÇÃO PRODUTO / SERVIÇO	NCM / SH	CST	CFOP	UN	QUANT.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.CALC. ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ALÍQUOTAS ICMS IPI
2420000000	CHAPA PLASMA # 14 S/E	7216.61.10	000	5101	KG	3,0000	25,3400	76,02	76,02	9,12	0,00	12 0

CÁLCULO DO ISSQN
 INSCRIÇÃO MUNICIPAL VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS **0,00** BASE DE CÁLCULO DO ISSQN **0,00** VALOR DO ISSQN **0,00**

DADOS ADICIONAIS
 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES
 REDUÇÃO ALÍQ. ICMS 12% ITEM 14 LT D INC II ART 46 DEC 18.955/97 RICMS-DF. | ----- Vendedor: REINALDO Pedido : 253101 Cliente : 842382 Portador : 60 Ordem de compra :
 RESERVADO AO FISCO

GRAVIA

RECIBO
45663

GRAVIA IND DE PERF DE ACO LTDA(GRAVIA 2)

CGC :26487744000419
ENDERECO :QI 12 LTS 04 E 08 PARTE A
TELEFONE :61 403-0444

RECEBI DE 842382 HELEN RACHEL AGUIAR MORAIS NA DATA DE 16/12/2010
A IMPORTACIA DE 76,00
REFERENTE A ADIANTAMENTO PARA PRODUCAO DE MATERIAL SOB ENCOMENDA

MATERIAL A SER CORTADO NO PLASMA COMPUTADORIZADO, PRAZO DECORTE 05 DIAS
DADOS DO DOCUMENTO

ESTABELECIMENTO :202
ESPECIE :AN
PARCELA :01
SERIE :
NRO DOCUMENTO :45663
VALOR : 76,00
DT PROVAVEL NF :16/12/2010
Vendedor :2005 - REINALDO

E INDISPENSAVEL A APRESENTACAO DESTE PARA A RETIRADA DO MATERIAL





GRAVIA

1º VIA - PPCP / ENCARREGADO / CORTE / DOBRA / PPCP
2º VIA - PCP / BALANCEIRO / ALMOXARIFADO

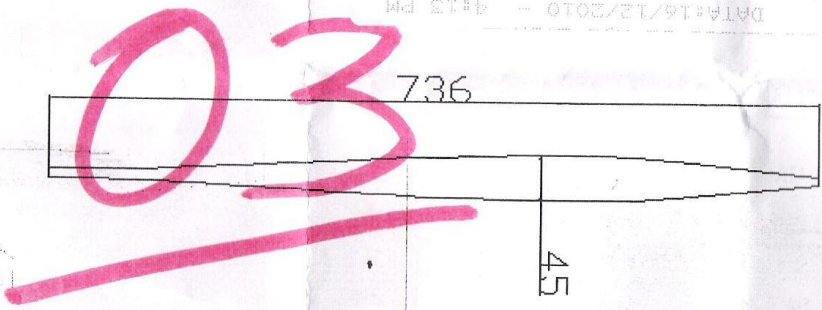
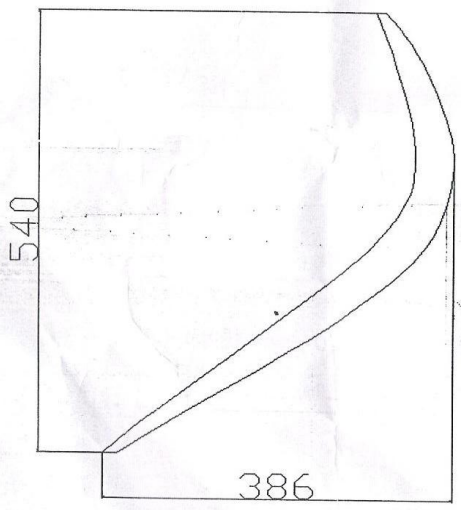
REQUISIÇÃO DE PERFIS

1º VIA

PRODUÇÃO
16/12/2010
ENTREGA
16/12/2010

253.101

FILIAL	Código do Cliente		CLIENTE					OBSERVAÇÃO:			
2	892382		Helen Rachel								
ITEM	GRAU DE DIFICULDADE	CÓDIGO	POS.	QUANT.	COMP. (mm)	DESENV.*	ESPE. (mm)	PESO TEÓRICO	PESO REAL	VALOR UN.	ORDEM
1	S	2420000000	A	2	540	386	2.00	3,00		76,00	
2	S	2420000000	B	1	45	736	2.00			"	648.286



OK

ppcp
16/12/2010

OP # 949.286 DATA: 16/12/2010 - 4:13 PM
ITEM # 2420000000
DESCR: CHAPA PLASMA # 14 S/E
PESO # 3,00 KG
PECAS # 0003
RegBob -
Lote

REG BOB	REG BOB	REG BOB	REG BOB	REG BOB
DATA: 16/12/10	EMITENTE: Rivaldo	CONFERENTE:	ASSINATURA DO CLIENTE:	

ANEXO 2

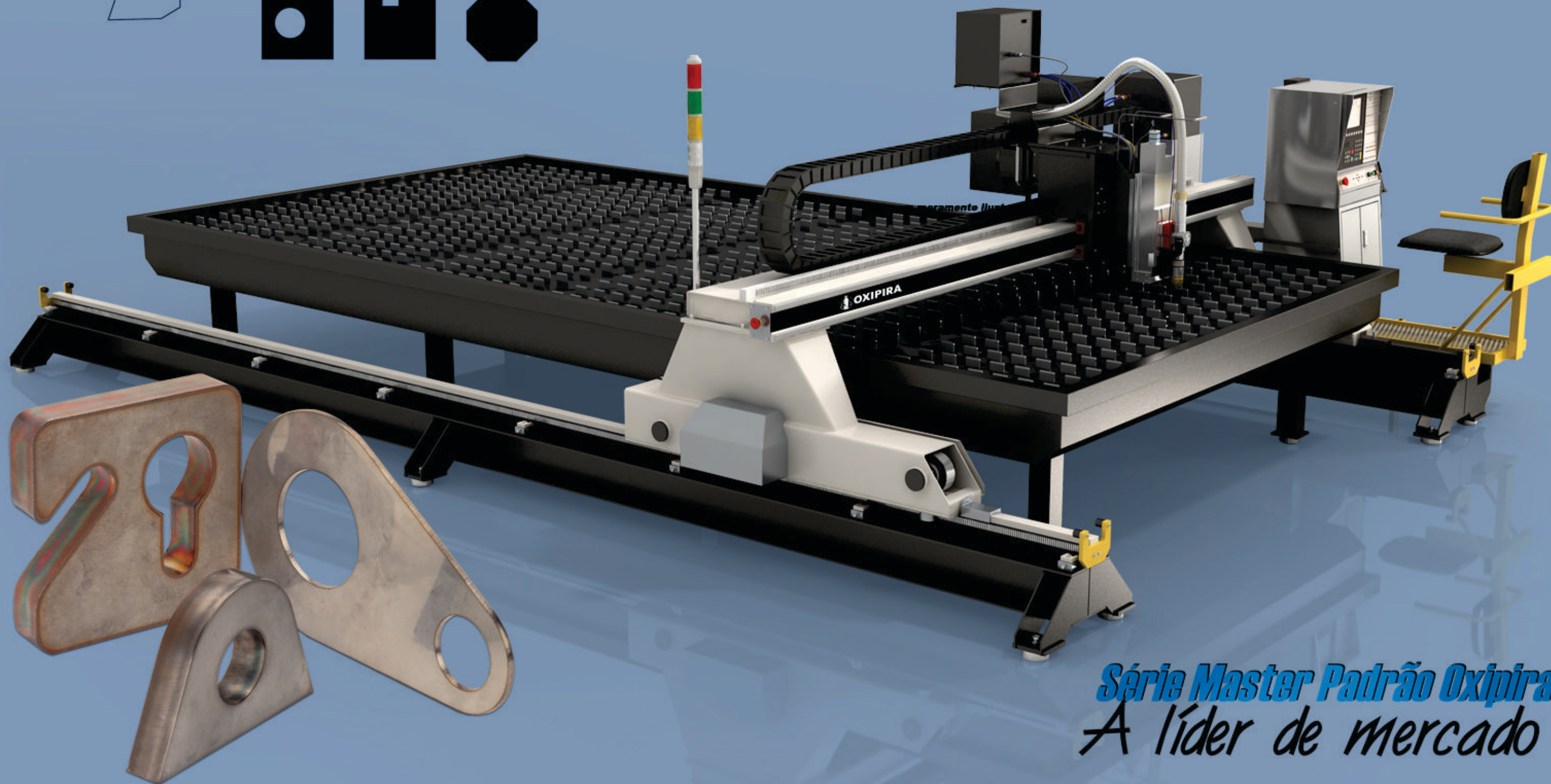
(Prospecto resumido da empresa Oxipira, fabricante de máquina CNC)



*Série Master Padrão Oxipira
A líder de mercado !*



*Série Master Padrão Oxipira
A líder de mercado !*



*Série Master Padrão Oxipira
A líder de mercado !*

***** **Compromisso Oxipira: menor custo por peça cortada.** *****

A Série Master Padrão Oxipira, líder de mercado, apresenta as seguintes vantagens:

- Facilidade de uso: programação simplificada.
- Fácil instalação e mudança de layout.
- Economize dinheiro com o melhor aproveitamento de chapa. (software opcional)
- Gerenciamento: informação e controle da produção. (software opcional)
- Flexibilidade: solução total para corte de chapas de aço carbono, inox e alumínio, de 0,5mm a 300mm.
- Adaptada/climatizada para o mercado brasileiro.
- Baixo custo operacional.
- Baixo custo de manutenção.
- Alta dinâmica: peças cortadas com a mais alta qualidade.
- Segurança do operador. A Master oferece o melhor conceito de aterramento.
- Máquina altamente robusta e resistente.
- Durabilidade: feita para o uso industrial com ciclo de trabalho máximo.
- Tecnologia testada e aprovada. Alto índice de satisfação.
- Compromisso Oxipira: menor custo por peça cortada.
- Máquina em processo de nacionalização.

Oxipira e Hypertherm: parceria líder em vendas no Brasil. A Hypertherm é líder mundial em tecnologia de corte plasma. Por outro lado, as máquinas de corte padrão Oxipira são insuperáveis nos requisitos qualidade, produtividade e custo operacional. O acúmulo técnico das duas empresas criou o melhor centro e programa de treinamento, suporte técnico e serviços do setor, oferecidos pela Oxipira.



Liderança de Mercado
Experiência de 25 anos, equipe de engenheiros inovadores, parceria com empresas líderes mundiais em seus segmentos e suporte técnico altamente qualificado fazem a diferença nas vendas.

★ Máquinas Oxipira distribuídas pelo Brasil.



Principais Especificações

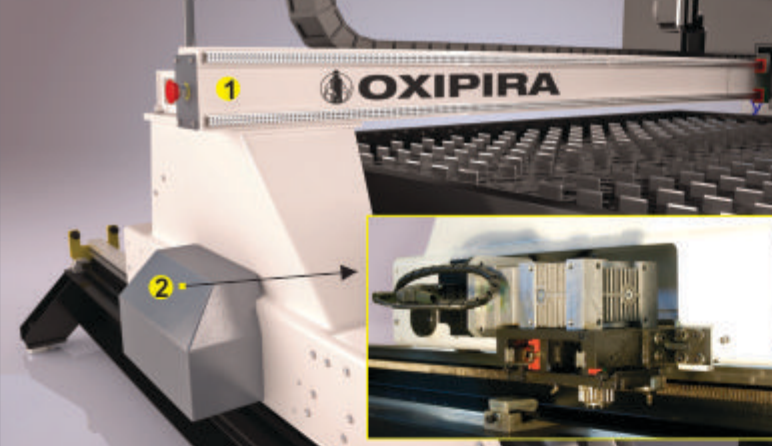
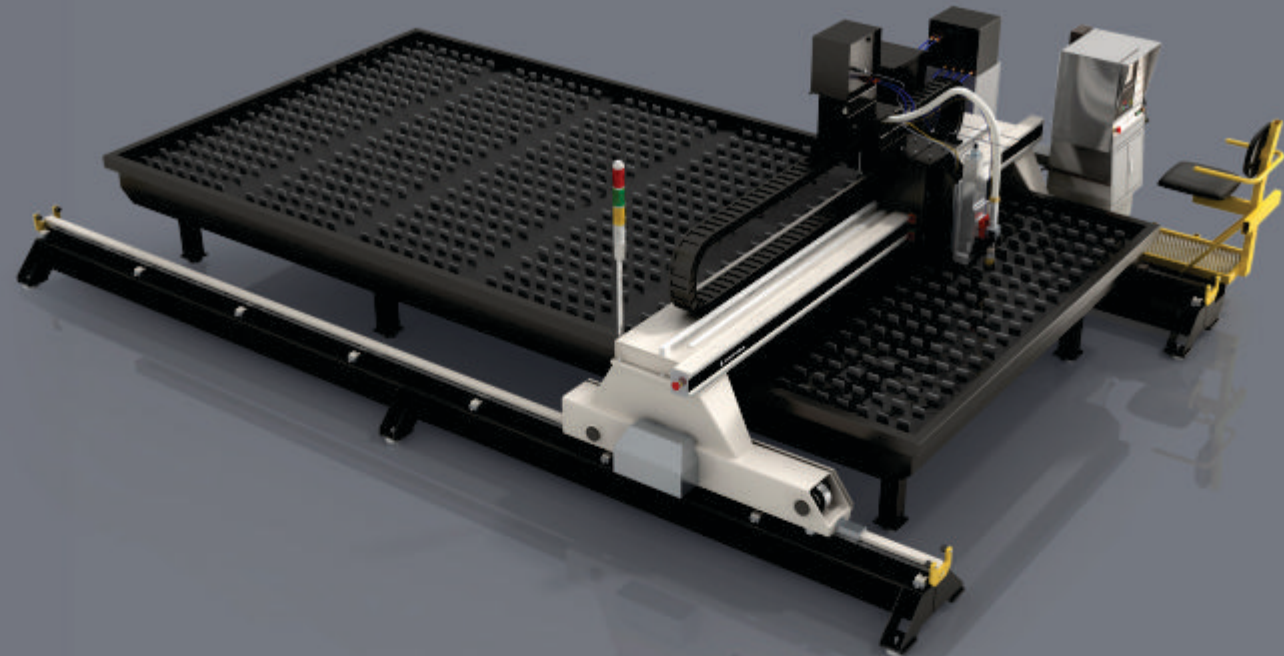
Master - Modelos 20 a 120		
Largura máx. de corte útil	mm	1500 a 11500
Pórtico Longitudinal		Pares de trilhos de 3 metros
Vel. máx. de movimento	m/min.	12 ou 16, opcional 24, s/ rampa
Altura Total	mm	1800
Largura total	mm	2000 a 12000

E mais: conheça a nova fábrica da Oxipira, veja uma demonstração técnica de corte e, ainda, visite com nossos técnicos uma máquina instalada no cliente.

Programa de Pós-venda

O Programa de pós-venda Oxipira consiste em um atendimento personalizado e de alto padrão. É um sistema de integração de diversos serviços para levar com qualidade a solução total ao cliente que adquire as máquinas de corte da empresa. Treinamento de Operador, Manutenção Preventiva, Programação de Troca de Consumíveis e Manutenção Corretiva são os pilares deste programa que garante produtividade com a mais alta performance. Mais uma vez a Oxipira sai na frente, entregando para o cliente todo o suporte necessário para o aumento da produtividade, elevação da qualidade de corte e diminuição dos custos por peça cortada. Solicite a um vendedor Oxipira a pasta do Programa de Pós-venda.



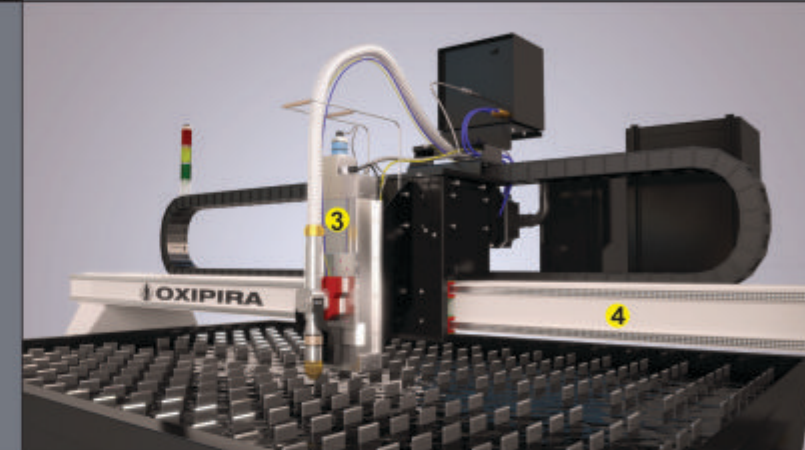


1 Pórtico principal confeccionado em perfil de aço soldado e usinado com design moderno e rígido, pintado com sistema eletrostático.

2 Motores e acionamentos Digital Weg e Mitsubishi AC de alta potência, proporcionando alto torque e desempenho, resolução de inércia nos eixos X e Y, desenvolvendo uma alta dinâmica de aceleração e desaceleração. Sistema de transmissão através de pinhão com cremalheiras usinadas e temperadas, com redutores Atlanta (Alemanha) superdimensionados. As características de resolução nos eixos X e Y é >= a 2arcos/minuto.

3 O sensor de altura é um módulo de controle com todas as características de comando especificamente desenhado para o sistema de corte plasma. Esse sensor incorpora os últimos avanços e é insuperável em performance.

4 Pista de Rolamento Transversal em guias lineares duplas, cremalheiras temperadas/retificadas de alta resistência e precisão.



5 Painel de Comando agregado com avançado CNC Oxipira ou Hypertherm.

6 Pista de Rolamento Longitudinal com sistema de trilhos usinados em pares de 3 metros, lubrificação automática e cremalheiras de alta resistência.

7 - Vigas I: Pares de vigas I para sustentação das pistas de rolamento, confeccionada em viga 300x300x1/2 apoiada em vibra stop de 3/4 que permite sua montagem em menor tempo. Isento de vibrações periféricas e fácil alinhamento. No seu comprimento é fixado o berço para a esteira porta cabos.



Série Master Padrão Oxipira A líder de mercado!

As máquinas da Série Master Padrão Oxipira são especialmente desenhadas para ser a solução completa e atender os mais exigentes requisitos de corte. Pela agressividade da atividade, são altamente robustas, precisas, eficientes e climatizadas para as mais diversas condições de trabalho do ambiente brasileiro. Equipada com CNC Oxipira ou Edge PRO, de base PC, servo

motores de alta potência, guias lineares de precisão, sensores de altura e colisão, a Série Master Padrão Oxipira oferece uma ampla gama de opções e escolhas que permitem configurar o seu sistema de corte CNC com as capacidades, velocidades e precisões de acordo com suas necessidades.

Preparada para os processos:

Processo Plasma

Preparada para os melhores resultados com plasma de alta definição e alta performance, tais como, HSD130, HPR 130/260/400 XD e outros processos que exigem qualidades de movimento. Oferece ainda, corte e marcação com os sistemas HPRs.



Processo Oxicorte

A Master Padrão Oxipira apresenta flexibilidade para corte a plasma e oxicorte. No processo oxicorte oferece opcionais como: maçaricos motorizados, capacidade de corte em até 300mm, perfuração automática plena, marcação pneumática e a zinco, controle de altura a distância. Sob consulta, corte em até 1200mm e sistema de corte VKX.



Consumíveis originais.
O maior estoque de consumíveis originais plasma do Brasil.



Série Master Padrão Oxipira é a mais alta performance em corte a plasma.

Opcionais:

Estações motorizadas / Dispositivo de ignição automática / Sensor de altura e colisão plasma / Sensor de altura Oxicorte / Extensões de trilho / Sistema V.K.X. para cortes de chanfros oxicorte / Sistemas de cortes de chanfro plasma / Marcador pneumático / Posicionamento a laser / Unidade High Speed / Sistema anti-pó no eixo Y / Mesa de corte / Softwares / Furadeira



www.oxipira.com.br



OXIPIRA



Matriz: Rua João Francisco Angeli, 160
Distrito Industrial Uninorte - CEP 13.413-087
Piracicaba - SP, Brasil - Tel: 55 (19) 3414.9999
Fax: (19) 3414.9995

Fábrica: Rua Luiz Silveira Pedreira, 357
Distrito Industrial Uninorte - CEP: 13.413-099
Piracicaba-SP, Brasil - Tel: 55 (19) 3413.2126

Filial Caxias do Sul: Rua Ludovico Cavinatto, 975
Sala 2 - Bairro Santa Catarina - CEP 95.032-620
Caxias do Sul - RS, Brasil - Tel: 55 (54) 3201.1155

www.oxipira.com.br • vendas@oxipira.com.br

ANEXO 3

(Passo-a-passo da transferência de dados para o corte computadorizado)

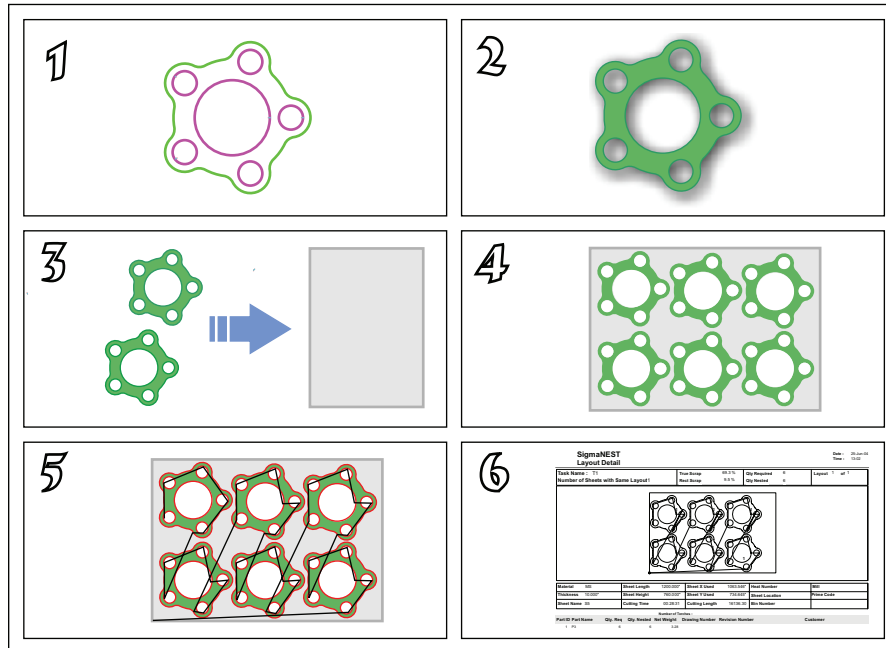
1.3 Apresentação

O SigmaNEST difere de alguns outros produtos do mercado. Este apresenta alguns conceitos e termos que o leitor pode não estar familiarizado. Esta seção descreve o essencial do trabalho com SigmaNEST e apresenta os termos principais que sejam únicos para o SigmaNEST.

O SigmaNEST tem uma grande quantidade de parâmetros que permitem ajustes finos às suas necessidades, na grande variedade de indústrias e máquinas em grandes ou pequenas instalações. Para facilitar o gerenciamento destes parâmetros, estes foram logicamente designados às entidades que usualmente este pertencam. Por exemplo, atributos da peça são designados e armazenados com a definição da peça. Os parâmetros que determinam como o arranjo será executado, são designados e armazenados nas tarefas dos arranjos.

Assim sendo o SigmaNEST pode parecer requerer mais passos que o usual para fazer uma operação de arranjo com conhecimentos básicos, esses passos tornam-se lógicos e necessários para organizar um trabalho otimizado. Uma vez que os parâmetros estejam gravados com a peça, eles podem ser usados repetidas vezes e a mesma peça pode ser incluída em diversas operações de arranjo: cada uma com seus próprios requisitos.

Processo de Arranjo



Step 1. Incluir geometria para as peças desejadas. SigmaNEST tem ferramentas sofisticadas para a criação de geometrias, porém o mais comum é importar uma geometria já existente de um Cad dedicado, como AutoCAD ou um produto de modelagem sólida como um Solidworks. Sigmanest suporta uma variedade de formatos de arquivo e se integra diretamente com o produto comum de modelagem.

Step 2. Criar uma Peça. SigmaNEST não faz arranjos de geometrias. Ele faz o arranjo de peças. A peça no SigmaNEST é uma coleção de entidades geométricas que correspondem a uma única peça física e que possui informação adicional como tipo de material, espessura do material, localização do corte de entrada, informações do cliente, etc. Uma vez que geometria foi convertida em peça, aquela peça é salva em um arquivo e pode ser chamada novamente com todas as suas informações intactas.

Quando uma peça é criada, a geometria é conferida para erros, classificada e seqüenciada. Contornos externos e internos são reconhecidos automaticamente. Tempo e custo de corte são

automaticamente estimados, baseado no material e parâmetros de processos.

Step 3. **Criar uma tarefa de arranjo.** Uma tarefa de arranjo traz consigo as peças a serem arranjadas, o material das chapas em que elas serão arranjadas e os parâmetros que descreverão como a operação de arranjo deve ser executada. Esta tarefa de arranjo pode ser salva e aberta novamente quando desejado.

Peças podem ser retiradas de uma ou mais bibliotecas, de listas de materiais, de ordens de serviço, de grupos previamente salvos de peças estáticas, pré-arranjadas ou podem ser criadas em cima de desenhos se necessário.

O material das chapas pode ser definido imediatamente, selecionado de uma biblioteca ou retirado de um estoque de chapas completas ou remanescentes.

Os parâmetros da tarefa de arranjo incluem: valores de folga entre peças, valores de distância das bordas, tipo de arranjo (retangular; formato real, guilhotina, etc.), o número de tochas, a quantidade empilhada, a referência da máquina, etc.

Step 4. **Criar o arranjo** Esse é o processo pelo qual as peças são realmente arranjadas em uma ou mais chapas. O arranjo pode ser totalmente automático ou totalmente manual. Em compensação, um arranjo automático pode ser modificado manualmente e um arranjo parcialmente manual pode ser arranjado de forma totalmente automática. Peças podem ser pré-arranjadas e os grupos resultantes de peças arranjadas como se fossem peças individuais.

Os algoritmos do SigmaNEST na forma automática de arranjos com forma real suportam arranjos de peças dentro de peças, tochas múltiplas e chapas remanescentes com formas variadas.

Step 5. **Gerador de código NC.** Este passo define a ordem na qual as peças serão cortadas. Ele pode ser feito manualmente, totalmente automático ou uma operação manual pode ser completada automaticamente. Com NC automático, o SigmaNEST determina a ordem de corte das peças, levando em consideração peças dentro de peças, reposicionamento e peças sob garras, etc.

SigmaNEST divide esse passo em duas sub-unidades: O primeiro gera e mostra a sequência de corte. O segundo gera o código NC da máquina através da sequência mostrada. O resultado final é

um código NC pós-processado, pronto para ser enviado à máquina.

Step 6. **Relatórios e detalhes.** O SigmaNEST produz uma variedade de relatórios. Relatórios completos de arranjos incluem índice de sucata e tempo de corte para cada chapa. Também é possível criar relatórios personalizados para atender necessidades individuais para determinadas situações.

Se a disposição de um arranjo é detalhado, então a imagem detalhada é incluída no relatório. Os relatórios podem ser vistos antes de serem impressos e terem o sinal de saída enviado a impressoras, plotters ou a arquivos de formas variadas, incluindo PDF.

1.4 Notas Importantes ao Usuário

Zoom e Pan

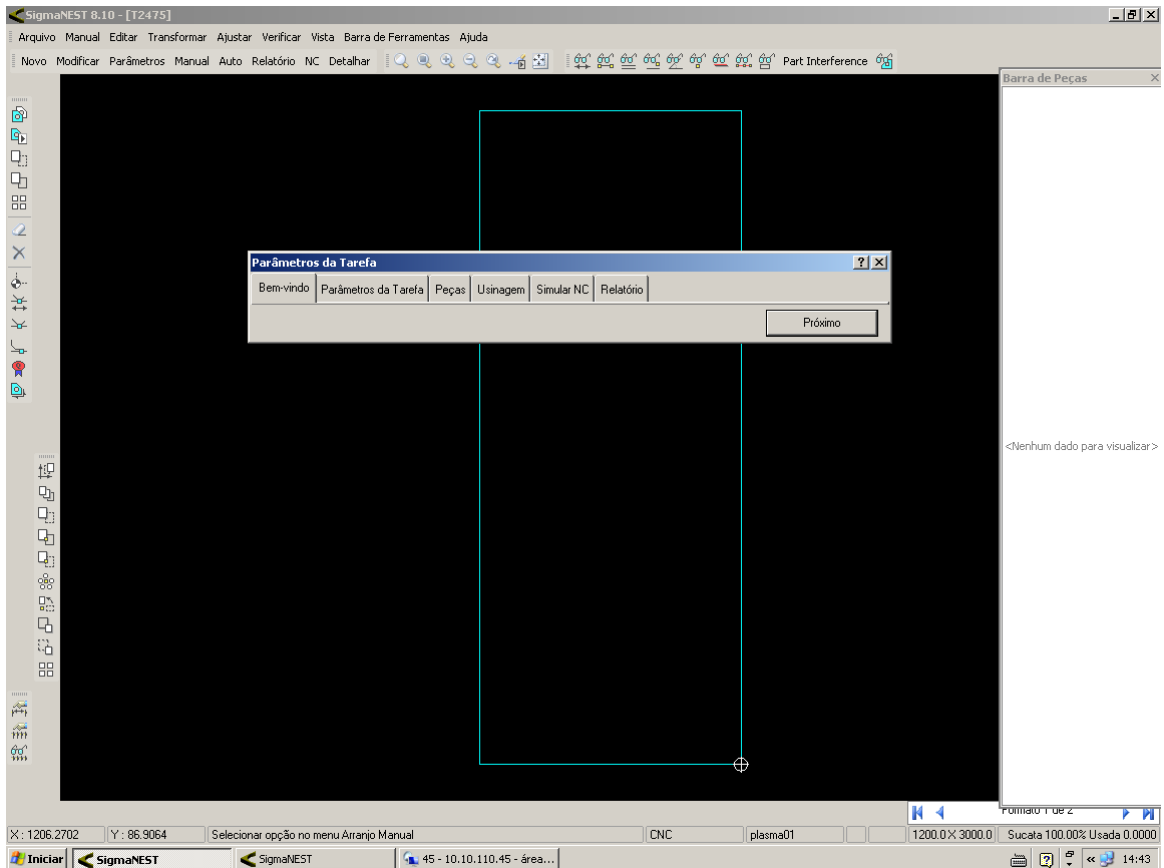
Ao operar no espaço de trabalho do SigmaNEST, os dois recursos mais comuns serão o Zoom e o Pan. O Zoom permite uma visão mais detalhada de uma área específica do espaço de trabalho ou mais abrangente. O Pan permite a visualização de uma parte diferente do espaço de trabalho que não esteja visível.

Um mouse que tenha um botão de rolagem entre os botões esquerdo e direito faz com que essas operações sejam feitas de forma fácil e rápida.

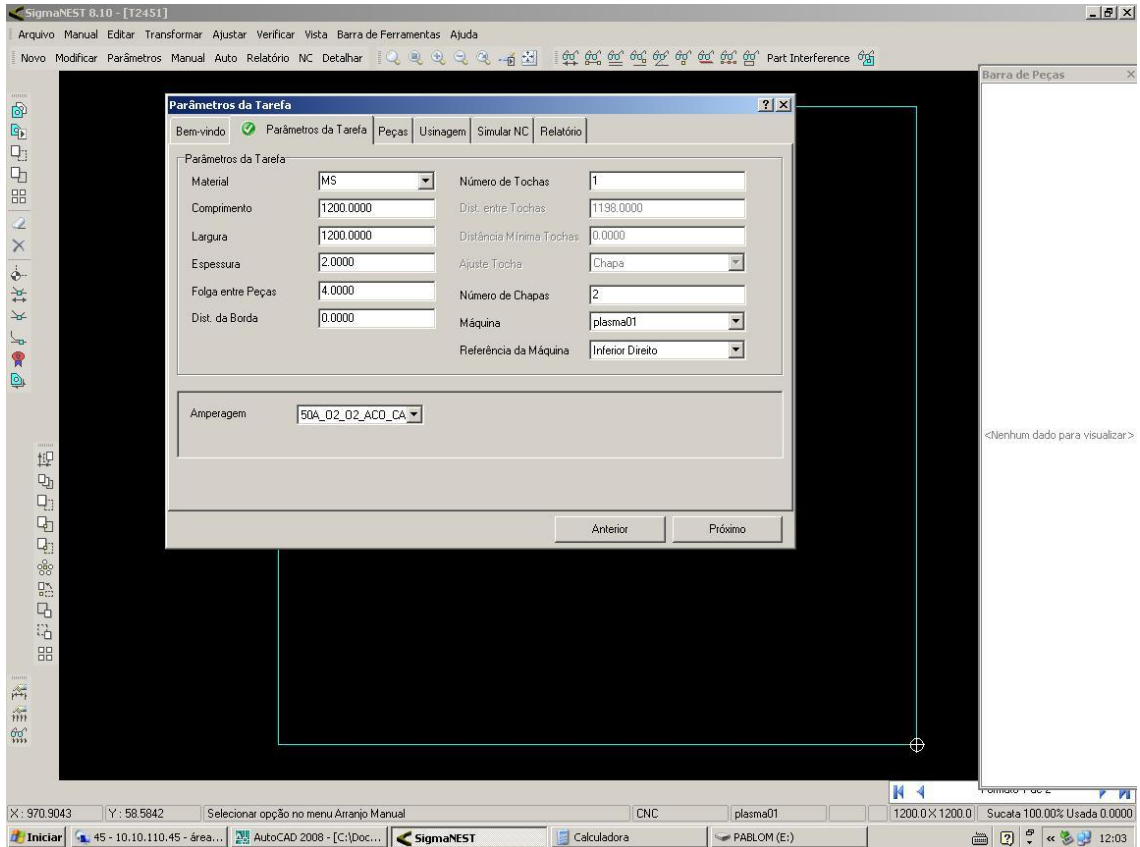
Pan

Step 1. Posicione o cursor no espaço de trabalho perto da margem de onde mais informação deve ser trazido para o campo de visão.

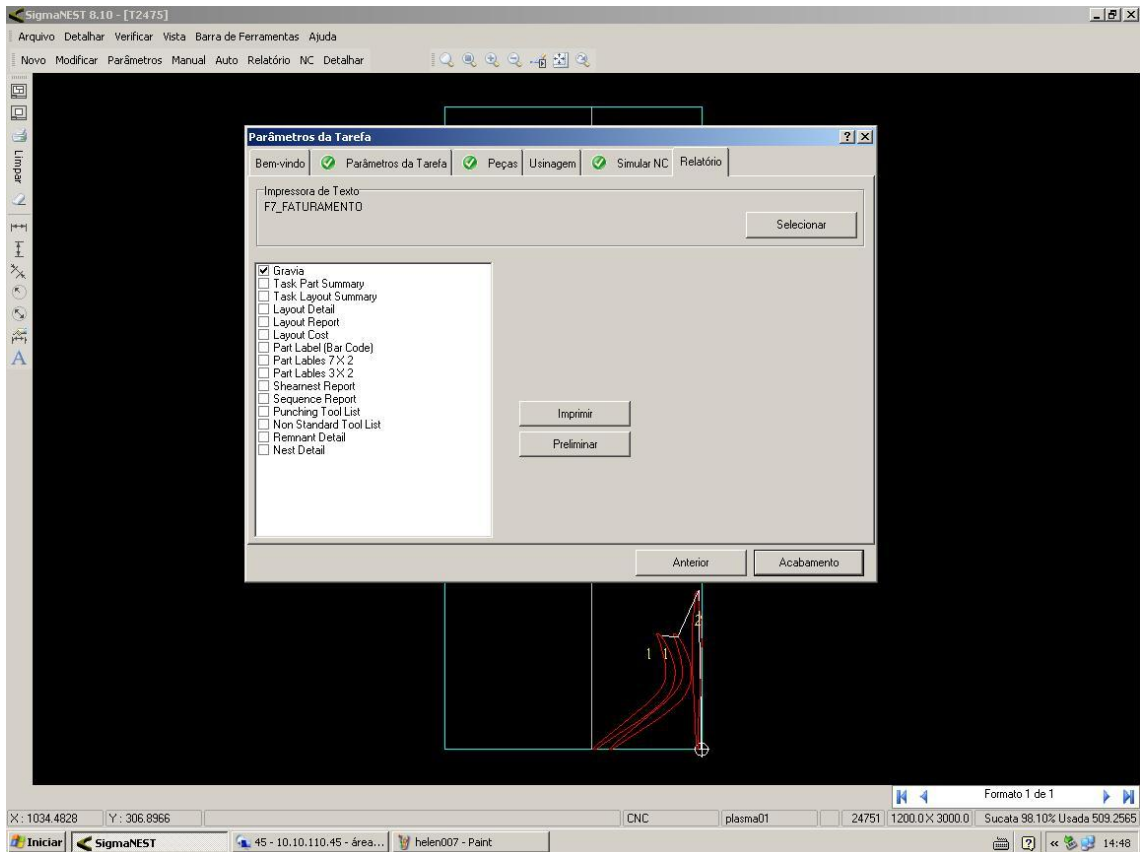
Step 2. Pressione o botão de rolagem do mouse e segure. O cursor vai mudar para uma mão indicadora.



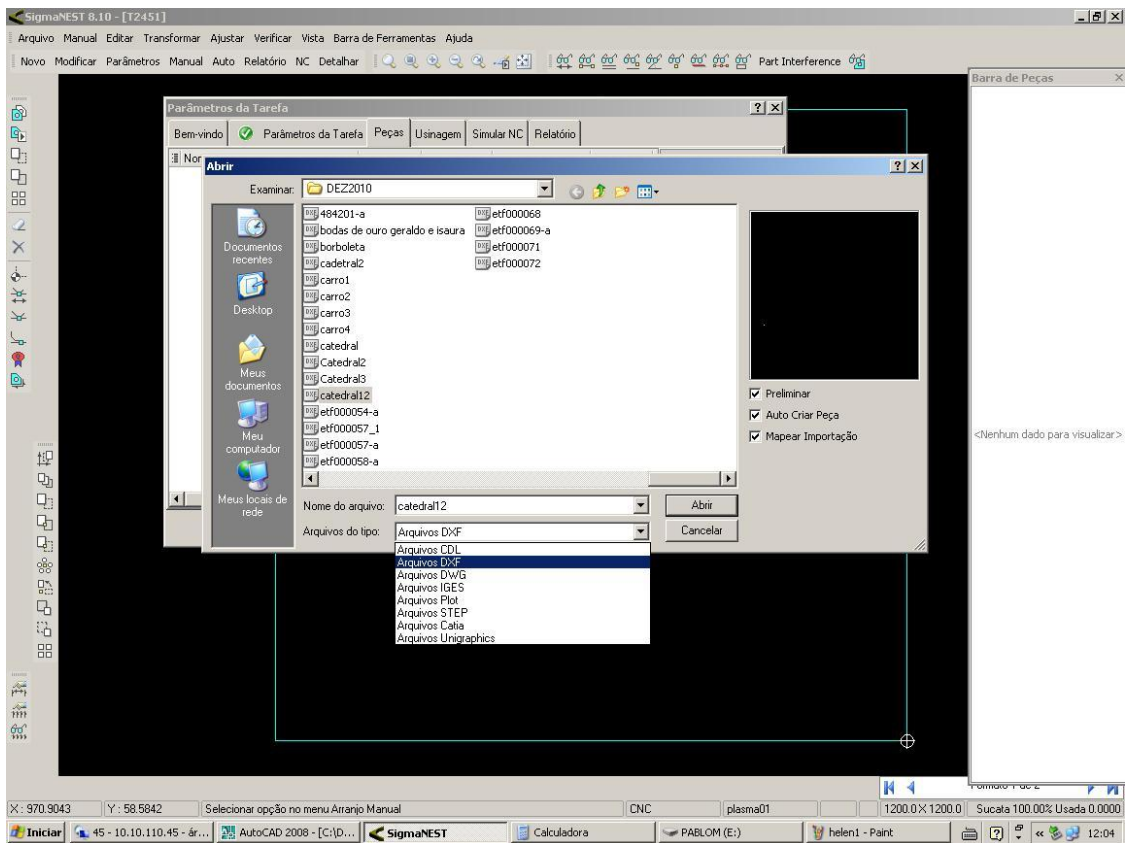
Tela inicial do programa Sigmanest.



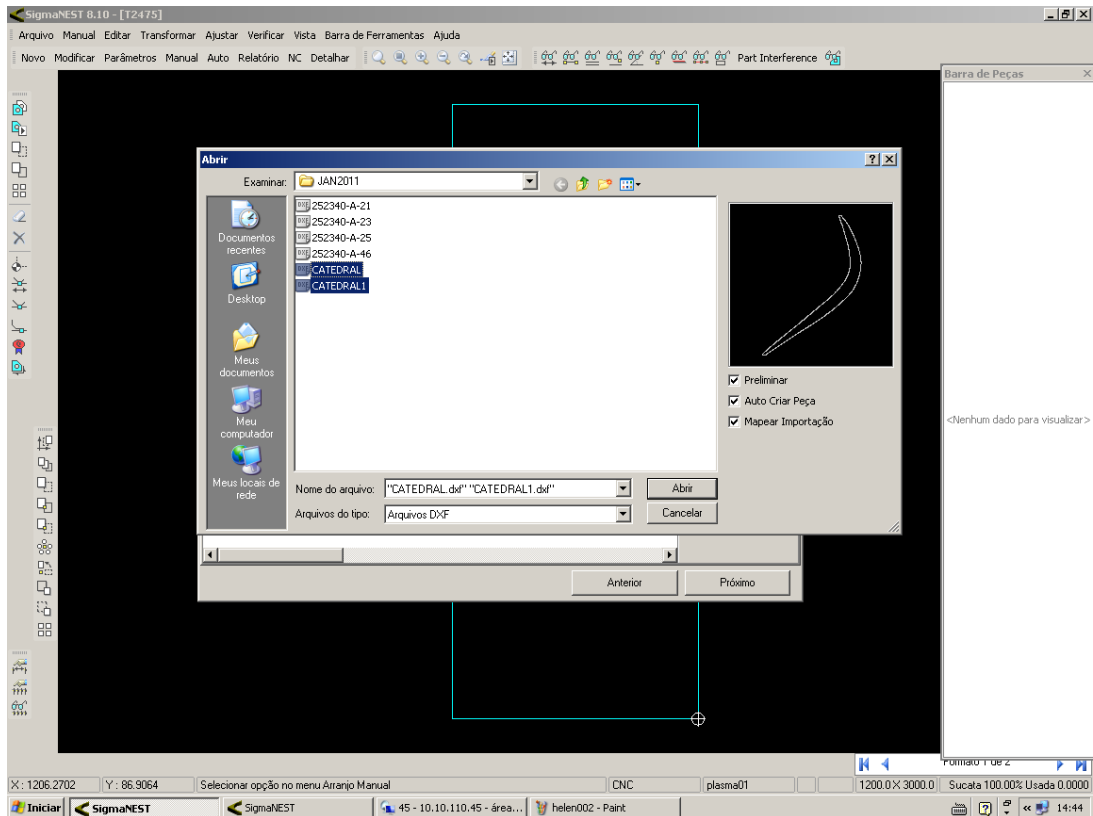
Definição dos parâmetros iniciais da tarefa (corte), dimensões, tolerâncias, tipo de corte etc.



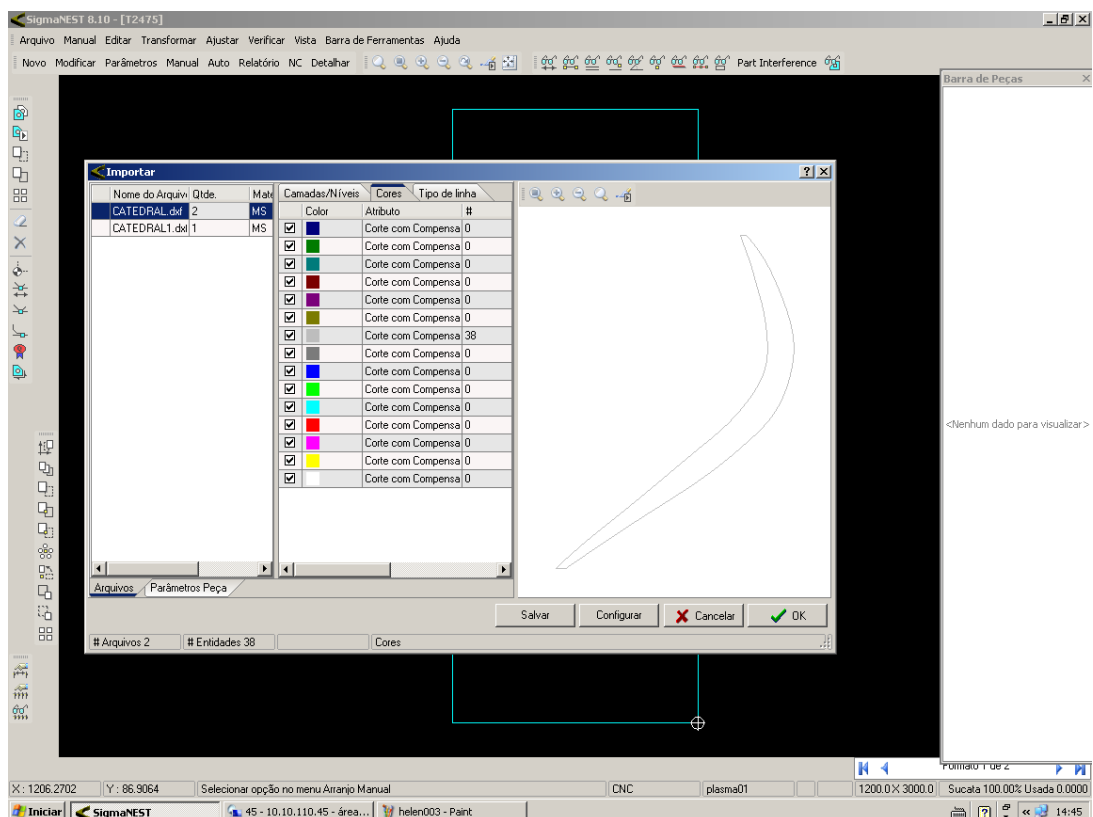
Após modelo CAD importado e os parâmetros definidos pode ser gerada lista de materiais que serão utilizados.



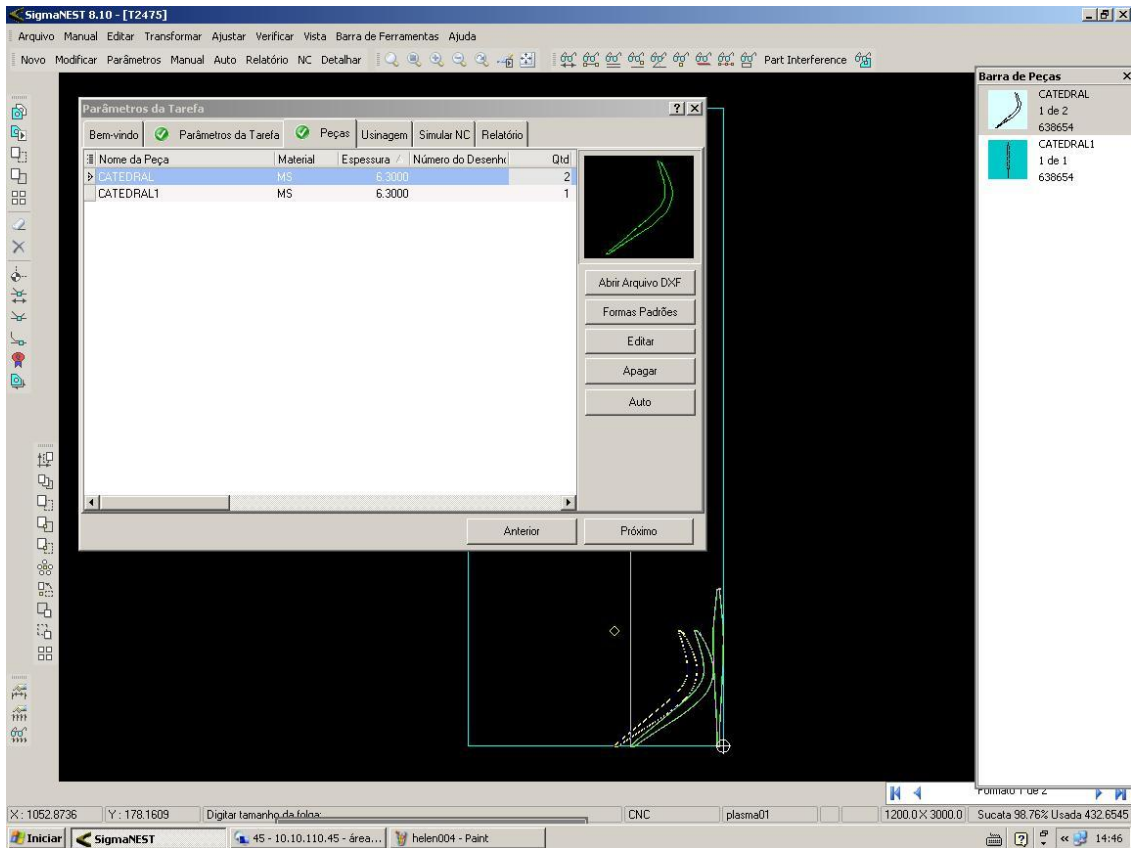
O modelo CAD é convertido em DXF.



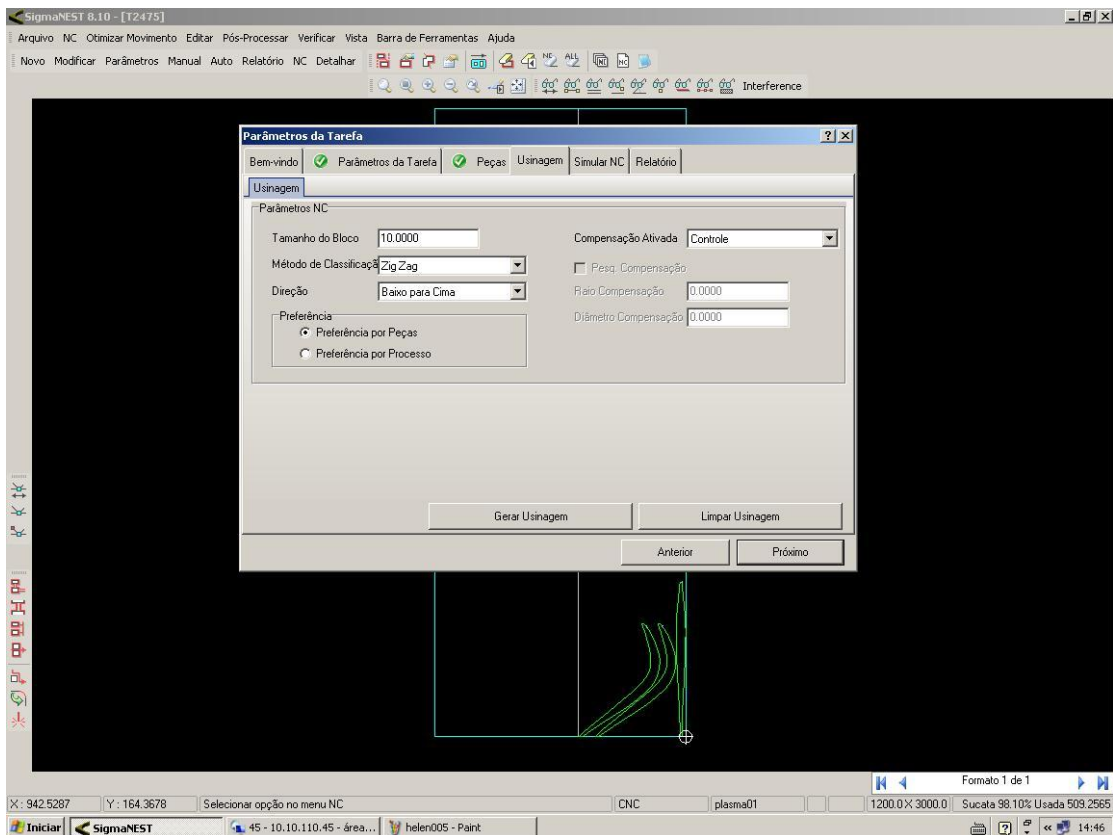
As partes do desenho em DFX do artefato são posicionadas na chapa definida.



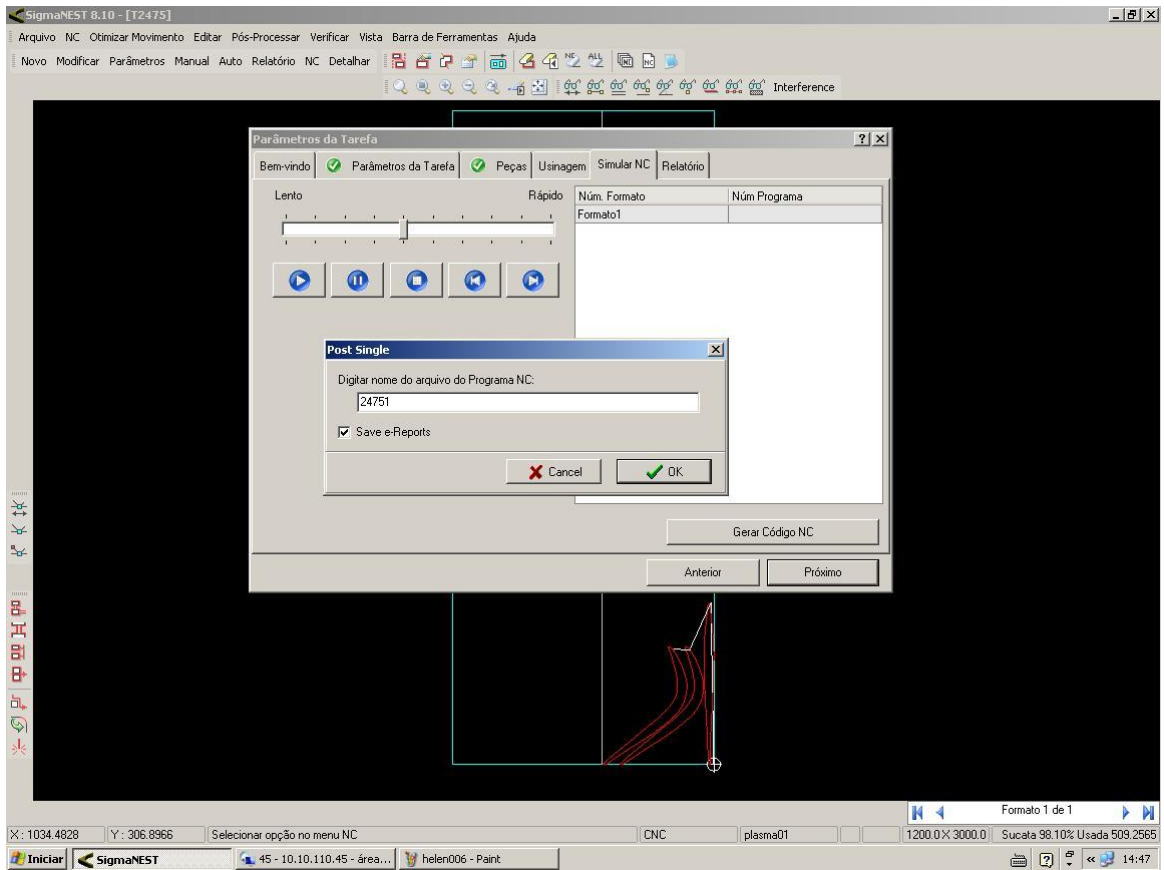
Cada linha define como deverá ser o corte (profundidade, bitola etc.)



As peças são posicionadas para melhor aproveitamento da chapa.



Definida a direção que a máquina deverá percorrer para efetuar o corte.



Definida a velocidade de corte, então é enviado o comando de corte para a máquina.