



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

DIOGO GOMES FERREIRA SANTOS

**O PARADIGMA DA ARQUITETURA DIGITAL: DA PADRONIZAÇÃO À
CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA**

Brasília – DF
2016

DIOGO GOMES FERREIRA SANTOS

**O PARADIGMA DA ARQUITETURA DIGITAL: DA PADRONIZAÇÃO À
CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA**

Dissertação apresentada a Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de
Brasília, como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em arquitetura.

Área de concentração: Tecnologia

Orientador: Prof. Dr. Neander Furtado Silva

Brasília – DF
2016

Santos, Diogo Gomes Ferreira.

O Paradigma da Arquitetura Digital: da Padronização à Customização em Massa/Diogo Gomes Ferreira Santos. UnB, 2016.

114 p.: il; 210 x 297mm

Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2016.

1. Arquitetura 2. Formas complexas. 3. Meios de produção. 4. Padronização.
5. Customização

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação intitulada “O paradigma da arquitetura digital: da padronização à customização em massa” submetida à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura.

Brasília, 13 de Dezembro de 2016.

Aprovada por:

Prof. Dr. Neander Furtado Silva - Orientador

Prof. Dr. Francisco Leite Aviani

Dr. Fábio Ferreira de Lima

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha mãe, Aurora, e a meu pai, Nilo, por terem me dado educação, valores e por terem me ensinado a andar com meus próprios pés. Sei que, muitas vezes, renunciaram a seus próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Partilho com eles a alegria e conquista deste momento.

Agradeço ainda a minha esposa Patrícia e a meus filhos Gabriela, Pedro e Bruno pela compreensão de minha ausência durante o tempo de estudo e de pesquisa. Esta conquista também pertence a vocês, e espero que consigam realizar seus sonhos assim como estou realizando os meus. Amo vocês.

Ao Prof. Neander Furtado e a sua esposa Ecilamar, por terem me aceitado como aluno, pelo aprendizado, paciência, amizade e compreensão. Vocês estarão para sempre em minha memória. Desculpas a Lilian, por tomar tanto tempo dos seus pais.

Aos outros familiares, aos colegas de mestrado, aos funcionários da FAU e aos amigos que não citei por esquecimento ou falta de tempo, também gostaria de agradecer.

“Cada pessoa que passa em nossa vida, passa sozinha, é porque cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra! Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha e não nos deixa só porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós. Essa é a mais bela responsabilidade da vida e a prova de que as pessoas não se encontram por acaso.”

Charles Chaplin

“A arquitetura depende do seu tempo. Ela é a cristalização da estrutura, o desembrulhar lento de sua forma. Esta é a razão pela qual a tecnologia e arquitetura são tão relacionadas. Nossa verdadeira esperança é que elas irão se desenvolver juntas e um dia uma será a expressão da outra. Só aí teremos uma arquitetura como símbolo do seu tempo.”

(Mies van der Rohe, Speech at IIT, 1950)

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo demonstrar que podemos construir uma arquitetura de custo menor ou igual à produção serial ou padronizada, sem prejuízo da qualidade, ao utilizarmos tecnologias de customização disponíveis no mercado de Brasília. Para tanto, adotamos a customização em massa como método de produção de componentes arquitetônicos e calculamos os benefícios em comparação a componentes padronizados, provenientes da produção em massa. Pode-se construir em Brasília (DF), componentes construtivos diferenciados daqueles produzidos em escala industrial (larga escala), com formas diversificadas, com custo igual ou inferior àqueles provenientes da produção serial. Esta hipótese se deve ao fato de possuímos tecnologia de fabricação digital suficiente na indústria da construção civil desta capital para executar tais componentes. No sentido de demonstrar que essa hipótese é promissora, foi feita uma comparação entre os componentes construtivos produzidos em série e os customizados. A título de recorte de pesquisa, escolhemos comparar pilares em perfil “I” submetidos a cargas sucessivas. Selecionamos dois perfis produzidos em série com áreas de seção sucessivas (monoblocos) e produzimos vários outros customizados, com áreas situadas entre os dois para podermos fazer algumas comparações. Os resultados obtidos demonstram um ganho percentual significativo em relação ao custo das estruturas, atendimento dimensional e desperdício de material. Isto foi possível por meio de orçamentos coletados e compilados de forma a demonstrar que a hipótese desta dissertação é promissora. Acreditamos que, por meio de processos provenientes da customização em massa, em escala industrial, a arquitetura poderá ser desenvolvida e evoluir para além das soluções ortogonais e padronizadas. Isto possibilitará a construção de formas complexas provenientes deste novo paradigma da arquitetura e sua nova tectônica.

Palavras-chaves: Arquitetura. Formas complexas. Meios de produção. Customização.

ABSTRACT

This thesis has the objective to demonstrate that we can construct an architecture with less or same cost and quality using customization technologies in the city of Brasilia. When considering the adoption of mass customization as a method of architectural production of components, we need to calculate the benefits compared to standardized and serialized components of mass production. We believe that we can construct in Brasilia, Federal District, differentiated constructive components with diversified forms, with equal or inferior cost to those produced in industrial scale. This hypothesis must be to the fact that we have enough digital manufacture technology in the civil construction industry on this capital to execute such components. To demonstrate that our hypothesis is promising, we made a comparison between serialized and customized constructive components. For a reason or purpose scissoring of research we choose to compare supporting pillars with "I" profile submitted successive loads. We will select serialized pillars with successive section areas and will produce several other customized with section areas between the serialized ones to be able to make some comparisons. The obtained results demonstrate a significant a percentual profit of the structural cost, dimensional attendance and wastefulness of substance. This was possible because of collected budgets to demonstrate that the hypothesis of this thesis is promising. We believe that by means of processes proceeding from the mass in an industrial scale, the architecture can be developed beyond the orthogonal and standardized solutions. This will enable the construction of the complex forms derived from this new paradigm of the architecture and its new tectonic thinking.

Key-words: Architecture. Complex forms. Means of production. Customization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Croqui edifícios Pampulha.....	16
Figura 2: Cidade do Cairo, Egito.....	17
Figura 3: Nova Dehli, Índia.....	18
Figura 4: Ferramenta Paramétrica de criação de escada do programa FormZ.....	24
Figura 5: Greg Lynn Embriological House.....	26
Figura 6: Terminal Internacional de Waterloo.....	29
Figura 7: Diagrama de Fischer e Herr	30
Figura 8: Peças metálicas da obra da Clínica Lou Ruvo	31
Figura 9: Portão da Escola de Design e Arquitetura em Miami.....	32
Figura 10: Estádio Nacional de Pequim	33
Figura 11: Peça criada para automóveis Toyota utilizando máquinas CNC.....	34
Figura 12: Protótipo da estrutura de um navio.....	35
Figura 13: Esquema de cortes para CNC router.....	36
Figura 14: Fachada do Palácio de Cristal	39
Figura 15: Torre Eiffel	40
Figura 16: BMW Exhibition for Expo 2000.....	42
Figura 17: Fabrica de Turbinas AEG/Fábrica Fagus.....	44
Figura 18: Terminal TWA.....	45
Figura 19: Santa Maria del Fiore	46
Figura 20: Casa da cascata na Pensilvânia.....	47
Figura 21: Interior da Igreja de Saint-Séverin.....	49
Figura 22: Entrada da estação de Montmartre.....	50
Figura 23: Ronchamp de Le Corbusier	52
Figura 24: Modelo tridimensional de automóvel.....	55
Figura 25: BMW Pavilion de Bernard Franken.....	57
Figura 26: Máquina de corte 2 eixos, fabricação bidimensional.....	58
Figura 27: Router de 3 eixos, método subtrativo de produção.....	59
Figura 28: Protótipo sendo retirado de uma impressora 3d.....	60
Figura 29: Artefatos criados impressora 3d de concreto.....	60
Figura 30: Artefatos criados por corte bidimensional e calandragem.....	61
Figura 31: Nestlé Chocolate Museum de Rojkind Arquitetos.....	62

Figura 32: Cellular Tessellation em Sidney.....	63
Figura 33: Estrutura em formas de cogumelo do arquiteto Jurgen Mayer.....	65
Figura 34: Memorial Darcy Ribeiro.....	68
Figura 35: Heydar Aliyev Cultural Center.....	70
Figura 36: Jockey Club Innovation Center.....	70
Figura 37: Dongdaemun Desgin Plaza.....	71
Figura 38: Wangjing Soho.....	72
Figura 39: London Aquatics Center.....	72
Figura 40: Eli and Edyth Pbrad Art Museum.....	73
Figura 41: Estrutura do Heydar Aliyev Cultural Center.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes.....	79
Tabela 2: Bitolas perfil I - aço ASTM A 572 Grau 50.....	81
Tabela 3: Cargas suportadas por área nos perfis metálicos.....	83
Tabela 4: Comparação de valores dos perfis.....	86
Tabela 5: Comparação de valores dos perfis e cargas suportadas	89
Tabela 6: Comparação econômica de utilização dos perfis customizados.....	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparativo de peso entre perfis customizados e serializados.....	85
Gráfico 2: Comparativo de vantagem de custo de perfil I.....	88
Gráfico 3: Comparativo de custo entre perfis customizados e serializados.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 BREVE HISTÓRICO DA ARQUITETURA.....	21
2.2 HISTÓRIA DOS MÉTODOS DE PRODUÇÃO.....	37
2.2.1 Revolução industrial - Impacto na arquitetura moderna.....	38
2.2.2 Movimento Moderno.....	42
2.3 EVOLUÇÃO DO PAPEL DO ARQUITETO.....	45
2.3.1 Precusores de formas complexas.....	48
2.4 ADVENTO DA COMPUTAÇÃO.....	54
2.4.1 Evolução dos meios de produção.....	56
2.4.2 Customização em massa.....	63
3 PROBLEMÁTICA	66
4 HIPÓTESE.....	75
5 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO.....	77
6 RESULTADOS OBTIDOS.....	88
7 CONCLUSÃO.....	94
Referências	98

1 INTRODUÇÃO

Apesar de existirem máquinas que permitem a customização de componentes arquitetônicos no mercado de Brasília, não existem cursos para sua utilização na elaboração do projeto de arquitetura e na construção da edificação. Salvo raras exceções ainda é uma atividade pouco explorada nas escolas e escritórios de arquitetura. Essa ausência de ensino dificulta tanto o entendimento quanto o desenvolvimento da modelagem, da fabricação digital e da prototipagem rápida, do aproveitamento de suas vantagens em relação à precisão, à rapidez e aos custos dos projetos arquitetônicos e construção das edificações.

Considerando esse contexto, esta dissertação tem como principal objetivo demonstrar que podemos obter ganhos relevantes na construção, particularmente por meio da criação de elementos arquitetônicos diferenciados e customizados. Além de permitir maior precisão projetual, um método de projeto e de construção, advindo do computador para execução da obra, permite obter custos iguais ou inferiores àqueles provenientes da produção em série.

A lacuna de pesquisa que pretendemos preencher com este trabalho se deve à constatação de que, apesar das mudanças ocorridas na arquitetura e nos métodos de criação e desenvolvimento das formas, seus meios de produção continuam artesanais e não condizem com a tecnologia dos dias atuais.

No sentido de contextualizar o tema, apresentamos um breve histórico dos métodos de produção, da evolução dos meios de produção, do advento da computação e da arquitetura e fabricação digitais. Por meio de experimentos de customização de componentes arquitetônicos, demonstra-se a produção de elementos construtivos customizados de forma mais precisa, com menos desperdícios de matéria-prima e custos reduzidos, em vez de utilizar componentes provenientes da produção em série.

Os resultados obtidos podem permitir que se sejam recomendações para os meios de produção automatizada na construção de edificações em nossa cidade. Portanto, eles podem contribuir para uma mudança do paradigma da produção serial de componentes construtivos, geralmente tida como única forma de reduzir custos, para a customização em massa, por meio da fabricação digital.

A fabricação digital consiste em recursos computacionais que permitem a elaboração computadorizada de artefatos, a partir de desenhos e modelos virtuais. A customização em massa por sua vez, proporcionada por esses recursos digitais, permite que os elementos construtivos sejam produzidos para propósitos específicos, para se tornarem elementos singulares em contextos únicos (SILVA, 2009, p.430).

A revisão bibliográfica do tema mudança de paradigma na construção deve iniciar com sua definição original. Para os gregos, paradigma tem origem em uma ideia muito clara que gera um padrão ou exemplos que serão seguidos. Platão usava a palavra modelo como “sinônimo de paradigma” (KUHN, 2006). Segundo o *Longman Dictionary of Contemporary English*, paradigma é um exemplo claro e típico de algo. Já o Dicionário de Português Michaelis define paradigma como um modelo, padrão e protótipo.

Percebe-se, numa análise mais detida, que o conceito de paradigma se associa à síntese da atividade de pesquisa que resulta em transformação e ampliação do conhecimento. O conceito utilizado nesta dissertação, em relação à mudança de paradigma, é o que trata da mudança de teorias, ideias ou modelos no processo de projeção e de construção digitais na arquitetura brasileira.

No Brasil, essa mudança não é observada na realidade, mesmo com o fato de a maioria das técnicas de construção digital - como a produção de componentes arquitetônicos saindo diretamente dos computadores para as fábricas - estarem disponíveis há mais de duas décadas, principalmente para a fabricação de peças metálicas. Uma pesquisa recente demonstrou que a tecnologia se encontra disponível em várias regiões, mas que a dificuldade de sua incorporação está no desconhecimento dela por parte dos arquitetos (SILVA, 2009).

Entendemos, assim, que apesar de disponível, a utilização incipiente dessa tecnologia prejudica evoluções da forma arquitetônica, pois, conforme explica Niemeyer (2005, p. 16), “a forma plástica evoluiu na arquitetura em função das novas técnicas e dos novos materiais que lhe dão aspectos diferentes e inovadores.”

Oscar Niemeyer utilizou, ainda nos anos 40 (século XX), novas técnicas construtivas para elaborar vários de seus projetos. Além disso, possibilitou avanços no modernismo brasileiro, com a inserção de curvas de concreto armado, a exemplo dos edifícios da Igreja e da Casa de Baile da Pampulha (figura 1).

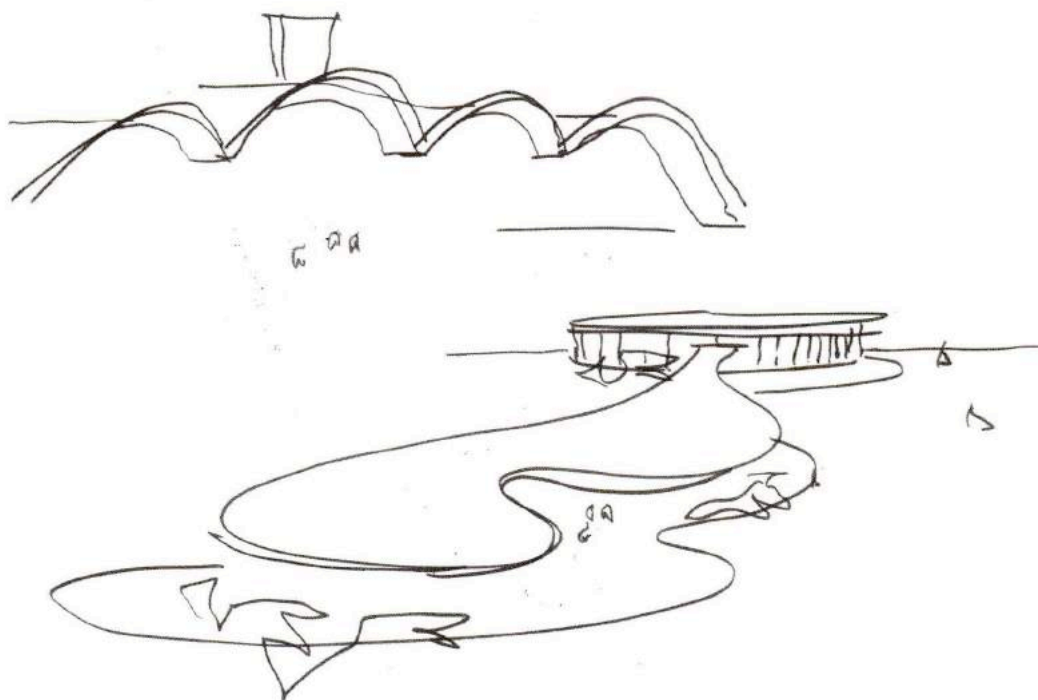


Figura 1: **Croquis dos edifícios da Pampulha**
 Fonte: Enora, 2015

O complexo da Pampulha é um dos marcos da arquitetura brasileira, estando entre os primeiros, que por sua forma livre e criativa, caracteriza nossa arquitetura até os dias atuais. Isso, no entanto, só foi possível com o advento das novas técnicas construtivas e da escolha dos materiais utilizados na obra.

A arquitetura contemporânea se baseia na perspectiva de que a técnica construtiva devia modificar tudo, e o funcionalismo era o apoio para ela realizar sua metamorfose. Assim, o funcionalismo se tornou seu principal suporte, recusando a verdade de concepção com seu rigor “estrutural opressivo” (NIEMEYER, 2005)

Com isso, Niemeyer questiona o funcionalismo como única maneira de desenvolvimento da forma na arquitetura que não deve ater-se só a ele. Mas não significa que se deva recorrer ao ornamento de forma aleatória. Deve-se considerar a estética como mais uma função, não só como resultado do formalismo estrutural.

[...] a mudança e a variedade são uma necessidade para a alma e o coração humano, assim como o são para os edifícios e os livros. Não sentimos prazer em edifícios com ornamentos padronizados ou com pilares que respeitam a monotonia das regras de proporção. Do mesmo modo, não sentimos prazer em nuvens que formam apenas um tipo de desenho, ou em árvores que tenham o mesmo tamanho [...] o universo arquitetônico, assim pensado, torna-se rico em variações (RUSKIN, 1985, p. 94).

Segundo Ruskin (1985), a divisão e a mecanização do trabalho vieram acentuar o processo de desvalorização das diferenças arquitetônicas. Desde o Renascimento, esse processo gera projetos que se reduzem à imitação e à aplicação de padrões fixos, em detrimento da diferenciação dos elementos arquitetônicos. Dessa forma, ao observarmos edificações em cidades no mundo inteiro, não conseguimos na maioria dos casos identificar a cidade e muito menos alguma tipologia arquitetônica própria de cada país. As figuras 2 e 3 ilustram, de forma mais clara, a dificuldade de identificar as edificações citadas por Ruskin, ao compararmos as cidades do Cairo e Nova Deli. Elas poderiam ser de qualquer cidade no Brasil ou exterior, devido à padronização da arquitetura e do urbanismo.



Figura 2: **Cidade do Cairo**
Fonte: Desporto Viajar, 2016



Figura 3: Nova Dehli, Índia

Fonte: Silva, 2016

Tradicionalmente, os arquitetos sempre se interessaram pela forma e pela função dos edifícios e, também, pelo modo de relacioná-las entre si. Louis Sullivan, contudo, sugeriu que a “a forma deveria seguir a função”, mas sua proposta não fornecia suficiente orientação para tal, pois não especificava com precisão o que queria dizer com “forma”, com “função” e com “seguir” (MITCHELL, 2008). Além disso, estava implícito que seria uma só forma para cada função, o que não corresponde à realidade, pois diferentes soluções podem atender a uma mesma função. Se a expressão de Sullivan fosse exata, só haveria um projeto adequado a um programa, não comportando variações dele.

Durante anos, os arquitetos detiveram-se na ideia de Louis Sullivan sem questioná-la ou mesmo interpretá-la de forma mais profunda, resultando em uma arquitetura estritamente funcionalista e formalista.

Mas nem todos pensavam desta maneira. Para os mais dotados, a Pampulha era uma opção atraente, permitindo a liberdade que o funcionalismo recusava. Mas alguns contra Pampulha se insurgiram, incapazes de nos acompanhar nas formas livres que propúnhamos. E as palavras barroca e fotogênica se repetiam, vazias e gratuitas, pois os que nos contestavam nada de novo tinham a sugerir (NIEMEYER, 2005, p. 31, 32).

AS formas propostas por Oscar Niemeyer para a obra da Igreja da Pampulha explorava os meios construtivos da época, desafiando a monotonia que rodeava a arquitetura moderna e aproveitando a liberdade plástica que o concreto permitia. Portanto, as formas tornaram-se mais fluidas, e o funcionalismo continuou sendo explorado com a criação de uma abóbada parabólica sem ser, no entanto, a única referência da criação das formas. Ele continuou a explorar a plasticidade permitida pelo concreto armado nas cúpulas de Brasília, nos parabolóides hiperbólicos da Catedral de Brasília e em outros projetos grandiosos.

As obras arquitetônicas de Oscar Niemeyer se destacam pelo arrojo das formas e pela plasticidade, estabelecendo uma conexão entre o sistema estrutural e a forma arquitetônica. Essas inovações construtivas permitiram o avanço dos conceitos de arquitetura e construtivos na época.

O projeto estrutural da Catedral é constituído de 16 pilares que, unidos, formam um parabolóide hiperbólico. Eles são distribuídos em uma circunferência de 60 metros de diâmetro e sustentados por dois anéis de concreto armado. O primeiro anel contorna a base da estrutura, funciona como um tirante sob tração e absorve os esforços horizontais originados das 16 colunas. O segundo anel é de compressão, passa por dentro dos pilares no ponto onde eles se encontram. Ele não é aparente na estrutura, já que sua função (de compressão) é não deixar as colunas se fecharem. A laje de cobertura serve somente de vedação, não tendo função estrutural (PESSOA, 2002). Disse Niemeyer:

A procura da solução diferente me dominava. Na catedral, por exemplo, evitei as soluções usuais, as velhas catedrais escuras, lembrando pecado. E, ao contrário, fiz escura a galeria de acesso à nave e esta, toda iluminada, colorida, voltada com seus belos vitrais transparentes para os espaços infinitos. [...]

Dos padres sempre tive compreensão e apoio, inclusive do Núncio Apostólico, que, ao visitá-la, não conteve seu entusiasmo: “esse arquiteto deve ser um santo para imaginar tão bem essa ligação esplêndida da nave com os céus e o Senhor”. [...]

Com a mesma preocupação de invenção arquitetural concebi os demais edifícios. O Congresso a exibir seus setores hierarquicamente principais nas grandes cúpulas contrastantes; o Ministério da Justiça a jorrar água, como um milagre, pela fachada de vidro; e o Panteão a enriquecer como um pássaro branco a Praça dos Três Poderes. Somente no Ministério do Exterior agi diferente, desejoso de demonstrar como é fácil agradar a todos com uma solução correta, generosa mas corriqueira, dispensando maior compreensão e sensibilidade. Agora, quando visito Brasília, sinto

que nosso esforço não foi à toa, que Brasília marcou um período heróico de trabalho e otimismo; que a minha arquitetura reflete bem o meu estado de espírito e a coragem de nela exhibir o que intimamente mais me comovia. E, ainda, que ao elaborá-la, soube respeitar o Plano Piloto de Lúcio Costa, nos volumes e espaços livres, nas suas características tão bem concebidas de cidade acolhedora e monumental (NIEMEYER, 2000, p. 273, 274).

Uma das etapas mais difíceis no processo executivo de uma obra arquitetônica é a integração do projeto de arquitetura com o de estrutura. Isso acontece, principalmente, devido a um distanciamento entre o arquiteto e o engenheiro. Questões formais e estéticas de projeto, muitas vezes, não estão subordinadas ou vinculadas ao sistema estrutural do edifício.

Obras de engenharia e de arquitetura de diversas épocas utilizam o sistema estrutural como uma das condicionantes de projeto. Nesses casos, a arquitetura desenvolve-se junto com a estrutura – “terminada a estrutura a arquitetura já está presente, simples e bonita” (NIEMEYER, 2000, p. 81).

Oscar Niemeyer, ao descrever grande parte de suas obras, utilizou essa expressão, demonstrando que é essencial para a concepção de um bom projeto o conhecimento técnico das estruturas, tanto dos materiais a serem utilizados, quanto do sistema estrutural que será adotado.

Na arquitetura do arquiteto Oscar Niemeyer, podemos apreciar a estrutura resistente, ligada diretamente à estrutura formal. Ambas são resolvidas e desenvolvidas simultaneamente durante a projeção e a criação arquitetônica. Isso proporciona uma arquitetura de qualidade plástica e promove repercussões para o ensino e a prática da arquitetura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BREVE HISTÓRICO DA ARQUITETURA

Na arquitetura atual, as ferramentas digitais estão frequentemente sendo usadas não apenas como meio de visualização e apresentação, mas como uma ferramenta de projeto na qual é possível gerar formas, testá-las e transformá-las até obter soluções satisfatórias para desenvolvimento final do projeto.

Ferramentas digitais se referem, nesta dissertação, ao conjunto dos programas de computador, utilizado pelos arquitetos e estudantes de arquitetura no desempenho de suas atividades, para produção, armazenamento, modelagem, visualização, animação, impressão ou manipulação de dados. Essas ferramentas têm um papel muito importante na produção de arquitetura, embora não sejam exclusivas dos arquitetos.

As dimensões e proporções de um poliedro, polígono, ou outra estrutura devem ser fixas ou definidas parametricamente. Isto significa que os valores que definem os vetores devem ser expressos não como números, mas como funções entre uma ou mais variáveis. Através de um sistema de equações associadas à estrutura, estas variáveis do sistema constituem os parâmetros do objeto (BRIDGES, 2006, p. 7, 8).

A abordagem de parâmetros na elaboração de projeto de arquitetura possibilita que o produto final surja como um resultado possível, entre várias alternativas viáveis. Os arquitetos podem gerenciar os resultados dentro do processo, deixando de ser apenas agentes metódicos da forma arquitetônica. Isso ocorre porque os objetos paramétricos na arquitetura são definidos por um sistema de relações implementadas, com equações que se interrelacionam e constituem os elementos que irão originar ou modificar as características físicas do objeto. Cabe ao arquiteto escolher o modelo que melhor se adeque à solução arquitetônica.

Apesar dessas vantagens, as ferramentas digitais vêm sendo utilizadas, na maioria dos casos, apenas para documentar e para representar projetos previamente definidos e finalizados. Muito vantajosos, esses recursos permitem retirar e analisar todas as informações durante o desenvolvimento da projeção, proporcionando maior controle do processo até a construção.

Eastman (2008) se refere aos sistemas *Building Information Model* (BIM) que permitem uma oportunidade singular durante a projeção, por meio do

desenvolvimento de desenhos e da construção das entidades arquitetônicas em um único projeto. Esses sistemas têm mais de 30 anos, mas essa nomenclatura só veio a ser usada nos últimos 15 anos.

Os sistemas BIM permitem a construção de um modelo virtual preciso que contém todas as informações de geometria para auxiliar a construção, a fabricação e outras atividades, necessárias à execução de um edifício. A modelagem de projeto por meio desses sistemas possibilita a definição de todos os atributos, comportamentos e inter-relações dos componentes arquitetônicos, bem como sua análise e observação durante o processo de projeção pelos projetistas e pelos demais profissionais relacionados. Dessa forma, a compatibilização de projeto é feita durante todo o processo de projeção.

Nos sistemas BIM, o método paramétrico permite que ao invés de se projetar um elemento construtivo como uma parede ou uma porta, o projetista defina uma família de objetos ou uma classe de componentes, que, por sua vez, possuem um conjunto de relações e regras para controlar os parâmetros envolvidos. Estas relações permitem que cada item de uma classe de elementos varie de acordo com a configuração de seus parâmetros e relações entre si. Estes parâmetros podem por sua vez ser definidos pelo projetista de modo a atender suas necessidades (EASTMAN, et al., 2008, p. 29).

Isso significa, por exemplo, a modelagem automatizada em um sistema tridimensional genérico na construção de uma escada, quando determinamos alguns parâmetros como: percurso, altura de patamar, largura de degrau, altura e tipo da escada. A partir dessas informações, os sistemas BIM possuem os recursos necessários para a criação da referida escada. Além disso, o arquiteto pode modificar esses parâmetros quando achar necessário, alterando dimensões e características do objeto a qualquer momento, até atingir o resultado esperado.

Os programas computacionais com modeladores tridimensionais parametrizados digitais permitem que o arquiteto tome decisões de projeto enquanto os está utilizando. Essa prática configura o uso de *scripts* computacionais genéricos e abordagens paramétricas como ferramenta de projeto. “O objeto paramétrico pode ser geometricamente definido como uma associação de informações e regras. As regras paramétricas quando modificadas automaticamente redefinem a geometria do objeto” (EASTMAN, 2008, p. 14).

Apesar de os objetos paramétricos serem modificados ao se alterar alguma regra ou informação, cabe ao projetista a iniciativa e as escolhas que serão feitas na definição das novas características, bem como as relações entre os componentes arquitetônicos. Afinal, o computador só desenvolve a forma a partir da inserção dos dados, mas quem altera ou escolhe a geometria é o arquiteto.

Se o projeto for executado ou transferido para um software que utilize um dos sistemas BIM e detalhado ao nível de um objeto real, este será uma representação precisa do objeto para fabricação. Em seguida, por meio da utilização de CNC podemos construir seus componentes (EASTMAN, 2008, p. 19).

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) é um processo em que as informações de um modelo tridimensional são enviadas diretamente para uma máquina de fabricação digital que, por sua vez, gera as peças necessárias para a execução do projeto. A informação é enviada do arquivo digital para a respectiva fabricação, conservando-se as medidas volumétricas.

“O processo *File to Factory* contém todas as informações necessárias à sua execução, permitindo portanto modificações mais rápidas e análises durante todos os processos de projeção” (PUPO, 2009, p.103, 104). Isso permite a fabricação sem o risco de interpretações de terceiros muitas vezes errôneas, ou seja, de pessoas que não têm conhecimento completo do projeto. Dessa forma, ideias ou conceitos implícitos do autor são assegurados até o final do projeto.

Na figura 4, apresentamos um modelo paramétrico de escada modelada, por meio do programa FormZ.

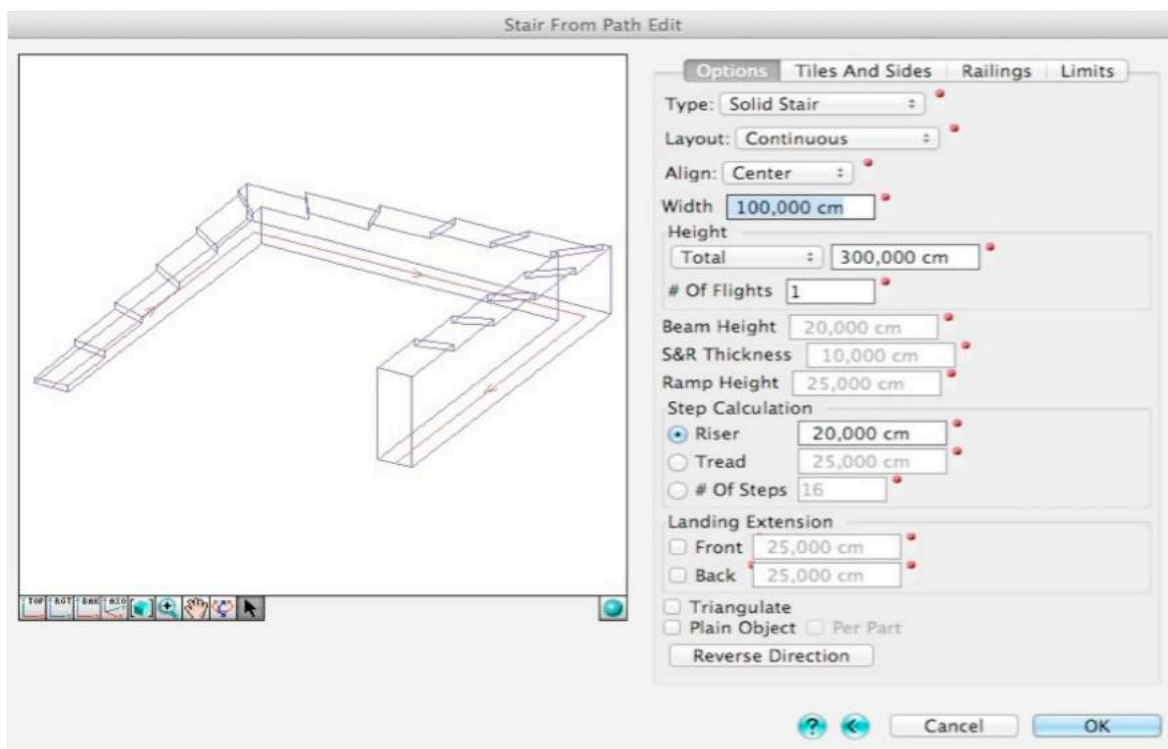


Figura 4: **Ferramenta paramétrica de criação de escada do programa FormZ**

Fonte: Elaborada pelo pesquisador, 2016

Nessa figura, as células ao lado da imagem apresentam os parâmetros básicos referentes ao alinhamento, à largura, à altura, à quantidade de lances, altura dos degraus e outros, dos quais o *software* tridimensional gera o modelo. Esses parâmetros podem ser modificados até que seja atingido o resultado esperado pelo projetista, ou seja, o computador é utilizado como ferramenta de projeto, não apenas como ferramenta de representação, pois possibilita análises plásticas e estruturais, entre outras, até a escolha final do arquiteto.

A figura ilustra as regras paramétricas para a modelagem da escada, de forma que, ao modificar os parâmetros, a geometria associada é alterada imediatamente, ou seja, a definição geométrica está diretamente relacionada a dados e a regras associadas a eles.

O processo de parametrização facilita e agiliza qualquer modificação em modelos elaborados, sem necessidade de utilização do desenho de forma manual e bidimensional do objeto arquitetônico. Isso gera vantagens de tempo, além de facilitar análises projetuais durante o processo de criação.

Conforme Mustoe (1990), não há só uma única e definida proposição para os elementos arquitetônicos. Quando se define um dos parâmetros, podem

ser feitos questionamentos adicionais, podendo mais informações serem necessárias para a elaboração do componente final.

Nem sempre os projetistas têm consciência da diversidade de soluções durante o processo de projeção arquitetônica. Portanto, essas definições de parâmetros demonstram a variabilidade de soluções possíveis para o projeto.

Entre os vários sistemas computacionais disponíveis há também aqueles denominados generativos que utilizam um processo de projeção por meio dos quais o arquiteto define um modelo de produção de formas. Esse modelo gera uma ampla gama de geometrias, entre as quais uma ou outras serão selecionadas pelo arquiteto para atender suas prerrogativas. Estes sistemas permitem ainda que o arquiteto modifique as diretrizes ou parâmetros utilizados possibilitando a criação de um novo modelo generativo (KOLAREVIC, 2003, p. 26).

Desse modo, ao inserir componentes, juntamente com a especificação de suas relações, atributos e comportamentos, podemos gerar um amplo espectro de soluções formais. A partir daí, podemos escolher a opção a ser desenvolvida ou alterar componentes que gerem novas formas que satisfaçam aquelas prescrições.

Mitchell (1995) definiu os modelos generativos como sendo uma forma de abordagem arquitetônica onde os vários componentes pertencem a um determinado vocabulário. Esses componentes podem ser agrupados de várias formas para, por sua vez, dar origem a um leque de soluções arquitetônicas.

A criação de um projeto que satisfaça a um programa funcional é o objetivo dos arquitetos. Cada estilo arquitetônico corresponde à melhor forma que as sociedades conseguiram produzir e resolver seus problemas envolvendo materiais, estágio tecnológico e aspectos naturais (MITCHELL, 2008, p. 97)

Na arquitetura, os sistemas generativos são formados por meio de um conjunto de parâmetros que define o processo de produção computacional. O arquiteto, por sua vez, determina os parâmetros que, através do processo computacional, resultará em uma forma ou um conjunto de objetos.

Os sistemas de modelagem tridimensional permitem a criação direta de uma forma tridimensional, sem que o arquiteto tenha de definir cada parâmetro isoladamente. Após o processo de criação e de testes, o autor do projeto pode fazer as modificações necessárias para atingir os resultados esperados. Esse método de projeção permite criar uma variedade de formas em pouco tempo.

Atualmente, o uso de uma modelagem paramétrica representa uma das grandes mudanças na indústria da construção, no que se refere à facilidade de substituir o trabalho manual pelo trabalho proveniente das tecnologias digitais. Isso facilita a criação de objetos complexos em três dimensões, bem como sua fabricação (EASTMAN, 2008).

A modelagem paramétrica possibilita a implementação de estratégias de projeto generativo de um modo relativamente fácil, numa abordagem que introduz conceitos computacionais aplicados à arquitetura de forma simples e dinâmica, permitindo modificações e análises rápidas durante todo o processo de projeção.

Na figura 5, apresentamos a ilustração do trabalho do arquiteto Greg Lynn, constante de seu livro de 1998. Nesse trabalho, ele utilizou recursos de parametrização, mais especificamente os sistemas generativos para produzir formas arquitetônicas no intuito de futuramente serem modificadas e desenvolvidas. Essas formas foram criadas por meio da inserção de parâmetros em um modelador tridimensional digital.

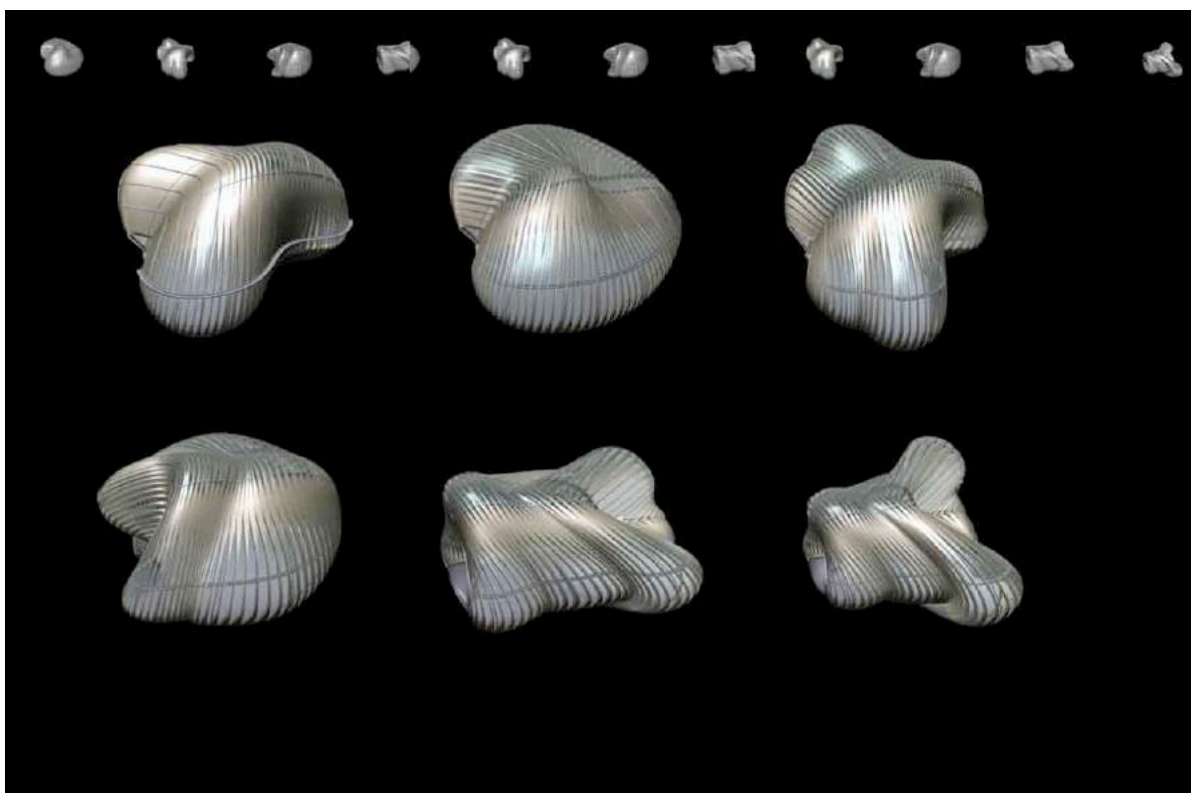


Figura 5: **Greg Lynn Embriological House**
Fonte: Digital Architecture, 2007

Os sistemas generativos deixam vislumbrar o potencial da prática projetual de arquitetura, considerando a possibilidade de geração de um grande número de soluções possíveis, entre as quais Greg Lynn, nessa figura, pôde escolher para atender definições estabelecidas do projeto arquitetônico.

Esses modelos computacionais tridimensionais serão utilizados em estudos e desenvolvimentos futuros pelo arquiteto Greg Lynn, de forma a atender melhor suas expectativas projetuais. O método computacional de trabalho proporciona uma atuação mais rápida e dinâmica do arquiteto e seu projeto. Isso, no entanto, é apenas uma das etapas do processo de projeção. O desenvolvimento de forma, da estrutura e da expressão plástica, entre outras, serão parte de análises posteriores.

Os esforços projetuais de Greg Lynn têm como suporte três temas fundamentais: a convergência do *software*, a mudança para um meio baseado em cálculos e a história da holística. Em qualquer caso, o desejo do arquiteto, ao elaborar um projeto, vai desde a apropriação de um código vigente até a criação de um novo.

“Para Greg Lynn, um arquiteto aprender a desenvolver ferramentas nos *softwares* ou aprender a programar é menos importante que aprender a projetar” (ROCKER, 2009, p. 113) Para Rocker, a origem da arquitetura e de sua produção está na ideia. Mas por compreender o alcance técnico do computador, Greg Lynn investiga uma prática experimental e distinta da convencional adotada pelos escritórios de arquitetura.

Essa investigação não seria possível sem o uso do computador que, antes de ser uma ferramenta, é um universo no qual podemos identificar caminhos, ajustar variáveis e nos surpreender com o resultado final do projeto. “O computador não é um cérebro. A inteligência da máquina pode ser mais bem explicada como conexões sem sentido. Ao juntar múltiplas variáveis, o computador simplesmente não ‘pensa’ criticamente em como elas se conectam” (LYNN, 1999, p. 19).

A prática adotada por Greg Lynn não é meramente uma especulação formal com o uso de técnicas de computação, pois há preocupações estruturais. É o caso de edificações do arquiteto Oscar Niemeyer durante o movimento moderno, como na Catedral Metropolitana Nossa Senhora Aparecida, na Igreja São

Francisco de Assis, no Palácio do Alvorada, entre outras obras. Greg Lynn considera que os esforços sobre uma estrutura não são exclusivamente verticais, mas se alteram ao longo do dia, em função de aspectos físicos e sociais.

O uso de ferramentas paramétricas computacionais ocorreu primeiramente durante os anos oitenta. Elas foram inicialmente utilizadas pela indústria automobilística, naval e aeroespacial. O emprego dessas tecnologias nessas indústrias consistiu uma nova forma de conceber e fabricar seus produtos. Essas indústrias têm feito uso do recurso de parametrização que permite, por sua vez, que o projeto seja desenvolvido e avaliado em um ambiente virtual, do qual são extraídas todas as informações necessárias para a fabricação dos elementos que constituem o produto final (KOLAREVIC, 2003, p. 10).

As ferramentas paramétricas e os sistemas generativos estão sendo usados em projetos de arquitetos renomados, como Frank Gehry, Peter Eisenman, Norman Foster, Zaha Hadid, como demonstra a literatura sobre o assunto (ZAHA HADID, 2016; FOSTER PARTNERS, 2016).

A figura 6 mostra o Terminal Internacional de Waterloo, em Londres, projetado pelo arquiteto Nicholas Grimshaw. É um exemplo simples e elucidativo da técnica de parametrização. Em vez de modelar ou de desenhar à mão, o modelo paramétrico foi preparado para que o tamanho e a curvatura do arco de cada perfil estivessem associados ao conjunto. Isso foi possível porque os parâmetros que definem cada perfil são os mesmos, com dimensões diferentes.



Figura 6: **Terminal Internacional de Waterloo**
Fonte: Architect, 2012

O processo de concepção, de desenvolvimento e de construção de um projeto complexo pode ser considerado mais simples nos dias de hoje, pois as informações podem ser extraídas, alteradas e utilizadas com mais facilidade e rapidez, com o uso de tecnologias digitais. Isso é possível devido à facilidade de modelagem e de modificações no projeto, com a utilização de *softwares* de modelagem digitais.

Embora os sistemas de proporção clássicos tenham caído em completo desuso, recentemente, têm surgido um novo tipo de sistema de geração da forma que apresenta ênfase nas regras de composição e não no produto final. Esses sistemas são conhecidos como sistemas generativos. Um exemplo de sistema generativo é a *shape- grammar* (gramática da forma), desenvolvida por Stiny e Gips em 1970, que, além de servir como sistema de geração de novas formas arquitetônicas, tem sido também aplicado à análise da arquitetura (CELANI, 2003, p. 15,18).

Embora sua utilização não esteja restrita a ferramentas digitais, os sistemas generativos encontraram no computador um parceiro ideal para gerar, automaticamente, uma grande quantidade de soluções em forma de

representações digitais, permitindo uma avaliação antes de sua produção final ou a escolha da solução que melhor atenda aos anseios do arquiteto.

Enquanto, no processo tradicional, o designer atua diretamente no processo de criação do produto, no sistema generativo, o papel principal do designer é criar regras que possibilitem gerar uma grande quantidade de produtos a serem utilizados na escolha do produto final. Podemos, portanto, vislumbrar o grande potencial do sistema generativo na criação e no desenvolvimento de formas arquitetônicas. Por meio da figura 7, no diagrama de Fischer e Herr, podemos comparar o processo tradicional de projeto com o processo generativo

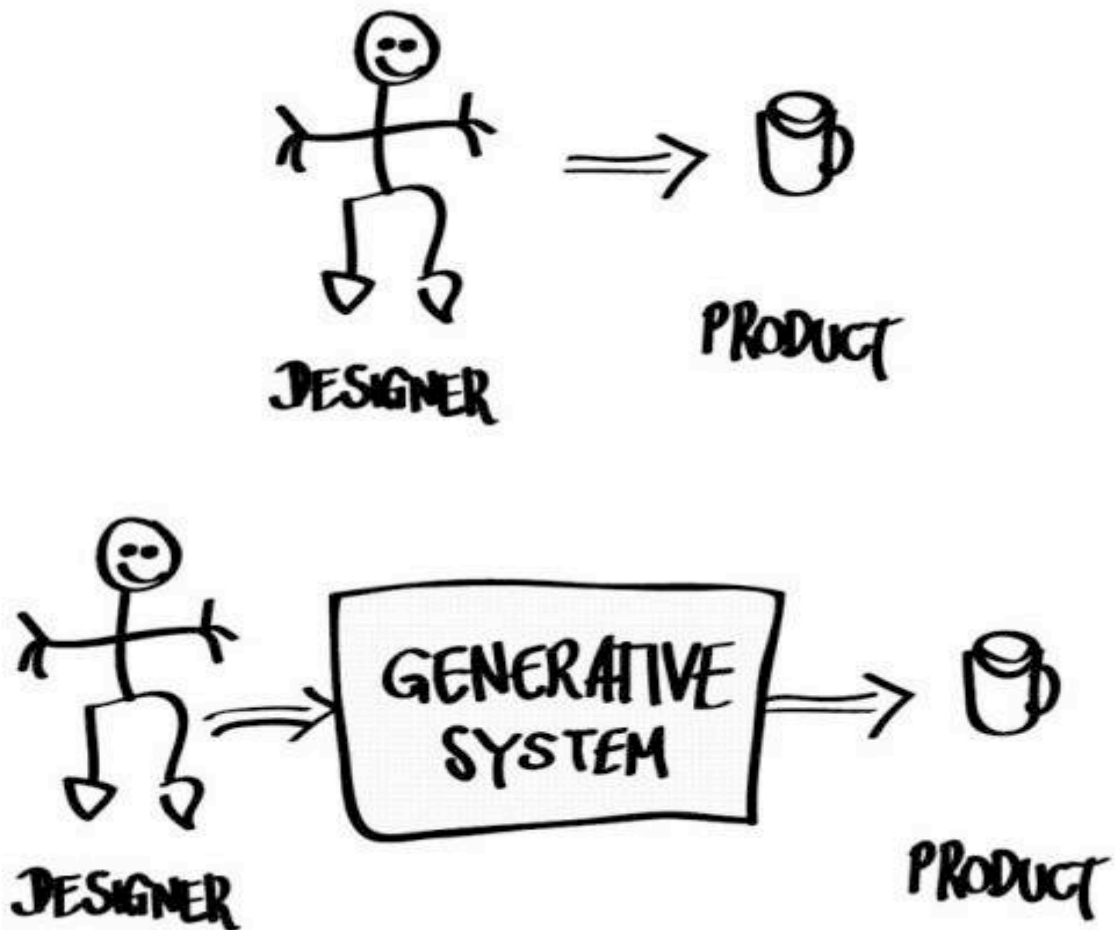


Figura 7: Diagrama de Fischer e Herr
Fonte: Vitruvius, 2016

Os *softwares* gráficos também possibilitaram maior liberdade para os arquitetos na concepção de geometrias complexas, além de contribuir para a melhoria da forma de representar a arquitetura. “A facilidade de manipular e

produzir modelos com tipologias complexas e formas orgânicas veio estimular a busca por novos formalismos arquitetônicos” (ORCIUOLI, 2009, p. 31).

Percebe-se que, ao se explorarem as formas complexas em projetos de arquitetura com o uso do computador, possibilita-se que elas sejam conduzidas, testadas e executadas fielmente, de acordo com o projeto concebido, além de facilitar seu entendimento e desenvolvimento pelos próprios projetistas.

Observa-se, na figura 8, que elementos construtivos com dimensões e formas diferentes podem ser montadas em um sítio de forma simples e direta.



Figura 8: **Peças metálicas da obra da Clínica Lou Ruvo em Cleveland**
Fonte: LIFSON, 2009

A figura acima demonstra que as peças dessa construção têm tamanhos e formas diferentes; No entanto, fazem parte de uma única obra, e isso só foi possível devido à transmissão de informações das peças diretamente do computador para a máquina que as produziu. Com isso, cabe ao construtor, apenas, a montagem das peças, sem se preocupar com a respectiva execução. Isso agiliza e torna o processo muito mais direto e isento de erros.

Na figura 9, vemos um portão executado com peças diferentes, cuja customização foi feita em máquina controlada numericamente pelo computador.

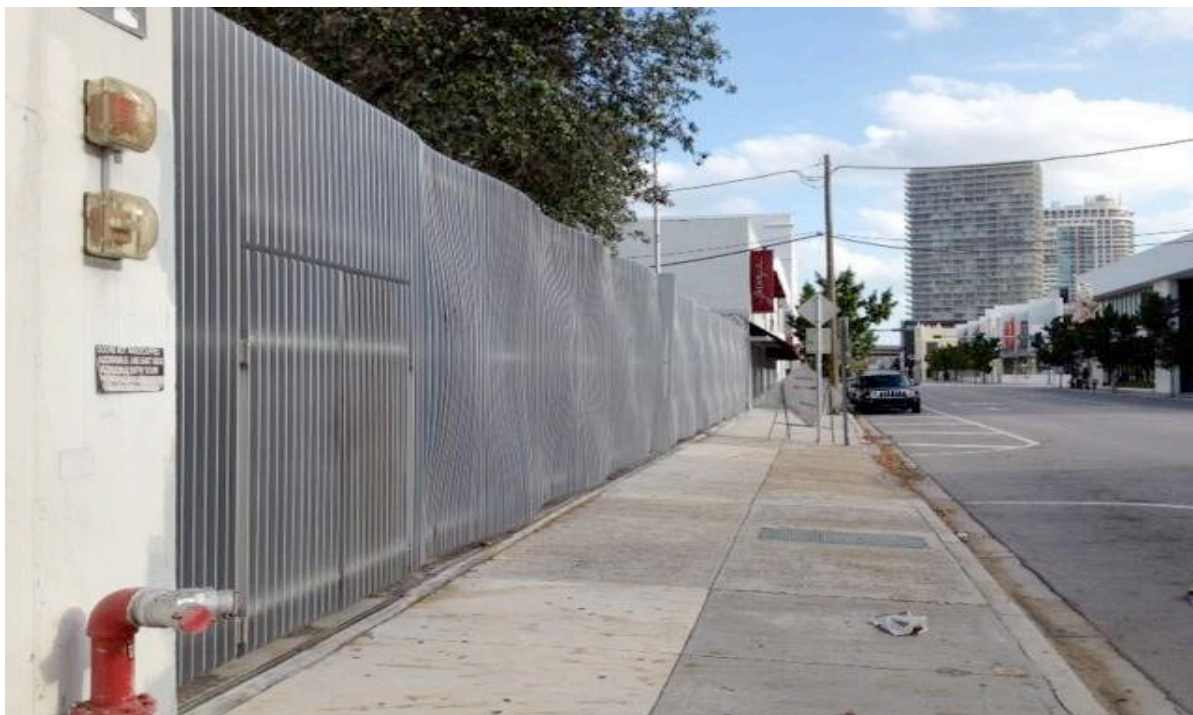


Figura 9: **Portão da Escola de Design e Arquitetura em Miami**
Fonte: Acervo do pesquisador, 2014

Os princípios de produção de componentes construtivos seriais, provenientes de conceitos da revolução industrial e utilizados amplamente pelos modernistas, tinham como principal objetivo reduzir os custos das construções para atender a uma demanda crescente. No entanto, aquela padronização e repetição de soluções formais não é mais essencial para que o projeto arquitetônico se torne economicamente viável nos dias atuais, nem tampouco mais ágil que processo gerado por elementos diferenciados entre si.

Esses projetos, para serem economicamente viáveis, precisam que peças específicas sejam produzidas, permitindo que a montagem, por sua vez, ocorra no local da obra, por meio da numeração de cada uma das peças, do código de barras e/ou do uso de GPS, conforme cada caso específico.

A figura 10 apresenta uma edificação na qual foi utilizada a locação de pilares e de vigas por GPS. Devido à complexidade e à variação das formas, os componentes estruturais foram produzidos, numerados e depois localizados com a utilização de GPS, tanto na base quanto na parte superior dos elementos, possibilitando que o resultado final se aproximasse muito do projeto desenvolvido.



Figura 10: **Estádio Nacional de Pequim**

Fonte: Al Hilal, 2007

Mesmo com a tecnologia de projeção e de fabricação digital, utilizada na indústria naval, na aeronáutica e na automobilística, inspirando a construção civil, essa última é a menos desenvolvida entre as demais. Na atualidade, observa-se, por exemplo, que a indústria naval quase que eliminou os desenhos manuais no processo de projeção e na construção de navios, enquanto que na construção civil, as mudanças “têm proporções bem menores” (KOLAREVIC, 2003).

A figura 11 mostra uma peça criada pela indústria automobilística com a utilização de máquinas controladas numericamente por computadores. Essa peça tem um alto grau de qualidade e de precisão, o que seria impossível de fazer de forma tão meticulosa por meios manuais, além de sua repetição ser inviabilizada.



Figura 11: Peça criada para automóveis Toyota utilizando máquinas CNC
Fonte: Toyota, 2012

Segundo o III Inventário do Parque de Máquinas para Corte e Conformação de Metais, elaborado entre 2006 e 2008, o número de equipamentos globais manuais cresceu 2,7% e o das máquinas do tipo CNC, 44,7% (SILVA, 2009). Isso demonstra que o mercado dessas máquinas está em plena expansão.

Nesse contexto, a situação dos arquitetos é complexa, no que se refere ao processo de projetar e de refletir sobre os projetos, diante de transformações cada vez mais rápidas. Com o advento da tecnologia, a postura do arquiteto, frente ao projeto e a seu processo, tem sofrido mudanças importantes, pois as ferramentas digitais deixaram de ser apenas formas de representação de um projeto para se tornar ferramentas de análise e de troca entre criatura e criador.

Se, de alguma forma, algo é eficiente, nos dias atuais ele pode tornar-se obsoleto ou até mesmo transformar-se em problema em um futuro próximo. O arquiteto está gerando abrangências maiores e recriando o futuro em sua área.

Podemos citar como exemplo de inovação tecnológica, o desenvolvimento automobilístico que facilitou muito a locomoção da população mundial, mas gerou outros problemas, como o aumento da poluição,

engarramentos e acidentes. Esse exemplo tenta ilustrar a questão levantada anteriormente em relação à eficiência de algo nos dias atuais e seus desdobramentos futuros (ou sua própria contrapartida).

Na figura 12, apresentamos um protótipo da estrutura de um navio, criado pela indústria naval. Nesse protótipo, foram utilizadas as máquinas CNC para criar as estruturas que foram montadas posteriormente.



Figura 12: **Protótipo da estrutura de um navio**
Fonte: Design News, 2012

Esse exemplo de fabricação por meio de CNC, com modelagem rápida de inúmeros detalhes do objeto e com grande precisão, “demonstra as razões pelas quais essa tecnologia vem sendo usada em ampla escala pelas indústrias naval, aeronáutica, automobilística” (KOLAREVIC, 2003, p. 9).

Com a transmissão direta de informações sobre o modelo tridimensional para as máquinas, problemas de interpretação errônea são eliminados, além de permitir maior precisão. Podemos citar exemplos de vários projetos que utilizam esse processo. A figura 13, demonstra os esquemas de corte, aproveitando da melhor maneira os objetos a serem gerados pelas máquinas CNC.

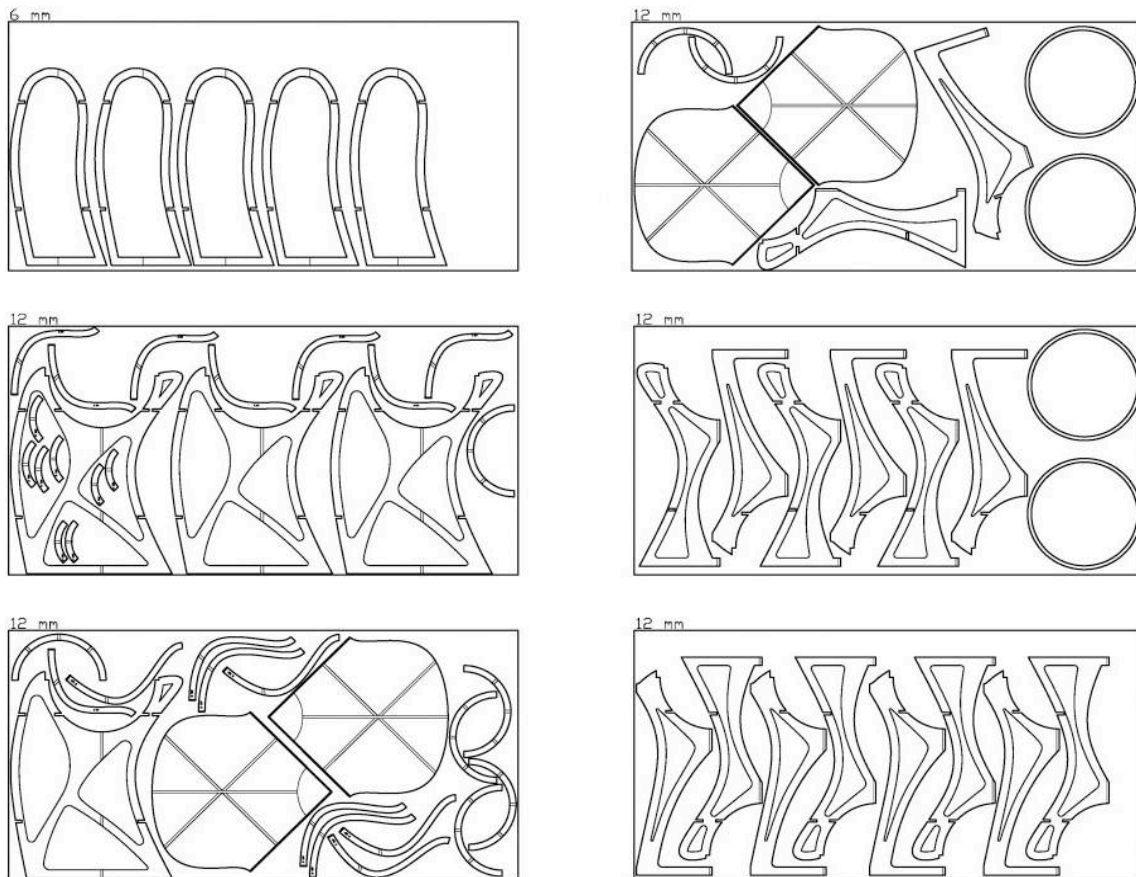


Figura 13: **Esquema de cortes para CNC router**
 Fonte: Architecture, 2012

Em meio à dinâmica destas inovações tecnológicas, tem sido crescente a exigência dos clientes e arquitetos de requisitarem um projeto arquitetônico diferente. Isso talvez se explique porque é inerente à natureza humana o desejo de diferenciar-se dos demais, de possuir exclusividade em determinados aspectos que possam, de certa forma, torná-lo distinto.

Pode-se dizer que, quando somados à aplicação da pré-fabricação dos componentes, os preceitos do racionalismo moderno e da produção em série passaram a se considerados uma estratégia essencial para a solução do problema do déficit habitacional, por exemplo, tanto em países desenvolvidos, quanto em países pobres. Esse reconhecimento se deve ao fato de essas práticas permitirem produzir um grande número de unidades habitacionais a um custo baixo e em um espaço de tempo mais curto. Porém, paralelamente aos benefícios da rapidez e do baixo custo de construção, essa alternativa tem a desvantagem da repetição em larga escala, o que concor para custos adicionais de estocagem e de influência na elaboração de projetos futuros, com dimensões e características

desses materiais. Em resumo, tais soluções “nem sempre atendem de forma satisfatória às necessidades específicas dos usuários e aos aspectos geográficos e ao conforto ambiental, por exemplo” (FELIX, 2011 p. 8).

Até a alta Idade Média o mestre construtor projetava e construía suas edificações. À medida que os arquitetos introduziram as representações ortográficas os mesmos foram se afastando do processo da construção e ficaram responsáveis apenas pela projeção arquitetônica. Nos dias atuais a representação em duas dimensões vêm sendo gradativamente substituída pelas modelagens tridimensionais, que permitem por sua vez a fabricação digital direta dos objetos arquitetônicos (CORSER, 2010, p.66).

Com a limitação da tecnologia, o desenvolvimento de formas complexas é representado de modo não tão fácil, como também não é entendido por meio de geometrias euclidianas. Esse modo de representação, quando transmitido aos fabricantes, torna tais formas inviáveis economicamente, já que têm de ser fabricadas a mão. Porém, com a utilização de computadores e de máquinas CNC, as informações podem ser transmitidas diretamente do modelo para o produto (CORSER, 2010).

Esse autor afirma que o controle do projeto, perdido por anos, está retornando para os arquitetos que, no entanto, não têm a função de mestre construtor, como Brunelleschi o foi há 500 anos. O controle do processo retorna por meio da integração, do trabalho colaborativo entre os diferentes profissionais de uma mesma equipe e pela integração de ferramentas computacionais.

2.2 HISTÓRIA DOS MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Foi a Revolução Industrial que possibilitou mudanças profundas para a produção do espaço edificado, com a utilização de novos métodos e materiais de construção de funções, de tamanhos e de formas inviáveis até então. Por ex.: o uso de concreto armado em construção de grandes vãos tornou-se possível.

A industrialização transformou o padrão de vida e levou à proliferação de novos edifícios sem precedentes. Naquela época, também havia um deslocamento econômico da igreja para a burguesia, como tentativa de resolver problemas da nova classe média emergente. Outro aspecto do mito progressista por trás da concepção da arquitetura era a crença em uma sociedade justa e racional. O

pensamento arquitetônico estava preocupado com a possibilidade de criar formas que não fossem *pastiches* de estilos passados, mas expressões genuínas do presente. Desse modo, uma nova gama de representações implicava uma série diferente de atitudes em relação às formas.

2.2.1 Revolução Industrial: impacto na arquitetura moderna

A Revolução Industrial teve início no século XVIII, na Inglaterra, com a mecanização dos sistemas de produção. Enquanto na Idade Média o artesanato era a forma de produzir mais utilizada, na Idade Moderna a burguesia industrial, ávida por maiores lucros, menores custos e produção acelerada, buscou alternativas para melhorar a produção de mercadorias. Também podemos apontar o crescimento populacional, que trouxe maior demanda de produtos e mercadorias (HOBBSAWM, 2004, p. 51).

No entanto, essa Revolução causou a repetitividade de soluções arquitetônicas, para atender as necessidades de habitação de um maior número de trabalhadores urbanos. A partir do movimento moderno, no início do século XX, a utilização de pré-fabricados foi incorporada à arquitetura, acentuando a serialização. Isso resultou, em alguns casos, na redução dos custos decorrentes da produção em massa, baseada nos conceitos da industrialização dos métodos construtivos, e na limitação do processo criativo na arquitetura, devido à utilização de elementos iguais serializados.

A transição do trabalho artesanal para o mecanizado foi o que os arquitetos modernistas desejavam ao longo do século XX. Muitos dos arquitetos renomados do século XX perseguiram este sonho de produção mecanizada. O objetivo era fazer de algumas arquiteturas, especialmente habitações, um produto para ser consumido pelas massas (KIERAN; TIMBERLAKE, 2003, p. 5).

Verificamos, na citação acima, uma tentativa dos arquitetos modernos de difundir um estilo de arquitetura baseada na repetição e peças pré-fabricadas que, de certa forma, reduziriam os custos da construção da época, tornando-a mais acessível a todos.

Timberlake (2003) considera que uma das consequências “mais devastadoras do modernismo” é a forma separação entre o projetista e os construtores. Porém, a indústria automobilística, a naval ou a aeronáutica buscaram uma forma de integrar o projeto à construção. Essas indústrias foram marcadas por uma aproximação cada vez maior entre elas. Além disso, a produção em massa de elementos arquitetônicos se desenvolveu durante a Segunda Guerra

Mundial visando atender à necessidade crescente destes artefatos.

O problema fundamental da produção em massa na arquitetura foi e continua sendo nos dias atuais a falta de apelo à produção em série. A produção em massa na arquitetura desenvolveu-se durante a Segunda Guerra Mundial para atender uma demanda crescente por parte da população (TIMBERLAKE, 2003, p. 113).

A figura 14 representa um exemplo da construção no século XVIII, pois utilizou-se de estruturas metálicas, permitindo vãos maiores e colunas mais esbeltas. Essa tipologia contribuiu para uma nova linguagem arquitetônica com os ideários industriais e tecnologia da época.



Figura 14: **Fachada do Palácio de Cristal em Londres**
Fonte: EFE, 2009.

O Palácio de Cristal de Joseph Paxton, de 1851, demonstra como o desenvolvimento tecnológico influencia a forma pela qual podemos elaborar a arquitetura. A fachada em metal e vidro revolucionou a arquitetura da época, permitindo modificações profundas na projeção e na fabricação. Essa edificação foi construída em oito dias e consistia em uma enorme galeria envidraçada ortogonal em três níveis, idêntica a uma grande estufa. “O palácio de Cristal de Joseph Paxton foi uma edificação ousada para seu tempo, consistindo em exemplo do espírito tecnológico da Revolução Industrial” (KOLAREVIC, 2003, p. 3)

A utilização de uma estrutura metálica e de vidro nesse projeto foi um marco para a construção da época e serviu de referência para uma produção em massa posterior. Trata-se de um exemplo adequado de utilização dos recursos tecnológicos de sua época. Outro exemplo de edificação que se utilizou da tecnologia em sua concepção e construção é a Torre Eiffel, de 1889. Ao lançar mão de uma estrutura treliçada de ferro, o arquiteto atingiu a marca de 324 metros de altura, e a construção se tornou a mais alta do mundo por muitos anos.

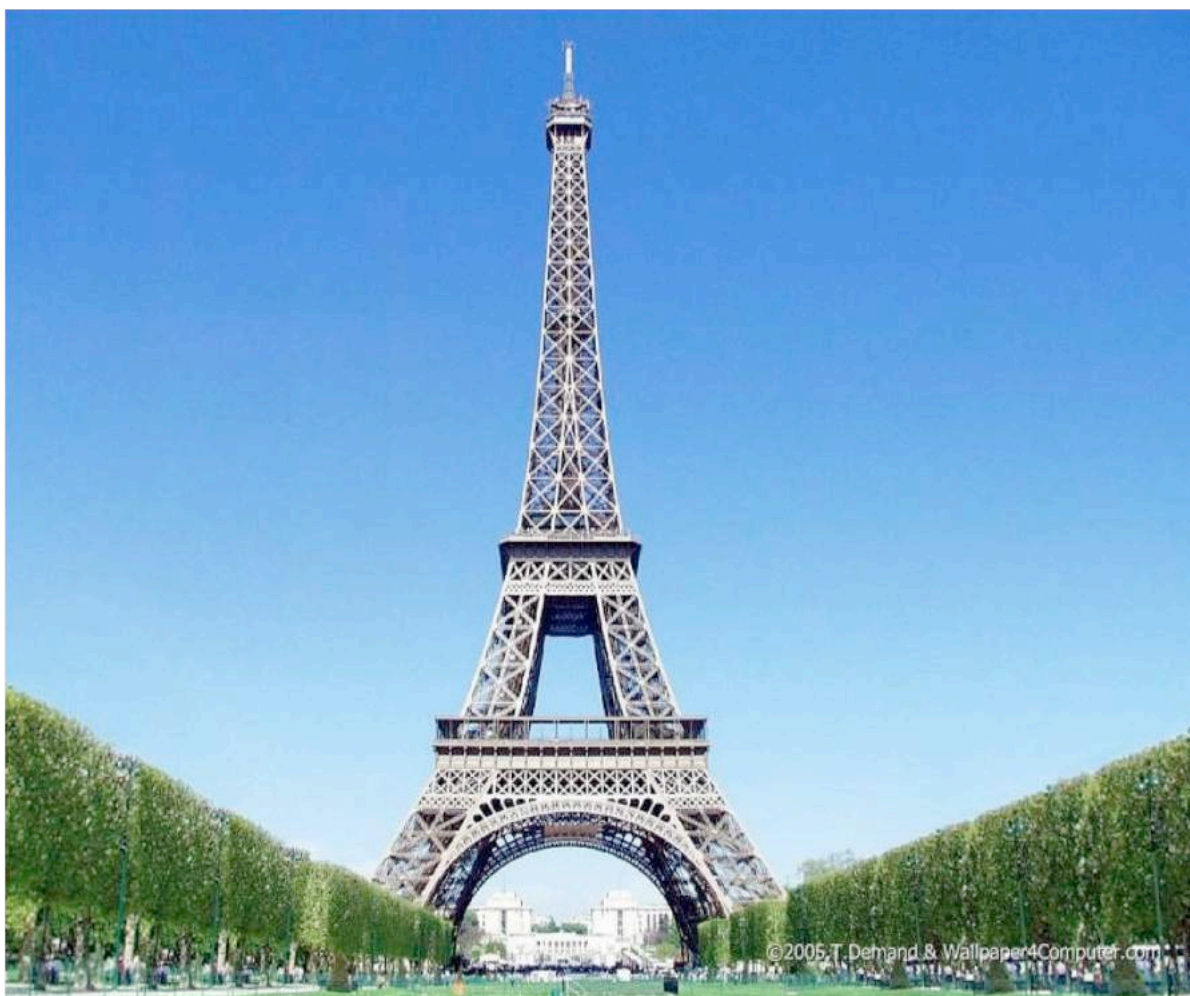


Figura 15: **Torre Eiffel**
Fonte: Wallpaper, 2011

A estrutura metálica dessa obra também serviu de exemplo de como o sistema estrutural e de fabricação pôde redefinir a arquitetura. Atualmente, o ferro sofreu uma série de mudanças, tanto em sua maneira de aplicação, quanto em sua estrutura física molecular. Segundo Kolarevic (2003, p. 3), “a torre Eiffel conseguiu introduzir na arquitetura, edificações com altura até então inexistentes e inimagináveis e isto só foi possível devido aos avanços tecnológicos da época.”

Na história da humanidade, as construções em altura marcaram época, no que se refere ao desenvolvimento de técnicas construtivas e ao poder econômico dos países. Ao longo dos anos, elas representaram desenvolvimento tecnológico, *status*, e supremacia econômica, como se a altura das construções demonstrasse a grandiosidade das nações. A Torre Eiffel retrata uma dessas épocas, representando o desenvolvimento do governo francês e uma forma de mostrar ao mundo o poderio do país em meio à Revolução Industrial.

Para Kolarevic (2003, p. 5), tal como no passado, mesmo de forma incipiente (como já dito), arquitetos atuais vêm explorando as últimas tecnologias para “conceituar, produzir e gerar as suas formas cada vez mais complexas e curvilíneas.” Essas evidências tentam demonstrar, de certa forma, a importância dos meios e dos métodos de produção em cada época, bem como sua relação direta com as construções e sua evolução tecnológica. “Através das imagens anteriores, observamos que o desenvolvimento de novas formas de construção, assim como a utilização de novos materiais, sempre teve papel significativo no surgimento de novas linguagens arquitetônicas” (FRAMPTON, 2015, p. 341).

A reciprocidade entre concepção e construção ainda não ocorre totalmente na era digital, porque a capacidade de produção e a viabilidade dos processos de fabricação digital limitam os arquitetos quanto a projetarem especificamente para algumas máquinas.

Vemos que algumas estruturas provenientes de processos computacionais só podem ser construídas e desenvolvidas com a fabricação digital. Na figura 16, as estruturas foram realizadas diretamente por máquinas CNC, portanto, com precisão das curvas.



Figura 16: BMW Exhibition for Expo 2000
Fonte: Franken- architekten, 2013

Os arquitetos, conseqüentemente, estão ficando cada vez mais envolvidos com o processo de fabricação e construção, criando informações que vão diretamente do computador para a máquina do fabricante.

2.2.2 Movimento moderno

O Movimento Moderno iniciou com a proposta do *Arts and Crafts* que ocorreu, principalmente, na Inglaterra, na segunda metade do século XIX. Contrário à industrialização, o objetivo do *Arts* era retomar a arte e o ofício artesanal. William Morris foi um de seus principais difusores (KOOP, 1990).

Uma expressão que sintetiza o pensamento do movimento moderno está na frase de Henry Ford: “*one size fits all*” (TIMBERLAKE, 2003, p.135). Essa frase reflete uma época na história na qual um único modelo de produto era usado para atender a necessidade de todos de forma viável economicamente. A indústria Ford, com esse princípio, procurava atender a todos com um único produto, ou seja, fazia uso da produção em massa. Isso conduziu a arquitetura à estereotipia, ao destacar um padrão de necessidades e de aspirações genéricas.

O questionamento sobre esse tipo de produção, o desenvolvimento da indústria, principalmente na Alemanha, e o término da Primeira Guerra Mundial resultaram reformularam os valores da sociedade. Os artistas foram em busca de novas técnicas e teorias na arquitetura e nas demais artes.

A arquitetura moderna se baseou nos princípios contidos na Carta de Atenas, de 1933, tais como a falta de ornamentos, formas retilíneas e retangulares, coberturas planas, paredes brancas e amplas janelas. Não havia consenso quanto a esses princípios, mas observava-se a presença deles, por ex., em muitos projetos modernistas difundidos pela Bauhaus (NUTTGENS, 1992).

As abordagens da Carta de Atenas, em sua maioria desenvolvidas pelo arquiteto franco-suíço Le Corbusier, doutrinaram uma geração, difusora de seus conhecimentos, e influenciaram decisivamente a arquitetura brasileira até hoje.

[...] esses princípios foram incorporados e rompeu-se com a ornamentação, procurando dar valor estético à estrutura e igualmente fazendo com que todas as fachadas fossem tornadas relevantes ao projeto. As obras passaram a apresentar forma cúbica e o expectador teve a oportunidade de apreendê-la de uma só vez (CARPINTERO, 2007, p. 213, 222).

A fachada pré-moderna é, essencialmente, um muro com aberturas. A fachada tradicional desempenhava um importante papel, representativo de complexidade, em relação às primeiras fachadas de vidro modernistas.

Peter Behrens (apud CARPINTEIRO, 2007, p. 213, 222), por volta de 1908, “pioneiro na utilização desses recursos em seu projeto para a Fábrica AEG, utilizou o tema industrial, dando função ao projeto e adotando as formas geométricas. Adotou fachada de vidro, iniciando uma tendência” .

Esse meio de projeção usava elementos industrializados, provenientes de avanços da Revolução Industrial, segundo a qual o produto precisava ser desenvolvido em larga escala pela indústria para atender a demandas crescentes da população. Portanto, o processo precisava ser mecanizado para isso ocorrer.

Walter Gropius, contrário ao Movimento *Arts and Crafts*, defendeu a industrialização e a standardização nas artes e na arquitetura. Sob a influência de Peter Behrens, associou princípios cubistas de geometrização a princípios da funcionalidade e do racionalismo. Na escola Bauhaus, incentivou a produção industrial, direcionada à funcionalidade, “mas com qualidade” (CARPINTEIRO,

2007). Ele se preocupou com a pré-fabricação na arquitetura, mas, certamente, não imaginou que a industrialização dos elementos construtivos chegassem ao nível visto hoje nas indústrias automobilística, naval e aeronáutica.

Na figura 17, comparam-se dois marcos da arquitetura industrial, tendo o segundo uma ornamentação reduzida, sem referência ao passado. Priorizaram-se o volume e os planos em detrimento do aspecto da massa.



Figura 17: **Fábrica de Turbinas AEG; Fábrica Fagus**
Fonte: Coisas da arquitetura, 2011

Nessa figura, colocam-se lado a lado os trabalhos de Peter Behrens e de Walter Gropius. Nesse, vê-se a menor valorização das superfícies opacas, ao retirar-se paredes sem abertura nos cantos, dando uma maior leveza volumétrica.

As geometrias propostas pelo movimento modernista (sec.XX) foram impulsionadas pelos paradigmas fordistas de produção industrial, e a construção civil teve influência da lógica de pré-fabricação, padronização e instalação no local. A figura 18 representa uma edificação do modernismo com formas complexas, que não podem utilizar estruturas convencionais durante sua execução. Essa edificação, de certa forma, está distanciada do discurso modernista da época. Apesar de ter sido produzida naquele momento, não segue o ideário massivamente difundido entre os arquitetos.

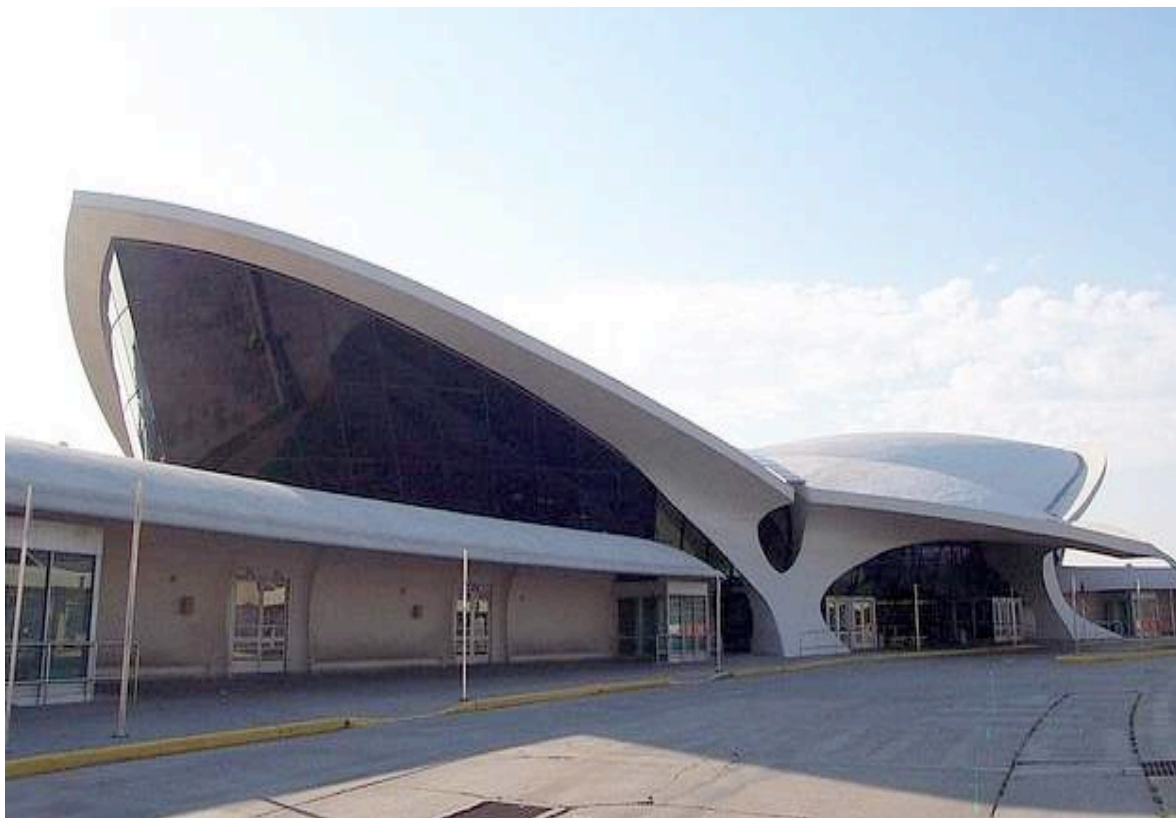


Figura 18: **Terminal TWA**
Fonte: Cambridge, 2000

Apesar das dificuldades construtivas das formas do Terminal TWA, como alto custo e mão de obra, o edifício foi construído entre 1955 e 1962.

A arquitetura está se enriquecendo e diversificando no que diz respeito às formas, desde a utilização de materiais, passando pelas estruturas e até mesmo os componentes. Estas variações são possíveis à medida em que pode-se projetar elementos de forma rápida e precisa com [...] computadores (GRAMAZIO, 2008, p.9).

A arquitetura moderna estava, de certa forma, associada a questões econômicas; as edificações deveriam ser economicamente viáveis. No entanto, o legado da arquitetura moderna, em sua maioria, foi uma linguagem isenta de austeridade formal, da rigidez nos modos de se estabelecer dentro dos critérios de composição e, sobretudo, a utilização de elementos pré-fabricados feitos em série.

2.3 EVOLUÇÃO DO PAPEL DO ARQUITETO

A ideia de mestre construtor tem mais de cinco mil anos. Os gregos davam a ele o nome de ἀρχιτέκτων (*architekton*); dos romanos derivou o nome latino *architectus*. Mas ambas as palavras tinham significavam mestre construtor, pessoa responsável pela criação e pela construção de um objeto arquitetônico.

As edificações medievais eram projetadas e produzidas em pedra pelo mestre de obras que desempenhavam o papel de arquiteto, pedreiro, administrador de materiais e de pessoal e que trabalhavam o dia inteiro no canteiro de obras. Deve-se ressaltar que o mestre de obras utilizava conhecimentos e limitações existentes na época relacionados às construções com pedras. O avanço da arquitetura estava diretamente ligado à indústria da construção (KOLAREVIC, 2003, p. 57).

A figura 19 mostra o trabalho de um mestre artesão envolvido em todo o processo da construção da obra, da criação e projeto até a execução.

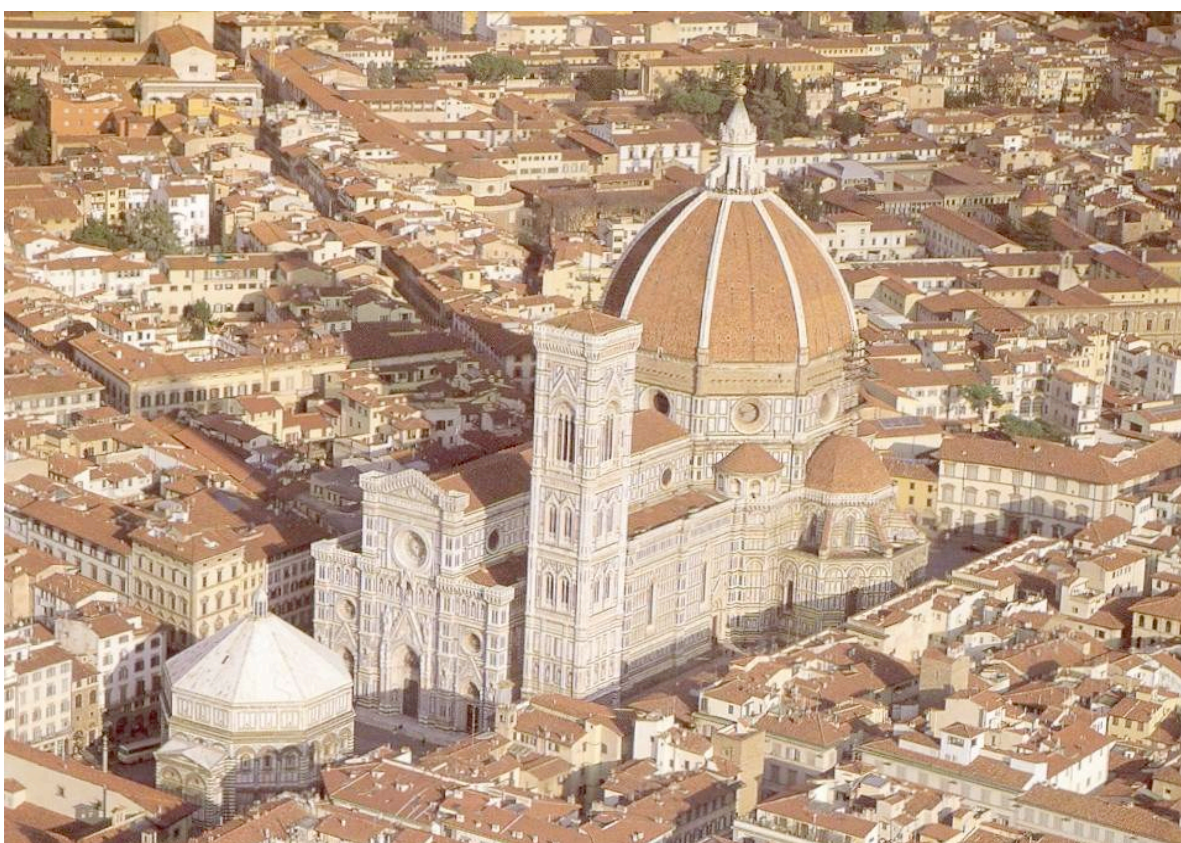


Figura 19: **Santa Maria del Fiore em Florença**
Fonte: Visititaly, 2012

A cúpula da Catedral de Brunelleschi, na figura 19, é um trabalho da época da Renascença. Brunelleschi, além de projetar o cúpula, foi responsável pela escolha de materiais como também pela construção em si.

Nas sociedades tradicionais o construtor combinava as funções de criação e construção que atualmente costumam ser exercidas por profissões diferentes. A palavra arquiteto no século XVIII não tinha o mesmo significado dos dias atuais, mas de alguém que detinha responsabilidades por todo o processo de edificação, desde a criação até a construção (DAVIS, 2006, p.108).

Na atualidade, há poucos arquitetos com o conceito de mestre construtor, ou seja, envolvidos em todos os contextos da construção, desde os materiais até as técnicas específicas da obra. Citam-se como exemplos desses arquitetos Frank Lloyd Wright e Bernanrd Maybeck (CHRISTOPHER, 1981). A figura 20 mostra um dos trabalhos realizados por Wright em 1936. Nessa edificação, foram utilizados materiais naturais brutos, como pedras, e o arquiteto envolveu-se nos vários processos da obra: estrutura, materiais, projeto e até a



construção, mesmo havendo um engenheiro envolvido nessa etapa.

Figura 20: **Casa da cascata na Pensilvânia**

Fonte: A percepção do mundo, 2011

O envolvimento técnico construtivo dos mestres construtores foi deixando de ser relevante para o arquiteto dos dias atuais, na medida em que ele se limita, na maioria das vezes, a representações gráficas que, posteriormente, serão construídas por outro profissional. Esse afastamento aparece como vantagem para o arquiteto, mas pode gerar vários problemas, como má execução e erros provenientes da má interpretação de seu trabalho.

O uso do desenho na arquitetura está associado às transformações culturais e sociais. Através da utilização de desenhos ortográficos para transmitir orientações ao canteiro de obras no qual não precisava mais estar fisicamente presente, o arquiteto distanciou-se gradativamente do processo construtivo, o que possibilitou ter vários projetos ao mesmo tempo (ROBBINS, 1994, p.10,16).

Porém, o conceito de mestre construtor da era medieval vem sendo retomado com uma maior aproximação da obra pelo arquiteto, por meio de uma arquitetura concebida e desenvolvida por meio de processos de fabricação digital.

Dessa forma, começa-se a reconectar o projeto ao processo de construção, diminuindo, portanto, custos, tempo a ser gasto na execução da obra, além de evitar erros e inconsistências provenientes de interpretação errônea.

2.3.1 Precusores de formas complexas

De acordo com Kolarevic (2003), durante séculos, a forma de pensar dos arquitetos se baseava em raciocínios euclidianos e platônicos, especialmente no que se referia à utilização das primitivas geométricas tridimensionais. As formas complexas são geometrias de curvas e de superfícies contínuas.

As formas possuem características e propriedades que as distinguem, podendo ainda se agregar a elas qualidades e virtudes que buscam atingir os reconhecidos padrões de beleza ou que as afastam deles. Portanto, a complexidade das formas talvez reflita os novos paradigmas da sociedade atual.

As formas complexas estão presentes num passado remoto das criações humanas, assim como na irregularidade das formas naturais. [...] podem ser localizadas na arquitetura gótica como também ser identificadas em diversas instâncias de outros estilos de arquitetura, como no art nouveau, arts and crafts [...] organicismo americano e no modernismo (SHODEK, 2005, p. 47).

A figura 21 ilustra a complexidade das formas em uma edificação gótica. As razões de uso das formas curvas complexas na arquitetura variam muito. Na contemporaneidade, elas se encontram porque os pensamentos são inconstantes, complexamente desenvolvidos e não se submetem a padrões preestabelecidos.

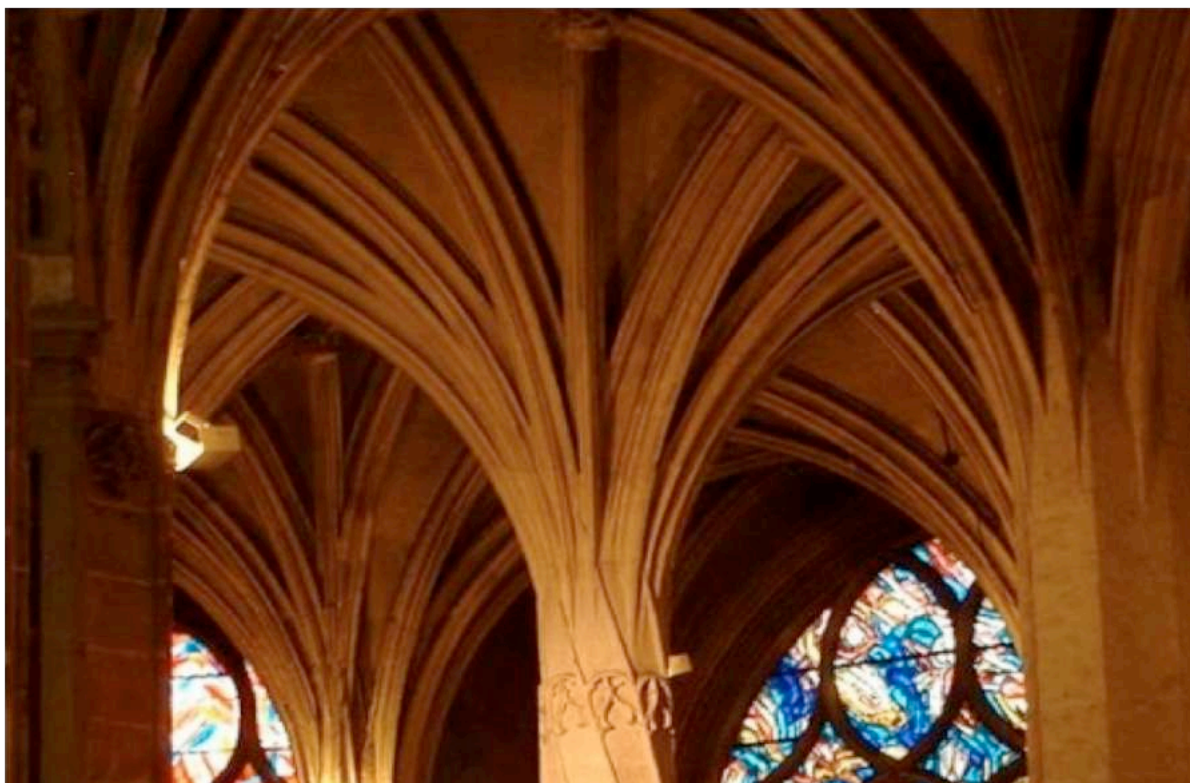


Figura 21: Interior da Igreja de Saint-Séverin
Fonte: Flickr, 2012

Com os sistemas digitais de projeção, alguns dos obstáculos históricos de representação e de execução das formas complexas deixaram de existir. Nos dias de hoje, os ambientes virtuais, nos quais são encontradas essas curvas complexas, são baseados em sofisticadas fórmulas matemáticas de curvatura, conforme explica Shodek (2005).

Formas complexas e curvilíneas são produzidas de forma simples e rapidamente com o auxílio das ferramentas computacionais. Porém, não se trata de formas novas, uma vez que sua presença pode ser observada no passado, em várias circunstâncias. O que se destaca aqui é a facilidade da respectiva produção com as ferramentas computacionais disponíveis (KOLAREVIC, 2003).

A figura 22 mostra outro exemplo, também de 2003, apresentado por Kolarevic, sob o argumento de que essas formas complexas não são novas, pois já foram produzidas em outras épocas, como nesta estação de metrô de Hector Guimard em 1900. Nesta figura, pode-se observar as formas curvas que marcam as estruturas metálicas e a cobertura. O desenvolvimento da estrutura metálica permitiu a criação das formas orgânicas.



Figura 22: **Entrada da estação de Montmartre**
Fonte: Avenue, 2012

A possibilidade de utilizar as tecnologias digitais em todo o processo de um projeto de arquitetura, desde a concepção até a fabricação, permite que as técnicas contemporâneas possam operar entre escalas, preservando a complexidade das formas em todos os níveis de projeção.

Isso é possível porque se pode trabalhar com detalhes menores dentro do projeto como um todo, preservando as características reais do objeto a ser produzido. As ferramentas digitais permitem um desenvolvimento mais minucioso, preciso e coerente do trabalho.

Esses ambientes têm um potencial de produzir efeitos inesperados sobre o arquiteto, em relação a suas intenções iniciais, os quais podem ser tanto no método construtivo quanto na forma.

Diante dessa evolução contínua e inevitável, bem como dos programas que surgem, criados pela insistência no progresso, o arquiteto vem concebendo, através dos tempos, o seu projeto: frio e monótono ou sublime e encantador, conforme seu temperamento e sensibilidade. Para alguns, é a função que o determina, para outros, inclui a beleza, a fantasia, a surpresa arquitetural que constitui, para mim, a própria arquitetura (NIEMEYER, 2005, p.8).

Nessa citação, Niemeyer tenta demonstrar algumas funções da arquitetura, ao tratar da surpresa arquitetural como uma das funções relevantes na própria arquitetura. Esse argumento tenta demonstrar que a estética também pode ser uma função arquitetônica ou, até mesmo, a mais importante delas.

Às vezes, revoltava-me contra tanta insensibilidade, respondendo aos mais complexados que formalista era a arquitetura purista que propunham, pois antes de elaborada já a esperávamos nos seus eternos cubos de vidro, o que para mim constitui formalismo absoluto, considerando que os programas construtivos sugerem, muitas vezes, soluções recortadas e inovadoras (NIEMEYER, 2005, p.36).

As formas complexas utilizadas nos dias atuais por alguns arquitetos contemporâneos renomados não são inteiramente novidade na arquitetura. Apesar da facilidade de visualização e de representação dessas geometrias, por meio da utilização de ferramentas computacionais, observamos a semelhança com várias obras do passado, como se verifica no exemplo de algumas figuras apresentadas.

Já no movimento barroco, os arquitetos tentaram desenvolver formas diferentes dos eixos cartesianos, apesar de elas terem uma representação muito difícil através de projeções ortográficas. “As formas provenientes de geometrias complexas e curvas na arquitetura têm precedentes nas formas curvilíneas da estação de metrô de Paris, de Hector Guimard, e nos trabalhos do arquiteto catalão Antonio Gaudí” (KOLAREVIC, 2003, p. 5).

Essa arquitetura complexa é observada em projetos de arquitetos como Erich Mendelsohn, Le Corbusier, Frank Lloyd Wright e Eero Saarinen, entre outros. Portanto, elas não se limitam à arquitetura proveniente de representações digitais.

Acredito que um grande equívoco acompanha os que se interessam pela arquitetura, aceitando com entusiasmo, nos antigos períodos o que, condicionados pelo funcionalismo, recusam na arquitetura contemporânea. E isso, como se a forma na arquitetura não constituísse um problema invariável, invariável e permanente, como a beleza, a proporção e a fantasia (NIEMEYER, 2005, p.51).

Para Niemeyer, a forma parece se restringir às ideias do funcionalismo. Mas, ao criarem beleza, ela tem uma das funções mais importantes na arquitetura.

Os artefatos foram fabricados artesanalmente em grande parte de nossa história. Isto necessitou uma grande utilização de energia humana. A transição do trabalho manual para a utilização de máquinas era um sonho modernista ao longo do século XX. Le Corbusier vislumbrava uma forma de atingir grandes massas através da utilização das máquinas na arquitetura, principalmente em casas (TIMBERLAKE, 2203, p. 5,7).

O objetivo da arquitetura moderna era atender a demanda crescente por moradia durante o século XX. Para tanto, um processo mecanizado iria facilitar o processo. A figura 23 representa um dos trabalhos de Le Corbusier que, de certa forma, rompeu os princípios de modernidade e do funcionalismo. “A Capela tem formas complexas que lembram um crustáceo” (FRAMPTON, 2003, p. 275). Mesmo Le Corbusier, que praticamente instaurou os princípios mais cruciais do modernismo, não o seguiu indistintamente com as curvas da Ronchamp, em 1955.



Figura 23: **Ronchamp de Le Corbusier**
Fonte: Galinsky, 2011

Essa obra constitui uma das formas complexas produzidas por Le Corbusier, distanciando-se dos princípios defendidos pelo movimento moderno e pela Carta de Atenas (como já dito). Niemeyer (2005, p. 40) explicou: “Já não caminhávamos sozinhos. Os últimos projetos de Le Corbusier denunciam, como disse Ozenfant, um alheamento ostensivo ao ângulo reto que sempre defendera.”

As possibilidades e a concepção formal, permitidas com a utilização da tecnologia digital na produção arquitetônica, têm estimulado os arquitetos a buscarem novos caminhos, rompendo paradigmas no que se refere a metodologias tradicionais de projeção. O uso de geometrias não euclidianas, através de recursos computacionais, permite a construção de formas complexas livres de modo mais eficiente, rápido e simples.

Do ponto de vista computacional, as NURBS fornece representação eficiente de dados das formas geométricas, usando uma quantidade mínima de informações e relativamente poucos passos para modelar. Essa 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).

As *Non-Uniform Rational B-Spline* (NURBS) são equivalentes digitais de rascunhos *splines*, utilizados para desenhas curvas complexas. Podemos observar essas curvas complexas na superfícies de navios e na fuselagem de aviões.

Na atualidade, há uma arquitetura fértil, preocupada em ampliar as possibilidades de materiais e de produção da forma arquitetônica. Tal fertilidade está diretamente associada aos processos digitais de produção e de exploração de formas, desde seu desenvolvimento até a construção (IWAMOTO, 2009). Projetos arquitetônicos com formas cada vez mais complexas têm expandido o repertório de edificações no mundo todo, explorando novos materiais e formas de produção e de desenvolvimento dos projetos. O desenvolvimento tecnológico muda a forma com a qual o ser humano percebe a arquitetura e a arte, por meio de sua tectônica.

Frampton (1995) explica que a palavra “tectônica” é considerada a “poética da construção”, por seu capaz de associar os aspectos materiais da arquitetura a seus aspectos culturais e estéticos. Mas ele esclarece que a arquitetura elaborada com ferramentas digitais, com suas superfícies dinâmicas e com dupla curvatura não são iguais à tectônica tradicional.

As atividades criativas relacionadas à arquitetura vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, de acordo com os pensamentos relacionados à tectônica, à forma espacial de produção arquitetônica, suas inter-relações, materiais, junções, conexões, detalhes e estrutura. Por isso, a arquitetura tende a refletir técnicas e tecnologias da contemporaneidade (MITCHELL, 1995).

Apesar das abordagens diferentes da tectônica contemporânea em Frampton e em Mitchell, ressaltamos a utilização do computador como ferramenta de criação, de desenvolvimento e de interpretação das mudanças culturais de projetos arquitetônicos. Mesmo que formalmente as edificações mantenham-se inalteradas, a forma de pensar e de desenvolver arquitetura tem se modificado.

Dessa forma, qualquer discussão sobre a consciência construtiva na arquitetura e sobre a tectônica implica, necessariamente, entender a arquitetura através dos meios de fabricação e da exposição da lógica estrutural de um edifício.

2.4 ADVENTO DA COMPUTAÇÃO

Os arquitetos contemporâneos, com os novos meios tecnológicos, podem projetar formas complexas de edificações que não representam um modelo perfeito, mas apontam novos caminhos que, certamente, evoluirão, dando lugar a novos conceitos. Um novo tipo de construção surge, quebrando barreiras entre disciplinas profissionais separadas e especializadas, incentivando novas formas de interagir entre as equipes de projetos e de obras.

No século XX e neste século XXI, observamos grandes mudanças na arquitetura, oriundas das inovações tecnológicas e da disseminação de novas ferramentas e de técnicas digitais; do aumento do potencial e da velocidade dos computadores pessoais; da diminuição dos custos de ferramentas, como *softwares*, para fabricação ou prototipagem digitais de subtração para corte bidimensional ou com três eixos e cortadoras a laser automatizadas (CORSER, 2010).

No início dos anos 40 (século XX), a Força Aérea norte-americana criou os primeiros sistemas controlados por números para fabricação de componentes das aeronaves, de forma frequente e mais precisa. Apesar de as técnicas terem sido utilizadas só em operações simples, como rolos de papéis perfurados para controlar máquinas, o respectivo processo representou uma revolução e passou a ser utilizado em outras indústrias. Nos anos 60 e 70, a união entre o *Computer Aided Design* (CAD), ou desenho assistido por computador, e o *Computer Aided Manufacturing* (CAM), ou fabricação assistida por computador, foi utilizada também por outras indústrias, para a construção de artefatos complexos, como navios e carros (CORSER, 2010).

Tradicionalmente, era utilizado um sistema de representação no qual as necessidades programáveis eram expressadas sob forma de listas, o projeto em forma de desenhos “e o mundo construtivo figurado por meio de informações e regras armazenadas em livros de referência e na cabeça do próprio arquiteto.” As melhorias trazidas pela tecnologia do projeto vêm buscando ampliar a eficiência computacional desse processo, por meio da utilização de tecnologias dos sistemas CAD (MITCHELL, 2008, p. 92).

Normalmente, omissões e erros documentais em um projeto de arquitetura têm como consequência custos inesperados, além de atrasos na obra. Porém, na atualidade, tais problemas vêm sendo resolvidos com o uso de ferramentas computacionais tridimensionais (EASTMAN, 2008).

Na figura 24, há um modelo virtual produzido pela indústria automobilística, utilizando o CAD e o CAM com vários detalhes. Esse modelo também é dotado de todas as peças a serem produzidas.

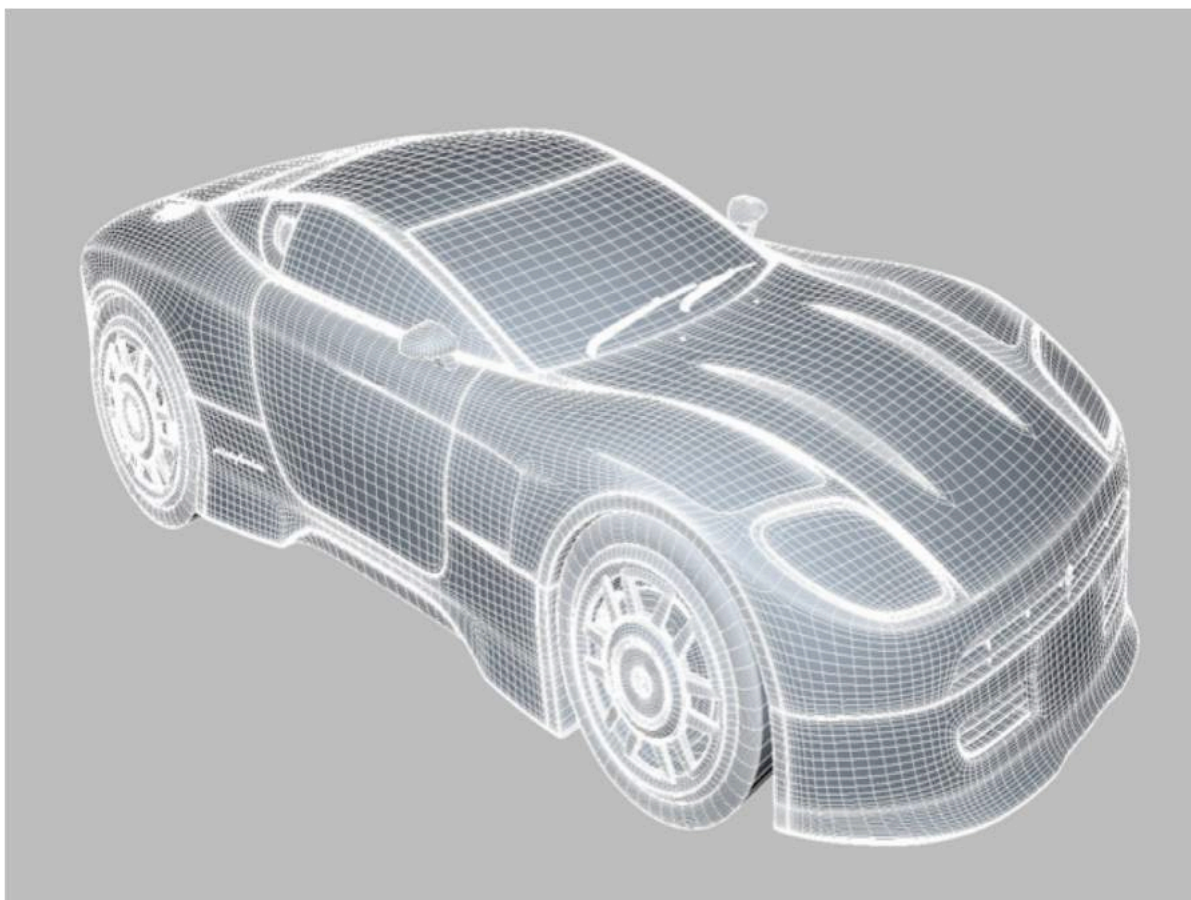


Figura 24: **Modelo tridimensional de automóvel**
Fonte: Carbody design, 2012

2.4.1 Evolução dos meios de produção

A fabricação digital na arquitetura deu início a uma revolução na forma de projeção, com o uso de inovações e de invenções que permitem a mudança direta do modelo tridimensional digital para o artefato arquitetônico físico. A prática digital preenche uma lacuna entre representação e objeto arquitetônico, segundo afirma Iwamoto (2009).

A transição entre um modelo computacional e o objeto físico é muito mais direta nos dias atuais com a utilização da fabricação digital. Com isso, há diminuição de erros provenientes da má interpretação das informações.

A transição destas geometrias complexas geradas por processos computacionais são representadas graficamente por desenhos bi-dimensionais e tri-dimensionais transcritas para informações computacionais de forma que uma máquina CNC possa entender. Portanto os arquitetos tem de aprender uma nova linguagem de raciocínio e produção de arquitetura (IWAMOTO, 2009, p.6,7).

A decisão quanto ao método ou à máquina de fabricação digital a serem utilizados pode variar segundo as respectivas capacidades. Por isso, o arquiteto deve conhecer o funcionamento e as possibilidades das novas tecnologias e dos materiais. Daí uma nova tectônica pode ser desenvolvida (IWAMOTO, 2009).

A arquitetura contemporânea está diretamente relacionada ao entendimento da tectônica da edificação e à identificação do melhor material e meio de fabricação digital a ser utilizado. A técnica mais usada na fabricação digital é o corte CNC (números controlados por computador) ou o recorte de chapas. Distintas técnicas de cortes - arcos de plasma, cortes a *laser* ou mesmo jatos de água - usam movimentos em eixos, dois ou mais, na fabricação das peças. A estratégia dessa produção bidimensional engloba elementos como cortes sequenciais, triangulações, contorno e desmontagem das peças. A CNC controla o movimento das máquinas por meio de instruções codificadas (KOLAREVIC, 2006).

Essa tecnologia tem sido utilizada na produção de moldes de elemento de dupla curvatura, como por exemplo, nos edifícios de Frank Gehry, em Dusseldorf, “Conde Nast Cafeteria” e o “BMW Pavilion”, de Bernard Franken.

A figura 25, do Pavilhão da BMW, utiliza-se de um processo contínuo desde o desenho até à manufatura, que é executado digitalmente. As formas são

geradas por campos e algoritmos e materializadas economicamente pelas máquinas CNC.



Figura 25: **BMW Pavilion de Bernard Franken**
Fonte: Vitruvius, 2012

Esse trabalho demonstra a forma como um projeto de formas complexas é executado, com uma sequência de seções planares laterais, em um modelo em três dimensões. Essas seções geraram as estruturas do pavilhão. A diferença na utilização dos meios de fabricação digital bidimensional está diretamente relacionada com a espessura do material a ser cortado. Enquanto os cortes laser (16mm) podem ser utilizados só em materiais não muito rígidos, o corte com jato de água (38cm) pode ser feito em quase todo tipo de material.

A figura 26 ilustra um dos meios de fabricação bidimensional. Nela, uma placa única de madeira se transforma num conjunto de peças a serem montadas.



Figura 26: **Máquina de corte 2 eixos, fabricação bidimensional**
Fonte: Ponoko, 2011

A fabricação subtrativa consiste na retirada gradual do volume desejado a partir de um sólido, por meio de processos elétricos, químicos ou mecânicos. Utiliza-se uma broca que se move em eixos diferentes para esculpir o volume desejado. A velocidade de rotação da broca **depende** das propriedades do material a ser usado.

A figura 27 é uma Router controlada por computador, utilizada pela indústria na criação de moldes ou protótipos. Uma fresa se movimenta sobre os eixos esculpindo a forma.

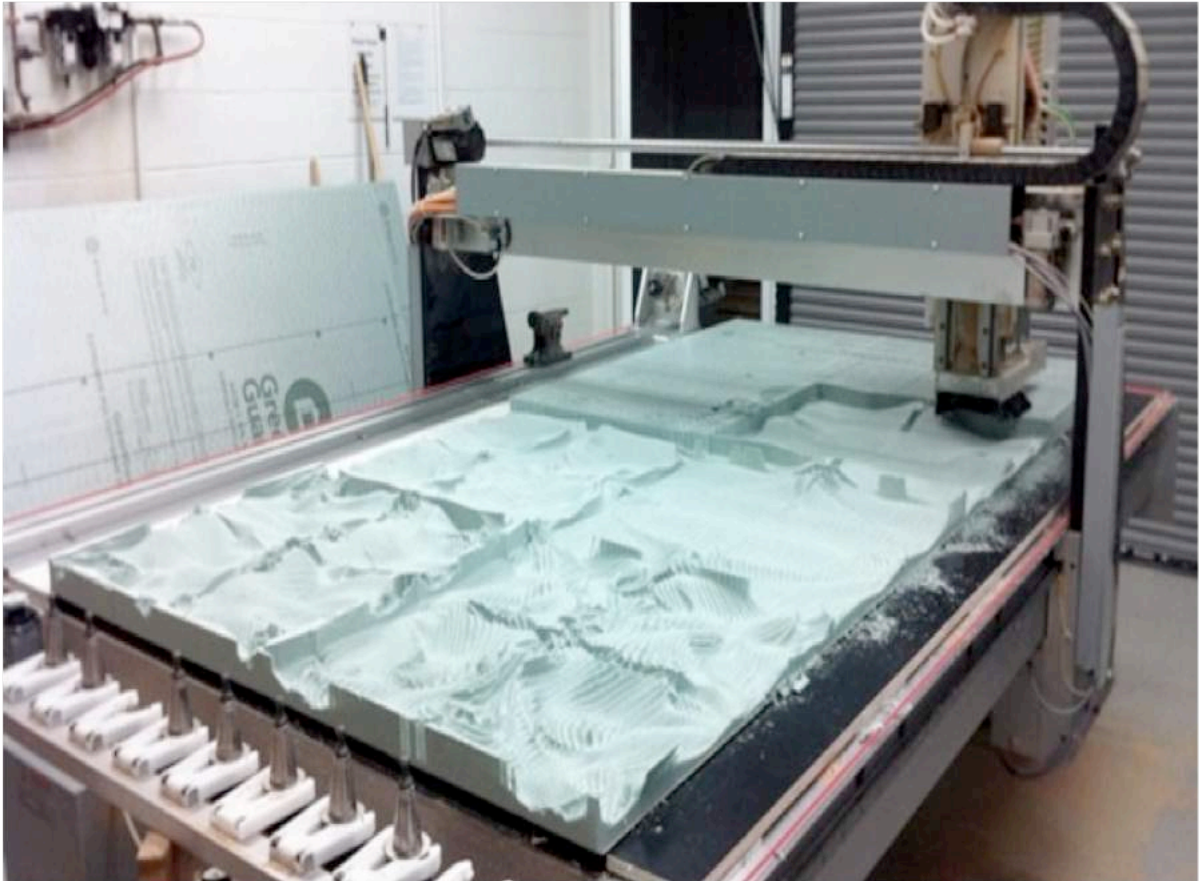


Figura 27: Router de 3 eixos, método subtrativo de produção
Fonte: Madlab, 2012

Esse exemplo mostra um dos métodos de fabricação subtrativa. Pode-se observar o material sendo retirado até atingir o formato desejado.

Já a fabricação aditiva é feita através da criação de várias camadas, uma sobreposta a outra para formar o objeto. O modelo digital em três dimensões é cortado em várias camadas que serão enviadas para a máquina no processo de fabricação. A utilização desse processo na arquitetura ainda é mínima (KOLAREVIC, 2003, p. 36).

A figura 28 é um exemplo de aplicação dessa tecnologia da fabricação digital, apesar do alto custo deste tipo de técnica para construções grandes. Esse tipo de processo ainda é mais utilizado em protótipos.



Figura 28: **Protótipo sendo retirado de uma impressora 3d**
Fonte: Various architects, 2012

No entanto, técnicas experimentais baseadas em *spray* de concreto estão sendo usadas em escala maiores, criando o objeto em escala real a partir do modelo virtual. Na figura 29, veem-se peças produzidas por máquinas de adição que usam o concreto como matéria-prima. Essas máquinas estão sendo aperfeiçoadas para construir artefatos maiores e mais baratos.



Figura 29: **Artefatos criados por uma impressora 3d de concreto**
Fonte: Sanfratello, 2012

A fabricação formativa aplica pressão, aquecimento ou outro meio de deformar o material para atingir a forma desejada (KOLAREVIC, 2003). A figura 30 mostra a aplicação dessa tecnologia num projeto do arquiteto Lelé para a Universidade de Brasília, em 2010. As peças foram cortadas por meio da fabricação bidimensional e curvadas com aplicação de forças para atingir a forma desejada.



Figura 30: **Artefatos criados por corte bidimensional e calandragem**
Fonte: Vitruvius, 2012

Essa figura ilustra pilares e vigas fabricados digitalmente no mercado de Brasília, por um arquiteto que é reconhecido por sua arquitetura modernista. A produção da arquitetura digital através da dobradura ocorre quando uma superfície plana é transformada em superfície tridimensional, dando mais rigidez ao material e permitindo que lele seja estruturado (IWAMOTO, 2009, p.62).

Na arquitetura, a dobradura é um conceito teórico, uma tática formal e uma operação de materiais. Nos últimos 15 anos, arquitetos têm explorado com maior frequência essa técnica e criado estruturas, espaços e formas mais complexas (IWAMOTO, 2009).

Esse meio de produção arquitetônica se assemelha bastante ao processo utilizado no *origami*, dobradura de papel como forma de sustentação das superfícies e de criação de formas diferentes da estrutura inicial.

A figura 31 é um exemplo de aplicação da dobradura como forma de estruturação do edifício e criação do sistema estrutural, desta forma a superfície consegue maior rigidez.



Figura 31: **Nestlé Chocolate Museum de Rojkind** arquitetos
Fonte: Style Park, 2016

Essa forma complexa obedece a princípios estruturais simples: vincos e dobras enrijecendo superfícies planas, como vemos nos origamis, acrescentando a estabilidade da seção tubular nos extremos da edificação.

A tesselação opera como uma forma de articular superfícies de forma decorativa mas ao mesmo tempo altamente estruturada, através de um ladrilhamento de planos que utilizam uma ou mais formas geométricas que vão se conectando criando uma superfície estrutural (PICON, 2010, p.141,142).

Apesar de a tesselação já vir sendo utilizada em arquitetura há milhares de anos, sua atual forma de utilização, por meio de modelos computacionais e de fabricação digital, estabelece uma nova materialidade formal.



Figura 32: **Cellular Tessellation Pavilion em Sidney**
 Fonte: Archinect, 2016

Nessa figura, vemos uma estrutura na qual se usou um processo de tesselação com painéis de alumínio que formam um superfície contínua e rígida.

A montagem das peças produzidas pela utilização do método de fabricação digital pode ser controlada precisamente utilizando-se de tecnologias digitais tais como o modelo virtual em três dimensões e a numeração das peças e seus encaixes (KOLAREVIC, 2003, p. 39).

Esse processo de montagem ainda é necessário, devido ao tamanho de algumas construções e à dificuldade de transportes das peças e de máquinas de fabricação digital até o canteiro de obras. No entanto, isso diminui bastante o tempo da obra na sua execução, bem como o valor da mão de obra.

2.4.2 Customização em massa

“As geometrias do modernismo do século XX foram amplamente influenciadas pela padronização, pré-fabricação e montagem das peças no sítio.” Porém, esses aspectos da produção tradicional não são obrigatórios na atualidade, uma vez que as máquinas controladas numericamente por computador têm condições de produzir tanto peças únicas como e por um custo mais razoável. “A possibilidade de produzir componentes diferenciados com a mesma facilidade de componentes padronizados introduziram um novo conceito,

isto é, de customização em massa” (KOLAREVIC, 2003, p.52).

Em seu livro de 1987, *Future Perfect*, Staley M. Davis introduziu a ideia de customização em massa. Para ele customização em massa simplesmente estendia a capacidade da tecnologia CAD/CAM, utilizando-se como exemplo os computadores Dell que podiam ser configurados de forma a atender melhor às necessidades dos consumidores. Em 1993, B. Joseph Pine ampliou os conceitos de customização em massa no que diz respeito à combinação do trabalho manual com a fabricação em massa (CORSEY, 2010, p.194).

A customização em massa permitiu que os arquitetos pudessem produzir uma arquitetura única e diferenciada para cada cliente. A implementação desse princípio se tornou possível com os avanços provenientes das novas tecnologias de produção, como a fabricação digital. Elementos estruturais podem ser fabricados de forma customizada, sem alteração significativa de custo para a obra. De forma simplificada, podemos utilizar, como exemplo, os computadores da empresa Dell, na qual o consumidor escolhe os principais componentes da configuração desejada (tamanho do disco rígido, tipo de monitor, número e tipos de módulos de memória entre outros), com base em um menu disponível no site da empresa, para a criação de um computador personalizado.

A relação entre consumo e produção está sendo modificada através da customização em massa, já que a produção tem como finalidade atender a uma necessidade específica de consumo. Isso implica em menor desperdício e armazenamento dos componentes.

O conceito de customização em massa rapidamente virou parte da ortodoxia moderna no final do último século. A arquitetura necessita ser desenvolvida e ser observada de forma diferente. Construir grandes partes do projeto fora do sítio no qual esse será implantado é possível e muitas vezes necessário nos dias atuais. Niemeyer (2005, p. 52) explica:

É claro que não pretendo uma volta ao adorno ou as fachadas ricamente decoradas que representam uma época de mão-de-obra irrecuperável, mas ao élan arquitetônico que neles encontramos e que as novas técnicas agora nos oferecem numa escala diferente e nas formas mais belas e imprevisíveis.

A figura 33 apresenta a construção de um estrutura impensável tempos atrás, devido dificuldades de execução e alto custo, mas que no contexto das novas tecnologias tornaram-se viáveis nos dias atuais.



Figura 33: **Estrutura em formas de cogumelo**

Fonte: Criticalismo, 2011

A estrutura desenvolvida pelo arquiteto Jurgen Mayer, apesar de apresentar uma grande complexidade formal, pode ser facilmente resolvida ao se utilizarem seccionamentos como forma de simplificação e de desenvolvimento estrutural. A partir dos seccionamentos, pode-se escolher a melhor forma de fabricação digital a ser empregada na referida obra.

De acordo com Kolarevic (2003, p. 4), a arquitetura contemporânea “tende a se afastar das formas padronizadas provenientes da industrialização e fabricação em série.” Isso representa uma “ruptura ideológica, conceitual e formal, de maneira semelhante ao que ocorreu com Walter Gropius, na Bauhaus em relação ao historicismo”. Para Gropius, a nova escola deveria superar o historicismo por meio de “uma linguagem formal clara” e da união entre a arte e o trabalho manual e o industrial.

3 PROBLEMÁTICA

A Revolução Industrial, por meio da fabricação repetitiva de componentes padronizados, reduziu significativamente o custo da construção no século XX. Porém, inibiu a diversidade. Essa arquitetura, pouco contextualizada e que se utiliza de elementos construtivos repetitivos, desconsiderou as condições climáticas, ambientais, econômicas e culturais específicas no processo de projeção e de construção arquitetônica na maioria de suas edificações. A ideia do mestre construtor, na qual o arquiteto estava envolvido em todos os processos de uma construção, foi desaparecendo gradualmente desde a Renascença, tendo se acentuado com a Revolução Industrial, afastando o arquiteto do processo de construção e fragmentando a produção do ambiente edificado.

A arquitetura contemporânea, com suas formas complexas e a evolução nos meios de sua produção e dos materiais empregados e a retomada do perfil de um novo mestre construtor, é inevitável. Nos dias atuais, as pessoas precisam expressar sua individualidade, traduzindo discernimentos e escolhas por meio de objetos de uso cotidiano. As roupas, calçados, carros, cortes de cabelos e outros adereços são elementos que as diferenciam das outras. No entanto, a arquitetura ainda continua produzindo edificações similares e através de processos padronizados.

Muitos arquitetos brasileiros continuam desinformados em relação às transformações e processos provenientes da fabricação digital como a customização de artefatos arquitetônicos. Isto fica evidente ao compararmos a utilização de novas tecnologias na arquitetura com as indústrias automobilística, aeroespacial e naval (SILVA, 2009, p. 1).

De certa forma, essa situação se deve à falta de conhecimento ou até mesmo ao movimento modernista, ainda muito presente em nossa arquitetura. A arquitetura contemporânea, com suas formas cada vez mais complexas e diferentes entre si não pode ficar restrita a peças padronizadas, pois assim ficarão mais caras e muitas vezes inviáveis. Essas formas complexas, se produzidas tradicionalmente, geram um custo muito alto de mão de obra e correm grande risco de não ser idênticas às ideias iniciais.

Nesse sentido, a customização é uma forma de tornar a construção dessa arquitetura viável, inclusive financeiramente, pois a fabricação das peças

por processos controlados por computador diminui os custos e aumenta a precisão. Isso se deve à complexidade das formas que, de certa maneira, inviabiliza construções por meio de componentes pré-fabricados, cuja metodologia é originária da Revolução Industrial.

Os componentes, por sua vez, devem ser substituídos por outros customizados, que reduzirão custos e dificuldades de execução.

A lacuna a ser preenchida nesta dissertação diz respeito à construção de uma arquitetura de menor custo e melhor qualidade. Especificamente no mercado do Distrito Federal, isto pode ser feito por meio de tecnologias de customização disponíveis as quais são muitas vezes sub-utilizadas. Deve-se ressaltar ainda que estas tecnologias são vastamente utilizadas pelas indústrias aeronáutica, naval e automobilística. Estes recursos de fabricação digital se encontram disponíveis em várias fábricas de estruturas e esquadrias metálicas no Brasil, inclusive em Brasília (CUNHA, 2008, p. 70, 91).

Embora exista pesquisa estatística demonstrando que há um número significativo de estabelecimentos industriais que utilizam tecnologia de fabricação digital, não há evidência de uso dessa tecnologia por parte da maioria dos arquitetos em Brasília. Boa parte das construções é feita com a utilização de componentes que já se encontram disponíveis no mercado, sem, no entanto, ser customizados para atender as necessidades específicas de cada uma das construções em questão.

A problemática desenvolvida por nós envolve a comparação de elementos produzidos serialmente com aqueles fabricados por meio da customização em massa no mercado de Brasília. A customização de componentes já é uma realidade nos dias atuais. O que tentaremos demonstrar é a incipiente utilização dessa tecnologia que pode ser viável, rápida e precisa.

Além da percepção espacial, a maior contribuição do arquiteto sempre foi sua capacidade de sintetizar e de integrar ao projeto o sistema estrutural da edificação. Portanto, faremos um recorte especificando alguns pilares, para podermos determinar a eficácia da customização em massa desses elementos construtivos. Só assim poderemos vislumbrar uma solução, que é a verdadeira especialidade do arquiteto. A profissão contemporânea do arquiteto proporciona mais facilidade do para implementar a diversidade por meio formas variáveis ou adaptáveis a situações específicas.

A produção em massa é o termo que designa a produção em larga escala de produtos padronizados por meio de linhas de montagem. Ela se tornou muito difundida em componentes construtivos durante a Revolução Industrial, pois permitia altas taxas de produção a preços baixos. Entretanto, esse sistema de produção tinha que operar com estoques e lotes de produção elevados, além de envolver custos relacionados a armazenagem e transporte dos produtos.

A produção em massa desenvolvida por Frederick Taylor e Henry Ford no início do século XX começa a dar lugar ao sistema de produção enxuta a partir da década de 80. Esse sistema de produção enxuta consistia na fabricação de pequenos lotes com maior variabilidade e maior qualidade. Produção “enxuta” (do inglês, “*lean*”) é um termo cunhado no final dos anos 80 por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), para definir um sistema de produção mais eficiente, flexível, ágil e inovador do que a produção em massa fordista.

Na figura 34, verificamos uma edificação na qual foram utilizadas máquinas CNC em Brasília. O arquiteto João da Gama Filgueiras Lima, por meio das estruturas metálicas produzidas pela empresa Gravia, conseguiu atingir o resultado esperado em relação a forma de seu projeto.



Figura 34: **Memorial Darcy Ribeiro**
Fonte: Arquiteta, 2012

O arquiteto autor do projeto vislumbrou uma solução singular para a obra. As alternativas oferecidas pela tecnologia digital contemporânea são tantas que o formalismo estrutural de pilares, vigas e lajes retilíneas ficou obsoleto.

As vantagens referentes às soluções singulares, decorrentes do uso da customização em massa, são evidenciadas pela possibilidade de permitir criar artefatos arquitetônicos diferenciados ou até mesmo uma edificação inteira com formas únicas pelo mesmo custo ou frequentemente inferior e com qualidade superior aos métodos de produção de componentes padronizados (KOLAREVIC, 2003, p. 52).

O uso de elementos padronizados, advindos dos avanços tecnológicos da Revolução Industrial, possibilitou construções para as massas que abandonavam o campo, migrando para as cidades.

Mas hoje, a evolução dos métodos de fabricação controlados por computador permite produzir componentes construtivos diferentes, sem interromper o processo contínuo de produção. Edifícios que eram considerados quase impossíveis de serem concretizados pela complexidade de suas formas e pelo alto custo delas, estão sendo construídos nos últimos anos com qualidade elevada e custo reduzido. Como exemplo, citamos os projetos da Heydar Aliyev Cultural Center, Jockey Club Innovation Center, Dongdaemun Design Plaza, Wangjing Soho, London Aquatics Centre, entre outros.

O projeto do Heydar Aliyev Cultural Center, na figura 35, estabelece uma relação de continuidade e fluidez entre a praça externa e o interior da edificação, criando um espaço sem hierarquia entre piso, parede e cobertura.



Figura 35: **Heydar Aliyev Cultural Center**
Fonte: Architecture, 2016

A edificação exposta na figura 36, com o nome Jockey Club Innovation Center, localiza-se a Universidade Politécnica de Hong Kong. É constituída por 15 pavimentos, com 15.000m² para mais de 1800 usuários. É uma composição fluida, cujos espaços informais permitem maior dinamismo e iteração entre os usuários.



Figura 36: **Jockey Club Innovation Center**
Fonte: Dezeen, 2016

O edifício Dongdaemun Design Plaza, figura 37, foi implantado em uma cidade histórica e entre artefatos descobertos durante escavações arqueológicas. Foi o primeiro a utilizar a fabricação digital como forma de assegurar a qualidade construtiva e o controle de custos na Coreia.

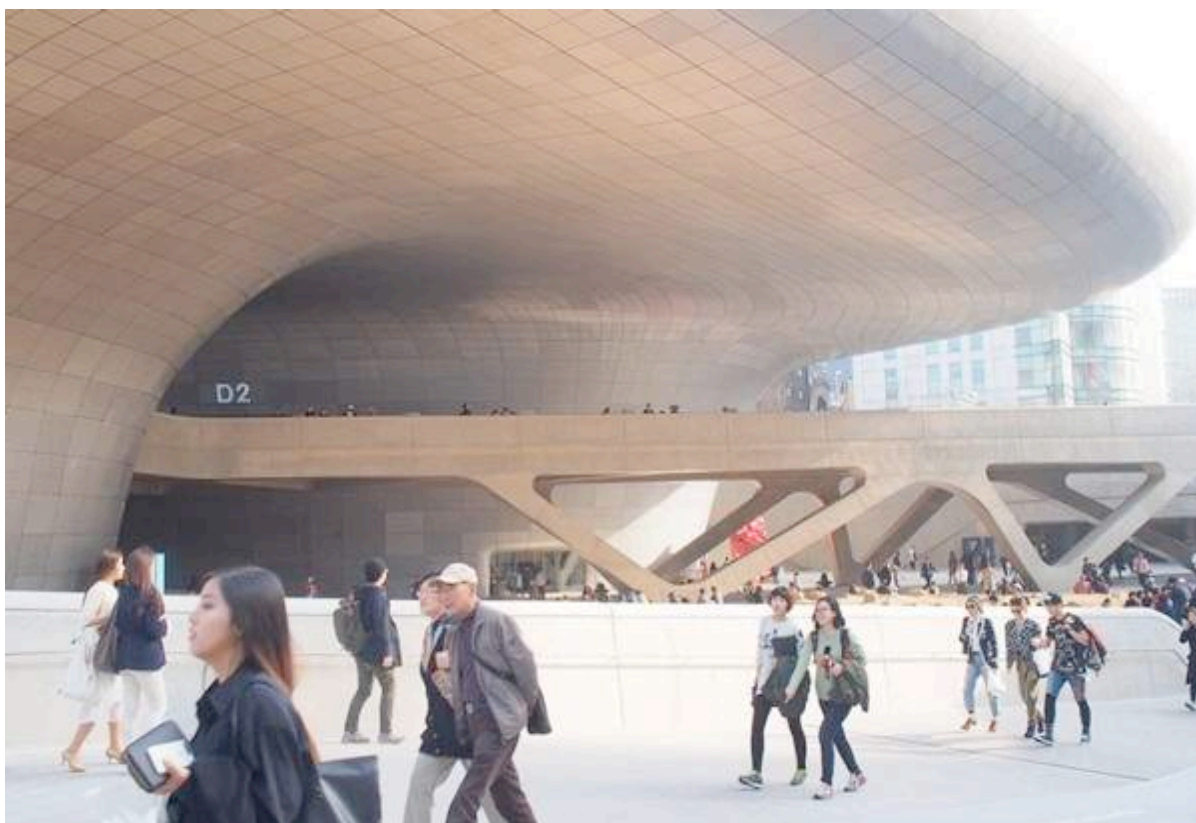


Figura 37: **Dongdaemun Design Plaza**
Fonte: Dongdaemun, 2016

O complexo constituído por três edifícios de uso misto, figura 38, Wangjing Soho em Beijing, tem 118,127 e 200m de altura, com área comum de 60.000m². A forma fluida das edificações permite uma melhor iluminação natural dos ambientes internos além de criar diferentes perspectivas visuais do complexo pelos usuários e visitantes.



Figura 38: **Wangjing Soho**
Fonte: Inhabit, 2016

O Centro Aquático, figura 39, foi projetado para os Jogos Olímpicos de 2012 em Londres. A geometria da cobertura, com dupla curvatura, foi desenvolvida com arcos parabólicos que criaram uma geometria única.



Figura 39: **London Aquatics Centre**
Fonte: Architecture, 2016

As formas complexas presentes na arquitetura de Zaha Hadid tornaram-se reais com o uso de novos métodos de desenvolvimento de projeto e da construção. Adventos de outras áreas da tecnologia foram fundamentais para essa realidade na arquitetura. As novas tecnologias digitais de projeção e construção têm possibilitado, ao arquiteto dos dias atuais, uma maior liberdade de formas. Essas podem ser produzidas de maneira economicamente viável e precisa, por meio da customização em massa dos elementos construtivos da obra. Observar o resultado do emprego dessa tecnologia na figura 40 a seguir.



Figura 40: **Eli and Edythe Broad Art Museum**

Fonte: Arquiteta, 2012a

Essa obra é exemplo de uma maior liberdade formal na arquitetura por meio da utilização de tecnologias digitais, durante o processo de projeção e do respectivo desenvolvimento plástico e estrutural. No museu, utiliza-se da fabricação digital como forma de produção do edifício.

Tendo em vista esse contexto de fabricação de elementos arquitetônicos ou da edificação global, diretamente do projeto desenvolvido por tecnologias digitais, levantamos a seguinte questão:

Pode-se fabricar hoje, em Brasília (DF), componentes construtivos com formas variáveis complexas ou não, com custo igual ou inferior àqueles provenientes da produção serial?

Essa pergunta se insere no contexto maior das características deste tempo, depreendida do conteúdo do trabalho, e leva a um questionamento amplo: se a padronização vem deixando de fazer parte do cotidiano, por que fazer parte da arquitetura? A questão proposta responde, em parte, esse problema maior.

4 HIPÓTESE

Nossa hipótese maior é: pode-se fabricar, em Brasília (DF), componentes construtivos diferenciados daqueles produzidos serialmente, com formas diversificadas, com custo igual ou inferior àqueles provenientes da produção padronizada e em escala industrial.

Essa hipótese é justificada pelo fato de possuímos tecnologia de fabricação digital suficiente na indústria da construção civil para produzir tais componentes. Apesar de existirem, no mercado de Brasília, ferramentas e equipamentos que permitem a construção de artefatos arquitetônicos diretamente de modelagens computacionais, seu uso pelos escritórios de arquitetura e por alunos e professores da área ainda é muito sutil.

Os métodos de produção padronizada estão dando lugar à customização em massa, baseada em modelos digitais paramétricos, para produzir um espectro amplo de formas arquitetônicas diferenciadas. A customização em massa veio beneficiar com desafios construtivos ou permitir novas possibilidades de projeto que até o presente momento eram inviáveis para os arquitetos. Esse é um benefício similar ao que a produção em massa proporcionou à arquitetura durante o movimento moderno.

Ao adotarmos a customização em massa como método de produção de componentes arquitetônicos, precisamos calcular seus benefícios em comparação com componentes padronizados disponíveis no mercado de Brasília. É necessário um levantamento de vantagens e desvantagens baseado na comparação entre alguns elementos.

Acreditamos que, por meio de processos provenientes da customização em massa, em escala industrial, a arquitetura possa ser desenvolvida além dos limites das soluções ortogonais e padronizadas. Isso possibilitará a construção de formas complexas, provenientes desse novo paradigma da arquitetura e de sua nova tectônica. A arquitetura complexa de muitos arquitetos aclamados nos dias atuais, como Zaha Hadid, foi facilitada pela fabricação digital.

Essa arquitetura, gerada por meio de processos computacionais e com formas fluidas, só pôde se tornou viável, econômica e fisicamente, com a fabricação digital, conforme descrevemos na problemática.

No sentido de demonstrar que nossa hipótese é promissora, teremos que simplificar os itens a serem testados, pois não poderíamos comparar elementos com geometrias complexas e customizados com elementos retilíneos ortogonais e serializados. Portanto, partindo do princípio de que a maioria dos edifícios com geometrias complexas contemporâneas tem estrutura fracionada e retilínea, como exemplificado na figura 41, faremos uma comparação entre dois grupos contendo esses tipos de elementos, sendo um deles serializado e o outro customizado.



Figura 41: **Estrutura do Heydar Aliyev Cultural Center**
Fonte: Arquiteta, 2016

A estrutura do edifício Heydar Aliev Cultural Center, da arquiteta Zaha Hadid, apresenta um sistema estrutural convencional de pilares e vigas coberto por uma treliça espacial de cobertura.

Tentaremos provar a viabilidade de nossa hipótese por meio de experimentos utilizando perfis I estruturais retilíneos seriais e customizados. Com isso, demonstra-se que podemos nos apropriar dessas novas tecnologias, de maneira a tornar essas novas formas viáveis.

5 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO

Ao observarmos as figuras 34, 35, 36, 37, 38, 39 e 40, expostas na problemática, constatamos que, para a criação de formas complexas na arquitetura contemporânea, é necessário utilizar elementos customizados. Considerando as características das respectivas edificações, conclui-se que a utilização de elementos serializados é incompatível com as geometrias de formas complexas.

As geometrias constituídas por pilares diferenciados devem ser pensadas de acordo com uma nova tectônica, que permitirá um método novo de concepção estrutural da forma arquitetônica. Muitas vezes, as geometrias aparentemente complexas são constituídas por variações de elementos retilíneos até atingir a plasticidade desejada, como na figura 41, apresentada na hipótese.

Ao adotarmos a customização em massa como método de produção de componentes arquitetônicos, precisamos calcular os benefícios e os investimentos necessários. Para testarmos nossa hipótese, fizemos uma comparação entre os componentes construtivos produzidos em série e os customizados.

A título de recorte da pesquisa, comparar pilares em perfil “I” submetidos a cargas gradualmente maiores. Selecionamos dois perfis produzidos em série com áreas de seções subsequentes na tabela de um fabricante nacional (perfis extrudado/monoblocos) e produzimos outros customizados (perfis soldados), com áreas situadas entre os dois primeiros para poder fazer algumas comparações.

O cálculo estrutural é um ponto fundamental na elaboração de um projeto arquitetônico e pode permitir benefícios diversos. O projeto de estrutura metálica quando bem elaborado permite diversos resultados positivos para gerenciamento da obra, como por exemplo, elevada resistência e baixo peso próprio, devido à sua excelente propriedade mecânica (KRIPKA, 2011, p.30).

Os componentes foram escolhidos por serem, frequentemente, partes integrantes em várias edificações. No entanto, nas edificações contemporâneas, com elementos curvilíneos, a customização é muitas vezes imprescindível. Para responder a nosso problema, comparamos elementos simples customizados e serializados.

Para tanto, nesta dissertação, utilizamos o conceito de pilares defendido por Salvatori (2011), segundo o qual “pilares são elementos estruturais lineares de eixo reto, visualmente dispostos na posição vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes”. Sua função maior “é receber as ações atuantes nos diversos níveis e conduzi-las até as fundações” (SALVATORI, 2011, p. 4, 9).

Utilizamos o perfil “I” partindo do princípio de que os pilares são responsáveis pela transição das cargas normais até as fundações. Portanto, vamos desconsiderar qualquer carga acidental que possa interferir no carregamento.

O sistema estrutural de uma edificação deve ser capaz de resistir às variadas ações que atuam sobre ele: verticais e horizontais. E estas cargas podem agir dentro de determinadas circunstâncias, que podemos classificar, mediante a sua ocorrência durante a vida da construção: em carregamentos normal, especial, excepcional e de construção. Os carregamentos normais são aqueles decorrentes do uso previsto para a construção e são considerados de longa duração. Os carregamentos especiais se referem a ações variáveis de natureza ou intensidade especial que superam usos previstos dos carregamentos normais. Os carregamentos excepcionais são aqueles que apresentam duração extremamente curta e com baixa probabilidade de ocorrência. O carregamento de construção é um caso particular onde os procedimentos de construção podem levar a estados limites de cargas ou deformações (KRIPKA, 2011, p.21, 22).

A apresentação do conceito de sistema estrutural acima é necessário, porque estamos investigando os custos e a capacidade dos perfis “I” nos projetos das edificações com formas simples ou até mais complexas. Ao utilizar as terminologias constantes do conceito acima, tais como carregamentos normais, especiais e excepcionais, nos familiarizamos mais com o assunto.

Devido à exiguidade de tempo, faremos outro recorte, considerando apenas as ações verticais de cargas normais e permanentes sobre cargas de compressão sobre os pilares com perfil “I”.

Nesse sentido, Beer (1996, p. 7, 9) diz que para “verificar se a estrutura tem condições de suportar a carga aplicada, é necessário determinar se cada uma das barras metálicas tem condição de suportar o esforço normal atuante”.

Isso significa que é preciso verificar se o material tem capacidade para resistir ao esforço normal aplicado em cada barra. Cada perfil metálico precisa resistir ao esforço normal exercido sobre ele em toneladas. Caso esse perfil não seja suficiente, escolheremos o seguinte e faremos uma nova testagem.

As cargas permanentes são compostas pelo peso próprio da estrutura em análise e o peso próprio dos materiais de composição da obra. Essas cargas podem ser determinadas com grande precisão, pois são calculadas exclusivamente por forças gravitacionais, como: peso próprio dos pilares, chapas de vedação, peso dos revestimentos de piso, cargas que recebem das coberturas, entre outros que não sofrem variações. Nesse caso, algumas considerações de cargas, em especial as de peso próprio da estrutura, são estabelecidas pela experiência profissional ou por meio da comparação com obras similares. Ao final do dimensionamento das peças estruturais, deve ser acrescido um percentual de 25% ao valor obtido como estado limite de carregamento, conformedetermina a NBR 8681, de 2003.

A tabela 1 ilustra o coeficiente de ponderação ou de segurança para casos de variabilidade de cargas a ser acrescido no valor do cálculo estrutural.

Tabela 1: Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,30	1,0

¹⁾ Por exemplo: paredes e fachadas pré-moldadas, gesso acartonado.
²⁾ Por exemplo: paredes de alvenaria e seus revestimentos, contrapisos.

Fonte: Araguaia, 2011

Na célula circulada em vermelho nessa tabela, constatamos que o peso próprio da estrutura deve ser multiplicado por 1,25, de modo a garantir um coeficiente de estado limite para que a estrutura seja segura, ou seja, não sofra rupturas ao ser carregada. Tanto os pilares customizados quanto aqueles produzidos em série precisam ser multiplicados por esse coeficiente de segurança. Mas isso não gera diferença, pois temos de fazer essa multiplicação em ambos os pilares, os customizados e os provenientes da produção serial, não alterando o resultado final.

Caso esta estrutura metálica não consiga resistir à carga permanente pré-dimensionada, deve-se efetuar uma nova verificação até encontrarmos um perfil que resista a carga desejada. As cargas permanentes serão sempre consideradas como de projeção de aplicação vertical (PFEIL, 2000, p. 26, 38).

Utilizamos a tabela de perfis estruturais da Gerdau (anexo 1) para demonstrar que podemos construir em Brasília, em escala industrial, componentes construtivos diferenciados daqueles produzidos serialmente, com formas diversificadas e custo igual ou inferior aos provenientes da produção padronizada. Usamos o aço ASTM A 572 grau 50, constituído de chapas de aço de qualidade estrutural, usadas na construção civil.

Iniciamos as comparações entre os perfis customizados e padronizados em pares, por meio de uma série que inicia com o perfil I serializado, com bitola de W150 x 13,0 kg/m e o respectivo par customizado. Variamos a área de 0,1 em 0,1cm² até o próximo perfil I da série com bitola de W200 x 15,0 Kg/m e seu correspondente customizado.

Esses dois perfis foram escolhidos por possuírem áreas de tamanho subsequentes e devido à limitação de variabilidade disponível na série oferecida pela Gerdau.

Os elementos customizados com corte bidimensional e soldagem serão comparados com elementos serializados extrudados que atendem a mesma função e submetidos às mesmas cargas na edificação.

Iniciaremos comparando um elemento serializado com seu correspondente customizado e criando variações até obter o correspondente customizado para o próximo perfil serializado.

Esta parte de bitolas perfil I - Aço ASTM A 572 grau 50 da Gerdau, na tabela 2 a seguir, com os dois perfis com áreas consecutivas em cm² marcadas em vermelho, mostra como componentes construtivos com áreas gradualmente maiores foram utilizados na investigação desta dissertação.

Tabela 2: **Bitolas perfil I - aço ASTM A 572 Grau 50**

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²
				t _w mm	t _f mm			
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9

Fonte: Gerdau, 2016

É possível que na série de perfis em questão, as dimensões variem de tal forma que o primeiro perfil W150 x 13,0 kg/m seja insuficiente para suportar um certo carregamento. Contudo, o próximo perfil, W200 x 15,0 Kg/m, embora seja suficiente para suportar a carga em questão, pode estar acima do necessário, que poderia ser atendida, por exemplo, por meio de um perfil intermediário que não está disponível para compra no mercado. Por exemplo: caso fosse necessária uma área de 17cm² para suportar 5,865 toneladas de força, teríamos de selecionar o perfil W200 x 15,0 Kg/m, pois o anterior, W150 x 13,0 Kg/m, não seria suficiente. Esse perfil só consegue suportar uma força de 5,727 toneladas, enquanto o perfil W200 x 15,0 Kg/m conseguiria suportar uma força de 6,693 toneladas.

A utilização desse último perfil implicaria um super dimensionamento estrutural e, portanto, um aumento no peso da estrutura, o que influenciaria o cálculo estrutural das fundações e o peso próprio da edificação. Esses valores podem ser observados na tabela que vem a seguir.

Além disso, fizemos o orçamento de um perfil correspondente ao W150 x 13,0 kg/m e ao W200 x 15,0 Kg/m, produzido por meio de corte bidimensional e de solda contínua. A série de perfis customizados foi produzida por esse meio. Assim, poderemos comparar o preço de elementos da mesma dimensão e área gerados por processos idênticos de fabricação.

Esse processo resultou em 29 variações de carga e, subsequentemente, 29 pilares customizados a serem produzidos por corte bidimensional e solda contínua, devido ao intervalo de variação proposto de 0,1cm². Para obter essas cargas, simplificamos a fórmula de resistência de Beer (1996, p. 11), sem majoração ou minoração .

$$F = \sigma \cdot A$$

F - é a força uniformemente distribuída sobre uma área

σ - é a tensão uniaxial mecânica A - área do perfil

Desconsideramos o percentual de 25% dos esforços solicitantes finais de força uniforme ou tensão mecânica do aço ASTM A 572 Grau 50, como explicado na tabela 1.

Utilizamos essa fórmula para calcular as forças suportadas pelos perfis I metálicos, mas primeiramente convertemos as unidades de área (A) de cm² para m², depois as multiplicamos pela tensão (σ) 345 MPa do aço ASTM A 572 Grau 50. Por exemplo:

$$F = \sigma \cdot A$$

$$F = 345 \cdot 0,166$$

$$\sigma = 5,727$$

Na tabela 3 a seguir, encontram-se perfis extrudados provenientes da indústria siderúrgica na primeira coluna com o W150 x 13,0 e, na última linha da

mesma coluna, o W200 x 15,0 com a respectiva área e carga suportada.

Os outros perfis terão que ser customizados com chapas metálicas 3/16, 1/4 e 11, permitindo, portanto, atender a carregamentos mais adequados em toneladas, para satisfazer as necessidades estruturais de forma mais precisa.

Tabela 3: **Cargas suportadas por área nos perfis metálicos**

PERFIL (mm x Kg/m)	ÁREA m²	TENSÃO MPa	FORÇA/Ton
W150 x 13,0 e Customizado A	0,166	345	5,727
(Customizado B) mm x 13,07	0,167	345	5,7615
(Customizado C) mm x 13,14	0,168	345	5,796
(Customizado D) mm x 13,21	0,169	345	5,8305
(Customizado E) mm x 13,28	0,170	345	5,865
(Customizado F) mm x 13,35	0,171	345	5,8995
(Customizado G) mm x 13,42	0,172	345	5,934
(Customizado H) mm x 13,50	0,173	345	5,9685
(Customizado I) mm x 13,57	0,174	345	6,003
(Customizado J) mm x 13,64	0,175	345	6,0375
(Customizado K) mm x 13,71	0,176	345	6,072
(Customizado L) mm x 13,78	0,177	345	6,1065
(Customizado M) mm x 13,85	0,178	345	6,141
(Customizado N) mm x 13,92	0,179	345	6,1755
(Customizado O) mm x 14,00	0,180	345	6,21
(Customizado P) mm x 14,07	0,181	345	6,2445
(Customizado Q) mm x 14,14	0,182	345	6,279
(Customizado R) mm x 14,21	0,183	345	6,3135
(Customizado S) mm x 14,28	0,184	345	6,348
(Customizado T) mm x 14,35	0,185	345	6,3825
(Customizado U) mm x 14,42	0,186	345	6,417
(Customizado V) mm x 14,50	0,187	345	6,4515
(Customizado W) mm x 14,67	0,188	345	6,486
(Customizado X) mm x 14,64	0,189	345	6,5205
(Customizado Y) mm x 14,71	0,190	345	6,555
(Customizado Z) mm x 14,78	0,191	345	6,5895
(Customizado AA) mm x 14,85	0,192	345	6,624
(Customizado BB) mm x 14,92	0,193	345	6,6585
W200 x 15,0 e Customizado CC	0,194	345	6,693

Fonte: Elaborada pelo pesquisador

Essa tabela ilustra o ponto principal que pretendemos demonstrar nesta dissertação: se aplicarmos uma força sobre o perfil I, acima de seu limite de resistência, teremos que escolher o próximo na tabela que pode suportar tal carga. No entanto, isso implicará um aumento significativo de área e, conseqüentemente, do peso próprio do componente, pelo fato de o custo das estruturas metálicas na indústria ser diretamente proporcional ao peso em quilogramas. Portanto, as implicações em relação ao custo serão diretas.

Por essa razão, comparamos os perfis W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 Kg/m, provenientes da produção serial em massa da tabela da Gerdau, com os perfis soldados customizados, produzidos também em massa. Os perfis seriais são extrudados ou perfilados na indústria siderúrgica, isto é, são produzidos originalmente sem emendas, como monoblocos. Avaliamos o custo, o atendimento as necessidades dimensionais e o desperdício de material originado da elaboração dos componentes em fábricas do DF.

Comparamos, portanto, perfis soldados, correspondentes em dimensão e em peso do início e do final da série da Gerdau, com perfis customizados produzidos com o intervalo de variação de 0,1 cm², para atender, de forma precisa, o carregamento permanente dos perfis.

Calculamos o peso próprio desses pilares customizados para comparar os preços com os pilares respectivos serializados que atendem aos carregamentos exigidos. Como foi dito, o preço das estruturas metálicas vendidas na indústria é calculado em relação ao peso. Tais pilares foram orçados na empresa Gravia que atua, há muito anos, no mercado de Brasília e do entorno; portanto, sua posição é consolidada, e ela constitui-se em referência aceitável.

Primeiramente, utilizamos a carga de 5,727 toneladas em ambos os pilares provenientes da produção em série e da customização em massa. Os resultados foram dispostos em planilha comparativa e em gráfico, esse para melhor configurar o resultado. Procedemos assim sucessivamente até o carregamento final de 6,693 toneladas. Essas cargas foram utilizadas por serem as duas com áreas consecutivas da tabela de perfis I da Gerdau.

O gráfico 1, com resultados da comparação entre os parâmetros, mostra um ganho percentual em relação ao custo das estruturas, atendimento dimensional

e redução de desperdício de material. Isso foi feito por meio de orçamentos coletados, contendo as informações utilizadas para comparar os resultados e testar a hipótese desta dissertação.

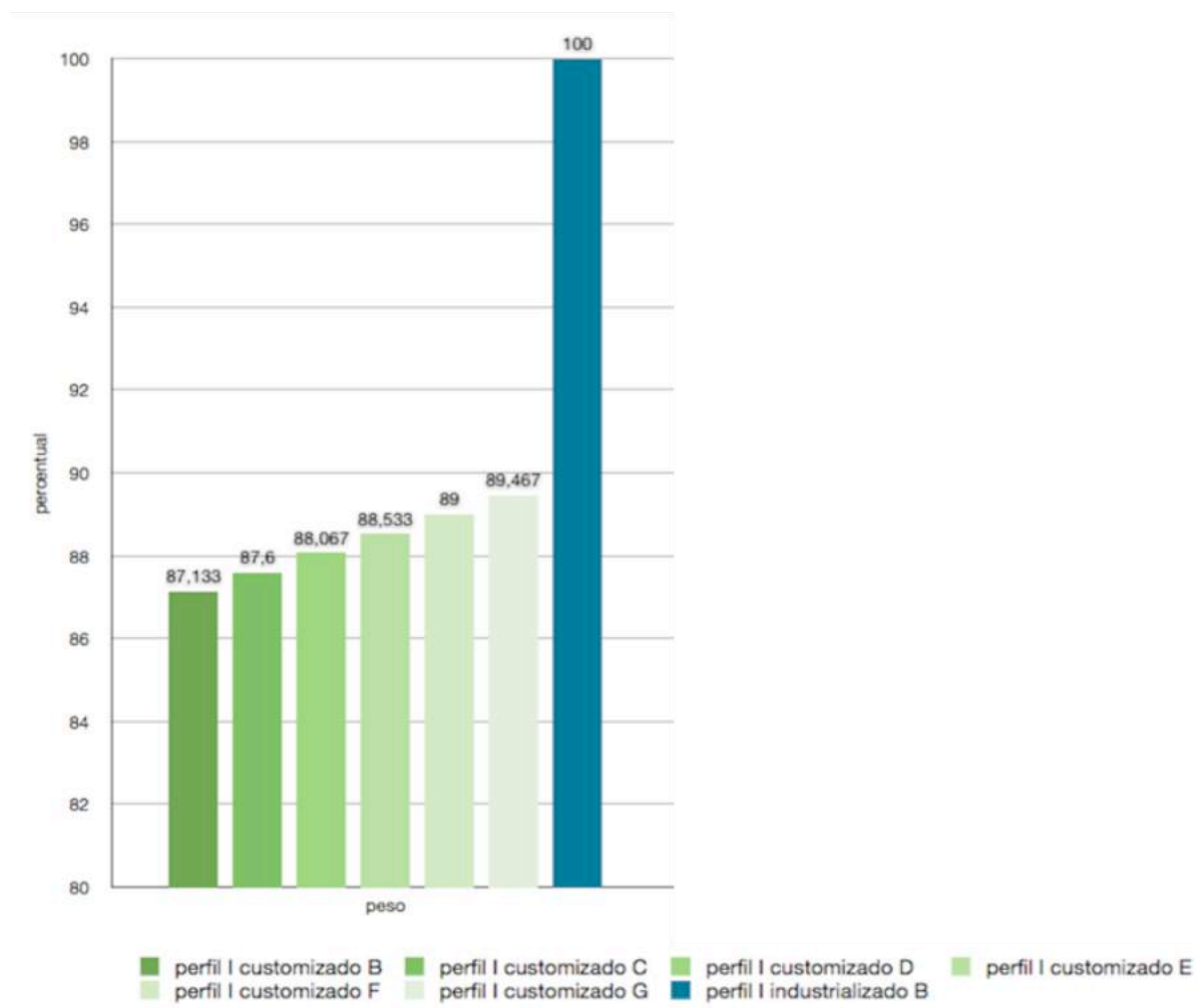


Gráfico 1: **Comparativo de peso entre perfis customizados e serializados**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador

Após o levantamento do orçamento, inserimos os resultados numéricos em um quadro para fazer as comparações. A tabela 4 foi preenchida com dados extraídos dos orçamentos (anexos 1, 2, 3 e 4). Com seu preenchimento, obtivemos as informações necessárias para a testagem da hipótese levantada nesta dissertação.

Tabela 4: Comparação de valores dos perfis

Peso Kg/m	Perfil Industrializado		Perfil customizado com chapa 3/16		Perfil customizado com chapa 1/4		Perfil customizado com chapa 11	
	Valor/Kg	valor/m	Valor/Kg	valor/m	Valor/Kg	valor/m	Valor/Kg	valor/m
13,0	3,7482	48,7266	4,34	56,42	4,53	58,89	4,34	56,42
13,07			4,34	56,7238	4,53	59,2071	4,34	56,7238
13,14			4,34	57,0276	4,53	59,5242	4,34	57,0276
13,21			4,34	57,3314	4,53	59,8413	4,34	57,3314
13,28			4,34	57,6352	4,53	60,1584	4,34	57,6352
13,35			4,34	57,939	4,53	60,4755	4,34	57,939
13,42			4,34	58,2428	4,53	60,7926	4,34	58,2428
13,50			4,34	58,59	4,53	61,155	4,34	58,59
13,57			4,34	58,8938	4,53	61,4721	4,34	58,8938
13,64			4,34	59,1976	4,53	61,7892	4,34	59,1976
13,71			4,34	59,5014	4,53	62,1063	4,34	59,5014
13,78			4,34	59,8052	4,53	62,4234	4,34	59,8052
13,85			4,34	60,109	4,53	62,7405	4,34	60,109
13,92			4,34	60,4128	4,53	63,0576	4,34	60,4128
14,00			4,34	60,76	4,53	63,42	4,34	60,76
14,07			4,34	61,0638	4,53	63,7371	4,34	61,0638
14,14			4,34	61,3676	4,53	64,0542	4,34	61,3676
14,21			4,34	61,6714	4,53	64,3713	4,34	61,6714
14,28			4,34	61,9752	4,53	64,6884	4,34	61,9752
14,35			4,34	62,279	4,53	65,0055	4,34	62,279
14,42			4,34	62,5828	4,53	65,3226	4,34	62,5828
14,50			4,34	62,93	4,53	65,685	4,34	62,93
14,67			4,34	63,6678	4,53	66,4551	4,34	63,6678
14,64			4,34	63,5376	4,53	66,3192	4,34	63,5376
14,71			4,34	63,8414	4,53	66,6363	4,34	63,8414
14,78			4,34	64,1452	4,53	66,9534	4,34	64,1452
14,85			4,34	64,449	4,53	67,2705	4,34	64,449
14,92			4,34	64,7528	4,53	67,5876	4,34	64,7528
15,0	3,9039	58,5585	4,34	65,1	4,53	67,95	4,34	65,1

Fonte: Elaborada pelo pesquisador com dados provenientes de orçamentos em anexo

Observando a tabela acima, assinalamos e circulamos, em amarelo, o menor valor de perfis por metro referente ao industrializado W150 x 13,0 kg/m. O valor assinalado e circulado em vermelho representa o limite de preço, pois já é referente ao pilar customizado seguinte W200 x 15,0 Kg/m. As colunas marcadas e circuladas em verde se referem a valores por metro, inferiores ao valor limite do perfil W200 x 15,0 Kg/m, mas com possibilidade de carregamento estrutural superior ao perfil industrializado inicial W150 x 13,0 kg/m.

Nessa tabela 4, verificamos quatro tipos de perfis I metálicos: um industrializado extrudado e três cortados e soldados em três chapas (3/16, 1/4 e 11). Na quarta, na sexta e na oitava colunas, há o peso por metro linear do pilar a ser utilizado, que é diretamente proporcional à carga suportada por ele.

Na coluna dos perfis industrializados, há o valor do perfil W150 x 13,0 por quilograma e, ao fim, o custo do perfil W200 x 15,0. Foram escolhidas três

espessuras diferentes de chapas, porque a espessura delas e a da alma dos perfis produzidos em série muito provavelmente não vão coincidir com a espessura das chapas utilizadas para fabricar os perfis soldados customizados. Com isso, criaremos uma gama maior de possibilidades projetuais.

A tabela continua sendo completada com custos por quilograma para os perfis customizados, soldados nas chapas 3/16, 1/4 e 11, com os valores por quilograma e por metro. Os orçamentos se encontram nos anexos 2, 3 e 4 desta dissertação e podem elucidar os devidos custos inseridos na tabela apresentada na tabela em foco.

Dessa forma, esta pesquisa poderá contribuir para a comprovação da hipótese de customização em massa no setor da construção civil na cidade de Brasília e em seu entorno.

6 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos na testagem demonstram que a customização em massa de componentes construtivos é viável técnica e economicamente no Distrito Federal. Além disso, outras possíveis vantagens podem ser observadas, tais como: maior eficiência estrutural e construtiva por meio da diminuição da quantidade de material e, por conseguinte, redução de desperdício.

O gráfico 2 mostra o percentual de vantagem financeira que teríamos ao utilizar um perfil customizado em comparação ao intervalo entre os perfis W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 kg/m, provenientes da produção serial em massa da tabela da Gerdau.

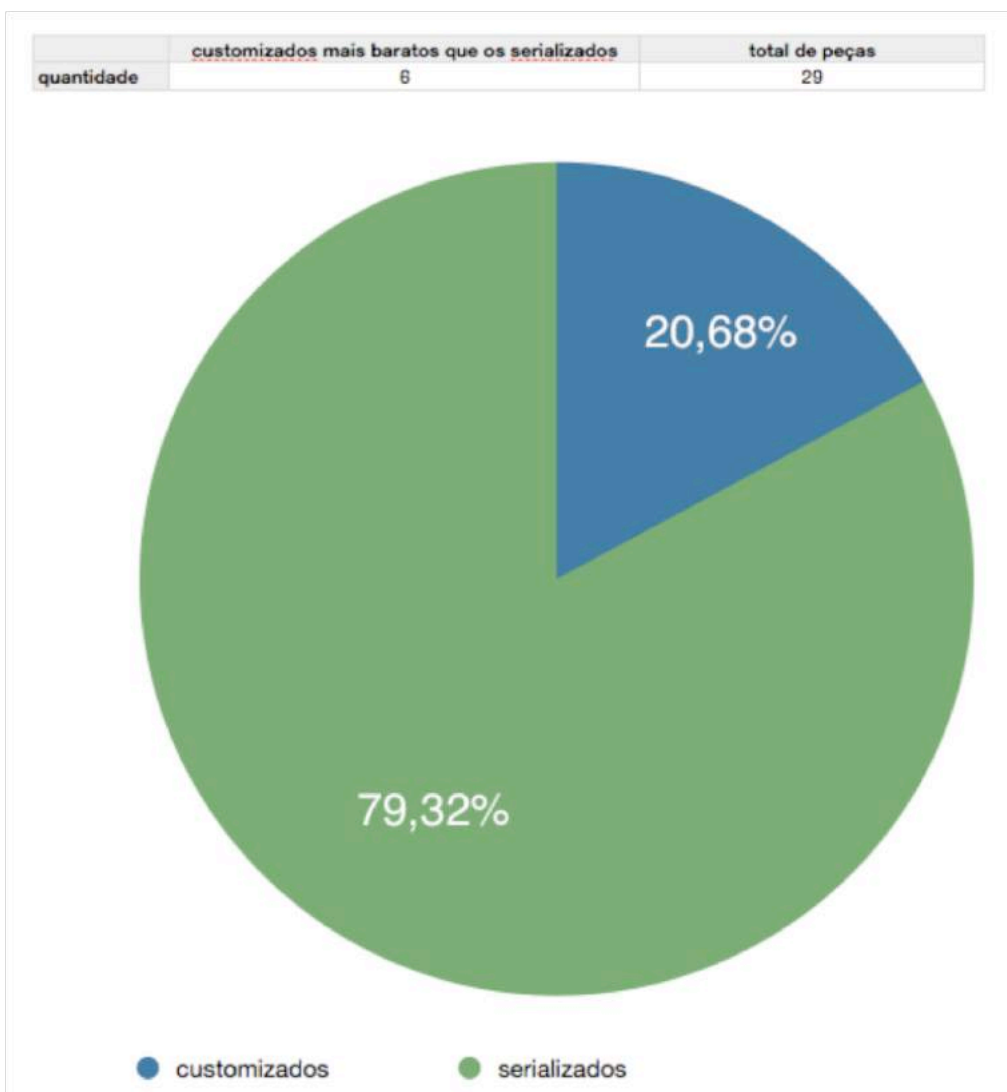


Gráfico 2: **Comparativo das vantagens de custo de perfil I**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador

Das 29 peças customizadas, seis atendem a necessidade estrutural e são mais baratas que as produzidas serialmente, como se compara na tabela 5.

Tabela 5: Comparação de valores dos perfis e cargas suportadas

Perfis	Peso kg/m	Valor/kg	Valor/m	Carga suportada/ton
Perfil serializado W150 x 13,0	13,0	3,7482	56,42	5,727
(Customizado B) mm x 13,07	13,07	4,34	56,7238	5,7615
(Customizado C) mm x 13,14	13,14	4,34	57,0238	5,796
(Customizado D) mm x 13,21	13,21	4,34	57,3314	5,8305
(Customizado E) mm x 13,28	13,28	4,34	57,6352	5,865
(Customizado F) mm x 13,35	13,35	4,34	57,939	5,8995
(Customizado G) mm x 13,42	13,42	4,34	58,2428	5,934
Perfil serializado W200 x 15,0	15,0	3,7482	58,5585	6,693

Fonte: Elaborada pelo pesquisador

Ao se observar essa tabela, constatamos que, caso a carga suportada pelo pilar exceda o valor de 5,727 toneladas do pilar serializado W150 x 13,0 mas não ultrapasse 6,693 toneladas do pilar (Customizado G) mm x 13,42, poderemos customizar pilares com valores inferiores ao próximo perfil serializado W200 x 15,0 que suporta 6,693 toneladas. Isso ocorre porque o preço dos pilares customizados ficariam entre 56,7238 e 58,2428 reais por metro linear, valor inferior ao perfil serializado W200 x 15,0 de 58,5585 reais por metro linear.

Utilizamos os resultados da tabela 4 para determinar o percentual de peças customizadas que atendem a necessidade estrutural com valor por metro linear mais barato que o dos perfis W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 kg/m serializados. Para tanto, a fórmula de cálculo utilizada foi:

<p>Percentual de vantagem = Número de peças customizadas mais baratas que as seriais / Quantidade total de peças</p> <p>Percentual de vantagem = 6 / 29</p> <p>Percentual de vantagem = 0,2068...</p>
--

Ao utilizarmos perfis "I", customizados com chapas 3/16 e 11 polegadas, conseguimos atender as necessidades estruturais e baratear 20,68% das vezes,

pois se a força normal que o pilar precisa suportar for maior que 5,727 toneladas, deve-se escolher o pilar serializado seguinte que suporta 6,693 toneladas. No entanto, caso a força normal de carregamento do pilar esteja entre o intervalo de 5,727 e 6,693 toneladas, pode-se customizar perfis “I” que atendam as necessidades estruturais desejadas.

No intervalo de carregamento 13,07 a 13,42 Kg/m, a serialização de perfis “I” apresentam valores por metro menores que o perfil serializado seguinte W200 x 15,0 Kg/m da tabela da Gerdau. É mais barato utilizar um perfil “I” customizado entre as cargas suportadas pelos perfis W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 Kg/m em mais de 20% das vezes. Custos indiretos, como de armazenagem, de transporte e outros, não foram levados em consideração, mas poderiam aumentar esse percentual de economia.

A lacuna entre um perfil I serializado e o seguinte pôde ser preenchida por um perfil “I” customizado (tabela 6), pois observamos que, dos 29 perfis customizados, entre os serializados W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 Kg/m, seis deles podem suportar cargas maiores que o W150 x 13,0 Kg/m, de forma mais econômica que utilizar o próximo perfil W200 x 15,0 Kg/m com chapa 3/16 e 11 polegadas. Podemos observar os referidos custos nas tabelas desta dissertação.

Tabela 6: **Comparação econômica de utilização dos perfis customizados**

Carga suportada/ton	Perfis Customizados	Valor/m	Perfil Serializado	Valor/m	Economia financeira
5,7615	(Customizado B) mm x 13,07	56,7238	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	3,133%
5,796	(Customizado C) mm x 13,14	57,0238	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	2,614%
5,8305	(Customizado D) mm x 13,21	57,3314	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	2,096%
5,865	(Customizado E) mm x 13,28	57,6352	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	1,577%
5,8995	(Customizado F) mm x 13,35	57,939	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	1,058%
5,934	(Customizado G) mm x 13,42	58,2428	Perfil serializado W200 x 15,0	58,5585	0,539%

Fonte: Elaborada pelo pesquisador

Na tabela acima, foi feita uma comparação entre pilares serializados e customizados com menores valores por metro linear, que suportam determinadas cargas e a economia em percentual ao utilizarmos perfis customizados.

Ao analisarmos a tabela 4, podemos constatar que, se carregarmos o perfil I com cargas entre 5,7615 e 6,6585 toneladas, obrigatoriamente teremos que utilizar o perfil W200 x 15,0 Kg/m serializado. No entanto, nesse mesmo caso, podemos customizar perfis que atendam o carregamento desejado. Essa vantagem, em relação à redução de custo referida no parágrafo anterior, se refere ao percentual de vezes em um total de 100% em que se pode customizar um elemento e obter ganhos financeiros diretos.

No processo de padronização em série, os componentes construtivos são produzidos diante de uma expectativa de venda e uso, que frequentemente não se concretizam integralmente resultando em perdas de componentes e aumento dos custos.

Outras vantagens que ressaltamos são: a possibilidade de um melhor aproveitamento dos recursos naturais, maior objetividade, organização e limpeza do canteiro de obras, menor tempo despendido durante a construção *in loco* e diminuição ou até mesmo a inexistência de re-trabalho. Ressaltamos, porém, que ensta dissertação nos restringimos ao custo, ao dimensionamento dos componentes estruturais e ao desperdício de material.

Várias são as consequências possivelmente sugeridas por esta pesquisa, por meio da utilização da projeção e fabricação digitais, dentre elas a possibilidade de redução dos excedentes de componentes não vendidos e redução da prática atual de super-dimensionamento de componentes estruturais feita pelos profissionais de arquitetura e engenharia de super-dimensionamento de componentes estruturais. Atualmente esta prática ocorre em função das limitações dos produtos seriais existentes no mercado.

Os gráficos 1 e 3 apresentam uma comparação percentual de peso e de custo entre perfis "I" customizados (B, C, D, E, F e G) e o perfil "I" serializado industrial W200 x 15,0 Kg/m. O gráfico 3 mostra que a produção de componentes, utilizando a customização em massa, tende a reduzir significativamente os desperdícios provenientes de peso estrutural, além de operar com custos iguais ou inferiores aos advindos da produção serial.

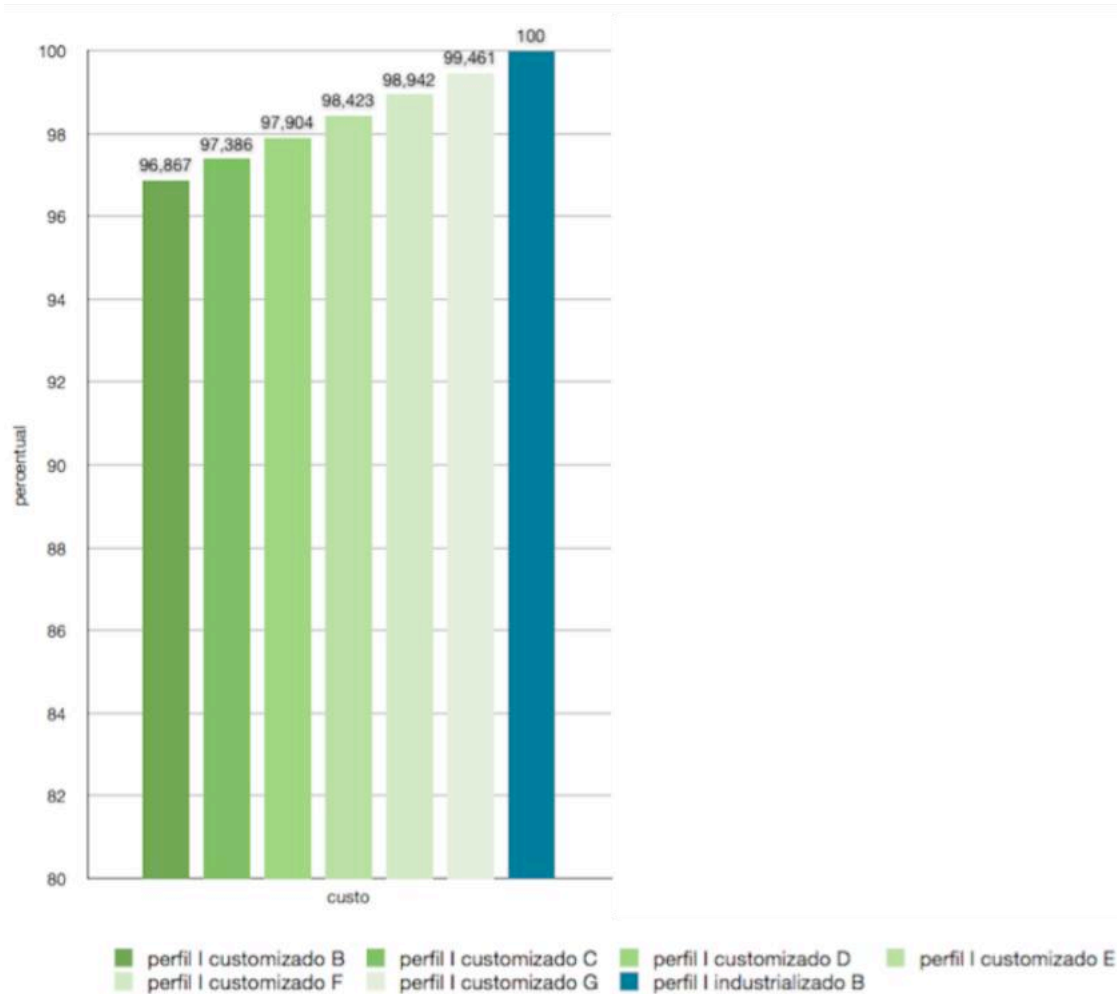


Gráfico 3: **Comparativo de custo entre perfis customizados e serializados**
 Fonte: Elaborado pelo pesquisador

A partir do gráfico 2, podemos constatar uma economia na adequação estrutural nos perfis customizados entre 10,533 e 12,867%. Esta redução de peso próprio dos perfis gera uma economia de matéria prima além de criar uma carga menor para a fundação da edificação. Além disso, componentes construtivos do projeto só serão produzidos no momento de sua necessidade específica. Esse processo ocorreria em substituição ao atual que exige a formação de algum tipo de estoque ou previsão de demanda.

O gráfico acima demonstra de forma clara um ganho em relação à esbeltez da estrutura, implicando em uma significativa redução no custo da edificação (estoque, fundação, transporte e outras), além dos ganhos apresentados em análise posterior. Esses resultados respondem à questão de pesquisa proposta neste trabalho.

Ao compararmos o custo constante do gráfico 3, observamos uma economia financeira entre 0,539 e 3,133%. Ainda que esse percentual seja pouco expressivo, outros custos, como o da fundação, podem ser reduzidos com a diminuição do peso da estrutura dos pilares na edificação, além do transporte.

7 CONCLUSÃO

Ao observarmos os resultados obtidos nos testes elaborados, constatamos que, ao utilizar perfis customizados no lugar de perfis serializados, entre os perfis W150 x 13,0 kg/m e W200 x 15,0 Kg/m, aço ASTM A 572 Grau 50, podemos reduzir os custos em mais de 20% das vezes, com a diminuição do valor entre 0,539 e 3,133%. Além disso, haverá uma diminuição relativa de peso estrutural entre 10,533% e 12,867%. Portanto, com o uso dos métodos provenientes de processos customizados de produção em massa, podemos atender, de forma mais precisa, o sistema estrutural, obtendo redução considerável de custos.

A produção de perfis customizados, satisfazendo o mesmo carregamento estrutural dos perfis serializados, porém com custo inferior a esses últimos, demonstra que a hipótese proposta nesta dissertação é promissora. Com isso, este estudo poderá contribuir para uma mudança no método de projeção e de construção atuais, ainda largamente baseado em princípios repetitivos e padronizados de produção de componentes.

Assim, respondendo ao problema desta pesquisa, a customização em massa contribuirá para reduzir o custo da construção, aumentar a eficiência de utilização de matéria prima, precisão estrutural, e redução do peso próprio da edificação, atendendo a uma nova tectônica arquitetônica.

O conceito e a prática de fabricar componentes arquitetônicos customizados por meio de fabricação digital em estabelecimentos industriais é agora uma realidade na cidade de Brasília. Os arquitetos podem fabricar componentes customizados do edifício fora do local da obra, não se restringindo, no entanto, a um projeto modular como acontecia na arquitetura moderna, pois o mercado detém nos dias atuais meios de produzir elementos diferentes com preços iguais ou menores que elementos serializados.

Apesar da indústria da construção civil dispor de tecnologias de fabricação digital e prototipagem rápida. A utilização delas por parte de arquitetos e construtores ainda parece ser baixa ou inexistente no mercado brasileiro. Isso se deve talvez à falta de conhecimento destas tecnologias ou até mesmo às

construções baseadas na pré-fabricação serial ou repetitiva de componentes. Uma maneira de modificar esse modo de pensar ou agir vai depender dos próprios arquitetos e da nova concepção tectônica da arquitetura contemporânea.

Nesse sentido, esta dissertação poderá contribuir para introduzir novas ideias e conceitos para que, em um futuro próximo, se desenvolva uma arquitetura condizente com os métodos de fabricação existentes no mercado de Brasília.

As tecnologias envolvendo maquinário e sistemas de controle numérico computacional, entre outros, utilizadas em empresas como a Gravia, entre tantas em Brasília, podem produzir componentes específicos para cada projeto, com um custo frequentemente inferior aos produzidos em série pela indústria.

Além do custo, há outro aspecto a ser considerado: muitas vezes, a customização é necessária, devido às formas complexas dos componentes arquitetônicos. Observa-se que, dependendo da estrutura, seus custos podem ser reduzidos se utilizarmos processos de customização de elementos construtivos em massa em um projeto arquitetônico.

Esses componentes são produzidos com qualidade similar aos componentes serializados. Isso porque o processo de criação de objetos arquitetônicos pode utilizar tecnologias tais como CNC, reduzindo erros de interpretações, de imprecisão e aqueles provenientes da má qualidade da mão de obra local, além de oferecer maior fidelidade aos componentes projetados.

A mudança do paradigma tecnológico na arquitetura dos dias atuais é uma realidade que não pode ser ignorada. Modelos arquitetônicos consistentes, contínuos e dinâmicos substituirão condições estáticas dos processos arquitetônicos e construtivos convencionais, bem como a utilização de pré-fabricados. A arquitetura será transformada por meio de processos de criação e de desenvolvimento da forma, através de uma análise mais rápida e direta.

Ressalte-se, ainda, a adoção da não linearidade relacionada à realidade dos eventos que não ocorrem de forma sequencial e contínua, ao explorarem a casualidade no modo de pensar. Tais eventos são refletidos nas formas da arquitetura contemporânea. As formas orgânicas e contínuas possibilitam maior interação entre os espaços em um projeto de arquitetura, apesar de essas serem muitas vezes desmembradas em elementos menores lineares e ortogonais.

A diferença entre os novos métodos de produção, baseados em modelos digitais, e os antigos, produzidos em massa, é que eles não se destinam a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constituem-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes, com custos, pelo menos, iguais aos elementos arquitetônicos executados em série.

Entendemos, ainda, que se escolhermos perfis com séries mais espaçadas entre si, os percentuais observados em relação ao peso e custos serão maiores. Ou seja, uma série de perfis com pesos espaçados permitiriam vantagens financeiras e estruturais maiores se forem utilizados elementos customizados.

Os *softwares* de modelagem digital, aliados às ferramentas de produção, vêm possibilitando a criação de formas cada vez mais complexas, economicamente viáveis e com características de racionalidade. Essas mudanças têm contribuído para que surjam novas formas de projetar em arquitetura, resultando em métodos que aproveitam melhor os recursos computacionais e naturais. A aplicação dos processos de projeção gera outras formas de conceber os espaços, os quais, por sua vez, propiciam novas linguagens plásticas na arquitetura. A abordagem atual de projeção requer que a tecnologia empregada, tanto na concepção quanto na produção dos artefatos arquitetônicos, se adeque a cada projeto, em vez de requerer que esse se adeque a uma tecnologia predefinida e tradicional.

A nova arquitetura utiliza uma gama de formas curvas, impossíveis de serem construídas com a utilização de métodos construtivos tradicionais, provenientes da serialização e amplamente difundida pelo movimento moderno. A arquitetura, ao longo de sua história, além de expressar os aspectos culturais e filosóficos de cada período, demonstra, com grande veemência, o patamar tecnológico de sua época. No entanto, podemos observar um certo atraso na arquitetura brasileira que, de certa forma, rejeita o que não conhece ou aquilo do qual não tem domínio, fundamentando, na cultura arraigada do concreto armado, seu modo de pensar, de projetar e de construir. Nos dias atuais, utilizamos máquinas controladas por computador em várias de nossas indústrias.

Se por um lado, essa utilização na arquitetura ainda é muito pequena, por outro, a nova fase da arquitetura contemporânea, altamente complexa e curvilínea, não tem um estilo preestabelecido, pois depende muito da evolução dos meios construtivos para produzir novas espacialidades.

E é aí que se alcança o objetivo pretendido neste trabalho: ao utilizarmos máquinas controladas digitalmente, podemos fabricar formas complexas de componentes únicos e a um custo razoável, significando que a variedade não compromete o custo da produção.

E nessa perspectiva, para além do problema de pesquisa respondido, podemos afirmar que, em relação ao contexto no qual esse problema se insere, os recentes avanços tecnológicos, tanto dos *softwares* de modelagem como da indústria da construção civil, auxiliam a transformação e a redefinição de economias, de relações sociais, de produções culturais e, também, de outras áreas do conhecimento humano. Portanto, não há razão para a arquitetura insistir na padronização.

REFERÊNCIAS

ALAGBE, Made. **Materials science & manufacturing**. Disponível em: <http://www.csir.co.za/plsql/pTI0002/PTL0002_PGE005_DIVISIONS?DIVISION_NO=1000025> Acesso em: 20 ag. 2013.

AL HILAL. **Estádio Nacional de Pequim**. Escritório Herzog & de Meuron, 2008. Disponível em: <<http://www.architecturelist.com/2007/10/04/national-beijing-olympic-stadium-bird-nest/>>. Acesso: 5 mar. 2012.

ARAGUAIA. **Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes**. Disponível em: <http://araguaia2.ufmt.br/professor/disciplina_arquivo/96/20111108148.pdf>. Acesso em: 5 jan 2016.

ARCHINECT. **Cellular tessellation pavilion em Sidney**, 2014. Disponível em: <<http://archinect.com/features/article/117185429/student-works-cellular-tessellation-pavilion-lights-the-way-in-sydney>>. Acesso em: 10 jun 2016.

ARCHITECT. **Terminal Internacional de Waterloo**. Disponível em: <http://www.e-architect.co.uk/london/waterloo_station.htm>. Acesso em: 20 mar. 2012.

ARCHITECTURE. **Esquema de cortes para CNC router**. 2012. Disponível em: <<http://www.subdv.com/architecture/?p=1293&lang=pt>>. Acesso em: 11 abr 2012.

ARCHITECTURE. **London Aquatics Centre**. Disponível em: <<http://www.designboom.com/architecture/zaha-hadid-opens-london-aquatics-centre-to-the-public-02-26-2014>>. Acesso em: 10 jun 2016.

ARQUITETA. **Memorial Darcy Ribeiro**. Disponível em: <<http://arquitetablog.com.br/2011/06/joao-filgueiras-lima-lele.html>>. Acesso em: 3 jan 2012.

ARQUITETA. **Eli and Edyth Pbrad Art Museum**. Disponível em: <<http://arquitetablog.com.br/2011/06/joao-filgueiras-lima-lele.html>>. Acesso em: 3 jan 2012a.

ARQUITETA. **Estrutura do Heydar Aliyev Cultural Center**. Disponível em: <<http://buildipedia.com/aec-pros/from-the-job-site/zaha-hadids-heydar-aliyev-cultural-centre-turning-a-vision-into-reality>>. Acesso em: 3 jul 2016.

BALTAZAR, Ana Paula. **E-futuros: projetando para um mundo digital**. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp077.asp>>. Acesso em: 26 ag 2006.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON Jr., E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

BOZA, Luis Eduardo. **Digital fabrication**. Disponível em: <<http://archivtecture.vcu.edu/vacademicprograms/digitalfabrication.cfm>>. Acesso em: 23 ag 2010.

BRIDGES, A. H. A critical review of problem based learning in architectural education. **eCAADe**. 2006. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/data/works/att/sigradi2009_1079.content.pdf>. Acessado em: 12 jun 2014.

CAMBRIDGE. **Terminal TWA**. Disponível em: <<http://www.cambridge2000.com/gallery/html/P73127481e.html>> Acesso: 21 ag. 2011.

CARBODY DESIGN. **Modelo tridimensional de automóvel**. 2011. Disponível em: <<http://www.carbodydesign.com/2011/05/pininfarina-coupe-concept/>> Acesso em: 10 maio 2012.

CARPINTERO, Antônio Carlos; REIS FILHO, Nestor Goulart; TANAKA, M. S. Brasília: Algumas notas sobre urbanização dispersa e novas formas de tecido urbano. In: REIS, Nestor Goulart; TANAKA, Marta Soban (Org.). **Brasil. Estudos sobre dispersão urbana**. São Paulo: FAU-USP/LAP/FAPESP, 2007.

CELANI, M. G. C. **Um algoritmo palladiano. Palladio e o neoclassicismo**. Porto Alegre, 2003. **Anais Palladio e o Neoclassicismo**. Porto Alegre: PUC, 2003.

CHRISTOPHER, Alexander. **The linz café**. New York: Oxford University Press, 1981.

COISAS DA ARQUITETURA. **Fábrica de Turbinas AEG/Fábrica Fagus**. 2011. Disponível em: <<http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2011/09/29/o-estilo-internacional>> Acesso: 1 jan. 2012.

CORBUSIER, Le. **Towards a new architecture**. New York: Dover Publications, 1931.

CORSER, Robert. **Fabricating architecture**. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

CRITICALISMO. **Estrutura em formas de cogumelo do arquiteto alemão Jurgen Mayer**. Disponível em: <<http://criticalismo.com.br/2011/09/experimenting-in-public-metropol.html>> Acesso em: 24 set 2011.

DAVIS, M. **Planeta favela**. São Paulo: Boitempo, 2006.

DESIGN NEWS. **Protótipo da estrutura de um navio**. Disponível em: <<http://www.designnews.com/author.asp?section>> Acesso em: 15 fev. 2012.

DESPORTOVIAJAR. **Cairo**. Egito. Disponível em: <<https://desportoviajar.wordpress.com/category/egito/cairo/gezira/torre-do-cairo/>> Acesso em: 10 jul. 2016.

DEZEEN. **Jockey Club Innovation Center**. Disponível em: <<http://www.dezeen.com/2013/innovation-tower-at-hong-kong-polytechnic>> Acesso em: 10 jun 2016.

DIGITAL ARCHITECTURE. **Greg Lynn Embriological House**. 2007. Disponível em: <<http://iaac-igitalarchitecture.com>> Acesso em: 10 dez 2011.

DONGDAEMUN. **Dongdaemun Design Plaza**. Disponível em: <<http://english.seoul.go.kr/dongdaemun-design-plaza-park-2/>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

EASTMAN, Charles M. **BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

EFE. **Fachada do Palácio de Cristal em Londres**. 2009. Disponível em: <<http://12-efe.com/2009/04/o-palacio-de-cristal.html>> Acesso em: 12 mar 2011.

ENORA. **Croquis edifícios da Pampulha**. Disponível em: <<http://www.enora.com.br/artigos/oscar-niemeyer-leveza-iconica>> Acesso em: 10 jan 2015.

FLICKR. **Interior da Igreja de Saint-Séverin**. Disponível em: <<http://www.flickr.com/photos/jmvnoos/3137858029/lightbox/>>. Acesso em: 20 jan 2012.

FOSTER PARTNERS. **Architecture & integrated**. Disponível em: <<http://www.fosterandpartners.com/projects/>> Acesso em: 20 jun 2016.

FRAMPTON, Kenneth. **História crítica da arquitetura moderna**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2015.

FRANKEN-ARCHITEKTEN. **BMW Exhibition for Expo 2000**. Disponível em: <<http://www.franken-architekten.de/index.php?pagetype=projectdetail&lang=en&cat=1¶m=philosophy¶m2=215¶m3=0&>> Acesso em: 20 nov 2013.

GERDAU. **Bitolas perfil I aço ASTM A 572 Grau 50**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/products/services/products/Document%20Gallery/Tabela%20de%20Bitolas.pdf>>. Acesso em: 5 jan 2016.

GRAMAZIO, Fabio. **Digital materiality in architecture: Gramazio & Kohler**. Zurich: Lars Muller Publishers, 2008.

INHABIT. **Wangjing Soho**. Disponível em: <<http://inhabitgroup.com/2014/04/prc-beijing-wangjing-soho/>>. Acesso em: 10 jun 2016

IWAMOTO, Lisa. **Digital fabrications. Architecture and material techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

JOHNSON, Scott. **Various digital fabrication projects**. Disponível em: <<http://www-personal.umich.edu/~sven/portfolio/fab/fab.html>> Acesso em: 24 ag 2011.

KLINGER, Kevin R. **Digital fabrication exhibit**. Disponível em: <<http://www.acadia.org/dde>> Acesso em: 28 ag 2010.

KRIPKA, Moacir. **Análise estrutural para Engenharia Civil e Arquitetura**. São Paulo: Pini, 2011.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age**. Design and manufacturing. New York: Taylor&Francis Group, 2003.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2006.

LIFSON, Edward. **Peças metálicas da obra da Clínica Lou Ruvo em Cleveland**. 2010. Disponível em: <<http://edwardlifson.com.br/2009/12/gehry-in-desert.html>> Acesso: 5 ag 2011.

LIU, Yu-tung. **Diversifying digital architecture**. Switzerland: Birkhäuser, 2004.

LYNN, G. **Folds, bodies & blobs**. Bruxelles:La Lettre Volée, 1998.

LYNN, Greg. **Animate form**. Princeton: Princeton Architecture Press, 1999.

MADLAB. **Router de 3 eixos, método subtrativo de produção**. Disponível em: <http://www.madlab.cc/madmashmaker-cmu-precollege-digital-fabrication-with-architectures-future>. Acesso em: 20 maio 2012.

MCCLUSKEY, Jerome. **Digital fabrication**. Disponível em: <http://www.indianainnovation.com/topics/di_fa.asp> Acesso em: 27 ag 2010.

MITCHELL, Willian. **Prototyping**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.

MITCHELL, Willian. **World's greatest architect: making, meaning, and network culture**. Cambridge: MIT Press, 2008.

MORALES, Ignasi De Sola. **Differences: topographies of contemporary architecture** Cambridge: MIT Press, 1997.

MUNT, Alex. **Digital fabrication**. Disponível em: <http://scan.net.au/scan/magazine/display.php?journal_id=45> Acesso em: 22 ag 2006.

MUSTOE, Julian. **Artificial intelligence and its application in architectural design**. Tese (Doutorado em Arquitetura) 1990. Glasgow. University of Strathclyde.

NIEMEYER, Oscar. **A forma na arquitetura**. Rio de Janeiro: Revan, 2005.

NIEMEYER, Oscar. **As curvas do tempo**. Memórias. 7 ed. Rio de Janeiro: Revan, 2000.

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

ORCIUOLI, Affonso; MASSAD, Fredy; YESTE, Alicia Guerrero. Gêiser Policromo. **Revista Au**. 2006; 21 (143), mensal.

PESSOA, Diogo Fagundes. Catedral de Brasília: histórico de projeto/execução e análise da estrutura. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**. 2002; 2 (2): 21-30.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático. 7a ed. Rio de Janeiro. LTC, 2000.

PICON, Antoine. Digital Culture in Architecture. 1st ed. Swiss: Birkhäuser Architecture, 2010.

PONOKO. **Máquina de corte 2 eixos, fabricação bidimensional**. Disponível em: <<http://ponoko.com/2011/10/16/what-the-cnc-is-a-zome/>> Acesso em: 18 set. 2011.

PUPO, R. T. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura**. Tese, 240 p. (Doutorado). 2009. Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e

Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas.

RAHIM, Ali. **Contemporary techniques in architecture**. London: Wiley Academy, 2002.

RAHIM, Ali. **Catalytic formations**. Architecture and digital design. New York: Taylor&Francis Group, 2006.

RICE, James R. **Solid mechanics**. Disponível em: <http://esag.harvard.edu/rice/e0_Solid_Mechanics_94_10.pdf> Acessado em: 1º fev 2016.

ROBBINS, Edward. **Why architects draw**. MIT: the MIT Press. Atlanta: Spi, 1994.

ROCKER, I. M. Calculus-based form: an interview with Greg Lynn. **Architectural Design**. 2006; 76(4).

RUSKIN, Thomas. **The nature of the gothic**. Londres: Penguin, 1985

SALVADORI, Mário. **Por que os edifícios ficam de pé**. São Paulo, Martins Fontes, 2011.

SANFRATELLO. **Artefatos criados por uma impressora 3d de concreto**. Disponível em: <<http://www.rael-sanfratello.com/?p=916>>. Acesso em: 10 mar 2012.

SHODECK, Daniel L. **Digital design and manufacturing: CAD/CAM applications in architecture and design**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

SILVA JÚNIOR, Félix Alves da. **O uso de algoritmos e de sistemas paramétricos na concepção arquitetônica de pequenas residências**. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de Brasília.

SILVA, Neander Furtado. **A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa obre um caso brasileiro**. Disponível em: <http://cumincad.scix.net/data/works/att/sigradi_2009_1079.content.pdf> Acessado em: 11 abr 2015.

SLAATTA, Tore. **Urban screens: towards the convergence of architecture and audiovisual media**. Disponível em: <http://firstmonday.org/issues/special11_2/slaatta/index.html> Acesso em: 20 ag 2006.

SILVA, Isabel. **Nova Delhi**. Disponível em: <<http://isabelsilvaphotography.com.br/2012/09/india-nova-deli.html>>. Acesso 10 jul. 2016.

STEELE, James. **Architecture and computers, action and reaction in the digital design revolution**. London: Laurence King Publishing, 2001.

TIMBERLAKE, James. **Refabricating architecture**. New York: McGraw-Hill, 2003.

TOYOTA. **Peça criada para automóveis Toyota utilizando máquinas CNC**. Disponível em: <<http://www.toyota-motorsport.com/en/services-en/engine-design-development-en/engine-design-en>> Acesso em: 19 maio 2012.

VARIOUS ARCHITECTS. **Protótipo sendo retirado de uma impressora 3d.** Disponível em: <<http://variousarchitects.no/detail>> Acesso em: 11 jan. 2012.

VISITITALY. **Santa Maria del Fiore em Florença.** Disponível em:<<http://www.visititaly.com/community/tuscany>> Acesso em: 22 jan 2012.

VITRUVIUS. **Diagrama de Fischer e Herr.** Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>> Acesso em: 20 jun 2016.

VITRUVIUS. **BMW Pavilion de Bernard Franken, de 1999.** Disponível em:<<http://www.vitruvius.com.br/media/images/magazines.jpg>> Acesso em: 12 mar 2012.

WALLPAPER. **Torre Eiffel.** Disponível em: <<http://3.bp.com/KkE49II58nl/TRtuTRPj7kl/AAAAAAAAAH4/NxCcOKc5Wmk/s1600/>> Acesso em: 7 out. 2011.

WEISSER-BOREL, Cordula. **Digital fabrication.** Disponível em: <<http://www.wag-architecture.co.uk/?p=154>> Acesso em: 25 ag 2010.

WHITELAW, John Christopher. **Digital fabrication.** Disponível em: <http://www.arch.columbia.edu/gsap/41409///?data=true!work!current_coursework.php?> Acesso em: 19 ag 2012.

WHYTE, Jennifer. **Virtual reality and the built environment.** Oxford: Architecture Press, 2002.

ZAHA HADID. **Architects.** Disponível em: <<http://www.zaha-hadid.com/archive>> Acesso em: 19 ag 2012.

ANEXOS

Anexo 1



PERFIS ESTRUTURAS GERDAU TABELA DE BITOLAS

**GERDAU**

PROPRIEDADES MECÂNICAS

	ASTM A 573 Grau 50	ASTM A 573 Grau 60*	ASTM A 902*	AQ3 CQ3 500*	ASTM A 331 A302*	ASTM A 331 A302*
Limite de Escoamento (MPa)	345 mPa	415 mPa	345 a 450	370 mPa	315 mPa	315 mPa
Limite de Resistência (MPa)	490 mPa	520 mPa	490 mPa	520 mPa	440 a 520	440 a 520
Alongamento após ruptura (%)	18 mPa	16 mPa	38 mPa	38 mPa	38 mPa	19 mPa

*Referencial.

As especificações da especificação dos eixos são as mesmas para os produtos, isto é, AP 300 e AP 250 CQ36, referindo-se.

NOTAS

- 1) Variação de massa linear: + 2% - - 2,5% para bobas com massa linear maior que 140 kg/m e +/- 2,5% para as demais bobas.
- 2) Materiais certificados para uso naval, produzidos sob ensaio.
- 3) Perfil distribuído ao mercado sempre com solda CE Marking (CQ3536 e 505336, em atendimento à norma EN 10225-2) e ao mercado especializado com solda BSAH 3011 (736 e 706, em atendimento à norma EN 10225-2), produzidos sob ensaio.

VENDEDAS

SÃO PAULO

Tel: (11) 2084-9070

Tel: (11) 2084-9080

Fax: (11) 2084-9080

E-mail: saopaulo@gerdau.com.br

BRASÍLIA

Tel: (61) 4005-8000

Tel: (61) 4005-8000

Fax: (61) 4005-8000

E-mail: brasilia@gerdau.com.br

SÃO JOÃO DEL REI

Tel: (31) 3084-7000

Tel: (31) 3084-7000

Fax: (31) 3084-7000

E-mail: saojoaodelrei@gerdau.com.br

CELESTINO DE OLIVEIRA

Tel: (41) 4005-8000

Tel: (41) 4005-8000

Fax: (41) 4005-8000

E-mail: celestinodeoliveira@gerdau.com.br

RECIFE / PERNAMBUCO

Pernambuco

Tel: (51) 3400-7000

Tel: (51) 3400-7000

Fax: (51) 3400-7000

BOA VISTA

Tel: (71) 3084-1000

Tel: (71) 3084-1000

Fax: (71) 3084-1100

E-mail: boavista@gerdau.com.br

PIAUÍ

Rua Osvaldo do Siqueira

Tel: (31) 3400-7000

Tel: (31) 3400-7000

Fax: (31) 3400-7000

PERNAMBUCO

Tel: (41) 3084-1000

Tel: (41) 3084-1000

Fax: (41) 3084-1000

E-mail: pernambuco@gerdau.com.br



GERDAU

www.gerdau.com.br

Anexo 2

GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

Data: 01/04/16

Cotação de Preços

Hora: 11:22:54

COTAÇÃO

Identificação do Estabelecimento Emitente

Denominação: GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

CNPJ: 26.487.744/0004-19

Identificação do Destinatário

Nome: .

CNPJ/CPF: 0

Telefone:

Endereço: . 0

Bairro:

Cidade: - DF

Nº do Pedido: 000001456594

Tipo: Loja

Vendedor: 114-JOSEMAR DE SOUZA SANTOS

Telefone: 33559063

E-mail:

ORÇAMENTO VÁLIDO ATÉ 11/04/2016 PARA DISTRITO FEDERAL

Após a data de validade do orçamento, os valores podem ser alterados

Código	Descrição	Qtde	Vlr. Unit	Final	Peso Total (KG)	Vlr. KG	Vlr. Total
20000003250	CHAPA LISA # 3/16 SAC/COR 6000X1200MM	1,00(PEÇ)	1.014,07		268,98(KG)	3,7701	1.014,07
20000003600	CHAPA LISA # 1/4 SAC/COR 6000X1200MM	1,00(PEÇ)	1.455,56		356,75(KG)	4,0801	1.455,56
20000002790	CHAPA LISA # 11 SAC/COR 6000X1200MM	1,00(PEÇ)	664,25		169,88(KG)	3,9101	664,25

Total Peso(KG): 795,61

SubTotal: 3.133,88

Desconto: 0,00

Entrega: 0,00

Acréscimo: 0,00

Total: 3.133,88

Item	Plano	Forma Pagto	Valor	Vlr. Entrada	Vlr. Acréscimo	Vlr. Total
01	0000 - A VISTA	DINHEIRO	3.133,88	0,00	0,00	3.133,88

Observação:

Notificação Material Sob Encomenda

A manutenção do produto sob encomenda, junto ao estabelecimento da Gravia não configura nenhuma forma de depósito.

O consumidor autoriza privar e expressamente a doação para uma entidade de caridade ou a venda daquele produto caso ele não seja retirado dentro do prazo de 120 (cento e vinte) dias.

Vendedor

Autorizado por _____

Cargo _____ Data ____/____/____

CPF _____

Assinatura _____

Anexo 3

GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

Data: 01/04/16

Cotação de Preços

Hora: 11:29:47

COTAÇÃO

Identificação do Estabelecimento Emitente

Denominação: GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

CNPJ: 26.487.744/0004-19

Identificação do Destinatário

Nome: DIOGO GOMES FERREIRA SANTOS

CNPJ/CPF: 610.118.861-20

Telefone: (61) 3224-2513

Endereço: SHIN QL 07 CJ 06 CASA 02. 2

Bairro: LAGO NORTE OI / QL

Cidade: BRASILIA - DF

Nº do Pedido: 000001456593

Tipo: Loja

Vendedor: 114-JOSEMAR DE SOUZA SANTOS

Telefone: 33559093

E-mail:

ORÇAMENTO VÁLIDO ATÉ 11/04/2016 PARA DISTRITO FEDERAL

Após a data de validade do orçamento, os valores podem ser alterados

Código	Descrição	Qtd	Vlr. Unit	Final	Peso Total (KG)	Vlr. KG	Vlr. Total
30000020180	VIGA I LAM W 150 x 13,0 - A572	500,00(PEÇ)	292,36		39.000(KG)	3,7482	146.180,00
30000020200	VIGA I LAM W 200 x 15,0 - A572	500,00(PEÇ)	351,35		45.000(KG)	3,9039	175.675,00
2247503000	CHAPA CORT # 3/16 S/E SAC/COR	33801,50(KG)	4,34		33.601,5(KG)	4,34	145.830,51
2263003000	CHAPA CORT # 1/4 S/E SAC/COR	59421,60(KG)	4,54		59.421,6(KG)	4,53	269.179,85
2230003000	CHAPA CORT # 11 S/E SAC/COR	25466,40(KG)	4,35		25.466,4(KG)	4,34	110.524,18

Total Peso(KG): 202.489,5

SubTotal: 847.389,54

Desconto: 0,00

Entrega: 0,00

Acréscimo: 0,00

Total: 847.389,54

Item	Plano	Forma Pagto	Valor	Vlr. Entrada	Vlr. Acréscimo	Vlr. Total
------	-------	-------------	-------	--------------	----------------	------------

Observação:

Notificação Material Sob Encomenda

A manufatura do produto sob encomenda junto ao estabelecimento da Gravia não configura nenhuma forma de depósito.

O consumidor autoriza prévia e expressamente a doação para uma entidade de caridade ou a venda daquele produto caso ele não seja retirado dentro do prazo de 120 (cento e vinte) dias.

Vendedor

Autorizado por _____

Cargo _____ Data ____/____/____

CPF _____

Assinatura _____

Anexo 4

GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

Data: 01/04/16

Cotação de Preços

Hora: 11:18:52

COTAÇÃO

Identificação do Estabelecimento Emitente

Denominação: GRAVIA INDUSTRIA DE PERFILADOS DE AÇO LT

CNPJ: 25.487.744/0004-19

Identificação do Destinatário

Nome: DIOGO GOMES FERREIRA SANTOS

CNPJ/CPF: 610.118.861-20

Telefone: (61) 3224-2513

Endereço: SHIN QL 07 CJ 06 CASA 02, 2

Bairro: LAGO NORTE QI / QL

Cidade: BRASILIA - DF

Nº do Pedido: 000001456593

Tipo: Loja

Vendedor: 114-JOSEMAR DE SOUZA SANTOS

Telefone: 33559093

E-mail:

ORÇAMENTO VÁLIDO ATÉ 11/04/2016 PARA DISTRITO FEDERAL

Após a data de validade do orçamento, os valores podem ser alterados

Código	Descrição	Qtd	Vlr. Unit	Final	Peso Total (KG)	Vlr. KG	Vlr. Total
30000020180	VIGA I LAM W 150 x 13,0 - A572	1,00(PEÇ)	292,38		78(KG)	3,7482	292,38
30000020200	VIGA I LAM W 200 x 15,0 - A572	1,00(PEÇ)	351,35		90(KG)	3,9039	351,35
22475030000	CHAPA CORT # 3/16 S/E SAC/COR	33,60(KG)	4,34		33,6(KG)	4,3399	145,82
22630030000	CHAPA CORT # 1/4 S/E SAC/COR	59,42(KG)	4,53		59,42(KG)	4,53	269,17
22300030000	CHAPA CORT # 11 S/E SAC/COR	25,47(KG)	4,35		25,47(KG)	4,34	110,54

Total Peso(KG): 206,49

SubTotal: 1.169,24

Desconto: 0,00

Entrega: 0,00

Acréscimo: 0,00

Total: 1.169,24

Item	Plano	Forma Pagto	Valor	Vlr. Entrada	Vlr. Acréscimo	Vlr. Total
------	-------	-------------	-------	--------------	----------------	------------

Observação:

Notificação Material Sob Encomenda

A manutenção do produto sob encomenda junto ao estabelecimento da Gravia não configura nenhuma forma de depósito.

O consumidor autoriza prévia e expressamente a doação para uma entidade de caridade ou a venda daquele produto caso ele não seja retirado dentro do prazo de 120 (cento e vinte) dias.

Vendedor

Autorizado por _____

Cargo _____ Data ____/____/____

CPF _____

Assinatura _____