



CENTRO UNIVERSITÁRIO FACVEST - UNIFACVEST
IASMIN STRAOBEL DA SILVA

DESIGN ESTRUTURAL – CONCRETO DE ESPESSURA ULTRAFINA

Lages
2020

IASMIN STRAOBEL DA SILVA

DESIGN ESTRUTURAL – CONCRETO DE ESPESSURA ULTRAFINA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Universitário
Facvest - Unifacvest, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenharia Civil.

Centro Universitário Facvest - Unifacvest

Supervisor: MSc. Aldori Batista dos Anjos

Lages

2020

DESIGN ESTRUTURAL – CONCRETO DE ESPESSURA ULTRAFINA

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Supervisor pedagógico do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Facvest – Unifacvest.

Lages, 17 de Dezembro de 2020.

Professor e Orientador MSc. Aldori Batista dos Anjos
Centro Universitário Facvest - Unifacvest

DEDICATÓRIA

Este trabalho de pesquisa é dedicado aos dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos: meus pais. Sem vocês nada seria possível.

Aos professores que me auxiliaram na germinação de ideias, crescimento profissional e pessoal no decorrer do curso de graduação.

RESUMO

O mundo vive de uma forma irreversível e, plenamente, necessária, um desenvolvimento grandioso das tecnologias e suas possíveis utilizações para a melhoria da qualidade de vida do homem. A implementação de ferramentas digitais representa uma grande virada, no que se refere à construção civil, trazendo facilidades e otimizando os projetos quanto ao tempo, materiais, durabilidade, economia, estética e questões ambientais. A implementação da arquitetura paramétrica e algorítmica permite que os modelos concebidos hoje em dia, tenham uma base em relações paramétricas do material utilizado. Paramétrico é um termo utilizado nas mais diversas disciplinas, indo da matemática ao design. O termo significa trabalhar com parâmetros variáveis - surge então o Parametricismo. O nome vem do inglês “Parametricism” e foi criado por Patrik Schumacher em sua obra “Manifesto Parametricista”, que foi inicialmente apresentado na Bienal de Arquitetura de Veneza no ano de 2008 e defende a tese central de que a arquitetura precisa reconstruir sua especificidade e poética própria, desligando-se de outras disciplinas. As obras parametricistas são marcadas pela variação, a diferenciação e a correlação, potencializados pelo uso das ferramentas oferecidas pelas novas tecnologias (modelagem e simulação digital). Paralelamente ao implemento do uso de computadores, o Método dos Elementos Finitos também se difundiu cada vez mais, sendo o principal método utilizado pelos softwares de cálculo e análise de estruturas. Uma alternativa fornecida por este método para a geração de superfícies curvas computacionalmente, é através da utilização de meshes, ou, malhas. O foco do presente trabalho é apresentar como a utilização de tecnologias altera positivamente a concepção de projeto, como o design estrutural pode otimizar uma estrutura e como o MEF pode ser utilizado como instrumento de ligação entre design e tecnologia.

Palavras-chave: concreto, espessura, ultra fina, método dos elementos finitos, design.

ABSTRACT

The world lives in an irreversible and, fully, necessary way, a great development of technologies and their possible uses to improve the quality of life of man. The implementation of digital tools represents a major turning point, not with regard to civil construction, bringing facilitations and optimizing projects in terms of time, materials, durability, economy, aesthetics and environmental issues. The implementation of the parametric and algorithmic architecture allows the models conceived today, to have a basis on parametric relationships of the material used. Parametric is a term used in the most diverse disciplines, ranging from mathematics to design. The term means working with parameters - variables - then Parametricism arises. The name comes from the English "Parametricismo" and was created by Patrik Schumacher in his work "Manifesto Parametricista", which was drawn up at the Venice Biennale of Architecture in 2008 and defends the central that architecture needs to reconstruct its specificity and its own poetics, disconnecting from other disciplines. Parametric works are marked by variation, differentiation and correlation, enhanced by the use of tools offered by new technologies (digital modeling and simulation). In parallel with the implementation of the use of computers, the Finite Element Method has also become increasingly widespread, being the main method used by the software for calculating and analyzing structures. An alternative foreseen for this method for the generation of computational curves, is the use of meshes, or meshes. The focus of the present work is to present how the use of technologies positively alters the design concept, how the structural design can optimize a structure and how the FEM can be used as a link between design and technology.

Key words: concrete, thickness, ultra thin, finite element method, design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porta dos Leões - Micenas.....	17
Figura 2 – Capela da Academia de Cadetes das Força Aérea dos Estados Unidos.....	18
Figura 3 – Centro Heydar Aliyev – Zaha Hadid	19
Figura 4 – Modelo CAD de câmara hiperbárica.....	25
Figura 5 – Malha Método dos Elementos Finitos	25
Figura 6 – Condições de carregamento e restrições.	26
Figura 7 – Resultados Deslocamento	26
Figura 8 – Protótipo NestHILO – estrutura concretada.....	27
Figura 9 – Protótipo NestHILO – manta têxtil – cofragem flexível	28
Figura 10 – Protótipo NestHILO – montagem da rede de cabos	29
Figura 11 – Projeto NestHILO 2021	29
Figura 12 – Projeto KnitCandela construído em 2018	30
Figura 13 – Projeto KnitCandela – processo de construção.....	31
Figura 14 – Projeto KnitCandela – projeto malha estrutural.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
BIM	Building Information Design
MEF	Método dos Elementos Finitos
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
NBR	Norma Brasileira
BRG	Block Research Group
ETH	Instituto Federal de Tecnologia de Zurich
NCCR	Centro Nacional Suíço de Competencia
ZHCODE	Grupo de Design Computacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO GERAL.....	11
2.1 Objetivos específicos	11
3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	12
3.1 Concreto Armado.....	12
3.1.1 História do Concreto Armado	12
3.2 O concreto Armado no Brasil	14
3.3 Aspectos Desfavoráveis do Concreto Armado	15
3.4 Início do Design Estrutural	16
3.5 Evolução do Design Estrutural e Surgimento do Parametricismo.....	18
3.6 Geometria Estrutural	21
3.6.1 Design Computacional	22
3.7 Método dos Elementos Finitos.....	24
3.7.1 Passos da análise de Elementos Finitos	25
3.8 Concreto de Espessura Ultra Fina.....	27
3.8.1 Projeto Nest HILO	27
3.8.2 Projeto KnitCandela.....	30
4. CONCLUSÃO.....	32
5 REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O mundo vive de uma forma irreversível e, plenamente, necessária, um desenvolvimento grandioso das tecnologias e seus possíveis usos para a melhoria da qualidade de vida humana e proteção do planeta como um todo.

O desenvolvimento de novas tecnologias beneficiam todas as áreas do conhecimento e produção, e, a engenharia, além de, na maioria das vezes estar à frente deste processo, também, nas áreas específicas, precisa de interação e desafios.

As novas tecnologias têm gerado significativas mudanças nos processos de projetos de Engenharia e na indústria da construção civil. Tais mudanças têm sido grandes aliadas na construção e exploração de possibilidades do desenvolvimentos de projetos.

As ferramentas digitais representam, realmente, a grande virada, no que se refere à construção civil, trazendo facilidades e otimização de tempo, materiais, durabilidade, economia, estética e reciclagem. Possibilitando um projeto em que, verdadeiramente, tenha relevância a eficiência e a eficácia.

As contribuições das ferramentas digitais à Engenharia Civil acontecem desde 1960, quando o relevante foi a vantagem do cálculo rápido para elaboração do projeto estrutural da Capela da Academia da Força Aérea dos Estados Unidos. Passa pela tecnologia CAD (Computer Aided Design), representações 2D e 3D em ambiente digital, tecnologia BIM (Building Information Modeling), acréscimo de informações faltantes através de relações paramétricas. Chegando, atualmente, ao uso dos princípios da geometria na Engenharia Civil, uma vez que, outros ramos da Engenharia já utilizam pela precisão de dados e resultados – como exemplo, Engenharia Naval e Aeronáutica. MEF (Método dos Elementos Finitos).

Através do uso da ferramenta MEF, tornamos esbeltas inúmeras estruturas retirando o excesso de material onde não se faz necessário, e, com esta retirada de material excedente, chegamos ao Concreto de Espessura Ultra Fina.

Esta pesquisa apresenta conceitos essenciais para o dimensionamento de estruturas, históricos e como a geometria e o MEF interagem entre si e tornam possíveis a estas estruturas, cumprirem com seu plano de necessidades.

Pesquisa desenvolvida a partir de análises bibliográficas, sem a aplicação prática de cálculos específicos.

O uso da geometria em cálculos complexos não é uma novidade, uma vez que, no século XV já era utilizado por Leonardo da Vinci.

A inovação é a interrelação/interação entre Geometria e MEF no design estrutural.

2 OBJETIVO GERAL

Análise bibliográfica visando mostrar como a implementação de tecnologia, Método dos Elementos Finitos e Design Estrutural aliados, podem impactar a Engenharia Estrutural com obras de Arquitetura impactante.

2.1 Objetivos específicos

- Análise bibliográfica sobre o Concreto, Método dos Elementos Finitos, Design Estrutural e Evolução da Tecnologia na construção.
- Incentivo a construções com caráter sustentável.
- Apresentar os aspectos gerais da temática do design estrutural;
- Elaborar uma resenha da evolução histórica das construções e métodos de projeto.
- Mostrar como o Métodos dos Elementos Finitos pode ser a principal ligação entre Tecnologia e Design Estrutural.
- Apresentar obras referência do Parametricismo e Design Estrutural.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 Concreto Armado

De maneira sucinta, podemos afirmar que o concreto é um tipo de “pedra artificial”, ele emoldra quase toda a capacidade construtiva do homem. É o material que o ser humano foi capaz de desenvolver, e que após endurecido, tem resistência similar às rochas naturais, enquanto em seu estado fresco é um composto plástico que possibilita com grande facilidade sua modelagem, podendo se adequar as mais variadas formas e dimensões.

Segundo a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), o concreto é um material compósito. Ele é constituído de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas das mais diferentes origens. O aglomerante utilizado é o cimento, este em presença de água. Já o agregado é qualquer material granular, como a areia, pedregulho, rocha britada, escória de alto-forno e resíduos de construção. Se as partículas de agregados forem maiores do que 4,75mm, o agregado é considerado graúdo, se forem menores o agregado é considerado miúdo. Podem ainda ser adicionados ao concreto os aditivos. Aditivos são substâncias químicas adicionadas ao concreto em seu estado fresco, estas lhe alteram algumas propriedades adequando o concreto às necessidades construtivas do projeto a ser desenvolvido.

3.1.1 História do Concreto Armado

O aço e, principalmente, o concreto armado foram responsáveis por profundas alterações nas técnicas habituais de construção de edifícios e na sua concepção estrutural. Pela rapidez e amplitude de expansão com que se impôs no panorama construtivo, o advento do concreto armado marca uma quebra com o passado, particularmente quando o conhecimento científico-técnico desse novo material permitiu a implementação de soluções estruturais impossíveis até o então momento.

A história do concreto armado não pode ser tratada de maneira isolada. O concreto utilizado atualmente na construção civil, é fruto do trabalho de inúmeras pessoas, que durante anos observaram a natureza e buscaram formas de transformá-la e aperfeiçoá-la, descobrindo a partir de suas buscas novos materiais, técnicas, teorias e estruturas.

A história do concreto armado não começou no século passado, mas com a própria civilização humana. A partir do momento que o homem existe sobre a terra, ele tem a necessidade básica de moradia, e desta necessidade surge uma busca por inovação, chegando-se então a um dos materiais mais utilizados nos dias atuais – o concreto.

A história do concreto deve ser remetida à do seu principal componente e que produz a reação química de formação da pasta aderente – o cimento. O cimento tem em sua história, passagens pelas pirâmides do Egito (gesso calcinado), Roma e Grécia antigas (hidratação de cinzas vulcânicas), e ganha desenvolvimento, enfim, nas mãos de John Smeaton (1756). Ressurge,

posteriormente, com James Parker, em 1791, que descobriu e patenteou em 1796 um cimento chamado de “Cimento Romano” e ganha destaque com as pesquisas do engenheiro Louis Vicat em 1818.

“ O concreto foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C. situada a 64km de Roma e no século II a.C. este novo material começou a ser usado em edificações em Roma. A pozolana de Pozzuoli, Itália, localidade próxima ao Monte Vesúvio foi utilizada em argamassas utilizadas para construir a Via Ápia, os banhos romanos, o Coliseu e o Pantheon em Roma e aquedutos, como Pont du Gard no sul da França. Os romanos usaram a cal como material cimentício. Plínio relata uma argamassa com proporção 1:4 de cal e areia. Vitruvius reporta uma argamassa com proporção 1:2 de cal e pozolana. Gordura animal, leite e sangue foram usados como aditivos para incorporar ar à mistura.” (Luís Fernando Kaefer, 1998, p.11).

No século XVIII, identifica-se as primeiras inserções de barras de ferro ao concreto, dando origem ao hoje em dia conhecido Concreto Armado.

O Concreto Armado foi uma das maiores invenções da humanidade, tanto para a engenharia como para a arquitetura mundial. Sua utilização veio trazer inúmeras vantagens para a construção civil, como a rapidez de execução das estruturas, a segurança contra o fogo, economia, durabilidade, capacidade impermeabilizante, resistência da estrutura a choques e vibrações, e facilidade na moldagem de elementos construtivos podendo levar a estrutura a assumir as mais variadas formas dos projetos de arquitetura. Além dos atributos plásticos, é fascinante a coincidência das propriedades físicas semelhantes entre os dois materiais - coeficientes de dilatação idênticos entre concreto e aço.

O concreto armado realiza sozinho o que era antes realizado separadamente pelo concreto e pelo ferro, e ainda, se transforma num material único pela sua grande capacidade de absorver esforços. O segredo da alta performance mecânica do concreto armado se encontrou na harmonia entre dosagem, tipo de metal, e configuração da estrutura a ser utilizada.

Do ponto de vista das análises de estruturas, o advento do concreto armado representa um marco decisivo para a construção civil. A implementação do novo material possibilitava a execução de elementos estruturais contínuos com características mecânicas que permitiam a aplicação dos princípios da resistência de materiais, vindo a resultar no desenvolvimento de sofisticados procedimentos de análise e cálculo estrutural.

3.2 O Concreto Armado no Brasil

O sistema construtivo do concreto armado foi utilizado pela primeira vez no Brasil no século XX. De início, este era um produto patenteado, podendo ser aplicado somente em tarefas como pontes e viadutos – obras governamentais.

Devido às mudanças políticas, sociais e econômicas e ao processo de industrialização e expansão da urbanização no país, após 1930, cresce, enfim, o uso do concreto armado, especialmente no setor de edificações da construção civil.

Em meados do século XX, o concreto já era difundido em todo o país, se tornando não somente a maior parte da atividade construtiva, mas também da pesquisa no campo da construção e no ensino de arquitetura e engenharia.

Dos vários sistemas construtivos empregados no Brasil, o concreto armado é, sem dúvidas, o mais conhecido e utilizado. A maior parte das edificações construídas nas áreas urbanas brasileiras são baseadas nesse sistema - tanto para as construções formais e legalizadas, quanto para as informais. Nenhum outro material de construção é tão consumido no Brasil quanto o cimento, que é a matéria prima principal utilizada na fabricação do concreto armado.

O concreto é o material mais utilizado pela civilização atual, perdendo em volume apenas para a água. Artigo de 1964, publicado pela revista *Scientific American* estimava que a produção mundial de concreto fosse de aproximadamente 3 bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. Em publicação mais recentes estima-se 15,6 bilhões de toneladas a quantidade de concreto produzida pela humanidade até o ano de 1997. Partindo destes dados, percebe-se a importância do material para a civilização moderna e como o material contribui para a constante evolução da humanidade.

No Brasil, o concreto que sai de concreteiras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos, e esses números crescem a cada ano com o rápido desenvolvimento urbano das cidades brasileiras e programas governamentais que incentivam a aquisição e/ou construção da casa própria.

3.3 Aspectos desfavoráveis do concreto armado

Um dos aspectos negativos do concreto como material de construção é, sua baixa resistência às tensões de tração em relação à sua própria resistência à compressão, sendo esta a principal causa da inclusão de armaduras em estruturas submetidas a esforços de tração e flexão. Apesar das armaduras evitarem o colapso prematuro das estruturas, absorvendo os esforços não mais resistidos pelo concreto fissurado, normalmente elas são incapazes de evitar o início de formação destas fissuras.

De acordo com a NBR 6118/2007, é inevitável a fissuração em elementos estruturais de concreto armado. São então adotadas medidas para o controle do grau de abertura das fissuras, visando o bom desempenho relacionado à proteção das armaduras quanto à corrosão.

Dentre os efeitos da fissuração, sabe-se que as fissuras reduzem consideravelmente a rigidez da estrutura, e que, uma vez formadas, a distribuição interna das tensões é fortemente modificada e o concreto passa a apresentar um comportamento não-linear.

Segundo FIB (2013), em uma seção transversal fissurada de concreto armado, todos os esforços de tração são balanceados apenas pela armadura, entretanto, entre fissuras adjacentes estes esforços de tração são transmitidos pela barra para o concreto no seu contorno, através das forças de aderência. Isto pode ser considerado como um aumento de rigidez das armaduras de tração, sendo este fenômeno conhecido como tension stiffening effect. A aplicação dos conceitos de fissuração e do tension stiffening effect é amplamente estudada na literatura a respeito de estruturas de concreto armado, sendo suas considerações indispensáveis para a correta simulação do comportamento global de uma estrutura.

A respeito da fissuração, três são os modelos mais conhecidos e utilizados para a simulação da fissuração nas formulações de concreto armado via elementos finitos (método estudado neste trabalho), são eles o modelo discreto, o de fissuras distribuídas e o de fissuras incorporadas.

No modelo discreto, a fissura é representada por meio da separação dos lados dos elementos, sendo portanto, altamente dependente da malha considerada além de necessitar uma redefinição da malha durante a análise, visando retratar o fenômeno da propagação das fissuras.

Para o caso do modelo de fissuras distribuídas, a descontinuidade causada pela fissura é espalhada por todo o elemento em questão, sendo este, por sua vez, submetido a uma alteração de suas equações constitutivas.

Já o modelo de fissuras incorporadas reúne aspectos dos dois modelos anteriores, incorporando descontinuidades no interior dos próprios elementos finitos, tratando-se, portanto, de um método bastante complexo.

3.4 Início do Design Estrutural

A necessidade de ter-se um local adequado para abrigar-se de forma permanente ou passageira é tão antiga quanto à história da própria humanidade.

As sociedades nômades, mesmo em constante movimento, ao chegar nos locais em que permaneciam por algum tempo, procuravam na natureza locais onde pudessem se abrigar dos animais e das ações climáticas. Caso este local não fosse encontrado, construções com aproveitamento de coleta eram levantados como abrigo indispensável à manutenção de suas vidas e proteção de seus animais e famílias.

À medida em que estas sociedades foram tornando-se sedentárias a necessidade de construir casas mais resistentes, melhor organizadas, que abrigassem com mais conforto suas famílias, que oferecessem segurança referente à ataques de animais ou inimigos, foram crescendo. A partir das conquistas destas necessidades, outras foram nascendo: já não era suficiente construções com base em coletas. Então, recursos naturais passaram a ser transformados em recursos alterados pela ação humana.

O homem iniciou experiências para ter e oferecer à família determinados benefícios, e, neste percurso, nasceu, também, o desejo estético.

Também, já não era mais suficiente um lar seguro e confortável para os padrões da época, era indispensável beleza.

Na busca da conquista da beleza, novas construções opulentas, abusando das formas e recursos foram sendo erguidas mundo a fora.

Castelos com recursos inimagináveis de engenharia foram construídos com enormes torres, pontes elevadiças, sistemas de segurança...

Cidadelas apresentavam os mais variados projetos de construção habitacional, com cores diversificadas, sistemas de drenagem, galerias pluviais...

Com a evolução da humanidade, as construções também foram evoluindo e se complexificando.

Grande exemplo deste desenvolvimento e complexificação, são as construções, principalmente, de templos religiosos. Numa mistura de fé, poder e capacidade intelectual, envolvidas num certo romantismo, transformava obras construídas pelas mãos humanas em algo quase celeste. Tais construções eram cantadas nas poesias da época devido ao seu poder de encantamento. Podemos dizer que, ainda nos dias atuais, tais monumentos inspiram poetas e compositores.

De acordo com o poder econômico das classes eram desenvolvidas suas construções. As vezes, com recursos mais simples, outras, com recursos sofisticados.

Na construção de edifícios religiosos e monumentais, a disponibilidade de meios era superior a de obras privadas, permitindo assim a utilização das melhores técnicas de construção e de materiais superiores. Assim, a pedra foi utilizada como material de construção nas pirâmides e

templos faraônicos. As pirâmides (2800 a 2000 A.C.) construídas com grandes blocos de pedra constituíram um enorme desafio do ponto de vista construtivo e os templos faraônicos (século XV A.C.), com as suas colunas com capitéis e tetos em lajes de pedra, representam uma significativa evolução na compreensão do comportamento estrutural de elementos construtivos.

No século XIII A.C., foi construída a famosa "Porta dos Leões" em Micenas (Figura 1), com 3 metros de vão, em pedra. Este lintel é considerado por alguns autores um exemplo das estruturas que viriam a dar origem ao arco.



Figura 1 - "Porta dos Leões" - Micenas, Grécia (século XIII A.C.).

3.5 Evolução do Design Estrutural e Surgimento do Parametricismo

O desenvolvimento de novas tecnologias tem gerado, a cada dia, mais mudanças nos processos de projeto de engenharia e na indústria da construção civil. A tecnologia CAD (Computer Aided Design) permitiu a representação de projetos em 2D e 3D num ambiente digital, e permitiu posteriormente a implementação da tecnologia BIM (Building Information Modeling). A utilização BIM significou o acréscimo de informações que antes faltavam aos elementos, através de relações paramétricas atribuídas ao projeto. A arquitetura paramétrica e algorítmica permite que os modelos concebidos tenham uma base em relações paramétricas do material utilizado, das forças aplicadas de forma concentrada ou distribuídas, de forças externas como o vento, etc.

Nas últimas décadas as ferramentas digitais têm se tornado grandes aliadas para a exploração de novas possibilidades no desenvolvimento de projetos. Os primeiros casos registrados do uso computacional auxiliando na engenharia foram em 1960, onde a principal vantagem era o cálculo oferecido pela nova ferramenta, permitindo assim uma investigação do cálculo estrutural de forma mais fácil e rápida.

Uma das primeiras obras a utilizar de computadores para auxiliar no processo de projeto foi o da Capela da Academia de Cadetes da Força Aérea dos Estados Unidos (Figura 2). Construída nos anos 60 pelos engenheiros do escritório SOM. O sistema Field Theory¹ foi o utilizado para auxiliar na elaboração do projeto estrutural.



Figura 2 - Capela da Academia de Cadetes da Força Aérea dos Estados Unidos

Paralelamente ao implemento do uso de computadores, o Método dos Elementos Finitos também se difundiu cada vez mais, sendo o principal método utilizado pelos softwares de cálculo e análise de estruturas. Uma alternativa fornecida por este método para a geração de superfícies curvas computacionalmente, é através da utilização de meshes, ou, malhas. A malha é formada por diversos polígonos e aproxima a superfície curva do projeto por meio de vértices, bordas e faces, que combinados definem a forma do objeto. Cada um desses polígonos é calculado como

se fosse um elemento em equilíbrio, e a ele são atribuídas informações paramétricas.

Paramétrico é um termo utilizado nas mais diversas disciplinas, indo da matemática ao design. O termo significa trabalhar com parâmetros variáveis. No campo do design contemporâneo, sua utilização se refere ao uso de softwares que auxiliam na modelagem paramétrica. Esses softwares são muito utilizados nos projetos de arquitetos que trabalham em desenhos curvilíneos e com grande manipulação das formas, como nas obras da arquiteta iraquiana-britânica Zaha Hadid (Figura 3). O termo “Parametricismo” foi criado para denominar esse novo estilo de arquitetura. Para Patrik Schumacher, sócio no Zaha Hadid Architects, o Parametricismo sucedeu o Modernismo como um novo estilo global de arquitetura (LEACH, 2014).



Figura 3 – Centro Heydar Aliyev, obra de Zaha Hadid.

O nome vem do inglês “Parametricism” e foi criado por Patrik Schumacher em sua obra “Manifesto Parametricista”, que foi inicialmente apresentado na Bienal de Arquitetura de Veneza no ano de 2008. Schumacher desenvolve um extenso trabalho com Zaha Hadid onde ambos defendem a tese central de que a arquitetura precisa reconstruir sua especificidade e poética própria, desligando-se de outras disciplinas. Para isso, os arquitetos precisam criar um impacto, como o Modernismo fez. As obras parametricistas são marcadas pela variação, a diferenciação e a correlação, potencializados pelo uso das ferramentas oferecidas pelas novas tecnologias (modelagem e simulação digital).

Segundo BLOCK (2014, p. 3), o Parametricismo pode utilizar geometria complexa para atender às demandas multifacetadas da arquitetura contemporânea, por exemplo, fornecendo maneiras mais intuitivas e naturais de navegar no espaço usando os potenciais semiológicos inerentes das formas

“O uso de estruturas de concha contínuas na arquitetura e o conhecimento necessário para seu projeto e construção diminuíram significativamente a partir da década de 1960 por uma série de razões. Em primeiro lugar, eles são difíceis de integrar às necessidades programáticas, particularmente em edifícios de vários níveis, e apresentam uma variedade de questões na arena da física de construção, bem como desafios no detalhamento

arquitetônico. Formalmente, eles saíram de moda, especialmente durante a ascensão do modernismo do século 20. Dados os custos típicos envolvidos na construção de formas, eles exigem materiais e mão de obra intensiva e, em última análise, os tipos disponíveis de geometria otimizada para estruturas de cascas eram limitados até recentemente.” (BLOCK, 2015, p. 3)

3.6 Geometria Estrutural

Resistência através da geometria significa alcançar desempenho estrutural sem aumentar a massa ou resistência do material, mas aproveitando o poder de um projeto estrutural bem pensado.

Formas estruturais eficientes, como conchas, arcos ou abóbadas, podem reduzir significativamente o volume estrutural necessário por auxiliarem na distribuição das cargas. Colocando o material apenas onde este se faz necessário, ou seja, seguindo o fluxo de forças para todos os casos de carregamento, conseguimos obter estruturas compactas e eficientes.

Em particular, o uso de formas funiculares - apenas de compressão, pode, mesmo com seções estruturais reduzidas, reduzir significativamente as concentrações de tensão graças à sua capacidade de distribuir uniformemente a carga em sua seção, permitindo assim o uso de materiais mais fracos e, portanto, mais sustentáveis.

Na geometria estrutural, o projetista terá uma compreensão mais clara do fluxo de força e pode, portanto, separar compressão e tensão ou discretizar estrategicamente a estrutura para controlar seu comportamento estrutural. Essa separação aumenta a longevidade e melhora o desempenho da estrutura.

No entanto, a geometria de uma estrutura não pode ser pensada separadamente de sua materialização: formas estruturais específicas são mais adequadas, ou mesmo requerem o uso de materiais específicos. Certos materiais devem ser usados com certas geometrias. Normalmente, os engenheiros se concentram na eficiência do material. O projeto estrutural é, muitas vezes, centrado na ideia de otimizar a quantidade de material, sem questionar se aquele material é o mais adequado para aquela aplicação (eficácia). Precisamos optar pelo uso de um material para o que ele é bom. O concreto é um bom exemplo disso. Dependendo do carregamento e das condições de contorno, grandes partes de elementos de concreto armado não contribuem para o desempenho da estrutura e são apenas carga adicional sem finalidade estrutural.

A elaboração de projetos baseados no desempenho estrutural surge como um instrumento que contribui para a concepção de projetos inovadores. Kolarevic (2005) afirma que questões qualitativas e quantitativas de desempenho devem ser colocadas como princípios tecnológicos que guiarão novas abordagens de projeto. Oxman (2006) cita três componentes essenciais para o sistema de design digital:

- modelo geométrico capaz de gerar e transformar a forma através de *inputs* dados pelos processos de avaliação;
- processos de avaliação integrados com o modelo geométrico; e
- o designer como um moderador do processo, de maneira interativa e iterativa.

Para o projeto baseado em desempenho, Oxman (2006) ressalta a importância do desenvolvimento de modelos paramétricos e algorítmicos. O modelo paramétrico cria relações entre as partes do projeto, possibilitando que elas sejam facilmente transformadas à medida em

que ocorrem alterações exigidas por critérios estabelecidos no projeto. Suas características principais são: adaptabilidade, a mudança, a continuidade e a conectividade. Técnicas de otimização podem ser integradas ao processo de modificação da forma, de modo a permitir que o designer desenvolva métodos automatizados e semiautomatizados de geração e avaliação.

O paradigma de projeto baseado em desempenho foca menos em questões formais e estéticas, e mais no material e na inteligência do design. De acordo com Grobman (2012), um novo tipo de arquitetura baseada em dados e desempenho está gradualmente sendo desenvolvido, em contraste com as arquiteturas focadas em tipologia.

O estudo de geometrias complexas e as possibilidades de projeto arquitetônico através de algoritmos vêm redefinindo possibilidades de projeto estrutural. Os softwares paramétricos foram extremamente importantes no desenvolvimento desses conceitos. Eles são um meio de produzir design generativo, estrutural e iterativo, através de processos colaborativos entre arquitetos e engenheiros, e demais profissionais envolvidos no processo.

3.6.1 Design computacional

No começo do século XXI houve uma mudança de metodologia na engenharia e arquitetura com a evolução para a era digital da forma, na qual o computador passou a ser utilizado para explorar todas as possibilidades inerentes ao processo de projeto. Nessa novo método de projetar, o projetista deixa de modelar as formas para articular uma lógica que gere as formas. É nesse contexto de mudança de paradigmas, que se abrem as possibilidades de simulação de formas através de processos de otimização e/ou geração, onde os projetistas começaram a desenvolver seus projetos a partir do desempenho esperado da estrutura. A arquitetura paramétrica e algorítmica permitiu que os modelos sejam concebidos com base em relações paramétricas e através de scripts, e que sejam colocados dados matemáticos como base de geração da forma.

A primeira geração de arquitetos e engenheiros que desenvolveu projetos baseados na era digital, experimentou uma euforia devido à exploração que as ferramentas possibilitavam. Começaram então a trabalhar as possibilidades de explorar a lógica do material e dos métodos de montagem e produção. A integração de projeto, fabricação e montagem embutidos na lógica do design fez com que as etapas de concepção fossem racionalizadas e que o trabalho se tornasse multidisciplinar e colaborativo.

Alcançar força por meio da geometria requer que o engenheiro estrutural recupere o controle da geometria durante o processo de projeto. A geometria é a linguagem universal que conecta os diferentes campos de nossa indústria, mas para controlá-la, as ferramentas tradicionais de design não são mais suficientes e novas soluções são necessárias tanto para o projeto quanto para a análise de estruturas. Mais importante, o processo de projeto precisa mudar radicalmente e encapsular restrições estruturais desde o início.

Os esforços implementados no lado do planejamento, coordenação e fabricação com a introdução da modelagem de informações de construção precisam ser combinados no lado do projeto com ferramentas que permitem que todos os atores envolvidos (arquitetos, engenheiros e empreiteiros) forneçam informações e definam restrições para a geração de geometrias que são eficientes e complexas e integram todos os critérios de desempenho. A típica linear e iterativa abordagem não é mais possível ou mesmo viável. Soluções avançadas de software de análise, design e desenho já estão disponíveis e em desenvolvimento contínuo (por exemplo, Grasshopper ou Dynamo e seus vários plug-ins). No entanto, tanto na pesquisa quanto na prática, tempo e recursos são desperdiçados conectando esses programas de software e configurando canais digitais que, muitas vezes, precisam ser completamente reconstruídos para cada novo projeto.

3.7 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) apresenta, atualmente, um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projetistas de estruturas, dos mais diversos setores da engenharia. Enquanto que, no passado, muitos dos utilizadores do MEF estavam também envolvidos na programação do computador e do software e ser utilizado, hoje quase totalidade dos projetistas estruturais apenas se preocupa com a utilização do correspondente software e com a interpretação dos resultados obtidos por este. O utilizador programador quase desapareceu, dando lugar ao mero utilizador.

Para que possa dar resposta em relação à segurança de uma estrutura, um projetista que não conheça as técnicas correspondentes à formulação do MEF será tentado pela simples utilização de um software de cálculo. Uma vez que este não tem acesso aos modelos que estão programados, nem tem bases para a compreensão do mesmo, procederá à utilização do software de acordo com o treinamento que recebeu ou com base em meras improvisações. A tentação para aceitar os resultados provenientes do programa é grande, quaisquer que sejam esses resultados, uma vez que considera que o software escolhido tem elevada qualidade e confia plena e cegamente nos resultados apresentados.

Os potenciais perigos de uma utilização nestas condições são a não percepção de eventuais erros na introdução dos dados, a ausência de correspondência entre o modelo seleccionado e a estrutura que está a ser analisada, o fato de serem desprezadas importantes condicionantes, etc. Na ausência de uma comparação dos resultados provenientes do MEF com os oriundos de outros modelos, existe o sério risco de a segurança de uma estrutura ser justificada com base em cálculos completamente inadequados.

O MEF é utilizado para cálculo de estruturas complexas. Esté é um método para resolver equações diferenciais. Consiste em separar o sistema sob análise em diversos elementos. Cada um desses elementos possuem nós que se deslocam com a aplicação de carregamento e podem fornecer respostas sobre o fenómeno que está se estudando.

O método nos fornece resultados de tensão, deformação e deslocamento de uma estrutura, equipamento ou produto sob sua análise. Nos fornece também resultados utilizados, posteriormente, para identificar a durabilidade do componente, identificar pontos de concentração de tensão, entender o comportamento da estrutura diante de um carregamento e fazer com que possamos otimizar peças antes mesmo de fabricá-las.

Grandes indústrias de desenvolvimento de produtos possuem softwares de análise de elementos finitos como base e apoio para a engenharia de produto.

3.7.1 Passos da Análise de Elementos Finitos

1. Possuir o modelo CAD do sistema sob análise;

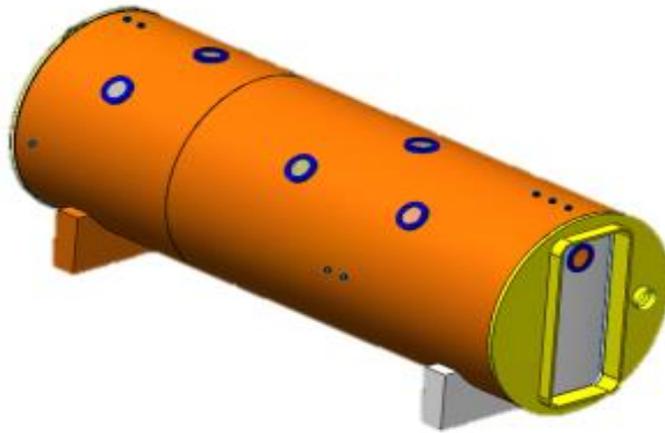


Figura 4 – Modelo CAD de Câmara Hiperbárica

2. Definir as propriedades do material;
3. Fazer a malha do modelo de elementos finitos;

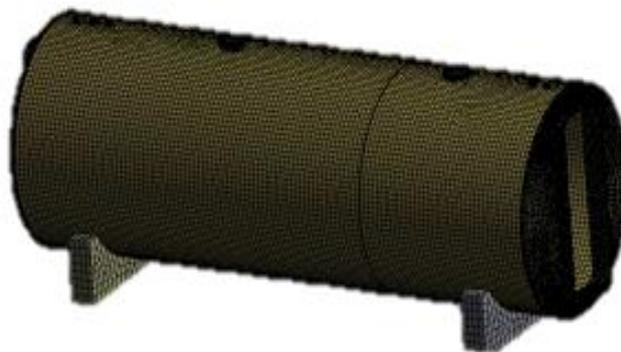


Figura 5 – Malha de Elementos Finitos

4. Definir as cargas e condições de restrição;

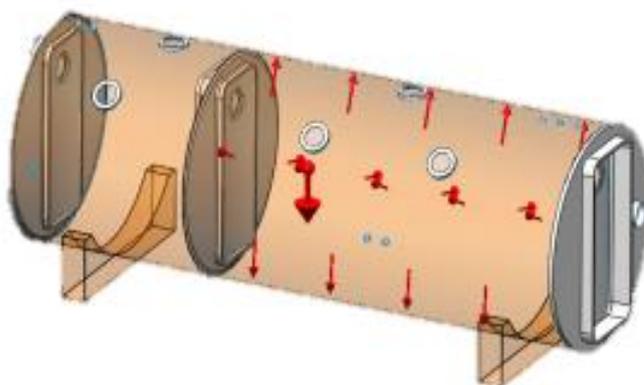


Figura 6 – Condição de Carregamento e Restrições

5. Resolver a análise;
6. Verificar os resultados (tensão, deformação e deslocamento).

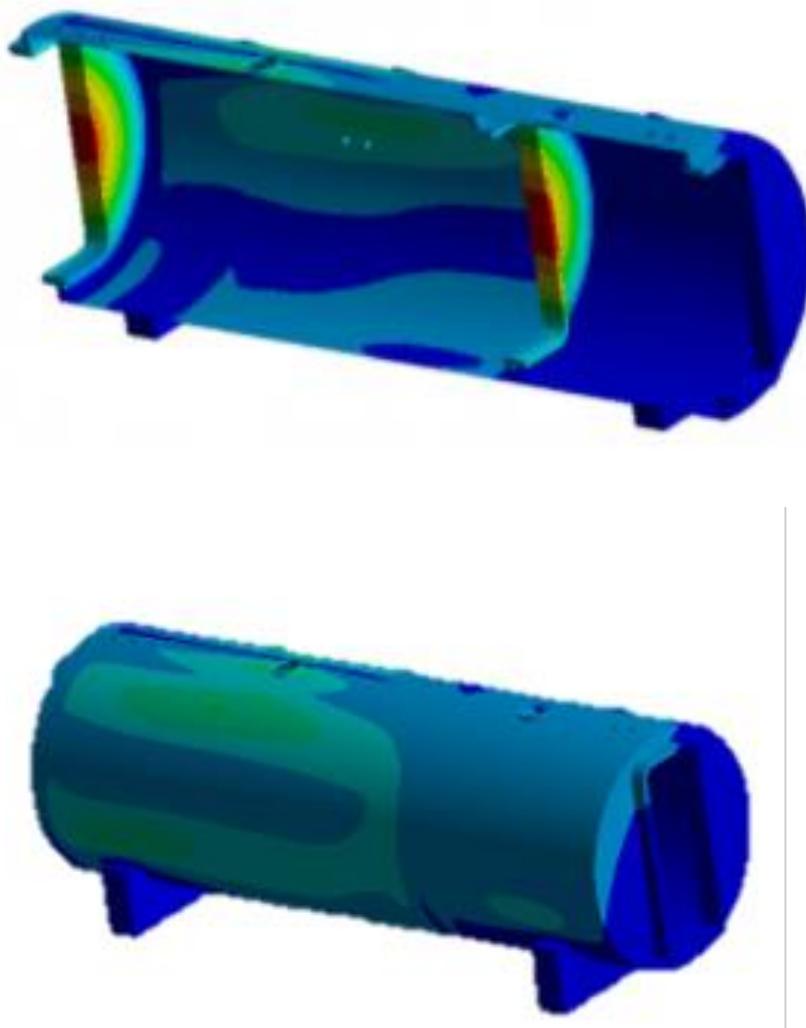


Figura 7 – Resultado de Deslocamento

3.8 Concreto de Espessura Ultra Fina

Em vários projetos em andamento, o Block Research Group (BRG) da ETH Zurich (Instituto de Tecnologia em Arquitetura) está desenvolvendo novas abordagens de design para projetos, bem como explorando novos métodos de construção e lógicas para criar essas formas estruturais expressivas e eficiente. O trabalho do grupo mostra que a engenharia estrutural pode ir além. Pesquisas do BRG mostram que com uma dada geometria, podemos produzir inovação verdadeira, e que projetar com restrições não precisa restringir o progresso da engenharia e arquitetura.

“Estruturas de concha de concreto, se adequadamente projetadas e construídas em um processo envolvendo arquitetos e engenheiros, são capazes de cobrir grandes espaços com custo mínimo de material por meio de tensões de membrana de compressão e / ou tração eficientes, tornando-se formas funcionais totalmente tridimensionais em vez de apenas telas . As formas de conchas agora vão além das formas e tipologias ideais otimizadas desenvolvidas por engenheiros e matemáticos no apogeu das conchas nas décadas de 1950 e 1960. Eles estão fluidos em seu potencial, o que é possível graças a novas abordagens e ferramentas de design.” (BLOCK 2014, p. 5)

3.8.1 Projeto Nest HILO

Em projeto desenvolvido pelo BRG, pesquisadores construíram um protótipo de um telhado de concreto curvo ultra fino. Essa cobertura foi desenvolvida através de um design digital e métodos de fabricação inovadores. Usando algoritmos desenvolvidos em colaboração com o Centro Nacional Suíço de Competência (NCCR) em Fabricação Digital, a equipe conseguiu construir a rede de aço de modo que assumiu a forma estrutural desejada quando o concreto foi lançado.



Figura 8 – Protótipo Nest Hilo – estrutura concretada.

A técnica de construção do telhado foi liderada pelo Prof. Block e pelo pesquisador sênior

Dr. Tom Van Mele, juntamente com a supermanutenção do escritório de arquitetura, e testado em um protótipo em escala real.

Possuindo uma espessura que varia de 3 cm (nas bordas) a 12 cm (na superfície de suporte – estruturas de viga), 7,5 metros de altura e uma área de superfície de aproximadamente 160 metros quadrados, cobrindo um plano de 120 metros quadrados.

A equipe Block Research Group se dedicou à construção do protótipo ao longo de 6 meses, porém o processo para chegar ao total do projeto durou quase quatro anos.

Em vez de cofragem utilizando madeira não-reutilizável feita sob encomenda ou espuma moída, o que seria necessário para realizar essa forma sofisticada, os pesquisadores usaram uma rede de cabos de aço esticada em uma estrutura de andaimes reutilizável. Esta rede de cabos suportava um polímero têxtil que funcionava como a fôrma para o concreto. Isso não só permitiu que os pesquisadores economizassem material para a construção, mas também forneceu uma solução para a realização eficientemente de novos tipos de projeto. Outra vantagem da solução de cofragem flexível é que, durante a concretagem do telhado, a área por baixo permanece desobstruída e, assim, o trabalho de construção interior pode ocorrer ao mesmo tempo.

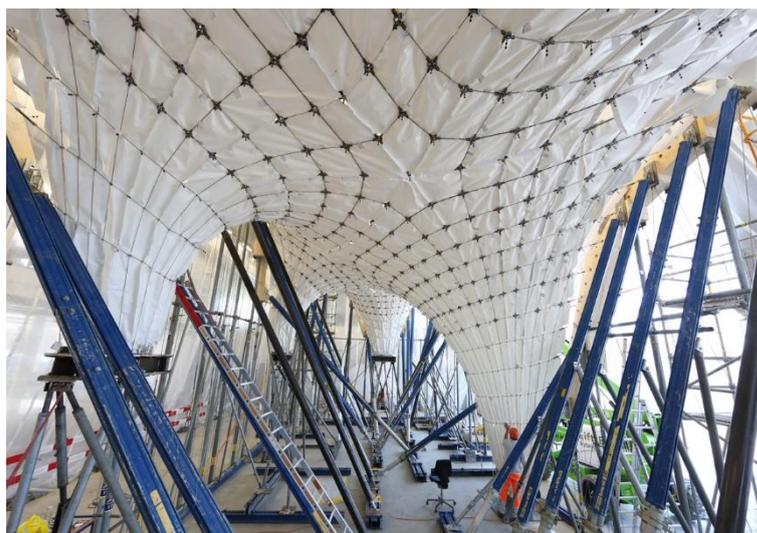


Figura 9 – Protótipo Nest Hilo – manta textil – cofragem flexível.

A rede de cabos utilizada, foi projetada para assumir a forma desejada sob o peso do concreto úmido, graças a um método de cálculo desenvolvido pelo BRG e seus colaboradores no Centro Nacional de Competência da Suíça (NCCR) em Fabricação Digital. Os algoritmos criados garantem que as forças sejam distribuídas corretamente entre os cabos de aço individuais, e o teto assume então a forma desejada com precisão. A rede de cabo pesa apenas 500 kg e a têxtil 300 kg. Com apenas 800 kg de material, são suportadas 20 toneladas de concreto úmido.



Figura 10 – Protótipo Nest Hilo – montagem da rede de cabos.

Especialistas da Bürgin Creations e Marti auxiliaram no projeto pulverizando o concreto usando um método desenvolvido especificamente para esse fim, garantindo que o têxtil pudesse suportar a pressão do concreto em todos os momentos. Os cientistas envolvidos determinaram a mistura de concreto correta: concreto precisava ser fluido o suficiente para ser pulverizado e vibrado, mas viscoso o suficiente para não escorrer do tecido.

O protótipo já foi desmanchado para que o espaço pudesse ser utilizado para novos experimentos, mas, no ano de 2021, a ideia é construir o telhado mais uma vez no prédio do NEST, em um período entre oito a dez semanas.

O telhado em concha vai fazer parte da cobertura de uma unidade de pesquisa e inovação, chamada HiLo. A unidade está prevista para ser construída no prédio do laboratório da Empa e Eawag em Dübendorf. A cobertura proporcionará espaço de morar e trabalhar aos professores convidados da Empa.



Figura 11 – Projeto Nest Hilo 2021.

3.8.2 Projeto KnitCandela

Projeto desenvolvido no ano de 2018 no Museo Universitario Arte Contemporáneo na Cidade do México, em colaboração com o Grupo de Design Computacional (ZHCODE) de Zaha Hadid Architects and Architecture Extrapolated (R-Ex).



Figura 12 – Projeto KnitCandela construído em 2018.

Utiliza de cofragem uma fôrma de malha que fica no local após concretada, para realizar sua complexa geometria arquitetônica e estrutural, minimizando ao máximo os custos, peso e tempo envolvidos na obra, trazendo também um viés ambiental ao projeto.

A sua geometria se baseia em uma concha duplamente curva, com aproximadamente 3 cm de espessura e nervuras de reforço de 4 cm de profundidade correndo em ambas as direções.

Se construída por métodos convencionais, teria exigido uma cofragem complexa, cara e trabalhosa, anulando assim a eficiência e benefícios econômicos de tal projeto. Em vez disso, a cofragem têxtil revestida com cimento para a estrutura de casca, trás a resistência e rigidez necessárias para a moldagem do concreto usando apenas o mínimo de cofragem externa. Como a cofragem permanece no local após a concretagem, o projeto praticamente não gerou resíduos durante sua construção.

O tricô que compõe a malha estrutural levou apenas 36 horas em uma máquina de tricô industrial. Se realizado por métodos tradicionais, estivama-se serem necessárias aproximadamente 750 horas de moagem para obter uma superfície de molde comparável em espuma.



Figura 13 – Projeto KnitCandela – processo de construção.

Este projeto conseguiu também reduzir significativamente as emissões de carbono emitidas no transporte de suas peças, visto que os elementos de formas complexas não precisavam ser enviadas para o local.

O estudo do design estrutural deste projeto, conseguiu trazer como vantagens:

- O uso de menos material, uma vez que este é colocado apenas onde necessário e não requer capa de reforço (concreto não é aplicado onde não tem função estrutural, estrutura de aço também não exige cobrimento).
- O uso de materiais mais fracos e, portanto, utilização de mais materiais sustentáveis, uma vez que a seção de resistência é totalmente utilizada e as concentrações de tensão são minimizadas aproveitando os efeitos positivos que o estudo da geometria da estrutura trás.
- Aumento na vida útil do elemento, uma vez que a armadura de aço não está embutida no concreto.

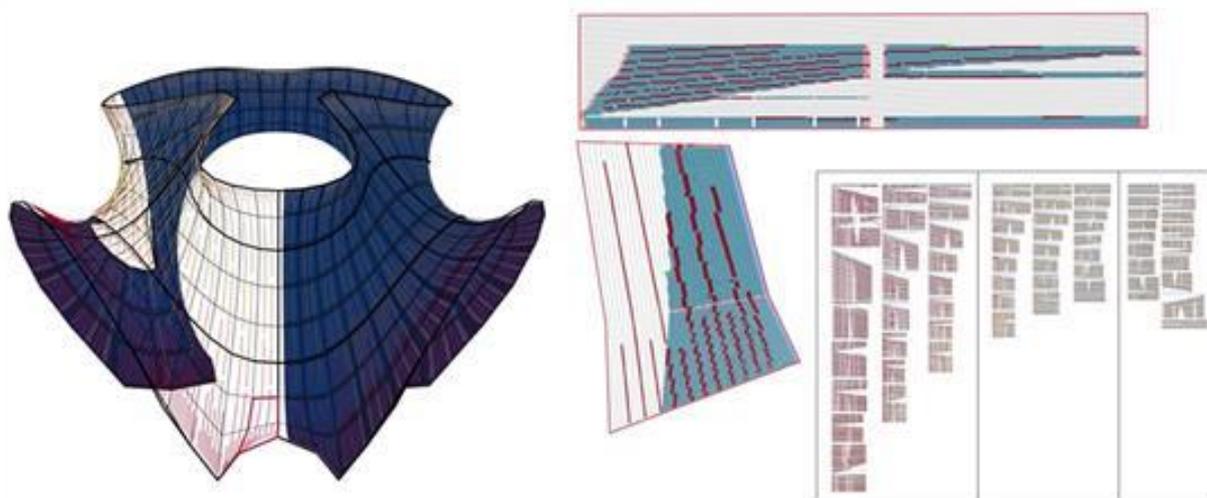


Figura 14 – Projeto KnitCandela – projeto malha estrutural.

4 CONCLUSÃO

A história da humanidade é marcada pelas invenções que são criadas para suprir as necessidades das pessoas de segurança, conforto, agilidade, economia, durabilidade, eficiência, e , renovação do planeta, ou seja, produções ecologicamente corretas.

Contribuindo para o processo de criação no campo da construção civil, tendo o pleno conhecimento que o ser humano, além da busca dos conceitos citados acima, também deseja a conquista da beleza e inovação, a Engenharia Civil e Arquitetura se aliam, para, num casamento que beira a perfeição, explorar os conhecimentos de geometria, elementos finitos e tecnologias, desenvolvendo assim uma nova abordagem de design e projetos estruturais, o Concreto de Espessura Ultra Fina.

O método dos elementos finitos, principal método utilizado pelos softwares de cálculo e análise estrutural de estruturas complexas, criou uma possibilidade para a geração de superfícies curvas computacionais, através de malhas formadas por polígonos que, por combinações de vértices, bordas e faces, definem a forma do objeto e aproximam a superfície curva do projeto.

A estes polígonos são atribuídas informações paramétricas, ou seja, trabalha-se com parâmetros que variam.

O MEF é utilizado para cálculos de estruturas complexas. O estudo de Geometrias complexas possibilita a redefinição do projeto estrutural e as possibilidades de projeto arquitetônico.

O processo do Concreto de Espessura Ultra Fina resume-se na otimização dos recursos utilizados na construção civil, gerando economia, agilidade, inovação e reciclagem.

As formas em concha, construídas a partir de malhas permite que o concreto seja distribuído de forma equivalente à, extremamente, necessário para suportar a construção mais espessa e pesada em determinadas partes, mais fina em outras, porém, tão resistente quanto.

É de tão peculiar importância que tal conhecimento seja alvo de estudo nos cursos de Engenharia Civil e Arquitetura, e que, daí seja dado o impulso para que o mundo tenha acesso cada vez mais a este processo.

Também é indispensável que os conhecimentos produzidos ao longo da história não fiquem reservados somente a recursos tecnológicos, mas que sejam praticados, dominados e transmitidos no seu processo mental, função, desenvolvimento e aplicação.

5 REFERÊNCIA

- [1] ABNT 6118/2007- Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.
- [2] ASTM C330/C330M - 17ª - Especificação padrão para Agregados leves para concreto estrutural.
- [3] BLOCK, P. LACHAUER, L. **Three-dimensional (3d) equilibrium analysis of gothic masonry vaults** (Análise de equilíbrio tridimensional (3d) de abóbadas de alvenaria gótica). Artigo. Instituto de Tecnologia em Arquitetura, ETH Zurich, Zurich, Suíça, p. 24, 2014.
- [4] BLOCK, P. LACHAUER, L. **Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults** (Análise funicular tridimensional de abóbadas de alvenaria). Artigo. Instituto de Tecnologia em Arquitetura, ETH Zurich, Zurich, Suíça, p. 8, 2014.
- [5] BLOCK, P. MELE, T. RIPPMANN, M. RANAUDO, F. BARENTIN, C. PAULSON. **Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities** (Redefinindo a arte estrutural: estratégias, necessidades e oportunidades). Artigo. Instituto de Tecnologia em Arquitetura, ETH Zurich, Zurich, Suíça, p. 7, 2020.
- [6] **BLOCK RESEARCH GROUP (BRG)** - Institute of Technology in Architecture - ETH Zürich. Disponível em: <<https://www.block.arch.ethz.ch/brg/>> acesso em: 08 de outubro 2020.
- [7] BORGES, M. **Design estrutural baseado em desempenho aplicado ao desenvolvimento de estrutura de torre eólica**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Estruturas). Belo Horizonte – MG, p.173, 2015.
- [8] Fédération Internationale du Béton (Federação Internacional do Concreto) – FIB. **Fib Model Code for Concrete Structures**. Suíça, p. 402, 2013.
- [9] FREITAS, M. **Concreto armado no brasil: invenção, história, revisões**. Artigo. 13º Seminário História e Historiografia da Arquitetura e do Urbanismo Modernos no Brasil. Salvador - BA, p.15, 2019.
- [10] FRICK, U. VAN MELE, T. BLOCK, P. **Data management and modelling of complex interfaces in imperfect discrete-element assemblies** (Gerenciamento de dados e modelagem de interfaces complexas em montagens de elementos discretos imperfeitos). Artigo. Block Research Group. Instituto de Tecnologia em Arquitetura, ETH Zurich, Zurich, Suíça, p. 9, 2016.
- [11] GROBMAN, Y. On Performalism: form and performance in digital architecture. In: GROBMAN, Y.; NEUMAN, E. (Eds.). **The Various Dimensions of the Concept of "Performance" in Architecture**. Routledge: Oxon, 2012.
- [12] KAEFER, L. **A Evolução do Concreto Armado**. Artigo. PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo - SP, p. 43, 1998.
- [13] LEACH, N. **Parametrics Explained. Next Generation Building**. Vol. 1, No. 1. 2014.
- [14] LIMA, C. COUTINHO, C. AZEVEDO, G. BARROS, T. TAUBER, T. LIMA, S. **Concreto e suas Inovações**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Ciências exatas e tecnológicas. Maceió, p.10, 2014.

- [15] NUNES, P. C. C. **Teoria do Arco de Alvenaria: Uma Perspectiva Histórica**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-005A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, p.160, 2009.
- [16] OXMAN, R. **Theory and design in the first digital age**. Design Studies, 27 (3), 229–265. 2006.
- [17] PEREIRA, V. Design e Aplicações de Estruturas em Casca de Formas Livres Ultrafinas. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Lisboa.
- [18] RIOS, R. **Aplicações do Métodos dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, p. 187, 2002.
- [19] SANTOS, J. **Estudo Construtivo e Estrutural de Abóbadas Alentejanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Militar). Lisboa, p. 124, 2014.
- [20] SIQUEIRA, H. **Análise do comportamento diferido de cascas de concreto armado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, p. 153, 2014.
- [21] TEIXEIRA, P. **Projeto e execução de coberturas em casca de concreto com forma de membrana pênsil invertida e seção tipo sanduíche**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, p. 143, 1999.
- [22] VASCONCELLOS, J. **Concreto Armado**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, p.313, 2004.