

ESTRATÉGIAS DE *FORM-FINDING* DE SUPERFÍCIES ESTRUTURAIS RÍGIDAS DE DUPLA CURVATURA

Felipe Corres Melachos

Resumo

O objeto de estudo desta proposta de estudo são as superfícies estruturais *rígidas* de dupla curvatura. O objetivo principal deste estudo reside em compreender algumas das presentes alternativas de concepção estrutural para superfícies rígiditas tendo em vista sua retomada em um âmbito global. Como objetivos complementares, verifica-se a possibilidade de aprimorar estratégias de concepção estrutural de superfícies estruturais rígiditas de dupla curvatura no ensino mediante o contato com expertise tecnológica de baixa disseminação em território nacional. Também espera-se fomentar a concepção estrutural intuitiva, tanto em prancheta quanto em salas de aula, ao invés de suas matizes verificativas, por meio da exploração das relações geométricas e construtivas em edificações pertencentes a tipologia estrutural em análise. Como método de pesquisa se propõem a análise e esgotamento de estudos de caso pré-selecionados em função de seu enquadramento na tipologia estrutural, oferta de material iconográfico acerca da obra, material utilizado no sistema construtivo e processo projetual e construtivo. Com base nos critérios elencados acima, ficou elencado a análise da cobertura em casca de concreto armado UHPFRC na estação ferroviária de Shawnessy, em Calgary no Canadá, projeto de Stantec Architecture e Lafarge Engineering em 2004. Esta pesquisa apresenta impacto tecnológico e pedagógico justamente por promover a aproximação com ferramental de processo de projeto e construtivo constituindo o estado da arte do *form-finding* no planeta.

Palavras-chave: superfícies estruturais; dupla-curvatura; concepção estrutural; UHPFRC; estação ferroviária de Shawnessy.

Abstract

This research focuses on the rigid double-curvature structural surfaces and its main goal is to comprehend some of the present alternatives in the structural conception of rigid surfaces, especially considering their worldwide resurgence. As complementary research objectives, it is important to mention the possibility to improve strategies for the conception of rigid double-curvature structural surfaces in architectural and engineering undergraduate education, by means of attaining contact with technological expertise of low dissemination in the nation. Also, it is expected to foster intuitive structural conception strategies in both classroom benches and studio drawing boards, instead of focusing on the traditional verifying methods, by means of the exploration of geometrical and constructive relationships in buildings belonging to the structural typology being analyzed. The chosen research methodology consists on the analysis of pre-selected case studies based on their similarity with the structural typology being analyzed, availability of graphic material and technical drawings related to the design, material utilized in its design and constructive process. Taking into consideration the criteria above, the selected case study was the UHPFRC roof of the Shawnessy

Railway Station, located in Calgary, Canada, and designed and built by Stantec Architecture and Lafarge Engineering in 2004. This research has technological and pedagogical impact, in the way that it promotes an approximation with state-of-art design and form-finding tools in the globe.

Keywords: structural surfaces; double-curvature; structural conception; UHPRFC; Shawnessy Railway Station.

Resumen

El objeto de estudio de esta propuesta de investigación son las superficies estructurales rijas de doble curvatura, y su principal objetivo es la comprensión de algunas de las presentes alternativa para su concepción estructural, considerando su retomada en un ámbito global. Como objetivos complementares, reside la posibilidad de mejorar estrategias de concepción estructural de superficies estructurales rijas de doble-curvatura en el ensino por causa del contacto con expertise tecnológica de baja disseminación en el territorio nacional. También se espera estimular la concepción estructural intuitiva, tanto en las mesas de dibujo cuanto en las salas de aula, al contrario de las estrategias tradicionales de concepción verificativas, por la exploración de relaciones geométricas y constructivas en las edificaciones pertenecientes a la tipología en análisis. Como método de investigación se propone la análisis y agotamiento de estudios de caso preseleccionados de acuerdo con su encuadramiento de tipología estructural, oferta de material iconográfico sobre la obra, material utilizado en el sistema constructivo y proceso proyectual y constructivo. Con base en esos criterios, quedó escogida la cobertura estructurada en UHPRFC de la estación ferroviaria de Shawnessy, en Calgary – Canadá, diseñada e construida en 2004 por Stantec Architecture e Lafarge Engineering. Esta investigación presenta impacto tecnológico y pedagógico justamente por promover la aproximación con herramientas de proceso de proyecto y constructivo que figuran en el estado-de-la-arte acerca de form-finding en el planeta.

Palabras-clave: superficies estructurales; doble-curvatura; concepción estructural; UHPRFC; Shawnessy Railway Station.

INTRODUÇÃO

O objeto de estudo desta proposta de estudo são as superfícies estruturais rígidas de dupla curvatura. Existem muitas taxonomias para sistemas estruturais vigentes no momento, seja por material construtivo constituinte, geometria geradora ou resultante da tipologia estrutural, ou até mesmo como elemento ativo no caminhamento de forças. Para este trabalho foi instituído o sistema de taxonomia de Daniel Schodek e Martin Bechthold (2014), onde existe a separação de elementos estruturais quanto a sua rigidez e natureza geométrica do elemento construtivo resultante, de tal sorte a fomentar o entendimento das estruturas pela forma e fomentar a concepção estrutural intuitiva.

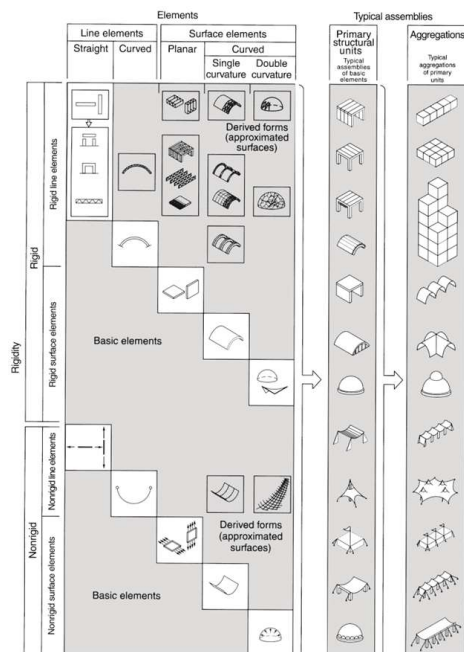
De modo a delimitar o objeto de

estudo desta proposta de pesquisa, é importante ressaltar que Bechthold (2004) lembra que superfícies estruturais são tipologias que derivam sua rigidez de curvaturas, dobras e protensão, encaminhando seus esforços por sua superfície. Schodek e Bechthold (2014) ainda classificam explicitamente suas estruturas entre rígidas (as cascas) e as não rígidas (membranas), assim como pela curvatura da geometria resultante (dupla ou simples):

[...] as superfícies estruturais incluem membranas tensionadas, cascas e placas dobradas, isto é, sistemas que podem ser altamente eficientes se projetado com base em seus princípios estruturais implícitos, e igualmente problemáticos se compreendidos de maneira superficial. Estes sistemas derivam sua resistência de dobra ou curvatura, ou, no caso de membranas tensionadas, protensão [...] Novos materiais como as fibras de fluoro-polímeros, por exemplo agora são introduzidos na construção civil e expandem consideravelmente nossas possibilidades projetuais em maneiras sem precedentes. (BECHTHOLD, 2004, p. 2, tradução nossa).

O objetivo principal deste estudo reside em compreender algumas das presentes alternativas de concepção estrutural para superfícies rígidas tendo em vista sua retomada em um âmbito global em função dos presentes avanços da engenharia dos materiais e não processo de análise digital na arquitetura (BELLES, P.; ORTEGA, N.; ROSALES,

Figura 1 – Classificação de Sistemas Estruturais de Daniel Schodek e Martin Bechthold (2014). Fonte: SCHODEK, D., et. al., 2014, p. 5, adaptado por Felipe Corres Melachos.



M.; ANDRES, 0, 2008). Dentre estas alternativas, esta proposta de pesquisa visa se aprofundar justamente nas vertentes de *form-finding* associadas a questão da modelagem e fabricação digital na concepção estrutural propriamente dita.

O termo *form-finding* diz respeito a concepção estrutural na arquitetura, mais especificamente na “busca pela forma ideal de uma construção em um âmbito arquitetônico e estrutural” (COENDERS, BOSIA, 2006). Entretanto, parte do referencial teórico consultado também se refere ao termo complementando a definição acima como “um processo de otimização estrutural que usa as coordenadas nodais como variáveis” (BASSO, DEL GROSSO, 2011),

Como objetivos complementares, verifica-se a possibilidade de aprimorar estratégias de concepção estrutural de superfícies estruturais rígidas de dupla

curvatura no ensino mediante o contato com expertise tecnológica de baixa disseminação em território nacional. Também espera-se fomentar a concepção estrutural intuitiva, tanto em prancheta quanto em salas de aula, ao invés de suas matizes verificativas, por meio da exploração das relações construtivas e geométricas em edificações pertencentes a tipologia estrutural em análise.

Como método de pesquisa se propõem a análise e esgotamento de estudos de caso (SERRA, 2006) pré-selecionados em função de seu enquadramento na tipologia estrutural, oferta de material iconográfico acerca da obra, material utilizado no sistema construtivo e processo projetual e construtivo. Com base nos critérios elencados acima, ficou elencado a análise da cobertura em casca de concreto armado UHPFRC na estação ferroviária de Shawnessy, em Calgary no



Figura 2 – Estação ferroviária de Shawnessy, em Calgary no Canadá, projeto de Stantec Architecture e Lafarge Engineering em 2004. Esta edificação foi elencada como estudo de caso para esta pesquisa sobretudo em função de sua utilização de UHPFRC associada a pré-fabricação de cascas extremamente esbeltas. Fonte: VICENZINO, et. al., 2008, p. 51.

Canada, projeto de Stantec Architecture e Lafarge Engineering em 2004 (Fig 1.2). Este projeto se enquadra no escopo de trabalho proposto justamente por constituir de abóbodas autoportantes de matriz geométrica conóide (ENGEL, 2000), pré-fabricadas em UHPFRC, *ultra-high performance fiber Reinforced concrete*, vãos de 6 metros negociados a 20 mm de espessura, e processo projetual fortemente calcado pela fabricação digital.

Esta pesquisa apresenta impacto tecnológico e pedagógico (GODIN, DORE; 2007) justamente por promover a aproximação com ferramental de processo de projeto constituindo o estado da arte do *form-finding* no planeta. O contato de arquitetos, engenheiros e acadêmicos para com este ferramental de concepção estrutural corrobora com o estímulo para a melhor equipagem de nossas instituições de ensino superior de engenharia civil e arquitetura, assim como um estímulo para o ensino de sistemas estruturais em um viés intuitivo (REBELLO, 2004) em relação ao verificativo.

DESENVOLVIMENTO

Conforme já adiantado na seção acima, o método de pesquisa proposto é constituído dá a análise e esgotamento de estudos de caso (SERRA, 2006) pré-selecionados em função de seu enquadramento na tipologia estrutural, oferta de material iconográfico acerca da obra, material utilizado no sistema construtivo e processo projetual e construtivo. Com base nos

critérios elencados acima, ficou elencado a análise da cobertura em casca de concreto armado UHPFRC na estação ferroviária de Shawnessy, em Calgary no Canada, projeto de Stantec Architecture e Lafarge Engineering em 2004 (Fig 1.2).

Este projeto se enquadra dentro dos critérios de escolha de estudo de caso pois sua cobertura é formada por abóbodas autoportantes de matriz geométrica conóide (ENGEL, 2000), pré-fabricadas em UHPFRC, *ultra-high performance fiber Reinforced concrete*, vãos de 6 metros negociados a 20 mm de espessura, e processo projetual fortemente calcado pela fabricação digital.

É sabido que o concreto pré-moldado acaba por promover acabamentos superiores, tolerâncias construtivas mais rígidas, maior velocidade da construção, menos manutenção (CHING, 2014). A questão do custo do concreto pré-moldado varia consideravelmente de país para país, e até mesmo de região para região como no caso do Brasil (TCPOWEB, 2018), mas sua adoção em módulos repetidos costuma ser menos onerosa que o concreto armado convencional.

Vicenzino et. al. (2005) apontam que a proposta inicial para a cobertura da estação ferroviária Shawnessy foi concebida em aço, mas sua mudança para o concreto armado se deu justamente por razões econômicas, de durabilidade e estéticas. A composição resultante de UHPFRC é amigável ao degelo, um parâmetro projetual a ser considerado no Canadá, e conseguiu negociar seus vãos com apenas 20 mm de espessura. Com

relação ao preço, o valor de construção total ficou em U\$ 2.600.000,00, mas o pioneirismo da adoção deste material no Canadá neste projeto, fez com que os projetos posteriores no mesmo material se tornassem relativamente mais baratos (ACKER, 2004).

De acordo com Nowodworski (2002) existem muitas patentes de concreto de alto desempenho, e estas incluem a adição de cimento Portland, micro sílica, quartzo, areia fina de sílica, redutores de água de alta absorção, e fibras orgânicas ou de aço. De acordo com Vincenzino et. al. (2005), a formula utilizada para o estudo de caso desta pesquisa possui estes materiais e chega a resistência de compressão mínima de 130 MPa. A resistência a flexão do material ficou em 18 MPa, sendo que estes valores foram obtidos pela omissão de armação com aço convencional, o que possibilitou maior resistência a flexão e maior capacidade de deformação. De fato, Vincenzino et. al. (2005) reforçam que a armação dos domos de cobertura se deu justamente por fibras de álcool polivinílico.

Tendo em vista que esta foi a primeira utilização deste tipo de armação para coberturas em casca, a Prefeitura de Calgary solicitou a elaboração de um protótipo em 1:1 para testes de resistência mecânica (Figura 1.3) em função da ausência de normativas para este material. Esta ausência de normativas, inclusive, paradoxalmente opera como principal obstáculo para a sua adoção no Brasil, pois o preço dos insumos poliméricos de armação estão sujeitos a oscilação

do Dólar, de modo que a contrapartida financeira citada por Acker (2004) perderia força se trasladada a realidade nacional.

No caso do Canadá, a própria prefeitura de Calgary auxiliou nos custos do protótipo por se tratar de uma obra pública, mas Vincenzino et. al. (2005) ressaltam que este não foi o caso em outros países na qual houve a tentativa de implementação deste tipo de sistema estrutural. De acordo com Vincenzino et. al. (2005), somente França, Austrália, Japão e EUA dispõem de normativas técnicas que dispensam a execução de protótipos preventivos.

A figura 4 ilustra a concepção estrutural do projeto por meio do corte transversal da estação Shawnessy. Nesta figura é possível observar como a cobertura em casca de cada um dos módulos é conectada por ligações junto aos apoios. De acordo com Vincenzino et. al. (2005), a concepção dos apoios partiu de ensaios com elementos de viga, fazendo as vezes de ligações. Nesta figura também fica evidenciada a maneira na qual a seção transversal foi composta de três cascas ligadas para se portar como uma unidade estrutural, ao passo que na Figura 5 fica evidenciada a necessidade de uma viga de borda para encaminhar os esforços das superfícies curvas para os elementos lineares da estrutura.

De acordo com Vincenzino et. al. (2005), esta viga necessitou de armação em aço convencional, o que nos permite verificar como a cobertura proposta em UHPRFC necessita de reforço em termos

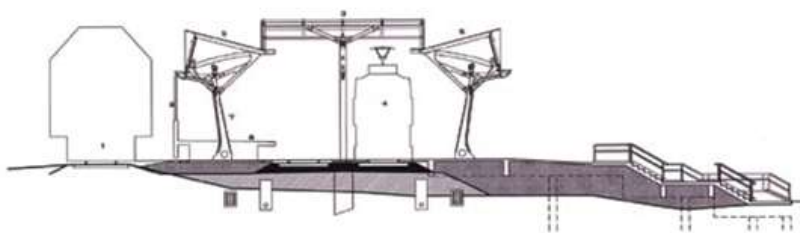


Figura 3 – Protótipo 1:1 da estação ferroviária de Shawnessy, conforme solicitado pela Prefeitura de Calgary em função do ineditismo do sistema estrutural. Fonte: VICENZINO, et. al., 2008, p. 61.

Figura 4 – Protótipo 1:1 da estação ferroviária de Shawnessy, conforme solicitado pela Prefeitura de Calgary em função do ineditismo do sistema estrutural. Fonte: VICENZINO, et. al., 2008, p. 61.

SECTIONS

- 1. CR Walk
- 2. Precast Concrete Screen
- 3. Reinforced Glass Concrete
- 4. Custom LIFT
- 5. Custom Carrot
- 6. Inboard Platform
- 7. Custom Column



de empuxo em peças de armação e robustez características do concreto armado convencional. Isto é, a cobertura esbelta dos módulos de casca foi viabilizada, portanto, por uma viga de transição. Nowodworski (2002) assume que as tensões oriundas do acúmulo de neve na cobertura são potencializadas pelo aumento de carga accidental na estrutura, de modo que esta viga de transição na borda da cobertura poderia muito bem ser interpretada como um fator de segurança para com o clima severo da região do projeto.

A equipe de projetistas da Stantec Architecture optou pela cor branca na cobertura, especialmente em sua porção inferior, de modo a refletir a claridade no interior da estação (VICENZINO, 2005). Estes arquitetos também justificam a escolha sugerindo que este acabamento faria a estação brilhar ao amanhecer e entardecer, facilitando sua visualização a distância.

Esta premissa está justificada pela redução de horas de sol no inverno da cidade, e influenciou a concepção do projeto a medida que os insumos da mistura tiveram que gerar uma aparência esbranquiçada. Acker (2004) sugere que é possível que fazer com que os elementos de ordem mecânica que trabalham na mistura desta variação de concreto fibroso também possam ser aproveitados e manipulados no que diz respeito ao apelo estético das peças resultantes, tal qual se faz em painéis de concreto pré-moldado convencionais, como os da *Stamp*, aqui no Brasil.

Este tipo de decisão, assim como a

leveza resultante da concepção estrutural deste projeto são em parte resultantes da ação conjunta de arquitetos e engenheiros na resolução do problema projetual. Martin Bechthold (2008) é um dos maiores defensores desta dualidade e seus benefícios implícitos, em uma alusão intrínseca aos escritos de David Billington (1983), onde fica estabelecido que o engenheiro civil competente é aquele que opera como um *artista estrutural*: unindo eficiência técnica e qualidade estética. Esta é uma constatação importante a ser objeto de reflexão nos bancos escolares de formação de engenheiros e arquitetos no que diz respeito a concepção estrutural: a dupla-docência de engenheiros e arquitetos nestas disciplinas.

A execução dos módulos deste projeto foram viabilizados pela repetição das formas para as cascas e colunas. Entretanto, o resultado da mistura para esta aplicação de UHPFRC foi resultado de experimentação conduzida pela equipe da Lafarge Engineering, de modo que estes ensaios resultaram nas 6 constatações abaixo (VICENZINO et. al., 2005):

1. Quais mudanças no processo de produção e mistura do concreto armado convencionais seriam necessárias para produzir o UHPFRC adequadamente?
2. Quais métodos de manufatura seriam necessários para produzir concreto armado pré-moldado com superfície consistentemente lisa?
3. Quais métodos de pré-moldagem irão maximizar a eficiência da orientação das fibras durante seu



Figura 5 – Viga de borda na base da região curva das abóbodas: mecanismo para conter o empuxo e transmitir as cargas para elementos lineares. Fonte: TRUCKER PHOTO. 1 fotografia. 2004.

assentamento?

4. Tendo em vista que o concreto UHPRFC tende a encolher duas vezes mais que o concreto convencional, quais processos irão fazer com que este encolhimento ocorra no início do processo de cura, mantendo assim a integridade estrutural da mistura?
5. Quais métodos de controle de qualidade seriam necessários para assegurar a espessura de 20 mm em uma superfície de dupla-curvatura.
6. É sabido que o UHPRFC necessita ser formado 20 minutos após a mistura, de modo que as técnicas de bombeamento se tornam as opções mais atrativas para seu assentamento. Quais métodos de bombeamento poderiam eficientemente ?

Mesmo após tanto mais de uma década da execução deste projeto, nem todas estas perguntas tem respostas precisas. Entretanto, é válido ressaltar a maneira na qual a solução final da estação Shawnessy é oriunda da experimentação no processo de projeto. Esta experimentação se deu inclusive em um âmbito computacional (VINCENZINO, et. al., 2005), e possibilitou a manipulação de parâmetros projetuais até por meio de tentativa e erro em busca da solução na qual o projetista depositasse maior confiança (FLORIO, 2009). Estas manipulações foram conduzidas por meio do *software* SAP2000 associada a um modelo FEM (*Finite Element Model* – Modelo de Elementos Finitos), de modo que o *output* a serem mensurados eram a resis-

tência as cargas acidentais e permanentes associadas ao projeto propriamente dito, assim como o comportamento estrutural e caminhamento de forças na superfície projetada em função da natureza dúctil do UHPRFC.

Estas experimentações permitiram com que a equipe de Flange Engineering pudessem constatar que as questões de elencadas sobre a mistura do UHPRFC podem ser parcialmente combatidas com o controle da temperatura no processo, ao passo que a execução detalhada das fôrmas por meio de fabricação digital na CNC permitiram tanto o controle de sua diminuta espessura, quanto controle de seu encurtamento e curvatura. Para tanto, foi necessário o corte a laser de fôrmas que possam cobrir todas as faces das peças (Figura 6). (VINCENZINO, et. al., 2005). A recomendação utilização da fabricação digital para a confecção de peças de geometria complexa é atestada nos escritos de Florio (2009) e Bechthold (2008).

A produção seriada destes módulos de cobertura só foi viabilizada em função da precisão atingida pela fôrma fabricada pela CNC, que absorveu os arquivos *.dxf* oriundos dos modelos experimentais de FEM. Esta experimentação computacional e laboratorial conduzida no processo projetual deste projeto, de modo que ficam abertas lacunas para aprimoramento na customização seriada de fôrmas para cascas de dupla-curvatura.

Da mesma maneira que os grandes artistas estruturais do século XX (BILLINGTON, 1985), a equipe da

Flange Engineering desenvolveu equipamentos para a execução do projeto. Foram projetados equipamento de bombeamento próprios para a mistura da UHPRFC da Estação Shawnessy, justamente para controlar a entrada e saída de oxigênio da mistura, assim como a orientação das fibras (VINCENZINO, 2005). Também foram projetados carrocerias de caminhão com 3 pontos de contato de modo a estabilizar melhor a base de cada módulo de cobertura, assim como as formas móveis junto aos apoios para o assentamento das coberturas nos pilares. O desenvolvimento deste ferramental de bombeamento também foi objeto de experimentação por meio de modelagem computacional, pois os diferentes efeitos dos sistemas de bombeamento foram testados nos modelos computacionais antes dos ensaios realizados no Centro de Inovação Tecnológica da Universidade de Calgary.

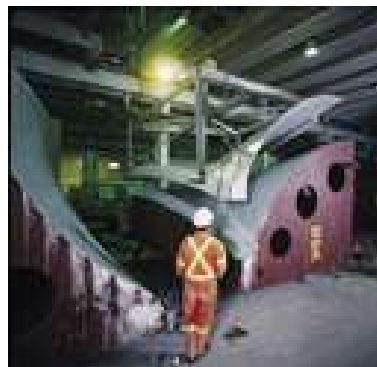
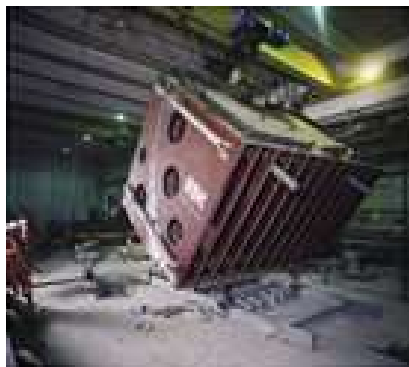
As coberturas foram assentadas de 3 em 3 módulos se utilizando das fôrmas na Figura 6.d. Assim que o conjunto de três módulos subsequente ao primeiro conjunto fosse assentado, Vincenzino et. al. (2005) explicam que as duas sequencias

de 3 módulos eram unidos por juntas e assim as formas do primeiro conjunto seriam retiradas e aproveitadas na sequencia seguinte. O mesmo procedimento seria realizado para os módulos subsequentes, ilustrando que não obstante o caráter inovador deste sistema construtivo, sua execução ainda está calcada na reutilização e racionalização do processo construtivo das cascas. Artistas estruturais do passado (BILLINGTON, 1985), como Eladio Dieste e Heinz Isler se nutriram a mesma preocupação ao projetar cascas em sistemas construtivos até então experimentais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto da Estação ferroviária Shawnessy demonstra o potencial da concepção estrutural de cascas em UHPFRC em sua primeira manifestação construtiva já registrada. A complexidade geométrica da solução projetual adotada no projeto, assim como sua espessura, acabam por induzir a experimentação computacional e laboratorial. Este caráter de experimentação acaba por prover

Figura 6 – (a) forma metálica executada na CNC sendo rotacionada de modo a viabiliza a uniformização das fibras nas misturas; (b) desfôrma de módulo de casca para cobertura; (c) transporte da fabricação até o canteiro necessitou de carroceria adaptada pelos engenheiros para que a base do baú tivesse 3 pontos de contato conforme moldagem dos módulos de cobertura; (d) escoras para o posicionamento das coberturas junto aos apoios centrais. Fonte: TRUCKER PHOTO. 4 fotografias. 2004.



ao projeto com uma solução na qual os projetistas se sintam mais confiantes, tal qual fomentar a operação conjunta de arquitetos e engenheiros em busca de eficiência estrutural, qualidade estética, e racionalidade no processo de construção e fabricação das peças executadas.

Esta experimentação foi potencializada pela operação conjunta de arquitetos e engenheiros no processo de concepção e execução da obra em questão. A presença de ambos os profissionais permitem a determinação de soluções tecnicamente eficientes e dotadas de qualidade estética, uma vez que as escolhas feitas através da manipulação dos parâmetros projetuais nos modelos FEM foram tomadas com base em um espectro transdisciplinar de expertise. Tal condição suscita a necessidade de reflexão acerca da implementação de equipes conjuntas de arquitetos e engenheiros na instrução destes profissionais a nível de graduação.

A utilização do UHPFRC provou que existe ainda mais potencial para aprimorar suas atestadas qualidades construtivas em termos de resistência mecânica, durabilidade da estrutura, conservação dos materiais,

redução do custo de construção e melhor aproveitamento do ciclo de vida dos insumos construtivos. Tendo em vista que a premissa construtiva original era realizar a cobertura da Estação Shawnessy em metal, fica comprovado de que existe a possibilidade de realizar coberturas em concreto armado com a mesma espessura do metal, e com vantagens no processo construtivo e vida útil da obra como um todo.

Todavia foram constatados obstáculos na execução destas coberturas em função de suas fôrmas. Entretanto, estes obstáculos foram satisfatoriamente combatidos por meio da experimentação computacional e laboratorial conduzida no processo projetual deste projeto, de modo que ficam abertas lacunas para aprimoramento na customização seriada de fôrmas para cascas de dupla-curvatura. Estes aprimoramentos são especialmente marcados pelo ferramental de bombeamento e pressurização da mistura de UHPFRC nas fôrmas, assim como os ensaios realizados por meio de modelagem computacional e ensaios laboratoriais para prever variações na conformação das peças finalizadas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKER, Phillip; et. al. "Ductal Technology: A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications". *Fib Symposium*. Avignon, France: April 2004, pp. 45-56.
- ADDIS, Bill. **Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction**. New York: Phaidon Press Limited, 2007.
- BASSO, Paolo, DEL GROSSO, Andrea. "Form-finding methods for structural frameworks: a review." **Proceedings of the International Association of Shells and Spatial Structures**. Londres: 2011, pp. 170-1983.
- BECHTHOLD, Martin. **Innovative Surface Structures – Technologies and Applications**. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2008.
- BELLES, P.; ORTEGA, N.; ROSALES, M.; ANDRES, O. "Shell form-finding: Physical and design tools". **Engineering Structures**. 2009. P. 2656-2666.
- BILLINGTON, D. **The Tower and the Bridge**. Princeton: Princeton University Press, 1985.
- CHILTON, John. **Heinz Isler**. Londres: Thomas Telford, 2000.
- CHING, Francis. **Sistemas Estruturais Ilustrados**. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- COENDERS, Jiri., BOSIA, D. Computational tools for design and engineering of complex geometrical structures: From a theoretical and a practical point of view. In: [Oosterhuis, Kas., Feireiss, Luka. (Eds.)]. **Game Set And Match II. On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies**. Rotterdam: Episode Publishers, 2006.
- DESIDERI, Paolo; NERVI JR., Pier Luigi. POSITANO, Giuseppe. **Pier Luigi Nervi**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S. A., 1982.
- ENGEL, Heino. **Sistemas de Estruturas**. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 2001.
- FLORIO, Wilson. "Modelagem Paramétrica, criatividade e projeto: Duas experiências com estudantes de arquitetura". **Gestão e Tecnologia de Projetos**. 2011. São Carlos: v.6, n.2, p. 43-66.
- FLORIO, Wilson. "Modelagem Paramétrica em Arquitetura: Estratégias para materializar Formas Complexas". **SIGraDi 2009**. 2009. Sao Paulo: Proceedings of the 13th Congress Congress of the Iberoamerican Iberoamerican Society Society of Digital Digital Graphics, pp. 59-61.
- FLORIO, W. "Modelagem paramétrica na concepção de elementos construtivos de edifícios complexos". **XV Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. 2014. Maceió: Anais..., pp. 2943-2953.
- FLORIO, Wilson. "Knowledge, Repertoire and Ruled Surfaces in Oscar Niemeyer's Architecture". **Journal for Geometry and Graphics**. 2007. v. 11, n. 2, p. 209-222.
- FREYSSINET, Eugene. Freyssinet by Himself. In: [BILLINGTON, David]. **Half-Century of French Prestressing Technology**. Princeton: Princeton University Press: 1983.
- KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age: Design and Manufacturing**. Londres: Taylor & Francis, 2003.

- NOWODWORSKI, Henry. "Ultra-High-Performance Concrete with Ductility: The World's First Long-Span Roof in Ductal – The Joppa Clinker Dome Roof." **CSCE (Canadian Society of Civil Engineering) Annual Conference**. Montreal, Quebec, 2002.
- OTTO, Frei. **Das hanged Dach**. Berlin: Bauwelt Verlag, 1954.
- OTTO, Frei. **Forming Bubbles**. Stuttgart: Universidade de Stuttgart, 1988.
- PEDRESCHI, Remo. **The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture**. London: Telford, 2000.
- PICON, Antoine. **French Architects and Engineers in the Age of Enlightenment**. New York: Cambridge University Press, 1992.
- POTTMANN, Helmut. **Architectural geometry**. Exton: Bentley Institute Press, 2007.
- REBELLO, Yopanan. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate, 2001.
- REBELLO, Yopanan. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. São Paulo: Zigurate, 2011.
- ROLAND, Conrad. **Frei Otto: estructuras : estudios y trabajos sobre la construcción ligera**. Barcelona: G. Gili, 1973.
- SASS, Lawrence. **Reconstructing Palladio's Villa: An Analysis of Palladio's Villa Design and Construction Process**. Tese de Doutorado em Arquitetura – Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2000.
- SASS, Lawrence; OXMAN, Rivka. "Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design". **Design Studies**. 2006. Londres: V. 27, n. 3, pp. 325-355.
- SCHODEK, Daniel; et. al. **Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- SCHODEK, Daniel; BECHTHOLD, Martin. **Structures**. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- TAGLIARI, Ana; PERRONE, Rafael; FLORIO, Wilson. **Vilanova Artigas: Projetos Residenciais Não Construídos**. São Paulo: Ed. Annablume, 2017.
- TCPOWEB. Disponível em: <<http://tcpoweb.pini.com.br/home/home.aspx>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Elsevier, 2006.
- TIMOSHENKO, Stephen.; et. al. **Theory of Shell and Plates**. Nova Iorque: McGrall-Hill, 1940.
- TORROJA MIRET, Eduardo. **Razon y ser de los tipos estructurales**. Madrid: Colegio de Ingenieros Caminos Madrid, 2008.
- VICENZINO, Enzo; et. al. "First use of UHPFRC in thin precast concrete roof shell for Canadian LRT Station". **PCI Journal**. 2005. September-October 2005, pp. 50-67.
- WHESTON, Richard. **Materials, Form and Architecture**. New Haven: Yale University Press, 2003.