

CONCEPÇÃO DO MODELO DA BARRAGEM DE ITAIPU COM A TECNOLOGIA DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Fabício de Andrade Fabian (aluno de IC) e Alfonso Pappalardo Jr. (Orientador)

Apoio: PIBITI CNPq

RESUMO

No campo da Engenharia Civil, a criação de modelos físicos concebidos a partir do uso da tecnologia de prototipagem rápida permite facilitar reflexões sobre os métodos construtivos adotados e suas etapas, as interferências entre os subsistemas e os aspectos estéticos de uma construção. Este trabalho consiste na elaboração de um modelo 3D do reforço realizado nas fundações da Barragem Principal de Itaipu, devido aos deslocamentos diferenciais observados durante a sua construção que comprometeram a segurança estrutural da obra. Este comportamento inesperado, ocasionado por uma falha geológica no leito de basalto, levou à paralisação da construção. A solução adotada para este problema foi a construção de uma grelha de túneis de concreto – conhecidas por chavetas – cobrindo uma área de 40 mil metros quadrados sob a região afetada. A concepção do modelo tridimensional da Barragem de Itaipu foi realizada a partir das plantas executivas das seções transversais dos blocos-chave, criadas nos anos 70. Uma vez concebido o modelo tridimensional, por interpolação e varredura das seções, o mesmo foi transferido para uma impressora 3D para sua materialização. Por razões de preservação do meio ambiente, definiu-se que o filamento da impressora seja constituído do material PLA, também conhecido como polilático, que é derivado do milho e biodegradável. Conclui-se que a produção de modelos 3D permite um aumento do interesse do aluno nas disciplinas do curso de Engenharia Civil e da capacidade de assimilação de conhecimentos técnicos para a criação de projetos e execução de construções de estruturas civis complexas e de grande porte.

Palavras-chave: impressão 3D, Barragem Principal de Itaipu, reforço de fundação

ABSTRACT

In the field of Civil Engineering, the creation of physical models conceived from the use of rapid prototyping technology allows to facilitate reflections on the constructive methods adopted and their stages, the interferences between the subsystems and the aesthetic aspects of a construction. This work consists on the elaboration of a 3D model of the Itaipu Main Dam, due to the differential displacements observed during its construction that compromised the structural safety. This unexpected behavior, caused by a geological fault in the basalt bed, resulted in the construction interruption. The solution adopted was the construction of a grid of

concrete tunnels - known as *chavetas* - covering an area of 40,000 square meters under the affected region. The three-dimensional model was carried out from original drafts of Itaipu Main Dam, created in the 1970s. Once the three-dimensional model was created, by extruding of the transversal cross sections, it was transferred to a 3D printer for its materialization. Due environmental questions, it has been defined PLA filament for the printer, also known as polylactic acid, which is derived from maize and biodegradable. It is concluded that the production of 3D models allows an increase in the student's interest in the Civil Engineering course and in their ability to assimilate technical knowledge for the creation of projects and execution of constructions of complex and large civil structures.

Keywords: 3D printing, Itaipu Main Dam, foundation reinforcement works

1. INTRODUÇÃO

As atividades de pesquisa em Engenharia Reversa, fazendo uso da metodologia baseada em laboratórios virtuais, atualmente tem se demonstrado uma das práticas mais aceitas no processo de ensino-aprendizagem nos cursos de Engenharia Civil (PRAVIA, 1995; BELHOT, 1997; MARCHETI, 2001). Objetivamente a Engenharia Reversa – apresentada nos cursos de Engenharia Civil e de Arquitetura – não só consiste em promover a excelência construtiva, como também, as práticas recomendadas para a desconstrução eficiente e segura e a destinação correta dos resíduos de construção gerados.

Este estudo foi inspirado, inicialmente, nos modelos tridimensionais (Figuras 5 a 8) apresentados na Exposição Internacional Nervi (Pier Luigi Nervi, 1871 – 1979), importante engenheiro italiano, autor de projetos arquitetônicos brilhantes e vanguardistas e construtor de diversas obras emblemáticas do Século XX, entre as quais destacam-se o Centro de Exposições de Turim (Figura 1), o *Palazzetto dello Sport* (Pequeno Palácio do Esporte) em Roma (Figura 2), o Salão de Audiências Pontíficas na Cidade do Vaticano (Figura 3) e a Embaixada da Itália em Brasília (Figura 4).



Figura 1 Abóboda do Centro de Exposições de Turim (inaugurado em 1950)
Fonte: PLN Project Association



Figura 2 Palazzetto dello Sport (inaugurado em 1957)
Fonte: PLN Project Association



Figura 3 Salão de Audiências Pontificias (inaugurado em 1971)
Fonte: PLN Project Association



Figura 4 Embaixada da Itália em Brasília (inaugurada em 1979)
Fonte: PLN Project Association

Em todas as obras citadas, ressaltam-se as seguintes características: (i) a leveza dos elementos construtivos; (ii) a utilização de elementos estruturais pré-fabricados permitindo a industrialização da construção; (iii) a racionalização do projeto com tamanhos e formatos padrão; (iv) e o alto desempenho do ambiente construído, atendendo os mais severos critérios de conforto térmico, acústico e lumínico. Pela complexidade das suas construções, diversos edifícios são objeto de estudo em universidades e faculdades principalmente ligada à área de tecnologia ao redor do mundo.



Figura 5 Modelo 3D do Hall C do Centro de Exposições de Turim
Fonte: PLN Project Association



Figura 6 Modelo 3D do *Palazzetto dello Sport*
Fonte: PLN Project Association



Figura 7 Modelo 3D do Salão de Audiências Pontifícias Fonte: PLN Project Association



Figura 8 Modelo 3D da Embaixada da Itália em Brasília Fonte: PLN Project Association

O sucesso da Exposição Internacional Nervi, que percorreu as principais capitais no mundo, é garantido pelo charme dos modelos tridimensionais, desenvolvidos pelo Grupo NerViLab (Nervi Virtual Lab) do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Universidade de Roma La Sapienza e foram materializados por fabricação digital, com a técnica estereolitografia ou manufatura aditiva por fotopolimerização.

Neste sentido, o desenvolvimento de modelos físicos, obtidos por fabricação digital (FABLAB), permite a materialização do projeto para uma reflexão sobre os métodos construtivos (etapas de construção ou de montagem), as interferências entre os subsistemas da construção, os aspectos estéticos da obra e a resposta estática e dinâmica do sistema estrutural frente aos cenários carregamentos.

A pesquisa atual consiste na produção de um modelo reduzido de um trecho da Barragem Principal de Itaipu, indicada no Esquema 1, utilizando uma impressora 3D. O

objetivo é despertar o interesse dos alunos através de um contato direto e similar à realidade que as tradicionais representações bidimensionais, aumentando sua capacidade de criação, assimilação e desenvolvimento. Na área da construção, a utilização de modelos tridimensionais traz a melhor compreensão do projeto e, na área acadêmica, mais dinâmica às aulas e alunos mais motivados (PRAVIA, 1995).

A escolha do tipo gravidade aliviada para a Barragem Principal, que corresponde à estrutura mais alta da usina, com cerca de 180 metros medidos a partir da fundação, permitiu grande diminuição no consumo de concreto. A Barragem Principal, do tipo barragem de gravidade aliviada, sustenta-se com seu peso próprio e possui base alargada suficiente para resistir aos empuxos d'água, diferentemente de um bloco maciço de concreto. Assim, há economia de material e maior facilidade para a construção, uma vez que se permite que as paredes da barragem sejam mais inclinadas, diminuindo ainda mais a pressão da água na direção horizontal. O fato de haver grandes espaços livres no interior da estrutura de concreto – conhecidos por catedrais – possibilita, inclusive, que as turbinas geradoras de energia sejam posicionadas dentro da estrutura (ITAIPU BINACIONAL, 2010).

Por conta do tamanho da construção, cuja execução contou com aproximadamente 40 mil trabalhadores diretos, foi montada uma grande estrutura de produção para garantir o suprimento da demanda de materiais. Foram implantadas quatro centrais de britagem com capacidade total de 2430 toneladas/hora de produção de agregados, seis centrais de concreto com capacidade de produzir 180 m³ por hora, e um sistema de monovias, guindastes e cabos aéreos para o transporte e lançamento do concreto (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

Esquema 1 Barragem Hidrelétrica de Itaipu: (1) Barragem de Terra Esquerda; (2) Barragem de Enrocamento; (3) Barragem de Ligação; (4) Estrutura de Desvio; (5) Barragem Principal; (6) Casa de Força; (7) Barragem Lateral Direita; (8) Vertedouro e (9) Barragem de Terra Direita



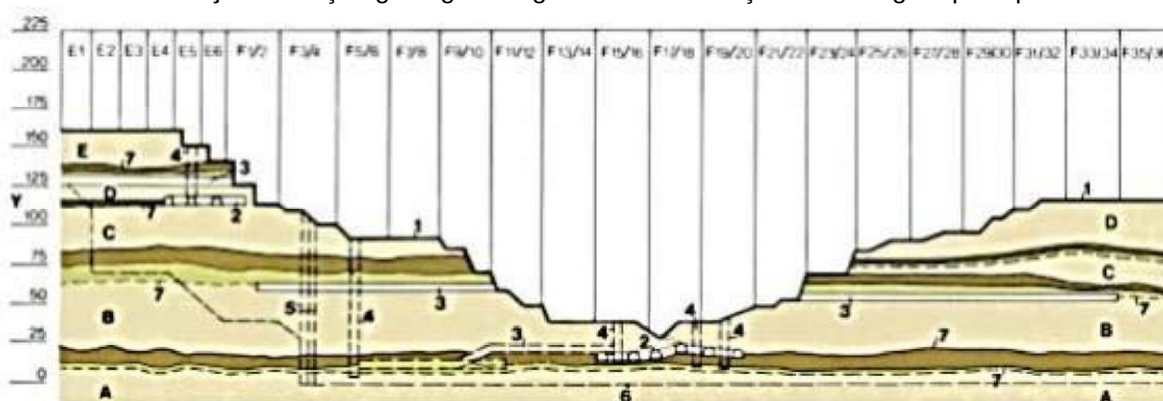
Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2009

Para minimizar o risco de aparição de fissuras no concreto, por elevação adiabática da temperatura, a concretagem dos blocos foi feita em camadas, de modo que não houvesse a execução de blocos excessivamente grandes, permitindo assim a dissipação adequada do calor de hidratação. Devido à elevada temperatura ambiente durante a concretagem, foram instaladas usinas de resfriamento que possibilitaram a produção de concreto a 4°C, reduzindo também a temperatura máxima atingida durante a reação do cimento com a água.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

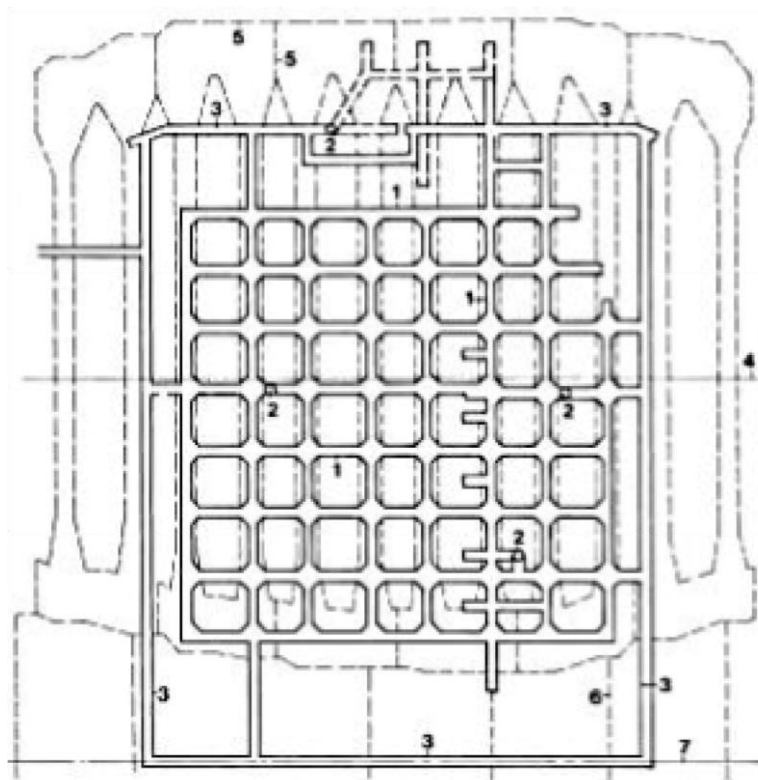
A Usina Hidrelétrica de Itaipu foi escolhida por ser uma estrutura icônica, reconhecida internacionalmente, que apresentou certos comportamentos inesperados no leito rochoso durante sua construção. Embora o levantamento geológico tenha confirmado a qualidade do leito, os engenheiros encontraram uma camada de rocha pouco resistente – não detectada nas investigações geológicas preliminares–, que precisou ser reforçada com concreto de alta resistência. Uma camada de rocha menos resistente, a cerca de 20 metros abaixo da base da estrutura da Barragem Principal, conforme indicado no Esquema 2, levou a recalques diferenciais da mesma e à ameaça de todo o projeto estrutural. A obra foi paralisada por cerca de um ano para que o problema pudesse ser contornado. A solução encontrada foi a escavação de uma grande malha de túneis em sistema de cruzetas, composto por uma série de túneis distribuídos em padrão quadriculado (Ilustrações 1 e 2) sobre a rocha de baixa resistência e o preenchimento dos mesmos com concreto (Fotografia 1) de modo que se aumente a resistência do solo.

Ilustração 1 Seção geológica longitudinal da fundação da barragem principal



Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2009

Ilustração 2 Reforço na fundação da barragem principal (El. 20)



Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2009

Fotografia 1 Estrutura de reforço (a) túnel perimetral na fundação
(b) chaveta na fundação da barragem principal (El. 20m)



Fonte: PASQUALI, 2017

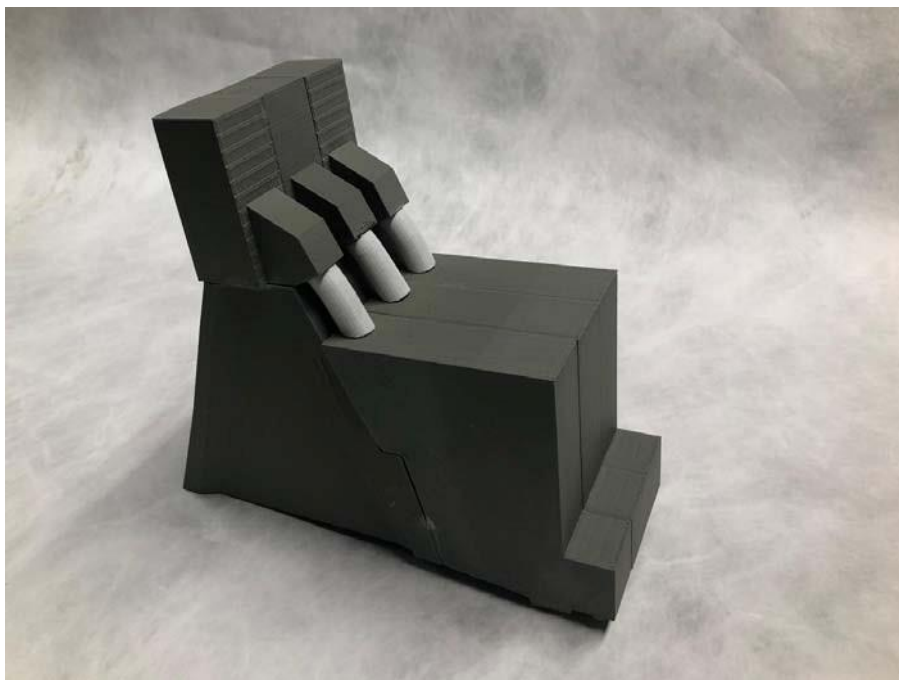
3. METODOLOGIA

A barragem é constituída de blocos instrumentados para o acompanhamento do comportamento da estrutura ao longo das fases de construção, enchimento do lago e operação: (i) pêndulos diretos, que medem os deslocamentos horizontais de pontos dos blocos em relação à fundação; (ii) pêndulos invertidos, que medem deslocamento horizontal da fundação em relação a um ponto mais profunda da própria fundação, a ponto de ser considerado fixo; (iii) medidores elétricos de junta, que medem deslocamentos de juntas de contração do concreto; (iv) bases de alongamento, que medem abertura, fechamento, recalque e deslizamento entre blocos ou juntas de monólitos; (v) deformímetros de armadura, que medem as tensões na armadura interna do concreto; (vi) deformímetros de concreto, que medem a deformação do concreto e, através dessa deformação, fornecem a tensão atuante na estrutura; (vii) tensômetros de concreto, que medem as tensões internas dos blocos de concreto; (viii) termômetros, que medem a temperatura no interior e na superfície da estrutura de concreto; (ix) medidores de vazão, que medem a vazão de percolação através das estruturas; (x) extensômetros de hastes múltiplas, que medem as deformações da fundação com relação ao ponto de ancoragem de sua haste; (xi) piezômetros elétricos, que monitoram a subpressão atuante no local de sua instalação; (xii) medidores de recalque, que medem deformações verticais nas barragens de terra; (xiii) células de pressão total, que medem as pressões atuantes nas zonas de contato solo-concreto; (xiv) medidores triortogonais, que medem os deslocamentos entre juntas de concreto e zonas fraturadas nas rochas adjacentes e (xv) medidores de nível d'água, que medem o nível de água do subsolo. Alguns destes instrumentos podem ser observados no Esquema 2.

A partir de 2016, houve contato constante entre alunos da Universidade Presbiteriana Mackenzie e o corpo técnico dos diversos setores em Itaipu, visando a colaboração para uma pesquisa conjunta, com a contratação de alunos para Programa de Estágios durante o período de recesso acadêmico e visitas técnicas especiais aos alunos e docentes do curso de Engenharia Civil que participaram do 60º Congresso Brasileiro do concreto IBRACON.

Uma vez definida a geometria a ser adotada, com base em plantas e elevações disponíveis na literatura, foi feita a impressão de três blocos-chave F16 a F18 da barragem principal e um modelo da topografia dos arredores.

Fotografia 2 Blocos-chave F16 a F18 da Barragem Principal



Fonte: Autor.

Fotografia 3 Vista inferior da estrutura de concreto aliviada e leito rochoso com sistema de cruzeta



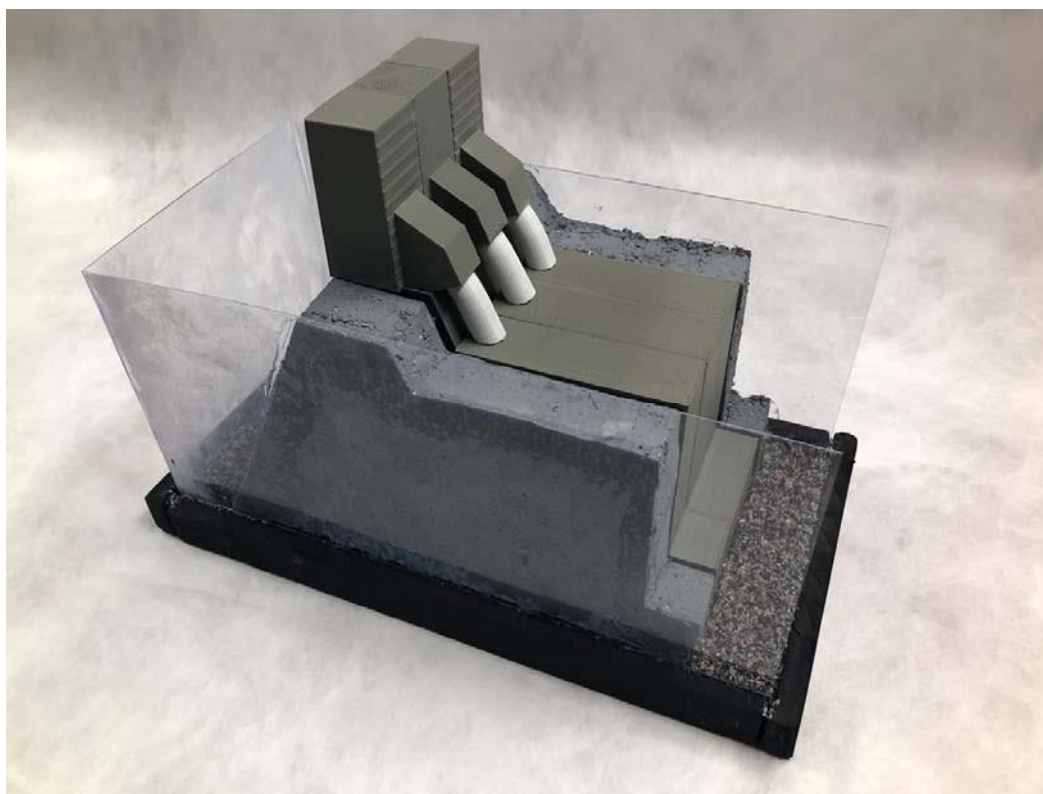
Fonte: Autor.

Fotografia 4 Detalhe do sistema de cruzetas para reforço do leito rochoso



Fonte: Autor.

Fotografia 5 Perspectiva do modelo completo



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fotografias 2 a 5 apresentam o modelo 3-D dos blocos-chave da Barragem Principal de Itaipu e do sistema de cruzetas para reforço da rocha de fundação. Todos os elementos do modelo foram desenvolvidos no Laboratório de Estruturas do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Foram encontradas diversas dificuldades ao longo do processo de materialização: plantas com discrepâncias ou falta informações, transformação do modelo bidimensional em modelo sólido, posicionamento da peça na impressora 3D para garantir a melhor reprodução e montagem do conjunto de peças.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais aspectos positivos observados no desenvolvimento do projeto são apresentados a seguir. A Tecnologia de Fabricação Digital permitiu proporcionar uma utilização mais ampla de ferramentas computacionais para o ensino da Engenharia de Estruturas, de forma fácil e interativa quanto a construção (montagem) de estruturas de barragens de concreto.

Estudos eólicos e sísmicos realizados por meio de ensaios em túnel de vento e ensaios dinâmicos associados à Teoria dos Modelos reduzidos para a previsão do comportamento da estrutura frente a estes cenários, mediante o uso de materiais termoplásticos indicados para ensaios laboratoriais: resistência mecânica, fadiga, medição de vibrações (frequências naturais), absorção de impacto, resistência ao fogo e às altas temperaturas.

Em termos de conhecimentos acumulados neste estudo destaca-se: (a) compreensão da instalação e funcionamento do sistema auscultação (instrumentação) da barragem; (b) compreensão das fases de construção e do método construtivo da estrutura proposta; (c) simulação dos efeitos de recalque de apoio e deformação lenta por fluência da rocha em programa de análise estrutural; (d) entendimento sobre a técnica mais eficiente de reforço estrutural para a fundação; (e) produção de kits de diversas barragens brasileiras de fama internacional: Belo Monte, Tucuruí, Jirau, Ilha Solteira, Xingó dentre outras hidrelétricas de grande porte do Brasil.

6. REFERÊNCIAS

BELHOT, R. V. Reflexões e propostas sobre o “ensinar engenharia” para o século XXI. São Carlos, 113p. Tese (Livre Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1997.

ITAIPU BINACIONAL (Ed.). Instrumentação. 2010. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/instrumentacao>>. Acesso em: 02 maio 2017.

ITAIPU BINACIONAL. Projeto: Aspectos de Engenharia. Foz do Iguaçu, PR, 2009. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br>>. Acesso em: 02 maio 2017.

MARCHETTI, A. P. C. Um estudo Exploratório Utilizando a Teoria das Inteligências Múltiplas, 179p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, EESC-USP, 2001.

PASQUALI, Luísa Salvati de. Integração do Monitoramento Geodésico com a Instrumentação de Segurança em Barragem de Concreto. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

PRAVIA, Z. M. C.. Modelos Reduzidos para o Ensino de Estruturas. In: XXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 1995, Recife. ANais, 1995. v. 1.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Ministério da Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Aos acadêmicos do curso de engenharia civil Max Branco Rossmark Schramm e Yuri Felipe da Silva pelo apoio na montagem do modelo reduzido e na criação da maquete.

Contatos: fabricao@hotmai.com
alfonso@mackenzie.br