



ANÁLISE SOBRE O DETALHAMENTO ESTRUTURAL DA RESIDÊNCIA MILAN: UM CASO DE POSSÍVEL FALHA ESTRUTURAL

Mariana Karoline Costa Ferreira

Lucas Façanha de Oliveira

mkkaroline_@hotmail.com

lucastzu@gmail.com

Centro Universitário Christus - Unichristus

Avenida Dom Luís 911, 60160-230, Ceará, Fortaleza, Brasil

Edson Moreira Dantas Junior

edsonmdantas@yahoo.com.br

Centro Universitário Christus - Unichristus

Avenida Dom Luís 911, 60160-230, Ceará, Fortaleza, Brasil

Resumo. *Buscando aplicações em elementos estruturais não retilíneos de concreto armado, optou-se pelo estudo de uma obra em casca. Esse estudo se dará através do projeto da Casa Milan, obra idealizada pelo Arquiteto Marcos Acayaba, que é uma casca fina (espessura 9,5 cm) cilíndrica utilizada em cobertura, gerada pela translação de um arco, de curvatura gaussiana nula. A Casa Milan está localizada na Cidade Jardim em São Paulo, é um projeto de estrutura em casca de concreto armado e protendido datada em 1972. Através de revisão bibliográfica notou-se que a estrutura apresentou problemas, como fissuras em dois pontos em toda dimensão longitudinal, a partir disso houve a necessidade de reforços nos quatro apoios, a estrutura apresenta problemas de deformação de tal ordem que danificam as esquadrias. A partir disso, foi levantada a hipótese de falha no detalhamento da estrutura*

CILAMCE 2017

Análise sobre o Detalhamento Estrutural da Residência Milan: Um Caso de Possível Falha Estrutural
M.K.C. Ferreira, L.F. Oliveira, E.M. Dantas Junior, Unichristus, Fortaleza, CE, Brasil, Novembro 5-8, 2017.

quando os carregamentos limitantes foram estimados. Este trabalho foi feito com o intuito modelar a estrutura de forma a estimar os carregamentos atuantes novamente, através da modelagem com software que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), relacionar com o método utilizado em projeto e identificar com esse processo quais são os fatores que levaram esta a apresentar problemas estruturais. Ao final, busca-comparar diversas formas de análise de estruturas em casca fina dentro do contexto da engenharia de forma a oferecer aos pesquisadores da área de estruturas mais uma ferramenta de embasamento, a fim de melhor conhecer e explorar a análise e projeto de cascas finas dentro do contexto de estruturas civis e mecânicas.

Palavras-chave: Casca, falha, elementos finitos, estruturas.

1 INTRODUÇÃO

Projetada pelo Arquiteto Marcos Acayaba e calculada por Tedeschi&Ogata, a Residência Milan está localizada no Estado de São Paulo. Sua geometria em casca é composta por retas tangentes e dois arcos de círculos não concêntricos, apoiada nas quatro bordas (NAKANISHI, 2007). Tem espessura variante e dimensões em planta de (17,5 x 36,1) m. A estrutura foi executada em concreto armado e protendido em 1973. A Figura 1, caracteriza melhor a situação descrita anteriormente.

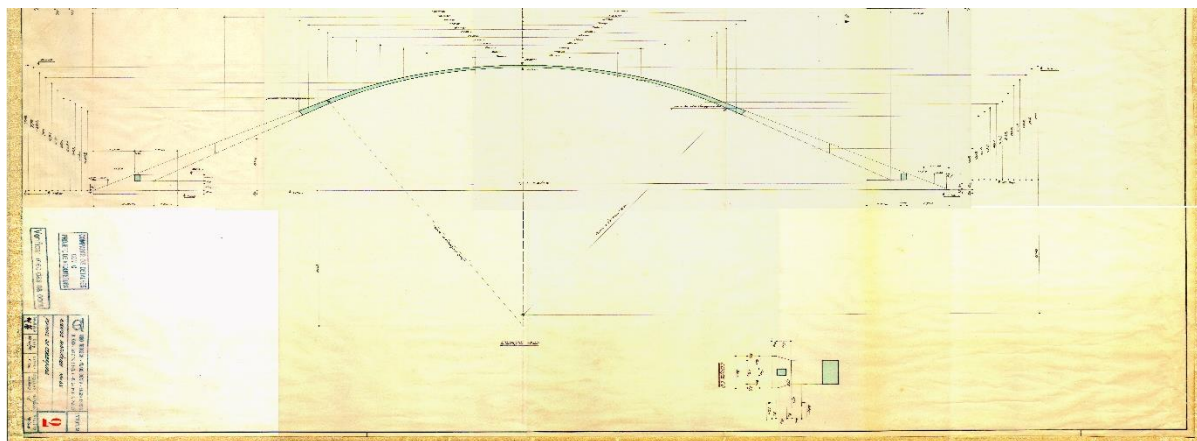


Figura 1. Vista frontal da Residência Milan em planta

FONTE: Projetos cedidos por Marcos Acayaba

A Casa Milan se encontra elevada 5m em relação ao nível do terreno natural. Na sua execução foram utilizadas fôrmas de madeira e o concreto foi feito *in loco* ($f_{ck} = 15$ Mpa) e lançado por bombeamento, em alguns trechos foi utilizado um reforço com cabos de protensão de acordo com o Processo Freyssinet.

Estudos realizados por Cavalcante e Roque (2012, pg. 29) e Nakanishi (2007, pg. 49) relatam que a casa apresentou problemas durante o processo de desforma, ocorrendo uma fissuração longitudinal em dois pontos ao longo da direção longitudinal, gerando a necessidade de reforço. Adotou-se um sistema de reforços prismáticos nos quatro bordos. Durante estações de temperaturas mais baixas, foi relatado a ruptura de esquadrias de vidro (NAKANISHI, 2007). Através de uma entrevista com a família que reside na residência foi relatado a diminuição gradativa deste fenômeno, até sua extinção.

Segundo Nakanishi (2007, pg. 49) as rupturas ocorreram devido a casa ter sido estruturalmente calculada como uma catenária, trabalhando somente a compressão, o que não ocorre devido às retas que tangenciam o arco. Embasado nas teorias deste autor, este estudo

foi feito para comparar as conclusões obtidas em seu estudo com uma análise via elementos finitos da cobertura como sólido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carga de Vento

De acordo com a NBR 6123 (2013, pg. 4) as forças que atuam numa estrutura por conta do vento devem ser consideradas para: vedação, partes da estrutura e estrutura de forma geral.

Também segundo a NBR 6123 (2013, pg. 4) as forças estáticas que atuam numa edificação por conta do vento devem admitir que a velocidade básica do vento (V_0), que é obtida por isopletas, indica a maior velocidade média do local medida de uma rajada de 3s, a 10m acima do terreno, em um campo aberto e plano excedida uma vez a cada 50 anos, deve garantir também que a velocidade característica do vento (V_k) é determinada através da velocidade básica e da ponderação de três fatores, indicados e definidos como

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (1)$$

A velocidade característica obtida (V_k) em m/s é usada para calcular a pressão dinâmica em N/m² que o vento impõe, através de

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2)$$

A NBR 6123 (2013, pg. 4) diz que a força atuante sobre um elemento plano à edificação devido a força que o vento (F) pode ser calculada adotando coeficientes de forma:

$$F = (C_e - C_i) \cdot q \cdot A \quad (3)$$

em que C_e é o coeficiente de forma externo, C_i é o coeficiente de forma interno e A é a área de projeção da edificação (área de sombra). Esses coeficientes são obtidos por tabelas e dependem da forma que a construção tem. Se esses coeficientes forem positivos indicam sobrepressões e se negativos indicam sucção. Ver Anexo E da NBR 6118 para este caso.

A NBR 6123 (2013, pg. 13) trata de edificações estanques, ou seja, vedadas aonde há aberturas fechadas por janelas ou algo que impeça a entrada do vento (o que ocorre no caso em estudo), o $c_{pi} = 0$ ou $-0,2$, o valor que caracterizar a ação mais danosa do vento à estabilidade da estrutura.

2.2 Sobrecarga de Utilização

Na NBR 6120 (2000, pg. 3-4) tem-se valores mínimos para cargas verticais de utilização da construção, como a edificação em estudo se trata de uma coberta, sem fluxo de pessoas, ela pode ser enquadrada como um forro ou como um terraço inacessível a pessoas, e nesse caso, adota-se 0,5 kN/m² como a sobrecarga de utilização na edificação.

2.3 Materiais utilizados

O material utilizado na obra de maneira geral foi o concreto. Para inserir características desse material no software serão adotados parâmetros sugeridos por norma, nesse caso a NBR 6118/2014.

Um indício que se faz pensar a respeito da falha no dimensionamento é o fato de que na NBR 6118 (2014, pg. 22) traz a informação de que concreto da classe C15 devem ser usados apenas para obras provisórias ou sem fins estruturais. E, segundo os projetos em que o estudo se baseia, esse foi o concreto utilizado na obra. Este fato se deve a norma estrutural vigente na época permitir a utilização deste tipo de material.

Segundo a NBR 6118 (2014, pg. 22-23), o concreto armado, quando não se conhece a massa específica, deve-se adotar o valor de 2500 kg/m³.

Também com base na NBR 6118 (2014, pg. 24-25) o coeficiente de Poisson será adotado como 0,2 e o módulo de elasticidade a ser adotado ao material, no caso em estudo, será o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) obtido através das seguintes equações:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (4)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (5)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \therefore \text{Concretos até C50} \quad (6)$$

Nesse caso α_E é um parâmetro que segundo a NBR 6118 (2014, pg. 24) depende do agregado graúdo, e quando este for granito ou gnaisse será 1.

2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

De acordo com Vaz (2011, pg. 26 e 121-123) o MEF tem base no Método dos Deslocamentos e no Método da Rigidez onde os deslocamentos (deslocamentos lineares e/ou rotações) são variáveis desconhecidas no problema. Esse método pode ser utilizado tanto para estruturas contínuas como para estruturas descontínuas simulando a fragilização do material

(da rigidez do material) com o progresso da deformação sofrida. Também pode ser utilizado tanto para estruturas planas (de duas dimensões significativas, por exemplo uma placa) como para estruturas sólidas (de três dimensões significativas, por exemplo um prédio).

Nesse método a estrutura é feita como se fosse constituída por várias peças menores, mais conhecidas como os elementos utilizados para criar a malha a ser utilizada, que são formas geométricas conhecidas (exemplo: quadrilátero, triângulo, tetraedro, etc). Essas pequenas “peças” são ligadas por nós, e a quantidade destes irá influenciar diretamente na convergência dos resultados obtidos.

Esse método se baseia em alguns fundamentos, se baseia na definição de que $\mathbf{d}_l$ representa o vetor de coordenadas local do sistema a ser obtido e $\mathbf{N}_m$ é a matriz de transposição e $\mathbf{d}_g$ é o vetor de coordenadas global do sistema a partir da seguinte relação:

$$\mathbf{d}_l = \mathbf{N}_m \cdot \mathbf{d}_g \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} d_{l1} \\ d_{l2} \\ d_{l3} \\ d_{l4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & s \\ 0 & 0 & -s & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{g1} \\ d_{g2} \\ d_{g3} \\ d_{g4} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

O vetor das deformações ($\boldsymbol{\sigma}_m$) pode ser obtido a partir da relação $\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{B}_m \cdot \mathbf{d}_g$, derivando $\mathbf{d}_l$ em relação à $\mathbf{d}_g$. Onde o vetor $\boldsymbol{\sigma}_m$ representa as tensões para um regime linear elástico e pode ser encontrado a partir da relação $\boldsymbol{\sigma}_m = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_m$, onde $\mathbf{C}$ é a matriz constitutiva do elemento e depende somente de parâmetros relativos ao material: E (módulo de elasticidade longitudinal) e ν (coeficiente de Poisson).

Esse método também utiliza o método da rigidez direta quando usa a matriz de rigidez local $\mathbf{K}_m$ e as cargas nodais $\mathbf{f}_m$ obtidas a partir das matrizes geradas anteriormente a partir de : $\mathbf{N}_m$, $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ e $\mathbf{C}$, para gerar a matriz de rigidez global $\mathbf{K}_g$ e as cargas globais $\mathbf{f}_g$, que podem ser obtidas a partir da relação:

$$\mathbf{f}_g = \mathbf{K}_g \cdot \mathbf{d}_g \quad (9)$$

A partir da aplicação desses fundamentos, de acordo com Vaz (2011, pg. 128), é gerada uma função aproximadora $\varphi(x,y,z)$ para o resultado analítico que irá reger os deslocamentos sofridos pelo elemento, deslocamentos esses gerados pelo carregamento atuante utilizado, e esse processo será repetido até que o resultado convirja, ou seja, se aproxime ao máximo do resultado analítico.

3 METODOLOGIA

Critérios de falha utilizados (CURY, 2015):

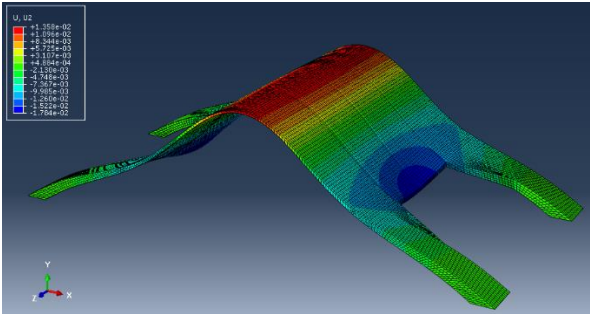
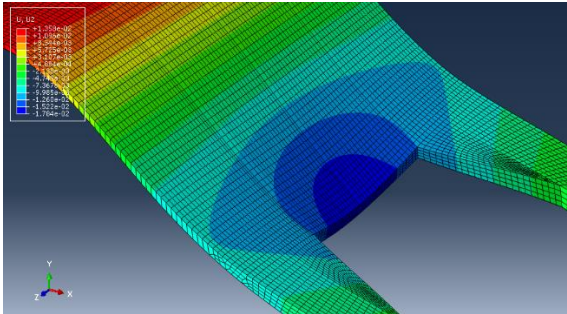
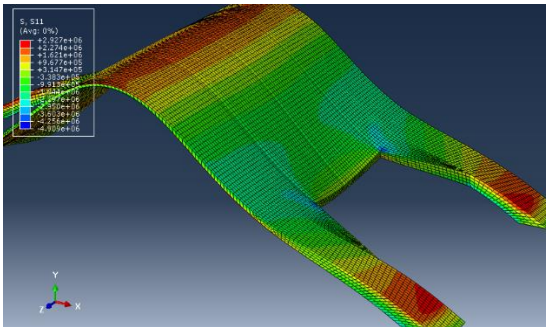
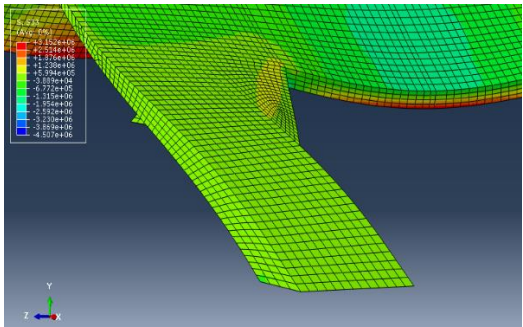
Critério de Tresca: quando o cisalhamento máximo ultrapassar o máximo obtido por ensaio por tração uniaxial.

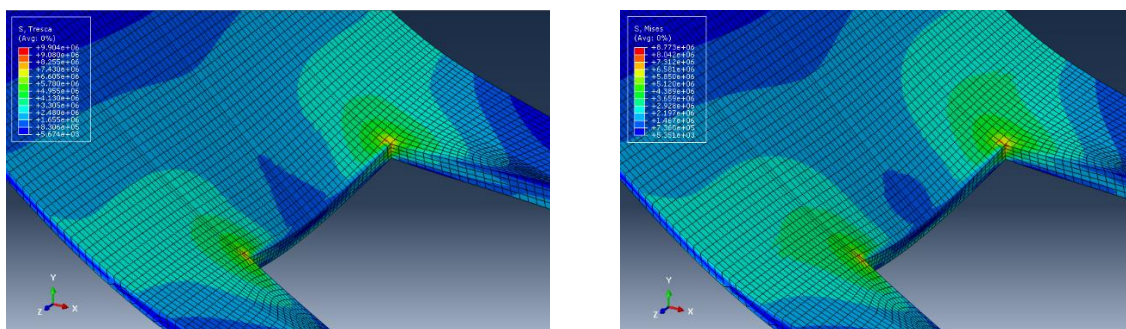
Von Mises: quando a distorção máxima por carga multiaxial ultrapassar a obtida por ensaio por tração uniaxial.

A Casa Milan foi modelada como sólido através do ABAQUS utilizando o elemento “Brick 20” numa análise linear e submetida aos carregamentos de projeto, obtidos por parâmetros normalizados: peso próprio (“body force”), carga de vento e sobrecarga de utilização. E abaixo seguem os resultados obtidos sem suavização de imagem:

Obs.: direção 1 – x, direção 2 – y, direção 3 – z.

Tabela 1. Resultados obtidos pela modelagem com o vento à 0°

Vento 0° + Sobrecarga de Utilização + Peso Próprio	
Deslocamento	Deslocamento
	
Tensão ss1	Tensão ss3
	
Tensão Tresca	Tensão Von Mises

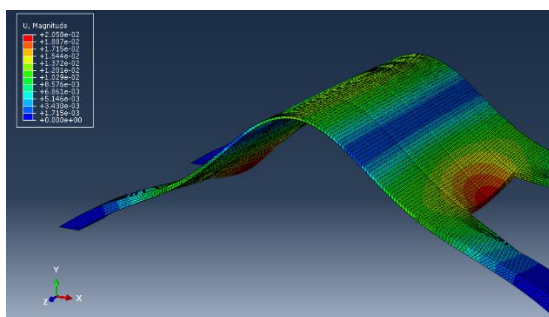


FONTE: Dados obtidos pelo(s) autor(es)

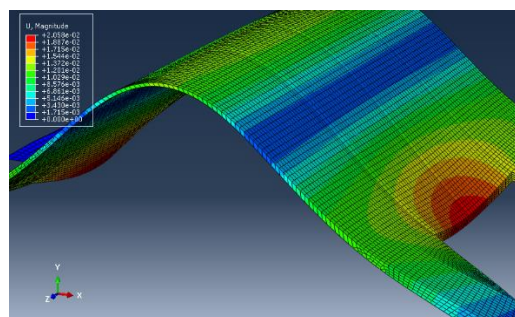
Tabela 2. Resultados obtidos pela modelagem com o vento à 90°

Vento 90° + Sobrecarga de Utilização + Peso Próprio

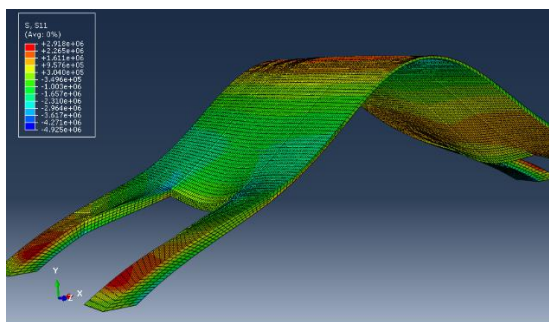
Deslocamento



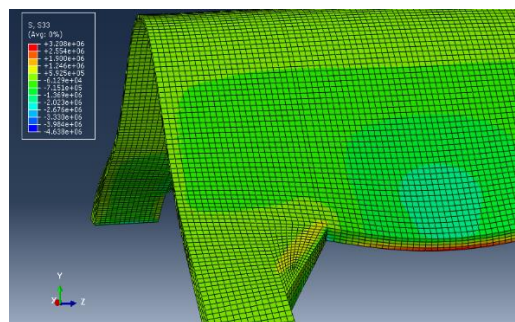
Deslocamento



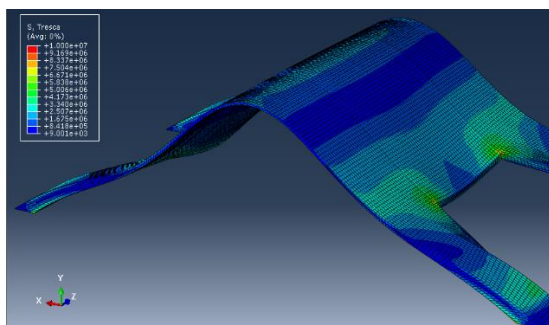
Tensão ss1



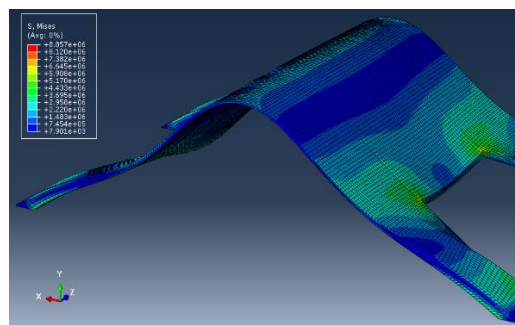
Tensão ss3



Tensão Tresca



Tensão Von Mises



FONTE: Dados obtidos pelo(s) autor(es)

4 CONCLUSÕES

Após essa análise, segundo os resultados obtidos na Tabela 1 e 2 foi constatado que a coberta, sem os reforços prismáticos, realmente sofreria trincas na região de transição entre os arcos e as retas que o tangenciam em toda a dimensão longitudinal e no topo. Porém, nos estudos que embasaram a pesquisa não haviam relatos de fissura no centro, mas em entrevista com Marcos Acayaba, ele relatou que no passado haviam manchas de infiltração no teto antes de ser colocada a manta protetora e o isolamento térmico. O que levanta a possibilidade de ter sido pela existência dessas fissuras.

Através dos resultados obtidos observa-se a necessidade de uma suavização na forma com que foram feitas as extremidades com abertura, ou até mesmo a inexistência das mesmas. Outra alternativa seria indicar que a forma fosse alterada, sendo realmente um arco em toda sua extensão, pois a zona de transição entre retas e arco gerou as fissuras laterais. E também uma indicação válida seria aumentar o f_{ck} adotado para o projeto. Ver Figura 2

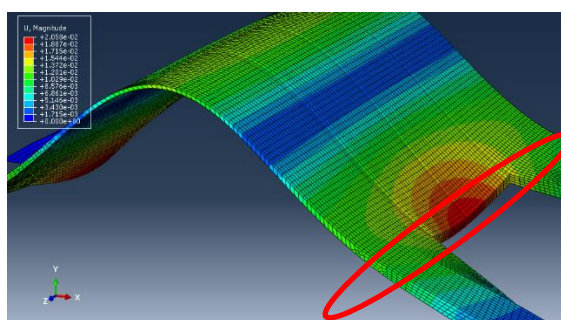


Figura 2. Zona de fragilidade

FONTE: Dados obtidos pelo(s) autor(es)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à família e aos meus amigos que sempre me disseram que eu seria capaz. Agradeço à Unichristus, à UFC por ceder o uso do software e a todos os professores. Agradeço ao Arquiteto Marcos Acayaba por colaborar com meu estudo e estar sempre disponível para contribuir com o projeto de pesquisa. Agradeço em especial aos professores que embasaram e encorajaram esse estudo, são eles: Roberto Senna, Carlos David, Pedro Sanderson, Lucas Façanha e Edson Dantas.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. Projeto De Estrutura De Concreto – Procedimento. ABNTNBR 6118:2014. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.*
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. Cargas para o cálculo de estruturas de Edificações – Procedimento. ABNTNBR 6120:1980. Errata. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.*
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. Forças Devidas Ao Vento Em Edificações – Procedimento. ABNTNBR 6123:2013. Errata 2. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.*
- Carvalho, José R. C. de. Análise Comparativa e de Desempenho de Elementos Finitos de Placa. São Paulo; Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 2004.*
- Cavalcante, Francisca Bruna S. V.; Roque, Jefferson Bruno L. Residência Marcos Acayaba (Casa Milan). Fortaleza; 17º Seminário HAAUB2 UFC, 2012.*
- Cook, Robert D. Concepts and applications of Finite Elements Analysis. John Wiley & Sons, 3ª Ed, 1989.*
- Cury, Alexandre A. Critérios de Falha. Minas Gerais; Slides de aula – Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, 2015.*
- Godoy, Arilda Schmidt. Introdução à Pesquisa Qualitativa e suas Possibilidades. In Revista de Administração de Empresas, v.35, n.2, Mar./Abr. 1995a, p. 57-63. Pesquisa qualitativa - tipos fundamentais, In Revista de Administração de Empresas, v.35, n.3, Mai./Jun. 1995b, p. 20-29.*
- Maffei, C. E. M.; Gonçalves, H. H. S.; Teixeira, P. W. G. N. Introdução à teoria das cascas. São Paulo; Moodle USP do Stoa, 2012.*
- Nakanishi, Tatiana Midori. Arquitetura e domínio técnico: a prática de Marcos Acayaba. São Paulo; Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.*
- Souza, V. C. M; Cunha, A, J, P. Lajes em Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro. Ed. UERJ, 1998.*
- Vaz, Luiz E. Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas. Elsevier, Rio de Janeiro, 2011.*
- Vieira, Vivian.L. Modelo teórico e processos construtivos de estruturas em casca de concreto. São Paulo; Biblioteca Digital da UNICAMP, 2003.*