



Cinpar
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



DO EMPIRISMO AO CÁLCULO: ANÁLISE ESTRUTURAL DA COBERTURA DA IGREJA DE SANT'ANA EM BELÉM – PA

*From the empiricism to the calculus: structural analysis from the covering of
the church of Sant'Ana in Belém - PA*

Larissa Corrêa Acatauassú Nunes Santos

*Professor Mestre, Departamento de Construção e Estrutura, Escola Politécnica - UFBA
Rua Carlos Maron, 436 ap. 302, Candeal, 40296-220 – Salvador - BA*

Resumo

No restauro de edificações antigas, deve-se compreender as práticas construtivas da época e as regras empíricas que nortearam a sua construção a fim de propor soluções adequadas que respeitem a edificação existente. Estes monumentos representam a memória arquitetônica e construtiva da humanidade cujo conhecimento é fundamental. Nestes edifícios, é comum o super dimensionamento da estrutura, pois não havia meios rigorosos e específicos para se dimensionar, por exemplo, a madeira utilizada nos telhados, que muitas vezes eram calculadas baseando-se no cálculo de algum estudioso do passado, de maneira conservadora, em favor da segurança.

Até o século XVI, os construtores utilizavam a experimentação empírica e a intuição para edificar os prédios. Somente no século seguinte, Galileu deu início aos trabalhos científicos sobre a ciência das construções e a partir de então outros estudos surgiram para compreender o comportamento das estruturas.

Nos dias atuais, a avaliação da estruturas de edifícios antigos podem ser auxiliadas por modernos processos de verificação por computador como foi o caso da análise estrutural da cobertura da Igreja de Sant'Ana em Belém (PA), obra do arquiteto italiano Antônio Landi, que chegou à cidade em 1754.

Palavra-Chave: Estrutura de Cobertura, Arquitetura Religiosa, Landi, Avaliação Estrutural

Abstract

In the restoration of ancient buildings, it is important to understand the practices of construction used at the time and the empirical rules that guided its construction in order to propose appropriate solutions that respect the existing building. These monuments represent the architectural and constructive memory of humanity whose knowledge is essential. In these buildings, over sizing the structure is common, as there was no rigorous and accurate means to size, for example, the wood used on roofs, which were often calculated based on the calculation of any scholar of the past, using very conservative criteria, in favor of safety.

Up to the 16th century, manufacturers used empirical experimentation and intuition to erect the buildings. Only in the following century, did Galileo start applying scientific basis to the science of buildings and since then other studies appeared in order to understand the behavior of structures.

Nowadays, the evaluation of the structures of old buildings can be aided by modern processes of computer modeling as was the case for the structural analysis of the roof of the Church of Sant'Ana in Belém (PA), the work of the Italian architect Antonio Landi, who came to the city in 1754.

Keywords: Roof structure, Religious Architecture, Landi, Structural Evaluation



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



1 Introdução

Ao se realizar o restauro de uma edificação antiga, devemos compreender as práticas construtivas da época e as regras empíricas que nortearam a sua construção a fim de propor soluções adequadas que respeitem a edificação existente. Tem-se que levar em conta que estes monumentos representam a memória arquitetônica e construtiva da humanidade, cujo conhecimento é de inestimável valor.

Uma vez que estas construções eram realizadas de maneira empírica é preciso entender suas razões, pois a resolução do restauro estrutural nem sempre está exclusivamente no cálculo, mas na interpretação e na experiência dos antepassados.

Até o século XVI, os construtores utilizavam a experimentação empírica e a intuição para edificar os prédios baseando-se em experiências que eram transmitidas de geração a geração e difundidas após o advento da escrita. No período medieval, porém, o conhecimento destes procedimentos foi pouco conhecido, em virtude do segredo que regia os procedimentos das corporações de ofício.

Os trabalhos científicos sobre a ciência das construções iniciaram-se com os ensaios realizados por Galileu Galilei (1564-1642) que publicou, em 1638, o livro “Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze”, que continha estudos sobre a resistência dos materiais. A partir desta pesquisa, outros estudiosos se dedicaram a compreender o comportamento das estruturas como Robert Hook (1635-1703), Edme Mariotte (1620-1684), Leonardo Euler (1707-1783), Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), entre outros.

O Século XVIII representou a passagem da teoria à prática e cresceu a importância das escolas militares, cujos engenheiros passaram a assumir não apenas as obras fortificadas como também obras públicas de maneira geral. Segundo OLIVEIRA (2005) “em Portugal e nas suas colônias do Além-mar, principalmente no Brasil, estas influências foram fundamentais para a formação de profissionais qualificados no domínio da ciência das construções, instruídos nas academias e *aulas militares*, que começaram a funcionar, entre nós, no ocaso do século XVII”. Entre estes engenheiros militares destacou-se Bernard Forest de Béliador (1697-1761), cujos livros foram adotados nas academias militares.

Com relação à madeira, SANTIAGO (2001, p. 300) destaca que “só a partir do século XVIII é que foram efetuados registros sistemáticos de ensaios de peças de madeira visando averiguar sua resistência com maior precisão, para que se pudesse utilizar o material da maneira mais racional possível”. No Brasil, destacam-se os ensaios em madeira realizados na Bahia pelo coronel português de Artilharia de Gôa, Theodósio da Sylva Reboxo entre 1779 e 1780.

Nos dias atuais, quando avaliamos as estruturas destes edifícios antigos podemos aplicar os modernos processos de verificação auxiliados por técnicas computacionais como foi utilizado na análise estrutural da cobertura da Igreja de Sant’Ana em Belém, Pará, obra do arquiteto italiano Antônio José Landi, que chegou à Belém em 1754 como membro da comissão de técnicos responsáveis pela demarcação da fronteira americana entre Portugal e Espanha.



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



2 Igreja de Sant'Ana: características da cobertura

A Igreja de Sant'Ana foi inaugurada em 1782 conforme o projeto original de Landi, após 20 anos de construção. Dois anos depois, Alexandre Rodrigues Ferreira (2003, p. 835) já observara sinais de danos na fachada e em um dos lados da capela-mor, que segundo ele, “hé feita de pedra e cal, pelo risco à romana, que deu Antonio Jozé Landy, porem já principiou a rarear tanto a parede do Frontespicio, como a de um dos lados da Capella Mor, por defeito da obra”.

As torres hoje existentes (Figura 1) foram adicionadas à fachada posteriormente, em data ainda não identificada, porém anterior a 1833, pois Antônio Baena (2004), no seu “Ensaio Corográfico sobre a Província do Pará”, já descreve a Igreja com torre e com fenda na abóbada. A Igreja foi fechada para recuperação em 1851, cujas obras foram concluídas em 1853.



Figura 1 – Vista e cobertura da Igreja de Sant'Ana

O problema estrutural da Igreja de Sant'Ana é antigo e já havia sido registrado desde 1784 quando Alexandre Rodrigues Ferreira observou rachaduras. É possível que estas rachaduras tenham evoluído ao longo dos anos e se agravado com a construção posterior das torres na fachada do templo, afetando, inclusive, as abóbadas e ameaçando a estabilidade do edifício. Na intervenção realizada pelo IPHAN em 2005, observaram-se problemas na fundação da Igreja que por não suportar a carga da edificação, acabou cedendo, sendo a causa da maioria das fissuras que a Igreja apresentava naquele momento.

Com relação à cobertura, a Igreja de Sant'Ana (Figura 2) possui quatro telhados de duas águas, com fechamento em telhas cerâmicas tipo capa-canal sob a qual foram construídas abóbadas em tijolo. No cruzamento da nave com o transepto, foi construída uma cúpula em tijolo e tambor de pedra.



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009

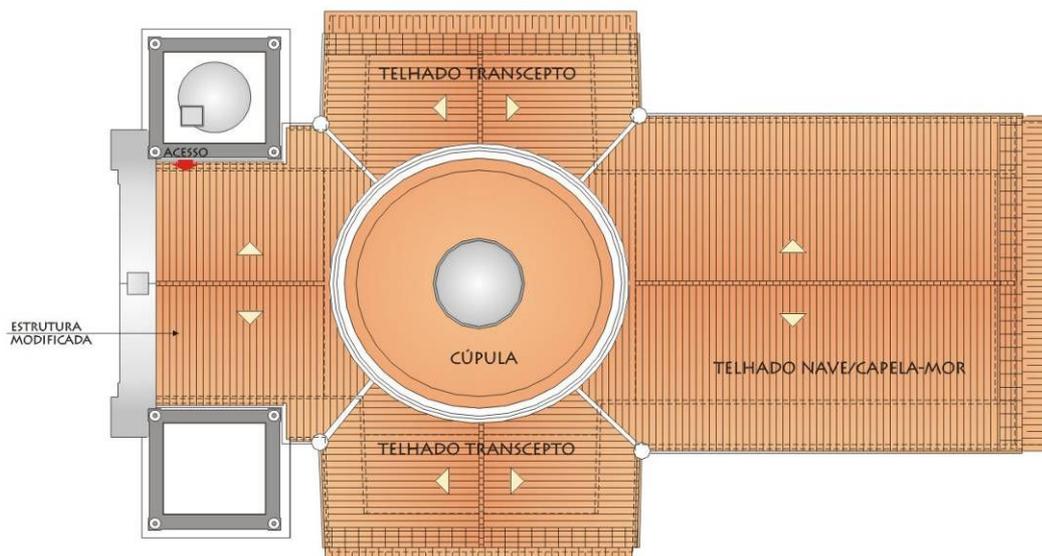


Figura 2 – Esquema da cobertura da Paróquia de Sant'Ana

Devido a reformas realizadas na igreja, apenas três telhados possuem suas estruturas de cobertura ainda originais, com peças de madeira lavrada e utilizando o sistema de caibro armado¹, com a carga do telhado distribuída uniformemente ao longo da estrutura. Neste trabalho, será analisada apenas a estrutura referente à nave e capela-mor, com largura de 10,50 metros.

Nesta igreja, existe a particularidade de não aproveitar o espaço livre abaixo da linha do caibro armado para a implantação da abóbada, como usualmente acontece neste tipo de estrutura de cobertura (Figura 3). A altura das paredes laterais supera o ponto mais alto do extradorso da abóbada, deixando um grande espaço vazio entre eles com aproximadamente 2,30 metros, tornando-se fácil a circulação no interior da cobertura. Nesta cobertura, foram colocados dois tirantes de ferro forjado, sendo um em cada extremidade da parede e também foram fixados outros tirantes de ferro e cavilha nas empenas. Possivelmente estes tirantes foram implantados como reforço estrutural durante as obras de recuperação ocorridas entre os anos de 1852 e 1853.

¹ Nas estruturas em caibro armado, as madeiras apresentam seções avantajadas e as ripas são assentadas diretamente sobre os caibros fixados a pequena distância entre si. Com a finalidade de suavizar o ângulo formado pelas pernas da tesoura com a beirada do telhado, no telhado da nave/capela-mor foram utilizados contrafeitos.



Cinpar
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009

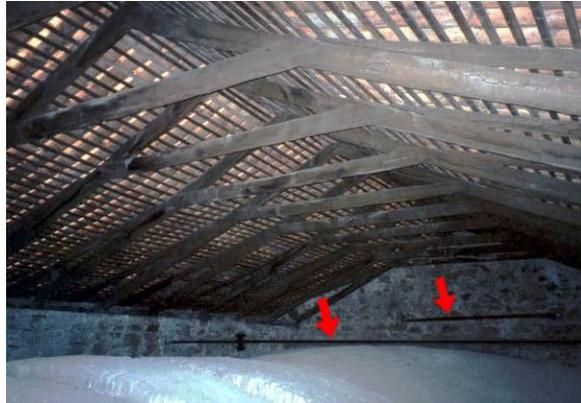


Figura 3 – Estrutura de Cobertura da Nave / Capela-mor, destacando-se os tirantes da parede e empena.

Curiosamente, nesta cobertura, o contra-caibro foi assentado com a maior dimensão da peça no sentido horizontal (Figura 4), provocando menor inércia e para diminuir a flexão do contra-caibro, foram colocados apoios de madeira entre esta peça e a perna da estrutura. Estes apoios possivelmente são posteriores, pois não há sambladuras e os mesmos possuem dimensões diferenciadas, sendo alguns construídos com madeira lavrada e outros com madeira serrada.



Figura 4 – Detalhe do apoio e contra-caibro assentado com a maior dimensão no sentido horizontal (Fonte: 2ª SR/IPHAN)

2.1 Metodologia para a avaliação Estrutural

Nesta cobertura da nave/capela-mor da Igreja de Sant'Ana, foi realizado o levantamento cadastral de um exemplar da tesoura, a qual foi desenhado em CAD, verificando o dimensionamento de todas as suas peças, com a finalidade de avaliar o comportamento estrutural do sistema construtivo e para manter o registro das estruturas



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



de coberturas utilizadas no século XVIII. Esta avaliação estrutural foi realizada com o auxílio do programa *Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool*².

Após o cadastro, os sistemas estruturais foram modelados no *Ftool* utilizando-se o eixo central de cada peça de madeira, cujas seções e a densidade da madeira são indicadas posteriormente no campo adequado do programa para que o mesmo considere o peso próprio da estrutura nas análises. No submenu de propriedades das seções transversais, utilizou-se a opção seção retangular para indicar as dimensões da base e da altura da seção da peça nos parâmetros adequados. Todas as tesouras são construídas com a madeira tipo acapu (*Vouacapoua americana*, Leg. Caesalp), cuja amostra foi identificada pelo Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), madeira amazônica que Landi, no seu manuscrito sobre a flora e fauna amazônica, destacava como sendo uma madeira de grande duração na construção civil e ideal para a utilização em telhados (PAPAVERO, 2002, p.16). Segundo LORENZI (2002), a densidade desta madeira é $0,9 \text{ g/cm}^3$, portanto foi adotado este valor para o cálculo no *Ftool*.

O carregamento da cobertura foi calculado considerando-se as dimensões das ripas, distância média entre elas e a quantidade de telhas encontradas em 1 m^2 de telhado. A madeira utilizada nas ripas não é o acapu, desta forma, adotou-se para o cálculo a densidade de $1,0 \text{ g/cm}^3$. O peso adotado da telha refere-se ao valor encontrado após a imersão em água por 24 horas da amostra retirada da edificação, procedimento necessário para a maior exatidão dos resultados, já que as telhas utilizadas nas edificações antigas eram quase sempre produzidas artesanalmente e possuíam dimensões maiores que as telhas industrializadas vendidas atualmente no mercado.

A utilização do peso da telha encharcada corresponde à pior situação que pode ser encontrada na edificação, uma vez que a telha cerâmica absorve água da chuva, e conseqüentemente, aumenta o seu peso próprio, principalmente em Belém, cidade que possui alto índice pluviométrico.

Para a determinação da carga por metro linear aplicada nas tesouras, considerou-se o carregamento do telhado e a distância média entre as tesouras. Esta carga foi utilizada no *Ftool* visando avaliar o comportamento das estruturas e determinar os valores e os sentidos dos esforços aplicados na parede que sustentam as tesouras.

Os “nós” das tesouras avaliadas foram considerados como ligações de barras articuladas, pois as peças são fixadas com, no máximo, dois parafusos e quando apresentam reforço com chapas de ferro, estas não são suficientes para enrijecê-la.

Com a finalidade de avaliar o dimensionamento das tesouras, considerou-se as resistências do acapu, determinadas pelo IPT de São Paulo (PEREIRA; MAINIERI, 1956) em ensaios realizados em laboratório para madeira seca (máximo 12% de umidade).

² O programa *Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool*, é uma versão educacional desenvolvida pelo departamento de Engenharia Civil e Tecgraf da Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro e distribuído gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



Tabela 1 – Peso específico e tensões resistentes para a madeira acapu

Acapu (<i>Vouacapoua americana</i>)	
Peso específico aparente	$\gamma_{ap} = 9,1 \text{ kN/m}^3$
Tensão normal	$\sigma_{nr} = 95,3 \text{ MPa}$
Tensão de cisalhamento	$\tau = 13,2 \text{ MPa}$
Tensão normal na flexão	$\sigma_{nf} = 160,2 \text{ MPa}$

Fonte: PEREIRA; MAINIERI, 1956

Em virtude de serem edificações históricas, optou-se pela utilização da norma NB-11 de 1951, a qual determina que o coeficiente de minoração da madeira verde para a determinação da tensão admissível é 6,67, enquanto que para a madeira seca recomenda-se a utilização do coeficiente 5. Este último valor é utilizado nas igrejas que foram construídas há mais de dois séculos, pois as madeiras do telhado já estão secas. Preferiu-se utilizar esta norma antiga, visto que as estruturas de cobertura destes monumentos foram construídas com peças de madeira com grandes dimensões, que podem apresentar defeitos, sendo geralmente retiradas de uma única árvore, pois naquela época não havia risco de extinção das espécies vegetais. Desta forma, as tensões admissíveis para o acapu, utilizadas nas avaliações estruturais desta tesoura, são apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 2 – Tensões admissíveis para a madeira acapu

Acapu (<i>Vouacapoua americana</i>)	
Tensão admissível à compressão	$\sigma_{nr} = \frac{95,3}{5} = 19,06 \text{ MPa}$
Tensão admissível ao cisalhamento	$\tau = \frac{13,2}{5} = 2,64 \text{ MPa}$
Tensão admissível à flexão	$\sigma_{nf} = \frac{160,2}{5} = 32,04 \text{ MPa}$

Os cálculos para os dimensionamentos das peças de madeira das tesouras estudados foram desenvolvidos à luz da resistência dos materiais, sem considerar as circunstâncias estabelecidas pelas normas brasileiras atuais, por não serem aplicáveis a construções do tipo que estamos analisando.

A grafostática foi utilizada com a finalidade de verificar a estabilidade das paredes da igreja de Sant'Ana. Para estes cálculos, foram utilizados os valores e direções das reações horizontais determinadas pelo *Ftool* e o peso próprio da parede definindo com isto a resultante que deve estar localizada no núcleo central de inércia da parede para que a mesma não sofra colapso.

Para esta avaliação, o peso próprio da parede foi determinado a partir do peso específico dos materiais construtivos da mesma, obtido pelos ensaios realizados no



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



laboratório do NTPR³, utilizando-se as amostras da pedra e da argamassa de assentamento retirados das paredes das igrejas. Para esta determinação, considerou-se a proporção de 80% de pedra e 20% de argamassa. No cálculo por grafostática, as reações verticais do peso do telhado não foram somadas ao peso próprio da parede, em favor da segurança, visto que a proporção de pedra e argamassa pode variar, não sendo possível determiná-la com exatidão.

A convenção de sinais adotada nos diagramas de esforço normal corresponde a positivo quando localizado acima do eixo da tesoura, indicando que a peça está sendo tracionada, e negativo quando se localiza no lado oposto, representando que a mesma está sendo comprimida.

Apesar dos gráficos de força normal e momento fletor estarem representados em gráficos separados, na realidade estas peças estão sofrendo flexo-compressão. Considerando-se que em uma peça sob o efeito da flexão, as fibras superiores e inferiores, equidistantes da linha neutra, sofrem esforços de compressão e tração de mesma intensidade, somou-se o valor da tensão normal com a tensão de flexão em um mesmo ponto da peça para as fibras superiores e inferiores, conforme o comportamento estrutural apresentado nos gráficos.

Para a identificação das maiores tensões de tração e compressão em relação a flexo-compressão da estrutura, calcularam-se as tensões para as peças mais solicitadas, possibilitando a sua comparação com a tensão admissível do acapu e verificando se a peça está suportando com segurança as cargas que estão aplicadas nela. Para esta verificação, comparou-se a tensão de compressão com a tensão admissível à compressão da madeira e a tensão de tração com a tensão admissível à flexão.

2.2 Avaliação estrutural

O telhado da nave/capela-mor possui vão maior que os telhados do transcepto, e com distância média entre as tesouras aproximadamente 80% maior que as demais. Desta forma, o carregamento da cobertura é o responsável pela maior solicitação das peças desta tesoura, cujo sistema estrutural está representado na Figura 5.

Com relação aos tirantes de ferro presentes nesta cobertura, acredita-se que os mesmos foram fixados para solucionar o problema da rotação das paredes e não em função da sua estrutura de cobertura.

³ Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração da Universidade Federal da Bahia, coordenado pelo Prof. Mário Mendonça de Oliveira.



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009

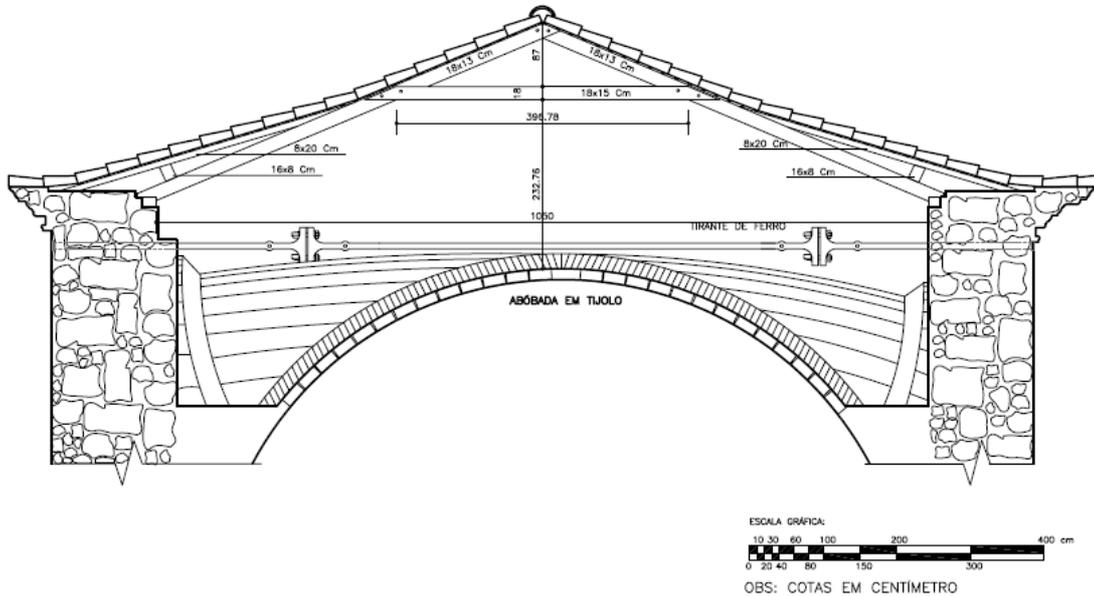


Figura 5 – Levantamento cadastral da tesoura da nave/capela-mor

Cálculo da carga do telhado:

Cálculo da telha:

Peso da telha encharcada: 0,0234 kN

24 telhas em 1 m²

0,25 kN/m² → Sobrecarga acidental

$0,0234 \times 24 \times 1 = 0,56 \text{ kN/m}^2$

$0,56 + 0,25 = 0,81 \text{ kN/m}^2$

Cálculo do madeiramento:

Secção das ripas: 0,05 × 0,01m

5 ripas em 1 m²

$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$

$5 \times 1 \times 0,05 \times 0,01 \times 10 = 0,025 \text{ kN/m}^2$

Cálculo da carga total do telhado:

$0,81 + 0,025 = 0,835 \text{ kN/m}^2 = 0,835 \text{ kPa}$

Cálculo da carga por metro linear:

Carga: 0,835 kN/m²

Distância média entre tesouras: 1,36 m

$0,835 \times 1,36 = 1,14 \text{ kN/m}$

O comportamento estrutural da tesoura da nave/capela-mor está representado nos diagramas abaixo (Figura 6 a Figura 10):



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009

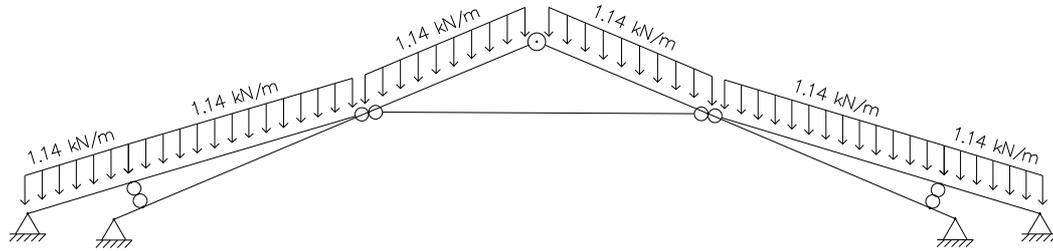


Figura 6 – Sistema estrutural da tesoura da nave/capela-mor

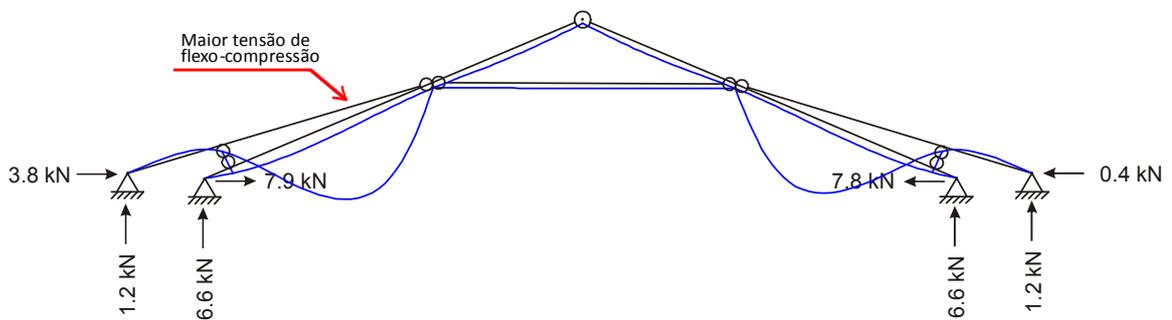


Figura 7 – Gráfico de deformação e valores das reações da tesoura da nave/capela-mor

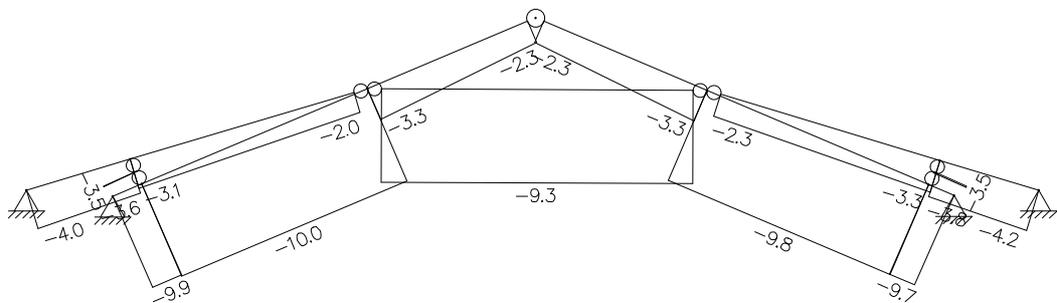


Figura 8 – Gráfico de força normal (kN) da tesoura da nave/capela-mor, sendo (+) para tração e (-) para compressão.

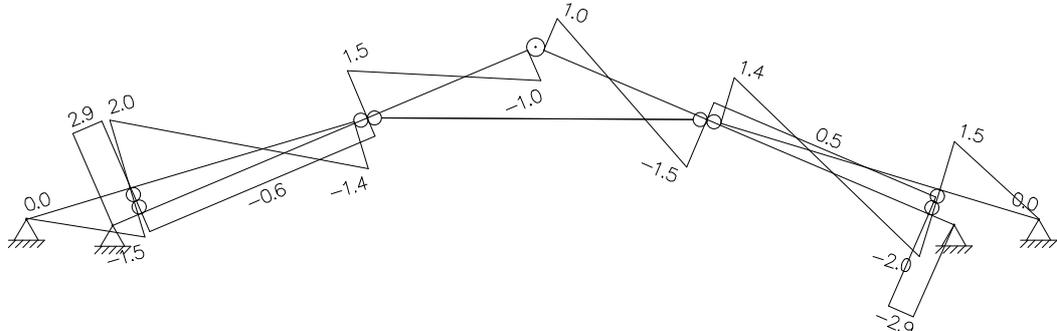


Figura 9 – Gráfico de força cortante (kN) da tesoura da nave/capela-mor



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009

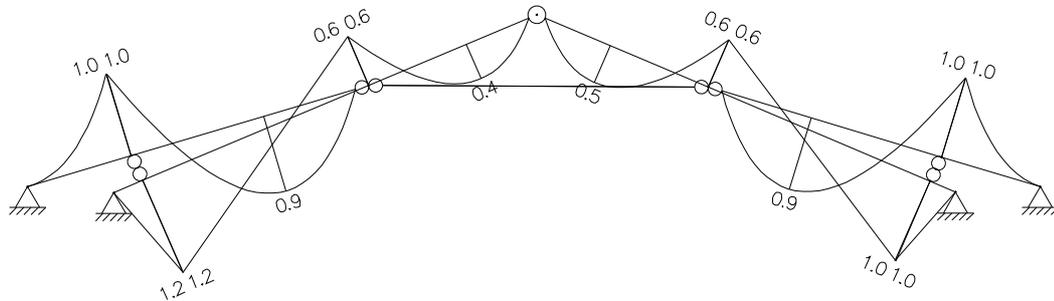


Figura 10 – Gráfico de momento fletor (kNm) da tesoura da nave/capela-mor

Os cálculos das tensões máximas para a compressão, cisalhamento e flexão, estão apresentados abaixo:

Tensão de flexo-compressão:

Tensão de compressão:

$$\sigma_{nr} = \frac{F}{A} = \frac{4,00}{0,016}$$

$$\sigma_{nr} = 250,00 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{nr} = 0,250 \text{ MPa}$$

$$F = 4,00 \text{ kN}$$

$$A = 0,20 \times 0,08 = 0,016 \text{ m}^2$$

Tensão de flexão:

$$\sigma_{nf} = \frac{M \times y}{J} = \frac{1,0 \times 0,04}{8533 \times 10^{-9}}$$

$$\sigma_{nf} = 4687,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{nf} = 4,687 \text{ MPa}$$

$$M = 1,00 \text{ kNm}$$

$$y = \frac{h}{2} = \frac{0,08}{2} = 0,04 \text{ m}$$

$$J = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{0,20 \times (0,08)^3}{12} = 8533 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Tensão de tração nas fibras superiores:

$$\sigma = 4,687 - 0,250 = 4,437 \text{ MPa} \leq \sigma_{acapu} = 32,04 \text{ MPa}$$

Tensão de compressão nas fibras inferiores:

$$\sigma = 4,687 + 0,250 = 4,937 \text{ MPa} \leq \sigma_{acapu} = 19,06 \text{ MPa}$$



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



Tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{q \times m_s}{J \times b} = \frac{2,9 \times 5265 \times 10^{-7}}{6318 \times 10^{-8} \times 0,13}$$

$$\tau = 185,89 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau = 0,19 \text{ MPa}$$

$$q = 2,9 \text{ kN}$$

$$m_s = b \times \frac{h}{2} \times \frac{h}{4} = 0,13 \times \frac{0,18}{2} \times \frac{0,18}{4} = 5265 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$J = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{0,13 \times (0,18)^3}{12} = 6318 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$b = 0,13 \text{ m}$$

As tensões máximas calculadas para as peças da tesoura da nave/capela-mor são muito inferiores às tensões admissíveis do acapu (Tabela 2), indicando que a estrutura suporta com segurança mais esforços do que está sendo solicitado

Apesar de contra-caibros estarem fixados com a menor dimensão da seção no sentido da altura, não haveria problemas em mantê-los assim, visto que a tensão de flexo-compressão desta peça ainda é inferior à tensão admissível da madeira.

A análise gráfica apresentada abaixo, realizada para as paredes da nave e capela-mor, as quais sustentam a tesoura estudada, indica que as mesmas não sofrerão colapso devido às cargas da estrutura de cobertura, visto que a resultante das forças, representadas em vermelho, está localizada no terço médio da parede.

Peso específico dos materiais:

Considerando-se:

80% Pedra: $\gamma = 23,90 \text{ kN/m}^3$

20% Argamassa: $\gamma = 19,50 \text{ kN/m}^3$

Área da parede: $28,95 \text{ m}^2$

Distância média de influência: $1,36 \text{ m}$

Peso específico da parede:

$$\gamma = (23,90 \times 0,8) + (19,50 \times 0,2)$$

$$\gamma = 23,02 \text{ kN/m}^3$$

Peso próprio da parede (entre apoios da tesoura):

$$P = 23,02 \times 18,14 \times 1,36 = 567,91 \text{ kN}$$

Resultante das reações horizontais da cobertura (esquerda):

$$(+3,8) + (+7,9) = +11,7 \text{ kN}$$

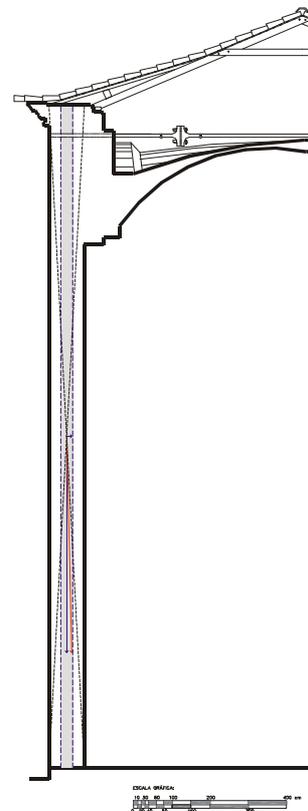


Figura 11 – Análise gráfica para a parede direita de quem entra na Igreja de Sant'Ana.



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



Peso específico dos materiais:

Considerando-se:

80% Pedra: $\gamma = 23,90 \text{ kN/m}^3$

20% Argamassa: $\gamma = 19,50 \text{ kN/m}^3$

Área da parede: $19,5 \text{ m}^2$

Distância média de influência: $1,36 \text{ m}$

Peso específico da parede:

$$\gamma = (23,90 \times 0,8) + (19,50 \times 0,2)$$

$$\gamma = 23,02 \text{ kN/m}^3$$

Peso próprio da parede (entre apoios da
tesoura):

$$P = 23,02 \times 19,5 \times 1,36 = 610,49 \text{ kN}$$

Resultante das reações horizontais da
cobertura (direita):

$$(-7,8) + (-4,0) = -11,8 \text{ kN}$$

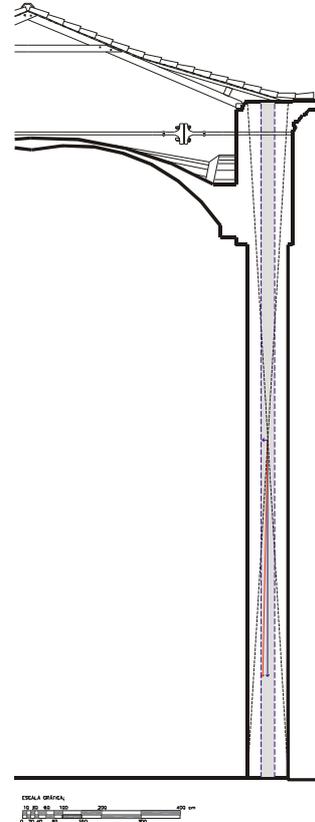


Figura 12 – Análise gráfica para a parede direita
de quem entra na Igreja de Sant'Ana.

3 Considerações Finais

Na Igreja de Sant'Ana, Landi projetou e acompanhou a sua construção, utilizando os conhecimentos das madeiras amazônicas adquiridos durante seus trabalhos como desenhador na Comissão Setentrional de Limites, encarregado de desenhar mapas e documentar a fauna e flora da região. O códice "*Descrizione di varie piante, frutti, animali, passeri, pesci, bisci, rasine, e altre simili cose che si ritrovano in questa Cappitania Del Gran Pará*" foi fruto deste trabalho e nele Landi descreve animais e vegetais da floresta amazônica. Provavelmente em virtude da sua formação de arquiteto, encontram-se neste códice muitas informações sobre as madeiras utilizadas na construção civil. Isto indica a preocupação do arquiteto em recomendar as espécies vegetais mais adequadas para o uso proposto, inclusive aplicando este conhecimento nas suas obras, como foi comprovado pela identificação botânica realizada pelo Museu Goeldi nas amostras de madeira retiradas da igreja de Sant'Ana.

Ao escolher o acapu, uma madeira desconhecida aos italianos, como a espécie vegetal que utilizaria nas estruturas de cobertura das igrejas que projetou em Belém, Landi utilizou conhecimentos obtidos durante os cinco anos que permaneceu no interior da Amazônia e provavelmente dimensionou esta estrutura com base na experiência adquirida durante a sua formação na Academia Clementina em Bolonha e nos trabalhos



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



IBRACON



realizados na Itália antes da sua partida para o Brasil, aplicando índices europeus, sem considerar que as madeiras utilizadas na Europa têm menos resistência do que o acapu.

Muito utilizado nas edificações antigas, o sistema de caibro armado estruturalmente ainda é pouco conhecido pelos profissionais que trabalham nas obras de restauração de monumentos históricos. Avaliando-se a estrutura de cobertura da nave/capela-mor, percebe-se que a mesma está super-dimensionada e apresenta tensões de solicitação bem inferiores às tensões admissíveis que a madeira acapu suporta.

Este dimensionamento exagerado era um fato comum nas edificações antigas, visto que não havia meios tão rigorosos e específicos para se dimensionar a madeira utilizada nos telhados, sendo às vezes determinadas segundo o cálculo de algum estudioso do passado, de maneira conservadora, em favor da segurança. Desta forma, havendo a integridade da madeira, conseguida com a manutenção preventiva da cobertura para evitar a degradação dificilmente haverá qualquer possibilidade de desabamento de coberturas como estas.

Na análise gráfica realizada para verificar se a parede não sofrerá colapso devido ao carregamento do telhado, não foi considerado o empuxo provocado pela abóbada, apesar do mesmo ser presente, visto que não foi possível realizar o levantamento adequado desta estrutura. Sugere-se que para as futuras intervenções restaurativas nesta igreja as suas abóbadas e cúpulas sejam cadastradas a fim de complementar esta verificação estrutural.

Na estrutura estudada, em sistema de caibro armado, de maneira geral, todas as peças destas estruturas trabalham comprimidas, inclusive as “linhas”, ao contrário do que acontece nas tesouras clássicas, nas quais as “linhas” trabalham tracionadas. Este comportamento inesperado acontece devido à deformação da perna e do contra-caibro da tesoura.

4 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB-11**: Cálculo e execução de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1951. 24 p.

BAENA, Antônio Ladislau Monteiro. **Ensaio corográfico sobre a Província do Pará**. Brasília, DF: Senado Federal, 2004. (Edições do Senado Federal, v. 30).

CAMARGOS, José Arlete Alves et al. **Catálogo de árvores do Brasil**. Versão 1.0. Brasília, DF: IBAMA, 2001. 1 CD-ROM.

FERREIRA, Alexandre Rodrigues. **Diário da viagem philosophica pela Capitania de S. Joseph do rio Negro, com a informação [...]**. Excerto da descrição da cidade de Belém do Pará e dos edifícios nela existentes, feitas por Alexandre Rodrigues Ferreira. In: MENDONÇA, Isabel Mayer Godinho. **Antônio José Landi (1713/1791): um artista entre dois continentes**. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian; Fundação para a Ciência e Tecnologia, 2003. (Textos universitários de ciências sociais e humanas).



CINPAR
2009

5º Congresso
Internacional
sobre Patologia e
Reabilitação
de Estruturas

Anais do 5º Congresso Internacional sobre
Patologia e Reabilitação de Estruturas

CINPAR 2009

Junho / 2009



IBRACON



LORENZI, Harri. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2. ed. São Paulo: Instituto Plantarum; Nova Odessa, 2002. v. 2.

LOUREIRO, Arthur A.; SILVA, Marlene Freitas da. **Catálogo das madeiras da Amazônia**. Belém: Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, 1968. 2 v.

NUNES, Larissa Corrêa Acatauassú. **Estruturas de cobertura na arquitetura religiosa de Landi em Belém – PA**: avaliação de tipologia, comportamento estrutural e identificação das espécies vegetais. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

OLIVEIRA, Mário M. Reabilitação de estruturas antigas: uma visão histórica: In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DANIFICADAS, 3, jul. 2002, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2002. Rio de Janeiro: UFF, 2002. Registro digital.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. **Restauro estrutural**: intuição e cálculo. In: DAMSTRUC - 4rd International Conference on the Behaviour of Damaged Structures, 2005, João Pessoa. 4rd International Conference on the Behaviour of Damaged Structures, 2005.

PAPAVERO, Nelson et al. **Landi**: fauna e flora da Amazônia Brasileira. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002.

PEREIRA, José Aranha; MAINIERI, Calvino. Tabelas de resultados obtidos para madeiras nacionais. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Boletim n. 31**. 2.ed. São Paulo, 1956.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. Estudo **dos materiais de construção de vitrúvio até ao século XVIII**: uma visão crítico-interpretativa à luz da ciência contemporânea. Tese (Doutorado em Conservação do Patrimônio Arquitetônico), Universidade de Évora, Évora (Portugal), 2001.

SANTOS, Paulo F. **Arquitetura religiosa em Ouro Preto**. Rio de Janeiro: Kosmos, 1951.

SEGURADO, João Emílio dos Santos. **Trabalhos de carpintaria civil**. 9. ed. rev. Lisboa: Livraria Bertrand, [196-?]. (Biblioteca de instrução profissional).

VASCONCELOS, Sylvio de. **Arquitetura no Brasil**: sistemas construtivos. Revisão e notas: Suzy P. de Mello. 5. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1979. (Série Patrimônio cultural, n. 2).

TIMOSHENKO, Stephen P. **History of strength of materials**. New York: Dover, 1983.