



## **Modelagem Computacional da Estrutura Histórica do Teatro Paiol**

**Guilherme Szelemei Santiago<sup>1</sup>, Elvidio Gavassoni Neto<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná / Departamento de Engenharia Civil / guilhermeszelemei@ufpr.br

<sup>1\*</sup> Universidade Federal do Paraná / Departamento de Engenharia Civil / gavassoni@ufpr.br

### **Resumo**

A análise estrutural de edificações é um passo importante na conservação do patrimônio histórico. Contudo devido às intrínsecas características dessas edificações, tal análise apresenta dificuldades comparadas às estruturas modernas. Tal contexto explica a relativa escassez de estudos na área da análise estrutural de edificações históricas no cenário nacional. Uma das principais ferramentas utilizadas na análise estrutural de edificações históricas é a modelagem computacional. O trabalho apresenta a análise estrutural estática do Teatro Paiol em Curitiba. Originalmente a edificação era usada como armazém de pólvora (1857), transformada em 1971 em teatro. A estrutura do teatro é composta por duas cascas concêntricas cilíndricas de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos. O telhado, cônico, é formado por treliças de cabos metálicos, barras de madeira e coberto por telhas cerâmicas. A análise estrutural estática considera a ação simultânea das cargas de peso próprio, peso da cobertura e vento. O modelo computacional baseado no método dos elementos finitos foi obtido utilizando-se o software RAM Elements.

### **Palavras-chave**

Análise estrutural; edificações históricas; modelo numérico; elementos finitos; alvenaria estrutural.

### **Introdução**

A análise estrutural de edificações é uma ferramenta importante para a conservação do patrimônio histórico e cultural. As edificações históricas devem ser enfatizadas e continuar cumprindo funções na sociedade moderna, conceituando-o como um monumento vivo, dando ênfase a necessidade de modernização da estrutura, mantendo a essência mesmo que com algumas modificações estruturais e culturais (KÜHL, 2010; SANTOS, 2015). “O patrimônio arquitetônico deve ser considerado parte integrante da identidade cultural de um povo e devendo preservado” e a preservação dessas estruturas, muitas vezes são dificultadas e os esforços para conservação são insuficientes devido ao elevado número de edificações históricas, sendo necessário uma colaboração de todas as ciências e técnicas que possam contribuir para o estudo (KÜHL, 2010; SANTOS, 2015).

Pela intrínsecas características dessas edificações e falta de estudos na área, os projetos de elementos estruturais (espessura da parede, profundidade da fundação, espaçamento entre os blocos de alvenaria, dimensões das aberturas, entre outros) eram fundamentados na experiência do construtor (Ahmad S. et al, 2014). Tal contexto explica a relativa escassez de estudos na área da análise estrutural de edificações históricas no cenário nacional. Contudo a análise estrutural é importante, mesmo não obtendo resultados extremamente precisos em função da falta de dados, pois é possível obter um fluxo de tensões e possíveis áreas críticas (LOURENÇO, 2014).

A análise estrutural de edificações históricas apresenta desafios significativos, principalmente devido à ausência de informações detalhadas sobre seus projetos originais, métodos construtivos empregados e materiais utilizados. Sendo essas construções de caráter antigo, muitas vezes não há registros precisos que permitam uma compreensão abrangente de sua composição estrutural. Nesse contexto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o propósito de suprir essas lacunas, incluindo estudos de caracterização química, análise da composição dos materiais e investigações sobre argamassas históricas (LOUREIRO ET AL., 2020; SILVA, 2022; VERDUM ET AL., 2021).

Diante disso, o método dos elementos finitos se apresenta com uma ferramenta alternativa na análise estrutural das edificações históricas. O desenvolvimento de modelos práticos se deu por volta de 1950 com o advento da computação. O MEF busca discretizar uma estrutura complexa em pequenas figuras geométricas simples como triângulos e quadrados, sendo possível uma análise de tensões em cada extremidade (T. Strouboulis, 2000). Baseado nisso, é possível discretizar estruturas históricas e analisar como ações externas influenciam na estrutura, como feito na estrutura da Catedral da Sé de São Paulo, calculando deslocamentos e tensões considerando o comportamento elástico linear dos materiais (Ramirez, 2010), podendo também ser utilizado na estrutura do Teatro Paiol.

O Teatro Paiol é uma estrutura que exerceu sua função originalmente criada para servir como depósito de pólvora em 1857, transformada em 1971 em teatro. A estrutura de blocos de alvenaria estrutural foram mantidas desde sua construção, mesmo com reformas a estrutura não perdeu os traços da história. Recentemente, em 2022, o teatro passou por reformas na sua fachada, onde não foi alterado nada estrutural, somente pequenas manutenções. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise estrutural numérica do Teatro Paiol, localizado em Curitiba (PR, Brasil), por meio da aplicação do Método dos Elementos Finitos, buscando avaliar a ação de cargas geradas pela estrutura, como o peso próprio, e ações externas, como a carga de vento, tendo resultados visuais de como as tensões (compressão, tração e cisalhante) e deformações se distribuem ao longo da estrutura.

## Materiais e Métodos

O Teatro Paiol fica localizado no Bairro Prado Velho na cidade de Curitiba, como pode ser visto na figura 1, é uma edificação composta por duas cascas de cilindros concêntricos, cujo cilindro interno tem maior altura que o externo, ambos construídos de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos que se comportam de forma autoportante. As telhas cerâmicas são suportadas pelo telhado de formato cônico treliçado que por sua vez distribuem os esforços para as paredes autoportantes. Uma estrutura metálica foi construída quando a estrutura modificou o seu uso, tal estrutura tem o intuito de ajudar a distribuição e condução de cargas até as fundações (Januário, 2025).



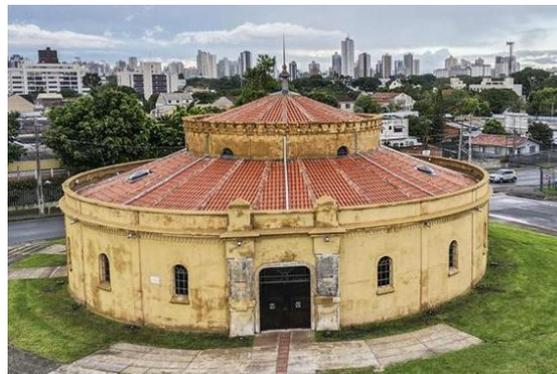
**Figura 1: Localização do Teatro Paiol.**

A Estrutura do Teatro Paiol fica localizada em uma pequena praça de geometria triangular na antiga zona industrial de Curitiba, no bairro Prado Velho, (Januário, 2025).



**Figura 2 – Mapa topográfico de Curitiba. Fonte: Topographic, 2025.**

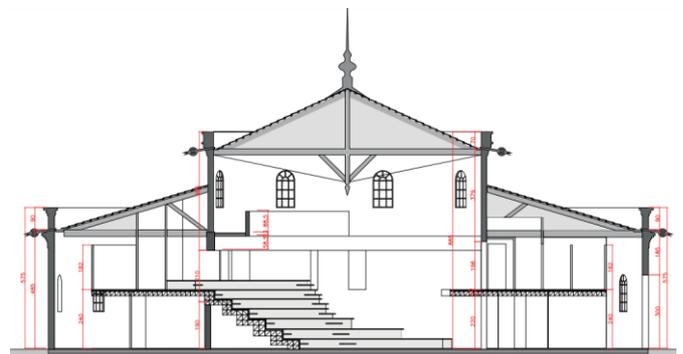
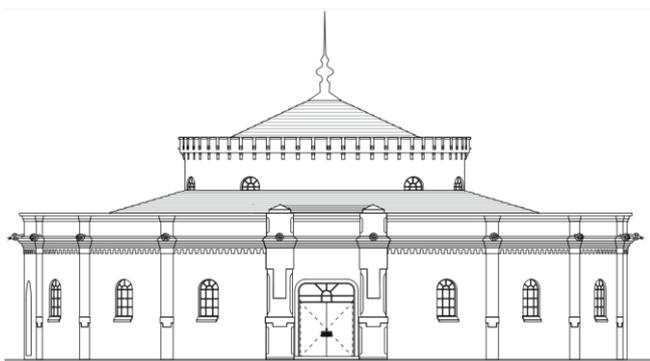
Uma vez calculados os valores das ações, vento e peso próprio, é possível realizar a análise estática da edificação. O Software utilizado foi o RAM Elements (Bentley) e algumas simplificações foram consideradas, como as portas e janelas que foram consideradas retangulares e não em formato de arco como o da estrutura real. A análise considerou o material como elástico e linear, homogêneo e isotrópico.



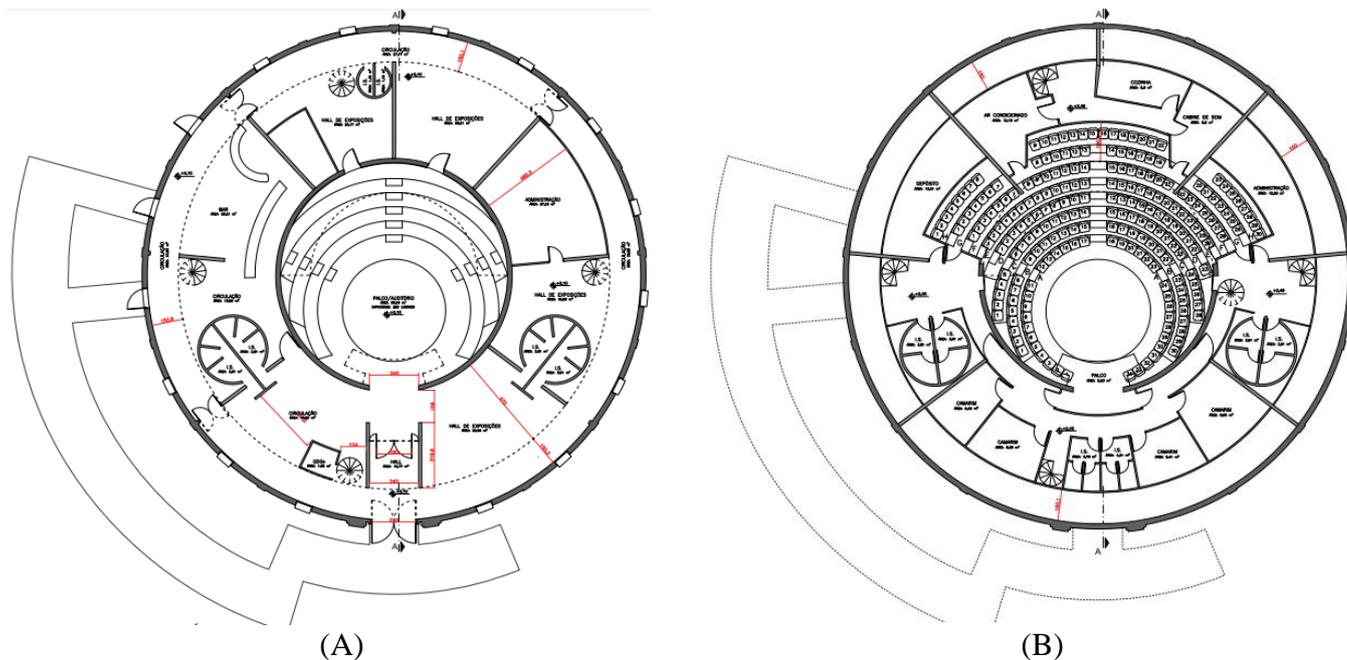
**Figura 3: Teatro Paiol. Fonte: BandNews (2025)**

A estrutura do teatro conta com 13 janelas com arcos, 3 portas simples e uma porta principal dupla no cilindro externo. Já no cilindro interno há uma abertura onde são localizados os assentos para o público. Além de uma abertura que coincide com a porta principal do teatro e janelas com arcos e telados cônicos treliçados, como pode ser observado nas figuras a seguir retiradas do acervo histórico de Curitiba.

A estrutura interna do Teatro Paiol conta com uma arquibancada com 217 lugares para o público apreciar os espetáculos, onde ela vai aumentando a altura gradativamente, como pode ser visto nas figuras 4 e 5. Além de contar com salas no segundo pavimento para os artistas que irão se apresentar no local.

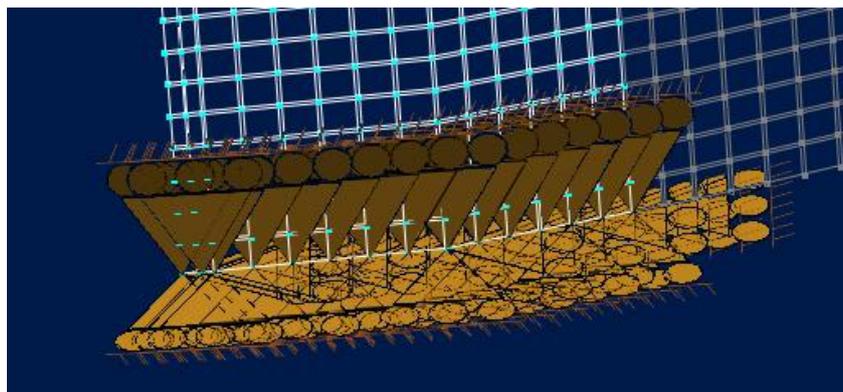


(A) (B)  
**Figura 4 – Elevação frontal do Teatro Paiol (A) e Corte (B). Fonte: Acervo histórico (2020).**

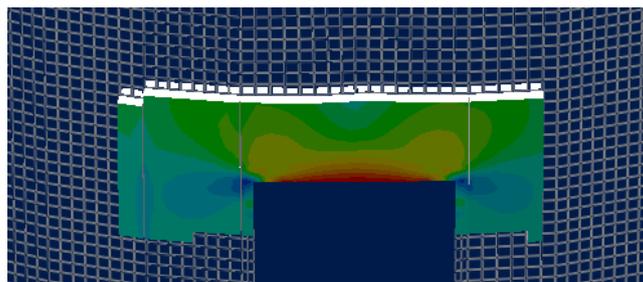


(A) (B)  
**Figura 5 – Planta primeiro pavimento (A) e Planta mezanino (B). Fonte: Acervo histórico (2020).**

Os vínculos da estrutura com a base foram considerados como fundação distribuída que impede o movimento nos três planos de direções. Como pode ser visto na figura 6, onde é possível verificar o tipo de vínculo, sendo estrutura tem seus vínculos com o solo distribuídos ao longo de toda a edificação. composto por um total de 828 nós, onde a rotação é impedida em todos os sentidos.



**Figura 6: Detalhe dos tipos de vínculos de ligação da estrutura com a fundação. Fonte: O Autor (2025)**



**Figura 7: Campo de tensões principais. Fonte: O Autor (2025).**

A tabela 1 – peso específico aparente dos materiais de construção, presente na NBR 2160 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações, apresentada na tabela 1. Como a estrutura é feita de blocos cerâmicos vazados de caráter estrutural o valor utilizado para densidade é de 14 kN/m<sup>3</sup>.

**Tabela 1: Propriedades do material. Fonte: NBR 16868-1.**

Componente	Propriedade	Valor
BLOCO CERÂMICO	Módulo de deformação longitudinal	600 $f_{pk}$
	Coefficiente de Poisson	0,15
	Coefficiente de dilatação térmica linear	6,0 x 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
	Coefficiente de expansão por umidade	300 X 10 <sup>-6</sup> mm/mm
	Coefficiente de fluência específica (considerando tensões na área líquida, ajustar os valores para área bruta conforme o caso)	0,15 mm/m/MPa

Na análise deste estudo foram consideradas a ação simultânea de vento e peso próprio. Baseado na NBR 2160 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações foi possível discretizar a carga que a parede está recebendo em função de seu peso próprio, sendo assim o valor adotado para os cálculos foi de 14 kN/m<sup>3</sup>, considerando a parede com espessura de 25 cm, por simplicidade considerada como constante ao redor dos cilindros.

Para o cálculo da pressão gerada pelo vento foi utilizado a NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações. Sendo assim, para o cálculo da velocidade característica do vento foi necessário analisar parâmetros da estrutura e dos seus arredores, sendo divididos em 3 fatores de ponderação, como pode ser observado na equação 1.

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

onde,

$V_k$ : Velocidade característica do vento;  $V_0$ : Velocidade do vento sem ponderações;  $S_1$ : Fator topográfico;  $S_2$ : Fator rugosidade do terreno, dimensões da edificação, estrutura ou componente e altura da edificação;  $S_3$ : Fator estatístico.

A velocidade básica do vento para a região é de 42m/s segundo a NBR 6123.

A partir da localização apresentada na figura 2 é possível observar que o relevo próximo a edificação é majoritariamente plano, resultando em um valor de  $S_1 = 1$ . O fator  $S_2$  obtido segundo os procedimentos e recomendações da norma 6123 é igual a 0,8204. O fator estatístico adotado segundo a NBR 6123 é igual a 1,06. Tais dados resultam na seguinte velocidade característica para a edificação.

$$V_k = 36,5242 \text{ m/s} \quad (2)$$

Para calcular as pressões internas e externas, deve-se subdividir o cilindro em partes menores, como foi recomendado pela NBR 6123 na tabela 2, obtém-se os valores de pressão externa. Considerando a alvenaria como uma superfície lisa (como recomendado na mesma norma), e com h/d sendo menor que 2,5.

A partir do coeficiente de pressão externa é possível calcular a pressão interna com a equação 3.

$$\sum \pm A_i \times \sqrt{C_{pe} - C_{pi}} = 0 \quad (3)$$

Sendo:

$A_i$ : Área das janelas e portas

$C_{pe}$ : Coeficiente de pressão externa

$C_{pi}$ : Coeficiente de pressão interna

Sabendo que o coeficiente de pressão interna pode ser considerado constante em todos os pontos da edificação (NBR 6123, 2023), basta resolver a equação 3, mas para isso é necessário calcular onde a dimensão das aberturas e a posição em que elas estão localizadas na edificação. Tais cálculos foram resolvidos na tabela 2.

**Tabela 2: Coeficiente da pressão externa em função da área de abertura e ângulo em que se encontra.**  
**Fonte: O Autor, 2025.**

Elemento	Área	Ângulo	Sentido	Cpe do centro das aberturas (ponderado segundo tabela 8)
Aj1	1,1648	15°	Ant horário	0,8
Aj2	1,1648	37°	Ant horário	0,105
Aj3	1,1648	58°	Ant horário	-0,94
Aj4	1,1648	79°	Ant horário	-1,23
Aj5	1,1648	101°	Ant horário	-0,83
Aj6	1,1648	122°	Ant horário	-0,385
Aj7	1,1648	153°	Horário	-0,25
Aj8	1,1648	132°	Horário	-0,31
Aj9	1,1648	111°	Horário	-0,6
Aj10	1,1648	69°	Horário	-1,23
Aj11	1,1648	47°	Horário	-0,35
Aj12	1,1648	26°	Horário	0,49
Aj13	1,1648	5°	Horário	0,95
Apdupla	6,3	90°	Horário	-1,2
Apsimples1	2,7	143°	Horário	-0,25
Apsimples2	2,7	163°	Horário	-0,25
Apsimples3	2,7	175°	Horário	-0,25

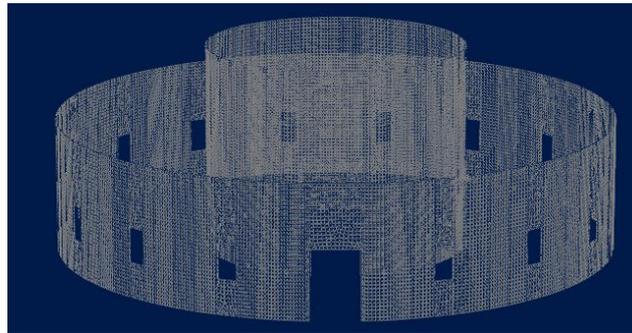
Utilizando os valores da Tabela acima na equação 3 obteve-se o Cpi igual a -0,453. Assim é possível calcular a força de pressão gerada pelo vento com a equação 4.

$$F_i = \frac{\rho}{2} \times V_k^2 \times (1 - C_{pi}) \quad (4)$$

A partir da equação 4 e dos coeficientes, é possível calcular a pressão causada pelo vento ao redor da estrutura, como pode ser visto na tabela 3.

**Tabela 3: Pressão por variação de ângulo a partir dos Cpe e Cpi. Fonte: O Autor (2025).**

Ângulos	Cpe	Cpi	Pressão (N/m <sup>2</sup> )
0 a 5	1	-0,453	1188,19
5 a 15	0,9	-0,453	1106,42
15 a 25	0,7	-0,453	942,87
25 a 35	0,35	-0,453	656,66
35 a 45	0	-0,453	370,44
45 a 55	-0,5	-0,453	-38,43
55 a 65	-1,05	-0,453	-488,20
65 a 75	-1,25	-0,453	-651,75
75 a 85	-1,3	-0,453	-692,64
85 a 95	-1,2	-0,453	-610,86
95 a 108	-0,85	-0,453	-324,65
108 a 129	-0,4	-0,453	43,34
129 a 150	-0,25	-0,453	166,00
150 a 180	-0,25	-0,453	166,00



**Figura 8: Modelo estrutural considerado. Fonte: O Autor (2025)**

As ações consideradas na estrutura são as de cargas de vento e a de carga do peso próprio. De acordo com a NBR 16868-1, a determinação da combinação de cargas para alvenarias submetidas a uma única carga variável pode ser realizada conforme a seguinte equação.

$$F_d = \gamma_g \times G_k + \gamma_q \times W_k \quad (5)$$

Sendo:

$F_d$ : Valor de cálculo para combinação;  $\gamma_g$ : Ponderação das ações permanentes (1,4 ou 0,9);  $G_k$ : Valor característico das ações permanentes (peso próprio);  $\gamma_q$ : Ponderação das ações variáveis (1,4 ou 0);  $W_k$ : Valor característico da carga de vento

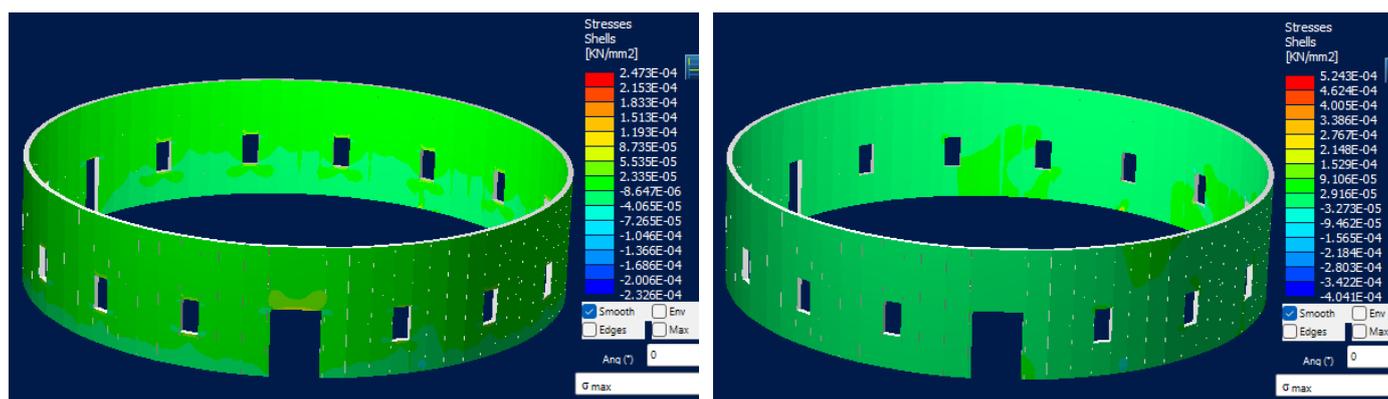
$$\begin{aligned} F_{d1} &= 1,4 \times G_k + 1,4 \times W_k \\ F_{d2} &= 1,4 \times G_k + 0 \times W_k \\ F_{d3} &= 0,9 \times G_k + 1,4 \times W_k \\ F_{d4} &= 0,9 \times G_k + 0 \times W_k \end{aligned} \quad (6)$$

O valor de cálculo foi aplicado ao software com os valores de  $G_k$  sendo 14 kN/m<sup>3</sup> e  $W_k$  sendo variável dependendo do ângulo que o elemento da estrutura está em relação à direção em que o vento está incidindo na estrutura como apresentado na tabela 3.

## Resultados

Os campos de tensões e deslocamentos para os cilindros de alvenaria estrutural são apresentados nesta seção.

Foram realizadas análises e gerados espectros de cores para melhor visualização da estrutura e de como as ações causam esforços diferentes na edificação, como pode ser visualizado na figura 9, onde é apresentado visualmente como o peso próprio e o vento afetam o cilindro externo da estrutura de forma isolada.



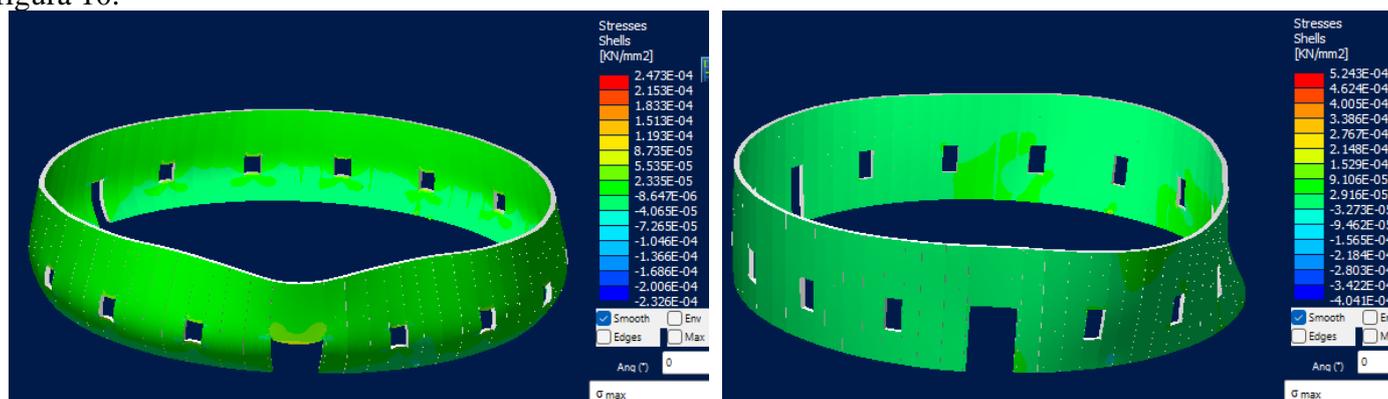
(a) Peso próprio

(b) Ação do vento

Figura 9: Espectro de cores do cilindro externo. Fonte: O Autor (2025).

É possível verificar que a ação que gera maiores esforços na estrutura são os gerados pelo vento, o que era esperado, tendo em vista que é uma estrutura de porte baixo e não tem uma forma com aerodinâmica favorável. Sendo assim, é possível observar na figura 9 uma comparação entre A e B, na qual a figura B, causada pelo vento, mostra-se com tensões nas paredes de aproximadamente o dobro do que na figura A causada pela ação do peso próprio.

A partir disso, é possível observar a deformada na estrutura causada pelas diferentes cargas, tais movimentações mostram como a edificação se comporta com essas ações sobre ela, como pode ser visto na figura 10.



(A) Peso próprio (deformada)

(B) Ação do vento (deformada)

Figura 10: Espectro de cores e deformações do cilindro externo. Fonte: O Autor (2025).

Com a visualização da deformada é possível perceber que o peso próprio gera maiores tensões no centro das aberturas, o que era esperado, tendo em vista que essas partes da estrutura se comportam como vigas biapoiadas. Além disso, no que diz respeito aos esforços causados pela ação do vento, é possível observar que a área leste (localizada a direita da figura 10 B) é a mais afetada, muito em função de absorver de forma direta a ação do vento, o que acaba diminuindo ao longo da estrutura.

Com as figuras 9 e 10 é possível verificar que os pontos de maiores tensões gerados pelo peso próprio são os vãos das portas e janelas, o que também era esperado. Já quando se analisam os pontos de maiores tensões causados pelo vento não se tem um ponto crítico, mas uma distribuição quase uniforme, com pontos mais acentuados nas paredes na direção leste, onde há a incidência maior de ventos.

**Tabela 4: Tensões Máximas. Fonte: O Autor (2025).**

Tensões máximas	Fd0 = Gk + Wk	Fd1 = 1,4Gk + 1,4Wk	Fd2 = 1,4Gk	Fd3 = 0,9Gk + 1,4Wk	Fd4 = 0,9Gk
$\sigma_c$ (MPa)	3,5	4,9	4,9	3,2	3,2
$\sigma_t$ (MPa)	3,5	7,8	7,7	5	5
$\tau$ (MPa)	10	7	7	9	9

A partir da análise da tabela 4 é possível avaliar a segurança da estrutura montando a tabela 5 para melhor visualização. É possível observar que nenhum dos critérios foi atendido, tal fato se deve as simplificações da análise que considerou o material como elástico e linear, homogêneo e isotrópico. A alvenaria é um material heterogêneo, anisotrópico e que facilmente apresenta fraturas e fissuras que impedem a aplicação da análise linear elástica além de um limite de tensões baixo. Contudo, vários estudos usam o modelo linear elástico como uma fase inicial do estudo das edificações para posterior sofisticação do mesmo, como na análise do comportamento estrutural da Catedral da Sé de São Paulo por meio de um modelo numérico tridimensional simplificado, considerando o comportamento elástico-linear dos materiais. O estudo foca em deslocamentos e tensões, avaliando a importância de elementos estruturais como arbotantes e torres frontais para o equilíbrio da edificação (Ramirez, 2010).

**Tabela 5: Tensões Limites, Máximas e Fator de Segurança. Fonte: O Autor (2025).**

Características mecânicas e físicas	Valores Limites	Valores máximos encontrados	Fator de segurança
$\sigma_c$ (MPa)	1,02	4,9	0,21
$\sigma_t$ (MPa)	0,05	7,8	0,006
$\tau$ (MPa)	0,11	10	0,011

## Conclusões

O estudo teve como objetivo analisar o comportamento de uma estrutura complexa com dados escassos e que faz parte da história a partir de um método de análise que simplifica a estrutura em figuras geométricas menos complexas, mostrando de forma visual como ela se comporta. É possível verificar que o método dos elementos finitos é muito eficaz mesmo que de forma simplificada para entender como a estrutura se comporta com a ação de cargas internas, como o peso próprio e externas, como o vento, mas não se mostrou eficiente para uma análise mais completa em função da falta de dados e de parâmetros para a análise da estrutura. Isso fica evidente pela falta de conhecimento e de dados sobre estruturas históricas, as quais poderiam ser preservadas de forma mais eficiente e segura se fossem feitas análises e estudos sobre essas edificações, detalhando melhor os materiais e unidades construtivas de tais estruturas.

Foi possível chegar a conclusões as tensões na estrutura ultrapassam as tensões limites, pode-se perceber que esses resultados são inconsistentes e necessitam de análises mais aprofundadas, como com reconstituição do traço da argamassa, resistência real da alvenaria estrutural utilizada, modelo estrutural com maior número de detalhes, principalmente em porta e janelas, além do dimensionamento das treliças do telhado e a distribuição de carga que essas mudanças resultarão.

## Referências

- ACERVO HISTÓRICO. *Planta original do Teatro Paiol*. Curitiba: Fundação Cultural de Curitiba, 1971.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6123-2: Forças devido ao vento em edificações, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 16868-1: Alvenaria estrutural Parte 1: Projeto, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 2160 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações, 2019.
- SANTOS, R. A. dos. A dimensão urbana do patrimônio na Carta de Atenas de 1931. *Arquitextos*, v. 15, n. 179, 2015.
- KÜHL, B. M. Conservação e restauração: Notas sobre a carta de Veneza. *Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material*, v. 18, n. 2, p. 287–320, 2010.

KERSTING, A. P. B.; CENTENO, J. S.; FILHO, C. ED. F. Geração de modelo tridimensional do Teatro do Paiol a partir do emprego da tecnologia laser scanner terrestre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 4., 2004, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UFSC, 2004.

LOURENÇO, P. The ICOMOS methodology for conservation of cultural heritage buildings: Concepts, research and application to case studies, Green Lines Institute for Sustainable Development. Portugal, 2014.

JANUÁRIO I. – Alternativas projetuais nos primeiros anos da década de 1970: projetos de Abrão Assad, Revista Vitruvius, p. 1809-6298, 2024.

OLIVEIRA, E. J. Biomecânica básica para ortodontistas. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 196p.

S. Ahmad, R. A. Khan, and H. Gupta, “Seismic Performance of a Masonry Heritage Structure,” no. 4, pp. 335– 340, 2014.

TOPOGRAPHIC – Mapa Topográfico de Curitiba. Disponível em: <https://pt-br.topographic-map.com/map-x93gp/Curitiba/?center=-25.46375%2C-49.28132&zoom=12&popup=-25.44773%2C-49.25748>. Acesso: 20/12/2024.