

APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS EM ALVENARIAS HISTÓRICAS: A IGREJA DE NOSSA SENHORA DO AMPARO EM OLINDA-PE

**Paulo Martin Souto Maior
Anne-Marie Pessis
Sílvio Ricardo de Sampaio Ribeiro
José Luis Mota Menezes**

RESUMO

Este artigo é produto de uma pesquisa financiada pelo CNPq no programa de Pós-graduação em Arqueologia e Preservação Patrimonial da Universidade Federal de Pernambuco. Teve como objetivo a comparação de esforços normais em alvenarias estruturais entre modelos numéricos, através de elementos finitos e modelos experimentais. Após o estudo da relação de discrepância e aproximação entre esses métodos, aplicou-se um modelo numérico para análise das patologias das fissuras da igreja de Nossa Senhora do Amparo, em Olinda, Pernambuco.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Finitos, Patologia Estrutural, Igreja N. S. do Amparo

ABSTRACT

This article results from a CNPq funded project for the graduate program in Archaeology and Heeritage Preservation of the Universidade Federal de Pernambuco. The objective was the comparison of normal stress in structural masonry between numeric models via finite elements and experimental models. After studying the discrepancy / approximation ratio between these methods, a numerical model was applied for the analysis of fissure pathologies in the Nossa Senhora do Amparo church in Olinda, Pernambuco.

KEYWORDS: Finite Elements, Structural Pathology, Nossa Senhora do Amparo Church



CRONOLOGIA

Em 1630, quando os holandeses invadiram Pernambuco, a Vila de Olinda tinha dimensões bem diferentes das atuais. Não se estendia o espaço urbano para o lado do mar, e ainda não estavam ocupadas as margens do rio Beberibe. O espaço habitado se limitava ao perímetro atual de tombamento pelo Governo Federal. Nem todas as ruas do trecho mais antigo estavam ocupadas com casas. No início, apenas a rua Nova estava povoada, ou seja, a atual rua que se desenha desde a igreja da Sé do Salvador do Mundo e a do hospital da Santa Casa de Misericórdia até a igreja de Nossa Senhora da Misericórdia. Dessa parte mais alta, onde estavam as casas mais antigas, se descia para o lugar dos quatro cantos — encruzilhada na qual existiam lojas com mercadores — por meio de uma ladeira muito íngreme que recebeu o nome de Misericórdia, dada a proximidade daquela igreja.

Outra ladeira começava ao lado da igreja de Nossa Senhora da Misericórdia e acompanhava o muro de arrimo do prédio do hospital, que ainda existe, e chegava a um largo no qual se defrontavam as igrejas de Nossa Senhora do Amparo e de São João Batista dos Militares. A tal largo também se chegava por uma rua que tinha o nome de Nossa Senhora do Amparo ou, simplesmente, Amparo. Essa rua, em 1630, estava construída mais intensamente no lado norte, o da colina da Misericórdia. O lado sul tinha poucas casas.

Existem referências da igreja de Nossa Senhora da Misericórdia desde 1613, ano em que nela se casaram Domingos do Vale e Maria Rodrigues, conforme anotações genealógicas de Borges da Fonseca, em sua Nobiliarquia Pernambucana. Segundo Pereira da Costa, a irmandade de Nossa Senhora do Amparo estaria em Olinda desde o reinado do Cardeal D. Henrique (1578 a 1580) e se constituía por mancebos solteiros. Uma formação bem curiosa por suas características.

Em 1631, a igreja foi consumida pelo fogo, quando foram destruídos o telhado e os assoalhos. Não se conhece iconografia do edifício naquele ano nem sequer descrições. Quando se permitiu, com o governo de João Maurício de Nassau (1637 a 1644), a reconstrução de casas em Olinda, tem-se justamente nesse período a datação da portada da igreja (1644). Talvez, por influência de Frei Manuel dos Óculos, tal reconstrução tenha sido aprovada por Nassau. Esse frade era íntimo da casa do Governador e seu nome religioso era Frei Manuel Calado do Salvador. Costumava celebrar missa na referida igreja, cujo capelão conhecido era o Padre Manuel Machado.



Depois de 1654, com a expulsão dos holandeses, tudo ficou em tempo lento na Vila. Na igreja de Nossa Senhora do Amparo instalou-se outra irmandade, a de Santa Cecília, padroeira dos músicos. Daquele ano em diante, outras igrejas foram reconstruídas como a matriz do Salvador, elevada a Sé em 1676, e a dos Jesuítas e seus colégios. Também o convento dos Franciscanos se tornou maior. No entanto, há um silêncio sobre obras na igreja de Nossa Senhora do Amparo.

Somente em 1783, D. Maria I aprovou *compromisso* com aquela irmandade de manebos para andamento das obras e reconstrução da igreja. Deste ano em diante se têm notícias de obras no prédio. Em 1780, por exemplo, foram executadas a capela-mor, na verdade a abertura de duas tribunas desde o consistório, e outro altar mais moderno. Também se ergueram, depois de 1780, os dois altares colaterais ao arco cruzeiro. Para o altar-mor se mandou fazer uma imagem de São Diogo de Alcalá, por Antônio Splanger Aranha. Os douramentos e pinturas se devem ao mestre João José Lopes da Silva. Esses trabalhos foram feitos em torno de 1797, segundo documentação conhecida.¹

A irmandade de Nossa Senhora do Amparo exigia, na admissão dos seus irmãos, que não fossem parentes até o 3º grau, pretos, mulatos ou judeus. Também não deveriam ter ofícios vis (talvez os de oficiais mecânicos)² tampouco serem escandalosos ou pecadores públicos (talvez bêbados e prostitutas). As armas da irmandade, descritas por Pereira da Costa, eram as seguintes: uma águia bicéfala, com uma das cabeças olhando para cima, lugar onde estava a letra M; e a outra cabeça na direção do peito. Nas garras estava uma meia lua com a extremidade voltada para baixo.

A igreja foi restaurada há cerca de dez anos. Na parte superior da linha do forro, estão restos de azulejos datáveis dos últimos anos do século XVI. Provavelmente da primeira igreja.





Figura 1: Fachada frontal da igreja de Nossa Senhora do Amparo, Olinda-PE.



Figura 2: Vista interna desde o altar, em direção à fachada frontal do interior da igreja de Nossa Senhora do Amparo, Olinda-PE.



Figura 3: Fachada lateral direita da igreja de Nossa Senhora do Amparo, Olinda-PE.

DESCRIÇÃO FÍSICA

Trata-se de uma igreja de planta retangular com naves laterais. A nave central possui um vão com 9,00 metros e um comprimento total, da face do frontispício até a parede do altar, de 26,60 metros. A nave lateral direita, com um vão de apenas 1,23 metros, serve exclusivamente de circulação e acesso à nave central. No outro extremo, a nave lateral possui 3,42 metros de vão e encontram-se ali o ossuário e, na parte posterior, com vão de 5,45 metros, a sacristia. A partir da sacristia tem-se acesso, através de um corredor e de uma escada aos fundos, à parte posterior do altar.



No primeiro pavimento encontra-se o coro, todo em madeira (vigas e dois pilares laterais nos planos das alvenarias entre a nave central e as naves laterais) e, nas naves laterais, repete-se a configuração da planta do térreo, mas atualmente sem usos específicos.

A edificação possui 18,08 metros de comprimento na fachada posterior; 18,19 metros na fachada frontal; e 30,75 metros nas laterais.

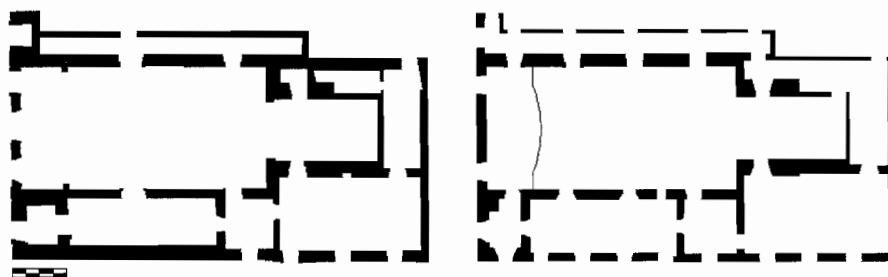


Figura 4: Plantas do térreo e do primeiro pavimento da igreja de Nossa Senhora do Amparo, Olinda-PE, nas quais se nota a diminuição da espessura das alvenarias.

A fachada frontal, com duas torres, segue um padrão identificável em várias igrejas do período. Trata-se de um prédio com frontispício com 10,75 metros de largura e telhado em duas águas (com ligeira diferença de inclinação entre a nave central e as laterais, duas volutas simétricas no coroamento e óculo central) e duas torres (sendo uma delas a sineira com 4,25 metros, e a outra, à esquerda com 3,73 metros de largura, ainda inacabada).

A altura do frontispício, no ponto mais alto, é de 16,5 metros. As torres medem, respectivamente, 22,20 metros e 13,56 metros de altura.

As fachadas laterais são praticamente desprovidas de ornamentação. A leitura estética ocorre através do ritmo das aberturas de janelas e portas e do arremate da cobertura em relação à parede. A fachada posterior carece de qualquer adorno, o que implica em uma face cega e sem aberturas.

Características e propriedades dos materiais

As paredes são compostas de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos e podem ser do tipo denominado frontal, com espessura de um tijolo, um tijolo e meio ou dois tijolos, que por sua vez podem estar assentados segundo disposição de fiadas dos tipos perpianhos (mais comuns em paredes entre 20 e 40 centímetros de espessura) em placas (comum em paredes entre 30 e 60 centímetros de espessura) ou mistas (comum em paredes com espessuras maiores que 60 centímetros).



Na análise estrutural consideraram-se as seguintes propriedades dos materiais:

	E (kgf/m ²)	ν	γ (kgf/m ²)
Tijolo maciço	200.000	0,20	2.200
Pedra (rocha)	400.000	0,25	2.800
Madeira	150.000	0,35	800

Sendo:

E = Módulo de elasticidade longitudinal

ν = Coeficiente de Poisson

γ = Peso específico

INFLUÊNCIAS E CONCEPÇÃO TECTÔNICA

O espaço interior configura-se a partir de um modelo de planta baixa conhecido como igrejas de salão, pelo aspecto quadrangular e simplificado de sua geometria. A origem desse conceito, tipicamente português, identifica-se em edificações anteriores, como São Francisco de Évora (Martim Lourenço, 1460 a 1501) e Espírito Santo de Évora (1567 a 1574). Entre as principais características desse padrão arquitetônico, que se percebem facilmente na igreja de Nossa Senhora do Amparo, destacam-se as paredes retangulares alinhadas quase desprovidas de frisos, a coberta sem cúpula, a ausência de capelas laterais e de colunata e as naves laterais que servem de acesso ou adaptadas a usos específicos, caso do ossuário e da sacristia.

Mas, segundo German Bazin, foi a igreja São Paulo de Braga que serviu como referência de planta para a Colônia. Ele cita os casos do colégio dos Jesuítas, no Rio de Janeiro (1585 a 1588), e de Nossa Senhora da Graça (1592), em Olinda.³

Por outro lado, a origem do modelo remonta à tradição românica na península ibérica, caso excepcional, por exemplo, da Catalunha que conserva o maior conjunto de edificações religiosas desse estilo na Europa. Nas suas construções góticas permaneceu esse aspecto sóbrio de fortaleza, que se identifica inclusive nos contrafortes e nos estreitos vitrais nas catedrais espanholas, a exemplo de Barcelona, Valência e Maiorca. Na igreja de Nossa Senhora do Amparo também se percebe a influência dessa característica compositiva.



Mesmo assim, independentemente da referência do estilo ou da influência de edificações antecessoras, tanto num caso como no outro, se observa o conceito e a configuração retangular sob telhados de duas águas a partir de modelos portugueses. Mas vislumbra-se também uma tendência ao classicismo, podendo-se até associar esse modelo arquitetônico às produções mais austeras e de espírito maneirista portugueses.⁴

Além das questões artístico-históricas — influências de outros templos construídos na Metrópole, de tratados estéticos, como os de Serlio, Vignola e Palladio⁵, ou dos aspectos compositivos da fachada e da planta baixa — somamos à origem da concepção espacial o elemento tectônico.⁶ A compreensão desse conceito introduz materiais e processos construtivos como elementos determinantes, geradores da qualidade espacial e motores de transformações, inclusive, estéticas. Ou seja, a técnica e a tecnologia construtivas induzem à qualidade espacial.⁷

A partir do enfoque do material e do processo construtivo profundamente relacionados à concepção espacial, este estudo, além da patologia das fissuras da igreja, expõe as questões que envolvem a análise numérica de alvenarias históricas e, especialmente, as limitações atuais nas tentativas em se *discretizar*⁸ modelos físicos.



PARTICULARIDADES DA ANÁLISE

Padrão construtivo

Na igreja de Nossa Senhora do Amparo emprega-se, quase como um cânone colonial, alvenaria maciça para compressão (paredes) e madeira para tração (coberta). Cantaria, via de regra, apenas nos arremates das aberturas e quase como adorno, um símbolo de status na época. Portanto, bem diferente de padrões europeus, onde a pedra é empregada exaustivamente.⁹

Aspectos geotécnicos

Os estudos sobre patologias das edificações religiosas no Brasil, devido a sua singeleza construtiva, têm ênfase nas questões geotécnicas ou na degradação decorrente da ação da água. Assim, a mecânica da edificação, aparentemente simples, é relegada a um segundo plano.

A geologia do sítio histórico de Olinda constitui-se, em sua grande parte, pela estratificação caracterizada por alternância de calcários argilosos e solos arenosos de consistência e compacidade variáveis e crescentes com a profundidade.¹⁰

As argilas existentes se enquadram na faixa de solos normais ou inativos, ou seja, não constituem solos especiais dos tipos colapsáveis ou expansivos, de acordo com pesquisas geotécnicas desenvolvidas por Gusmão Filho¹¹.

São construções, via de regra, sólidas e robustas, que suportam as intempéries e o tempo sem apresentarem patologias graves, apenas aquelas em que a manutenção predial, se fosse feita, poderia evitar.

Conforme estudo geotécnico das patologias mecânicas das igrejas do sítio histórico de Olinda se verifica a particularidade da cidade. Caso, por exemplo, dos mais graves, o das fissuras do mosteiro de São Bento, onde a sacristia está desprendendo-se do corpo da igreja, devido à movimentação do solo, como descreve Gusmão Filho.¹²

Nesse aspecto, vale acrescentar que a igreja de Nossa Senhora do Amparo se localiza no alto de um morro e uma das possíveis causas para as patologias identificadas foi a descompactação do solo decorrente da construção de um tanque séptico para captação de efluentes junto à fachada lateral direita.



Análise numérica e experimental de alvenarias históricas

No caso da igreja de Nossa Senhora do Amparo, a unidade construtiva, o isolamento físico da edificação — pois não possui acréscimos fora dos padrões construtivos nem interferência de outros imóveis —, e a fácil identificação das fissuras permitem chegar a um modelo matricial bastante próximo da realidade. Portanto, serve de exemplo para o estudo do comportamento mecânico desse padrão de construção.

Este estudo pretende estabelecer uma referência para pesquisas posteriores. Entretanto, ao descermos ao nível da configuração (mais de um tipo de material e suas propriedades mecânicas), do arranjo (quantidade utilizada dos vários tipos de materiais) e da paginação (disposição geométrica de cada material) dos elementos construtivos surge um problema de aplicação do método de elementos finitos. Esse tipo de análise, não linear, desenvolveu-se, inicialmente, para meios homogêneos, caso de elementos metálicos e de madeira.

Em contrapartida, devido aos resultados alcançados em meios heterogêneos, a aplicação do método de elementos finitos têm sido cada vez mais utilizado em pesquisas sobre blocos de concreto e alvenaria estruturais. É o caso dos trabalhos desenvolvidos aqui no Brasil por Correa e Ramalho.¹³

Contudo, no caso das alvenarias históricas, o primeiro entrave é a irregularidade geométrica dos modelos físicos a serem representados matricialmente. Pedras, tijolos maci-

ços e blocos cerâmicos, com ou sem coesão, são aglutinados com argamassas ou cimentos e, como bem se sabe, a configuração, o arranjo e a paginação desses elementos são variáveis decisivas para determinar a condição de estabilidade mecânica do sistema.

É o caso da paginação arqueada de blocos cerâmicos, levada a padrões de esbelteza excepcionais no Império Romano, que permitiu a construção de vãos e cúpulas inéditas na época. Ou o arranjo das alvenarias nas abobadas góticas com pedra e argamassa à base de cal. E mais ainda, o construtor florentino **Filippo Brunelleschi** (1377 a 1446) ao levantar a cúpula de Santa Maria del Fiori, onde a paginação em espinha de peixe dos blocos cerâmicos, permitiu novas possibilidades tectônicas.¹⁴ Apenas esses três exemplos básicos demonstram uma infinidade de variáveis a serem consideradas para alvenaria estrutural. O grande desafio ou, segundo alguns, a deficiência¹⁵ é a necessidade de simplificar os modelos matriciais afim de torná-los, nos dias atuais e com os aparelhos disponíveis, exequíveis.

Dessa forma, antes de adentrarmos na análise da igreja propriamente dita, algumas considerações devem ser feitas em relação a:

Regularidade geométrica e mecânica

A representação da irregularidade geométrica dos modelos de edificações históricas ainda não se tornou uma prática convencional devido aos recursos tecnológicos disponíveis. Por mais que se tente refinar a matriz a ser analisada, as modelagens, na sua grande maioria ou praticamente todas, são elaboradas em programas vetoriais com ferramentas de desenho a partir de levantamentos manuais *in situ* ou, quando muito, por fotogrametria. Mesmo neste último, recuperam-se apenas dados de superfície, permanecendo indefinidas as incógnitas mecânicas e geométricas. Quando se trabalha com mais de um material, no caso de meios heterogêneos, as incógnitas são ainda maiores.

Na figura 5, apresenta-se um modelo que procura *discretizar* a alvenaria por meio de dois materiais: elementos aglutinantes (argamassas ou cimentos) e blocos cerâmicos. Mesmo assim, ainda persiste a questão da irregularidade geométrica.

Outro aspecto não considerado nas análises nodais em meios heterogêneos são as variáveis de viscosidade e atrito. Especialmente esta última, que tem papel determinante na coesão entre aglutinante e blocos cerâmicos de alvenarias. Mesmo assim, os resultados alcançados, inclusive apresentados nesta pesquisa, mostram a eficácia do método por elementos finitos.



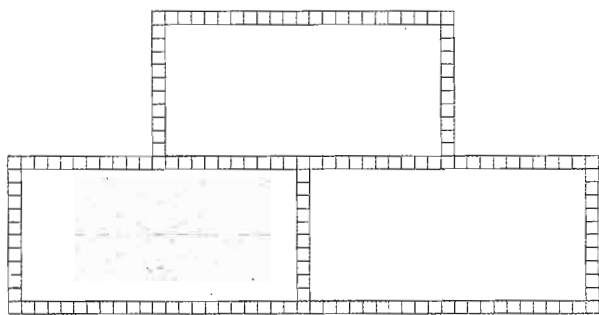


Figura 5: Modelo de malha para dois materiais (bloco e aglutinante), no qual, mesmo com extremo refinamento, permanece a regularidade geométrica e mecânica, que tenta, por assim dizer, aproximar-se da realidade física.

Visualização e representação matricial do comportamento mecânico

Como desdobramento imediato do item anterior, outro ponto a ser levando em consideração é a interpretação dos dados, uma vez que foram fornecidos por um método de constantes mecânicas e geométricas. Sua relação, ou melhor, comparação, com o modelo real, termina por identificar apenas áreas ou pontos de risco. Assim, nas figuras 6a, 6b, 7a e 7b, percebe-se a relação entre essas duas situações, ou seja, a realidade física e a representação numérica com constantes mecânicas e geométricas.

40



Os dois exemplos hipotéticos de carregamento, figuras 6a e 7a, são patologias relativamente comuns em alvenarias. Pode-se perceber de forma mais precisa a discrepância entre realidade física (modelos experimentais) e numérica (modelos matriciais) através do gráfico da figura 8, no qual se descreve a hipótese de cálculo para cargas e meio físico semelhante ao da figura 6a.

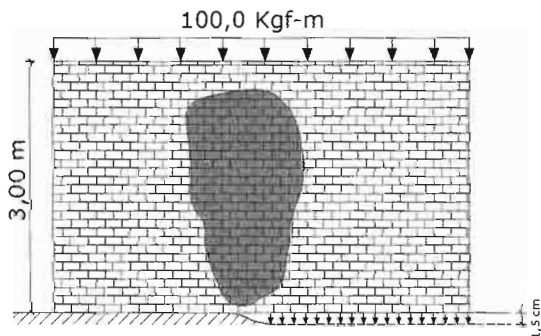


Figura 6a: Parede de alvenaria com carga uniformemente distribuída e recalque diferencial. A região sinalizada representa a área crítica de ruptura por recalque, onde surgem fissuras e se observa cisalhamento.

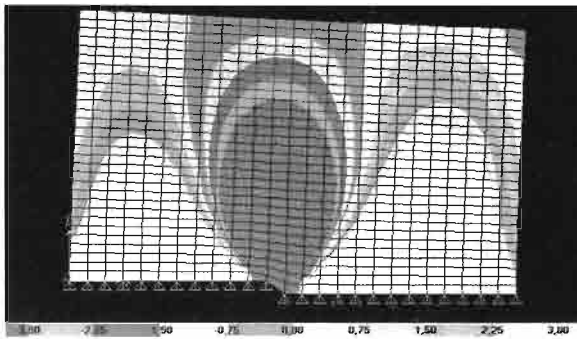


Figura 6b: Modelo numérico, através de elementos finitos, para a hipótese de carregamento da figura 6a. Podemos considerar a área mais escura como a região de cisalhamento. De forma progressiva, as demais camadas são as regiões de ocorrências de trincas, fissuras e micro-fissuras.

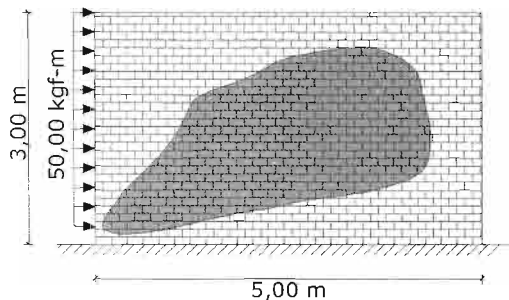


Figura 7a: Parede de alvenaria com carga uniformemente distribuída lateralmente. A região sinalizada representa a área crítica com ruptura por esforço normal de tração, provocado por momento fletor máximo e onde surgem fissuras.

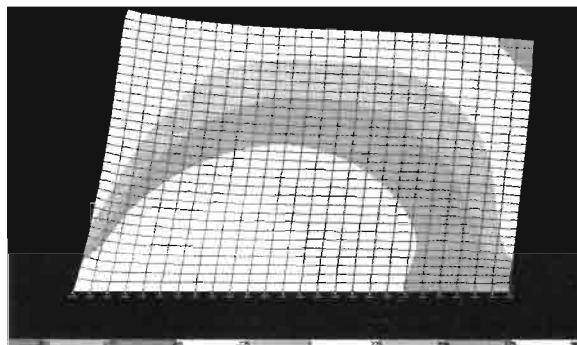


Figura 7b: Modelo numérico, através de elementos finitos, para a hipótese de carregamento da figura 7a. Podemos considerar a área branca como a região crítica de ruptura por esforço normal de tração, provocado por momento fletor máximo. De forma progressiva, as demais camadas são as regiões de ocorrência de trincas, fissuras e micro-fissuras.

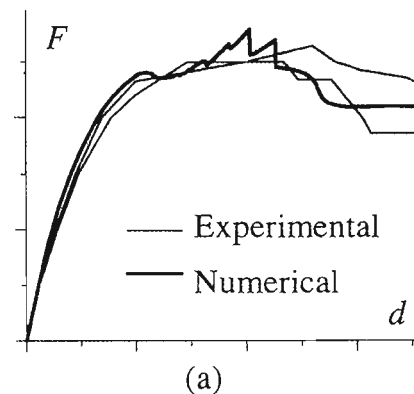


Figura 8: Discrepância entre análise numérica e experimental, expondo o grau de aproximação de modelos numéricos em relação às alvenarias estruturais. Nesse caso, refere-se à hipótese de carga de ensaio de um modelo semelhante ao da figura 6a.



Na tabela da figura 9, com exemplos de paginação, arranjo e configuração de alvenarias submetidas a cargas normais, verifica-se que as fissuras mudam em função da forma como os materiais estão dispostos. Nesse aspecto, os modelos numéricos ainda precisam de instrumentos de *discretização* mais refinados. Mesmo assim, como se observa no gráfico da figura 8, os resultados estão próximos à realidade física.

Angle θ	Uniaxial tension	Tension/compression	Uniaxial compression
0°			
22.5°			
45°			
67.5°			
90°			

Figura 9: Fissuras em paredes de alvenaria sob cargas axiais e biaxiais. Notam-se as alterações no sentido das fissuras em relação às diferentes paginações da alvenaria em função do tipo de esforço normal.¹⁶

CARGAS

Na análise das cargas atuantes da edificação, foram consideradas as seguintes hipóteses de cálculo:

Cargas permanentes

Parâmetros referentes ao peso próprio dos elementos construtivos que compõem o arranjo estrutural da edificação, tais como:

- *Elementos estruturais de madeira*
- *Paredes de alvenaria*
- *Elementos em pedra (fachada frontal)*

Cargas acidentais

Cargas referentes às sobrecargas de utilização e ações prescritas em norma técnica.

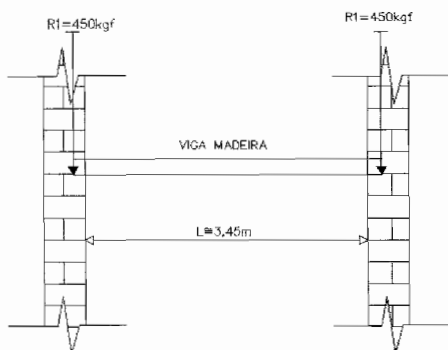


Figura 10: Carga concentrada por viga (com 0,80 metro) na nave lateral direita sobre o ossuário.

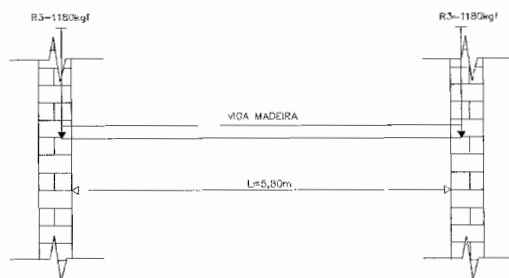


Figura 11: Carga na estrutura da nave lateral direita, sobre a sacristia, com seis treliças espaçadas a 1,5 metro de distância.

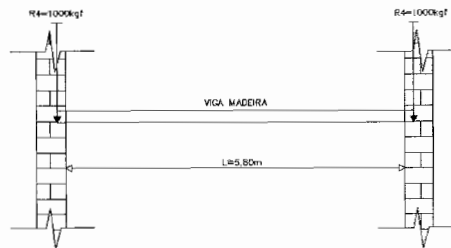
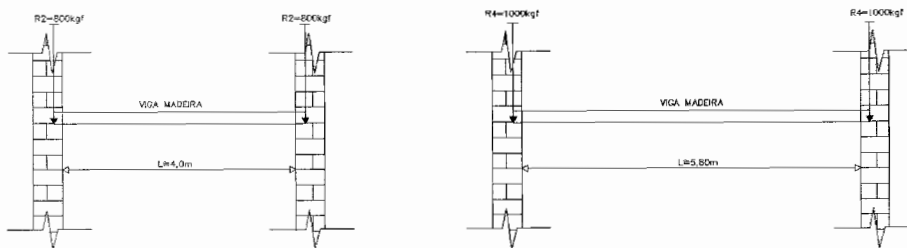


Figura 12: Cargas da nave central com quatro treliças espaçadas a 3,6 metros distância.

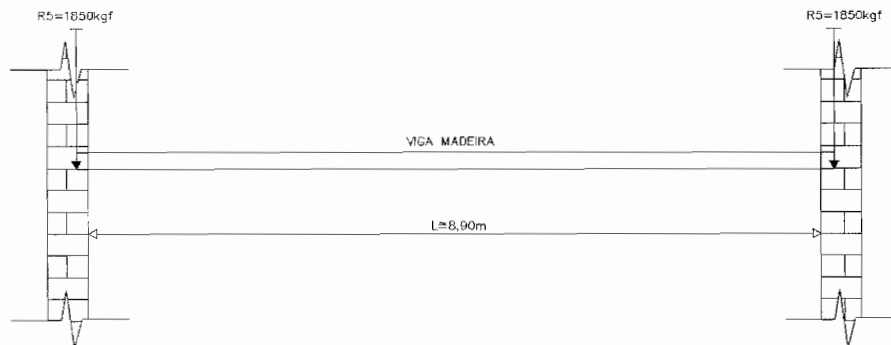
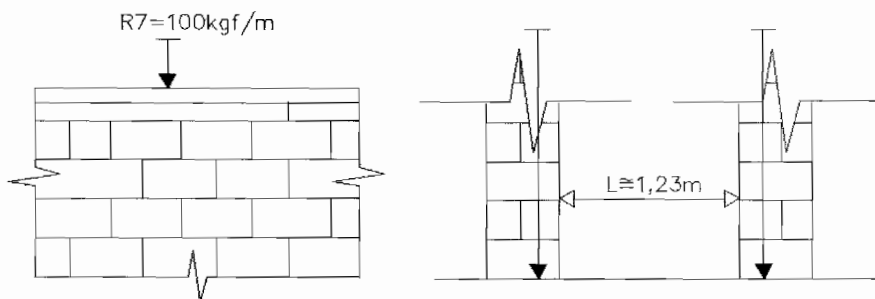


Figura 13: Cargas de cobertura por treliças, nas áreas sobre o ossuário e a sacristia, na nave lateral direita.





Figuras 14 e 15: Cargas de cobertura e de piso na nave lateral esquerda.

SINTOMATOLOGIA

O primeiro aspecto a ser considerado é a aproximação entre o mapeamento de danos das fissuras e os resultados, bastante próximos, obtidos através do modelo calculado por elementos finitos.

Assim, no estudo da sintomatologia, faz-se uma análise dos fenômenos e das manifestações das fissuras da edificação. Devido ao surgimento de esforços normais de tração, observam-se processos de fissuração das paredes portantes de alvenaria causados por recalques diferenciais.

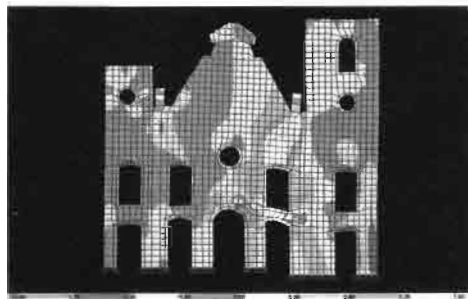
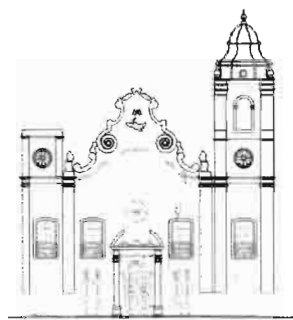
A partir desse comportamento mecânico, aparecem planos de cisalhamento devido aos movimentos diferenciados que atingem valores máximos nos pontos indicados, conforme se observam nas figuras 17, 20 e 22.

Vale acrescentar que, na restauração concluída em 1992, da qual participaram várias instituições, entre elas o IPHAN e a Prefeitura de Olinda, recuperaram-se o acervo, parte do altar, a cobertura e o forro. Na ocasião, a construção provisória de um tanque séptico para captação de efluentes de esgoto sanitário para atender à obra, ao lado da torre sineira, pode ter influenciado no surgimento das fissuras. Isso devido ao fato, além dos aspectos geológicos e especialmente geográficos anteriormente descritos, das construções dessa natureza ocasionarem, na maioria dos casos, descompactação do solo e incremento de erosão por escoamento de fluidos. Motivos suficientes para relacionar a construção do tanque às patologias descritas.¹⁷

As fissuras ocorrem na fachada frontal e lateral direita e podem ser divididas em três patologias. Na primeira, na fachada frontal, verifica-se que a hipótese de cálculo obteve resposta semelhante à situação que se observa na edificação. Assim, a patologia recai sobre um recalque diferencial da torre, com distorção angular nos planos das fachadas frontal e lateral direita, conforme as figuras 16 e 17.



O modelo numérico determina justamente o local onde existe uma fissura real, ou seja, representa-se, com bastante aproximação, através de um modelo homogêneo e geometricamente regular, um elemento físico, heterogêneo e irregular.



Figuras 16 e 17: Comparação entre o modelo numérico e o modelo físico para esforços normais de tração na fachada frontal. Pode-se identificar a aproximação e eficácia da análise por elementos finitos através da correlação entre a fissura registrada na fachada da edificação e a área, mais clara, no modelo numérico, que representa o cisalhamento nos planos limites das fissuras. Nesse caso, decorrente de recalque diferencial da torre sineira.

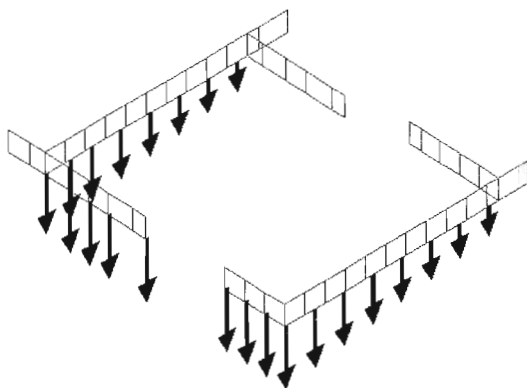
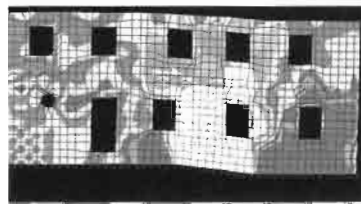
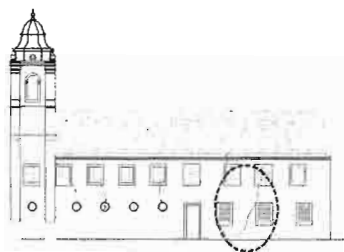


Figura 18: No modelo numérico, aplicaram-se, na base da torre sineira e para simulação do recalque, os deslocamentos verticais crescentes com intervalos de 0,5 até 3,00 centímetros.

A **segunda** patologia ocorre na parte posterior da fachada lateral e também é uma configuração típica de fissura devido ao mecanismo por recalque diferencial. No modelo apresentado, foi possível determinar o comprimento e a curva de recalque, o que permite assegurarmos a região de cisalhamento na parede, conforme as figuras 19 e 20.





Figuras 19 e 20: Recalque diferencial na fachada lateral direita, parte posterior da edificação. A área mais clara determina a região de cisalhamento, onde se identifica uma fissura que se prolonga entre uma janela do primeiro pavimento e o piso do térreo.

A **terceira** patologia ocorre na fachada lateral direita, contígua à torre sineira. Nesse ponto, o modelo por elementos finitos não permitiu chegarmos a uma representação precisa, como nos casos anteriores. São três fissuras que apresentam inclinação e orientação semelhantes.

Foi possível simular o comportamento mecânico das duas primeiras fissuras próximas à torre sineira. Entretanto, há um intervalo entre a segunda e a terceira que não resultou demonstrável no modelo numérico.

46

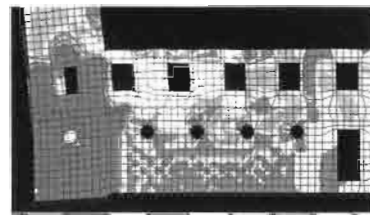
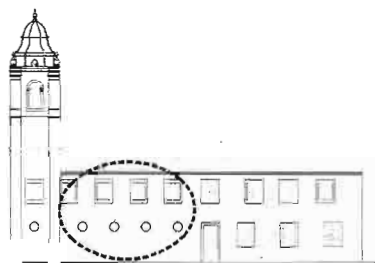


A causa recai devido ao fato de não ter sido feita prospecção arqueológica ao nível das paredes. É possível que algumas fissuras tenham sido encobertas durante a manutenção predial e, portanto, ocultem o comportamento real do prédio. Fato relatado por um membro da congregação que atualmente mantêm a edificação e executa as obras de manutenção.

Mesmo assim, podemos perceber que o modelo analisado apontou para a hipótese que, ao recalcar a torre sineira, houve tração nas paredes do primeiro pavimento, pois são mais esbeltas (0,55 metro) do que as do térreo (1,00 metro).

Partindo dessa constatação, configurou-se o sistema de modo que as paredes do térreo, especificamente nesse trecho, funcionassem, devido a sua espessura, como corpos rígidos. Como consequência, as paredes do primeiro pavimento, devido à espessura inferior, não resistiram aos esforços de tração decorrentes dos movimentos diferenciados provocados pelo recalque da torre. Vale salientar também que as aberturas, ou seja, as janelas no primeiro pavimento diminuem a seção no plano horizontal da parede, enfraquecendo, portanto, todo o sistema estrutural da parede do primeiro pavimento.

Nesse contexto, as fissuras detectadas nas paredes da edificação são típicas de recalques diferenciais de fundações, causadas por movimentações na interação solo-estrutura com elementos de fundações devido às características geológicas do solo.¹⁸



Figuras 21 e 22: Mapeamento de danos e representação de deslocamentos nodais e da concentração de esforços normais de tração, gerando cisalhamento na parede do primeiro pavimento da fachada lateral direita, decorrente do recalque da torre sineira.

Conclui-se que esse padrão construtivo, ao nível das alvenarias, foi idealizado para trabalhar sob esforços normais de compressão. As causas das fissuras, nas três patologias descritas, tiveram como elementos preponderantes os esforços de tração. Ou seja, esse padrão construtivo absorve bem esforços de compressão decorrentes das cargas atuantes. Ao menor sinal de recalque, surgem configurações de fissuras decorrentes de esforços de tração, conforme se percebe nas figuras 17, 20 e 22.

Vale ressaltar, para fins de intervenção e restauração, que a análise por elementos finitos deve ser adotada como instrumento complementar à prospecção arqueológica, através da qual se identificam os tipos de tijolos e aglomerantes, além dos aspectos já mencionados de configuração, arranjo e paginação das alvenarias.¹⁹

Além do mais, a arqueologia permitiria identificar fissuras encobertas que mascaram o real comportamento mecânico do prédio. De fato, em orientação realizada em nível de mestrado, foi possível definir com bastante precisão esses aspectos físicos das alvenarias históricas e mapear, de forma exaustiva, as paredes portantes da casa-grande do engenho Monjope, em Igarassu-PE. Dados esses, primordiais para modelagem matricial e representação numérica de uma edificação histórica.²⁰

Ainda como instrumento complementar à prospecção arqueológica, caberia uma análise geotécnica associada à mecânica da estrutura, que serviria para mensurar numericamente os recalques diferenciais na edificação. Por último, seria possível monitorar a movimentação e a progressão ou estacionamento das fissuras com instrumentos de extensometria não destrutivos.

Contudo, sem implementar nenhum desses três métodos, a análise por elementos finitos, mesmo que o modelo numérico possua divergências em relação ao modelo físico,



permitiu aproximações com rigor científico e que comprovam numericamente as patologias e o comportamento mecânico de um meio heterogêneo. Dessa forma, esta pesquisa abre caminho à aplicação de modelos matriciais no estudo das edificações históricas e demonstra sua capacidade em auferir respostas concretas sobre comportamento e as patologias mecânicas dessa tipologia construtiva de valor histórico.

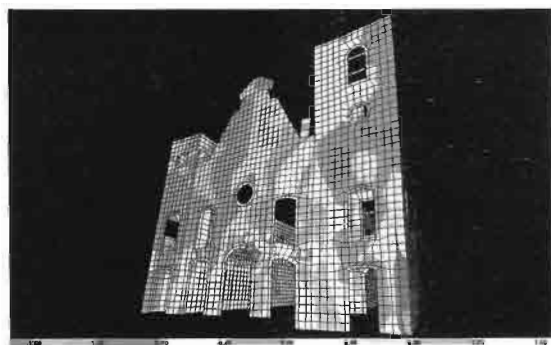


Figura 23: Perspectiva por elementos finitos da igreja de Nossa Senhora do Amparo, para esforços normais.



1 COSTA, F. A. Pereira da Costa, *Anais Pernambucanos*, FUNDARPE, Recife, 1985, Vol. 6, p. 411 a 414.

2 Percebe-se aqui a influência das ordenações filipinas onde, para ser membro da câmara do Recife, era necessário possuir grandes extensões de terras, ser branco e não possuir defeitos mecânicos, ou seja, não ter exercido, até três gerações, nenhum tipo de trabalho mecânico.

3 BAZIN, German. *A Arquitetura Religiosa Barroca no Brasil*. Ed. Record, Rio de Janeiro, 1983.

4 CORREIA, José Eduardo Horta. *Arquitetura Portuguesa: Renascimento, Maneirismo e Estilo Chão*, Ed. Presença, Lisboa, 2002 ; SILVA, Jorge Henrique Pais da. *Estudos Sobre o Maneirismo* Ed. Estampa, Lisboa, 1983.

5 SERLIO, Sebastiano. *Tercer y Cuarto Libro de Arquitectura*, Toledo, Ed. Casa de Ivan de Ayala, 1552, Traduzido por Francisco de Villapando. Edição facsímile, Ed. Alta Fulla, Barcelona, 1990.

PALLADIO, Andrea. *Los Cuatro Libros de Arquitectura (1570)*. Traducción del Italiano de Luisa de Alipriandini, Ed. Akal, Barcelona 1988.

LÉVEIL, J. A. *Tratado Prático Elementar de Architectura ou Estudo das Cinco Ordens Segundo Jacques Barozzio de Vinhola*. Ed. F. Briguiet & Cia., Rio de Janeiro.

6 FRAMPTON, Kenneth. *Estudios Sobre Cultura Tectónica – Poéticas de la Construcción en la Arquitectura de los Siglos XIX y XX*. Akal, Madrid, 1999.

7 Idem.

8 Não se encontrou a palavra *discretizar* nos dicionários Aurélio e Houaiss. Mas, ao consultarmos especialistas das áreas de matemática e cálculo de estruturas, foi consenso que o termo é utilizado **para designar uma distribuição contínua em unidades individuais: discretos.**

No Aurélio aparecem os seguintes significados para o termo discreto:

“Do lat. *discretu*, Adjetivo:

Relativo a, ou que envolve objetos, elementos, valores, etc. não contínuos: conjunto. Discreto. Que não está em continuidade com a vizinhança; separado, distinto: pontos discretos. V. conjunto”. Conclui-se que se trata, na verdade, de um neologismo, pois a palavra discretization, (conforme The American Heritage Dictionary of the English Language, Fourth Edition, Ed. Houghton Mifflin Company, New York, 2003) significa “The act of making mathematically discrete”. Por sua vez a palavra discrete remete, especificamente na matemática, “for a finite or countable set of values; not continuous”. Vale salientar que o método de Elementos Finitos foi proposto na década de 1960, na Inglaterra, portanto, aqui no Brasil, como é frequente nas ciências exatas, terminologias e especificidades metodológicas estrangeiras são linguisticamente adaptadas ao português.

9 O índice de esbelteza determina o comportamento mecânico das paredes: esse índice é a relação entre (h) altura e (e) espessura de paredes. Se compararmos os módulos de elasticidade, verificamos que blocos cerâmicos atingem, em média, 200.000 (kgf/m²) e a pedra (rocha) 400.000 (kgf/m²).

10 FILHO, J. A. G, Silva, J. M. J, JUCÁ, J. M. T. *The Movements in the Hills of Olinda, Brazil*, In: International Symposium of Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Site (Proceedings), Ed. IAEG - A. A. Balkema, Vol. 2, p. 191-199, Atenas, 1988.



11 FILHO, J. A. G. *Caracterização Geológico-Geotécnicas dos Morros de Olinda*, In: VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações, Recife, ABMS, Anais, Vol. 1, 1986.

12 FILHO, J. A. G. *A Cidade Histórica de Olinda – Problemas e Soluções de Engenharia*. Editora Universitária – UFPE, Recife, 2001, p. 171.

13 CORREA, M.R.S ; RAMALHO, M.A. *Procedure for the Analysis of Masonry Buildings Under Vertical Loads*, In: Australasian Masonry Conference, Gladstone, Austrália, 1998.

14 Parsons, Wiliam Barclay. *A Cúpula de Santa Maria del Fiori*, in: GAMA, Ruy. Antologia de Textos Históricos (org.). Ed. T. A. Queiroz, São Paulo, p. 129.

15 “Independent of the type of strategy adopted, accurate masonry models can only be used if a complete material description is available. This is not generally the case because experimental data suitable for numerical purpose are scarce, especially in the softening regime.” P. B. Lourenço. *Modelling of the mechanical behaviour of masonry*, In: Structural Analysis of Historical Constructions II, Ed. CMNE-International Center of Numerical Methods in engineering, Barcelona 1998, p. 57.

16 LOURENÇO, P. B. *Modelling of the mechanical behaviour of masonry*, In: Structural Analysis of Historical Constructions II, Ed. CMNE-International Center of Numerical Methods in Engineering, Barcelona 1998, p. 81.

17 Informação obtida através de entrevista com Sr. Francisco de Assis, membro da confraria de Nossa Sra. do Amparo.

18 THOMAZ, E. *Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica - USP, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1989.

19 *Estúdio Arqueológico de las Técnicas Constructivas*. Ed. Universidade do País Vasco-UPV, no. 3 e 4, 2007.

20 MATTOS, Manuela. *Análise Construtiva do Engenho Monjope, Igarassu-PE*. Dissertação de Mestrado, Programa da Pós-graduação em Arqueologia e Preservação Patrimonial, Departamento de Arqueologia, UFPE, 2009.

