

ESTRUTURAS HISTÓRICAS DE MADEIRA: EFEITOS DE INTERVENÇÕES SOBRE A RIGIDEZ NOS ELEMENTOS HORIZONTAIS

HISTORICAL TIMBER STRUCTURES: EFFECTS OF INTERVENTIONS ON THE STIFFNESS IN THE HORIZONTAL ELEMENTS

Alfredo Cali⁽¹⁾, Poliana Dias de Moraes⁽²⁾, Ângela do Valle⁽³⁾ (A)

(1) Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

(2) Profa. Dr., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,

(3) Profa. Dr., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,

Endereço de contato: alfredo.cali85@gmail.com; (P) Apresentador

Código de identificação: T9-05

Resumo

A modelagem de painéis horizontais como diafragmas é central na análise da estrutura de um edifício submetido a ações horizontais, como vento e terremoto, entre outras. No caso de edifícios históricos, a preservação da memória, o respeito aos princípios patrimoniais e o caráter interdisciplinar tornam a análise mais complexa. A rigidez dos diafragmas influencia o comportamento global do edifício, seja em madeira ou misto com alvenaria, por exemplo. O objetivo deste trabalho é apresentar alguns problemas relacionados às intervenções em elementos horizontais de madeira que modificam o desempenho estrutural do edifício. São expostas algumas simplificações geralmente adotadas na modelagem dos pisos, e apresentadas soluções tecnológicas disponíveis. Como referências normativas foram utilizados o Eurocódigo 8 (Parte 1 e 3), as normas italianas (NTC08, Circolare 617/09 e Circolare 26/10), e a norma brasileira NBR 15421 (2006). Essas normas são relativas a análises estruturais de edifícios, com enfoque particular no desempenho sísmico, e aqui podem ser encontradas as definições relativas ao conceito de elemento horizontal analisado como diafragma. Destaca-se que muitas normas, incluindo a norma brasileira, NBR 15421 (2006), não possuem formulação dedicada à verificação da segurança de estruturas existentes e históricas, sendo questionável se o critério de avaliação pode ser idêntico para edificações contemporâneas e antigas. Além desta lacuna normativa, seria preciso propor uma melhoria das normas de projeto ao sismo a fim de orientar os profissionais que atuam nessa área.

Palavras chave: estruturas históricas de madeira; rigidez de planos horizontais; ação de sismos

Abstract

The modeling of horizontal diaphragms plays a fundamental role in the analysis of a building subjected to horizontal actions, such as wind and earthquake. In the case of historical buildings, the preservation of memory, the principles of restoration and the interdisciplinarity of the problem make the analysis more complex. The in-plane stiffness of the diaphragms influences the global behavior of the building, especially in the wooden structures or in mixed masonry-wood structures. The aim of this paper is to present some problems related to interventions in timber flooring that modify the structural global behaviour of the buildings. Some simplifications, generally adopted in the modeling of the floors, are exposed with some technological solutions available. As normative references were used the following standards Eurocode 8 (Part 1 and 3), Italian standards (NTC08, Circolare 617/09 and Circolare 26/10), and the Brazilian standard NBR 15421 (2006). These norms are related to structural analysis of buildings, with particular focus on seismic performance, and here we can find the definitions regarding the concept of horizontal element analyzed as diaphragm. It is important to note that many standards, as well as the Brazilian standard NBR 15421 (2006), have not focused on existing and historical buildings, being questionable whether the safety verification can be the same for new and existing structures. Furthermore, it would be necessary to propose an improvement of design standards to create a helpful tool for professionals working in this area.

Keywords: historical timber structures; in-plane stiffness of the horizontal diaphragms; seismic action

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos e mais comuns na história do ser humano. Por esta razão, o ambiente construído apresenta vários exemplares de estruturas de madeira, antigas e modernas. No caso de construções históricas, é fundamental centrar a atenção nos temas de reabilitação e reforços estruturais adequados aos diferentes problemas que um edifício pode apresentar. Em especial, serão tratados os elementos horizontais em madeira, tais como coberturas e pavimentos de madeira, e as características de rigidez a ações atuantes no plano da estrutura. Para os diferentes tipos de problemas construtivos, existem muitas técnicas de intervenções já utilizadas. As técnicas de intervenções estruturais podem ser divididas em técnicas de reparação ou consolidação e técnicas de reforço (1).

A necessidade de reparação ou reforço estrutural e as técnicas e materiais a serem aplicados devem ser ponderadas considerando-se objetivos da intervenção, custo envolvido, grau de degradação existente, características dos edifícios e vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas (2).

Em pequenas intervenções, quando a estrutura apresenta um bom estado de conservação e não se prevê uma alteração de uso do edifício, é razoável repor as condições de segurança originais e reparar apenas os elementos deteriorados. Quando se prevê uma alteração de uso ou é necessária uma intervenção profunda, habitualmente, é exigido que o edifício recuperado obedeça aos regulamentos em vigor (2). Na implementação de soluções de reabilitação ou reforço é importante assegurar a manutenção da autenticidade original das estruturas de madeira (3).

Como referência normativa, foram avaliadas algumas normas que norteiam os elementos horizontais de madeira em relação ao comportamento que desempenham no caso de ações horizontais. Normalmente esse tipo de comportamento é tratado nas normas sísmicas, enquanto que a função dos elementos horizontais, definidos como diafragmas rígidos ou deformáveis em relação à própria rigidez no plano, resulta ser de relevante importância no desempenho global da estrutura resistente a sismos. Em particular foram analisadas a norma brasileira 15421(2006) (4), as normas europeias do Eurocódigo 8, Parte 1 (5) e Parte 3 (6), e as normas italianas NTC08 (7), Circolare 617/09 (8) e Circolare 26/10 (9).

No caso de edificações antigas e com valor patrimonial é imprescindível entender a evolução da estrutura e das diferentes fases pelas quais a construção histórica passou. Às vezes, o projetista responsável por uma análise desse tipo não encontra indicações e suporte nas normas, uma vez que frequentemente são elaboradas apenas para projeto de construções novas.

O estudo de caso deste artigo é o Quartel da Tropa, pertencente ao conjunto de construções das Fortalezas de Santa Cruz de Anhatomirim, localizado na Ilha de Anhatomirim, na barra norte do canal da ilha de Santa Catarina, atual município de Governador Celso Ramos, no litoral do estado de Santa Catarina, no Brasil. Trata-se de uma construção em alvenaria estrutural e madeira. Apesar da construção do conjunto das Fortalezas ter iniciado em 1739, a conclusão das obras do Quartel provavelmente ocorreu somente após 1748 (10). As diferentes obras de reforma realizadas nessa construção são relativas aos elementos estruturais horizontais de madeira, como pisos e cobertura. Provavelmente essas intervenções foram devidas às elevadas cargas horizontais na estrutura. No trabalho são analisadas as ações horizontais que podem agir sobre esse tipo de construção histórica e as normas aplicáveis para análise da segurança estrutural.

2. COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS HORIZONTAIS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS E RIGIDEZ NO PLANO

As estruturas estão sujeitas a ações verticais e horizontais decorrentes do seu uso e dos fenômenos naturais. Em edificações históricas é comum que as ações horizontais que representam o efeito de vento, de sismos, e, no caso de construções enterradas ou semienterradas, o efeito do solo,

não tenham sido consideradas no projeto da estrutura original. Como consequência, pode ocorrer que, caso as ações venham a atuar na edificação, a estrutura não apresente uma resposta adequada (11). Outro problema que pode acontecer é decorrente da deterioração do edifício devida à ação do tempo e ao uso, o que pode levar à redução das propriedades mecânicas dos materiais e, conseqüentemente, da capacidade portante dos elementos estruturais.

2.1 Ação das forças horizontais em edifícios com sistema piso-parede

Em um sistema piso-parede ligado às fundações da edificação, as forças laterais que incidam diretamente sobre as paredes transversais, situadas em planos perpendiculares em relação à direção das forças, são transferidas para a fundação e para a estrutura de piso (12).

O elemento estrutural piso é solicitado no seu próprio plano e recebe reações das paredes estruturais (laterais), que por sua vez transferem os esforços para as fundações. Nesse sistema, a força horizontal pode representar diferentes ações, como ações de vento, sismo ou outras cargas horizontais. Essas forças horizontais são distribuídas pelos diafragmas nas paredes laterais através de ações de cisalhamento. Nos sistemas piso-parede, geralmente os elementos horizontais são modelados como diafragmas. Estes últimos podem ser classificados em relação à rigidez no próprio plano como sendo rígido ou deformável (Figura 1). Os pavimentos e coberturas de madeira ou as abóbadas finas de alvenaria, que são comuns em edifícios existentes, tipicamente possuem comportamento de diafragmas deformáveis.

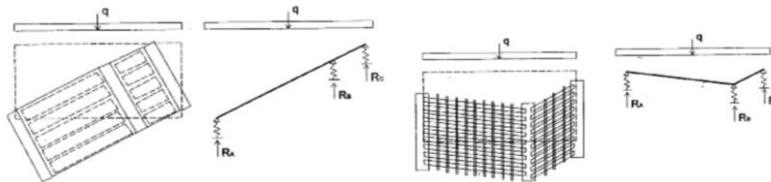


Figura 1: Esquema estático do comportamento idealizado de um pavimento como diafragma rígido (esquerda) e deformável (direita) (13)

Em relação à rigidez no próprio plano, um diafragma pode ser considerado rígido quando permitir uma redistribuição hiperestática de forças entre paredes submetidas ao cisalhamento, enquanto que, no caso de diafragmas deformáveis, ocorre uma redistribuição isostática das forças horizontais nos painéis verticais (14). A existência de conexões apropriadas entre paredes e pavimentos permite evitar a formação de mecanismos locais de primeiro modo (tombamento) (15).

Uma função chave desempenhada pelo diafragma horizontal é a transmissão das ações horizontais, incluindo, entre outras, as ações sísmicas. Quando o piso não é satisfatoriamente ligado às paredes adjacentes ou a rigidez no plano é inadequada, podem ser observados a formação de mecanismos locais de primeiro modo com formas de colapso que envolvem tombamento das paredes. Paredes de alvenaria demonstram, em geral, uma resistência insuficiente para cargas laterais que atuam fora de seu plano. Quando o diafragma horizontal pode ser considerado perfeitamente rígido, e as conexões entre as paredes e o diafragma estão corretamente asseguradas, a carga sísmica lateral pode ser totalmente transmitida às paredes paralelas à direção da ação horizontal, permitindo à estrutura ter uma rigidez muito maior (16).

2.2 Edifícios históricos em alvenaria e *box-behaviour* das estruturas

No comportamento sísmico e na resistência em relação às ações monotônicas horizontais, o comportamento geral do edifício depende da qualidade das conexões entre paredes e estruturas horizontais. Um pavimento, ou uma cobertura, que seja muito deformável, pode causar danos estruturais nos elementos verticais, porque cada elemento resiste ao sismo segundo a própria rigidez

(Figura 2). A existência de um comportamento de diafragma rígido junto com boas conexões parede-parede e parede-diafragma pode melhorar muito a capacidade geral da estrutura na resistência a ações horizontais. Isso é devido ao fato que todos os elementos resistem em conjunto e a estrutura global apresenta uma rigidez muito maior. Este comportamento é conhecido como *box-behaviour* (comportamento de caixa).

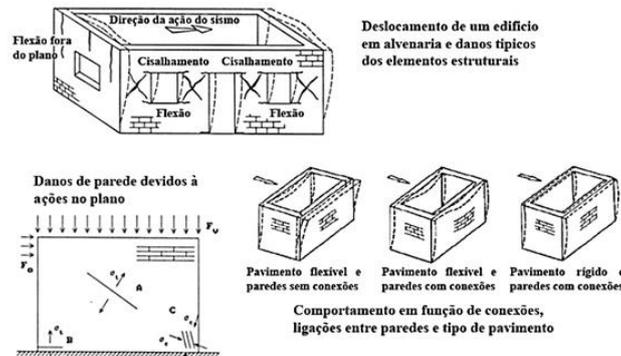


Figura 2: Comportamento de box behaviour de um edifício em alvenaria com diafragma horizontal deformável ou rígido sob efeito sísmico (17)

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE DIAFRAGMAS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS EM DIFERENTES NORMAS DE PROJETOS ESTRUTURAIS

Na análise normativa foram incluídas aquelas normas nas quais há alguma referência sobre os temas relativos a diafragmas rígidos ou deformáveis e, em alguns casos, em relação a edifícios existentes. Normalmente essas definições estão incluídas nas normas que tratam de sismos, uma vez que na análise sísmica dos edifícios, e muito mais na dos edifícios existentes, o comportamento dos diafragmas horizontais é fundamental no desempenho global das estruturas.

3.1 Normas europeias

Uma norma europeia de referência para definição de diafragmas horizontais é o código para estruturas resistentes a sismos, EN 1998- Eurocódigo 8 (2004): Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Ela está dividida em seis partes, mas nesse artigo serão tratadas exclusivamente as partes relativas aos tópicos de interesse, sendo a parte 1 - Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios, e a parte 3 - Avaliação e reabilitação de edifícios.

3.1.1 Eurocódigo 8 – Parte 1

A parte 1 da norma EN 1998-1 (5) considera que o diafragma é rígido se, na situação de projeto sísmico, quando modelado com a sua flexibilidade real no plano os valores de seus deslocamentos horizontais não excederem em mais de 10%, em nenhum ponto, os relativos à hipótese de diafragma rígido.

Ainda na parte 1, a referência a edifícios históricos está presente só na seleção da tipologia de análise na avaliação sísmica. O tipo de análise proposta é não-linear estática, denominada “*pushover analysis*”, e segundo a norma poderá ser aplicada para verificação do desempenho estrutural de edifícios novos e existentes nas seguintes situações:

- verificar ou rever os valores do coeficiente de sobrerresistência α_u / α_1 ;
- avaliar os mecanismos plásticos previstos e a distribuição de danos;
- avaliar o desempenho estrutural de edifícios existentes ou reabilitados, para efeitos da EN 1998-3;

d) como alternativa ao cálculo baseado numa análise elástica linear.

3.1.2 Eurocódigo 8 – Parte 3

Refere-se à avaliação e reforço sísmico de edifícios existentes, com o objetivo de garantir uma capacidade resistente suficiente para suportar as exigências sísmicas a que poderão estar sujeitos.

O âmbito da norma EN 1998- Parte 3 é:

- a) fornecer critérios para a avaliação do desempenho sísmico das estruturas existentes;
- b) descrever a abordagem na seleção de medidas corretivas necessárias;
- c) estabelecer critérios para a concepção de medidas de retrofitting (ou seja, a concepção, a análise estrutural, incluindo medidas de intervenção, o dimensionamento final das peças estruturais e de suas conexões com elementos estruturais existentes).

Desde os primeiros parágrafos, a norma enfatiza a importância dos valores históricos de um edifício. Embora as disposições sejam aplicáveis para todas as categorias de edifícios, a norma afirma que a avaliação sísmica e a restauração de monumentos e edifícios históricos requerem diferentes tipos de disposições e abordagens, dependendo da natureza dos monumentos.

As estruturas existentes refletem o estado dos conhecimentos no momento da sua construção, eventualmente contendo erros de execução grosseiros ocultos, além de, por vezes, terem sido submetidas a terremotos anteriores ou outras ações acidentais, com efeitos desconhecidos. Nestas condições, a avaliação estrutural e uma possível intervenção estrutural normalmente estarão submetidas a um grau diferente de incerteza (nível de conhecimento), ao contrário de um projeto de novas estruturas (6).

Portanto, são necessárias diferentes caracterizações de materiais e fatores de segurança estrutural, bem como diferentes procedimentos de análise, dependendo da integralidade e confiabilidade da informação disponível (6).

No anexo C da EN 1998-3 (parágrafo ou item C.5.1.3), há indicações sobre como proceder ao reforço e aumento de rigidez de diafragmas horizontais. Os pisos de madeira podem ser reforçados nas seguintes três formas:

- a) inserindo uma camada adicional (ortogonal ou oblíqua) de tábuas de madeira sobre as camadas existentes;
- b) aplicando lajes de concreto reforçado com armadura soldada. A camada de concreto deve ter conexão ao cisalhamento com o piso de madeira e deve ser fixada às paredes;
- c) colocação de uma malha duplamente diagonal de vigas planas de aço ancoradas às vigas e às paredes do perímetro.

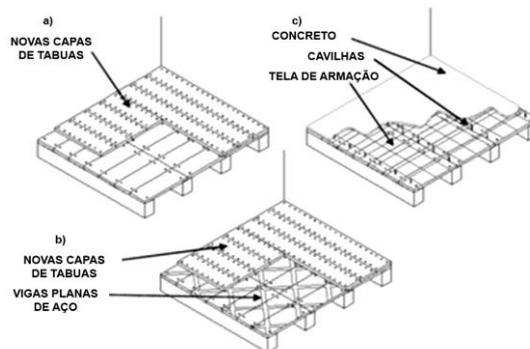


Figura 3: Métodos de reforço de pavimentos de madeira antigos sugeridos pelo Eurocódigo 8 (18)

A elevada rigidez dos diafragmas é uma hipótese muito frequente nas análises sugeridas por essa norma. A análise linear estática e multi-modal pressupõe, por exemplo, entre outras hipóteses (Parágrafo C.3.1), que os pisos possuam suficiente rigidez no plano e sejam eficientemente ligados

às paredes do perímetro para supor que distribuam as forças de inércia entre os elementos verticais, como ocorre em um diafragma rígido (14).

3.2 Normas Italianas

3.2.1 Normas técnicas de construção NTC08, D.M. 14-01-08

A norma italiana sobre as construções D.M. 14-01-08 (7) tem um capítulo (Capítulo 8) dedicado às construções existentes. Nessa parte, a norma sugere as etapas para avaliação de segurança e de preparação dos projetos: análise histórico-crítica; levantamento; caracterização mecânica dos materiais; nível de conhecimento e fatores de confiança; ações.

Destaca-se que a primeira etapa é uma das mais importantes. Geralmente, quando se trata de edifícios existentes, pode ser difícil encontrar desenhos e documentos originais para reconstruir a história do projeto e da construção. Para os edifícios, em particular para edifícios de valor cultural, histórico e arquitetônico, às vezes é possível, por meio de pesquisa de arquivo, reunir uma documentação suficientemente completa para reconstruir e interpretar as diferentes fases de construção. Com base em dados levantados ou obtidos na fase de pesquisa histórica, é possível obter conclusões operacionais para a modelagem mecânica do edifício geral.

3.2.2 Circolare 617/09 - Instruções para a aplicação das Normas Técnicas NTC08

Na norma explicativa (8) do código italiano das construções (7), são explicados os critérios dos fatores de confiança que têm referência no Eurocódigo 8, Parte 3 (6). A diferença entre ele é que em todos os níveis deve ser feita uma análise completa do edifício, enquanto o Eurocódigo 8 permite, para o nível mais baixo de conhecimento KL1, uma análise estática linear ou dinâmica linear.

Nos requisitos de segurança, a norma explicativa (8) prevê que, para a avaliação sísmica dos edifícios existentes simultaneamente à análise sísmica global, deve ser considerada também a análise dos mecanismos locais. Na análise sísmica global, deve ser considerado, na medida do possível, o sistema estrutural real do edifício, com particular atenção para a rigidez e resistência dos diafragmas e a eficácia das ligações dos elementos estruturais.

Quando a construção não apresenta um comportamento de conjunto, conhecido como *box behaviour* (Figura 2), mas tende a reagir ao terremoto como um conjunto de subsistemas (mecanismos locais), a verificação de um modelo global não está em conformidade ao seu comportamento sísmico real. Nesse caso, em que os diafragmas são flexíveis, uma abordagem aceitável na prática poderia ser analisar esses elementos individualmente (19).

3.2.3 Circolare 26/10: "Diretrizes para a avaliação e mitigação do risco sísmico do patrimônio cultural - alinhamento com as normas técnicas para construção, NTC08 "

Essas diretrizes (9) contêm a adaptação da diretiva do Presidente do Conselho de Ministros para a avaliação e redução do risco sísmico do patrimônio cultural, de 12 de outubro de 2007, às novas normas técnicas para a construção de 2008 (7).

Uma das primeiras inovações da presente diretiva é a introdução de alguns elementos relevantes para o conhecimento dos edifícios históricos. Seus principais aspectos são a análise dos contextos territoriais do entorno da construção, a sua localização em relação a determinadas áreas de risco e um levantamento inicial do edifício, com a identificação de elementos que podem afetar o nível de risco. Outro aspecto relevante é a etapa de investigação do tipo de solo e de fundação que é usado, principalmente, para análise do comportamento sísmico do sistema de fundação no solo.

Este documento também recomenda outro procedimento, que é considerado altamente útil e desejável: o monitoramento (*monitoring*) por meio de inspeções periódicas do edifício, que representa uma medida sábia para a boa conservação. O monitoramento auxilia na programação de

ações de manutenção e na ação pontual com uso de procedimentos de intervenção, em caso de constatação de danos estruturais.

Em relação ao fator de confiança, as diretrizes (9) explicam que, depois que o levantamento da construção é feito, após o aprofundamento do levantamento geométrico, a investigação dos materiais de construção e de suas características mecânicas, abrangendo tipo de solo e fundações, o projetista deve escolher um fator de confiança F_c , entre 1 e 1,35, o que permite aumentar a confiabilidade do modelo de análise estrutural e a avaliação do fator de segurança sísmica.

O fator de confiança F_c é aplicado de forma diferente (5), dependendo dos modelos para a avaliação da segurança sísmica, que podem ser classificados em: modelos que consideram a deformabilidade e resistência dos materiais e dos elementos estruturais (caso a); modelos que consideram o equilíbrio limite dos diferentes elementos do edifício, considerando a alvenaria como rígida e não resistente à tração (caso b).

No primeiro caso (a), o fator F_c é aplicado para as propriedades do material, reduzindo tanto o módulo elástico quanto as resistências mecânicas. No segundo caso (b), o fator é aplicado diretamente à capacidade portante da estrutura, ou na redução da aceleração que corresponde aos diferentes estados limite.

3.3 Norma Brasileira: NBR15421-Projeto de estruturas resistentes a sismos

A norma brasileira NBR15421 (2006) apresenta a seguinte definição de diafragma (parágrafo da norma 3.10): é a parte horizontal de um sistema estrutural sismo-resistente, usualmente composto pelas lajes de um piso, que será projetado de forma a assegurar a transferência das forças sísmicas horizontais atuantes neste piso para os elementos verticais do sistema sismo-resistente.

Nos critérios básicos dessa norma, estão definidas algumas condições gerais que o edifício deve ter (Parágrafo 8.1), tais como a que afirma que os sistemas estruturais devem apresentar redundância por meio de várias linhas de elementos sismo-resistentes verticais, conectados entre si por diafragmas horizontais de elevada ductilidade (4).

A deformabilidade dos diafragmas também tem uma definição, mesmo geral, no parágrafo 8.3.1 da referida norma. Os diafragmas são classificados como flexíveis em função da máxima deflexão horizontal para a seguinte condição: a máxima deflexão horizontal transversal a um eixo da estrutura paralelo ao eixo do diafragma, medida com relação à média dos deslocamentos relativos de pavimento dos pontos extremos deste eixo, é mais do que o dobro desta média dos deslocamentos relativos dos pontos extremos. Diafragmas de concreto que tenham uma relação entre vão e profundidade menor do que 3,0 e não apresentem as irregularidades estruturais no plano (definidas na Tabela 8.2 da mesma norma), podem ser classificados como rígidos.

As outras tipologias de diafragmas, como de madeira ou com abóbadas, como é típico nas edificações históricas, não são contempladas nessa norma, sendo sugerido que, quando os diafragmas não puderem ser classificados como rígidos ou flexíveis, o modelo deve incluir elementos que representem a rigidez destes diafragmas. Essa norma não prevê abordagem específica para edifícios existentes de relevância histórica, não proporcionando aos projetistas as orientações para este caso de intervenção.

Em conclusão, como analisado nos parágrafos anteriores, algumas normas de avaliação estrutural apresentadas, inclusive a norma brasileira de segurança sísmica de estruturas, ABNT NBR 15421/06, mostram-se carentes no aspecto de análise de riscos no caso de edifícios históricos, além de não fornecerem uma ferramenta útil na avaliação do conhecimento no caso de patrimônio histórico edificado. Estas normas não apresentam uma parte dedicada a estruturas existentes e históricas, dificultando aos profissionais a verificação da segurança de tais edifícios.

4. QUARTEL DA TROPA DAS FORTALEZAS DE ANHATOMIRIM

O Quartel da Tropa é um dos principais edifícios no conjunto da Fortaleza de Santa Cruz, situada na Ilha de Anhatomirim no município de Governador Celso Ramos, estado de Santa Catarina, Brasil. Essa construção foi projetada pelo engenheiro militar português Brigadeiro José da Silva Paes. A fortaleza formava, no século XVIII, um dos vértices do sistema triangular de defesa, formado ainda pelas Fortalezas de São José da Ponta Grossa e Santo Antônio de Ratoles. Este sistema deveria proteger a Barra Norte da Ilha de Santa Catarina das investidas estrangeiras – principalmente da Espanha – e consolidar a ocupação portuguesa do Sul do Brasil setecentista.

O estilo dessa construção é clássico e o projeto original demonstra a influência da arquitetura renascentista (10). Apesar da construção da Fortaleza ter sido iniciada em 1739, a conclusão das obras do Quartel provavelmente ocorreu somente após 1748, visto que nesta data Silva Paes enviou correspondência ao Rei de Portugal, remetendo também a planta e a fachada do Quartel da Tropa para aprovação real (Figura 4). É o maior quartel existente entre as fortificações brasileiras (10).

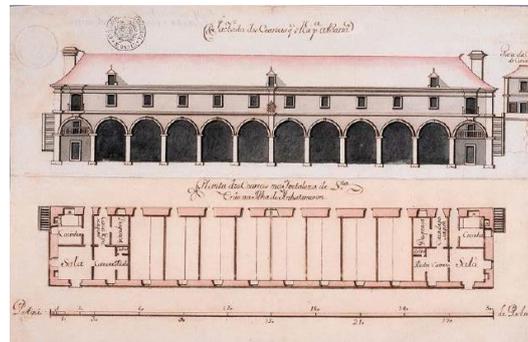


Figura 4: Iconografia de 1747 com planta e fachada principal, lado nordeste da construção (20).

Essa construção funcionou como alojamento militar por quase toda a sua existência. Segundo relatos de funcionários militares da Fortaleza, o Quartel teria sido utilizado no início do século XX também como depósito de sal da Marinha. Em meados da década de 1950, juntamente com o restante da Fortaleza, foi abandonado e depredado. A restauração parcial do Quartel aconteceu em várias etapas ao longo da primeira metade da década de 1970 e início dos anos 80 (10). O Projeto Fortalezas da Ilha de Santa Catarina, realizado entre 1988 e 1992 sob a coordenação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com financiamento da Fundação Banco do Brasil, previa a restauração da Fortaleza de Santa Cruz de Anhatomirim, que desde 1979 é gerenciada pela UFSC. Atualmente o edifício tem uma nova fase de estudos para uma ulterior restauração sob a gestão de empresas privadas escolhidas pela Universidade Federal de Santa Catarina, gerente do projeto Fortalezas.

4.1 Obras de Conservação

A última restauração do Quartel da Tropa foi desenvolvida em várias etapas ao longo da primeira metade da década de 1970. Foi recuperada a cobertura do Quartel, com estrutura de caibro armado com linhas altas e tirantes de madeira fixados aos frechais, assentados de forma espaçada (Figura 5 centro). Ressalta-se que numa foto da década de 1960, época anterior às intervenções de 1970, a tipologia estrutural era de tesouras de madeira (Figura 5 esquerda) e que posteriormente foi alterada para a estrutura atual. Ainda na intervenção da primeira metade da década de 1970, foram refeitos os pisos de madeira e as esquadrias. Na mesma intervenção, as peças de madeira de grandes dimensões utilizadas no barroteamento do piso e na estrutura de cobertura, assim como ocorre com os originais, são de madeira obtida nas matas próximas à Ilha de Anhatomirim. Na intervenção

citada, também foi parcialmente refeito o reboco das paredes internas no segundo piso, bem como alguns trechos do revestimento externo das fachadas (10).



Figura 5: Evolução da estrutura após a restauração do 1970. Estrutura anterior com piso superior do Quartel com cobertura com tesouras tradicionais e piso intermediário com barrotes engastados na alvenaria (esquerda) e posterior com cobertura em caibro armado (centro) e barrotes apoiados sobre as vigas de concreto (direita) (10)

Talvez a primeira intervenção no Quartel, imediatamente após a construção inicial, tenha sido a inclusão do corpo central de alvenaria em forma de talude, bem como os contrafortes da fachada nordeste (Figura 6). O referido talude não aparece no projeto original do Quartel, embora já esteja presente nos levantamentos do Brigadeiro Sá e Faria, em 1760, e do Alferes Corrêa Rangel, em 1786. Na realidade, nesses dois levantamentos, o talude de alvenaria no corpo central do edifício é representado somente nas plantas baixas, não sendo mostrado, no entanto, nas fachadas (10).



Figura 6: Fachada Nordeste atual, talude no corpo central avançado (esquerda) e contrafortes (direita) (10)

Outra intervenção realizada no restauro do 1970 foi a introdução de vigas de concreto sobre os arcos, para suportar os barrotes do assoalho do piso superior.

Essa intervenção modificou a função estrutural dos arcos em tijolos e dos barrotes do piso, sendo que anteriormente os segundos estavam engastados na alvenaria de pedra que repousava sobre os primeiros. Após a modificação, os barrotes passaram a estar simplesmente apoiados no novo elemento estrutural em concreto modificando o tipo de ligação para rótula.

O Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional de Santa Catarina (IPHAN-SC) elaborou diferentes documentos nos quais são descritos os reparos feitos pela empresa Aresta, de Curitiba, sobre esse edifício, desde 1970 até 1987.

5. ANÁLISE QUALITATIVA PRELIMINAR DAS EVOLUÇÕES DAS FASES CONSTRUTIVAS DO EDIFÍCIO EM RELAÇÃO À RIGIDEZ DOS ELEMENTOS HORIZONTAIS

Num percurso de conhecimento de um edifício histórico, uma das problemáticas maiores, sobretudo no caso de uma edificação que sofreu muitas intervenções ao longo do tempo, é identificar que elementos são da construção original e quais são acréscimos ou substituições.

Alguns exemplos na história da construção podem demonstrar que nem sempre um projeto original é completamente adequado. Às vezes, com o transcorrer do tempo e do uso de um edifício, surgem sugestões de melhorias que podem ser introduzidas na construção. Isso é particularmente verdadeiro no caso de construções históricas, nas quais os projetistas de diferentes épocas não dominavam os conhecimentos de engenharia que estão disponíveis no mundo atual.

A inclusão da estrutura central de alvenaria em forma de talude, tal como aquela dos contrafortes da fachada nordeste do Quartel, pode ter ocorrido em virtude de razões estruturais, ou seja, pela necessidade de equilibrar forças horizontais. O térreo tem dois lados enterrados (10), recebendo dessa forma a carga horizontal devida ao empuxo do solo. Essas forças provocam um aumento de carga horizontal, que se adiciona às eventuais ações horizontais, como sismos e vento, que normalmente solicitam as estruturas.

As intervenções feitas em 1970 mudaram radicalmente a configuração da estrutura. Na estrutura da cobertura, as tesouras tradicionais foram substituídas por uma configuração de caibro armado com linha alta e tirante de madeira, como exemplificados no seguinte esquema estrutural (Figura 7).



Figura 7: Desenho ilustrativo de um sistema estrutural com tesouras (esquerda) e cobertura em caibro armado (centro) com esquema de carga no apoio de um caibro armado (direita) (21)

O esquema estrutural do caibro armado difere do das tesouras uma vez que introduz o inconveniente de transmitir empuxos oblíquos sobre as paredes laterais de apoio (Figura 7 direita) (21). Como consequência deste tipo de modificação, surgem efeitos de flexão sobre os elementos verticais da estrutura de apoio.

Na mesma ocasião, foi trocado o sistema de barrotes de madeira, que eram engastados na alvenaria acima dos arcos, introduzindo uma viga de concreto, material que nem sempre é indicado para intervenções em estruturas de alvenaria. Esta modificação na forma de apoio dos barrotes, transforma a estrutura hiperestática em isostática. Além disso, a introdução de vigas de concreto parece não respeitar os princípios de intervenção estabelecidos pelo ICOMOS (22). Uma intervenção desse tipo não respeita os princípios de autenticidade, de preferência ao emprego de técnicas tradicionais, de compatibilização e de reversibilidade. Do ponto de vista estrutural, a alteração das técnicas construtivas reduziu a rigidez dos diafragmas horizontais, tanto de cobertura quanto de pavimentos intermediários. Como explicado nos parágrafos anteriores (parágrafo 2.3), uma alteração de rigidez nos edifícios provoca uma diminuição de firmeza da estrutura, enquanto que num sistema piso-parede é preferível que a construção responda às solicitações de maneira global (*box-behaviour*). Uma possível consequência da rigidez dos diafragmas pode ser o dano observado nas conexões entre os muros longitudinais e os arcos transversais. A redução da rigidez dos diafragmas horizontais provoca danos nas interligações entre os arcos transversais e as paredes ortogonais. O mesmo problema aparece nos contrafortes, pela falta de conexões estruturais com os muros do edifício. Este tipo de vinculação com reduzida rigidez não permite que ocorra uma redistribuição homogênea das cargas entre os diferentes elementos estruturais, com a consequência de criar zonas de tensões excessivas ou descarregadas.

No levantamento das fontes documentais sobre o Quartel, que foram consultadas, não foi possível encontrar as justificativas para realização dessas profundas modificações. Uma análise estrutural comparativa entre as tipologias construtivas, nas diferentes fases do edifício, seria necessária para entender a evolução e as alterações feitas no mesmo.

CONCLUSÕES

Algumas normas de avaliação estrutural, inclusive a norma brasileira de segurança sísmica de estruturas (4) mostram-se carentes no aspecto de análise de riscos no caso de edifícios históricos, além de não fornecerem uma ferramenta útil na avaliação do conhecimento no caso de patrimônio histórico edificado. Estas normas não apresentam uma parte dedicada a estruturas existentes e históricas, dificultando aos profissionais a verificação da segurança de tais edifícios. Este fato justifica a necessidade da realização de mais pesquisas sobre os temas de análise e projeto ao sismo de edifícios existentes, que tenham como objetivo a avaliação e redução de riscos estruturais. Um dos desafios para a comunidade científica moderna é compartilhar e adaptar os critérios das normativas mais completas em âmbito mundial, com uma perspectiva de internacionalização da construção. Cada região possui sua própria história e prática no uso de diferentes materiais e sistemas construtivos. É particularmente importante o estudo sísmico das edificações históricas, sendo que a ocorrência de eventos sísmicos não é desprezável, mesmo nos países nos quais os sismos não são considerados na prática de projeto das estruturas. As ações sísmicas têm intensidade e frequência variáveis em relação ao lugar aonde acontecem, não sendo sempre possível aplicarem-se os mesmos critérios de forma padronizada internacionalmente. Em relação às diferentes técnicas de intervenções apresentadas, tanto na revisão de literatura quanto no estudo de caso, é importante observar que em cada projeto devem ser escolhidas as intervenções adequadas ao edifício existente, a fim de manter seus valores culturais e arquitetônicos. Da mesma forma, é preferível não modificar o esquema de carga e estrutural do edifício originário. As soluções ilustradas nesse artigo, e propostas pelo Eurocódigo (Parte 3), têm como objetivo a criação de diafragmas e conexões rígidas, já que, no estudo de caso, as intervenções feitas mudaram o comportamento estrutural do edifício. Para um efetivo projeto de reforço e de restauro será preciso um ulterior estudo estrutural da construção e das suas diferentes fases, com o objetivo de entender as razões das intervenções que foram feitas nos restauros passados e propor adequações estruturais mais apropriadas ao projeto original.

AGRADECIMENTOS

"Este projeto foi financiado com o apoio da Comissão Europeia. Esta publicação/comunicação reflete apenas a opinião dos autores e a Comissão não pode ser responsabilizada por qualquer utilização que possa ser feita das informações aqui contidas - Programa ELARCH (Referência do projeto: 552129-EM-1-2014-1-IT -ERA MUNDUS-EMA21) ".

REFERÊNCIAS

- [1] Costa, L.F.S. Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. Relatório de projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos.
- [2] Cruz, H.M. Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira. 2011.
- [3] Dias, T.I.M.P. Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. ese de Mestrado.
- [4] ABNT NBR 15421, Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento. 2006.
- [5] EN:1998-1. Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.
- [6] EN:1998-3. Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Bruxelas: CEN, 2005.
- [7] NTC. Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. 2008.
- [8] Circolare_617. Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. 2009.

- [9] 26/10, Circolare. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale – allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni. 2010.
- [10] Toner, R. Tombamento dos Próprios Nacionais pertencentes ao Ministério da Guerra e situados no Estado de Santa Catarina, 1901. Florianópolis : s.n., 2001.
- [11] A. Cali, P. D. Moraes, Â. Do Valle. Rigidez no plano dos elementos estruturais horizontais em estruturas historicas em madeira. Porto : CINPAR 2016, 2016.
- [12] Ambrose, J. Simplified design of wood structures. John Wiley & Sons, 1994.
- [13] Ceravolo, R. e Demarie, G. V. Analisi sismica er livelli di conoscenza del patrimonio architettonico. Torino: Clut, 2009.
- [14] Elnashai, A.S. e Di Sarno, L. Fundamentals of Earthquake Engineering. Chichester : s.n., 2008.
- [15] Piazza, M., Baldessari, C. e Tomasi, R. The role of in-plane floor stiffness in the seismic behaviour of traditional buildings. Pequim : s.n., 2008. 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- [16] Piazza, M., Baldessari, C. e Tomasi, R. The role of in-plane floor stiffness in the seismic behaviour of traditional buildings. Pequim : s.n., 2008. 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- [17] Tomazevic. Earthquake design of Masonry Buildings. Londres : Imperial College Press, 1999.
- [18] Brignola, A., Pampanin, S. e Podestà, S. Evaluation and control of the in-plane stiffness of timber floors for the performance-based retrofit of URM buildings. 2009.
- [19] Magenes, G. e Penna, A. Existing masonry buildings: general code iusses and methos of analysis and assessment. Napoli, Italia : Doppiavoce, 2009. Vol. Eurocode 8: Perspectives from the Italian Standpoint Workshop.
- [20] Nestor Goulart, Reis Filho. Imagens de Vilas e Cidades do Brasil Colonial. 2000.
- [21] Pereira, R. Lopes. Estruturas de cobertura da Arquitetura religiosa em pernambuco tipologia, patologia e intervenções. s.l. : AERPA Editora, 2007. Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação. Vol.1, No.6, pp. 332 - 337 .
- [22] ICOMOS. Princípios para a preservação das estruturas históricas em madeira. Mexico : s.n., 1999.
- [23] Diekmann. Diaphragms and Shearwall. New York : K. F. Faherty and T. G. Williamson (Eds.), 1995. Vol. Wood Engineering and Construction Handbook.
- [24] Breyer, D.E., et al. Design of Wood Structures. s.l. : Springer, 2007. Structural Rehabilitation of Old Buildings.
- [25] Giuriani, E. e Marini, A. Experiences from the Northern Italy 2004 earthquake: vulnerability assessment and strengthening of historic churches. Londres : Taylor & Francis, 2008. International Journal of Architectural Heritage.
- [26] Gattesco, N. e Mascorini, L. In-plane stiffening techniques with nail plates or CFRP strips for timber floors in historical masonry buildings. Trieste, 2004. Construction and Buildings Materials.
- [27] Doglioni, F. Seismic strengthening and renewal of architectural treasure damaged during the Umbria-Marche earthquake in 1997. 2000. Handbook (guidelines) for the design of adjustment interventions.
- [28] Mariani, M. Consolidamento delle strutture lignee con l'acciaio. 2004. DEI Genio Civile, 2004.
- [29] Branco, J.M. Reforço de elementos existentes de madeira. Guimarães : P.B. Lourenço, J.M. Branco e H.S. Sousa (eds.), 2014. ISISE.