

Estudo de caso de edifício de alvenaria estrutural em situação de incêndio por meio de simulação numérica

Danilo de F. Barbosa¹, Vladimir G. Haach¹

¹Depto. de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos/SP, Brasil
danilobarbosa@usp.br, vghaach@sc.usp.br

Resumo. Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas buscando melhor entender o comportamento da alvenaria estrutural submetida a temperaturas elevadas. Devido às diversas limitações para esse tipo de ensaio, os elementos submetidos a esses experimentos geralmente são prismas e pequenas paredes, nos quais a análise geralmente abrange seu comportamento térmico ou termomecânico. No entanto, pensando na análise estrutural de um edifício de alvenaria submetido a condição de incêndio, deve-se considerar não apenas a perda de rigidez das paredes individualmente, mas incluir a capacidade de redistribuição de esforços entre os demais elementos estruturais. Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo realizar uma análise mecânica de um edifício usual de alvenaria para um cenário de incêndio adotado. Dessa forma, com o auxílio do software DIANA®, foram simulados alguns modelos para considerar a perda de rigidez gradual dos elementos do cômodo onde ocorre o sinistro. Com os resultados obtidos, foi possível observar a grande reserva de capacidade resistente dessa tipologia de edificação, além da grande capacidade de redistribuição de esforços nas paredes estruturais conforme a ocorrência do incêndio, o que permitiu contemplar a importância da compartimentação como medida protetiva de combate ao incêndio.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural, Incêndio, Análise estrutural, Perda de rigidez, Compartimentação.

1 Introdução

A alvenaria estrutural hoje é largamente utilizada no Brasil para construção de edificações residenciais e comerciais não só de pequeno, mas também de grande porte. Nesse contexto, o estudo da alvenaria estrutural em situação de incêndio se faz necessário, uma vez que ainda não há um código normativo para essa temática em nosso país.

O Brasil teve ausência de relatos de incêndios de grandes proporções até início dos anos 70. Até então, a segurança contra incêndio era relegada à segundo plano. Silva [1] comenta que grandes tragédias após essa década foram decorrentes do negligenciamento ao real perigo de ocorrência do incêndio, podendo-se citar como exemplos os edifícios Andraus e Joelma na cidade de São Paulo e o Edifício Wilton Paes de Almeida em 2018.

Há dois tipos de proteção de combate ao incêndio: proteção ativa e passiva. As medidas protetivas ativas são compostas basicamente das instalações prediais de proteção e combate ao incêndio, podendo-se citar como exemplos os chuveiros automáticos (sprinklers), iluminação de emergência e detecção do incêndio. Já a proteção passiva, é definida como o conjunto de ações inerentes ao sistema construtivo que contribuem passivamente na resistência ao fogo promovendo a fuga dos usuários e propiciando condições de trabalho para a equipe de combate. São exemplos de medidas passivas a compartimentação vertical e horizontal, rotas de fuga e resistência ao fogo dos elementos estruturais.

Do ponto de vista estrutural, deve-se garantir que a estrutura do edifício mantenha a função corta-fogo e a função de suporte por um determinado tempo denominado tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Este tempo pode representar a ação correspondente ao incêndio. Araujo [2] comenta que, com relação a função corta-fogo, a estrutura não deve permitir que o fogo a ultrapasse ou que o calor a atravesse em suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial. Já a função de suporte, consiste em a estrutura manter sua capacidade de suporte da construção como um todo ou de cada uma de suas partes, evitando o colapso global ou o colapso

local progressivo.

Pelo método tabular constante na ABNT NBR 15200:2012 [3], as lajes de concreto, de acordo com o TRRF da edificação, devem possuir uma espessura mínima para garantir a função corta-fogo, além de um valor mínimo da distância do centroide da armadura longitudinal à face exposta para garantir a função de suporte frente às ações de cálculo na situação de incêndio, considerando a redução das resistências em função da temperatura. É importante salientar que elementos de concreto em situação de incêndio geralmente rompem por flexão ou flexo-compressão e não por cisalhamento. Por isso, considera-se apenas a verificação das dimensões referentes à armadura longitudinal.

As pesquisas do comportamento da alvenaria em situação de incêndio vêm crescendo nos últimos anos. No geral, elas mostram que a alvenaria estrutural perde bastante suas propriedades mecânicas a altas temperaturas. Rigão [4], avaliando a resistência residual de prismas e pequenas paredes de blocos cerâmicos submetidos a temperatura de 400°C e 900°C, chegou a valores de 73% e 48,7% de resistência residual respectivamente. Ao ensaiar argamassas sujeitas a 900°C, percebeu-se a completa deterioração dos corpos de prova mostrando a baixa resistência ao fogo desse tipo de material.

Bailey [5] comenta que o colapso de uma parede de alvenaria em situação de incêndio se dá devido à amplificação do carregamento na parede em função do grande deslocamento na região central resultante do gradiente térmico (curvatura térmica). Neste artigo, essa situação de ruína é considerada ao desprezar, em última instância, os elementos em situação de incêndio da análise.

Nadjai et al. [6] comentam que a normatização de projeto para alvenaria estrutural, em âmbito internacional, tem adotado requisitos de proteção contra incêndio e alguns métodos de cálculo foram adicionados para estimar a resistência ao fogo. No entanto, os autores chamam atenção que essas prescrições e métodos de cálculo são baseados consideravelmente em ensaios experimentais de elementos estruturais isolados, uma vez que raramente são ensaiadas estruturas reais devido ao custo e limitações físicas dos fornos. Estes experimentos são importantes para entender o comportamento do material sujeito a altas temperaturas. Todavia, é necessária também a observação desse fenômeno em modelos que contemplem a capacidade de redistribuição de esforços de toda a estrutura, principalmente com relação a alvenaria estrutural, que é um sistema estrutural de elevado grau de hiperasticidade, o que contribui para a capacidade resistente do Edifício como um todo.

Nesse sentido, as lajes apresentam uma função importante que é a de possibilitar essa redistribuição de esforços entre as demais paredes que não atingiram seu estado limite último. Para isso, esses elementos estruturais precisam ser projetados para suportar os esforços gerados pela perda completa de paredes estruturais do edifício.

Nesse contexto, este artigo objetiva, através de um estudo de caso, lançar luz sobre como um edifício de alvenaria estrutural se comporta frente as consequências de um cenário de incêndio num compartimento. Este cenário de incêndio apenas num cômodo foi considerado para avaliar a importância da compartimentação como medida de proteção passiva imprescindível contra o sinistro.

2 Apresentação do estudo de caso

Nadjai et al. [6] comentam que, na prática, os incêndios ocorrem de forma geral em locais compartimentados dos edifícios. Dessa forma, o estudo de caso trata-se de um cenário de incêndio contido apenas num cômodo no pavimento térreo de um Edifício residencial de quatro pavimentos em alvenaria estrutural de blocos de concreto, com quatro apartamentos por pavimento, estudado também no trabalho de Kleingesinds [7].

O cenário de incêndio adotado neste estudo de caso foi um dos dormitórios do pavimento térreo por entender que esse seria o pavimento mais crítico em relação à segurança estrutural do edifício, uma vez que os elementos estruturais estão mais solicitados.

As lajes apresentam espessura de 10 cm e as paredes de 14 cm. A Figura 1 apresenta a planta arquitetônica do pavimento tipo e as paredes estruturais da edificação que possui pé-direito de 2,80 m.

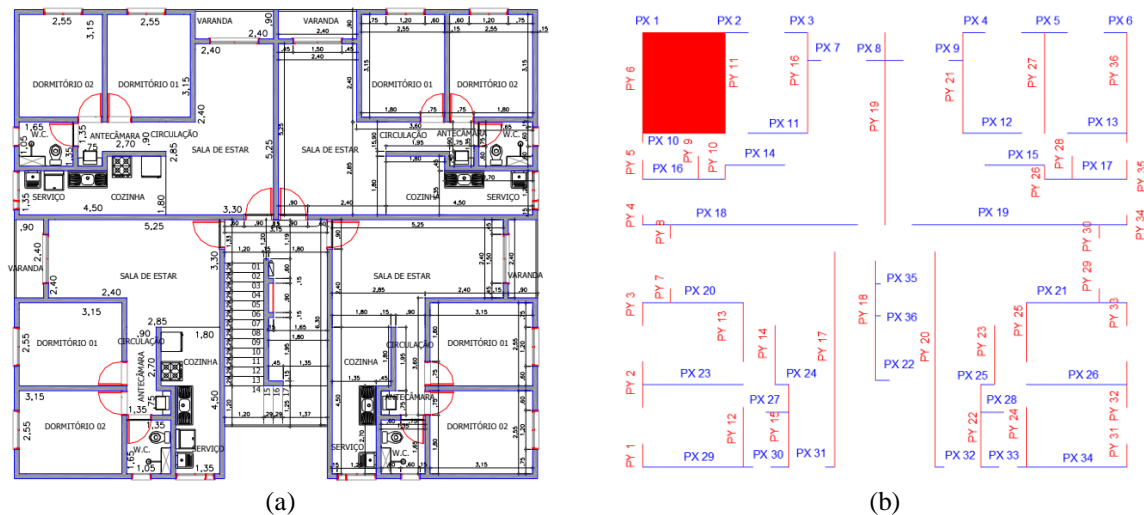


Figura 1. Pavimento tipo do edifício: a) Planta arquitetônica; b) paredes estruturais; (Adaptado de Kleingesinds [7]).

3 Metodologia empregada

A metodologia aplicada nesse trabalho consiste na análise mecânica do edifício de alvenaria estrutural, incorporando a perda de rigidez dos elementos estruturais, supondo que tal redução se dá por conta do incêndio. Dessa forma, é necessário apresentar como será considerada a modelagem numérica do edifício, o carregamento e as condições de contorno considerados, as propriedades dos materiais adotadas e a forma de aplicação da perda de rigidez dos elementos submetidos ao cenário de incêndio.

A modelagem numérica foi realizada com o software comercial DIANA®. O modelo numérico das paredes e lajes foi representado pelos seus planos médios. As paredes foram discretizadas por elementos finitos de membrana tridimensional isoparamétrico quadrilateral de quatro nós denominado Q12GME, em que os deslocamentos são aproximados por função linear. Já as lajes foram discretizadas por elementos finitos do tipo casca plana isoparamétrica quadrilateral de quatro nós denominado Q20SF em que os deslocamentos são aproximados por funções bi-lineares e a teoria de flexão de placas adotada é a de Reissner-Mindlin.

A modelagem dos elementos estruturais baseou-se na planta de modulação das paredes (modulação M15). Alguns trabalhos, como o de Medeiros [8] utilizam elementos finitos de casca com malhas de 15cm x 20cm para as paredes e 15cm x 15cm para as lajes. Esse tipo de discretização é tido como o modelo de referência por ser mais refinado. Como condição de contorno em deslocamento, foram restringidas as translações da base das paredes do primeiro pavimento (térreo), simulando uma fundação rígida.

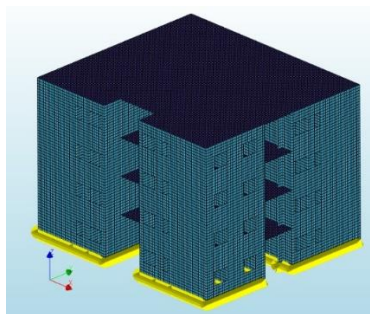


Figura 2. Malha de elementos finitos do edifício (Elaborada pelo autor).

Considerou-se comportamento elástico linear tanto para a alvenaria estrutural quanto para o concreto em todas as análises. As propriedades dos materiais foram resumidas na Tabela 1. Esses valores foram os mesmos utilizados em projeto e apresentados por Kleingesinds [7].

Tabela 1. Propriedades dos materiais do Edifício (Kleingesinds [7]).

Dados da Estrutura de Alvenaria: Paredes	Valor	Dados da Estrutura de Concreto: Lajes	Valor
fbk (MPa)	4,0	fck (MPa)	25
Eficiência prisma/bloco	0,8	-	-
Coeficiente de Poisson	0,2	Coeficiente de Poisson	0,2
Peso Específico (kN/m ³)	14	Peso Específico (kN/m ³)	25
Módulo de deformação (MPa)	2.560	Módulo de deformação (MPa)	23.800

Em termos de carregamento, com base na ABNT NBR 6120:2019 [9], foram aplicados no topo das paredes carregamento permanente distribuído de maneira uniforme ao longo do comprimento com base em seu peso específico (*Load Case 1 – LC1*), carga permanente de peso próprio nas lajes (*LC2*), além de cargas de utilização nas lajes (*LC3*). A ação do vento não foi considerada por se tratar de um edifício de quatro pavimentos e esta ação ser desprezível neste caso, mas, principalmente, por estar sendo analisado em combinação excepcional, sendo baixíssima a probabilidade de ocorrência simultânea do vento de norma e a ação excepcional correspondente (incêndio). Trata-se de duas combinações de ações distintas: uma para a temperatura ambiente e outra considerando o cenário de incêndio. Para a simulação em temperatura ambiente e em situação de incêndio, foram utilizadas, respectivamente, as combinações últimas normal (*CUN*) e excepcional (*CUE*) conforme a ABNT NBR 8681:2004 [10]. Resultando, portanto, em:

Tabela 2. Combinações (Elaborada pelo autor).

Combinação	Equação
CUN	1,4 (<i>LC1 + LC2</i>) + 1,4 <i>LC3</i>
CUE	1,2 (<i>LC1 + LC2</i>) + 0,21 <i>LC3</i>

Para análise da estrutura em situação de incêndio, além do carregamento aplicado ser resultado da combinação última excepcional, foi atribuída uma minoração gradual da rigidez aos elementos que constituem o cenário de incêndio até a consideração da total retirada dos elementos estruturais. Essa minoração da rigidez ou diminuição das propriedades mecânicas do concreto com a temperatura foi aplicada com a adoção de um fator de redução para as paredes conforme a Figura 3. Esses valores são encontrados na ABNT NBR 15200:2012 [3].

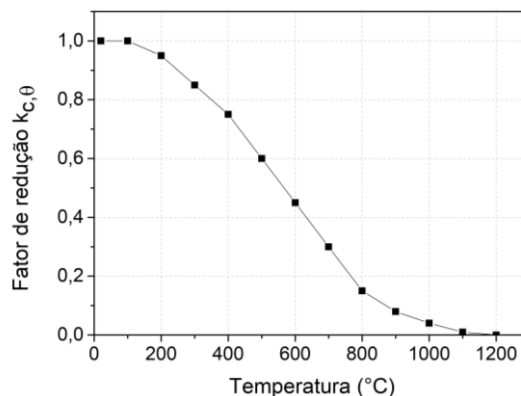


Figura 3. Fator de redução da resistência à compressão do concreto com a temperatura (Adaptado de ABNT NBR 15200:2012 [3]).

Ao reduzir a rigidez das paredes de um compartimento em decorrência do incêndio, foram analisados os seus comportamentos e como ocorre a redistribuição dos esforços nas demais paredes do edifício. Obtendo assim, um indicativo de redução ou aumento de tensão nos elementos estruturais. Para isso, adotou-se um índice que relaciona a tensão média atuante na base das paredes pela capacidade resistente do elemento para as duas combinações últimas de ação e a cada acréscimo de redução do módulo de deformação dos elementos.

A edificação em análise, segundo a ABNT NBR 14432:2001 [11], é classificada no grupo A-2 (Edificação residencial de habitações multifamiliares) e, conforme a altura da edificação, na classe P2. Dessa forma, o TRRF é de 30 minutos. Assim, a Edificação deve resistir a ação do fogo mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento por, no mínimo, 30 minutos de ação de uma elevação gradual padronizada de temperatura.

Com a curva de incêndio padrão e o TRRF, é possível obter o fator de redução da resistência à compressão do concreto a cada aumento de temperatura. Como o módulo de elasticidade longitudinal da alvenaria é tomado de forma simplificada diretamente da resistência à compressão do prisma, foi adotado esse fator de redução do concreto diretamente naquela propriedade. Para considerar a perda de rigidez dos elementos sujeitos ao incêndio, foi aplicado este fator para 5 min, 10 min, 20 min, 30 min até consideração da retirada completa dessas paredes conforme a tabela a seguir.

Tabela 3. Perda de rigidez dos elementos afetados pelo incêndio (Elaborada pelo autor).

Situação	T min	θ °C	$k_c \theta$	$k_c \theta$ adotado	E_{alt} (MPa)
CUN	0	20,00	100,00%	100,00%	2.560
CUE – 50%	5	576,41	48,54%	50,00%	1.280
CUE – 35%	10	678,43	33,24%	35,00%	896
CUE – 20%	20	781,35	17,80%	20,00%	512
CUE – 10%	30	841,80	12,07%	10,00%	256
CUE – 0%	Retirada dos elementos			0%	~0

4 Resultados e discussão

Na Figura 4 são apresentados, para todas as paredes estruturais do pavimento térreo na CUN e CUE, os valores da relação entre a tensão de cálculo média na base da parede pela sua respectiva resistência de cálculo. Para a CUE, nessa figura, foi considerada a totalidade da rigidez e capacidade resistente dos elementos do cenário de incêndio (CUE-100%).

Percebe-se uma uniformidade dessa relação nas paredes estruturais do pavimento. Como era de se esperar, os elementos mais solicitados pertencem a região da escada, são eles: PX35, PX36, PX22 e PY18. O valor máximo do índice é o da parede PX35 com 82,97% da sua capacidade resistente utilizada em CUN e 37,96% em CUE. A parede menos solicitada é PX30 (parede de fachada) com 36,96% (CUN) e 20,60% (CUE). Avaliando a média dessa relação para todas as paredes do referido pavimento, chega-se ao valor de 50,47% e 27,03% na CUN e CUE, respectivamente. Pelas linhas horizontais que representam a média para cada combinação, pode-se visualizar que a maior parte das paredes estruturais estão sendo solicitadas abaixo dela. Esses resultados mostram como o edifício apresenta uma grande reserva de capacidade resistente.

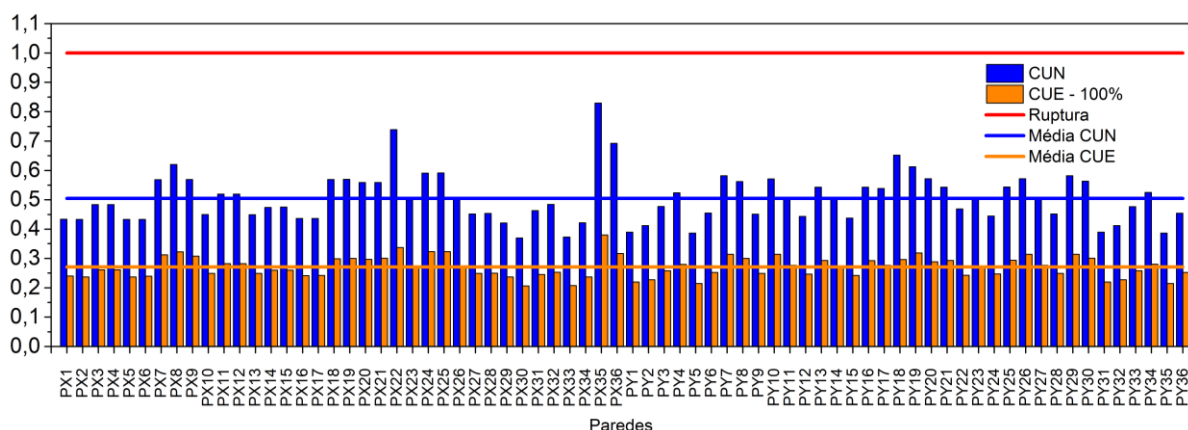


Figura 4. Relação para as paredes do pavimento térreo da tensão média de cálculo pela resistência de cálculo (Elaborada pelo autor).

Aplicando todas as reduções de rigidez nas paredes do cenário em estudo, para o nível de solicitação em CUE (Fig. 5), observa-se que apenas estas atingem sua capacidade resistente enquanto que algumas aumentam, outras diminuem e até mantêm seus níveis de tensão inicial sem chegar à situação de ruptura.

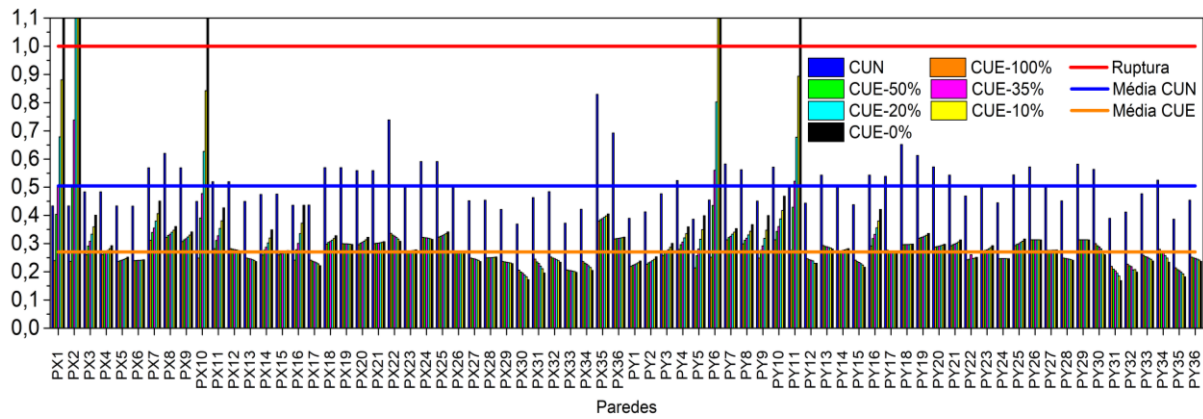


Figura 5. Relação da tensão média de cálculo pela resistência de cálculo das paredes do pavimento térreo (Elaborada pelo autor).

Esse mecanismo de redistribuição pode ser melhor observado na Figura 6 em que se apresenta a tensão média na base de cada parede à medida que se reduz a rigidez dos elementos em situação de incêndio.

As paredes estruturais onde ocorre o sinistro (PX1, PX2, PX10, PY6 e PY11), em geral, apresentam uma diminuição da compressão à medida que cresce a consideração da perda de rigidez, produzindo uma redistribuição dos esforços para as paredes próximas ao cenário de incêndio (PX16, PX11, PY16, PX7, PY9, PY5 entre outras). Nas demais paredes estruturais, houve uma manutenção do nível da tensão média de compressão à medida que se reduz a rigidez dos elementos do cenário de incêndio.

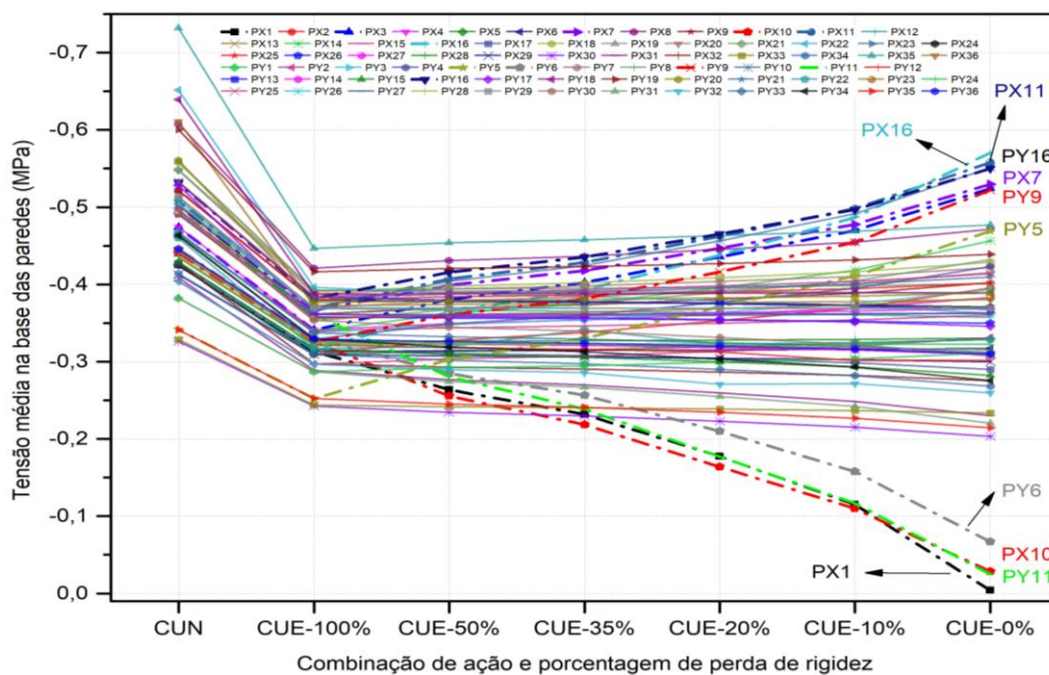


Figura 6. Tensão média na base de cada parede (Elaborada pelo autor).

Esse mesmo comportamento de redistribuição de esforços de regiões de menor rigidez (cenário de incêndio) para regiões próximas, de maior rigidez relativa, é apresentado também nos pavimentos superiores.

A Figura 7 apresenta a deformada e os níveis de deslocamento vertical da laje do primeiro pavimento. Como esperado, a região do cenário apresenta maior deslocamento vertical devido a perda de rigidez das paredes. Analisando os deslocamentos máximos no painel de laje onde foi considerado o sinistro, os deslocamentos verticais aumentaram consideravelmente passando de -0,69 mm para -2,18 mm. No entanto, os deslocamentos nos demais painéis do pavimento praticamente se mantiveram no mesmo nível de deslocamento.

Considerando também a redução da rigidez no painel de laje do cenário de incêndio, há aumento considerável na flecha nesse painel. No entanto, praticamente não há alteração na redistribuição dos esforços. Isto pode ser

explicado pelo mecanismo de caminhamento das cargas em edifícios de alvenaria. As cargas das paredes de um pavimento descarregam quase que diretamente na parede estrutural do pavimento inferior e as cargas de utilização e peso próprio das lajes são distribuídas para as paredes estruturais.

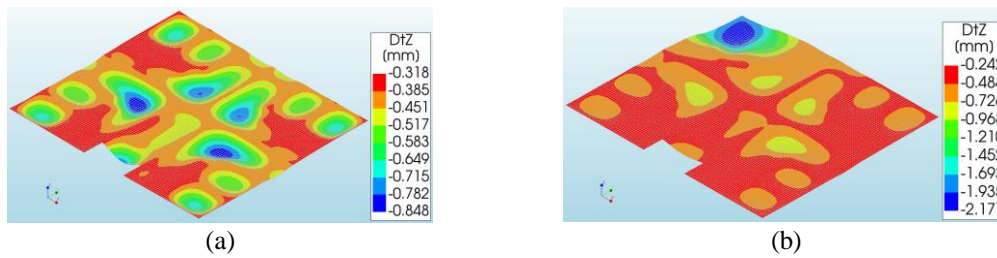


Figura 7. Deslocamento vertical da laje do primeiro pavimento: a) CUE-100% (elementos do cenário de incêndio íntegros); b) CUE-0% (elementos do cenário de incêndio com perda total de rigidez) (Elaborada pelo autor).

5 Conclusões

Após avaliar o pavimento térreo, o mais solicitado do edifício, é possível concluir que a estrutura apresenta uma grande reserva de capacidade resistente, mesmo adotando blocos de concreto com a menor resistência à compressão admitida pela ABNT NBR 6136:2016 [12] para esse tipo de edificação: 4,0 MPa.

Além disso, mesmo desprezando a contribuição de todas as paredes do cenário de incêndio (CUE-0%), nenhuma das outras paredes estruturais apresentaram ruptura. Isso pode ser explicado devido à redistribuição de esforços das paredes do cenário de incêndio para as paredes próximas a essa região. Esse cenário de incêndio, restrito a um cômodo, mostra, para este estudo de caso, como a compartimentação é uma medida protetiva eficiente no combate ao incêndio, diminuindo bastante as chances de colapso global da estrutura.

É importante observar que a região do cenário de incêndio adotada neste artigo não se configura como a mais preocupante, por se encontrar na extremidade do pavimento em planta. Para maiores conclusões, é necessário avaliar muitos outros cenários de incêndio, inclusive não compartimentados, além de outras tipologias de edifício com menor reserva de resistência como edifícios de maior número de pavimentos.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo material incluído no mesmo é de propriedade (e autoria) dos autores ou possui a permissão dos respectivos donos/autores para ser incluído aqui.

Referências

- [1] V. P. Silva, Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. São Paulo, Blucher, 2012. 237p.
- [2] J. M. de Araujo. Curso de concreto armado/José Milton de Araujo - Rio Grande: Dunas, 2010. V.4, 3.ed.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro. 2012. 48 p.
- [4] A. O. Rigão. Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas. 142 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.
- [5] C. Bailey. Structural Fire Design: core or specialist subject? *The Structural Engineer*, v. 82, n. 9, p. 32–38, 2004.
- [6] A. Nadjai; M. O'Garra; F. Ali; and R. Jurgen. Compartment masonry walls in fire situations. *Fire Technology*, v. 42, 211-231, 2006.
- [7] S. E. Kleingesinds. Influência do efeito arco sobre o custo de estruturas de suporte em concreto armado para edifícios de alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014. 186 p.
- [8] K. A. S. Modelagem computacional para avaliação da interação entre painéis de alvenaria e estrutura de suporte em concreto armado. Dissertação (Mestrado). Natal :Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015. 134 p.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro. 2019. 61 p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro. 2004. 18 p.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro. 2000. 14 p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro. 2016. 10 p.