

Confiabilidade de lajes de edifício em alvenaria estrutural **na ocorrência de remoção de uma parede**

TÚLIO RAUNYR CÂNDIDO FELIPE - Ph.D - <https://orcid.org/0000-0002-3958-4643> (tulio.raunyr@gmail.com) ; **LAÍS MORAES TEIXEIRA** - M.Sc ;
ÍTALO GUSMÃO SILVA - BACH. ; **HUGO LEONARDO RIBEIRO BAPTISTA DE SOUZA** - BACH. ;
WILLIAM MACEDO KOELLER - M.Sc ; **RAFAEL NUNES DO NASCIMENTO** - M.Sc ;
JOSÉ COSTA DOS SANTOS - BACH. | DIRETORIA DE OBRAS CÍVIS DA MARINHA
ANDRÉ TEÓFILO BECK - PROF. | EESC/USP

RESUMO

EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA, A REMOÇÃO DE UMA PAREDE ESTRUTURAL PARA AUMENTAR AMBIENTES SEM A AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO PELO PROJETO, OU DE UM ENGENHEIRO CIVIL COM A DEVIDA ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA, AUMENTA A PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DANOS ACIDENTAIS COM GRAVES CONSEQUÊNCIAS PARA A ESTRUTURA DO EDIFÍCIO. PORTANTO, SURGE UMA GRANDE PREOCUPAÇÃO À RESPEITO DA OCORRÊNCIA DESTA PROBLEMA, O QUAL ENVOLVE RISCOS À VIDA HUMANA, ASSIM COMO PREJUÍZOS FINANCEIROS À SOCIEDADE. NESTE SENTIDO, O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR UMA METODOLOGIA PARA MENSURAR A PROBABILIDADE DE FALHA DE LAJES NA OCORRÊNCIA DE REMOÇÃO DE UMA PAREDE. PARA TAL, EMPREGA-SE A TEORIA DE CHARNEIRAS PLÁSTICAS PARA DETERMINAR OS MOMENTOS DE PLASTIFICAÇÃO PARA AS CONFIGURAÇÕES DE RUÍNA DE LAJE SIMPLEMENTE APOIADA E LAJE APOIADA COM UMA BORDA LIVRE. A EQUAÇÃO DE ESTADO LIMITE É ESCRITA EM FUNÇÃO DO MOMENTO DE PLASTIFICAÇÃO E DO MOMENTO RESISTENTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL. AS ANÁLISES PROBABILÍSTICAS SÃO REALIZADAS POR MEIO DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO, COM NÚMERO DE SIMULAÇÃO IGUAL A 10^7 . VERIFICOU-SE QUE NO ESTÁGIO ÍNTEGRO (SEM REMOÇÃO DE PAREDE), TODAS AS LAJES DO PAVIMENTO TIPO EM ESTUDO ESTÃO COM PROBABILIDADE DE FALHA ACEITÁVEL (MENORES QUE 10^{-4}). POR OUTRO LADO, NA OCORRÊNCIA DE REMOÇÃO DE PAREDE, O VALOR DA PROBABILIDADE DE FALHA CONDICIONAL RESULTA NA UNIDADE, OU SEJA, CONFIABILIDADE NULA.

PALAVRAS-CHAVE: ALVENARIA ESTRUTURAL, ANÁLISE PROBABILÍSTICA, CONFIABILIDADE ESTRUTURAL, DANOS ACIDENTAIS.

1. INTRODUÇÃO

O uso de edificações em alvenaria estrutural tem experimentado um aumento nos últimos anos no Brasil. Essa tendência visa otimizar o canteiro de obra e reduzir os custos finais, uma vez que as características de modulação e racionalização desse sistema construtivo reduz os desperdícios de materiais (1-3).

As construtoras brasileiras adotaram este método construtivo como o “carro-chefe” para projetar seus novos edifícios residenciais (4). Todavia, uma considerável parcela desses novos empreendimentos é adquirida por um cliente final que não possui o conhecimento sobre o processo construtivo da alvenaria. Isso resulta, em alguns casos, na remoção de paredes pelos usuários dos imóveis, buscando a expansão dos espaços, o que pode acarretar sérios problemas, como, por exemplo, a ruptura de uma laje. Isso porque a retirada de um elemento de apoio da laje modifica as suas condições de contorno conduzindo um aumento brusco nos esforços internos, em especial, no momento de plastificação.

Neste contexto, a remoção de uma parede exigiria a autorização do responsável técnico pela obra, ou de um engenheiro civil com a devida Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), conforme a Lei nº 5.194 e suas alterações. Isso se deve ao fato de que a remoção de uma parede estrutural pode aumentar a probabilidade de ocorrerem danos acidentais ou até mesmo o colapso, acarretando consequências graves para a estrutura do edifício. Assim, surge uma preocupação significativa quan-

to à possibilidade desse problema ocorrer, resultando em riscos para a vida humana, bem como prejuízos financeiros para a sociedade. Sendo assim, o objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia para mensurar a probabilidade de falha de lajes de edifícios de alvenaria estrutural na ocorrência de remoção de uma parede.

2. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, são apresentadas as equações de estado limite das lajes. São adotadas as seguintes premissas: (i) as lajes são consideradas retangulares; (ii) é utilizado o processo das forças nodais; (iii) o carregamento adotado é o uniformemente distribuído; (iv) os cálculos são implementados em Linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA); (v) o equacionamento é baseado na Teoria das Charneiras Plásticas (TCP); (vi) não é considerado efeito de membrana e arqueamento da laje; (vii) as lajes são avaliadas isoladamente; e (viii) as paredes estruturais e as fundações não serão analisadas.

No estudo de caso apresentado na seção 4 deste artigo, é considerado o pavimento do edifício formado por lajes simplesmente apoiadas nas quatro bordas. Este procedimento é usual no pré-dimensionamentos das edificações em alvenaria estrutural (4-5). Isso porque os vãos das lajes são pequenos, o que implica baixos momentos fletores nas suas bordas. Ademais, as fissuras que surgem nas suas bordas ficam sob as paredes.

Contudo, ressalta-se que a falha ou a remoção de um elemento de apoio modifica as condições de contorno da laje,

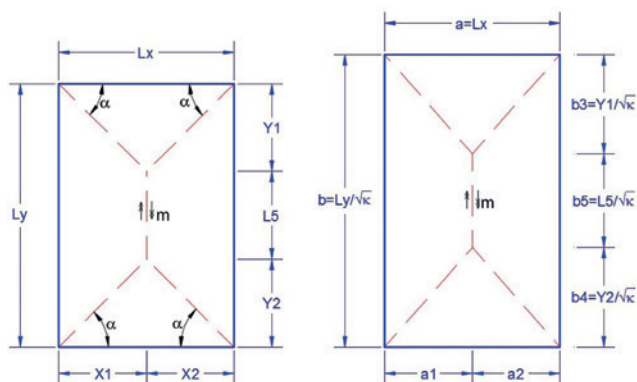


FIGURA 1

NOTAÇÃO PARA CONFIGURAÇÃO COMUM

FONTE: (5)

já que a laje ficará com uma das bordas livre. Além disso, haverá uma alteração nos esforços dos demais elementos estruturais da edificação. Esta alteração não será abordada neste artigo. Sendo assim, nas análises que seguem, faz-se necessário a determinação da equação de estado limite para duas condições de contorno: (a) laje simplesmente apoiada; e (b) laje com três bordas apoiadas e uma borda livre.

A seguir, são apresentadas as equações da TCP para essas condições de contorno. A TCP consiste de uma aplicação às placas, do Teorema do Limite Superior da Teoria da Plasticidade. Maiores detalhes sobre a TCP podem ser encontrados nos trabalhos de (6-8).

2.1. Laje simplesmente apoiada

A configuração de ruína de uma laje,

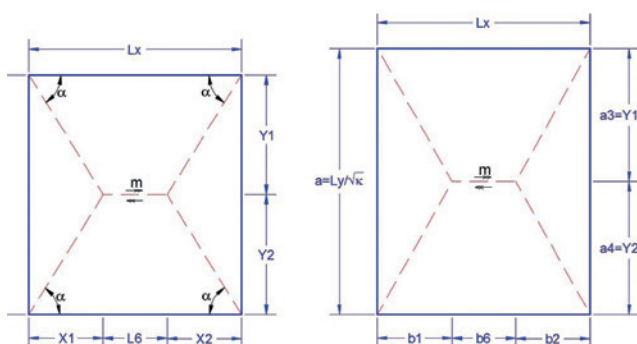


FIGURA 2

NOTAÇÃO PARA CONFIGURAÇÃO EVENTUAL

FONTE: (5)

por meio da TCP, é aquela associada ao maior valor de momento de plastificação (6-8). Nas lajes retangulares, a configuração de ruína mais frequente apresenta-se com a charneira central paralela ao maior vão (L_y), conforme ilustrado na Figura 1. Esta é denominada de configuração comum.

Em contrapartida, quando a razão ($\lambda = \frac{L_y}{L_x}$) entre o maior e menor vão (L_x) da laje é pequena e a charneira central é paralela ao L_x , tem-se a configuração eventual, em conformidade com a Figura 2.

Para lajes com bordas simplesmente apoiadas, o grau de engastamento (ϕ) e o índice de ortotropia (κ) são definidos por:

$$[1] \quad \phi = \frac{\tilde{m}}{m} = 0$$

$$[2] \quad \kappa = \frac{m_y}{m_x}$$

Onde m e $\tilde{m}$ são, respectivamente, os momentos de plastificação positivo e negativo, enquanto que m_x e m_y são os momentos de plastificação positivo nas direções x e y , respectivamente. Os valores de m_x e m_y são mensurados a

partir das funções de aproximação descritas no trabalho de (7).

Para obter a direção da charneira central inicialmente supõe-se que esta é paralela à L_y , por consequência, obtém-se $a = L_x$ e $b = \frac{L_y}{\sqrt{\kappa}}$. Se $a \leq b$, a hipótese inicial é correta e, de fato, ocorre a configuração comum. Caso contrário, $a > b$, tem-se a configuração eventual, consequentemente, $a = \frac{L_y}{\sqrt{\kappa}}$ e $b = L_x$.

Determinados os valores de a e b , calcula-se m_x e m_y por:

$$[3a] \quad m = m_x = \frac{(g + q) \cdot c^2}{6}$$

$$[3b] \quad m_y = \kappa \cdot m_x$$

Sendo, g a carga permanente, q a carga variável, e o valor de c obtido pela Equação 4.

$$[4] \quad c = \frac{a}{2} \left\{ \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + 3 \right]^{1/2} - \frac{a}{b} \right\}$$

2.2 Lajes com três bordas apoiadas e uma borda livre

A Figura 3 apresenta a notação utilizada nesta seção. Inicialmente, supõe-se que a configuração de ruína é a ilustrada na Figura 3(a). Logo, fazendo-se o equilíbrio de momentos fletores, obtém-se:

$$[5] \quad m = \frac{b^2}{24 \cdot a \cdot \kappa} \left[\frac{(g + q) \cdot (3 \cdot a - 2 \cdot a_1) + 3 \cdot (P_g + P_q)}{3 \cdot (P_g + P_q)} \right]$$

Sendo, P_g e P_q , respectivamente, a carga linear permanente e variável ao longo

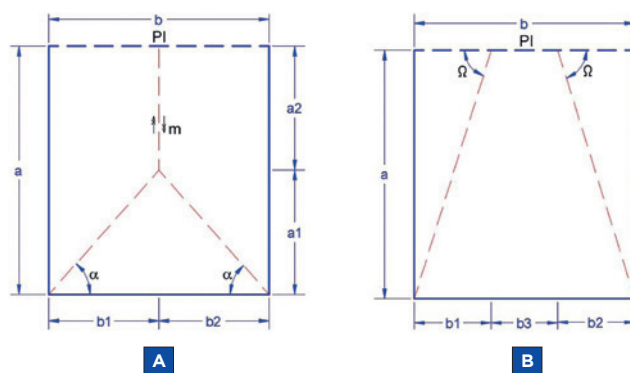


FIGURA 3

LAJE COM UMA BORDA LIVRE: (A) CONFIGURAÇÃO COMUM E (B) CONFIGURAÇÃO EVENTUAL

FONTE: (5)

TABELA 1

PROBABILIDADE DE FALHA ALVO ($p_{f,target}$)

Medida relativa do custo de segurança	Consequência de falha leve	Consequência de falha moderada	Consequência de falha grave
Grande	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Normal	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Pequeno	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$

NOTA: A CONSEQUÊNCIA LEVE CONSIDERA QUE O RISCO DE VIDA E PREJUÍZOS ECONÔMICOS SÃO PEQUENOS OU NEGLIGENCIÁVEIS. JÁ A CONSEQUÊNCIA MODERADA CONSIDERA QUE O RISCO DE VIDA E PREJUÍZOS ECONÔMICOS SÃO CONSIDERÁVEIS. ENQUANTO QUE A CONSEQUÊNCIA GRAVE CONSIDERA QUE O RISCO DE VIDA E OS PREJUÍZOS ECONÔMICOS SÃO ALTOS.

FONTE: (10)

da borda livre e o valor de a_1 calculado pela Equação 6.

$$[6] \quad a_1 = \frac{b^2}{4 \cdot a \cdot \kappa} \left[\sqrt{1 + \frac{12 \cdot a \cdot \kappa \cdot \left[\frac{a(g+q)}{(p_g + p_q)} \right]}{(g+q) \cdot b^2}} - 1 \right]$$

Para verificar a hipótese inicial, é indispensável que $a_1 \leq a$. Caso contrário, a configuração de ruína é aquela mostrada na Figura 3(b). Logo, fazendo o equilíbrio de momentos fletores, obtém-se:

$$[7] \quad m = \frac{b^2}{6 \cdot a \left[\kappa - \left(\frac{b^2}{a} \right)^2 \right]} \left[\frac{(g+q) \cdot (p_g + p_q)}{a + 3 \cdot (p_g + p_q)} \right]$$

Em que,

$$[8a] \quad b_2 = \frac{\kappa \cdot a^2}{b} \left(\frac{\sqrt{c_3} - 2 \cdot c_1}{3 \cdot c_2} \right)$$

$$[8b] \quad c_1 = (g+q) \cdot a + 3 \cdot (p_g + p_q)$$

$$[8c] \quad c_2 = (g+q) \cdot a + 2 \cdot (p_g + p_q)$$

$$[8d] \quad c_3 = 4 \cdot c_1^2 + \frac{9 \cdot b^2 \cdot c_2^2}{\kappa \cdot a^2}$$

2.2 Momento resistente da seção transversal

A solução do problema pode ser realizada fazendo-se o equilíbrio dos esforços na seção transversal, o que resulta (5):

$$[9] \quad M_R = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{170 \cdot f_c} \right) \quad [kN \cdot cm/m]$$

Sendo M_R o momento resistente da seção transversal, A_s a armadura longitudinal, f_y a tensão de escoamento do aço, d a altura útil da seção transversal e f_c a resistência à compressão do concreto. Ressalta-se que, para a formulação da equação de estado limite, os valores das propriedades dos materiais que compõem o valor do M_R devem ser avaliados com seus valores nominais.

2.3 Equação de estado limite

Na avaliação da confiabilidade de uma estrutura, é fundamental a determinação das equações de estado limite para cada modo de falha. No caso das lajes em estudo, o modo de falha predominante é a formação de charneiras plásticas (8). Este modo transforma o comportamento da laje em um mecanismo, provocando o seu colapso. Neste contexto,

a equação de estado limite para esse modo de falha resulta:

$$[10] \quad g(\vec{x}) = M_R - m = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{170 \cdot f_c} \right) - m$$

Onde m (momento de plastificação) é calculado por meio das equações apresentadas nos itens 2.1 e 2.2, sendo seu valor dependente da configuração de ruína, geometria e carregamentos atuantes na laje.

3. PROBABILIDADE DE FALHA

O problema fundamental da teoria de confiabilidade estrutural é a mensuração da probabilidade de falha definida por:

$$[11] \quad p_f = P[g(\vec{x}) \leq 0] = \int_{g(\vec{x}) \leq 0} f_x(\vec{x}) d\vec{x}$$

Em que $\vec{x}$ é o vetor das variáveis aleatórias, $P[\cdot]$ é o operador probabilidade e $f_x(\vec{x})$ é a função conjunta de densidade de probabilidade.

A confiabilidade (R) é o evento complementar da p_f sendo determinada pela Equação 12.

$$[12] \quad R = 1 - p_f = 1 - \int_{g(\vec{x}) \leq 0} f_x(\vec{x}) d\vec{x} = \int_{g(\vec{x}) > 0} f_x(\vec{x}) d\vec{x}$$

Devido à dificuldade da integração multi-dimensional, a Equação 11 não pode ser determinada analiticamente, apenas para alguns casos individuais (9). Neste artigo, a Equação 11 é resolvida por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC). Este método foi implementado em linguagem VBA e acoplado ao algoritmo que determina o momento de plastificação das lajes por meio da TCP. Para mais detalhes da SMC, recomenda-se o trabalho de (9).

A Tabela 1 apresenta os valores alvos para p_f , conforme prescrição do código internacional de análise probabilística (10). Ressalta-se que os projetos de engenharia devem ser dimensionados para atingir, no mínimo, os valores de $p_{f,target}$ apresentados na Tabela 1, a fim de proporcionar à segurança estrutural.

4. ESTUDO DE CASO

A Figura 4 apresenta o pavimento tipo do edifício de alvenaria estrutural hipotético. As lajes são do tipo maciça com

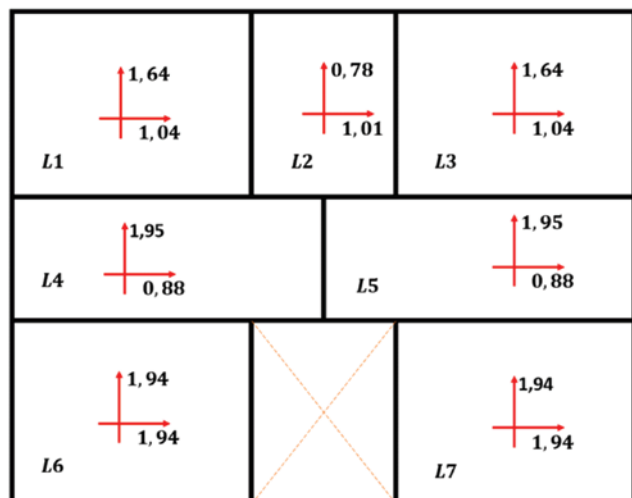


FIGURA 4

PAVIMENTO TIPO EM ESTUDO

TABELA 2

GEOMETRIA DAS LAJES EM CM

Vão	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
L _x	315	270	315	300	300	420	420
L _y	420	315	420	555	555	420	420

NOTA: AS VARIÁVEIS A_g, d, L_x E L_y SÃO ASSUMIDAS DETERMINÍSTICAS

TABELA 3

ESTATÍSTICAS DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Parâmetros	f _y (kN/cm ²)	f _c (kN/cm ²)	g (kN/m ²)	q (kN/m ²)
Média	54,50	3,00	1,05 · g	q
Coefficiente de variação	0,05	0,10	0,10	0,25
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Gumbel Max
Referência	(13)	(13)	(14)	(14)

NOTA: AS VARIÁVEIS A_g, d, L_x E L_y SÃO ASSUMIDAS DETERMINÍSTICAS

espessura de 10 cm, a carga permanente é igual a 3,5 kN/m² (sendo o peso próprio da laje igual a 2,5kN/m² e uma parcela de 1,0 kN/m² para considerar o peso próprio do piso, revestimento e forro), a carga variável é igual a 2 kN/m² (conforme Tabela 10 da ABNT NBR 6120 (11)), o concreto considerado é C25, o aço utilizado é CA-50 e o cobrimento nominal igual 2,5 cm. O dimensionamento das lajes é realizado, conforme prescrições da norma brasileira de concreto (12). Os valores indicados na Figura 4 são as armaduras transversais de cada laje em . Neste artigo, não é apresentado o detalhamento das taxas de armadura das lajes. Maiores detalhes, os autores recomendam a ABNT NBR 6118 (12).

A Tabela 2 mostra os vãos das lajes, enquanto a Tabela 3 apresenta as variáveis aleatórias e suas respectivas estatísticas. Para as análises de confiabilidade, utiliza-se a SMC com número de simulação (n_s) igual a 10⁷.

Partindo das estatísticas dadas na Tabela 3, realiza-se a determinação da p_f. Primeiramente, calcula-se p_f considerando o Estado Íntegro (EI), sem remoção

de parede, ou seja, condição de contorno de laje simplesmente apoiada. Como os valores das armaduras da seção transversal são determinados para cada direção (A_{s,x}, A_{s,y}), a p_f deve ser mensurada levando-se em conta a configuração de ruína correspondente a cada direção (Tabela 4).

Assumindo que os eventos são mutuamente exclusivos, a p_f é dada pela soma das sequências de falhas referente a A_{s,x} e A_{s,y}. A Tabela 5 apresenta os valores de p_f e R obtidos por meio da Simulação de Monte Carlo.

Comparando os valores da Tabela 5 com a p_{f,target} recomendada por (10), assumindo consequências de falha moderada e medida relativa do custo de segurança grande (p_{f,target} ≤ 5 · 10⁻⁴), observa-se que todas as lajes estão com probabilidade aceitável e confiabilidade compatível com os requisitos da segurança estrutural. Além disso, verifica-se que o dimensionamento das lajes por meio da norma brasileira de concreto (11) resulta aproximadamente no mesmo nível de segurança (mesma confiabilidade), conforme mostrado na Tabela 5.

A TCP é baseada no teorema do limite superior da plasticidade. Este teorema estabelece que toda configuração de ruína cinematicamente admissível é maior ou igual à carga que provoca a ruína da peça. Portanto, verifica-se que a carga determinada por esse teorema é o limite superior para a carga efetiva de ruína. Por isso que a p_f mensurada por meio da TCP implica valores próximo a p_{f,target}, o que comprova que a TCP subestima a carga de ruína, sendo a favor da segurança. Além disso, resultados experimentais confirmam que a carga

de ruína é geralmente maior que a determinada pela TCP (7). Isso porque o efeito de membrana e arqueamento oferece uma reserva de resistência. Contudo, tal reserva pode não ser considerada para todos os tipos de lajes.

Realizando novamente as análises de confiabilidade, agora para a estrutura no Estágio de Propagação de Dano (EPD), isto é, remoção ou falha de uma parede, determinam-se as probabilidades de falha condicionais (p_f [L_j/E_i]), que corresponde à falha da laje L_j dada à ocorrência de falha/remoção da parede E_i. Inicialmente, a parede E_i é removida de uma borda da laje L_j. Em seguida, calcula-se a p_f [L_j/E_i] para esta condição de contorno (laje apoiada com uma borda livre). Este procedimento é repetido para todas as lajes do pavimento tipo em estudo, sempre colocando de volta a parede retirada na análise anterior.

A Figura 5 apresenta a notação utilizada no código implementado. No EPD, a configuração de ruína da laje vai depender da posição da parede que foi removida. Pela condição de simetria, pode-se agrupar as bordas da laje em dois tipos: borda tipo 1 (borda paralela ao menor vão) e borda tipo 2 (borda perpendicular ao menor vão). Assim, avaliando a laje L₁ considerando a remoção da parede sob o vão menor (borda tipo 1) resulta p_{f,x} [L₁/E₁] = p_{f,x} [L₁/E₂] = 9,99 · 10⁻¹, p_{f,y} [L₁/E₁] = p_{f,y} [L₁/E₂] = 6,25 · 10⁻², p_f [L₁/E₁] = 1 e R = 0. No caso da remoção da parede sob vão maior (borda tipo 2) resulta p_{f,x} [L₁/E₃] = p_{f,x} [L₁/E₄] = 9,90 · 10⁻¹, p_{f,y} [L₁/E₃] = p_{f,y} [L₁/E₄] = 7,36 · 10⁻¹, p_f [L₁/E₃] = p_f [L₁/E₄] = 1 e R = 0. As Tabelas 6 e 7 resumem os resultados de todas as lajes do pavimento tipo.

Para o EPD, obtém-se p_f [L_j/E_i] = 1, conforme Tabela 7. Por consequência, todas as lajes em estudo falham, ou seja, R = 0.

TABELA 4

ANÁLISE DAS LAJES NO EI: p_{f,x} E p_{f,y}

Laje	p _{f,x}	p _{f,y}
L1	1,33 · 10 ⁻⁵	1,44 · 10 ⁻⁵
L2	1,44 · 10 ⁻⁵	1,35 · 10 ⁻⁵
L3	1,33 · 10 ⁻⁵	1,44 · 10 ⁻⁵
L4	1,25 · 10 ⁻⁵	1,33 · 10 ⁻⁵
L5	1,25 · 10 ⁻⁵	1,33 · 10 ⁻⁵
L6	1,26 · 10 ⁻⁵	1,22 · 10 ⁻⁵
L7	1,26 · 10 ⁻⁵	1,22 · 10 ⁻⁵

TABELA 5

ANÁLISE DAS LAJES NO EI: p_f E R

Laje	p _f	R
L1	2,77 · 10 ⁻⁵	0,9999723
L2	2,79 · 10 ⁻⁵	0,9999721
L3	2,77 · 10 ⁻⁵	0,9999723
L4	2,58 · 10 ⁻⁵	0,9999742
L5	2,58 · 10 ⁻⁵	0,9999742
L6	2,48 · 10 ⁻⁵	0,9999752
L7	2,48 · 10 ⁻⁵	0,9999752

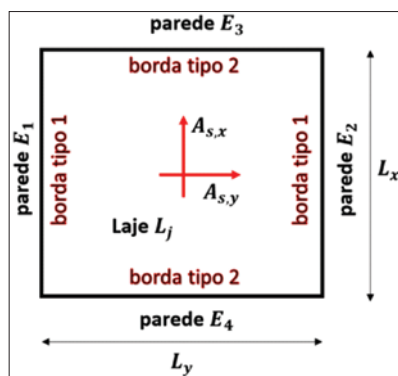


FIGURA 5
NOTAÇÃO UTILIZADA NO EPD

A configuração de ruína da laje devido à falha/remoção de um elemento de apoio aumenta drasticamente o momento de plastificação. Como o dimensionamento do pavimento tipo foi realizado para uma configuração que gera um momento solicitante razoavelmente baixo, as armaduras transversais calculadas não são suficientes para suportar o aumento do momento de plastificação para a configuração de ruína de borda livre. Portanto, conclui-se que uma possível solução de projeto para minimizar as falhas das lajes é a consideração da condição de contorno de laje com vinculação engastada nas suas bordas. Isso porque a configuração de ruína de uma laje engastada tem a capacidade de redistribuir melhor os momentos fletores solicitantes, transferindo parte desses esforços para as bordas engastadas. Outrossim, suas bordas possuiriam taxas de armaduras dadas pelo seu dimensionamento que iriam contribuir com o valor do momento resistente da seção transversal.

Um aspecto fundamental a considerar são as taxas de armaduras adicionais, que desempenham um papel crucial na resis-

tência e estabilidade dos elementos estruturais. Conforme especificado nas normas ABNT NBR 16868-1 (15) e BS 5628-1 (16), essas taxas são determinadas de acordo com as cargas e exigências estruturais, garantindo a segurança e reduzindo os riscos de falhas. Além disso, os detalhes construtivos previstos nessas normas são projetados para promover a redundância, continuidade e ductilidade das estruturas. A redundância é importante para que, mesmo em caso de falha em um elemento estrutural, a carga seja redistribuída de forma segura. A continuidade, por sua vez, garante a integridade estrutural ao longo de toda a obra, minimizando os pontos fracos. Já, a ductilidade é essencial para a capacidade da estrutura de deformar-se sem rupturas bruscas, o que é crucial em situações de carregamento extremo.

Outro fator a destacar é a importância da regularização e modulação na construção de alvenaria estrutural. A regularização refere-se ao processo de correção de imperfeições e nivelamento das superfícies, garantindo uma distribuição uniforme das cargas e evitando pontos de concentração de tensão. A modulação, por sua vez, consiste na padronização das dimensões e posicionamento dos elementos construtivos, facilitando a execução e garantindo a precisão dimensional da estrutura. Somado a isso, o efeito arco, resultado da disposição e interação dos elementos estruturais, confere à alvenaria estrutural uma capacidade única de redistribuir esforços. Esse fenômeno permite que a carga seja transferida de forma mais eficiente e uniforme ao longo da estrutura, aumentando sua capacidade de suportar solicitações variadas

e reduzindo a probabilidade de ocorrência de danos acidentais.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma metodologia foi proposta para avaliar a probabilidade de falha de lajes em concreto armado na ocorrência de remoção/falha de um elemento de apoio. A metodologia combina a Teoria de Charneiras Plásticas com a Confiabilidade Estrutural. Duas configurações de ruína foram avaliadas: (a) laje simplesmente apoiada e (b) laje apoiada com uma borda livre. Verificou-se que no estágio íntegro (sem remoção de parede), todas as lajes do pavimento tipo em estudo estão com probabilidade de falha aceitável. Em contrapartida, no estágio de propagação de dano (com remoção de parede), os valores das probabilidades de falhas condicionais resultam igual a 1, ou seja, confiabilidade nula. Por conseguinte, todas as lajes nesse estágio falham.

Portanto, a hipótese de considerar a laje na configuração (a) é contra a segurança. Isso porque, a laje não teria a capacidade de redistribuir os seus esforços na ocorrência de retirada/falha de uma parede. A remoção de uma parede implicaria a configuração (b). Esta configuração impõe um aumento significativo no momento de plastificação, conduzindo a sua ruptura.

No presente estudo, as análises foram conduzidas sem levar em consideração as taxas de armaduras adicionais e os detalhes construtivos prescritos pelas normas ABNT NBR 16868-1 e BS 5628-1. Além disso, o efeito arco não foi contemplado nas análises. É importante ressaltar que, devido ao caráter acadêmico do exemplo, o foco foi na apresentação da metodologia proposta. No entanto, para trabalhos

TABELA 6
ANÁLISE DAS LAJES NO EPD: $p_{f,x}$ e $p_{f,y}$

Laje	Borda tipo 1		Borda tipo 2	
	$p_{f,x} [L_j/E_{1,2}]$	$p_{f,y} [L_j/E_{1,2}]$	$p_{f,x} [L_j/E_{3,4}]$	$p_{f,y} [L_j/E_{3,4}]$
L1	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-1}$	$7,36 \cdot 10^{-1}$
L2	1,00	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$9,97 \cdot 10^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-1}$
L3	$9,99 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-1}$	$7,36 \cdot 10^{-1}$
L4	1,00	$5,38 \cdot 10^{-1}$	1,00	1,00
L5	1,00	$5,38 \cdot 10^{-1}$	1,00	1,00
L6	1,00	$3,33 \cdot 10^{-3}$	1,00	$3,33 \cdot 10^{-3}$
L7	1,00	$3,33 \cdot 10^{-3}$	1,00	$3,33 \cdot 10^{-3}$

NOTA: $p_i [L_j/E_{i,k}] = p_i [L_j/E_i]$, ONDE i E k REFEREM-SE À PAREDE REMOVIDA

TABELA 7
ANÁLISE DAS LAJES NO EPD: p_f E R

Laje	p_f	R
L1	1,00	0,00
L2	1,00	0,00
L3	1,00	0,00
L4	1,00	0,00
L5	1,00	0,00
L6	1,00	0,00
L7	1,00	0,00

futuros ou aplicações no meio técnico, é recomendável incluir esses requisitos nas análises, pois eles desempenham um papel significativo na segurança e

estabilidade das estruturas de alvenaria.

Por fim, a metodologia aqui delineada pode ser aplicada para qualquer sistema construtivo, não apenas para edificações

em alvenaria estrutural, desde que seja possível escrever as equações de estado limite para seus respectivos modos de falha. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo: PINI, 2004.
- [2] PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural. São Carlos: EdUFSCAR, 2013.
- [3] MOHAMD, G. Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho. São Paulo: Blucher, 2020.
- [4] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. G. Discussion about progressive collapse of masonry building. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.12, n.3, p.479-485, 2019.
- [5] FELIPE, T. R. C. Novo método para a avaliação do risco de colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- [6] INGERSLEV, A. The strength of rectangular slabs. Journal of the Institution of Structural Engineers, v.1, n.1, p.3-14, 1923.
- [7] JOHANSEN, K. Moments of rupture in cross-reinforced slabs. Proc. Intern. Assoc. Bridge and Structural Eng., v.1, p.277-296, 1932.
- [8] PINHEIRO, L. M. Análise elástica e plástica de lajes retangulares de edifícios. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.
- [9] MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. Structural reliability analysis and prediction. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
- [10] JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. Probabilistic model code - Part 1: Basis of design. Denmark, 2001.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2023.
- [13] NOGUEIRA, C. G. Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estrutura de concreto armado. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [14] ELLIWOOD, B.; GALAMBOS, T. V. Probability-based criteria for structural design. Structural Safety, v.1, n.1, p.15-26, 1983.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16868: Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.
- [16] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5628: Code of practice for use of masonry - part 1. London, 1992.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE CONTROLE DA QUALIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS



COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
Representante CTA: Sofia Maria Carrato Dinis



PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a Prática Recomendada “Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras” indica métodos de ensaios para o controle da qualidade do CRF utilizado em estruturas de concreto reforçado com fibras e estruturas de concreto reforçado com fibras em conjunto com armaduras.

A Prática Recomendada aplica-se tanto a estruturas de placas apoiadas em meio elástico quanto a estruturas sem interação com o meio elástico.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-30-5

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 31

Acabamento: digital

Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio

