

Erro de modelo de lajes lisas de concreto armado submetidas a carregamento centrado

ELYSON A. P. LIBERATI – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7905-1593> – eapliberati@uem.br, UEM-PR;

MARÍLIA G. MARQUES – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0234-5224>, UFV-MG;

LEANDRO M. TRAUTWEIN – PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4631-9290>, UNICAMP-SP

RESUMO

A determinação da capacidade resistente de estruturas de concreto armado pode ser realizada a partir de modelos analíticos, presentes em normas ou na literatura específica, ou por meio de modelos numéricos mais refinados. Entretanto, qualquer modelo utilizado para estimar a resposta de um sistema estrutural está sujeito a hipóteses e simplificações. Neste contexto, este trabalho apresenta uma investigação de modelos analíticos de previsão

da resistência à punção de lajes lisas de concreto armado, de acordo com quatro especificações de projeto: EUROCODE 2 (2004), *fib* MODEL CODE (2010), ABNT 6118 (2014) e ACI 318 (2019). O estudo envolveu 249 resultados experimentais de carga de ruptura de lajes lisas com ou sem armaduras de cisalhamento, como também de lajes com ou sem aberturas, sendo que todas foram submetidas a carregamento centrado, de modo que estatísticas da variável aleatória erro de modelo pudessem ser construídas.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO ARMADO, LAJES LISAS, PUNÇÃO, ERRO DE MODELO.

1. INTRODUÇÃO

O sistema estrutural denominado de lajes lisas é constituído por lajes de concreto armado ou protendido que são apoiadas diretamente sobre pilares. A utilização de estruturas com

lajes lisas tornou-se habitual há muitos anos.

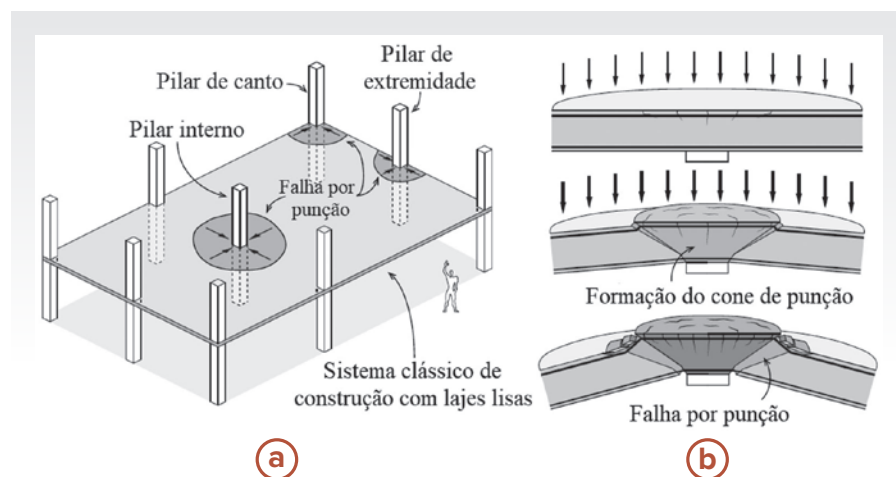
As principais vantagens desse sistema estrutural são: flexibilização do layout, diminuição da altura total do edifício, simplificação das armaduras e formas, diminuição da quantidade

de formas e escoramento; maior facilidade no lançamento do concreto e menor carga na fundação, devido a diminuição do peso próprio.

Embora pareça simples, esse sistema apresenta um comportamento estrutural complexo, principalmente no que se refere ao fenômeno de punção em lajes, caracterizado por elevadas tensões de cisalhamento nas regiões próximas da conexão laje-pilar (Figura 1).

Dentre os problemas que podem diminuir a resistência ao funcionamento de lajes lisas está a existência de aberturas nas regiões adjacentes ao pilar. Isso ocorre devido à diminuição da resistência ao cisalhamento provocada pela retirada de concreto e de armadura na abertura, reduzindo o perímetro crítico da laje.

De modo geral, os modelos utilizados pelas normas consistem em definir uma tensão nominal de cisalhamento obtida pela razão entre a força de reação do pilar e a área de uma superfície de controle normal ao plano da laje situada ao redor da área carregada. Com relação a essa área de



► **Figura 1**

Fenômeno de punção: (a) tipos de falha em uma laje lisa; (b) fases consecutivas para solicitação axissimétrica (pilar interno)

Fonte: Brantschen, 2016 – adaptado

carregamento, cada norma de projeto especifica suas próprias recomendações. Isso resulta em diferentes previsões obtidas pelas normas, o que mostra que não se têm de fato um modelo de cálculo único e definitivo para a avaliação desse fenômeno.

De acordo com Marque e Nogueira (2021), essa característica fica ainda mais evidenciada, uma vez que a superfície de controle é apenas uma grandeza de referência, não sendo necessariamente a superfície onde ocorre a ruptura. Em virtude das diferenças observadas nos modelos de previsão da resistência à punção de cada código de projeto, a obtenção de um parâmetro definido como erro de modelo que expressa a precisão desses modelos é de grande importância.

2. MODELOS DE CÁLCULO À PUNÇÃO

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2004), a resistência à punção (V_{NBR} e V_{EC} , respectivamente) para lajes lisas sem armaduras de cisalhamento é definida como:

$$[1] \quad V_{NBR}, V_{EC} = \gamma \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d$$

(unidades no SI: MPa; mm)

Onde:

γ – é igual a 0,13 para a ABNT NBR 6118 (2014) e 0,18 para o EUROCODE 2 (2004);

u_1 – é o perímetro de controle posicionado a uma distância $2d$ a partir das faces do pilar;

ρ – é a taxa de armadura de flexão e;

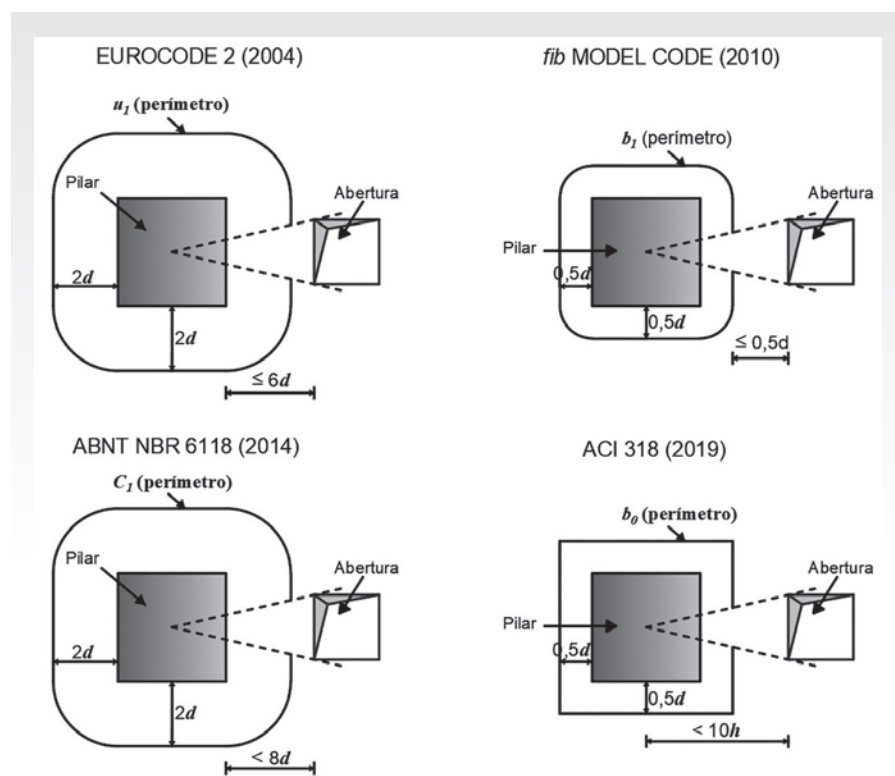
d – é a altura útil do elemento.

O fator k é responsável pelo *size effect* (efeito em que a resistência ao cisalhamento nominal decresce com o aumento do tamanho do elemento estrutural), cujo valor é obtido da seguinte forma:

$$[2] \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (\text{com } d \text{ em mm})$$

A norma europeia limita o valor deste efeito em $k \leq 2,0$, enquanto que, na norma brasileira, isso não é limitado.

O *fib Model Code* (2010) é ba-



► Figura 2

Perímetros de controle considerados pelos códigos de projeto

seado na *Critical Shear Crack Theory* ou Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento, proposta por Muttoni (2008). Portanto, a resistência à punção depende da rotação da laje, que resulta da carga aplicada e da rigidez da laje definida pela resistência à flexão. Para lajes sem armaduras de cisalhamento, o *fib Model Code* (2010) permite a avaliação da resistência à punção (V_{MC}) por meio da Equação 3.

$$[3] \quad V_{MC} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_1 \cdot d$$

Onde:

b_1 – é o perímetro de controle e;

k_{ψ} – depende da deformação e é definido como:

$$[4] \quad k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6$$

O parâmetro ψ denota o ângulo de inclinação da laje em radianos na força máxima, enquanto k_{dg} leva em conta a influência da granulometria máxima do agregado no concreto, e é apresentado de acordo com a Equação 5.

$$[5] \quad k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75$$

Onde:

d_g – é a granulometria máxima do concreto, ou seja, 16 mm neste caso.

O ângulo de inclinação (rotação) da laje ψ é obtido experimentalmente ou usando algumas expressões teóricas que são propostas de acordo com o *fib Model Code* (2010).

Nesta pesquisa, a aproximação de nível II é usada para a previsão da rotação das lajes. Sendo assim:

$$[6] \quad \psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5}$$

Onde:

r_s – é a distância ao ponto em que o momento fletor radial é zero;

f_y – é a tensão de escoamento da armadura;

E_s – é o módulo de elasticidade da armadura de flexão;

m_R – é a capacidade de momento da laje e;

m_s – é o momento atuante médio na faixa do pilar, onde, para pilares

► **Tabela 1**

Adaptação do critério de Collins (2001) – DPC

Intervalo	$E_m = V_{exp} / V_{teo}$	Classificação	Penalidade
I	< 0,50	Extremamente perigoso	10
II	[0,50 – 0,85]	Perigoso	5
III	[0,85v 1,15]	Segurança apropriada	0
IV	[1,15 – 2,00]	Conservador	1
V	≥ 2,00	Extremamente conservador	2

Fonte: Collins, 2001 – adaptado

internos em lajes com geometria suficientemente regular, pode ser aproximada como $m_s = V/8$ (V é a força cortante característica).

Assumindo um comportamento perfeitamente plástico da armadura após o escoamento, um bloco de tensão retangular para concreto na zona de compressão e desprezando a armadura de compressão, a capacidade de momento m_R da seção é então:

$$[7] \quad m_R = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{2 \cdot f_c}\right)$$

As disposições do código ACI 318 (2019) referente à punção de lajes sem

armadura de cisalhamento é bastante simples e direta. A área do perímetro de controle é multiplicada pela tensão de cisalhamento admissível. Assim, a força de punção (V_{ACI}) é avaliada da seguinte forma para este estudo:

$$[8] \quad V_{ACI} = \frac{1}{3} \cdot \lambda_s \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_0 \cdot d$$

(unidades no SI: MPa; mm)

O parâmetro λ_s refere-se ao size effect dado pela Equação 9:

$$[9] \quad \lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004 d}} \leq 1$$

(com d em mm)

As instruções normativas reduzem o perímetro de cisalhamento crítico com base no tamanho e na localização de aberturas, sendo que parte do perímetro de controle contido entre duas tangentes traçadas a partir do centro do pilar é considerada ineficaz. Nesses casos, o perímetro de controle será reduzido somente se a distância entre o perímetro do pilar e a borda da abertura atender aos valores estipulados para cada código de projeto, conforme detalhado na Figura 2.

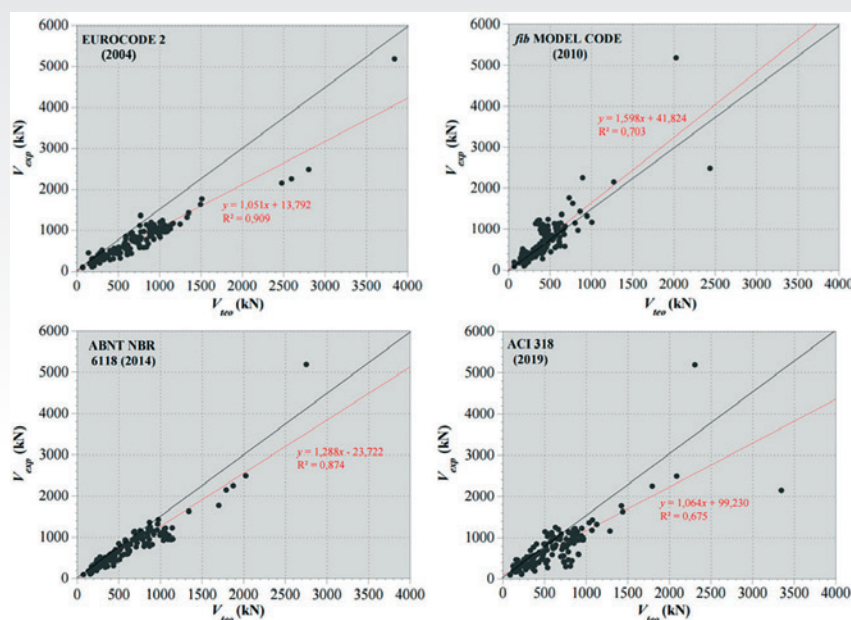
3. ANÁLISE DE ERRO DE MODELO

Entende-se por erro de modelo (E_m) a variável aleatória que permite comparar os resultados reais com os resultados obtidos segundo a previsão do modelo que pretende-se avaliar (BOLANDIM, BECK e MALITE, 2013). Nesta pesquisa, os resultados considerados como reais correspondem aos valores experimentais de carga de ruptura (V_{exp}) de lajes lisas de concreto armado obtidos nos ensaios.

Nas análises de confiabilidade, o erro de modelo é utilizado para identificar o quanto a resistência experimental oscila em torno de um valor padrão. A oscilação resultante da análise de erro de modelo possibilita concluir se o modelo proposto é conservador ou não em relação ao valor experimental (ADOLFS, 2011).

O autor ainda afirma que o valor do erro de modelo é usado nas análises de confiabilidade como uma variável aleatória do problema de segurança estrutural. Após definir-se o seu valor, a sua inclusão nas análises de confiabilidade possibilita verificar o impacto no índice de confiabilidade, aumentando o índice de segurança, no caso de modelos conservadores e diminuindo, no caso de modelos não conservadores.

Neste trabalho, portanto, os valores experimentais de carga de ruptura de lajes lisas de concreto armado submetidas a carregamento centrado foram comparados com os resultados estimados por meio de recomendações normativas EUROCO-



► **Figura 3**

Avaliação dos resultados quanto à precisão (V_{exp} versus V_{teo}) para lajes sem aberturas

DE 2 (2004), *fib* MODEL CODE (2010), ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2014).

3.1 Equacionamento do erro de modelo

Os valores de erro de modelo (E_m) são obtidos individualmente para cada ensaio realizado, bastando-se determinar os valores teóricos de carga de ruptura das lajes a partir das equações contidas nas prescrições normativas.

Dessa forma, a variável E_m é calculada considerando os valores médios de resistência dos materiais e sem a consideração dos coeficientes parciais de segurança, conforme Equação 10.

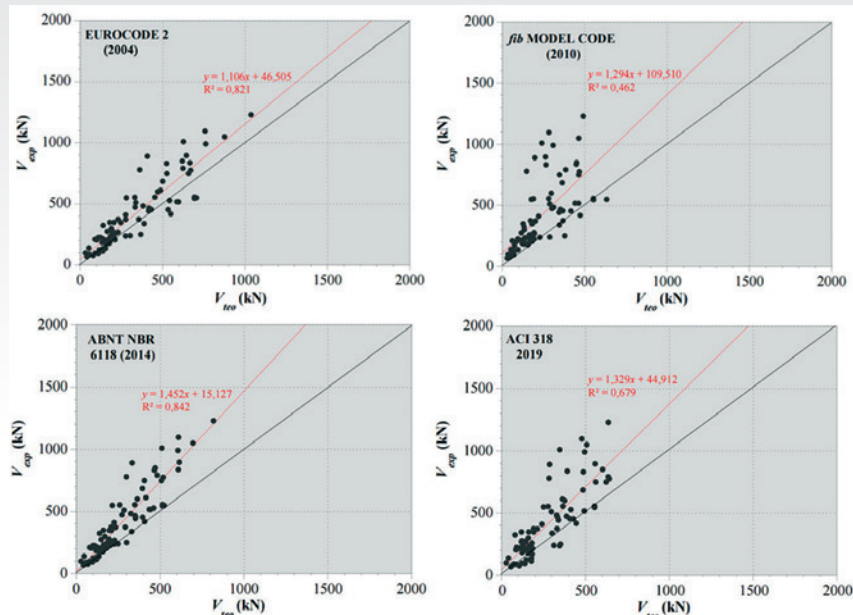
$$[10] \quad E_m = \frac{V_{exp}}{V_{teo}}$$

Nesta equação, V_{exp} é a carga de ruptura da laje obtida experimentalmente e V_{teo} é o valor teórico da carga de ruptura para cada modelo teórico considerado.

A média da variável erro de modelo ($E_{m, média}$) é conhecida como fator de tendenciosidade (*bias factor*) do modelo e indica se o mesmo é conservador ou contrário à segurança. O valor unitário representa que o modelo teórico não possui qualquer tendenciosidade, sendo, portanto, considerado um modelo ideal. Para valores médios da variável superiores à unidade, tem-se um modelo teórico a favor da segurança em relação às observações experimentais, e o oposto para valores abaixo da unidade de (BECK *et al.*, 2009).

Com relação ao desvio padrão desta variável ($E_{m, desvio}$), esse corresponde ao erro aleatório do modelo teórico devido à incapacidade de se prever, em todas as situações de projeto, a verdadeira resistência do elemento estrutural. O desvio padrão é uma referência das incertezas existentes no modelo adotado e no material empregado (ADOLFS, 2011).

Oliveira (2008) ainda afirma que idealmente o fator de tendenciosidade ($E_{m, desvio}$) deve ser utilizado para corrigir o modelo, fazendo com que,



► **Figura 4**

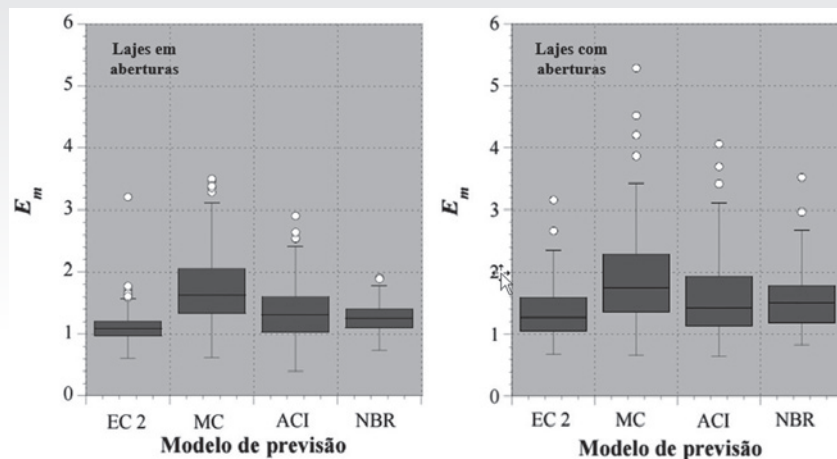
Avaliação dos resultados quanto à precisão (V_{exp} versus V_{teo}) para lajes com aberturas

em média, o modelo corrigido resulte na carga de ruptura correta. Introduzindo essa correção, a carga de ruptura teórica pode ser obtida mediante Equação 8.

$$[11] \quad V_{teo}^{cor} = E_{m, média} \cdot V_{teo}$$

Sendo assim, as análises da variável E_m consistiram, primeiramente,

em investigar a dispersão e o nível de conservadorismo das instruções normativas para previsão da carga de ruptura de lajes lisas de concreto armado submetidas a carregamento centrado consideradas neste trabalho. Uma adaptação do critério de penalidade proposto por Collins (2001) também foi utilizada no estudo, o



► **Figura 5**

Avaliação dos resultados quanto à segurança e à dispersão

Demerit Points Classification (DPC), conforme Tabela 1.

Além disso, modelos lineares generalizados (MLG) foram construídos neste trabalho para descrever a variável E_m em função de suas covariáveis signifi-

cativas. Estes modelos são uma extensão dos modelos normais lineares em que admitem a não normalidade nos erros e, portanto, da variável resposta.

Para o desenvolvimento das análises de erro de modelo envolvendo

o fenômeno da punção, foram coletadas informações de 249 lajes de concreto armado ensaiadas com ou sem armaduras de cisalhamento, como também de lajes com ou sem aberturas, sendo que todas foram submetidas a carregamento centrado. As características físicas e geométricas destas lajes podem ser verificadas de forma compilada no trabalho de Liberati (2019).

► Tabela 2

Classificação segundo o critério de Collins (2001) para lajes sem aberturas

Previsões		Intervalos de E_m					Total	E_m , médio	CV (%)
		I	II	III	IV	V			
EC 2 (2010)	N° lajes	0	16	88	58	1	163	1,11	25,02
	Penalidade	0	80	0	58	2	140		
MC (2010)	N° lajes	0	4	18	90	41	153	1,71	35,17
	Penalidade	0	20	0	90	82	192		
NBR 6118 (2014)	N° lajes	0	7	40	116	0	163	1,27	18,81
	Penalidade	0	35	0	116	0	151		
ACI 318 (2019)	N° lajes	2	20	35	92	14	163	1,34	34,71
	Penalidade	20	100	0	92	28	240		

► Tabela 3

Classificação segundo o critério de Collins (2001) para lajes com aberturas

Previsões		Intervalos de E_m					Total	E_m , médio	CV (%)
		I	II	III	IV	V			
EC 2 (2010)	N° lajes	0	8	22	48	8	86	1,36	32,91
	Penalidade	0	40	0	48	16	104		
MC (2010)	N° lajes	0	2	11	40	31	84	1,93	44,11
	Penalidade	0	10	0	40	62	112		
NBR 6118 (2014)	N° lajes	0	1	17	56	12	86	1,56	31,17
	Penalidade	0	5	0	56	24	85		
ACI 318 (2019)	N° lajes	0	9	15	44	18	86	1,59	43,18
	Penalidade	0	45	0	44	36	125		

► Tabela 4

Estimativas dos parâmetros λ_i

Parâmetro	EUROCODE 2 (2004)	fib model code (2010)	ABNT NBR 6118 (2014)	ACI 318 (2019)
λ_0	38,95	77,76	34,50	29,22
λ_1	32,63	39,23	34,87	39,14
λ_2	-508,66	-2.956,00	-374,56	1.469,09
λ_3	-0,18	-0,02	-0,03	-0,15
λ_4	-0,17	-0,21	-0,13	-0,31
λ_5	17,56	39,57	3,61	36,97
λ_6	-4,56	-10,41	-4,69	-9,89
λ_7	-5,84	-10,05	-5,84	-6,18
λ_8	444,81	1.034,00	441,73	698,27

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados nas Figuras 3 a 5 avaliam os desempenhos dos códigos em prescrever a resistência última à punção das lajes lisas de concreto armado com ou sem aberturas.

O resumo das análises é apresentado nas Tabelas 2 e 3 para lajes sem e com aberturas, respectivamente. Estas tabelas, além de exibir a classificação dos códigos segundo a adaptação do critério de Collins (2001), apresentam também valores estatísticos como a média e o coeficiente de variação da variável erro de modelo (E_m).

A partir das Figuras 3 e 5 e da Tabela 2, constata-se que as prescrições dos códigos EUROCODE 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014) foram as mais satisfatórias em prever a carga de ruptura das lajes sem aberturas consideradas na pesquisa. Nesses códigos, foram verificados resultados mais precisos e menos dispersos, com valores médios da variável E_m iguais a 1,11 e 1,27, nessa ordem, e coeficientes de variação iguais a 25,02% para a norma europeia e 18,81% para a norma brasileira.

Com base no critério de classificação de Collins (2001) contido na Tabela 2, verifica-se que 54% e 25% dos valores obtidos pelas normas EUROCODE 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014), nessa ordem, encontravam-se dentro do intervalo de 0,85 a 1,15, considerado como intervalo ideal (segurança apropriada).

As instruções normativas fib MODEL CODE (2010) e ACI 318 (2019) apresentaram resultados mais conservadores, com valores médios de E_m iguais a 1,71 e 1,34, nessa ordem, e

coeficientes de variação praticamente iguais. Avaliando os pontos de mérito, essas normas foram as que mais pontuaram, obtendo 192 e 240 pontos, respectivamente.

Vale ressaltar que o código *fib* MODEL CODE (2010) baseia-se na Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento. Dentre os quatro níveis de aproximação previstos para a determinação da rotação da laje ao redor da área carregada (ψ), neste trabalho foi considerado o nível de aproximação II. Além disso, a norma americana não considera a taxa de armadura de flexão em suas formulações.

Nas Figuras 4 e 5 e na Tabela 3 observa-se, novamente, valores mais precisos da variável E_m para lajes com aberturas obtidos pelas normas EUROCODE 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014). Os valores médios de E_m para esses códigos de projeto resultaram iguais a 1,36 para a norma europeia e 1,56 para a norma brasileira e coeficientes de variação iguais a 32,91% e 31,17%, nessa ordem.

Modelos de regressão, conhecidos como modelos lineares generalizados (MLG) foram ajustados a fim de descrever a variável resposta (E_m) em função de covariáveis significativas.

Dessa forma, a variável E_m foi descrita neste trabalho em função das seguintes covariáveis: presença de aberturas na laje (Ab), taxa de armadura de flexão (ρ), altura útil da laje (d), resistência à compressão do concreto (f_c), armadura de cisalhamento (A_{sw}) e da relação $c_{m\max}/d$, sendo $c_{m\max}$ a maior dimensão do pilar. Além dessas covariáveis, as interações mais significativas entre elas também foram consideradas.

Portanto, o modelo geral para a i -ésima observação, com $i = 1, \dots, 249$ (número total de lajes levantadas) que foi testado para as normas é dado por:

[12]

$$E_{m_i} = \exp[\lambda_0 + \lambda_1 Ab_i + \lambda_2 \rho_i + \lambda_3 d_i + \lambda_4 f_{c_i} + \lambda_5 A_{sw_i} + \lambda_6 (c_{m\max}/d)_i + \lambda_7 (Ab_i \times (c_{m\max}/d)_i) + \lambda_8 (\rho_i \times (c_{m\max}/d)_i)]$$

Nesta equação, λ_0 representa o valor esperado de E_m para o nível de

Tabela 5
Probabilidades de significância

Parâmetro	EUROCODE 2 (2004)	<i>fib</i> model code (2010)	ABNT NBR 6118 (2014)	ACI 318 (2019)
λ_0	$4,69 \times 10^{-4}$	$7,44 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-3}$	$2,27 \times 10^{-2}$
λ_1	$1,10 \times 10^{-6}$	$6,77 \times 10^{-5}$	$4,66 \times 10^{-8}$	$4,88 \times 10^{-7}$
λ_2	$4,10 \times 10^{-1}$	$5,13 \times 10^{-3}$	$5,22 \times 10^{-1}$	$4,10 \times 10^{-2}$
λ_3	$1,04 \times 10^{-6}$	$7,97 \times 10^{-1}$	$3,70 \times 10^{-1}$	$1,89 \times 10^{-4}$
λ_4	$1,09 \times 10^{-1}$	$1,37 \times 10^{-1}$	$2,14 \times 10^{-1}$	$1,36 \times 10^{-2}$
λ_5	$8,05 \times 10^{-7}$	$2,00 \times 10^{-16}$	$2,72 \times 10^{-1}$	$2,00 \times 10^{-16}$
λ_6	$1,13 \times 10^{-1}$	$5,28 \times 10^{-2}$	$8,49 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-3}$
λ_7	$7,96 \times 10^{-3}$	$5,72 \times 10^{-3}$	$5,07 \times 10^{-3}$	$1,53 \times 10^{-2}$
λ_8	$4,25 \times 10^{-2}$	$1,37 \times 10^{-2}$	$3,35 \times 10^{-2}$	$6,22 \times 10^{-3}$

referência considerado no modelo (ausência de aberturas na laje). Os coeficientes λ_2 , λ_3 , λ_4 e λ_6 são os efeitos de ρ , d , f_c e $c_{m\max}/d$, respectivamente. Os efeitos das variáveis indicadoras Ab e A_{sw} são expressos pelos parâmetros λ_1 e λ_5 . Por fim, λ_7 e λ_8 simbolizam os efeitos asso-

ciados às interações $Ab \times c_{m\max}/d$ e $\rho \times c_{m\max}/d$, nesta ordem.

A Tabela 4 contém as estimativas dos parâmetros λ_i obtidos por meio do MLG e a Tabela 5 apresenta as respectivas probabilidades de significância (p-valor) desses parâmetros, ao nível de significância 5%. A Figura 6

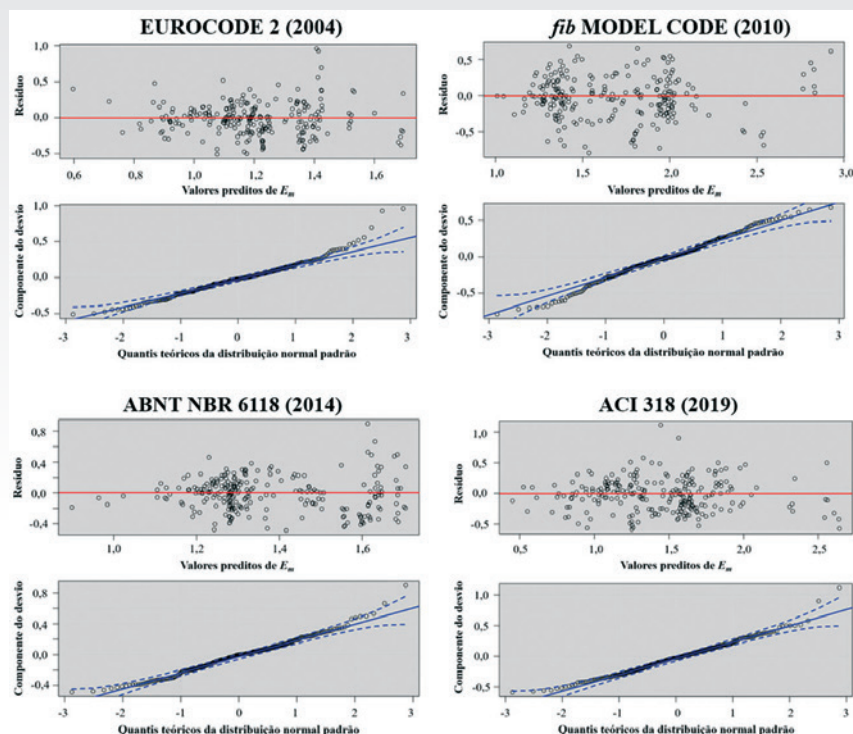


Figura 6
Gráficos de resíduos em (a) e de probabilidade normal com envelope com grau de confiança de 95% em (b)

apresenta a análise de resíduos dos modelos considerados.

Com base na Tabela 5, observam-se graus de significância diferenciados para cada método de previsão com p-valor entre 10^{-6} a 10^{-2} . Constatou-se que em todos os códigos de projeto estudados, a existência de aberturas (A_b) mostrou-se um dos parâmetros mais significativos.

Além da variável A_b , nas instruções normativas EUROCODE 2 (2004) e ACI 318 (2019), a altura útil da laje (d), a existência de armadura de cisalhamento (A_{sw}) e a relação $c_{máx}/d$ também foram significativos. Já, nos códigos fib MODEL CODE (2010) e ABNT NBR 6118 (2014), as interações entre as variáveis $A_b \times c_{máx}/d$ e $\rho \times c_{máx}/d$ foram também significativas.

Por meio das Figura 6, é possível verificar que os resíduos apresentaram comportamento oscilatório em torno do zero. Sendo assim, as covariáveis dos modelos explicam a maior parte da variabilidade da variável res-

posta, indicando um bom ajuste desses modelos.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos parâmetros estatísticos, média e coeficiente de variação da variável erro de modelo (E_m) determinados foi possível concluir que as prescrições dos códigos EUROCODE 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014) foram as mais satisfatórias em prever a carga de ruptura das 249 lajes analisadas. Nestes códigos, os resultados foram mais precisos e menos dispersos, com valores médios da variável E_m para lajes sem aberturas iguais a 1,11 e 1,27, respectivamente e coeficientes de variação iguais a 25,02% para a norma europeia e 18,81% para a norma brasileira.

Para as análises considerando as aberturas nas lajes, os códigos EUROCODE 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014) apresentaram $E_{m,médio}$ iguais a 1,36 e 1,56, respectivamente, e coeficientes de variação iguais a 32,91%

para a norma europeia e 31,17% para a norma brasileira.

As instruções normativas fib MODEL CODE (2010) e ACI 318 (2019) apresentaram resultados mais conservadores, com valores médios de E_m para lajes sem aberturas iguais a 1,71 e 1,34, nessa ordem, e coeficientes de variação praticamente iguais (em torno de 35%). Para as análises considerando as aberturas nas lajes, os códigos fib MODEL CODE (2010) e ACI 318 (2019) apresentaram $E_{m,médio}$ iguais a 1,93 e 1,59, respectivamente, e coeficientes de variação em torno de 44% para ambos os códigos.

Os modelos lineares generalizados construídos para descrever a variável resposta E_m em função de covariáveis significativas apresentaram resíduos com comportamento oscilatório em torno de zero. Sendo assim, as covariáveis dos modelos explicaram a maior parte da variabilidade de E_m , o que indicou um bom ajuste desses modelos. 

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADOLFS, D. V. Análise de confiabilidade de peças de madeira fletidas dimensionadas segundo a NBR: 7190/97. 2011. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-19). Farmington Hills, Michigan, 2019.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2014.
- [4] BECK, A. T. *et al.* Reliability-based evaluation of design code provisions for circular concrete-filled steel columns. Engineering Structures, v. 31, p. 2299-2308, 2009.
- [5] BOLANDIM, E. A.; BECK, A. T.; MALITE, M. Bolted connections in cold-formed steel: reliability analysis for rupture in net section. Journal of Structural Engineering, v.139, p. 748-756, 2013.
- [6] BRANTSCHEN, F. Influence of bond and anchorage conditions of the shear reinforcement on the punching strength of RC slabs. 2016. 27 p. Thèse (Doctorat ès Sciences) – Faculté de L'environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2016.
- [7] COLLINS, M. P. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design, 2001.
- [8] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB – fib Model Code Design Code 2010: Final Draft. Bulletin d'Information, CEB, Lousanne, April 2010.
- [9] EUROCODE 2. Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. European Standard, 2004.
- [10] LIBERATI, E. A. P. Análise de confiabilidade de lajes lisas de concreto armado submetidas à punção. 2019. 310. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2019.
- [11] MARQUE, N. L. A.; NOGUEIRA, C. G. Probabilistic analysis of slab-column connections subjected to punching shear according to the ABNT NBR 6118 (2014) recommendations considering the model error measure. Rev. IBRACON Estrut. Mater., v. 14, n. 6, p. 1-20, 2021.
- [12] MUTTONI, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Structural Journal, v. 105, n. 4, p. 440-450, 2008.
- [13] OLIVEIRA, W. L. A. Análise teórico-experimental de pilares preenchidos de seção circular. 2008. 251f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.