

Comparação de critérios normativos através do erro de modelo de lajes de concreto armado submetidas à punção

Carla Simone de Albuquerque¹, Mauro de Vasconcellos Real¹,
Viviane Leite Dias de Mattos¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande – PPG em Modelagem Computacional, Rio Grande, RS, Brasil
carla19matematica@gmail.com

Resumo

Este artigo compara e avalia a variável aleatória erro de modelo associada aos modelos teóricos presentes nas normas ABNT NBR 6118 (2014 e 2023), ACI 318 (2022), EUROCODE 2 (2004 e 2023) e FIB MC 2020 (2024). O erro de modelo é obtido pela razão entre os resultados experimentais e os valores previstos pelas normas. A análise considera o estado limite último à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, com base em 218 resultados experimentais disponíveis na literatura. Para isso, os modelos normativos foram aplicados desconsiderando os coeficientes parciais de segurança, permitindo estimar os valores médios da resistência última à punção. Os resultados mostram que os modelos normativos NBR 6118 (2014), Nível II da FIB MC2020 (2024) e EUROCODE 2 (2023) apresentaram as melhores aproximações aos dados experimentais, com médias do erro de modelo de 0,993, 0,997 e 1,079, respectivamente. Em contrapartida, os modelos da ACI 318 (2022), NBR 6118 (2023), Nível I da FIB MC2020 (2024) e EUROCODE 2 (2004) subestimaram, em média, as cargas de ruptura em 30,31%, 15,54%, 16,25% e 15,54%, respectivamente. Os resultados indicam que as normas NBR 6118 (2014), Nível II da FIB MC2020 (2024) e EUROCODE 2 (2023) são menos conservadoras, enquanto a ACI 318 (2022) adota uma abordagem significativamente mais conservadora, priorizando a segurança estrutural.

Palavras-chave

Erro de modelo, resistência à punção, resistência experimental.

Introdução

Segundo Albuquerque e Real (2020), um dos principais desafios da Engenharia é garantir a segurança adequada das estruturas, assegurando seu bom desempenho. Para isso, as normas de projeto adotam modelos baseados em estados limites, que estabelecem critérios de segurança a serem considerados no dimensionamento estrutural.

De acordo com Beck (2024), as incertezas de modelo originam-se da simplificação do comportamento estrutural por meio de modelos idealizados. Essas incertezas podem ser representadas por uma variável aleatória denominada erro de modelo, cuja distribuição de probabilidade é obtida por meio de uma caracterização estatística, a partir da comparação entre os resultados de ensaios experimentais e as resistências estimadas pelos modelos teóricos.

Diversos trabalhos vêm sendo realizados com a finalidade de quantificar e analisar o erro de modelo em estruturas de concreto armado (Cervenka *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2020; Liberati *et al.*, 2022; Seventekidis e Giagopoulos 2023; Abood *et al.*, 2024).

Segundo Galdino (2022), as lajes lisas recebem essa denominação devido à ausência de vigas no sistema estrutural, o que permite que as lajes se apoiem diretamente sobre os pilares. Para Araújo (2014), o apoio direto das lajes lisas sobre os pilares provoca uma elevada concentração de tensões cisalhantes nas regiões de conexão entre esses elementos. A principal consequência dessas tensões é a ocorrência de ruptura. Esse fenômeno, denominado punção, caracteriza um estado limite último por cisalhamento nas zonas próximas às cargas concentradas.

Este trabalho tem como objetivo principal comparar e avaliar a variável aleatória erro de modelo associada ao cálculo da resistência última de lajes lisas de concreto armado, conforme os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) [NBR1], ABNT NBR 6118 (2023) [NBR2], EUROCODE 2 (2004) [EC2.1], EUROCODE 2 (2023) [EC2.2], ACI 318 (2022) e FIB Model Code 2020 (2024) [Nível I (FMC1) e Nível II (FMC2)]. Para isso, serão analisadas lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, submetidas ao estado limite último de punção, com base em 218 ensaios experimentais disponíveis na literatura.

Metodologia

A metodologia deste trabalho baseia-se em 218 resultados experimentais extraídos da literatura, referentes à resistência à punção de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento.

Os modelos de cálculo de resistência das normas ABNT NBR 6118 (2023), ACI 318 (2022), EUROCODE 2 (2023) e FIB MC2020 (2024) são avaliados por meio da comparação entre suas previsões e os resultados experimentais, visando à determinação de parâmetros estatísticos do erro de modelo. Em seguida, é realizada uma análise exploratória do conjunto de dados, com o objetivo de investigar a correlação entre os resultados experimentais e as estimativas fornecidas pelos modelos de cálculo.

Crítérios normativos

De acordo com Silva (2022), em lajes apoiadas diretamente sobre pilares, a concentração de carga em uma área reduzida pode provocar a ruptura por punção. Mangalathu *et al.* (2021) destacam que, quando essa falha ocorre, há uma separação física entre o pilar e a laje, comprometendo de forma crítica o equilíbrio da conexão entre ambos, conforme ilustrado na Fig. 1.

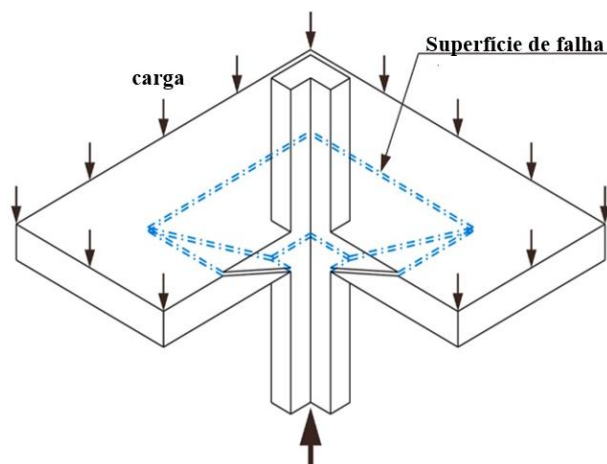


Figura 1 – Modo de falha por punção em lajes lisas.
Fonte: Autores

Na análise do erro de modelo, os valores normativos de resistência são calculados sem os coeficientes parciais de segurança, pois estes se aplicam apenas ao dimensionamento estrutural. Utilizam-se os valores médios das propriedades dos materiais, e o erro de modelo é definido como:

$$E_m = \frac{V_{exp}}{V_m} \quad (1)$$

onde E_m é o erro de modelo, V_{exp} é a resistência do ensaio e V_m é a resistência do modelo.

A resistência à punção na superfície crítica, segundo a ABNT NBR 6118 (2014), é calculada considerando a presença ou ausência de armadura de punção. A Eq. (2) apresenta a estimativa de resistência para lajes sem essa armadura. Na versão de 2023 da norma, as principais alterações referem-se à limitação do fator de escala e da taxa de armadura, ambos limitados a valores menores ou iguais a 2, conforme ilustrado nas Eqs. (3) e (4):

$$V_{m,NBR} = 0,18 \xi^3 \sqrt{100 \rho_l f_c} u \cdot d \quad (2)$$

sendo,

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (3)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 2\% \quad (4)$$

onde: ξ é o fator de escala para punção, f_c é a resistência média à compressão do concreto, d o valor médio da altura efetiva na direção x e y , ρ_l é a taxa de armadura longitudinal em X e ρ_x, ρ_y são as taxas de armadura nas duas direções ortogonais, assim calculadas.

Para lajes sem armadura de cisalhamento, a norma ABNT NBR 6118 (2023) adota os mesmos critérios da EUROCODE 2 (2004). Já a versão mais recente, EUROCODE 2 (2023), recomenda o uso da Eq. (5) para o cálculo da resistência à punção:

$$V_{m,EC2} = 0,6 \cdot k_{pb} \left(100 \rho_1 f_c \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{\frac{1}{3}} b_{0,5} \cdot d \quad (5)$$

onde: k_{pb} é o coeficiente de aumento do gradiente de cisalhamento de punção, que pode ser calculado através de:

$$1 \leq k_{pb} = 3,6 \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5 \quad (6)$$

b_0 é o perímetro torno das áreas, $b_{0,5}$ é o perímetro de controle típico, d_{dg} é um parâmetro que depende do tipo de concreto e de suas propriedades de agregado.

Para lajes sem armadura de cisalhamento, a norma ACI 318 (2022) recomenda que a carga de ruptura por punção na ligação laje-pilar seja determinada exclusivamente pela resistência do concreto, adotando-se o menor valor entre as Eqs. (7), (8) e (9), apresentadas a seguir:

$$V_{m,ACI} = \frac{1}{3} \lambda_s \lambda \sqrt{f_c} b_0 d \quad (7)$$

$$V_{m,ACI} = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f_c} b_0 d \quad (8)$$

$$V_{m,ACI} = \frac{1}{12} \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f_c} b_0 d \quad (9)$$

sendo,

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004d}} \leq 1 \quad (10)$$

onde: λ_s é o fator de modificação do efeito escala. λ é o fator de modificação que leva em consideração a redução das propriedades mecânicas de concretos leves em comparação aos concretos normais de mesmo f_c . Para concreto de densidade normal, considerar $\lambda = 1$. b_0 é o perímetro de controle, α_s : constante que depende da posição do pilar, sendo igual a 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto, β : razão entre a maior dimensão do pilar e a maior largura.

O dimensionamento da punção em lajes lisas, segundo o FIB MC2020 (2024), consiste na comparação entre a resistência disponível e a carga solicitante à punção. Para lajes sem armadura de cisalhamento, a resistência última à punção pode ser expressa como:

$$V_{m,FMC} = K_\Psi \sqrt{f_c} b_0 d_v \quad (11)$$

onde: d_v é a distância do centroide da armadura de flexão à área de apoio. K_Ψ depende da rotação da laje, sendo determinado a partir de seu valor médio por meio de:

$$K_\Psi = \frac{1}{\frac{4}{3} + \frac{15}{32} K_{dg} \Psi d} \quad (12)$$

sendo, Ψ a aproximação da rotação da laje (Eq. 13) e K_{dg} um parâmetro que varia em função do diâmetro máximo do agregado (dg), o diâmetro não deve ser menor que 16 mm, assim, pode ser considerado $K_{dg} = 1$. Para o nível I de aproximação a rotação é:

$$\Psi = 1,5 \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \quad (13)$$

O nível II de aproximação mostra uma formulação mais precisa para determinar a rotação da laje, considerando tanto o momento atuante quanto o momento resistente da laje, conforme mostrado em:

$$\Psi = 1,5 \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \right)^{1,5} \quad (14)$$

sendo, M_{sd} o momento médio atuante por unidade de comprimento da armadura de flexão numa faixa (para a direção considerada) e M_{Rd} é a resistência à flexão média do momento numa faixa de suporte.

Conjunto de dados

O conjunto de dados utilizado neste estudo é o mesmo adotado por Silva Júnior e Gomes (2023) e Nguyen *et al.* (2021), composto por resultados experimentais de 519 lajes lisas ensaiadas por diversos pesquisadores desde 1938. Esse banco de dados está disponível em Ospina *et al.* (2023).

Do banco de dados original, foram excluídas 301 lajes que não apresentaram ruptura exclusivamente por punção. Além disso, os dados remanescentes foram ajustados conforme os critérios estabelecidos pelas normas. As principais variáveis do estudo são: altura útil da laje

(d), largura do pilar (b), resistência média à compressão do concreto (f_c), tensão de escoamento média do aço (f_y), taxa de armadura longitudinal média (ρ), vão de cisalhamento (r_s) e resistência experimental (V_{exp}).

Foi realizada uma análise exploratória dos dados obtidos nos ensaios experimentais, utilizando-se medidas como média, mediana (Md), desvio-padrão (s), coeficiente de variação (cv), valor máximo e mínimo da amostra. Os parâmetros estatísticos que sintetizam as características das variáveis presentes no conjunto de dados estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Medidas resumo das variáveis de entrada

	b (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	r_s (mm)	V_{exp} (kN)
Média	194,70	114,20	1,10	33,58	477,40	671,80	359,00
s	119,54	40,68	0,40	11,45	126,73	299,21	271,56
cv	0,61	0,36	0,37	0,34	0,27	0,45	0,76
$min.$	51,00	53,50	0,30	19,95	250,00	75,00	60,00
25%	120,00	88,50	0,80	24,89	414,00	490,20	200,20
Md	156,00	108,50	1,10	31,07	480,00	686,00	290,00
75%	225,00	124,70	1,50	37,22	548,50	815,00	399,20
max.	901,00	300,00	2,00	70,02	749,00	1725,00	2050,00

Fonte: Autores

A Figura 2 apresenta um *pairplot*, representado por uma matriz simétrica de gráficos. Nesse gráfico, as variáveis analisadas são exibidas na diagonal principal por meio de histogramas, enquanto nas demais células são apresentados diagramas de dispersão acompanhados e coeficientes de correlação. Essa representação gráfica permite uma análise preliminar da possível existência de correlação entre as variáveis do estudo.

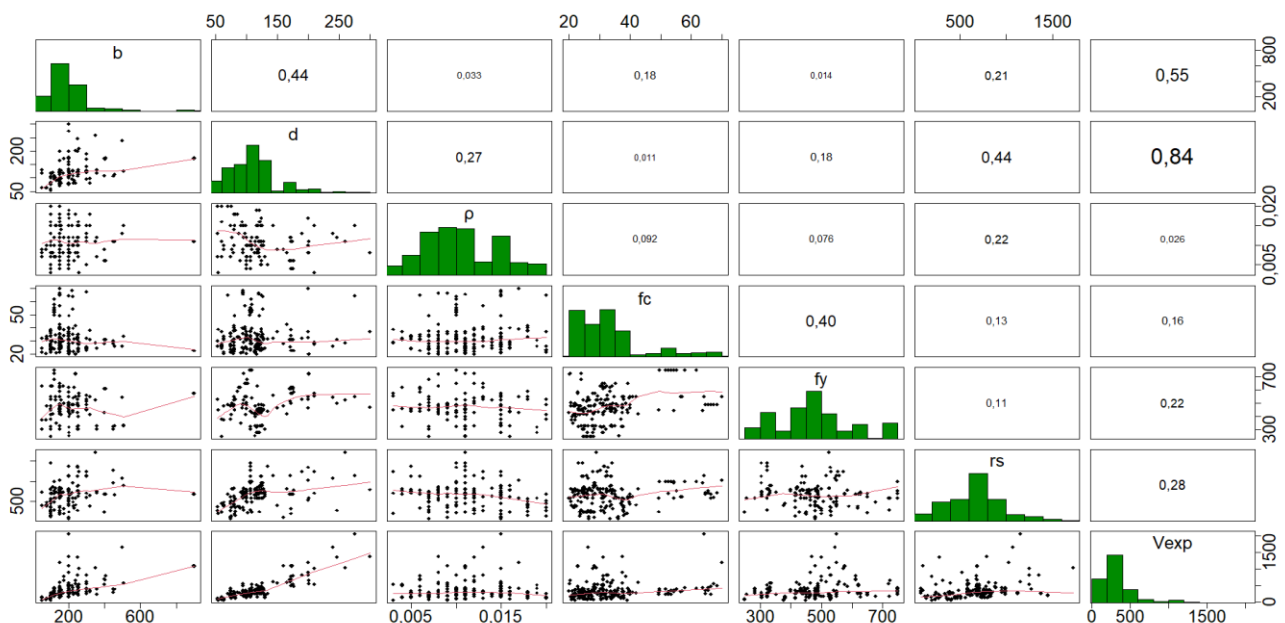


Figura 2 – Análise gráfica das variáveis de entrada do conjunto de dados.

Fonte: Autores

A partir da Fig. 2, identifica-se uma forte correlação entre a altura útil e a carga de ruptura. Por outro lado, não se observa correlação significativa entre os parâmetros relacionados aos materiais (f_c e f_y), o que é coerente, uma vez que as propriedades do concreto não influenciam diretamente as do aço. Em contrapartida, as propriedades geométricas das lajes (d e b) demonstram uma relação proporcional. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, nos ensaios experimentais, lajes com maior altura útil geralmente são apoiadas em pilares de maiores dimensões, sugerindo que o aumento ou a redução do tamanho da laje ocorre de maneira proporcional entre suas dimensões.

Resultados e discussões

Nesta seção, comparam-se os resultados experimentais das cargas de ruptura à punção de lajes lisas com aqueles estimados pelos critérios normativos. O objetivo dessa análise é comparar e estimar a variável aleatória erro de modelo. Foram considerados os modelos preditivos das seguintes normas: ABNT NBR 6118 (2014), ABNT NBR 6118 (2023), ACI 318 (2022), EUROCODE 2 (2004), EUROCODE 2 (2023) e FIB Model Code 2020 (2024).

Os erros de modelo associados a cada norma analisada foram obtidos a partir da comparação entre os resultados experimentais e os valores estimados pelos modelos normativos. Os resultados são sintetizados em um resumo estatístico, apresentado na Tab. 2.

Tabela 2 – Medidas resumo das variáveis erro de modelo

Variáveis	<i>min.</i>	<i>Média</i>	<i>Md</i>	<i>max.</i>	<i>s</i>	<i>cv</i>
$E_{m,NBR1}$	0,580	0,993	0,987	2,148	0,206	0,207
$E_{m,NBR2}$	0,685	1,184	1,160	2,368	0,274	0,231
$E_{m,ACI}$	0,723	1,435	1,413	2,695	0,397	0,277
$E_{m,PMC1}$	0,537	1,194	1,164	2,099	0,322	0,270
$E_{m,PMC2}$	0,418	0,997	1,002	1,655	0,235	0,236
$E_{m,EC2.1}$	0,685	1,184	1,160	2,368	0,274	0,231
$E_{m,EC2.2}$	0,583	1,079	1,067	2,165	0,240	0,223

Fonte: Autores

A análise dos resultados apresentados na Tab. 2 revela que, para todas as variáveis de erro de modelo, com exceção do $E_{m,PMC1}$, as médias são superiores às respectivas medianas, o que sugere uma distribuição assimétrica à direita. Os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação indicam uma elevada dispersão dos dados, evidenciando significativa variabilidade nas resistências estimadas pelos modelos. Além disso, observa-se que, em média, os erros $E_{m,NBR2}$, $E_{m,ACI}$, $E_{m,PMC1}$ e $E_{m,EC2.1}$ apresentam um comportamento conservador.

Os resultados dos modelos de cálculo das normas estudadas são avaliados por meio da comparação entre as previsões de resistência à punção de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento e os resultados experimentais, utilizando a variável aleatória erro de modelo.

Para avaliar o desempenho dos modelos analíticos desenvolvidos, foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos de erro: Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Quadrático Médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). O MAE calcula a média das diferenças absolutas entre os valores previstos e os observados. O RMSE representa a média das diferenças quadráticas, sendo que valores menores indicam melhor desempenho do modelo. O R^2 avalia o grau de ajuste do modelo aos dados, indicando que quanto mais próximo de 1, maior a capacidade explicativa

do modelo. A Fig. 3 apresenta o diagrama de dispersão, juntamente com as métricas MAE, R^2 e RMSE, que comparam as resistências experimentais e as previstas pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), ABNT NBR 6118 (2023), ACI 318 (2022), EUROCODE 2 (2004), EUROCODE 2 (2023) e FIB Model Code 2020 (2024).

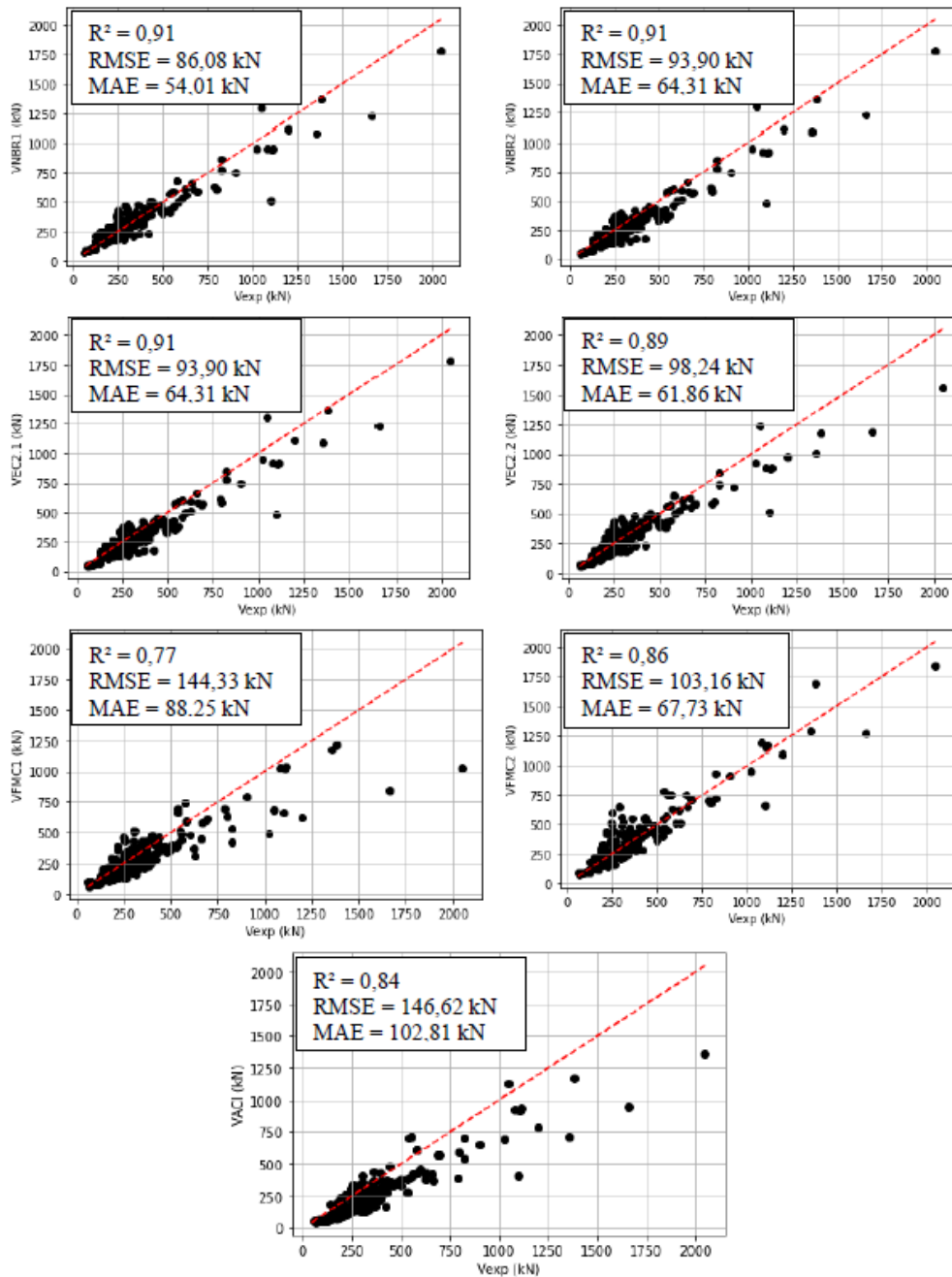


Figura 3 – Modelos de cálculo das normas estudadas
 Fonte: Autores

Os gráficos da Figura 3 indicam que, entre os dados analisados, as normas NBR1, FMC2 e EC2.2 são as menos conservadoras, uma vez que os pontos no diagrama de dispersão se concentram mais próximos da linha diagonal. Além disso, observa-se uma forte correlação positiva entre as variáveis V_{exp} e V_m em todas as normas avaliadas. Em relação às métricas, as

normas NBR2, FMC1, ACI 318 e EC2.1 apresentaram desempenhos semelhantes, sendo mais conservadoras. A Fig. 4 apresenta os erros dos modelos por meio de histogramas, evidenciando o comportamento de cada norma analisada.

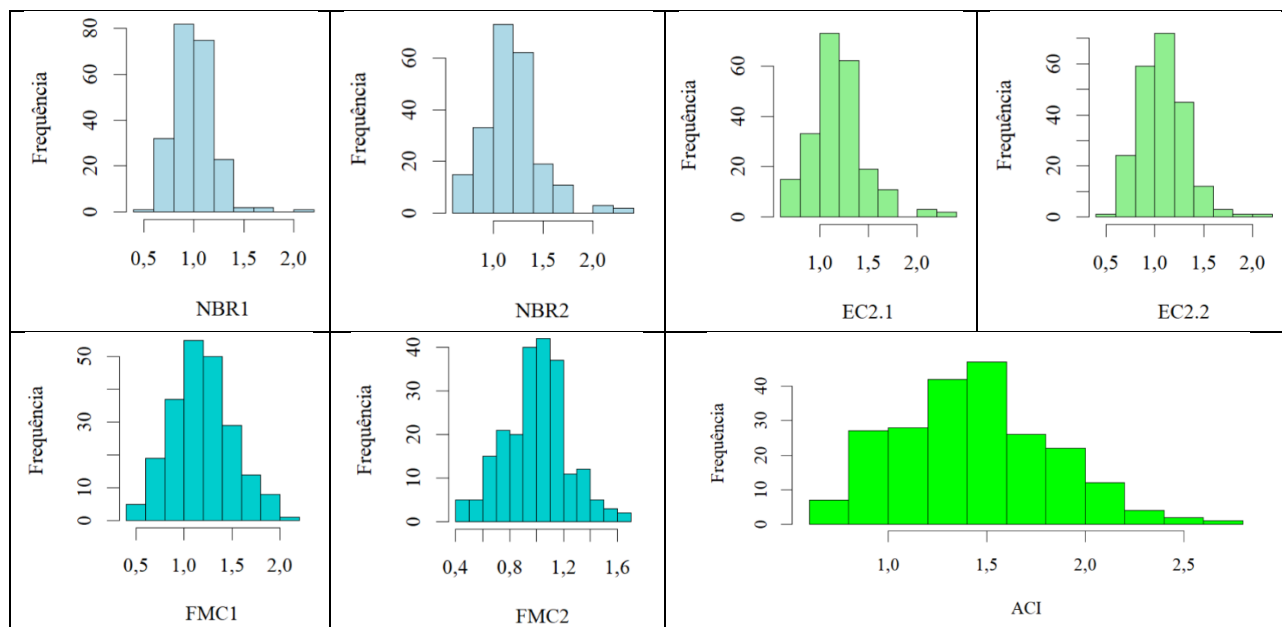


Figura 4 – Histogramas do erro de modelo de cada norma

Fonte: Autores

Conforme ilustrado na Fig. 4, os modelos das normas ACI, NBR2, FMC1, EC2.1 e EC2.2 estimaram, em média, cargas de ruptura 30,31%, 15,54%, 16,25%, 15,54% e 7,9% inferiores aos valores experimentais, respectivamente, apresentando distribuições com cauda à direita da média em seus histogramas. Em contraste, os modelos NBR1 e FMC2 superestimaram levemente as resistências, com médias 0,7% e 0,3% superiores aos resultados experimentais, e com valores fortemente concentrados em torno de 1. A Fig. 5 reforça essa comparação.

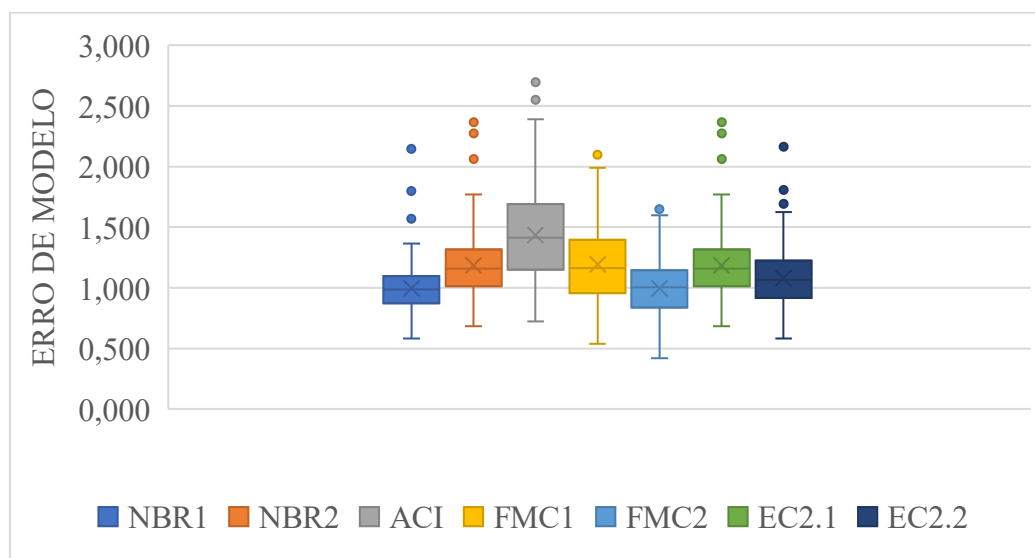


Figura 5 – Comparação dos erros de modelo das normas analisadas

Fonte: Autores



Os gráficos da Fig. 5 mostram que, entre os dados analisados, os modelos das normas NBR1, FMC2 e EC2.2 são menos conservadores, apresentando maior frequência de erros de modelo menores ou iguais a 1,00. Em contraste, a norma ACI se destaca como a mais conservadora, seguida por NBR2, FMC1 e EC2.1. Isso indica que a ACI adota uma abordagem fortemente voltada à segurança. Já os modelos NBR1, FMC2 e EC2.2 apresentam estimativas mais próximas das resistências experimentais à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento.

Conclusões

A avaliação dos modelos de resistência à punção foi baseada em um banco de dados contendo resultados experimentais de 218 lajes lisas sem armadura de cisalhamento. Os erros de modelo foram calculados de acordo com as normas ABNT NBR 6118 (2014 e 2023), ACI 318 (2022), EUROCODE 2 (2004 e 2023) e FIB Model Code 2020 (2024), revelando significativa variabilidade e dispersão nos resultados obtidos.

Os critérios normativos foram avaliados com base na comparação com os dados experimentais. As normas NBR1, FMC2 e EC2.2 apresentaram os resultados mais próximos dos valores reais, indicando maior precisão nas estimativas. Em contraste, a norma ACI foi a que mais se afastou dos dados experimentais, subestimando significativamente a resistência das lajes, o que a caracteriza como uma abordagem altamente conservadora, com forte ênfase na segurança. Já as normas NBR2, FMC1 e EC2.1 apresentaram desempenhos semelhantes, com erros menores em comparação à ACI, embora ainda conservadores em média.

O EUROCODE 2 (2023) atualizou o modelo de cálculo da resistência à punção em relação à versão de 2004, adotando uma abordagem mais simplificada, geral e integrada, capaz de abranger uma maior variedade de condições. A ABNT NBR 6118 (2023), por sua vez, concentrou as mudanças na limitação do fator de escala e da taxa de armadura. Já as normas ACI 318 (2022) e FIB Model Code 2020 (2024), não apresentaram alterações em relação às suas versões anteriores.

Referências

- ABOOD, E. A; ABDALLAH, M. H; ALSAADI, M.; IMRAN, H.; BERNARDO, L. F. A.; DE DOMENICO, D.; HENEDY, S. N. Machine Learning-Based Prediction Models for Punching Shear Strength of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Slabs Using a Gradient-Boosted Regression Tree. **Materials**, vol. 17, 2024.
- ALBUQUERQUE, C. S.; REAL, M. V. Estudo comparativo de métodos de confiabilidade estrutural aplicados a estruturas de concreto, **62º Congresso Brasileiro do concreto**, 2020.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. **ACI 318-22**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2022.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado. 4 vols.** Rio Grande, Editora Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas** – 2. ed. – Rio de Janeiro: Orsa maggiore, 2024.
- CERVENKA, V.; CERVENKA, J.; KADLEC, L. Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. **Structural Concrete**, v.19, n. 6, p. 2004 – 2016, 2018.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1: Eurocode2** - Design of concrete structural, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1: Eurocode2** - Design of concrete structural, 2023.



- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FIB Model Code** for Concrete Structures 2020. Lausanne, 2024.
- GALDINO, B. C. P. **Análise Numérica do Comportamento Pós Puncionamento e Colapso Progressivo em Edifícios em Laje Lisa de Concreto Armado**. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2022.
- LIBERATI, E. A. P.; MARQUES, M. G.; TRAUTWEIN, L. M. Erro de modelo de lajes lisas de concreto armado submetidas a carregamento centrado. **Concreto & Construções**, v.107, p.90 - 96, 2022.
- LU, S.; KOOPIALIPOOR, M.; ASTERIS, P. G.; BAHRI, M.; ARMAGHANI, D. J. **A Novel Feature Selection Approach Based on Tree Models for Evaluating the Punching Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Flat Slabs**. *Materials*, v. 13, p. 1-20, 2020.
- MANGALATHU, S.; SHIN, H.; CHOI, E.; JEON, J. Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement. **Journal of Building Engineering**, v. 39, p. 1-10, 2021.
- NGUYEN, H. D.; TRUONG, G. T.; SHIN, M. **Development of extreme gradient boosting model for prediction of punching shear resistance of r/c interior slabs**. *Engineering Structures*, v. 235, p. 1-14, 2021.
- OSPINA C. E.; BIRKLE G.; WIDIANTO, Y.; Wang S. R.; CATLIN A. C.; PUJOL S. **NEES: ACI 445 punching shear collected databank**, 2023. Disponível em: <<https://datacenterhub.org/resources/256>>.
- SEVENTEKIDIS, P.; GIAGOPOULOS, D. Model error effects in supervised damage identification of structures with numerically trained classifiers. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.184, 2023
- SILVA JÚNIOR, E. S. F.; GOMES, W. J. S. Machine learning models to predict the punching shear strength of reinforced concrete flat slabs. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n.4, 2023.
- SILVA, G. R. **Confiabilidade estrutural de lajes lisas: estado limite último à punção**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Porto do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2022.