

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Nando Maia Germano; UNICEP; germano4755@hotmail.com
Renato Silva Nicoletti; UNICEP/UFSCAR; nicoletti@hotmail.com
João Paulo Boff Almeida; UFSCAR; joopaulo@gmail.com

RESUMO

Elementos em concreto armado estão presentes em praticamente todas as construções. Considerando isso e a alta nos custos dos materiais de construção, faz-se importante a sensibilidade do engenheiro no projeto em concreto armado quanto às escolhas de projeto, as quais são fundamentais para garantir um projeto eficiente. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar, por meio de análises paramétricas, a influência das principais variáveis de projeto na área de aço e na capacidade resistente de pilares, vigas e lajes em concreto armado. Foram analisados 28 casos de pilares, 32 de vigas e 30 de lajes maciças. Nos elementos submetidos predominantemente à flexão (lajes e vigas), a altura foi o parâmetro que exerceu maior influência no momento resistente e na área de aço. Por sua vez, a classe do concreto pouco afetou o momento resistente e a área de aço necessária. Além disso, a largura da viga mostrou sensibilidade intermediária. Especificamente nas lajes, o engastamento dos bordos proporcionou uma redução do momento positivo e da área de aço positiva, além de reduzir as deflexões da laje. Porém, ele causa maior consumo de aço, visto que se faz necessária armadura longitudinal negativa. Quanto aos pilares, se o objetivo for diminuir a área de aço de armadura longitudinal, há um limite até o qual aumentar a resistência do concreto surte resultados. Por sua vez, caso o intuito seja aumentar a capacidade resistente do pilar, deve-se trabalhar com concretos com maiores classes de resistência. Além disso, verificou-se que o comprimento destravado do pilar provoca significativas variações na taxa de armadura.

Palavras-chaves: concreto armado; análise paramétrica; análise de sensibilidade.

Data de recebimento: 04/01/2022

Data do aceite de publicação: 06/07/2022

Data da publicação: 31/08/2022

PARAMETRIC ANALYSIS OF THE MAIN DESIGN VARIABLES IN THE STEEL AREA AND THE RESISTANT CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS, BEAMS AND SLABS

ABSTRACT

Reinforced concrete elements are present in practically all constructions. Considering this and the high costs of construction materials, the sensitivity of the engineer in the project in reinforced concrete regarding the project choices, which are fundamental to guarantee an efficient project, is important. In this context, the present work aimed to investigate, through parametric analysis, the influence of the main design variables in the steel area and the resistant capacity of columns, beams, and slabs in reinforced concrete. 28 cases of columns, 32 beams, and 30 solid slabs were analyzed. In elements predominantly subjected to bending (slabs and beams), height was the parameter that exerted the greatest influence on the resistant moment and steel area. On the other hand, the concrete class had little effect on the resistant moment and the required steel area. In addition, the beam width showed intermediate sensitivity. Specifically, in the slabs, the embedding of the edges provided a reduction of the positive moment and the positive steel area, in addition to reducing the slab deflections. However, it causes greater consumption of steel, since negative longitudinal reinforcement is required. As for columns, if the objective is to decrease the longitudinal reinforcement steel area, there is a limit up to which increasing the strength of the concrete has results. On the other hand, if the intention is to increase the strength of the column, it is necessary to work with concretes with higher strength classes. Furthermore, it was found that the unlocked length of the column causes significant variations in the reinforcement ratio.

Keywords: reinforced concrete; parametric analysis; sensitivity analysis.

1 INTRODUÇÃO

O sistema construtivo em concreto armado é amplamente difundido e utilizado no Brasil. Porém, apesar de sua intensa utilização, tal fato não significa que ele é o mais econômico. Atualmente, com a grande concorrência de mercado, o alto custo dos materiais de construção e a exigência por profissionais de qualidade, é cada vez mais importante a sensibilidade do profissional no projeto em concreto armado quanto às variáveis de que ele depende, a fim de se obter um projeto eficiente, que pondere custo e economia.

Nacionalmente, o projeto de estruturas de concreto armado e protendido é norteado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Nesse contexto, há uma série de trabalhos que realizaram análises paramétricas em elementos estruturais em concreto armado nos últimos 20 anos (Brisotto, 2021; Carvalho Neto, 2019; Costa, 2021; Felix *et al.*, 2017; Kunzier, 2013; Miranda, 2018; Paula, 2020; Real, 2000; Schmaltz, 2015; Silva *et al.*, 2008; R. C. Soares, 2001; S. L. Soares, 2009). Dentre os trabalhos citados, destacam-se as pesquisas de Felix *et al.* (2017), Schmaltz (2015) e Paula (2020).

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Felix *et al.* (2017) realizaram uma análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado. Para tanto, ele utilizou Redes Neurais Artificiais via linguagem orientada a objetos C++. Dentre os principais resultados, os autores observaram que: a carbonatação decresce a medida em que se aumenta a resistência à compressão do concreto; e que o teor de adições influencia na carbonatação de forma inversamente proporcional à resistência do concreto.

Por sua vez, Schmaltz (2015) investigou, por meio de parametrizações, o efeito da armadura em pórticos de concreto armado utilizando a teoria de mecânica do dano. A metodologia descrita pelo pesquisador demonstrou eficiência ao prever micro defeitos e se mostrou útil para auxiliar na compressão dos efeitos de fissuração.

Por fim, Paula (2020) realizou análises paramétricas em pilares mistos de aço e concreto preenchidos. Nesse trabalho, observou-se que o diâmetro do pilar tubular foi o parâmetro que apresentou maior influência na capacidade resistente do elemento estrutural. Em seguida, na escala de sensibilidade, figurou a área de aço de armaduras presente na seção transversal. Por último, o comprimento do pilar foi o parâmetro que menos ocasionou mudanças na capacidade resistente à compressão do pilar.

Dentre os trabalhos nacionais, os quais se pautam na norma técnica brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), não foi identificado nenhum que analisou, simultaneamente, o efeito das principais variáveis de projeto no dimensionamento de vigas, pilares e lajes.

Visto isso, o presente trabalho tem o objetivo de investigar, por meio de análises paramétricas, a influência das variáveis de projeto na capacidade resistente de vigas, pilares e lajes em concreto armado.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho realizou análises paramétricas variando a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), a geometria transversal e a taxa de aço. Especificamente, na análise paramétrica, objetivou-se estudar os seguintes parâmetros:

- Influência do f_{ck} , da altura da seção transversal e do comprimento destravado na capacidade resistente à compressão e na área de aço de armadura longitudinal de pilares;
- Influência do f_{ck} e da altura e da largura da seção na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço de armadura longitudinal de vigas;
- Influência do f_{ck} , da espessura da laje e do tipo de vinculação na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço de armadura longitudinal de lajes maciças.

Com esse intuito, foram analisados 28 casos de pilares, 32 de vigas e 30 de lajes maciças. Nas parametrizações, admitiu-se:

- Seção transversal retangular nas vigas e pilares;
- Largura da seção transversal (b_w) dos pilares e vigas igual a 19 cm;
- Cobrimento da armadura igual a 3,0 cm para vigas e pilares e 2,5 cm para lajes;

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

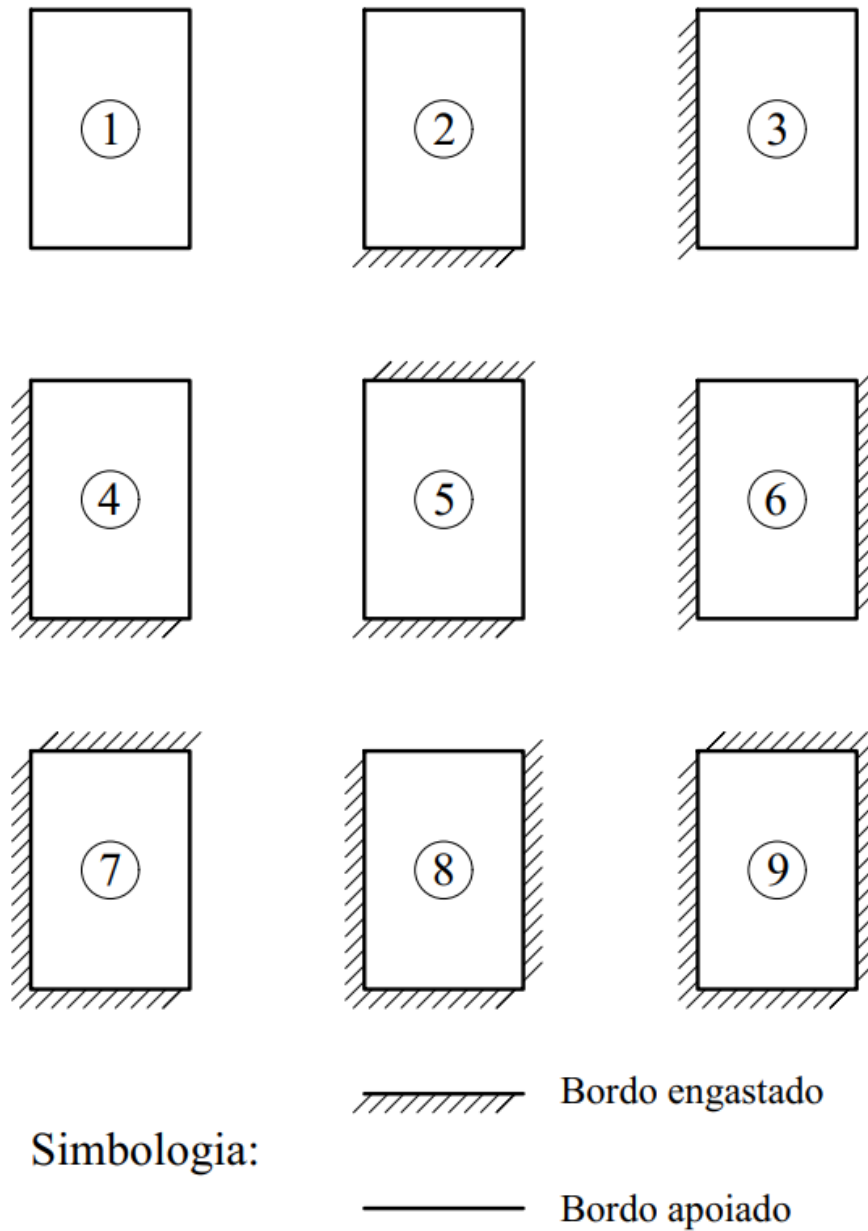
- Armaduras com aço CA-50;
- Armadura transversal com diâmetro de 5 mm;
- Armadura longitudinal com diâmetro de 10 mm;
- Lajes quadradas com vão fixo de 3,50 m;
- Vão das vigas igual a 10 vezes a altura da seção transversal;
- A análise do pilar apenas em relação ao eixo de maior inércia;
- Pilares centrais, isto é, com excentricidade inicial igual a zero. Além disso, considerou-se excentricidade de fôrma nula;
- Carga axial de compressão de projeto (N_d) solicitando os pilares com intensidade de 1.120 kN, equivalente a um edifício com cinco pavimentos dotado de uma carga distribuída de 10 kN/m², atuante numa área de influência de 16 m² (4x4 m), considerando um coeficiente majorador de 1,4;
- Carga vertical distribuída de projeto (p_d) nas lajes igual a 14 kN/m², equivalente a uma carga vertical distribuída característica de 10 kN/m², ponderada por um coeficiente majorador igual a 1,4;
- Carga vertical linear nas vigas (q_d) igual a $2,5 \cdot L$, em kN/m, sendo L o vão longitudinal da viga. Tal carga é obtida pela consideração de que, numa laje quadrada totalmente apoiada com vão L, 25% da carga total na laje vai para cada uma das vigas que a circundam; e que a carga vertical distribuída de projeto nas lajes é de 14 kN/m².

Para auxiliar na determinação da área de aço de armadura longitudinal dos pilares, foram utilizados os ábacos elaborados por Venturini e Rodrigues (1987) para o dimensionamento de peças retangulares de concreto armado, solicitadas à flexão reta.

Na parametrização do tipo de vinculação das lajes, foram analisadas as 9 situações apresentadas na Figura 1. Tais tipologias são definidas no livro de Carvalho e Figueiredo Filho (2014). Eles apresentam uma metodologia para determinar os momentos internos que solicitam a laje e esta foi utilizada no presente trabalho.

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Figura 1: Tipos de vinculação de laje.



Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

Os Quadros 1, 2 e 3, respectivamente, apresentam as propriedades dos casos estudados para pilares, vigas e lajes maciças, respectivamente.

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Quadro 1: Descrição dos pilares analisados.

Caso	Parametrização	b [m]	h [m]	L [m]	n_{pavimentos}	N_d [kN]	f_{ck} [kN/m²]
1	Estudo da influência do f _{ck}	0,19	0,40	4,00	5	1.120	15.000
2		0,19	0,40	4,00	5	1.120	20.000
3		0,19	0,40	4,00	5	1.120	25.000
4		0,19	0,40	4,00	5	1.120	30.000
5		0,19	0,40	4,00	5	1.120	35.000
6		0,19	0,40	4,00	5	1.120	40.000
7		0,19	0,40	4,00	5	1.120	45.000
8		0,19	0,40	4,00	5	1.120	50.000
9	Estudo da influência da altura da seção transversal	0,19	0,20	4,00	5	1.120	30.000
10		0,19	0,25	4,00	5	1.120	30.000
11		0,19	0,30	4,00	5	1.120	30.000
12		0,19	0,35	4,00	5	1.120	30.000
13		0,19	0,40	4,00	5	1.120	30.000
14		0,19	0,45	4,00	5	1.120	30.000
15		0,19	0,50	4,00	5	1.120	30.000
16		0,19	0,55	4,00	5	1.120	30.000
17		0,19	0,60	4,00	5	1.120	30.000
18		0,19	0,65	4,00	5	1.120	30.000
19		0,19	0,70	4,00	5	1.120	30.000
20		0,19	0,75	4,00	5	1.120	30.000
21	0,19	0,80	4,00	5	1.120	30.000	
22	Estudo da influência do comprimento destravado	0,19	0,40	3,00	5	1.120	30.000
23		0,19	0,40	3,50	5	1.120	30.000
24		0,19	0,40	4,00	5	1.120	30.000
25		0,19	0,40	4,50	5	1.120	30.000
26		0,19	0,40	5,00	5	1.120	30.000
27		0,19	0,40	5,50	5	1.120	30.000
28		0,19	0,40	6,00	5	1.120	30.000

Fonte: Elaborado pelos autores.

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Quadro 2: Descrição das vigas analisadas.

Caso	Parametrização	b_w [m]	h [m]	L [m]	p_d [kN/m]	f_{ck} [kN/m²]
1	Estudo da influência do f _{ck}	0,19	0,50	5,00	12,50	15.000
2		0,19	0,50	5,00	12,50	20.000
3		0,19	0,50	5,00	12,50	25.000
4		0,19	0,50	5,00	12,50	30.000
5		0,19	0,50	5,00	12,50	35.000
6		0,19	0,50	5,00	12,50	40.000
7		0,19	0,50	5,00	12,50	45.000
8		0,19	0,50	5,00	12,50	50.000
9	Estudo da influência da altura da seção transversal	0,19	0,20	2,00	5,00	30.000
10		0,19	0,25	2,50	6,25	30.000
11		0,19	0,30	3,00	7,50	30.000
12		0,19	0,35	3,50	8,75	30.000
13		0,19	0,40	4,00	10,00	30.000
14		0,19	0,45	4,50	11,25	30.000
15		0,19	0,50	5,00	12,50	30.000
16		0,19	0,55	5,50	13,75	30.000
17		0,19	0,60	6,00	15,00	30.000
18		0,19	0,65	6,50	16,25	30.000
19		0,19	0,70	7,00	17,50	30.000
20	0,19	0,75	7,50	18,75	30.000	
21	0,19	0,80	8,00	20,00	30.000	
22	Estudo da influência da largura da seção transversal	0,10	0,50	5,00	12,50	30.000
23		0,12	0,50	5,00	12,50	30.000
24		0,14	0,50	5,00	12,50	30.000
25		0,16	0,50	5,00	12,50	30.000
26		0,18	0,50	5,00	12,50	30.000
27		0,20	0,50	5,00	12,50	30.000
28		0,22	0,50	5,00	12,50	30.000
29		0,24	0,50	5,00	12,50	30.000
30		0,26	0,50	5,00	12,50	30.000
31		0,28	0,50	5,00	12,50	30.000
32		0,30	0,50	5,00	12,50	30.000

Fonte: Elaborado pelos autores.

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Quadro 3: Descrição das lajes maciças analisadas.

Caso	Parametrização	$l_x = l_y$ [m]	h [m]	f_{ck} [kN/m²]	Tipo de vinculação
1	Estudo da influência do f_{ck}	3,50	0,12	15.000	1
2		3,50	0,12	20.000	1
3		3,50	0,12	25.000	1
4		3,50	0,12	30.000	1
5		3,50	0,12	35.000	1
6		3,50	0,12	40.000	1
7		3,50	0,12	45.000	1
8		3,50	0,12	50.000	1
9	Estudo da influência da altura da seção transversal	3,50	0,08	30.000	1
10		3,50	0,09	30.000	1
11		3,50	0,10	30.000	1
12		3,50	0,11	30.000	1
13		3,50	0,12	30.000	1
14		3,50	0,13	30.000	1
15		3,50	0,14	30.000	1
16		3,50	0,15	30.000	1
17		3,50	0,16	30.000	1
18		3,50	0,17	30.000	1
19		3,50	0,18	30.000	1
20		3,50	0,19	30.000	1
21	3,50	0,20	30.000	1	
22	Estudo da influência do tipo de vinculação	3,50	0,12	30.000	1
23		3,50	0,12	30.000	2
24		3,50	0,12	30.000	3
25		3,50	0,12	30.000	4
26		3,50	0,12	30.000	5
27		3,50	0,12	30.000	6
28		3,50	0,12	30.000	7
29		3,50	0,12	30.000	8
30		3,50	0,12	30.000	9

Fonte: Elaborado pelos autores.

Todas as etapas de dimensionamento das vigas, pilares e lajes maciças foram realizadas com base nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

3 RESULTADOS

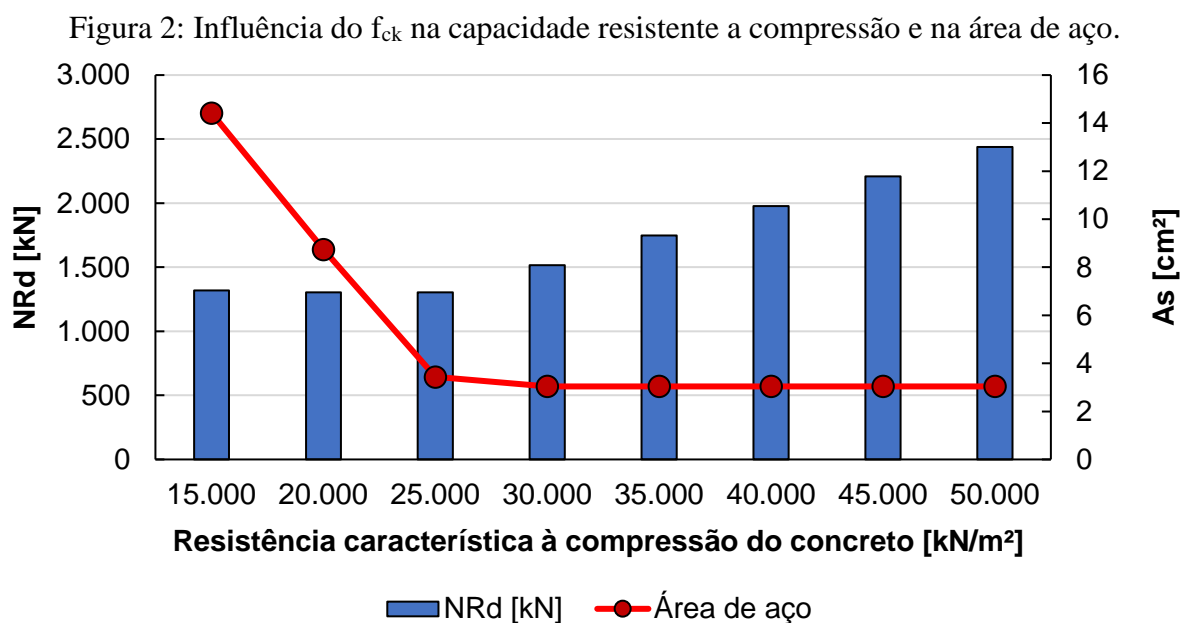
3.1. Pilares

No dimensionamento dos pilares, quando pertinente, a metodologia utilizada para calcular a excentricidade de segunda ordem foi o método aproximado do pilar padrão com curvatura máxima.

3.1.1. Influência f_{ck} da seção transversal do pilar na capacidade resistente à compressão e na área de aço

A

Figura 2 apresenta a influência da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) na capacidade resistente à compressão do pilar (N_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na

Figura 2, observa-se que, ao aumentar o f_{ck} de 15.000 para 25.000 kN/m^2 a capacidade resistente praticamente não se altera. Por outro lado, há uma redução significativa na área de aço de 76%. Por sua vez, ao aumentar o f_{ck} de 25.000 até 50.000 kN/m^2 , nota-se que ocorre o

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

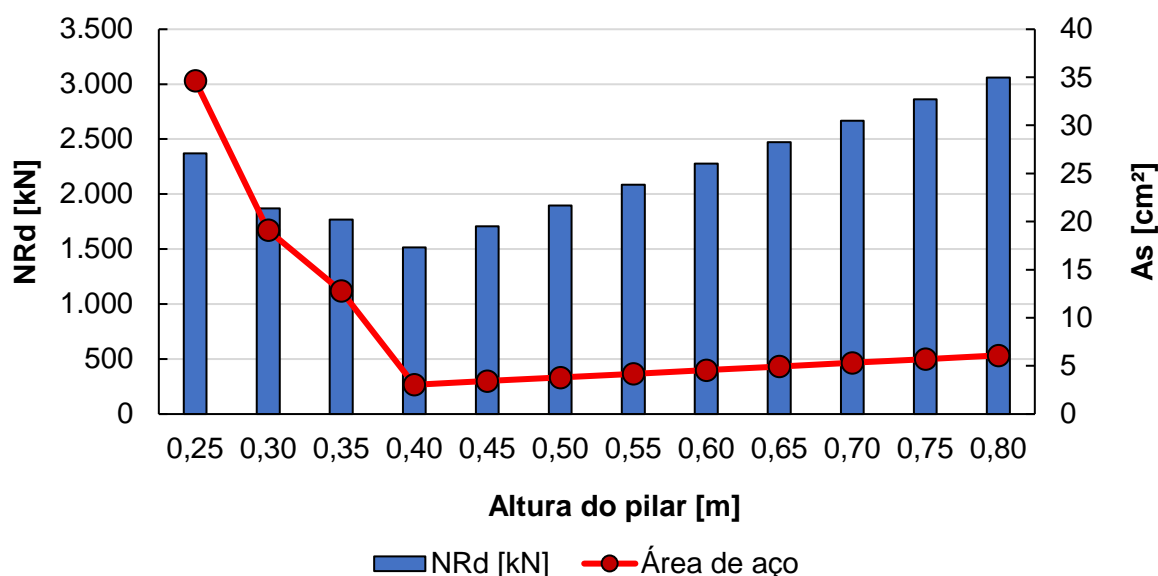
oposto, isto é, a área de aço praticamente não varia (mudança inferior a 1%) e a capacidade resistente tem um aumento de 47%.

Assim pode-se concluir que, se o objetivo for diminuir a área de aço, há um limite até o qual é viável aumentar o f_{ck} . Já se o objetivo for aumentar a capacidade resistente, faz-se necessário utilizar concretos com classe de resistência superior a tal limite. No caso, foi preciso considerar concretos com classes superiores à C25.

3.1.2. Influência altura da seção transversal do pilar na capacidade resistente à compressão e na área de aço

A Figura 3 apresenta a influência da altura da seção transversal do pilar na capacidade resistente à compressão (N_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s).

Figura 3: Influência da altura da seção transversal do pilar na capacidade resistente e na área de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

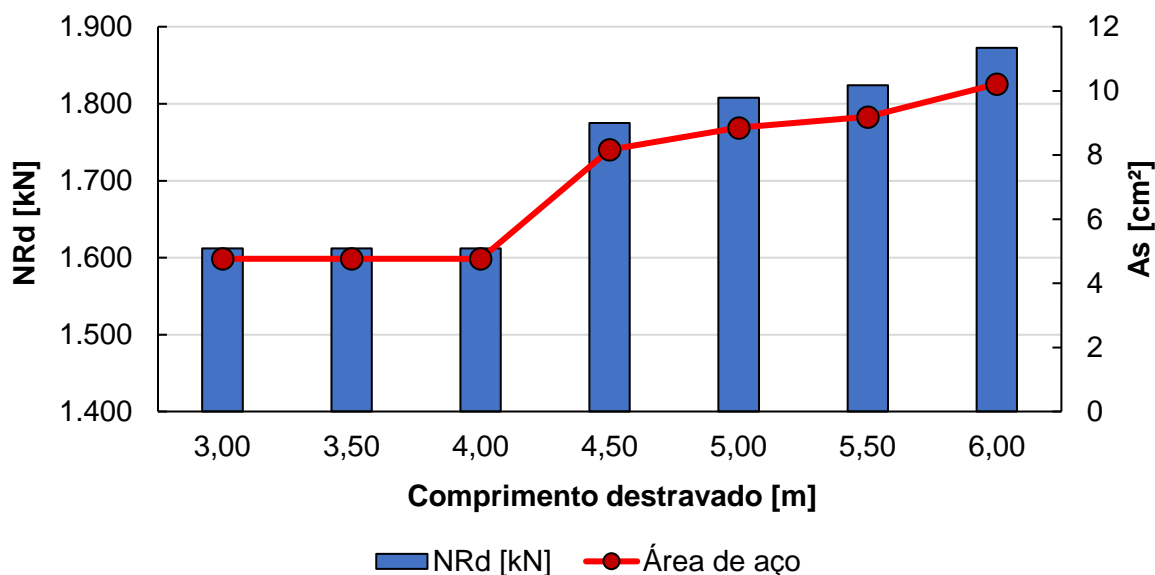
Observando a Figura 3, verifica-se que, ao aumentar a altura do pilar de 0,25 m para 0,40 m, a capacidade resistente à compressão do pilar apresentou uma redução de 34% e área de aço de 91%. Ao aumentar a altura do pilar de 0,40 m até 0,80 m, tanto a capacidade resistente quanto a área de aço apresentaram aumentos proporcionais da ordem 1:1, isto é, de 100%. Detalhadamente, a altura do pilar influenciou significativamente somente até um cerco limite, que, no caso, foi 0,40 m. Tal limite foi definido pela área de aço mínima de armadura longitudinal estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, para alturas superiores a 0,40 m, o pilar passou a ser armado com a taxa mínima prescrita pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e obteve-se aumentos mais significativos na capacidade resistente.

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA
CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO**

3.1.3. Influência do comprimento destravado na capacidade resistente à compressão e na área de aço

A Figura 4 apresenta a influência do comprimento destravado dos pilares na capacidade resistente a compressão (N_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s).

Figura 4: Influência do comprimento destravado na capacidade resistente a compressão e na área de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando a Figura 4, nota-se que a variação do comprimento destravado de 3 m até 4 m não exerceu influência na capacidade resistente à compressão e nem na área de aço. Por sua vez, ao variar o comprimento destravado de 4 m até 6 m, fez-se necessário um aumento da área de aço longitudinal de 114% e, conseqüentemente, houve um aumento na capacidade resistente à compressão de 16%. Em outras palavras, foi preciso mais aço para atender às verificações decorrentes de um maior comprimento destravado.

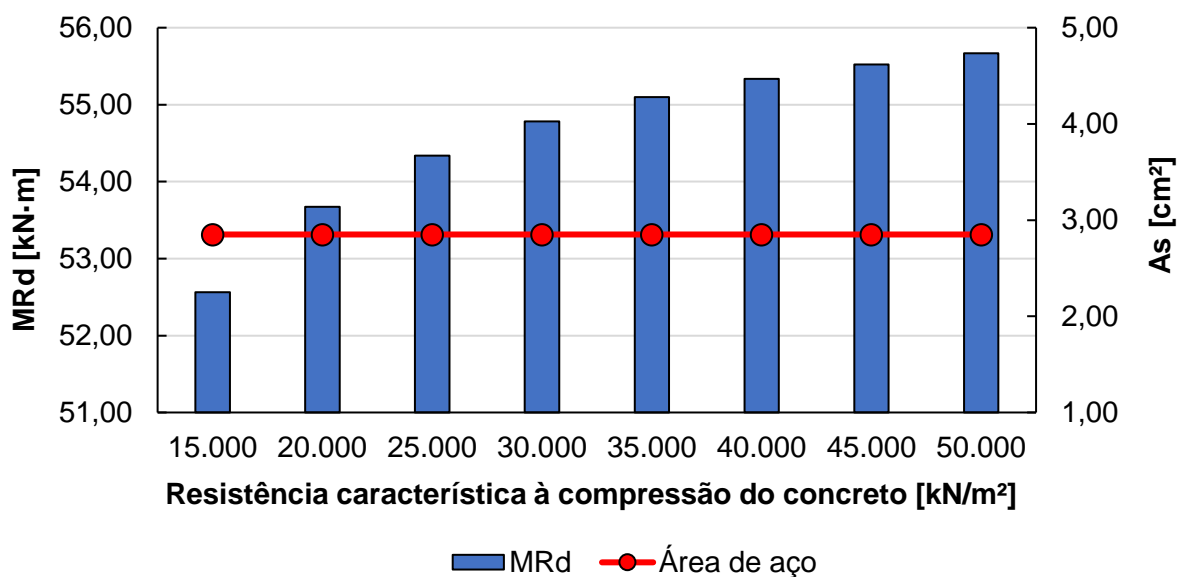
3.2. Vigas

3.2.1. Influência do f_{ck} no momento resistente da viga

A Figura 5 apresenta a relação entre a resistência característica à compressão da viga (f_{ck}) e sua capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}).

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Figura 5: Influência do f_{ck} do concreto na capacidade resistente ao momento fletor.



Fonte: Elaborado pelos autores.

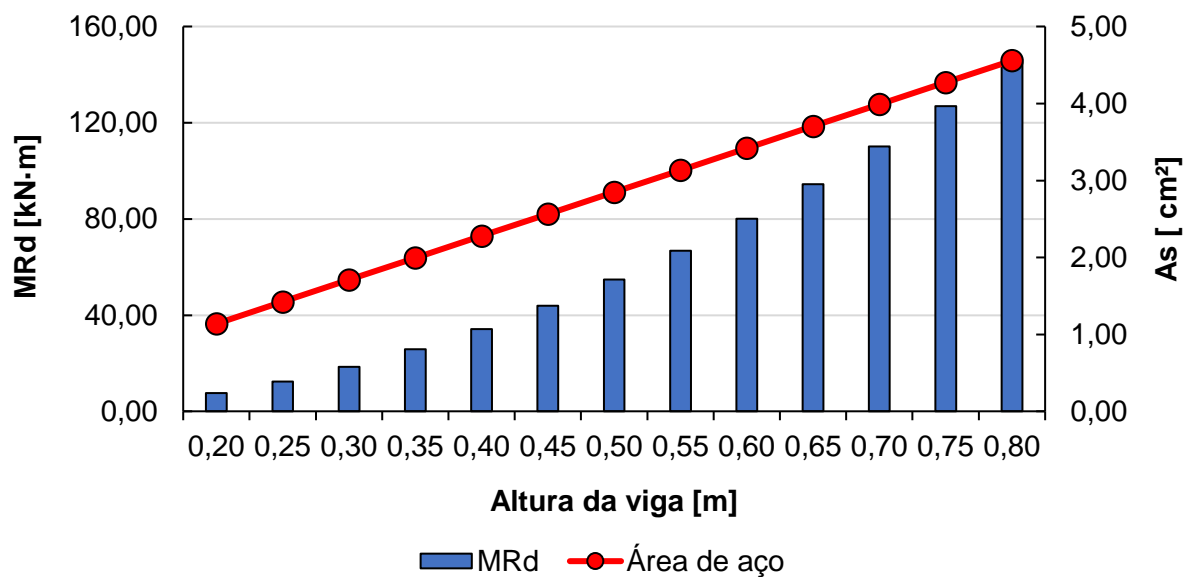
Pela Figura 5, nota-se que, ao aumentar o f_{ck} de 15.000 até 25.000 kN/m^2 , o aumento da capacidade resistente à flexão da viga foi de 3,4%. Por sua vez, com o f_{ck} variando de 25.000 a 50.000 kN/m^2 , o aumento do M_{Rd} foi ainda menos expressivo - apenas 2,4%. No total, ao se elevar o f_{ck} em 233% (da classe C15 para a C50), o M_{Rd} aumentou 6%.

Trata-se de uma relação média entre as variáveis de 1:0,025, aproximadamente. Visto isso, conclui-se que a resistência característica à compressão do concreto pouco contribui para sua capacidade resistente à flexão.

3.2.2. Influência da altura da viga na capacidade resistente ao momento fletor

A Figura 6 apresenta a relação entre a altura da viga e sua capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}).

Figura 6: Influência da altura da seção transversal na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço longitudinal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

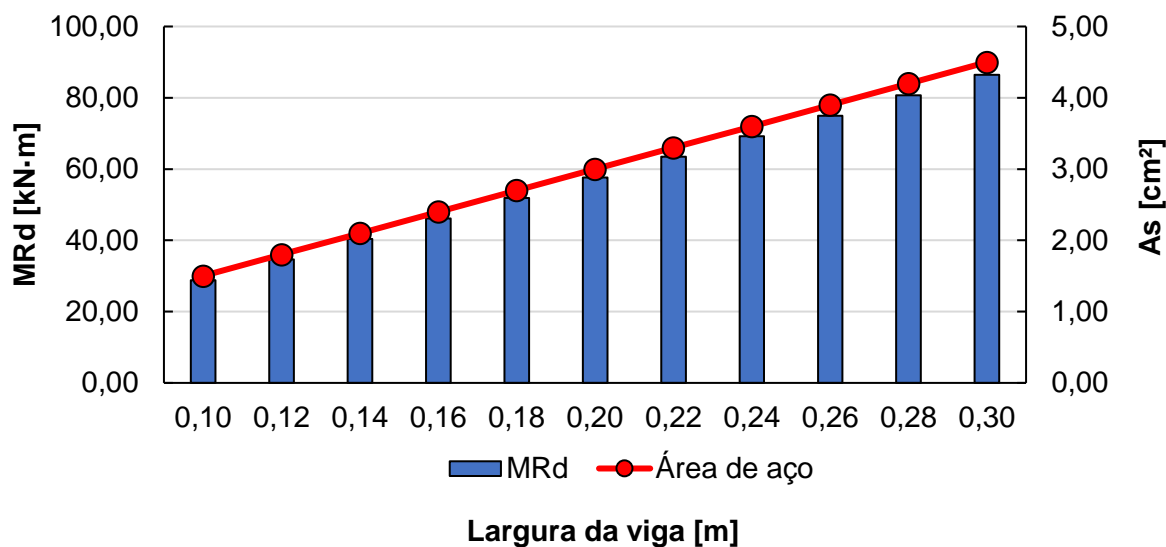
Observando a Figura 6, nota-se que ao aumentarmos a altura da viga, o aumento do momento resistente é quase que exponencial. Para vigas com 0,20 m de altura, a capacidade resistente à flexão é de 7,97 kN·m. Já para vigas com 0,80 m de altura (aumento de 400%), a capacidade resistente ao momento fletor é de 152,63 kN·m, constituindo um aumento de 1.815% em relação à viga com altura de 0,20 m. Vale ressaltar ainda que, como foi utilizada taxa de armadura igual a duas vezes a mínima e esta é proporcional às dimensões da seção, a área de aço cresceu linearmente com o aumento da altura da viga.

Assim, a relação média entre a altura da viga e o M_{Rd} é de 1:4,54, aproximadamente. Portanto, verifica-se que a altura da viga possui uma influência muito expressiva na capacidade resistente à flexão. Isso justifica-se pelo fato de que, quanto maior a altura da viga, maior é o braço de alavanca entre a região comprimida e a região tracionada da viga de concreto.

3.2.3. Influência da largura da viga na capacidade resistente ao momento fletor

A Figura 7 apresenta a relação entre a largura da viga e sua capacidade resistente ao momento fletor (M_{Rd}).

Figura 7: Influência da largura da seção transversal na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço longitudinal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando a Figura 7, nota-se que um aumento de 200% na largura da viga (de 0,10 m para 0,30 m) provocou um aumento da capacidade resistente à flexão de 200% também. Trata-se de um aumento de ordem 1:1, com comportamento linear.

Novamente, vale ressaltar que a área de aço cresceu linearmente pelo fato de a armadura mínima ser diretamente e linearmente proporcional às dimensões da seção transversal da viga.

Logo, a capacidade resistente ao momento fletor é sensível e diretamente proporcional à largura da seção transversal da viga. Tal parâmetro influencia mais que o f_{ck} e menor que a altura da viga.

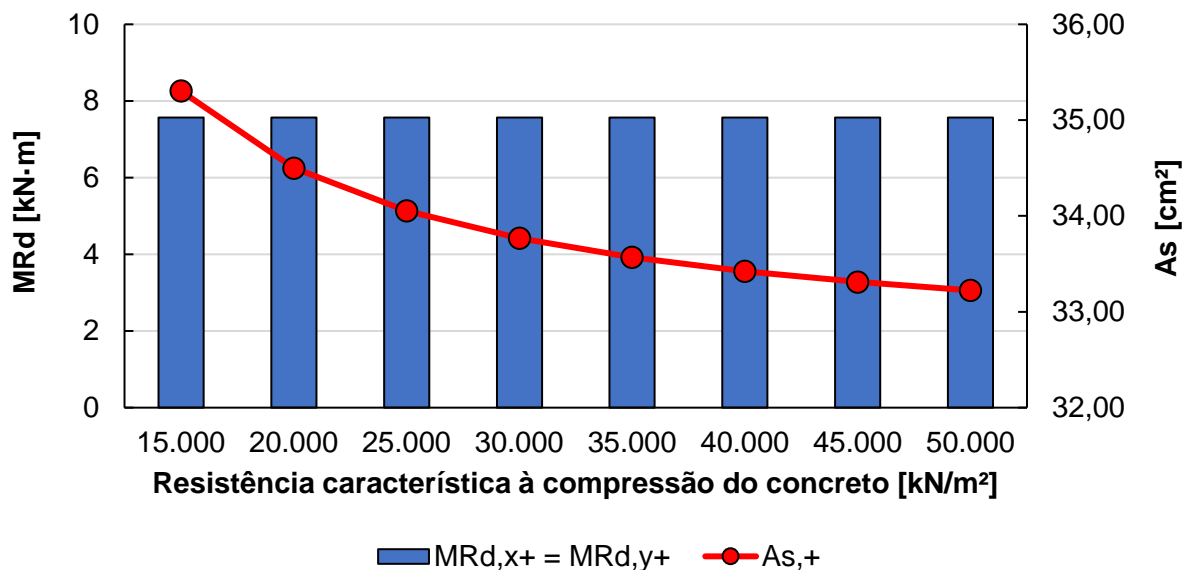
3.3. Lajes

3.3.1. Influência do f_{ck} na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço

A Figura 8 apresenta a influência da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) na capacidade resistente ao momento fletor da laje (M_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s).

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

Figura 8: Influência do f_{ck} do concreto na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço longitudinal.



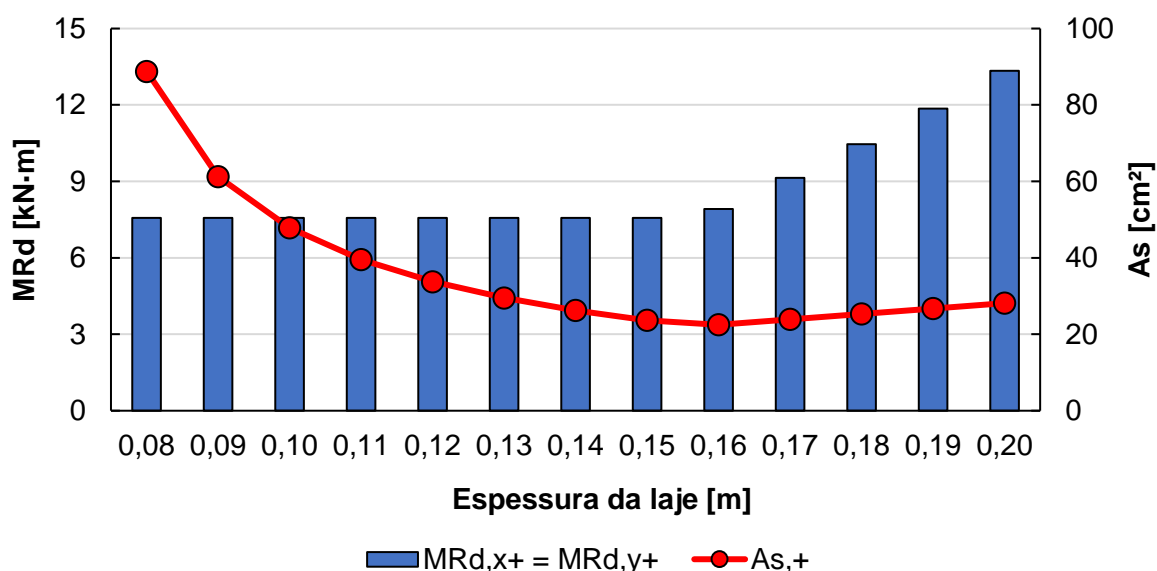
Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela Figura 8, verifica-se que, para as condições admitidas, um aumento do f_{ck} do concreto em 233% (de 15.000 kN/m^2 para 50.000 kN/m^2), a área de aço total necessária foi reduzida em 6,3% (de 35,3 cm^2 para 33,2 cm^2). De modo geral, não foi uma redução tal expressiva e que se justifica, economicamente, pelo aumento do f_{ck} do concreto, o que também possui um custo significativo.

3.3.2. Influência da espessura da laje na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço

A Figura 9 apresenta a influência da espessura da laje na capacidade resistente ao momento fletor da laje (M_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s).

Figura 9: Influência da espessura da laje na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço longitudinal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

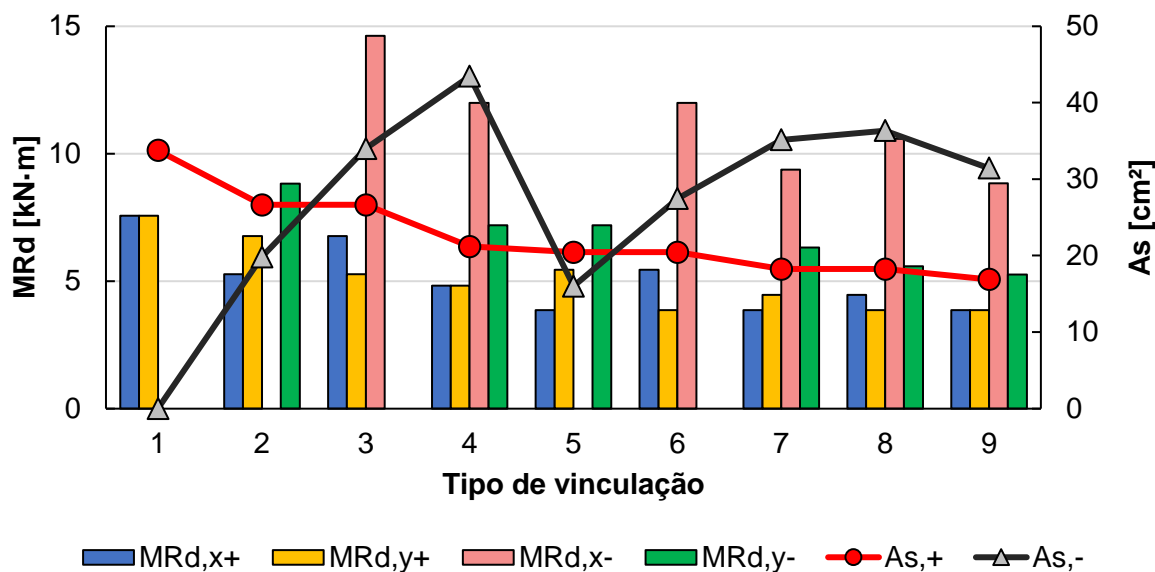
Na Figura 9 é possível observar que quando se varia a altura da laje de 8 cm até 16 cm, a área de aço diminui de 88,78 cm² para 23,65 cm², uma redução percentual de 74%. Por sua vez, comparando uma laje com espessura de 17 cm com uma de 20 cm de espessura, houve um aumento de 25% na área de aço total necessária (de 22,51 cm² para 28,14 cm²). Isso ocorreu, pois, a partir da espessura de 17 cm, a armadura mínima passou a ser maior que a armadura calculada.

Portanto, conclui-se que existe um limite até o qual o aumento de espessura proporciona reduções expressivas da taxa de aço e que tais parâmetros apresentam grande sensibilidade entre si.

3.3.3. Influência da vinculação na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço

A Figura 10 apresenta a influência das vinculações da laje na capacidade resistente ao momento fletor da laje (M_{Rd}) e na área de aço de armadura longitudinal (A_s). Nessa parametrização, foi analisada a armadura positiva (A_s^+) e a negativa (A_s^-), bem como a capacidade resistente à flexão positiva e negativa nas direções x e y (M_{Rd,x^+} , M_{Rd,y^+} , M_{Rd,x^-} e M_{Rd,y^-} , respectivamente).

Figura 10: Influência do tipo de vinculação na capacidade resistente ao momento fletor e na área de aço longitudinal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela Figura 10, observa-se que o engastamento gera um momento negativo na borda das vigas, ocasionando a necessidade de armadura negativa para resistir a tais solicitações. Apesar desse esforço e armadura adicional, há uma redução do momento positivo e, conseqüentemente, da área de aço de armadura longitudinal positiva.

Não é possível delinear um comportamento claro entre as variáveis para realizar afirmações sobre qual a melhor escolha de projeto. O engastamento dos bordos proporciona uma redução do momento positivo e da área de aço positiva, além de reduzir as deflexões da laje. Porém, ele causa um maior consumo de aço, visto que se faz necessária a armadura negativa.

Assim, pode-se afirmar que a escolha do tipo de vinculação depende, acima de tudo, das peculiaridades do projeto.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o objetivo de investigar, por meio de análises paramétricas, a influência das principais variáveis de projeto. No pilar, foi analisado a influência dessas variáveis na capacidade resistente a compressão e na área de aço longitudinal resultante. Por sua vez, nas vigas e nas lajes, analisou a influência na capacidade resistente à flexão e nas áreas de aço de armadura longitudinal.

Da análise dos pilares, verificou-se que, se o objetivo for reduzir a área de aço de armadura longitudinal, há um limite até o qual aumentar o f_{ck} seja a solução. Por sua vez, caso se busque aumentar a capacidade resistente do pilar, deve-se trabalhar com concretos com

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

maiores classes de resistência. Além disso, verificou-se que o comprimento destravado do pilar causa significativas variações da área de aço de armadura longitudinal necessária.

Já na análise paramétrica das vigas, o parâmetro que exerceu maior influência na capacidade resistente ao momento fletor foi a altura da viga, pelo fato desse parâmetro estar diretamente relacionado com o braço de alavanca existente entre as regiões tracionada e comprimida do concreto. A relação média entre a altura e o M_{Rd} foi de 1:4,54. Na sequência, o fator de maior sensibilidade foi a largura da viga, com relação média. Por fim, tem-se o f_{ck} do concreto, que pouco influenciou o M_{Rd} , tendo apresentado relação média de 1:0,025.

Por fim, similarmente ao observado nas vigas, o f_{ck} do concreto exerceu pouca influência na área de aço de armadura longitudinal e a espessura da laje foi o parâmetro que mais causou alterações na quantidade de aço. Já no estudo da influência das vinculações, verificou-se que não é possível delinear um comportamento claro entre as variáveis para realizar afirmações sobre qual a melhor escolha de projeto. Nesse contexto, o engastamento dos bordos proporciona uma redução do momento positivo e da área de aço positiva, além de reduzir as deflexões da laje. Porém, ele causa maior consumo de aço, uma vez que se faz necessária a armadura negativa. Por outro lado, o carregamento externo é diretamente e linearmente proporcional com capacidade resistente ao momento fletor e à área de aço.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises paramétricas para estudar a influência das variáveis de projeto em lajes treliçadas, lajes nervuradas, lajes alveolares, pilares laterais, pilares de canto, vigas em balanço e vigas protendidas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*.
- Brisotto, D. S. ; d'Avilla, V. M. R. ; B. E. (2021). Análise paramétrica de um modelo de transferência de tensão por aderência em peças de concreto armado fletidas. *Estudos Tecnológicos Em Engenharia*, 3(2), 92–111.
- Carvalho Neto, J. J. (2019). *Análise de seções de concreto armado submetidas à flexo-compressão reta e oblíqua*.
- Carvalho, R. C., & Figueiredo Filho, J. R. (2014). *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado* (2nd ed.). EdUFSCar.
- Costa, L. F. S. C. (2021). *Análise termomecânica e paramétrica de estruturas de concreto armado submetidas a um incêndio*.
- Felix, E. F., Carrazedo, R., & Possan, E. (2017). Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 302–316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>
- Kunzier, P. S. (2013). *Análise paramétrica por elementos finitos de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma*.

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE PROJETO NA ÁREA DE AÇO E NA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES, VIGAS E LAJES EM CONCRETO ARMADO

- Miranda, W. F. (2018). *Análise paramétrica de vibrações em pavimentos de concreto armado*.
- Paula, M. R. Q. (2020). *Análise paramétrica do modelo de dimensionamento de pilar misto de aço preenchido com concreto*.
- Real, M. v. (2000). *Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos*.
- Schmaltz, F. A. V. ; P. J. W. M. ; B. C. M. P. ; S. M. W. R. (2015). Efeito paramétrico da armadura em pórticos de concreto armado utilizando mecânica do dano. *Revista Eletrônica de Educação Da Faculdade Araguaia*, 8, 192–213.
- Silva, J. L., el Debs, M. K., & Beck, A. T. (2008). Avaliação da confiabilidade de tubos de concreto armado no estado limite de fissuração. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 1(4), 314–330. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952008000400001>
- Soares, R. C. (2001). *Um estudo sobre modelos mecânico-probabilísticos para pórticos de concreto armado*.
- Soares, S. L. (2009). *Análise paramétrica de seções de concreto armado em flexão composta submetidas à ação sísmica*.
- Venturini, W. S. ;, & Rodrigues, R. O. (1987). *Dimensionamento de peças retangulares de concreto armado solicitados à flexão reta*. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.