



Análise da Introdução do Fator η_c pela NBR 6118:2023 no Dimensionamento de Seções Poligonais de Concreto Armado Submetidas à Flexo-compressão Oblíqua

Cassio Francisco Krás Borges¹, Mauro de Vasconcellos Real², Ângelo Simonetto Pessutto³, Américo Campos Filho⁴, Paula Manica Lazzari⁵, Nathália Flores Cogo⁶

¹ UFRGS / PPGEC / cassiofkb@gmail.com

² UFRGS / PPGEC / mvrealgm@gmail.com

³ UFRGS / PPGEC / angelospessutto@gmail.com

⁴ UFRGS / PPGEC / americo@ufrgs.br

⁵ UFRGS / PPGEC / p.manica.lazzari@gmail.com

⁶ UFRGS / PPGEC / natifcogo@gmail.com

Resumo

A recente edição da norma brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto (ABNT NBR 6118:2023) incorporou na formulação do diagrama tensão-deformação do concreto o fator η_c para concretos de classe superior a C40. Este fator, que tem efeito redutor nas tensões de compressão, foi extraído do projeto de revisão do Eurocode 2 (FprEN 1992-1-1:2022) e busca introduzir o efeito da fragilidade para concretos com resistência característica à compressão (f_{ck}) superior a 40MPa. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre as taxas de armaduras obtidas para 04 (quatro) seções poligonais de concreto armado submetidas à flexão composta oblíqua com concretos de classe C40 a C90, sendo estas dimensionadas através das curvas tensão-deformação para o concreto propostas pela ABNT NBR 6118:2014 e pela ABNT NBR 6118:2023. Os resultados apontam que, nas seções abordados no estudo, ocorre um aumento significativo das taxas de armaduras obtidas através do dimensionamento com o texto de 2023 em relação ao texto de 2014. Além disso, em algumas seções o dimensionamento realizado conforme o texto de 2023 fornece taxas de armaduras superiores para concretos de maior resistência em relação a concretos de menor resistência, o que difere da tendência estritamente decrescente entre taxa de armadura *versus* f_{ck} observada através do dimensionamento pelo texto de 2014. Complementarmente ainda, foi realizado um estudo de cunho financeiro, a fim de evidenciar o comportamento antieconômico das seções dimensionadas através do novo procedimento descrito pela ABNT NBR 6118:2023.

Palavras-chave

Concreto Armado; Fator de fragilidade η_c ; Seções Poligonais de Concreto Armado; Pilares de Concreto Armado; Flexo-compressão oblíqua; Revisão NBR 6118:2023.

Introdução

Apesar da revisão da norma brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto ABNT NBR 6118:2023 manter o procedimento geral para a determinação do diagrama tensão-deformação para concretos com classe de resistência inferior a C40 conforme a ABNT NBR 6118:2014, há uma introdução adicional dos efeitos de fragilidade para concretos de classe de resistência superior a C40, que se superpõe aos efeitos já considerados na ABNT NBR 6118:2014. Este efeito é introduzido através do fator de fragilidade η_c , extraído do projeto de revisão do Eurocode 2 (FprEN 1992-1-1:2022), que introduz um efeito redutor na máxima tensão à compressão admissível no diagrama parábola-retângulo e no diagrama retangular simplificado. Na **Tabela 1** são apresentados os parâmetros para a definição dos diagramas tensão-deformação do concreto para classes de resistência C40 à C90.



Como apontado por ARAUJO (2023), a adoção do fator de fragilidade η_c foi feita de forma equivocada, o que pode levar a erros inaceitáveis nos dimensionamentos à flexão-simples e à flexo-compressão, principalmente no caso dos pilares de edifícios. Entretanto, apesar dos votos contrários e da apresentação das inconsistências técnicas na fase de Consulta Nacional, o fator de fragilidade foi mantido e está a cargo de uma futura Emenda a correção desta possível falha.

Tabela 1 – Parâmetros para definição dos diagramas tensão-deformação do concreto

Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
f_{ck}	40	50	60	70	80	90
n	2,00	2,00	1,59	1,44	1,40	1,40
ϵ_{c2}	0,20%	0,20%	0,23%	0,24%	0,25%	0,26%
ϵ_{cu}	0,35%	0,35%	0,29%	0,27%	0,26%	0,26%
γ_c	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
f_{cd}	28,57	35,71	42,86	50,00	57,14	64,29
η_c	1,00	0,93	0,87	0,83	0,79	0,76

Na **Figura 1** e na **Figura 2** são apresentadas as máximas tensões de compressão de cálculo em relação ao f_{ck} e os diagramas tensão-deformação conforme ambos os textos, respectivamente, para classes de resistência C40, C50, C60, C70, C80 e C90.

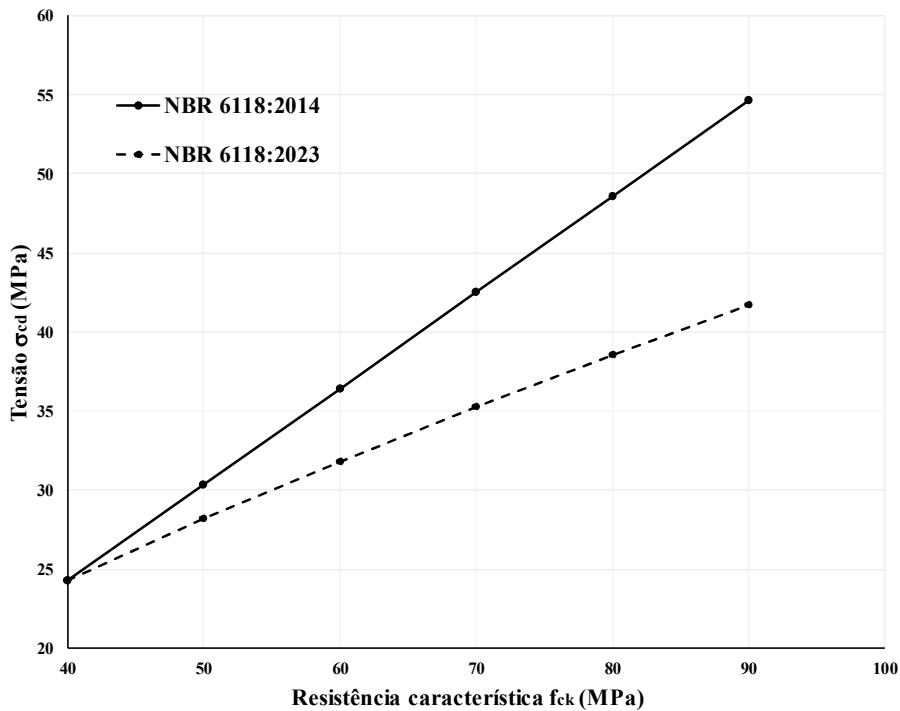


Figura 1 – Relação entre máxima tensão de cálculo e resistência característica do concreto (f_{ck}).

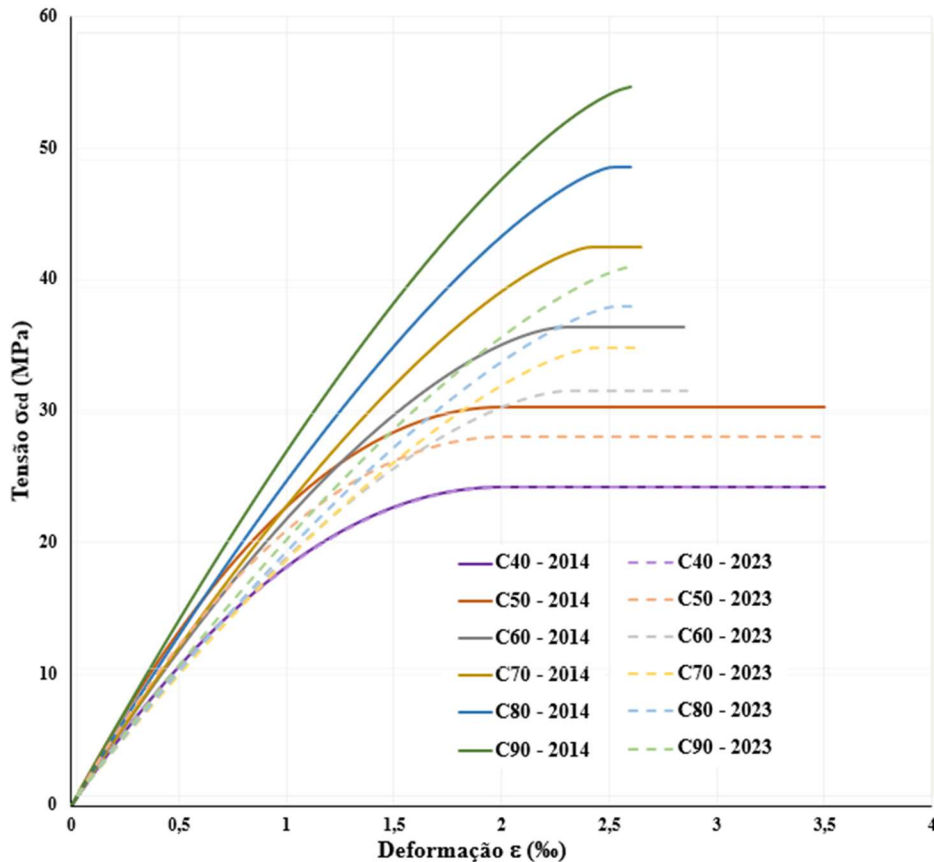


Figura 2 – Diagramas tensão-deformação para o concreto.

Metodologia

Fez-se uso da formulação desenvolvida por CAMPOS FILHO (2023), que utiliza o teorema de Green e o método de Newton-Raphson para a solução do problema de dimensionamento à flexão composta oblíqua, com objetivo de avaliar o impacto da introdução do fator de fragilidade η_c em relação às taxas de armaduras necessárias para 04 (quatro) seções poligonais de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua.

Por fim, realizou-se uma estimativa de custos do insumo vergalhões (barras de aço longitudinais), sendo estes compostos de aço do tipo CA-50, através de barras retas e com diâmetros nominais entre 12,5 mm e 25 mm. O custo de referência utilizado no estudo foi de R\$ 5,73 por kg de vergalhão, dado este informado pela empresa FERROS BONAMIGO.

Para efeitos de melhor visualização, a avaliação dos custos foi realizada por metro de pilar e aplicada para classes de concreto superiores a C40, onde os resultados das áreas de aço variam através dos dois procedimentos e, por tanto, há diferença também de custos financeiros.

A seguir são apresentadas as seções de concreto armado investigadas no estudo e as solicitações consideradas no dimensionamento, que são aplicadas no centroide da seção bruta de concreto. Para todas as seções, a distância entre o centroide das barras de aço e o bordo da seção é de 4cm.

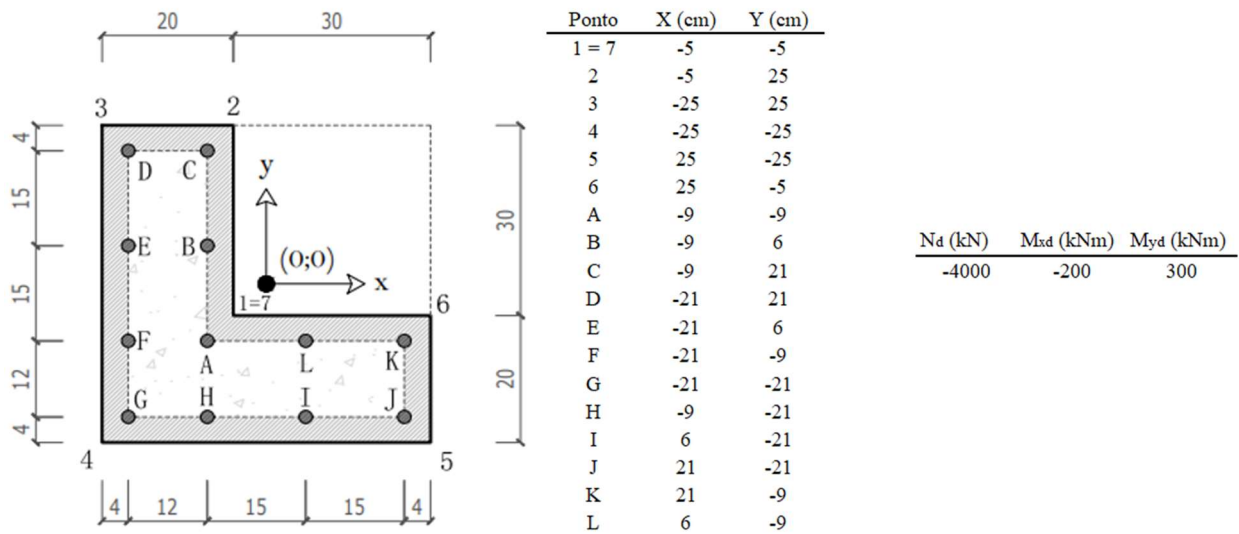


Figura 3 – Geometria e solicitações para seção L.

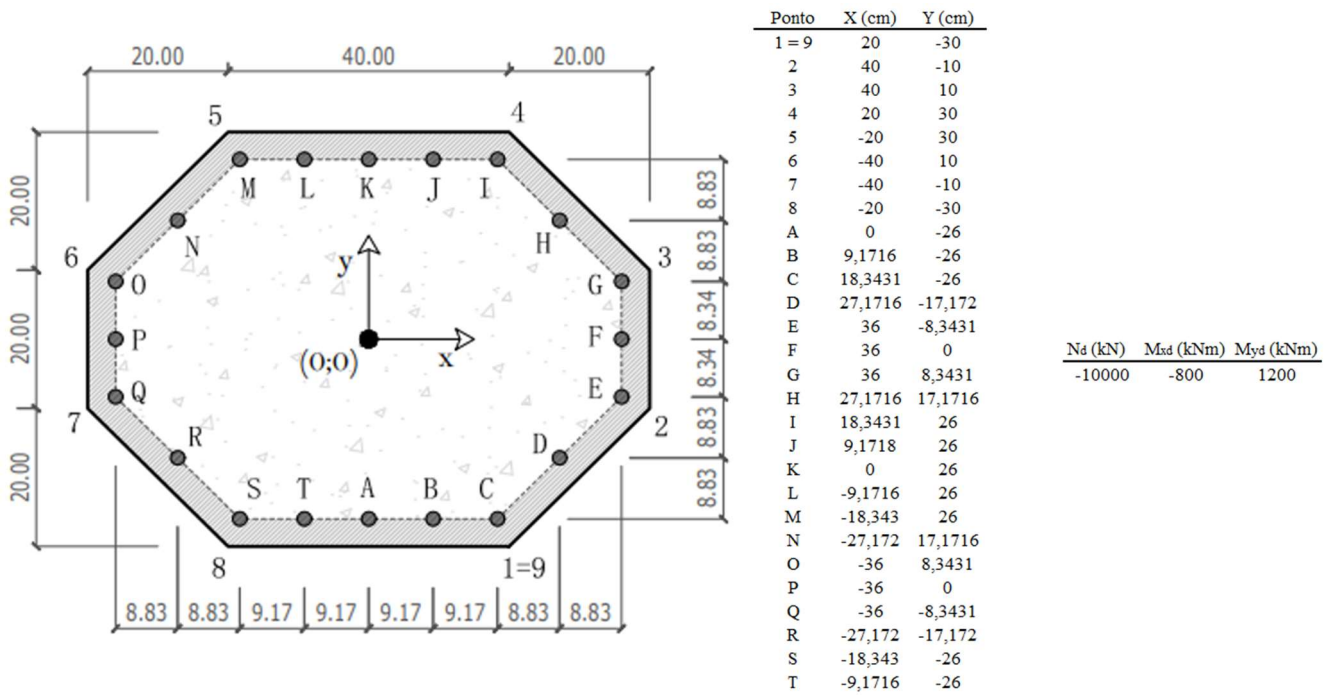
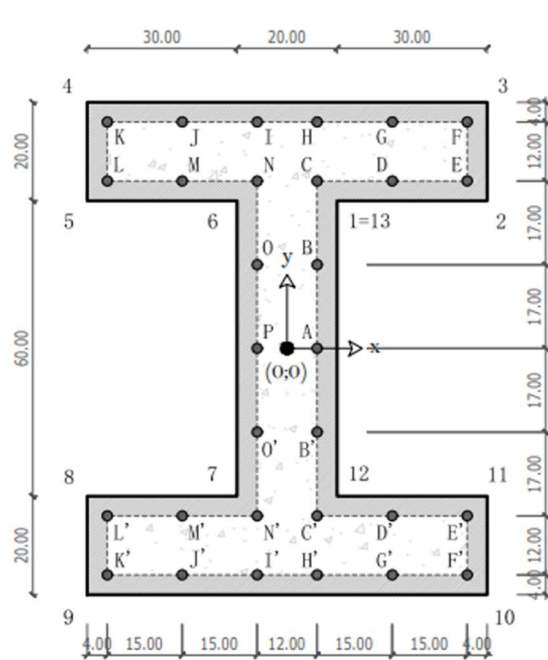


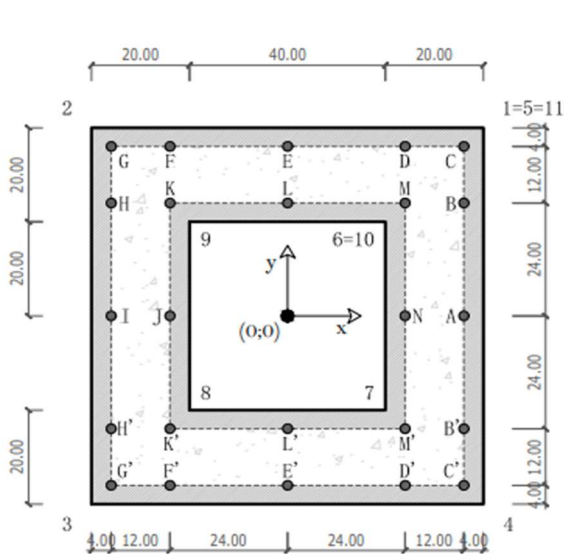
Figura 4 – Geometria e solicitações para seção OCTOGONAL.



Ponto	X (cm)	Y (cm)
1=13	10	30
2	40	30
3	40	50
4	-40	50
5	-40	30
6	-10	30
7	-10	-30
8	-40	-30
9	-40	-50
10	40	-50
11	40	-30
12	10	-30
A	6	0
B	6	+17
C	6	+34
D	21	+34
E	36	+34
F	36	+46
G	21	+46
H	6	+46
I	-6	+46
J	-21	+46
K	-36	+46
L	-36	+34
M	-21	+34
N	-6	+34
O	-6	+17
P	-6	0

N_d (kN)	M_{xd} (kNm)	M_{yd} (kNm)
-10000	-1500	1000

Figura 5 – Geometria e solicitações para seção I.



Ponto	X (cm)	Y (cm)
1=5=11	40	40
2	-40	40
3	-40	-40
4	40	-40
6=10	20	20
7	20	-20
8	-20	-20
9	-20	20
A	36	0
B	36	+24
C	36	+36
D	24	+36
E	0	+36
F	-24	+36
G	-36	+36
H	-36	+24
I	-36	0
J	-24	0
K	-24	+24
L	0	+24
M	24	+24
N	24	0

N_d (kN)	M_{xd} (kNm)	M_{yd} (kNm)
-10000	-2000	1000

Figura 6 – Geometria e solicitações para seção QUADRADA VAZADA.

Resultados

Abaixo são apresentados os resultados obtidos para a seção L, onde é possível visualizar o aumento significativo das taxas de armadura através da introdução do fator η_c , principalmente em classes de concreto mais elevadas. No caso da classe de concreto C90, o aumento relativo da taxa de armadura chega próximo aos 80%. Além disso, nota-se que ocorre um mínimo nas taxas de armadura necessária para classe C50 e C90 e um máximo para classe C40 e C70. A introdução do fator de fragilidade torna antieconômica a utilização de classes de concreto superiores à classe C50 para esta seção.

Tabela 2 – Resultados obtidos para seção L

Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
σ_c (2014)	24,29	30,36	36,43	42,50	48,57	54,64
A_s (2014)	81,97	62,60	63,92	61,95	52,96	41,59
ρ_s (2014)	5,12%	3,91%	4,00%	3,87%	3,31%	2,60%
σ_c (2023)	24,29	28,18	31,82	35,27	38,55	41,70
A_s (2023)	81,97	69,43	77,46	81,90	79,06	73,56
ρ_s (2023)	5,12%	4,34%	4,84%	5,12%	4,94%	4,60%
ρ_s (2023) / ρ_s (2014)	1,00	1,11	1,21	1,32	1,49	1,77

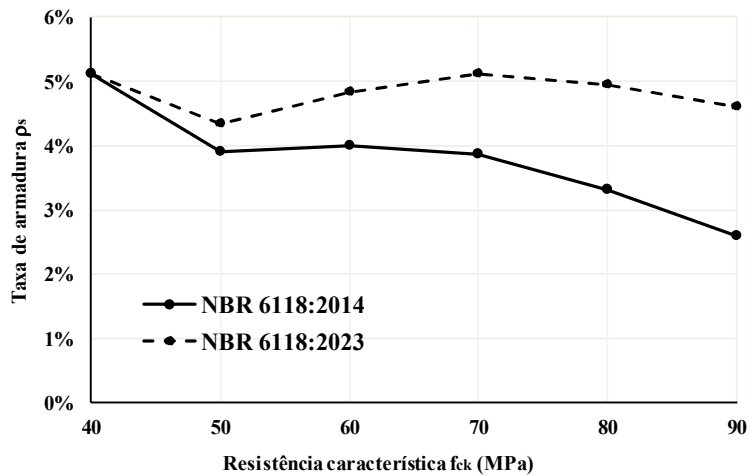


Figura 7 – Taxa de armadura versus f_{ck} obtidos para seção L.

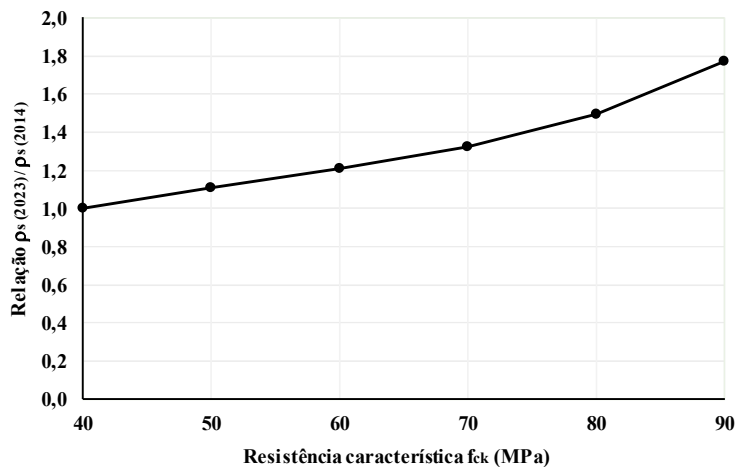


Figura 8 – Relação entre taxas de armadura 2023/2014 versus f_{ck} para seção L.

Abaixo são apresentados os resultados obtidos para a seção OCTOGONAL, onde é possível novamente notar o aumento significativo das taxas de armadura através da introdução do fator η_c . No caso da classe de concreto C90, a taxa de armadura necessária é significativamente superior com a introdução do fator de fragilidade, com valores próximos de três vezes o valor dimensionado através do texto de 2014. Nesta seção, observa-se que as classes C50, C60 e C70 necessitam de taxas de armadura similares, não apresentando valores máximos/mínimos expressivos como a seção L.

Tabela 3 – Resultados obtidos para seção OCTOGONAL.

Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
σ_c (2014)	24,29	30,36	36,43	42,50	48,57	54,64
A_s (2014)	161,58	114,09	97,25	79,88	54,51	34,5
ρ_s (2014)	4,04%	2,85%	2,43%	2,00%	1,36%	0,86%
σ_c (2023)	24,29	28,18	31,82	35,27	38,55	41,70
A_s (2023)	161,58	130,79	129,89	127,93	117,07	102,97
ρ_s (2023)	4,04%	3,27%	3,25%	3,20%	2,93%	2,57%
ρ_s (2023) / ρ_s (2014)	1,00	1,15	1,34	1,60	2,15	2,98

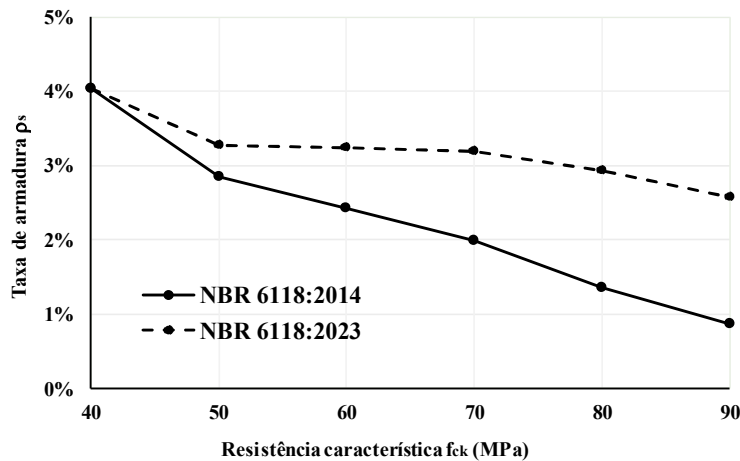


Figura 9 – Taxa de armadura versus f_{ck} obtidos para seção OCTOGONAL.

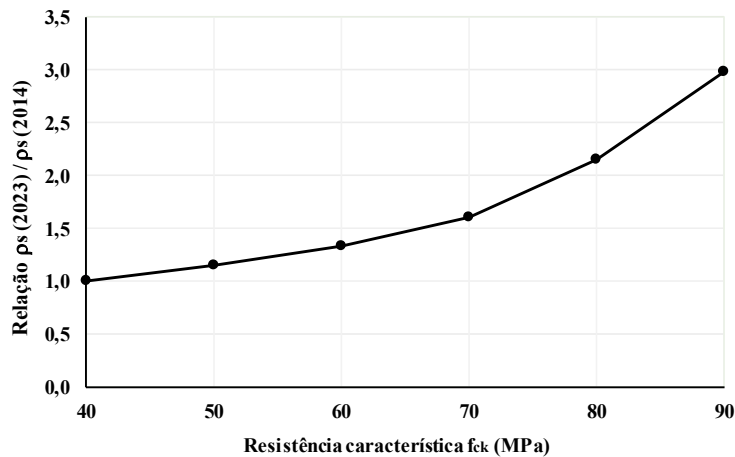


Figura 10 – Relação entre taxas de armadura 2023/2014 versus f_{ck} para seção OCTOGONAL.

Abaixo são apresentados os resultados obtidos para a seção I, onde é possível notar uma tendência similar à seção L. No caso da classe de concreto C90, onde o aumento da taxa de armadura é o mais significativo através da introdução do fator η_c , a taxa de armadura necessária é superior a três vezes à taxa dimensionado através do texto de 2014. Nota-se que há uma tendência com máximos em C40 e C60/C70 e mínimos em C50 e C90. O comportamento obtido na seção é incoerente, pois as taxas de armaduras são maiores em classes de concreto maiores, o que novamente tornaria antieconômico a utilização de classes de concreto C60, C70 e C80.

Tabela 4 – Resultados obtidos para seção I.

Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
σ_c (2014)	24,29	30,36	36,43	42,50	48,57	54,64
A_s (2014)	156,31	100,85	92,44	73,25	41,53	34,5
ρ_s (2014)	3,55%	2,29%	2,10%	1,66%	0,94%	0,78%
σ_c (2023)	24,29	28,18	31,82	35,27	38,55	41,70
A_s (2023)	156,31	120,40	132,71	134,00	121,93	104,58
ρ_s (2023)	3,55%	2,74%	3,02%	3,05%	2,77%	2,38%
ρ_s (2023) / ρ_s (2014)	1,00	1,19	1,44	1,83	2,94	3,03

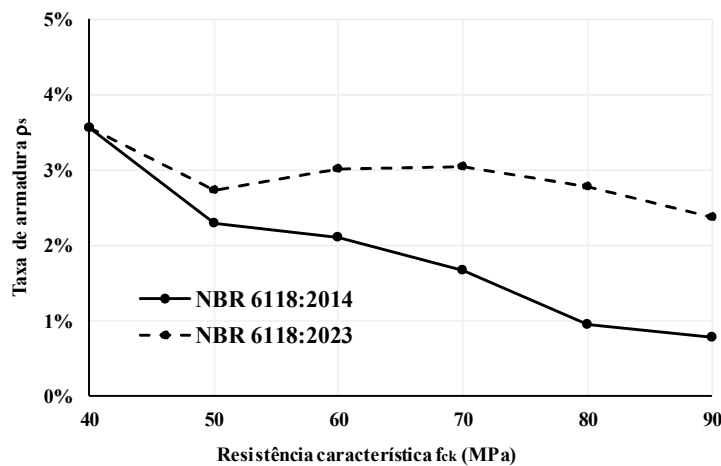


Figura 11 – Taxa de armadura *versus* f_{ck} obtidos para seção I.

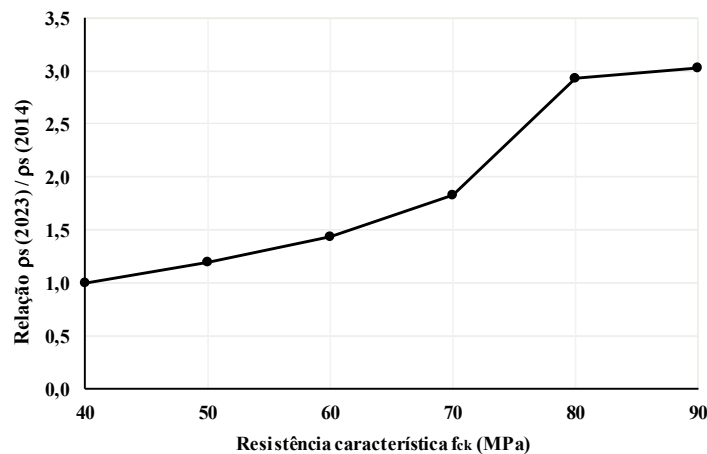


Figura 12 – Relação entre taxas de armadura 2023/2014 *versus* f_{ck} para seção I.



Abaixo são apresentados os resultados obtidos para a seção QUADRADA VAZADA, que segue a mesma tendência das demais seções. Em C90, a taxa de armadura necessária conforme o texto de 2023 é superior a três vezes o necessário conforme o texto de 2014. Além disso, nota-se que há uma tendência com máximos em C40 e C70 e mínimos em C50 e C90. O comportamento obtido na seção é novamente incoerente, com taxas de armaduras maiores em classes de concreto maiores, o que novamente tornaria antieconômico a utilização de classes de concreto C60 e C70.

Tabela 5 – Resultados obtidos para seção QUADRADA VAZADA.

Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
σ_c (2014)	24,29	30,36	36,43	42,50	48,57	54,64
A_s (2014)	170,67	110,16	92,42	73,95	42,15	34,5
ρ_s (2014)	3,56%	2,30%	1,93%	1,54%	0,88%	0,72%
σ_c (2023)	24,29	28,18	31,82	35,27	38,55	41,70
A_s (2023)	170,67	131,51	135,69	138,11	125,77	107,57
ρ_s (2023)	3,56%	2,74%	2,83%	2,88%	2,62%	2,24%
ρ_s (2023) / ρ_s (2014)	1,00	1,19	1,47	1,87	2,98	3,12

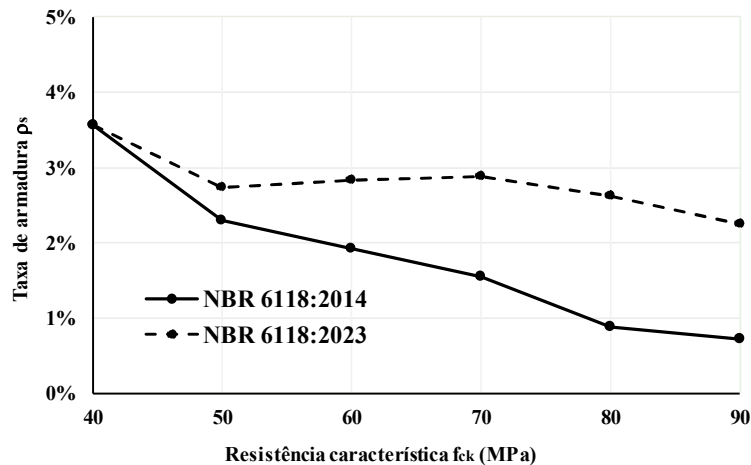


Figura 13 – Taxa de armadura *versus* f_{ck} obtidos para seção QUADRADA VAZADA.

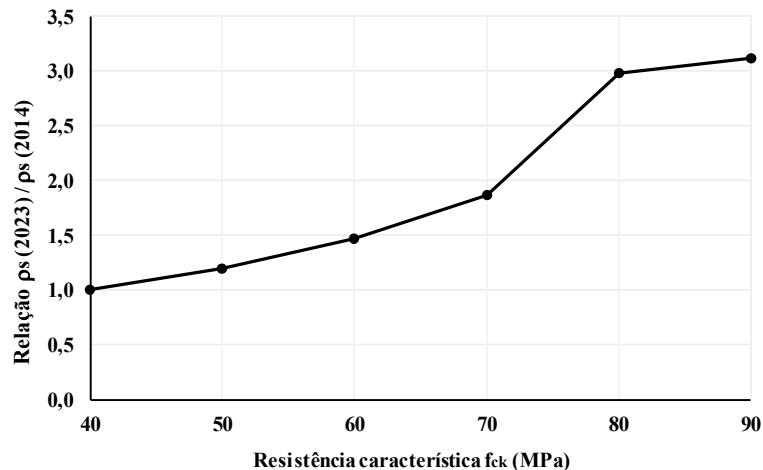


Figura 14 – Relação entre taxas de armadura 2023/2014 *versus* f_{ck} para seção QUADRADA VAZADA.

Com a intenção de demonstrar o comportamento antieconômico ao realizar os dimensionamentos das seções de pilares dos casos em estudo, através do procedimento indicado pela nova norma, foram executadas a tabela e gráfico abaixo:

Tabela 6 – Aumento de custo por metro nas seções de pilares dimensionadas através da nova norma.

	Classe	C40	C50	C60	C70	C80	C90
Seção L	As (2014)	81,97	62,60	63,92	61,95	52,96	41,59
	RS/m (2014)	368,4	281,53	287,46	278,60	238,17	187,04
	As (2023)	81,97	69,43	77,46	81,90	79,06	73,56
	RS/m (2023)	368,4	312,24	348,36	368,32	355,55	330,82
Seção Octogonal	As (2014)	161,58	114,09	97,25	79,88	54,51	34,5*
	RS/m (2014)	726,66	513,09	437,36	359,24	245,14	155,15
	As (2023)	161,58	130,79	129,89	127,93	117,07	102,97
	RS/m (2023)	726,66	588,19	584,15	575,33	526,49	463,08
Seção I	As (2014)	156,31	100,85	92,44	73,25	41,53	34,5*
	RS/m (2014)	702,96	453,55	415,72	329,42	186,77	155,15
	As (2023)	156,31	120,40	132,71	134,00	121,93	104,58
	RS/m (2023)	702,96	541,47	596,83	602,63	548,35	470,32
Seção Quadrada Vazada	As (2014)	170,67	110,16	92,42	73,95	42,15	34,5*
	RS/m (2014)	767,54	495,42	415,63	332,57	189,56	155,15
	As (2023)	170,67	131,51	135,69	138,11	125,77	107,57
	RS/m (2023)	767,54	591,43	610,23	621,11	565,62	483,77

* Seções dimensionadas com área mínima de armadura.

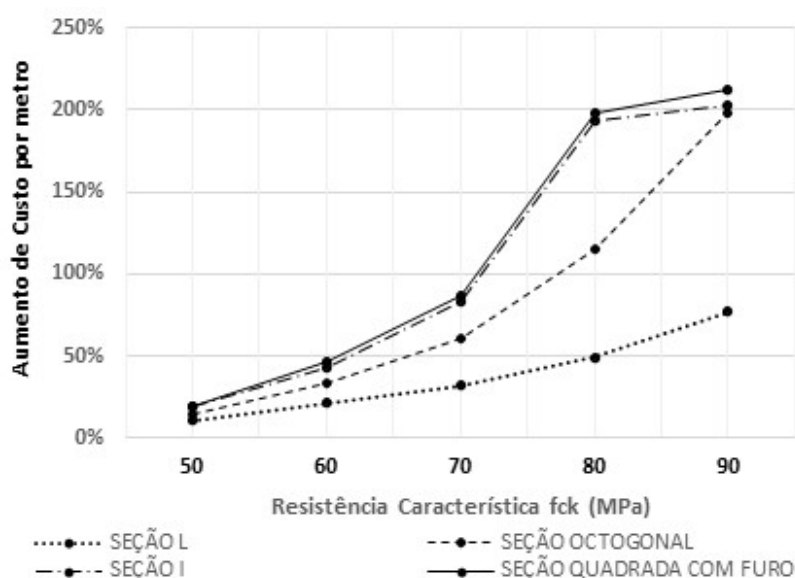


Figura 15 – Aumento de custo por metro nas seções de pilares dimensionadas através da nova norma.



Conclusões

Através dos resultados obtidos pelo dimensionamento das seções poligonais em concreto armado submetidos à flexo-compressão oblíqua conforme as ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 6118:2023, foi possível analisar o impacto da introdução do fator de fragilidade η_c em termos de taxa de armadura e custos. Nota-se um aumento substancial nas taxas de armadura necessárias para concretos de maior resistência conforme o texto de 2023, podendo chegar a 3 vezes o valor dimensionado pelo texto de 2014 para concretos de classe C90. Além disso, em alguns casos o dimensionamento com fator de fragilidade pode fornecer taxas de armaduras maiores para concretos de classe C60 e C70 em comparação a concretos de classe C50, o que vai contra à tendência lógica e estritamente decrescente da relação taxa de armadura *versus* f_{ck} , podendo dar origem a geometrias antieconômicas, como demonstrado no estudo financeiro, com concretos de alta resistência sob certos casos de flexo-compressão oblíqua.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- ARAUJO, J.M. **Curso de Concreto Armado – Tópicos Avançados**. Editora Dunas, 2023.
- CAMPOS FILHO, A. **Projeto de Pilares de Concreto Armado**. Porto Alegre: UFRGS, 2014.
- CAMPOS FILHO, A. **Dimensionamento e Verificação de Seções Poligonais de Concreto Armado Submetidas à Flexão Composta Oblíqua**. CPGEC/UFRGS - CE 53/96.