

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

MARCO ANTONIO PALIVONAS CHAIN

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS LINEARES DE CONCRETO
ARMADO COM SEÇÃO CIRCULAR SUBMETIDOS À FORÇA CORTANTE**

**Uberlândia
2024**

Marco Antonio Palivonas Chain

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS LINEARES DE CONCRETO
ARMADO COM SEÇÃO CIRCULAR SUBMETIDOS À FORÇA CORTANTE**

Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, curso de Engenharia Civil, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera

Uberlândia
2024

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS LINEARES DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO CIRCULAR SUBMETIDOS À FORÇA CORTANTE

Marco Antonio Palivonas Chain¹

Rodrigo Gustavo Delalibera²

Resumo

O dimensionamento de elementos lineares de concreto armado com seção circular frente à ação da força cortante é um assunto que não recebe nenhum comentário na norma brasileira NBR6118:2023 e poucas menções em outras normas estrangeiras, como o adendo da ACI CODE-318-19(22), que fornece uma forma de adaptar as fórmulas originalmente feitas para seções retangulares. Aliado a essa problemática, existem poucas pesquisas nessa área. Dessa forma, este trabalho busca realizar experimentos para melhorar o entendimento do comportamento desses elementos sujeitos à força cortante. Os experimentos envolvem o ensaio de 9 corpos de prova de seção circular e verificar a capacidade resistente, variando os diâmetros e taxas de armadura transversal.

Palavras-chave: *Seções Circulares, Concreto Armado, Esforço Cortante.*

Abstract

Design of circular sections subject to shear force is not mentioned in Brazilian standard NBR6118:2023, and is seldom mentioned in foreign standards, apart from a small appendix in the American standard ACI CODE-318-19(22), which allows for an adjustment to the original rectangular section formulation. In addition to this problem, there is little research in this area. Because of that, this work aims to better understand circular sections' behavior when exposed to shear force by experimental tests. 9 circular section specimens with varying diameters and shear reinforcement ratios will be tested and their shear resistances will be verified.

Keywords: *Circular Sections, Reinforced Concrete, Shear Stress.*

¹ Graduando em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

² Prof. Dr. da Universidade Federal de Uberlândia. Orientador.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento das estruturas de concreto armado com seções circulares é um tópico pouco abordado, ainda mais quando se trata de elementos solicitados majoritariamente por força cortante.

Isto se torna mais preocupante quando pode-se observar uma vasta gama de aplicações de estruturas com essas configurações, como por exemplo, em cortinas de contenção, estacas de fundações sujeitas a esforços horizontais, dentre outros.

As normas técnicas em sua maioria não abordam o dimensionamento destes elementos frente à ação da força cortante. Uma exceção é a norma Americana ACI CODE 318-19(22), que traz instruções para realizar o dimensionamento dessas estruturas, que se dá pela adaptação da formulação de força cortante em vigas, que foi desenvolvida originalmente para vigas com seções transversais retangulares. Esta solução se dá pela substituição dos valores de bw e d na seção 22.5.2.2 e se dá da seguinte forma:

$$(a) \quad d = 0,8 * bw$$

$$(b) \quad bw = \text{diâmetro (seções cheias)}$$

O método é facilmente empregável para as verificações da norma Americana, no entanto, o comportamento desses elementos é bem diferente dos elementos de seção retangular, especialmente quando se trata de seções contendo altas taxas de armadura transversal. Resultados obtidos em experimentos mostram que as normas subestimam a capacidade resistente à força cortante, com corpos de prova facilmente excedendo os limites superiores de resistência obtidos por norma em seções altamente armadas. (JENSEN et al, 2009)

Dessa forma, a efetividade do método da ACI pode ser questionável. Estudiosos propõem outros métodos para a representação mais fidedigna do comportamento dessas estruturas, como, por exemplo, a *Teoria Modificada dos Campos de Compressão*, que por sua vez requer implementação de algoritmos computacionais mais sofisticados. (BENTZ; VECCHIO; COLLINS, 2006)

Frente às complexidades inerentes dos modelos matemáticos de mecanismos de

resistência às tensões de cisalhamento, que dificultam o emprego dos mesmos por profissionais no cotidiano, além da deficiência de informações nas normas técnicas, o assunto pode ser considerado relevante no meio técnico da engenharia. (QUEIROZ JUNIOR, 2014)

Dessa maneira, este trabalho visa investigar o comportamento dessas estruturas e possibilitar a ampliação do conhecimento público nesse assunto.

(2020) Delalibera propõe uma adaptação para a norma Brasileira NBR 6118:2023 que consiste na alteração de parâmetros já utilizados nas verificações de cortante para seções retangulares e segue dessa forma:

$$V_{c0} = 0,6 * f_{ctd} * Ac'$$

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} * 0,9 * df' * f_{ywd} * \frac{(\sin \alpha + \cos \alpha)}{NR}$$

$$V_{Rd3} = V_{c0} + V_{sw}$$

Onde:

V_{c0} é a parcela resistida pelo concreto (kN);

V_{sw} é a parcela resistida pelos estribos (kN);

f_{ctd} é a resistência à tração de cálculo do concreto (kN/cm²)

df' é o diâmetro da seção compreendida dentro dos estribos (cm);

$\frac{A_{sw}}{s}$ é a área de armadura transversal compreendida no comprimento s (cm²/cm);

f_{ywd} é a resistência ao escoamento do aço dos estribos (kN/cm²);

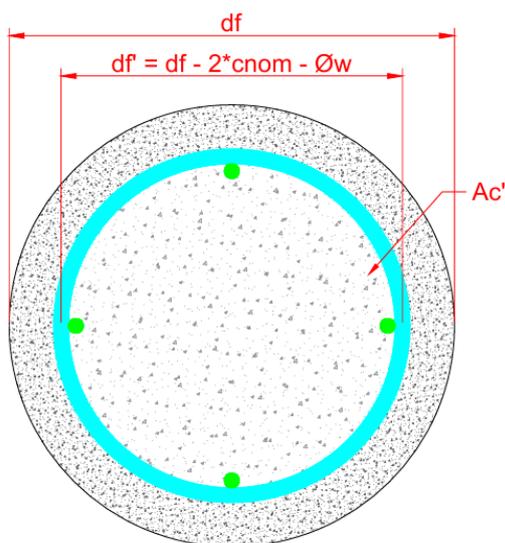
α é o ângulo de inclinação da armadura transversal;

Ac' é a área compreendida dentro dos estribos;

NR é o número de ramos que intercepta o estribo na superfície de ruptura (neste caso, $NR = 2$).

V_{Rd3} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal

Figura 1 – Esquema Visual da Seção



Fonte: Autor

Dessa forma, a área contabilizada seria apenas a parcela compreendida dentro dos estribos, ou seja, a parcela confinada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental consistiu no ensaio à cortante de 9 vigas cilíndricas de 1m de comprimento, moldadas com diferentes diâmetros, diferentes taxas de armadura transversal, mas mantendo a quantidade de armadura longitudinal.

As vigas foram moldadas em duas etapas: o primeiro lote, moldado com concreto usinado; e o segundo lote, moldado com concreto virado in loco.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos e do aço foram obtidos utilizando a máquina de ensaios universal Modelo **DL 60000**, da fabricante **EMIC**.

Os corpos de prova de concreto foram ensaiados após retificação.

2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO 1:

A concretagem do primeiro grupo foi feita na data de 19/12/2023, com concreto usinado de fck 20Mpa, slump 14 ± 2 . O traço fornecido pela concreteira foi de 165kg de areia fina, 669kg de

areia média, 1105kg de brita 1262kg de cimento Portland CII F 40 e 1,31 l de aditivo poli funcional mira set 28.

Deste primeiro grupo, foram moldados 3 corpos de prova para ensaio de compressão, 3 corpos de prova para ensaio de tração por compressão diametral e 3 corpos de prova para ensaio de módulo de elasticidade. Os ensaios de caracterização deste concreto ocorreram na data de 19/03/2024, aos 91 dias de idade.

As seguintes tabelas condensam os resultados obtidos do grupo de concretagem 1.

Tabela 1 – Compressão Concreto 1

Nº CP	Relação h/d	fc (MPa)	fc,m (MPa)
CP1	2,01	22,94	24,26
CP2	2,01	25,38	
CP3	1,99	24,46	

Fonte: Autor

Tabela 2 – Módulo Concreto 1

Nº CP	Relação h/d	fc (MPa)	fc,m (MPa)	Eci (GPa)	Eci,m (GPa)
CP1	2,01	26,24	25,04	30,10	28,03
CP2	1,98	26,08		28,00	
CP3	2,01	22,80		26,00	

Fonte: Autor

Tabela 3 – Tração Concreto 1

Nº CP	d (mm)	l (mm)	fct,sp (MPa)	fct,sp,m (MPa)	fct,m (MPa)
CP1	99,21	201,23	3,233	2,74	2,466
CP2	100,52	198,78	2,696		
CP3	99,58	200,94	2,291		

Fonte: Autor

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO 2:

Já os corpos de prova do segundo grupo foram moldados com concreto rodado in loco, na data de 04/12/2024, com traço 20MPa, utilizando cimento Portland CII F 32, para 80l: 24,4kg de cimento; 70,24kg de areia média; 71,28kg de brita

1; 15,36kg de água e 0,11 de aditivo plastificante (alterado de BASTOS; BARBOZA).

Deste grupo, foram moldados 2 corpos de prova para ensaio de compressão, 3 corpos de prova para ensaio de tração por compressão diametral e 3 corpos de prova para ensaio de módulo de elasticidade. Os ensaios de caracterização deste concreto ocorreram na data de 28/05/2024, aos 176 dias de idade.

As seguintes tabelas condensam os resultados obtidos do grupo de concretagem 2.

Tabela 4 – Compressão Concreto 2

Nº CP	Força Máxima (kN)	fc (MPa)	fc,m (MPa)
CP1	206,18	25,73	25,89
CP2	208,90	26,06	

Fonte: Autor

Tabela 5 – Módulo Concreto 2

Nº CP	fc (MPa)	fc,m (MPa)	Eci (GPa)	Eci,m (GPa)
CP1	24,8	24,1	28,9	29,1
CP2	22,7		28,0	
CP3	24,8		30,3	

Fonte: Autor

Tabela 6 – Tração Concreto 2

Nº CP	Força Máxima (kN)	fct,sp (MPa)	fct,sp,m (MPa)	fct,m (MPa)
CP1	105,79	3,37	3,09	2,78
CP2	89,45	2,85		
CP3	95,82	3,05		

Fonte: Autor

2.3 PROPRIEDADES DO AÇO

O aço utilizado para a confecção das vigas, tanto nas armaduras longitudinais, como nas armaduras transversais foi o vergalhão CA-60, bitola Ø5mm, da fabricante ArcelorMittal.

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos do aço utilizado nas vigas.

Tabela 7 – Tração do Aço

Nº CP	Fmáx (kN)	Área (mm ²)	fu (MPa)	fu,m (MPa)	fy (MPa)
CP1	12,02	19,45	617,79	615,5	575,5
CP2	12,06	19,65	613,28		

Fonte: Autor

2.4 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

A tabela abaixo sintetiza as informações referentes às características das vigas.

Tabela 8 – Características das Vigas

Nº CP	Ø (mm)	Asw	Asl	fc,m (MPa)	fct,m (MPa)
V1	100	0	4 Ø 5	25,89	2,78
V2	100	Ø5 c/ 20	4 Ø 5		
V3	100	Ø5 c/ 10	4 Ø 5		
V4	150	0	4 Ø 5	24,26	2,47
V5	150	Ø5 c/ 20	4 Ø 5		
V6	150	Ø5 c/ 10	4 Ø 5		
V7	200	0	4 Ø 5		
V8	200	Ø5 c/ 20	4 Ø 5		
V9	200	Ø5 c/ 10	4 Ø 5		

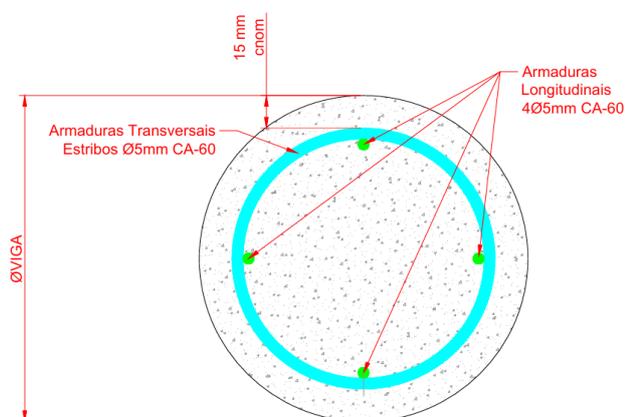
Fonte: Autor

Todas as vigas foram moldadas utilizando tubos de PVC com 1m de comprimento como forma, utilizando lona plástica para evitar a perda de umidade na base. Foram ao total, 3 peças de tubos DN100, 3 peças de tubos DN150 e 3 peças de tubos DN200.

Todos os corpos de prova foram moldados utilizando 4 barras de 5mm CA-60 em cruz, como armadura longitudinal.

A figura abaixo mostra a representação da seção típica genérica das vigas ensaiadas.

Figura 2 – Armação das Vigas



Fonte: Autor

2.5 ENSAIOS:

Os corpos de prova foram ensaiados em um pórtico de reação com a utilização do cilindro hidráulico “CDA-1012” da fabricante **USIWAL**, com máxima força de 10tf, conforme mostra imagem abaixo.

Imagem 1 – Cilindro Hidráulico USIWAL

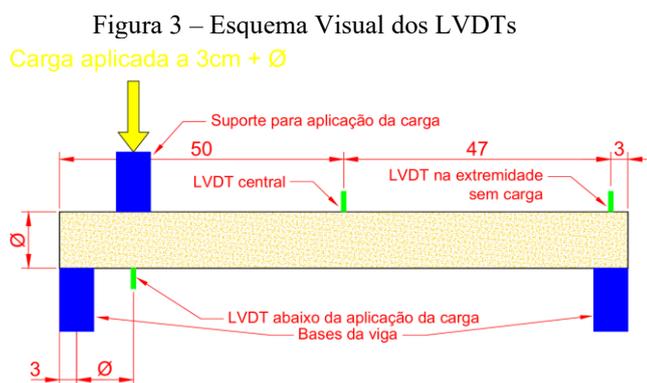


Fonte: Autor

Para a aquisição de dados, foram utilizados 3 transdutores de deslocamento **HBM** “WA/10MM-T” acoplados com os suportes de base magnética **Mitutoyo**, em associação com célula de carga com capacidade de 500 kN, ambos conectados ao aquisitor de dados de 8 canais **HBM** “MX840A”

Os ensaios foram realizados utilizando um sistema de pórtico de reação, suportes em formato semicircular, inclinômetro digital para obtenção do giro na extremidade não solicitada e transdutores de deslocamentos em pontos de interesse.

No caso, foram dispostos da seguinte maneira: 1 LVDT diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga, 1 LVDT acima do meio do vão e 1 LVDT acima da extremidade sem carga, conforme mostra figura:

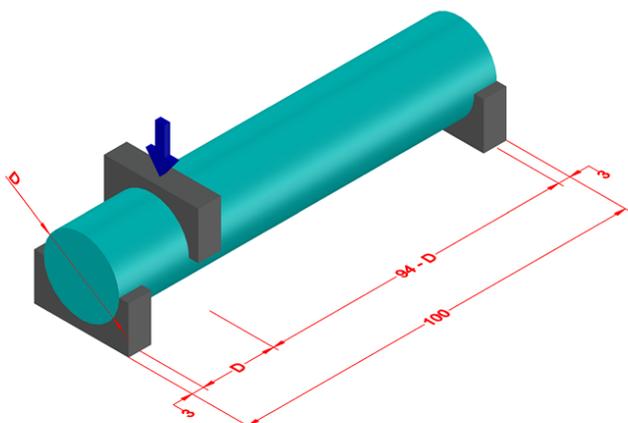


Fonte: Autor

A carga foi introduzida à distância equivalente ao diâmetro do corpo de prova, de eixo do apoio ao eixo da aplicação da carga, a fim de solicitar a diagonal comprimida e minimizar os efeitos de flexão.

A figura abaixo mostra um esquema visual dos ensaios.

Figura 4 – Esquema Visual dos Ensaio



Fonte: Autor

A imagem abaixo mostra uma foto real do experimento, com indicação de cada um dos equipamentos utilizados.

Imagem 3: Esquema dos Ensaio



Fonte: Autor

As vigas foram ensaiadas até a ruptura. A aplicação de carga ocorreu de forma manual, bombeando o cilindro hidráulico, com intervalos para monitoramento de abertura de fissuras e inclinação da peça.

3. NORMAS UTILIZADAS

A seção a seguir mostra as expressões utilizadas por cada norma analisada.

3.1 NBR 6118:2023:

$$VRd3 = Vc + Vsw$$

Onde:

$$Vsw = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) 0,9 d f_{ywd} (\sin a + \cos a) ;$$

$$Vc = 0,6 f_{ctd} b w d ;$$

$VRd3$ é a cortante resistente de cálculo, relativa à ruína da peça por tração diagonal.

3.2 Delalibera:

O método é uma adaptação da norma NBR 6118:2023 e já foi descrito na introdução.

3.3 ACI 318-19(22):

A tabela abaixo mostra as formulações disponíveis para cálculo da parcela resistida pelo concreto:

Tabela 9 – V_c para concreto armado

Table 22.5.5.1— V_c for nonprestressed members

Criteria	V_c	
$A_v \geq A_{v,min}$	Either of:	$\left[2\lambda \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$ (a)
		$\left[8\lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$ (b)
$A_v < A_{v,min}$		$\left[8\lambda_s \lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$ (c)

Notes:

1. Axial load, N_u , is positive for compression and negative for tension.
2. V_c shall not be taken less than zero.

Fonte: ACI 318-19(22) seção 22.5

Desta tabela, foi utilizada a expressão (a), para membros armados à cortante e a expressão (c), para membros não armados à cortante.

Já a parcela resistida pelos estribos foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (22.5.8.5.3)$$

3.3 *fib* Model Code

A expressão utilizada pelo *fib* Model Code para a determinação da parcela resistida pelo concreto segue como descrita abaixo:

$$V_{Rd,c} = k_v \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} z b_w \quad (f_{ck} \text{ in MPa})$$

Encontrada na seção 7.3-17

Já a parcela resistida pelos estribos é calculada da seguinte forma:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta$$

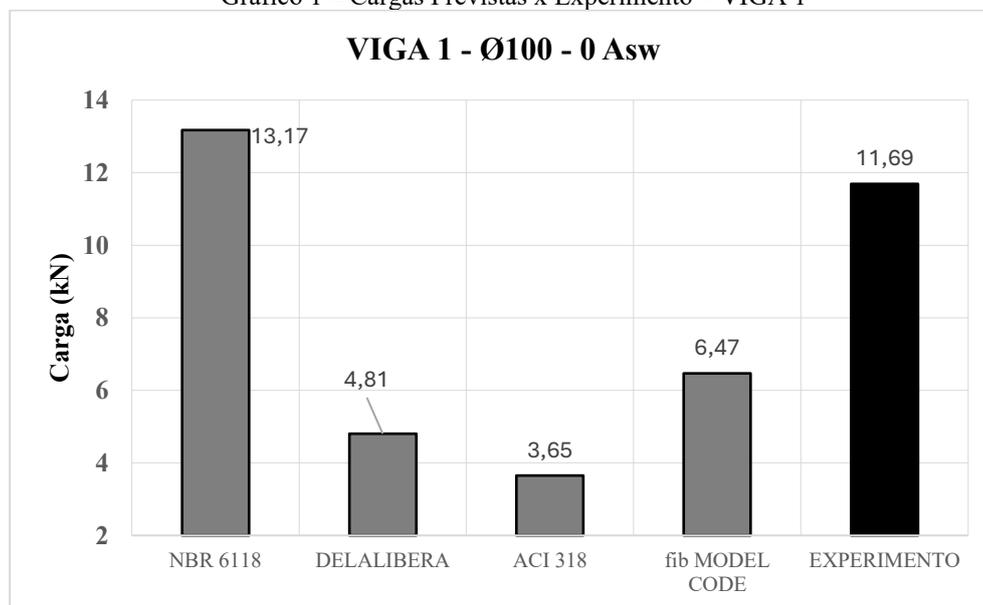
Encontrada na seção 7.3-29.

4. RESULTADOS

4.1 CORPO DE PROVA 1

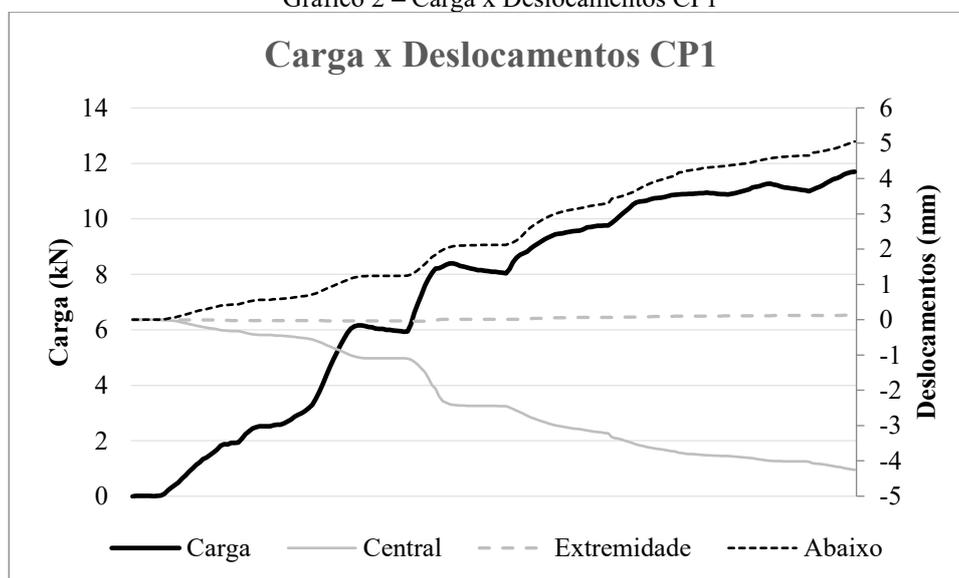
A primeira viga ensaiada foi o VIGA 1, com diâmetro externo de 100mm, sem armadura transversal.

Gráfico 1 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 1



Fonte: Autor

Gráfico 2 – Carga x Deslocamentos CP1

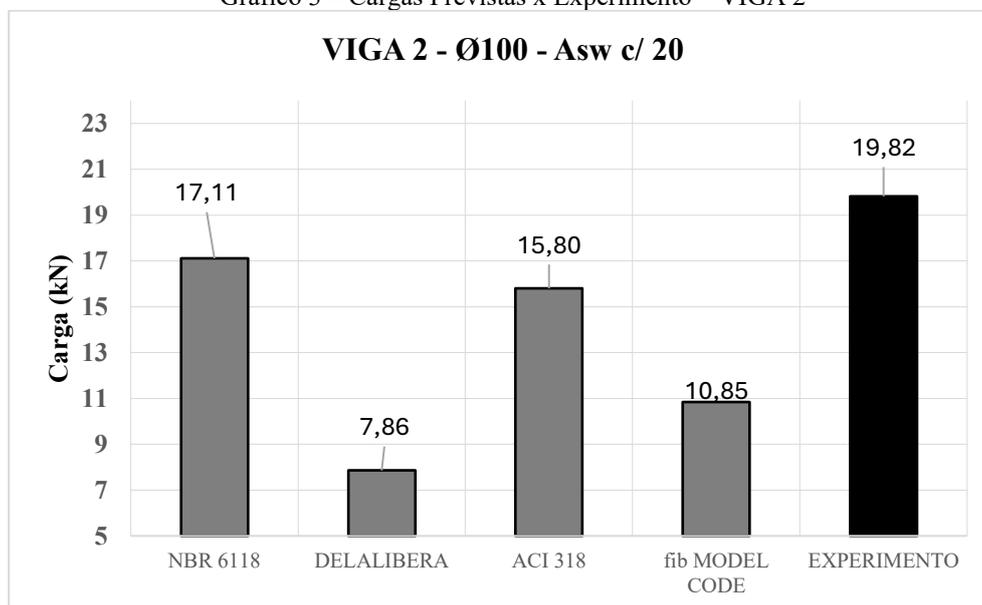


Fonte: Autor

4.2 CORPO DE PROVA 2

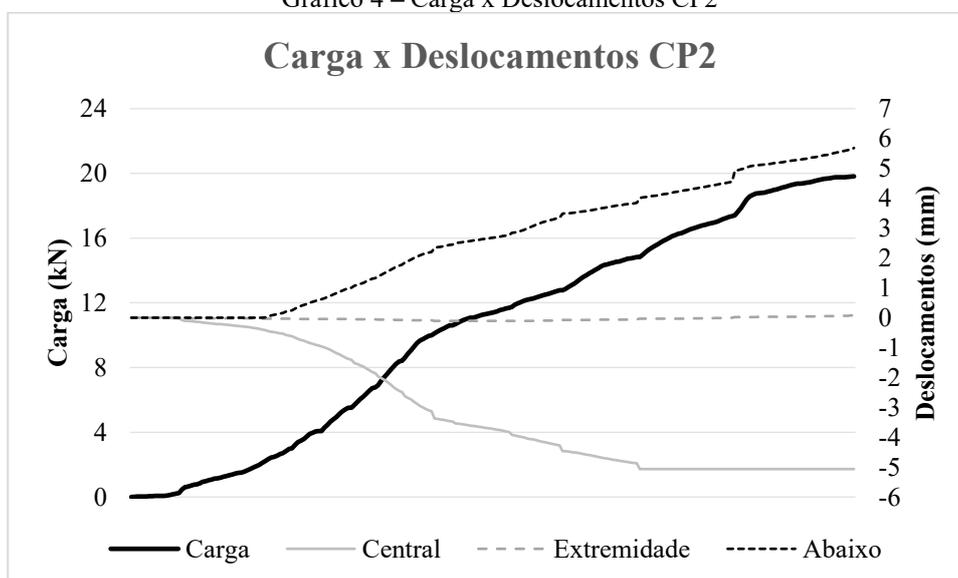
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 2, com diâmetro externo de 100mm e armadura transversal Ø5mm c/ 20:

Gráfico 3 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 2



Fonte: Autor

Gráfico 4 – Carga x Deslocamentos CP2

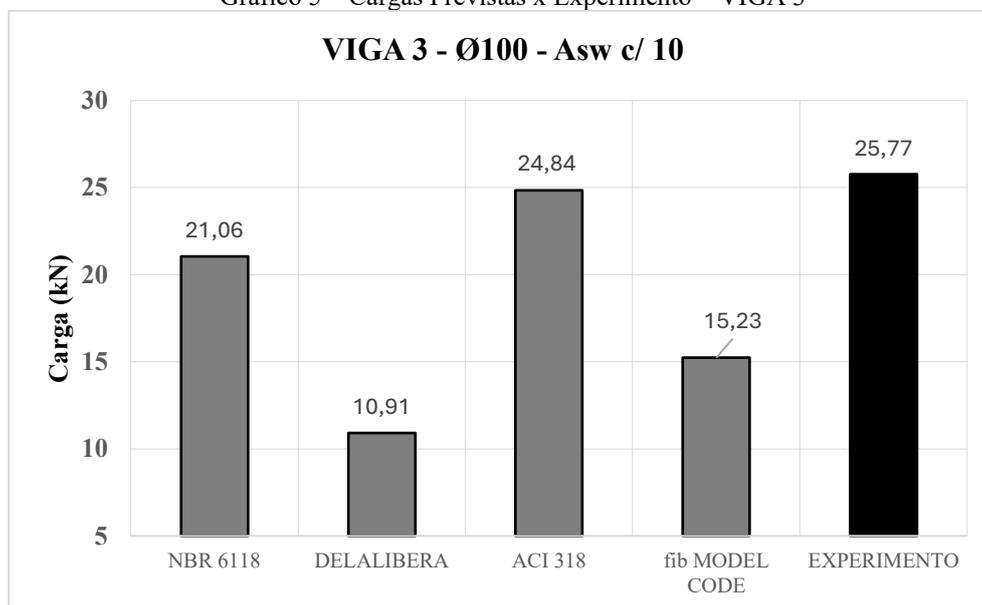


Fonte: Autor

4.3 CORPO DE PROVA 3

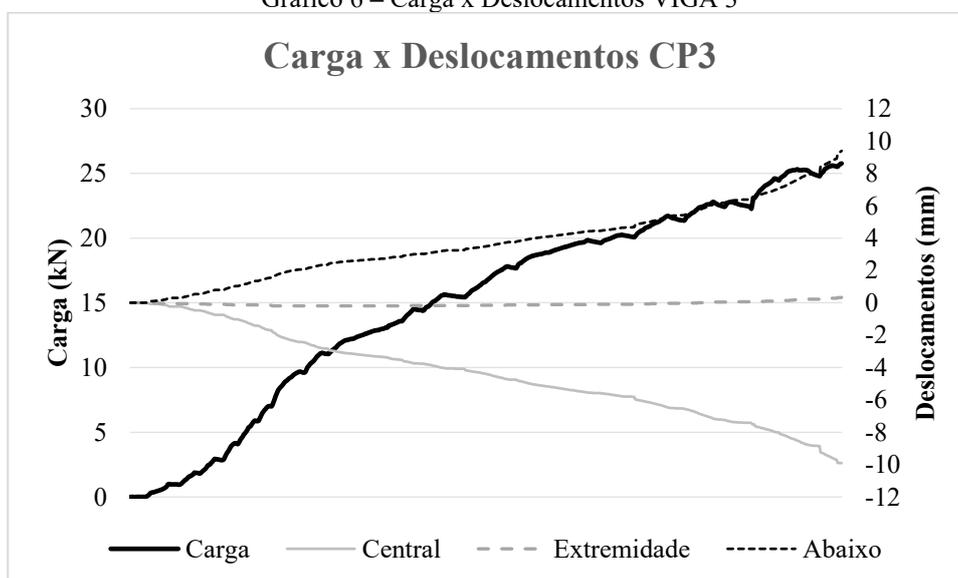
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 3, com diâmetro externo de 100mm e armadura transversal Ø5mm c/ 10:

Gráfico 5 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 3



Fonte: Autor

Gráfico 6 – Carga x Deslocamentos VIGA 3

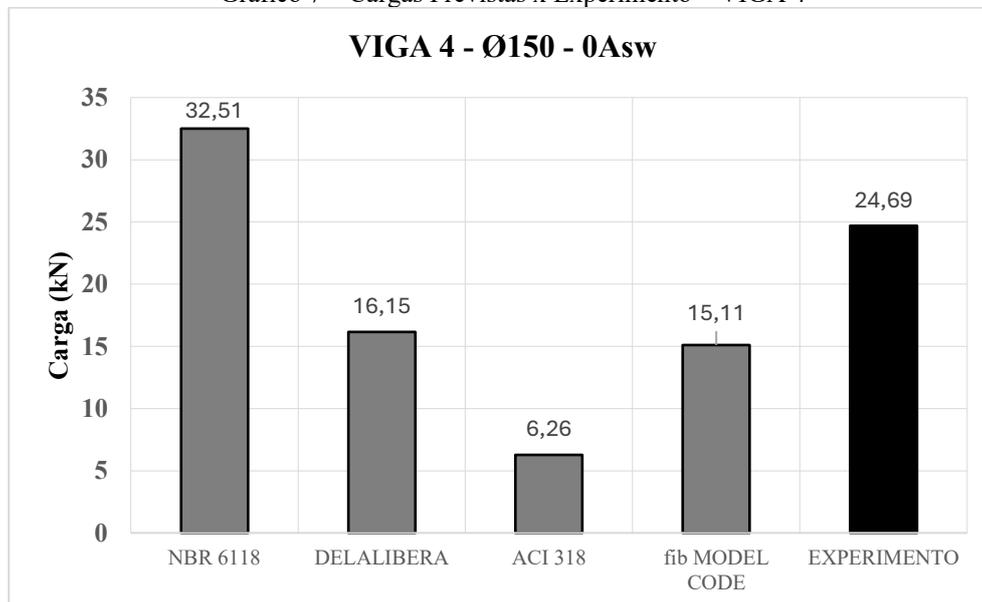


Fonte: Autor

4.4 CORPO DE PROVA 4

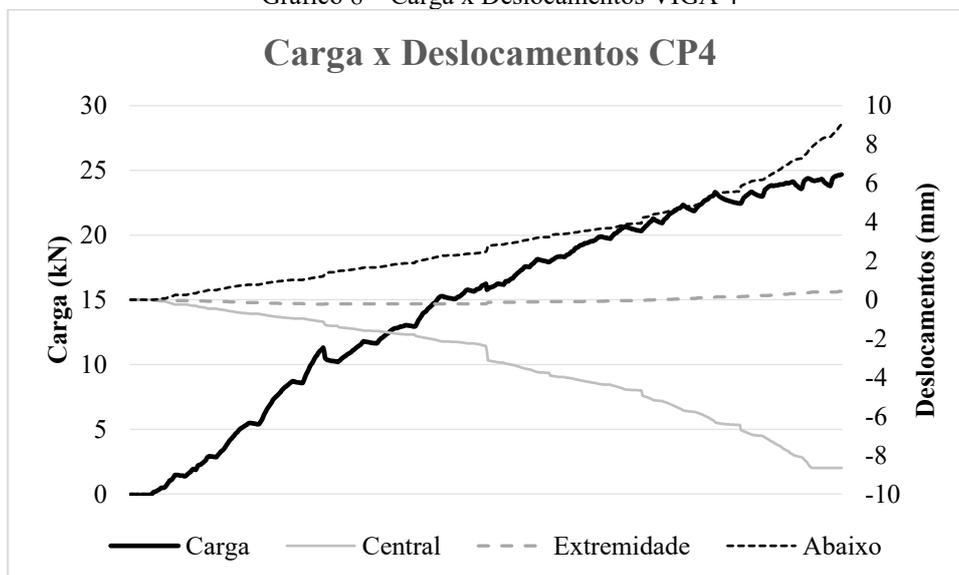
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 4, com diâmetro externo de 150mm sem armadura transversal:

Gráfico 7 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 4



Fonte: Autor

Gráfico 8 – Carga x Deslocamentos VIGA 4

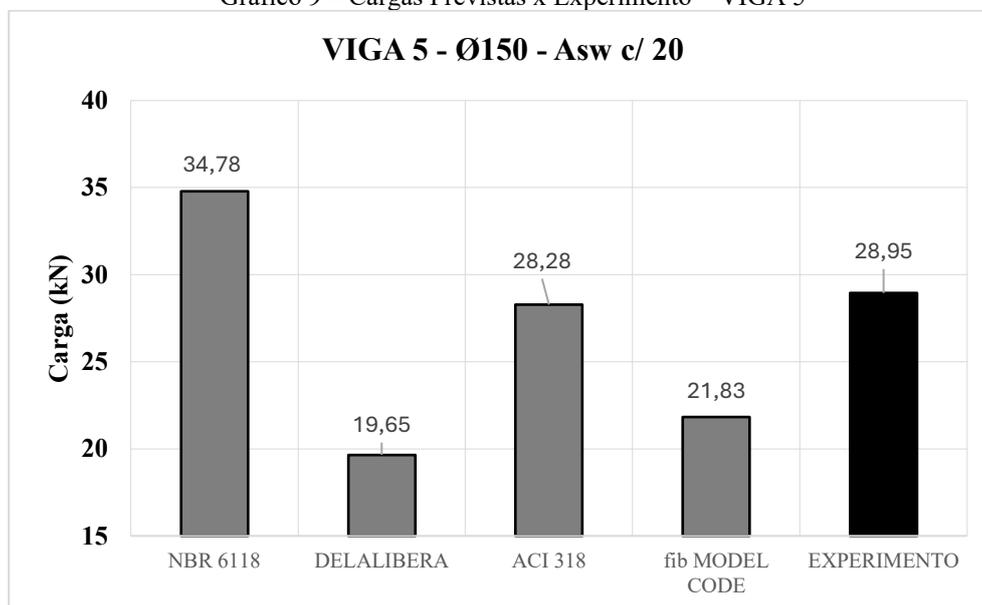


Fonte: Autor

4.5 CORPO DE PROVA 5

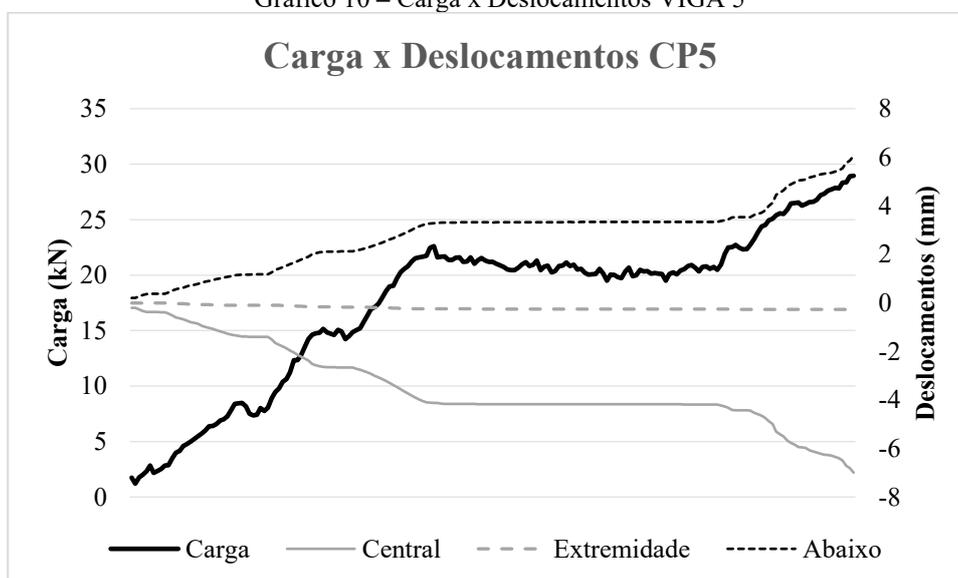
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 5, com diâmetro externo de 150mm e armadura transversal $\varnothing 5\text{mm}$ c/20 :

Gráfico 9 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 5



Fonte: Autor

Gráfico 10 – Carga x Deslocamentos VIGA 5

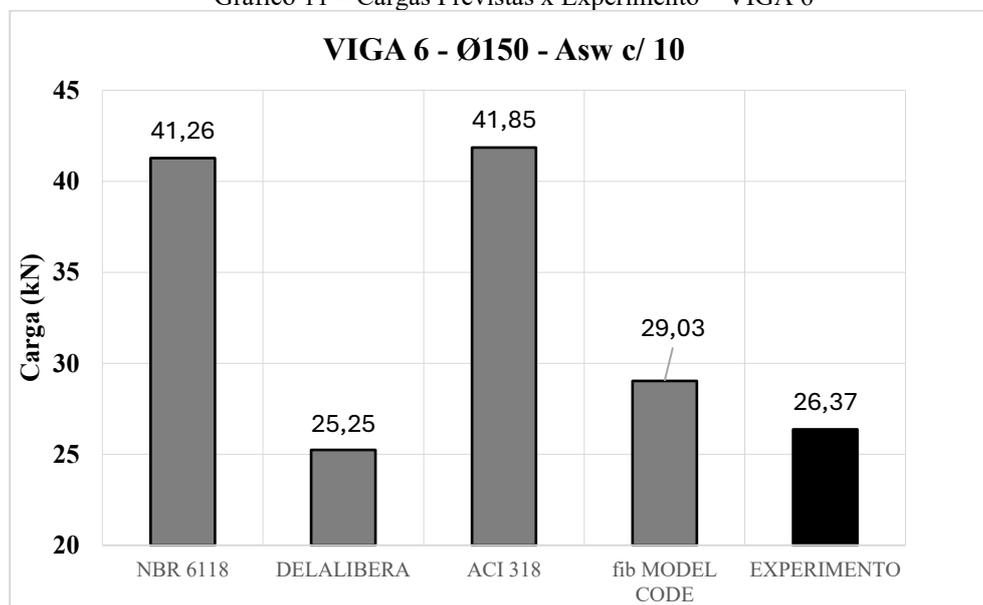


Fonte: Autor

4.6 CORPO DE PROVA 6

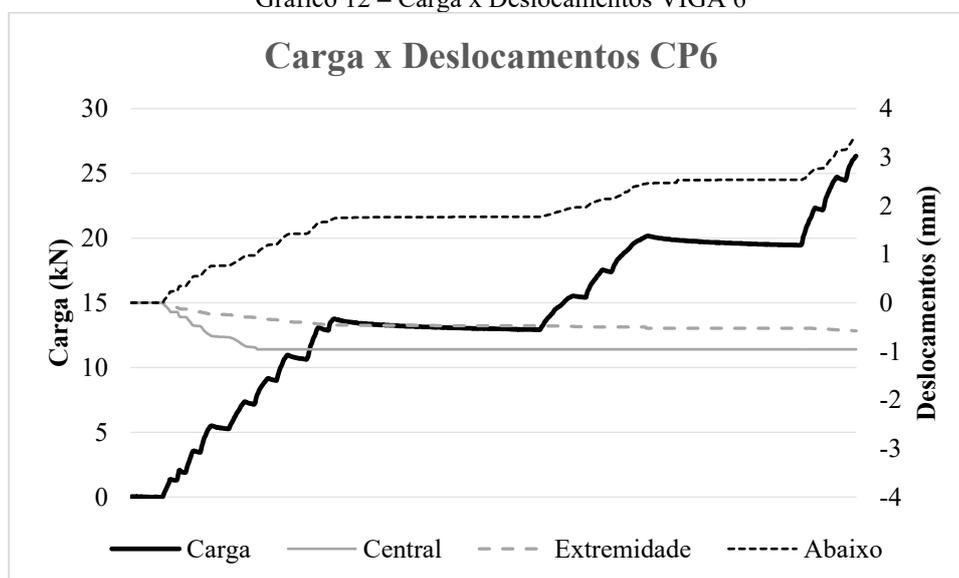
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 6, com diâmetro externo de 150mm e armadura transversal Ø5mm c/10 :

Gráfico 11 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 6



Fonte: Autor

Gráfico 12 – Carga x Deslocamentos VIGA 6



Fonte: Autor

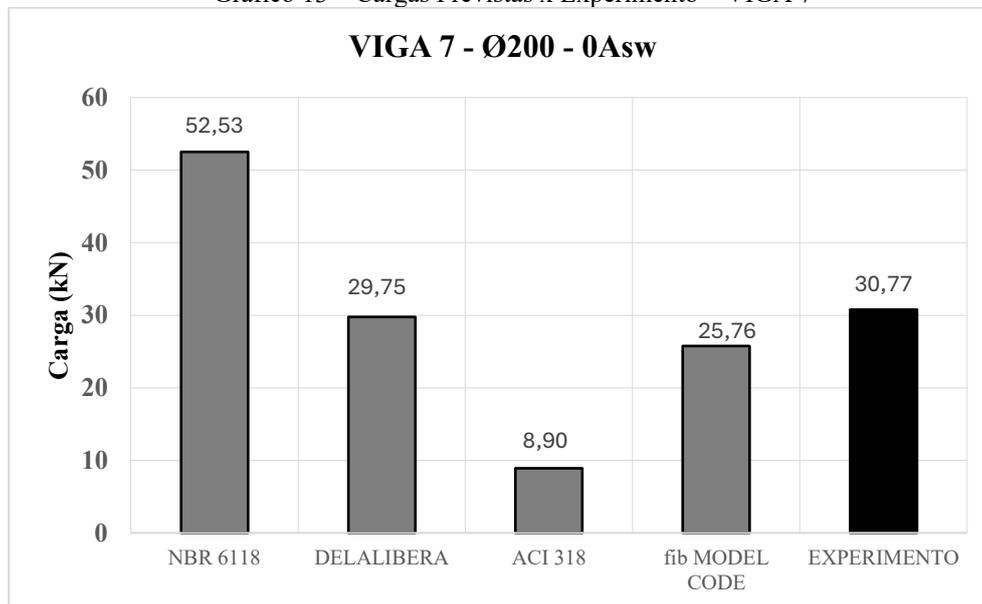
Neste caso, teve uma diferença considerável na capacidade resistente prevista da viga, por motivos não determinados. Pode ter ocorrido erro no posicionamento de armaduras, falha na concretagem, dentre outras possibilidades.

Resultados inclusive inferiores à Vigas 4 e 5.

4.7 CORPO DE PROVA 7

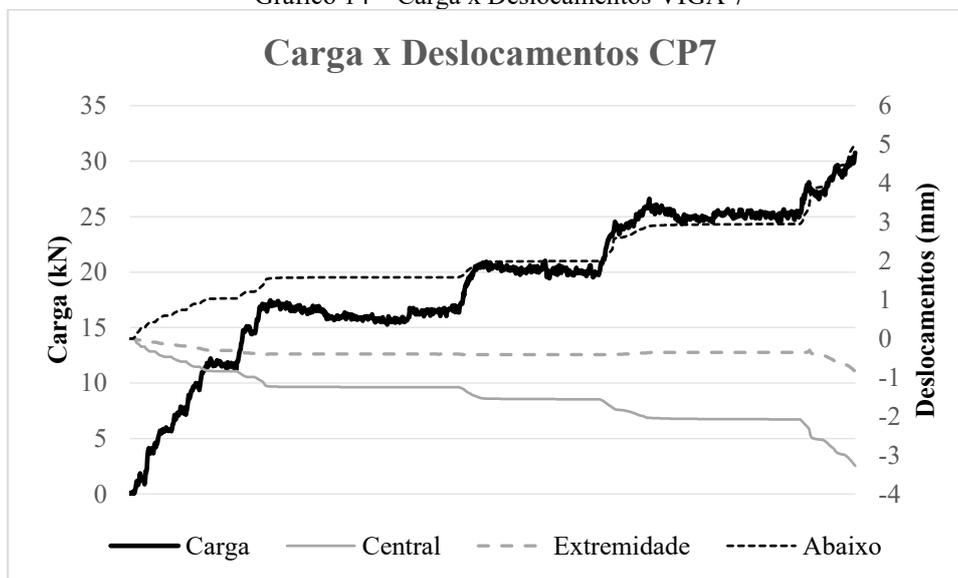
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 7, com diâmetro externo de 200mm e sem armadura transversal:

Gráfico 13 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 7



Fonte: Autor

Gráfico 14 – Carga x Deslocamentos VIGA 7

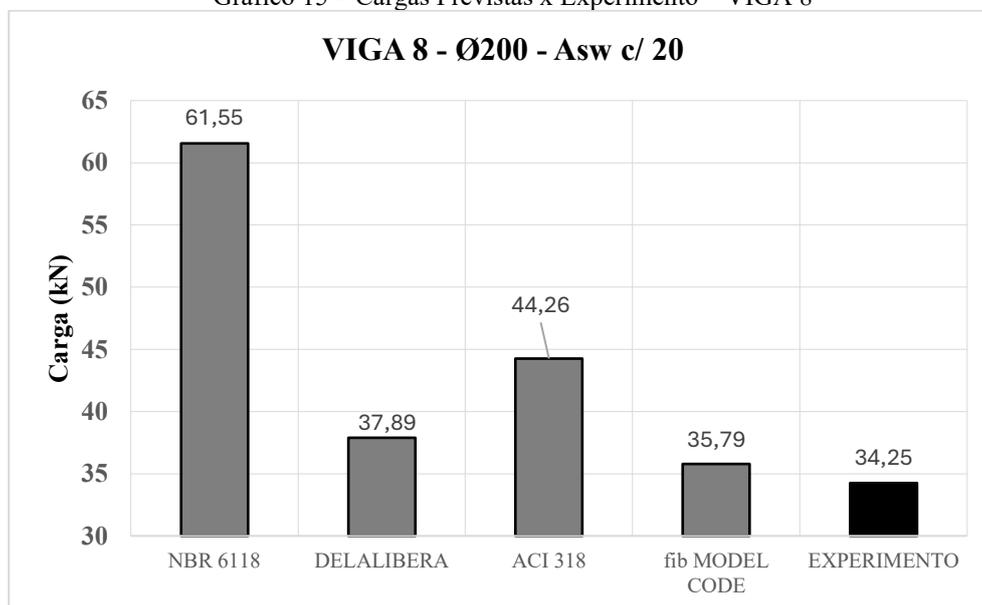


Fonte: Autor

4.8 CORPO DE PROVA 8

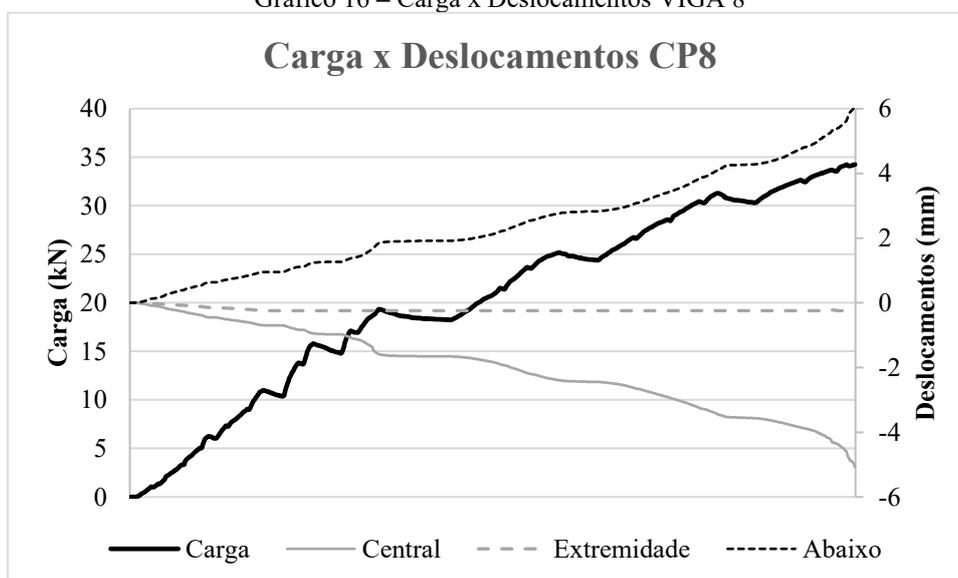
Em seguida, foi ensaiada a viga VIGA 8, com diâmetro externo de 200mm e armadura transversal $\varnothing 5\text{mm}$ c/20 :

Gráfico 15 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 8



Fonte: Autor

Gráfico 16 – Carga x Deslocamentos VIGA 8

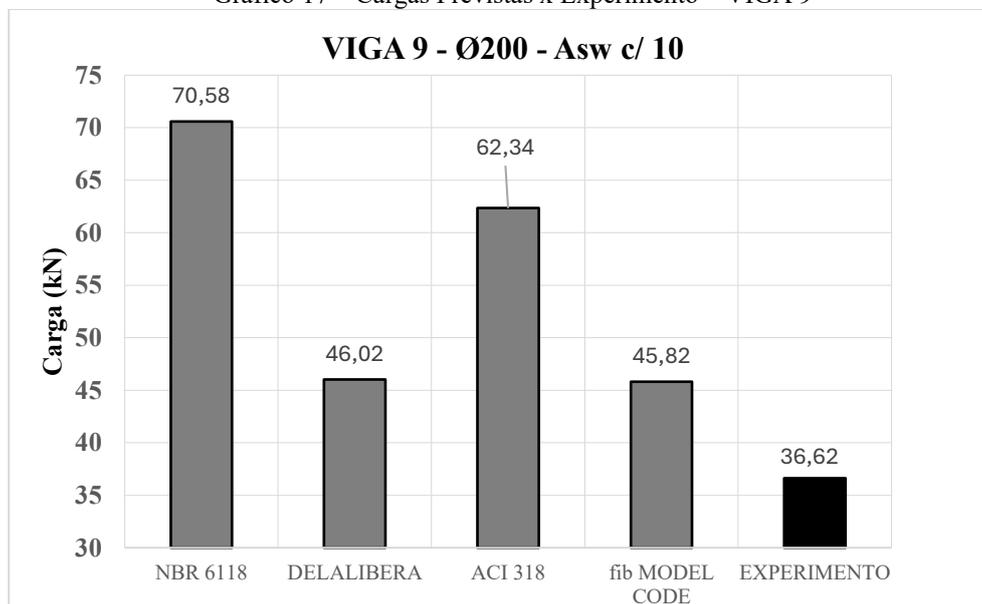


Fonte: Autor

4.9 CORPO DE PROVA 9

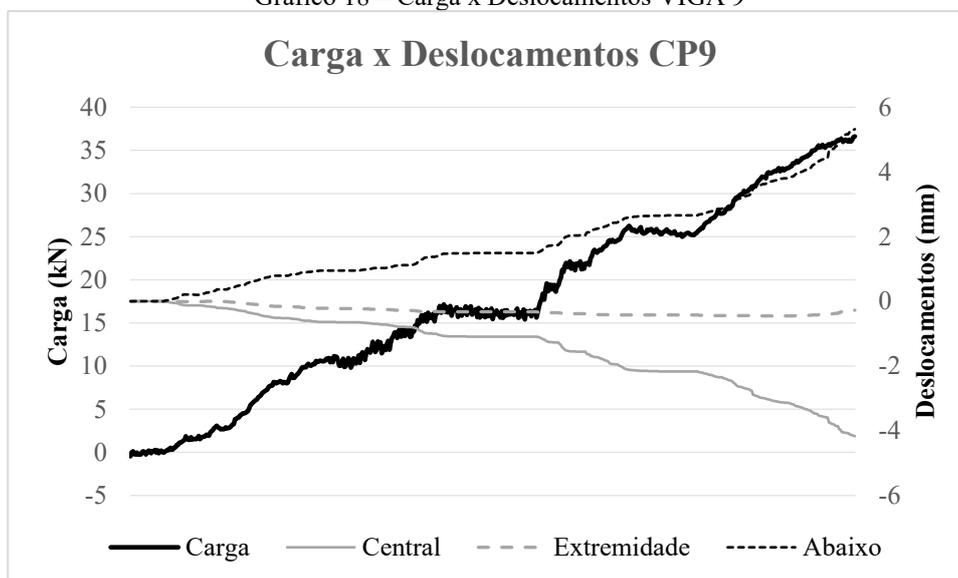
E por fim, foi ensaiada a viga VIGA 9, com diâmetro externo de 200mm, armadura transversal Ø5mm c/10 :

Gráfico 17 – Cargas Previstas x Experimento – VIGA 9



Fonte: Autor

Gráfico 18 – Carga x Deslocamentos VIGA 9



Fonte: Autor

5. SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 NBR 6118 x EXPERIMENTO

A tabela abaixo mostra a comparação entre os resultados obtidos em laboratório e as cargas de ruptura previstas, de acordo com a NBR 6118:2023

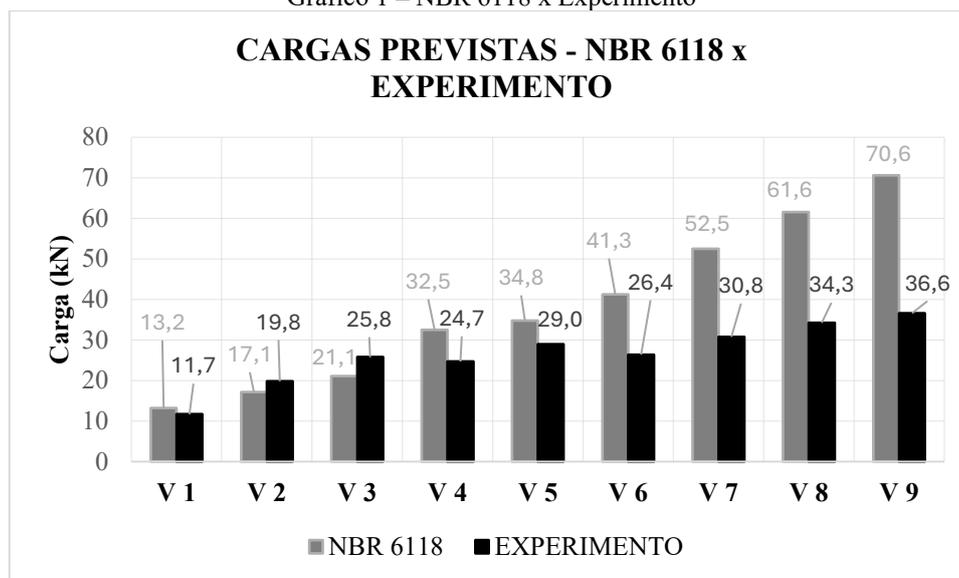
Tabela 10 – NBR 6118 x Experimento

PREVISÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (kN)									
MÉTODO	VIGA 1 Ø100 0Asw	VIGA 2 Ø100 c/20	VIGA 3 Ø100 c/10	VIGA 4 Ø150 0Asw	VIGA 5 Ø150 c/20	VIGA 6 Ø150 c/10	VIGA 7 Ø200 0Asw	VIGA 8 Ø200 c/20	VIGA 9 Ø200 c/10
NBR 6118	13,1735	17,1143	21,0551	32,5087	34,7807	41,2640	52,5258	61,5516	70,5774
EXPERIMENTO	11,6900	19,8200	25,7700	24,6900	28,9500	26,3669	30,7700	34,2500	36,6200
ERRO (%)	11%	14%	18%	32%	20%	56%	71%	80%	93%
ERRO MÉDIO (%) =									43,9%

Fonte: Autor

Em forma de gráfico:

Gráfico 1 – NBR 6118 x Experimento



Fonte: Autor

Pode-se observar que a NBR 6118:2023 passa a superestimar a capacidade resistente das vigas com diâmetro igual ou superior a 150mm. Isto pode ocorrer por ser um modelo mais simples, que não incorpora em seus cálculos o efeito escala nem a teoria dos campos de compressão.

Visualmente, este método aparenta não ser eficiente na previsão da capacidade de carga das vigas. O modelo precisa de parâmetros de ajuste, de forma a diminuir a força cortante resistente.

5.2 DELALIBERA x EXPERIMENTO

A tabela abaixo mostra a comparação entre os resultados obtidos em laboratório e as cargas de ruptura previstas, de acordo com o método proposto por Delalibera (2020).

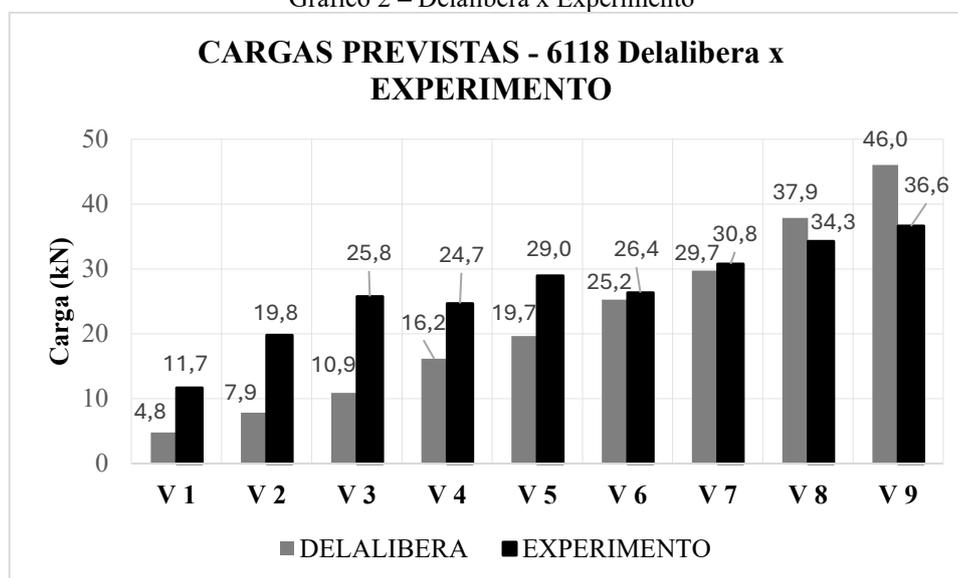
Tabela 11 – Delalibera x Experimento

PREVISÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (kN)									
	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3	VIGA 4	VIGA 5	VIGA 6	VIGA 7	VIGA 8	VIGA 9
MÉTODO	Ø100 0Asw	Ø100 c/20	Ø100 c/10	Ø150 0Asw	Ø150 c/20	Ø150 c/10	Ø200 0Asw	Ø200 c/20	Ø200 c/10
DELALIBERA	4,8061	7,8570	10,9080	16,1537	19,6546	25,2480	29,7491	37,8851	46,0210
EXPERIMENTO	11,6900	19,8200	25,7700	24,6900	28,9500	26,3669	30,7700	34,2500	36,6200
ERRO (%)	143%	60%	58%	35%	32%	4%	3%	11%	26%
ERRO MÉDIO (%) =									41,3%

Fonte: Autor

Em forma de gráfico:

Gráfico 2 – Delalibera x Experimento



Fonte: Autor

Pode-se observar que o modelo apenas superestima a capacidade resistente apenas em peças maiores armadas. Nas vigas de 100mm e 150mm, o modelo subestima a capacidade resistente.

Visualmente, este método aparenta ser adequado, porém, requer parâmetros de ajuste, para que os resultados fiquem mais próximos aos valores obtidos em laboratório.

5.3 ACI 318 x EXPERIMENTO

A tabela abaixo mostra a comparação entre os resultados obtidos em laboratório e as cargas de ruptura previstas, de acordo com a norma americana ACI 318 (19).

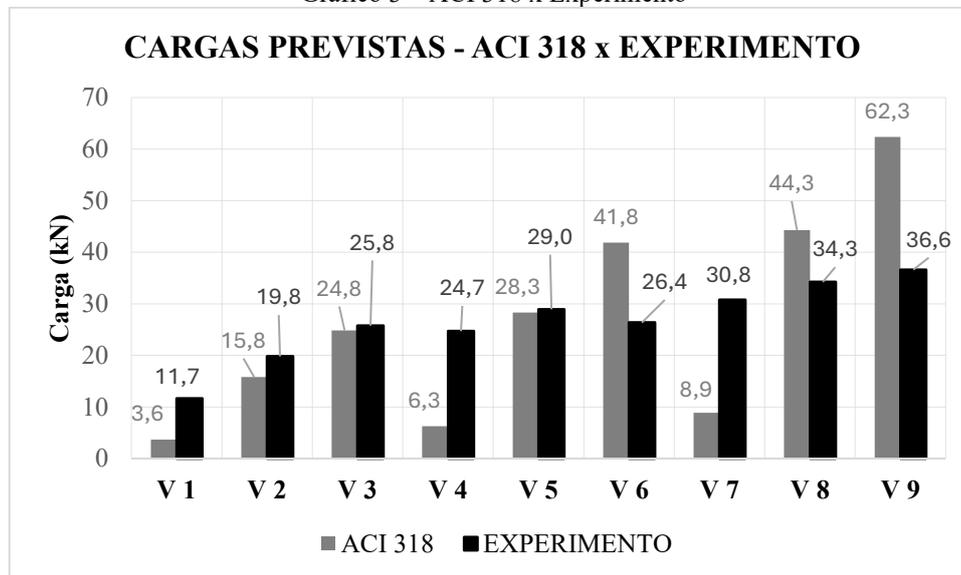
Tabela 12 – ACI x Experimento

PREVISÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (kN)									
MÉTODO	VIGA 1 Ø100 0Asw	VIGA 2 Ø100 c/20	VIGA 3 Ø100 c/10	VIGA 4 Ø150 0Asw	VIGA 5 Ø150 c/20	VIGA 6 Ø150 c/10	VIGA 7 Ø200 0Asw	VIGA 8 Ø200 c/20	VIGA 9 Ø200 c/10
ACI 318	3,6474	15,8007	24,8414	6,2629	28,2845	41,8456	8,8969	44,2564	62,3378
EXPERIMENTO	11,6900	19,8200	25,7700	24,6900	28,9500	26,3669	30,7700	34,2500	36,6200
ERRO (%)	221%	20%	4%	75%	2%	59%	71%	29%	70%
ERRO MÉDIO (%) =									61,2%

Fonte: Autor

Em forma de gráfico:

Gráfico 3 – ACI 318 x Experimento



Fonte: Autor

Pode-se observar que o modelo subestima a capacidade resistente das vigas não armadas à cortante (V1, V4 e V7) mesmo incorporando a teoria dos campos de compressão e o efeito escala no modelo de cálculo.

Além disso, o modelo aparenta superestimar a capacidade resistente de vigas armadas com diâmetros iguais ou superiores a 200mm (V8 e V9).

Isto é curioso, tendo em vista que a norma traz adaptações para as formulações, de forma a indicar parâmetros para trabalhar com seções circulares. Seria esperado que os resultados fossem mais ajustados aos dados de laboratório.

Dessa forma, por apresentar cortante resistente superior aos resultados obtidos em laboratório, o modelo requer ajustes para levar estes efeitos em consideração, introduzindo fatores de redução da capacidade resistente prevista, além de ser necessário rever os modelos para membros não armados à força cortante.

5.4 FIB Model Code x EXPERIMENTO

A tabela abaixo mostra a comparação entre os resultados obtidos em laboratório e as cargas de ruptura previstas, de acordo com a norma europeia FIB Model Code 2010.

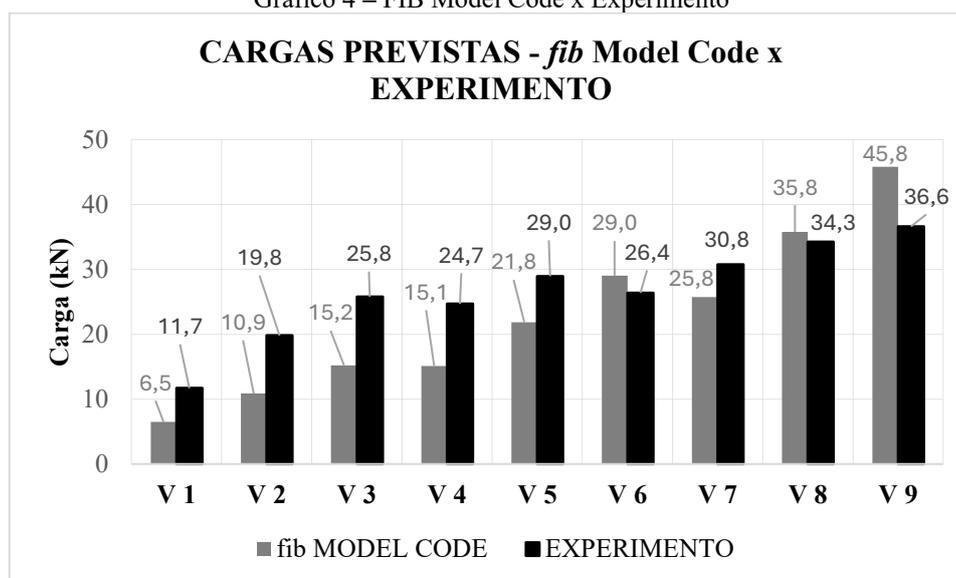
Tabela 13 – Model Code x Experimento

PREVISÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (kN)									
	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3	VIGA 4	VIGA 5	VIGA 6	VIGA 7	VIGA 8	VIGA 9
MÉTODO	Ø100 0Asw	Ø100 c/20	Ø100 c/10	Ø150 0Asw	Ø150 c/20	Ø150 c/10	Ø200 0Asw	Ø200 c/20	Ø200 c/10
<i>fib</i> Model Code	6,4712	10,8503	15,2294	15,1083	21,8293	29,0336	25,7584	35,7880	45,8175
EXPERIMENTO	11,6900	19,8200	25,7700	24,6900	28,9500	26,3669	30,7700	34,2500	36,6200
ERRO (%)	81%	45%	41%	39%	25%	10%	16%	4%	25%
ERRO MÉDIO (%) =									31,8%

Fonte: Autor

Em forma de gráfico:

Gráfico 4 – FIB Model Code x Experimento



Fonte: Autor

Pode-se observar que o modelo apresenta resultados mais próximos dos obtidos em laboratório, apenas superestimando a capacidade resistente em poucos casos (V6, V8 e V9).

Este modelo apresentou o menor erro médio dentre as normas analisadas. No entanto, ainda necessita de ajustes, pois a superestimativa vai contra a segurança, podendo levar a membros com capacidade resistente insuficiente.

5.5 TODOS OS MÉTODOS

Os resultados foram reunidos nas tabelas a seguir:

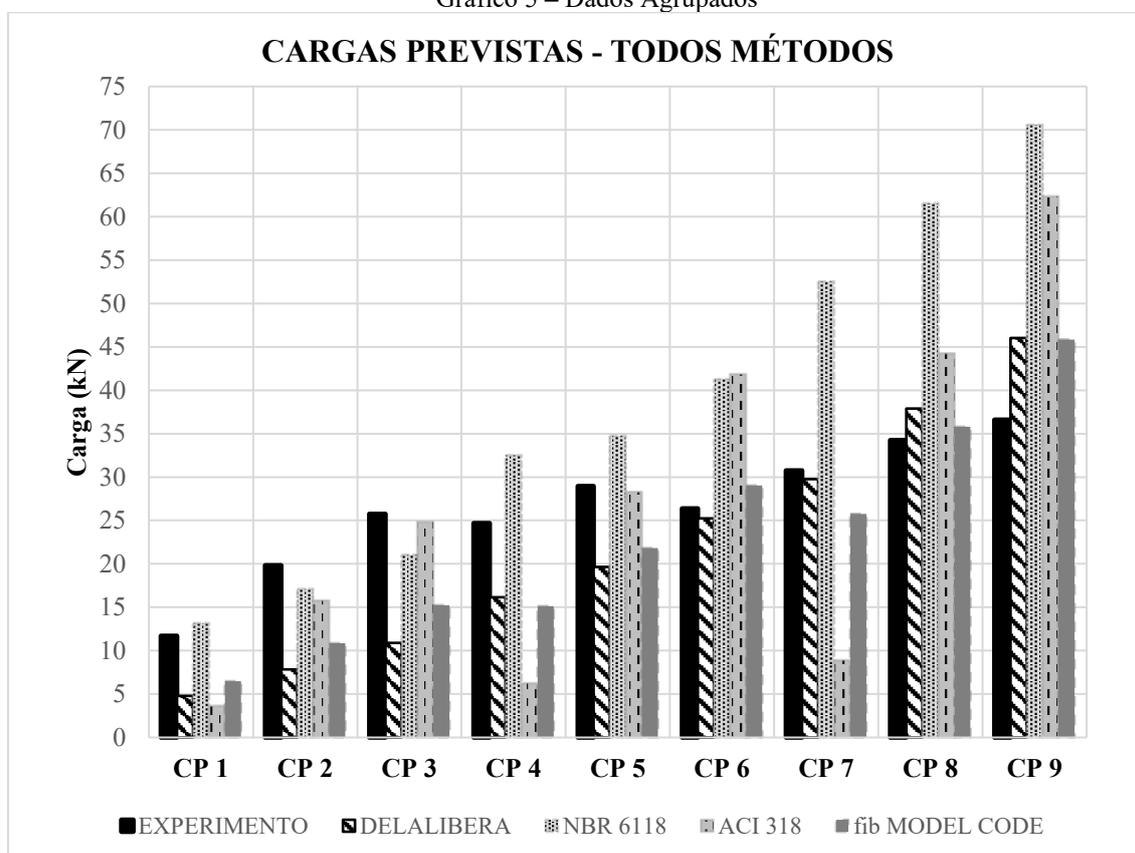
Tabela 14 – Dados Agrupados

PREVISÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (kN)									
MÉTODO	Ø100 0Asw	Ø100 c/20	Ø100 c/10	Ø150 0Asw	Ø150 c/20	Ø150 c/10	Ø200 0Asw	Ø200 c/20	Ø200 c/10
NBR 6118	13,17	17,11	21,06	32,51	34,78	41,26	52,53	61,55	70,58
DELALIBERA	4,81	7,86	10,91	16,15	19,65	25,25	29,75	37,89	46,02
ACI 318	3,65	15,80	24,84	6,26	28,28	41,85	8,90	44,26	62,34
FIB MODEL CODE	6,47	10,85	15,23	15,11	21,83	29,03	25,76	35,79	45,82
EXPERIMENTO	11,69	19,82	25,77	24,69	28,95	26,37	30,77	34,25	36,62

Fonte: Autor

Em forma de gráfico:

Gráfico 5 – Dados Agrupados



Fonte: Autor

Tabela 15 – Correlação com o Experimento

MÉTODO	Coefficiente de Correlação (R)
NBR 6118	0,9058
DELALIBERA	0,9042
ACI 318	0,7262
FIB MODEL CODE	0,8994

Fonte: Autor

Com esses dados em mãos, o modelo mais adequado para a análise de elementos lineares de concreto armado com seção circular submetidos à força cortante seria o *fib* Model Code 2020.

Isto se dá pois o modelo apresentou a menor taxa de erro média, em 31,8% , além de ter um coeficiente de correlação bem próximo a 90%. Juntamente com a análise qualitativa visual dos gráficos, o modelo se mostra o mais adequado, porém, ainda superestima a capacidade resistente dos maiores membros, o que torna o método passível de revisão.

Assim como a norma americana ACI 318-19(22), o *fib* Model Code 2020 tem sua formulação de resistência à força cortante embasada na teoria dos campos de compressão, método mais preciso e atual.

Enquanto os métodos NBR 6118:2023, Delalibera e *fib* Model Code 2020 tiveram coeficientes de correlação próximos a 0,90 , nenhum método mostrou-se plenamente adequado para as situações analisadas.

A norma americana ACI 318 (19) chega a abordar métodos para reduzir a força cortante resistente, aplicando um fator de redução λ_s que leva em consideração o efeito escala (cap. 22.5), mas este só é aplicado no cálculo de peças com armadura transversal menor que a mínima, ou para peças não armadas a cortante. Este método reduz significativamente a capacidade resistente, talvez até além do necessário, como foi possível observar nas cargas previstas das vigas VIGA 1, VIGA 4 e VIGA 7.

A norma americana já apresenta algum progresso para lidar com seções circulares, ao indicar ao calculista algumas adaptações para seções circulares, como, por exemplo, a utilização de $b_w = 0.8 d$, dentre outras (cap 22.5). Isto, no entanto, não é refletido nos resultados que o método entrega. Às vezes subestima, às vezes superestima.

No que diz respeito ao método Delalibera, este se mostrou relativamente efetivo, apenas superestimando a capacidade dos maiores membros armados. Isto reflete o modelo da norma NBR 6118 no qual o método é baseado.

A norma NBR 6118:2023 é apenas baseada nos modelos de treliça de Ritter-Mörsch, e não incorpora elementos da teoria dos campos de compressão em sua formulação. Dessa forma, tanto os modelos de cálculo da NBR 6118:2022, como o método Delalibera requerem fatores de ajuste para a análise de elementos com seção circular.

6. CONCLUSÃO

Com todas as informações em mãos, pode-se concluir que nenhum dos métodos está realmente adequado para a análise de elementos lineares com seção circular submetidos à força cortante.

A capacidade preditiva dos modelos analisados não parece seguir padrões, vez um método estima melhor, vez outro estima melhor. Além disso, não há melhoria perceptível na correlação em peças não armadas à cortante, o que sinaliza problemas nos modelos referentes à parcela da cortante resistida pelo concreto.

A capacidade preditiva de elementos armados também não demonstra resultados satisfatórios, o que pode levar a conclusão de que há problemas nos modelos de cálculo referentes à parcela resistida pelos estribos. Pode ser também referente ao diferente comportamento de estribos circulares frente ação da força cortante que não é traduzido nos resultados obtidos pelos métodos analisados.

A principal preocupação observada é a superestimativa da capacidade resistente, que ocorreu em todos os métodos analisados neste trabalho. Isto pode levar ao projeto e execução de membros com capacidade resistente inadequada, comprometendo sua integridade estrutural.

Frente a todos os problemas enunciados, este trabalho visa informar que as normas disponíveis para análise de resistência à força cortante não apresentam modelos de cálculo efetivos para todas as situações. No caso particular da análise de elementos com seção circular, fazem-se necessários mais estudos aprofundados para melhorar os modelos de cálculo, de forma a torná-los otimizados e seguros para esta situação.

REFERÊNCIAS

JENSEN, Uffe G.; HOANG, Linh C.; JOERGENSEN, Henrik B; FABRIN, Lars S. Shear strength of heavily reinforced concrete members with circular cross section. **Engineering Structures**, [S.L.] v.32, p. 617-626, novembro 2009. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.11.008>.

BENTZ, E.C.; VECCHIO, F.J.; COLLINS, M.P. Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements. **ACI Structural Journal**, v.103, p. 614-624, julho 2006. <https://doi.org/10.14359/16438>.

QUEIROZ JUNIOR, F. O. Análise de resistência ao cisalhamento em peças de seções circulares vazadas utilizando a teoria do campo de compressão modificada. 2014. **Repositório UFPE**. [DISSERTAÇÃO Francinaldo Junior.pdf \(ufpe.br\)](#).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-19(22). 624p, 2019.

The International Federation for Structural Concrete, Model Code for Concrete Structures 2020 (MC2020).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS DE NORMAS TÉCNICAS, Projeto de Estruturas de Concreto, NBR 6118:2023, 242p, novembro 2023.