

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33

3
44
55
66
77
88
99
10

10

11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31

30

32

33

ABSTRACT: During the execution of buildings, there are many situations that weren't predicted in project, as a result of incompatibility, for example, between the structural design and the hydraulic installations. Therefore, usually holes are created to pass pipes through structural elements that haven't been designed for this purpose. This inadequate passage of piping reduces the strength of the structure, and may damage the integrity of the building. For this reason, the objective of this paper was to analyze the presence of openings reinforced concrete beams. The method used was the finite elements analysis in the ATENA 2D software. For that, at first, it was necessary to do the calibration of the numerical model from an experiment performed on four beams. All the beams have 250 cm of length and 25 cm of height, resting on two supports with two symmetric concentrated loads. The analysis was made on nine beams. From the reference beam without opening, six other beams were designed, six of them with a circular opening, ranging the diameter opening (75 mm and 150 mm) and the opening position, in addition to the reinforcement presence. It was also done, the numerical modeling of another two beams with rectangular openings of 8 cm x 30 cm, with and without reinforcement, to analyze the influence of the reinforcement near the opening. Regarding the collapse load, it was realized that the beam with a 150 mm diameter opening in the central part had a reduction of 13,81 % when compared to the reference one. Yet, the same beam had an increase of 18,10 % in its strength. The reinforcement presence caused an improvement in all of their properties, with an increase of the collapse load and the stiffness and the reduction of the cracking.

KEYWORDS: collapse load, cracking, finite elements method, reinforcement, structural design, structural stiffness.

1 INTRODUÇÃO

Diversos projetos de engenharia estão vinculados à construção de uma obra, como o arquitetônico, o elétrico, o hidrossanitário, o estrutural, entre outros. Na maioria das vezes, esses projetos não são feitos por apenas um profissional, já que é comum a terceirização desses serviços, e isso pode implicar em incompatibilidades entre eles. Inicialmente, a compatibilização gera um custo, que no decorrer da construção é ressarcido em economia de tempo, de material e de mão de obra.

Assim, é comum realizar a passagem de tubulações e eletrodutos pelos elementos estruturais de forma aleatória, ou seja, sem nenhuma previsão no projeto, e isso pode comprometer a capacidade resistente da estrutura. A Figura 1 apresenta vigas distintas de uma residência com abertura na direção da largura em duas posições diferentes, próxima ao apoio e próxima ao centro.

Figura 1. Aberturas circulares em vigas.



a) Próxima ao apoio

b) Próxima ao centro

Fonte: Autor.

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

2 REFERENCIAL TEÓRICO

81

82

83

84

85

2.1 Modelos numéricos

86

87

88

89

Para estudos que realizam comparativos em um elemento estrutural, de acordo com variações em seu formato, dimensão, ponto de aplicação de cargas, entre outros, a modelagem computacional é importante, pois, permite estimar, de forma precisa, o comportamento da estrutura frente à essas alterações.

Entretanto, para isso, é necessário que seja feita uma validação do modelo computacional, que, segundo Silva e Rosa (2015), irá avaliar a resposta da estrutura, a fim de ser analisado se o seu comportamento está de acordo com o esperado. Para o desenvolvimento de uma modelagem computacional consistente, deve ser realizado um estudo detalhado do ensaio experimental, podendo, assim, validar a mesma (SIMOES, ROCHA E MUNAIAR NETO, 2018).

A validação de um modelo computacional representa de forma eficaz o comportamento da estrutura. Existem muitos *softwares* que auxiliam nessa análise, como por exemplo o ATENA 2D. O processamento no *software* depende da escolha dos modelos pré-definidos para o concreto e o aço, no caso do concreto armado, e de alguns parâmetros como a resistência média à compressão, resistência média à tração, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e energia de fratura, que devem ser definidos para representar os materiais.

2.2 Furos e aberturas em vigas de concreto armado

Os furos e aberturas em vigas são permitidos, desde que estejam de acordo com o item 13.2.5.1 da norma ABNT NBR 6118 (2014). Entretanto, existem restrições e seu efeito na resistência deve ser verificado em algumas situações.

Assim, a ABNT NBR 6118 (2014) traz algumas recomendações. Para os furos que atravessam as vigas na direção da sua largura, a distância mínima de um furo à face mais próxima da viga deve ser no mínimo igual a 5 cm e duas vezes o cobrimento previsto.

Além disso, para ser dispensada a verificação, devem ser respeitadas as seguintes condições: os furos devem estar situados em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo $2h$, onde h é a altura da viga; possuir dimensão do furo de no máximo 12 cm e $h/3$; a distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, deve ser de no mínimo $2h$; os cobrimentos deverão ser suficientes e não poderá haver seccionamento das armaduras.

Pontes, Silva e Silva (2016) analisaram experimentalmente cinco vigas com aberturas atravessando na direção da altura e com isso foram observadas as formas de ruptura e o modelo de fissuração. Das estruturas analisadas, três apresentaram ruptura por cisalhamento, enquanto as outras duas romperam por flexão. Com essa análise, foi possível concluir que os furos verticais influenciaram na resistência ao cisalhamento das vigas, causando aumento da tração diagonal na região de flexão simples.

2.3 Análise não linear

Para realizar a análise não linear empregando o Método dos Elementos Finitos, é necessário recurso computacional. Dessa forma, o avanço da tecnologia foi determinante para a consagração do método. Segundo Lyra (2011), o *software* ATENA 2D é capaz de descrever bem a resposta do

concreto submetido a vários tipos de carregamentos, desde que utilizado corretamente os parâmetros de entrada dos modelos constitutivos.

2.3.1 Modelo constitutivo do concreto armado

Encontrar um modelo constitutivo para o concreto armado é muito difícil devido à sua complexidade, por isso, ainda não existe um modelo único (BITTENCOURT E LYRA, 2013). Em virtude da armação existente, as estruturas de concreto armado demandam uma modelagem de elementos finitos especial.

Conforme Lyra (2011), o concreto é representado por elementos planos e sólidos, já as barras de aço individuais são representadas por elementos de barras incorporados ao concreto com rigidez axial. Dessa forma, a malha é gerada primeiramente para o concreto, e a barra é incorporada à malha gerada. Os nós dos elementos de barras estão cinematicamente dependentes aos nós do concreto.

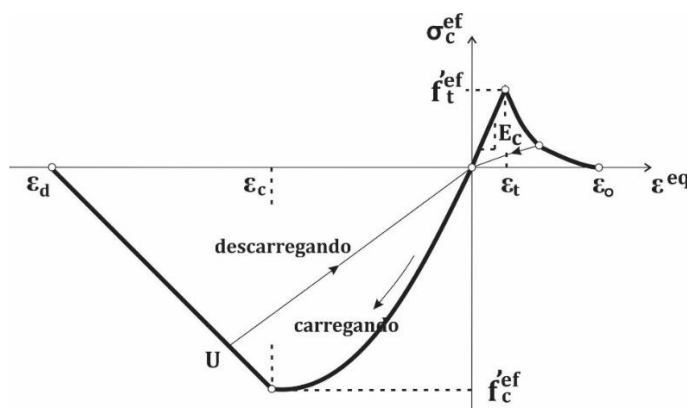
2.3.1.1 Concreto

Um dos modelos utilizados pelo *software* ATENA 2D para modelar o concreto é o *SBeta*, que, segundo Barros (2014), inclui as seguintes influências:

- Comportamento não linear na compressão, incluindo efeitos de endurecimento e amolecimento;
- Fraturamento do concreto baseado na tensão da mecânica da fratura não linear;
- Critério de resistência biaxial;
- Redução da tensão de compressão depois de fissurado.

De acordo com Lyra (2011), o comportamento não linear do concreto no estado biaxial de tensão é representado pela tensão efetiva (σ_c^{ef}) e o uniaxial equivalente da deformação (ε^{eq}). Na maioria dos casos, a tensão efetiva é a tensão principal. Assim sendo, o diagrama tensão *versus* deformação uniaxial equivalente completo para o concreto é mostrado na Figura 2.

Figura 2. Diagrama tensão *versus* deformação do concreto.



Fonte: Adaptado de Cervenka (2017).

Onde:

ε_t : deformação na máxima tensão de tração.

ε_c : deformação na máxima tensão de compressão.

$f_t'^{ef}$: tensão máxima de tração.

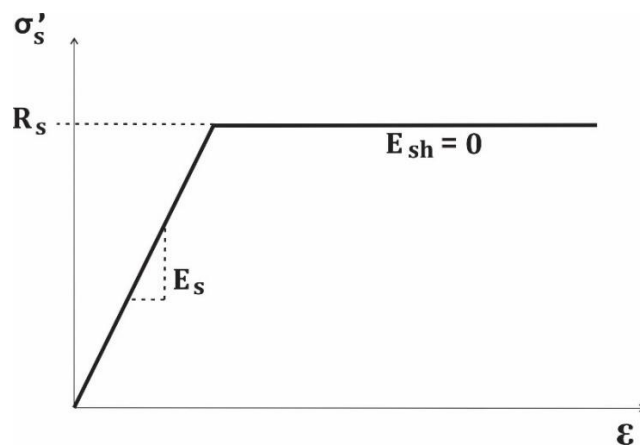
$f_c'^{ef}$: tensão máxima de compressão.

E_c : módulo de elasticidade do concreto.

2.3.1.2 Aço

Para o modelo constitutivo da armadura, o *software* utiliza a lei bilinear, elasto-plástica, que é apresentada na Figura 3.

Figura 3. Tensão *versus* deformação do aço.



Fonte: Adaptado de Cervenka, 2017.

O trecho inicial inclinado do gráfico, é a parte elástica inicial, possuindo módulo de elasticidade do aço igual a E_s . Já o segundo trecho, representado por uma reta horizontal, representa a plasticidade do aço com o endurecimento, possuindo inclinação igual a E_{sh} . Como é considerado que ocorre plastificação perfeita no aço, $E_{sh} = 0$.

2.4 Energia de fratura

A energia de fratura pode ser obtida através de relações empíricas. Segundo o *Model Code* (1993), o valor da energia de fratura G_f pode ser obtido através da Equação 1.

$$G_f = G_{f0} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \quad (1)$$

Onde:

$f_{cm0} = 10\text{MPa}$.

O valor de G_{f0} é dado em função do tamanho máximo do agregado, de acordo com a Tabela 1, onde $d_{máx}$ é a dimensão máxima do agregado utilizado no concreto.

Tabela 1 – Valores de G_{f0}

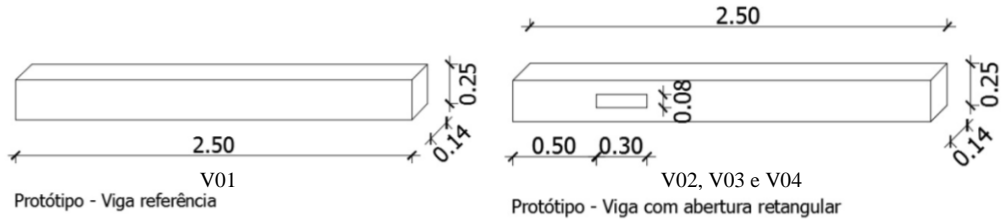
$d_{máx}$ (mm)	G_{f0} (N mm/mm ²)
8	0,025
16	0,030
32	0,058

Fonte: MC90 CEB-FIP (1993)

2.5 Ensaio experimental de Brixner (2017)

A autora confeccionou quatro vigas de concreto armado, sendo uma delas de referência (V01) e três com aberturas (V02, V03 e V04), todas com 250 cm de comprimento, 14 cm de base e 25 cm de altura. A abertura possui 30 cm de largura e 8 cm de altura, e está a uma distância de 50 cm do apoio, conforme mostrado na Figura 4. As vigas possuíam concreto com resistência característica de 25 MPa e aço CA-50.

Figura 4. Dimensões dos protótipos. (Unidades em m)



Fonte: Adaptado de BRIXNER (2017).

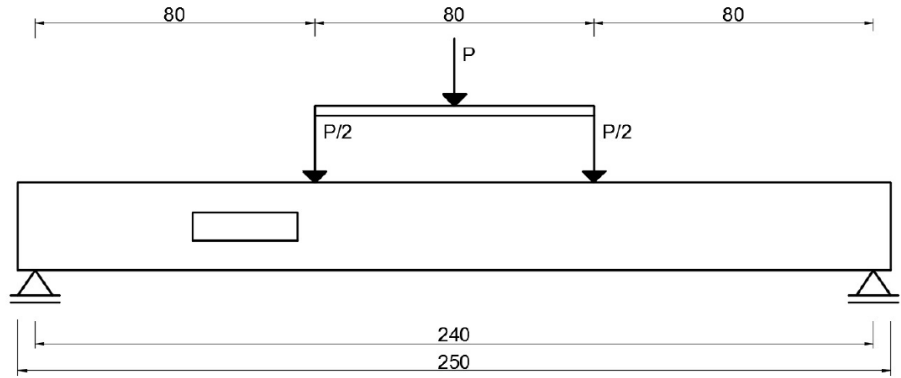
Segundo Brixner (2017), optou-se por utilizar nas vigas duas barras longitudinais de Ø10.0 mm tanto para a armadura inferior, quanto para a superior e pré-definidos estribos de Ø5.0 mm a cada 15 cm.

Para as vigas que possuem aberturas foi calculada uma armadura de reforço, sendo 3 estribos de Ø5.0 mm no banzo comprimido, 2 estribos de mesma bitola no banzo tracionado e como armadura de suspensão, 3 estribos de Ø5.0 mm distribuídos em 6,25 cm de cada lado da abertura. O detalhamento das vigas com aberturas retangulares, está apresentado na Figura A-8, do Apêndice A.

De acordo com Brixner (2017), para determinar as resistências dos materiais, foi realizado ensaio de compressão axial no concreto, e ensaio de tração no aço da armadura longitudinal.

No ensaio experimental optou-se por utilizar a prensa universal para o carregamento em dois pontos de aplicação simétricos, conhecido como o ensaio de Stuttgart (BRIXNER, 2017). A Figura 5 esquematiza a aplicação de cargas nesse método.

Figura 5. Esquema de aplicação de cargas pelo ensaio de Stuttgart. (Unidades em mm)



Fonte: Adaptado de BRIXNER, 2017.

As características dos materiais e a carga de ruptura das vigas experimentais, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados experimentais

Viga	V01	V02	V03	V04
$f_{c,m}$ (MPa)	34,42	37,52	36,05	33,93
$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	54,68	56,00	56,05	55,00
f_y (MPa)	567,41			

Fonte: Autor.

3 METODOLOGIA

Com base no modelo numérico calibrado, estudou-se numericamente mais sete vigas de concreto armado, variando-se a posição e o tamanho das aberturas e a utilização de reforço próximo as aberturas.

3.2 Descrição do modelo numérico

O modelo numérico foi validado a partir das vigas V01 e V04 de Brixner (2017), pois foram as estruturas que apresentaram resultados mais semelhantes com a experimentação física. N modelagem numérica, foram denominadas de VR (Viga de Referência), sem abertura e resistência média do concreto de 34,42 MPa, e VARR (Viga com Abertura Retangular com Reforço), com uma abertura retangular e resistência média do concreto de 33,93 MPa. Em seguida foram modeladas no *software* outras seis vigas a partir dos parâmetros da viga VR, com características variadas como apresentadas na Tabela 3. Para a viga VARR, que se trata de uma viga com abertura retangular de 30 cm de comprimento por 8 cm de altura com reforço, foi analisado numericamente o comportamento sem o reforço, resultado não modelado experimentalmente.

223

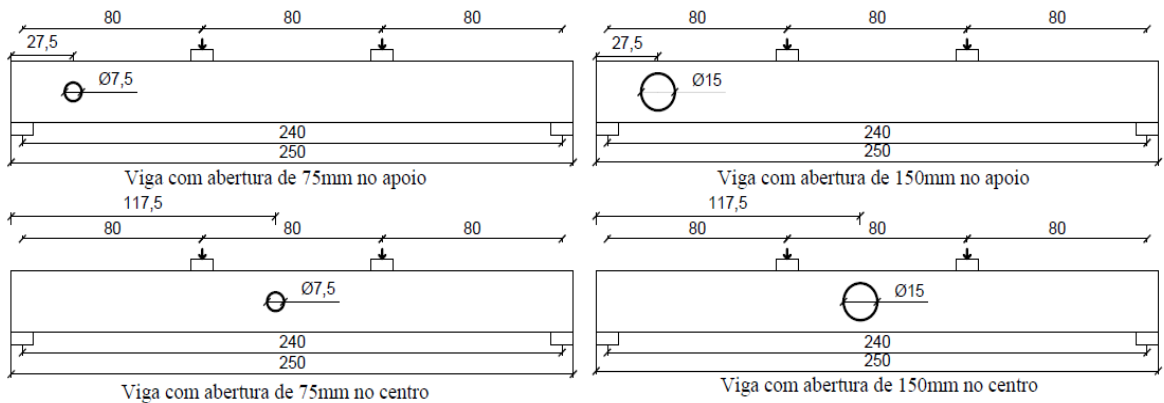
Tabela 3. Variações nas vigas

Nomenclatura	Descrição da viga
VR	Viga de referência
V75A	Viga com abertura de 75mm no apoio
V75C	Viga com abertura de 75mm no centro
V150A	Viga com abertura de 150mm no apoio
V150C	Viga com abertura de 150mm no centro
V75CR	Viga com abertura de 75mm no centro com reforço
V150CR	Viga com abertura de 150mm no centro com reforço
VARR	Viga com abertura retangular com reforço
VAR	Viga com abertura retangular sem reforço

224 Fonte: Autor.

225 As dimensões das vigas modeladas estão representadas na Figura 6.

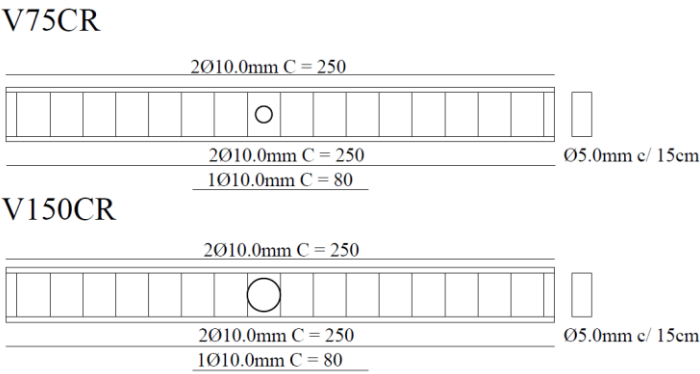
226 Figura 6. Dimensões das vigas analisadas. (Unidades em cm)



227
228 Fonte: Autor.

229 No Apêndice A é possível encontrar os detalhamentos de todas as vigas. O reforço utilizado
230 nas vigas V75CR e V150CR foi a inclusão de uma barra longitudinal de Ø10.0 mm na parte inferior
231 da viga, conforme mostrado na Figura 7.

232 Figura 7. Detalhamento das vigas com armadura de reforço.



233
234 Fonte: Autor.

235 3.2.1 Parâmetros de entrada

236 Para realizar a calibração dos modelos experimentais no *software*, foi necessário informar os
 237 modelos constitutivos do concreto e do aço. No caso do concreto foi utilizado o modelo *SBeta*, onde
 238 definiu-se os parâmetros para análise. Foi utilizado o valor da resistência à compressão do concreto
 239 obtido por Brixner (2017). Os valores do módulo de elasticidade (E_{ci}) e resistência à tração ($f_{ct,m}$),
 240 foram calculados, segundo a ABNT NBR 6118 (2014), de acordo com as Equações 2 e 3,
 241 respectivamente.

$$242 E_{ci} = 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

$$243 f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

244 Onde:

$$245 f_{ck} = 25\text{MPa}$$

246 Ainda segundo a ABNT NBR 6118 (2014), o coeficiente de Poisson (ν) foi adotado igual a 0,2.
 247 O cálculo da energia de fratura foi feito utilizando a Equação 1, substituindo os respectivos valores
 248 de $f_{c,m}$ e adotando o diâmetro máximo do agregado igual a 19 mm para encontrar o valor de G_{f0} . Para
 249 o coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto devido à formação de fissuras, foi
 250 adotado o valor de 0,8 de acordo com Lyra (2011). Os parâmetros estão explicitados na Tabela 4.

251 Tabela 4. Parâmetros de entrada do concreto

Viga	$f_{c,m}$ (MPa)	E_{ci} (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	ν	G_f	Coeficiente de redução
VR	34,42	3,29E+04	3,17	0,2	8,60E-05	0,8
VARR	33,93	3,26E+04	3,14		8,51E-05	

252 Fonte: Autor.

253 Nas barras de aço, foi utilizado o modelo *Reinforcement*, não linear, onde os parâmetros de
 254 entrada foram a tensão média de escoamento de 567,41 MPa, e conforme ABNT NBR 6118 (2014),
 255 o módulo de elasticidade foi de 210 GPa. Para a análise dos dados foi considerada ancoragem perfeita
 256 entre o concreto e o aço, logo, durante o ensaio numérico, não há deslizamento entre os materiais. O
 257 critério de ruptura adotado foi o de *Von Mises*, considerando plasticidade ideal.

258 Nos pontos de apoio e aplicação de carga, foi definida uma placa de aço feita de material
 259 elástico linear no estado plano de tensão, a fim de melhorar a distribuição das tensões. Cada placa
 260 possui dimensões de 3 cm x 10 cm, módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson
 261 de 0,3.

262

263

264

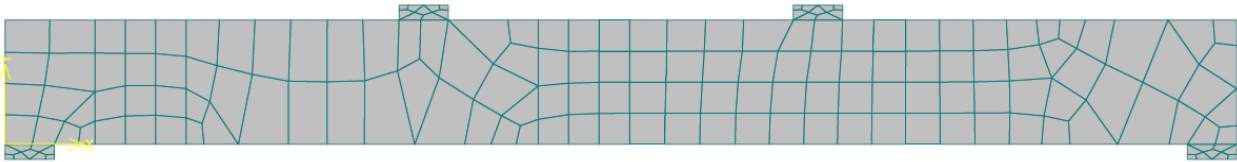
265 **3.2.2 Malha de elementos finitos**

266 De acordo com Oliveira (2013), a finalidade do Método dos Elementos Finitos consiste na
267 redução de um problema de difícil resolução, em vários problemas menores, de fácil resolução. Essa
268 redução se dá pela discretização em vários elementos hexaédricos ou tetraédricos, chamados de malha
269 de refinamento.

270 Em termos de precisão, quanto menor for o volume do elemento, maior será sua precisão.
271 Entretanto, esse aumento dos elementos implica em um maior tempo de processamento e esforço
272 computacional (OLIVEIRA, 2013).

273 De acordo com o apresentado, foram adotadas em todas as vigas malhas com quadriláteros de
274 7 cm. A malha de refinamento da viga VR está apresentada na Figura 8.

275 Figura 8. Malha de elementos finitos na viga VR.



276
277 Fonte: Autor.

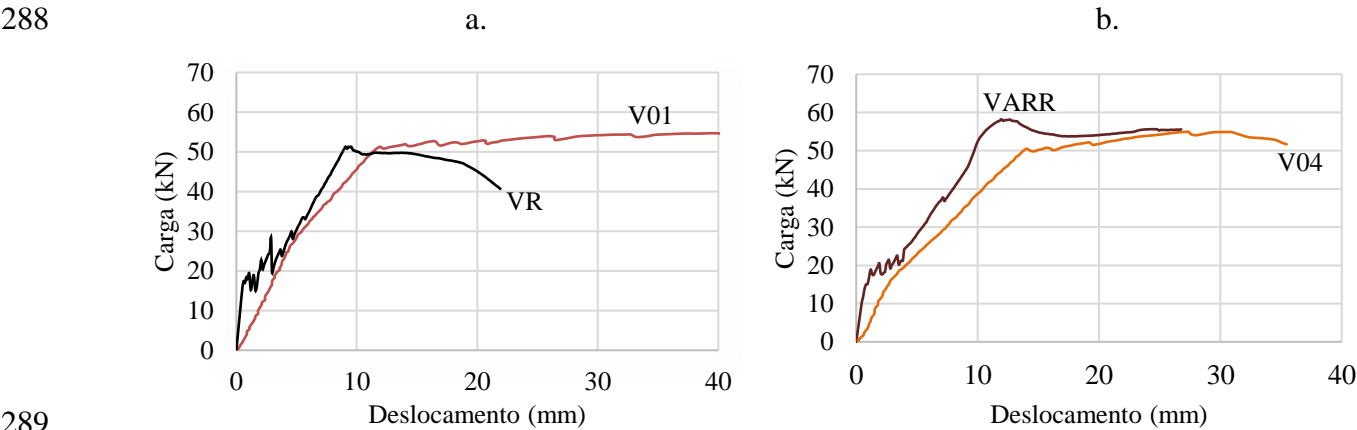
278 **4 RESULTADOS**

279 Os resultados obtidos após a calibração do modelo numérico foram: carga *versus* deslocamento,
280 carga de ruptura, fissuração e tensões de tração e compressão.

281 **4.1 Validação dos modelos computacionais**

282 Para corroborar a calibração do modelo numérico e realizar a análise de dados, foram
283 comparados os gráficos obtidos nos ensaios experimentais de Brixner (2017), com os gráficos obtidos
284 no *software* ATENA 2D. A Figura 9a apresenta os gráficos carga *versus* deslocamento das vigas sem
285 abertura, experimental (V01) e numérica (VR). Da mesma forma, na Figura 9b é apresentado o gráfico
286 carga *versus* deslocamento das vigas com abertura, experimental (V04) e numérica (VARR).

287 Figura 9. Gráfico carga x deslocamento das vigas VR, V01, VARR e V04.



289
290 Fonte: Autor.

291 A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para carga máxima de ruptura das vigas
292 experimental e numéricas.

293 Tabela 5. Carga máxima de ruptura nas vigas numéricas e experimentais.

Viga	$P_{máx}$ (kN)
V01	54,68
VR	51,28
V04	55,00
VARR	58,22

294 Fonte: Autor.

295 Assim, notou-se que as cargas máximas de ruptura foram distintas em 6,22 % para as vigas sem
296 abertura e 5,85 % para as vigas com abertura. Desse modo, foi possível calibrar outros modelos de
297 vigas baseados nos modelos numéricos das vigas VR e VARR.

298 4.1 Carga máxima de ruptura

299 Estão apresentadas na Tabela 6 a carga máxima de ruptura ($P_{máx}$) de cada viga e a relação entre
300 essa e a carga máxima da viga referência VR (P_{VR}). Para obter as cargas máximas de ruptura, foram
301 analisados os gráficos carga *versus* deslocamento, além das tensões nos elementos.

302 Notou-se que, para as vigas com aberturas próximas aos apoios, a carga de ruptura se manteve
303 semelhantes, ou seja, o tamanho da abertura não teve influência significativa na resistência da viga.
304 A viga V75A teve uma diferença de +0,43 % na carga de ruptura em relação à viga VR, enquanto a
305 viga V150A, diferenciou em apenas -0,82 % em relação à mesma viga. Esses valores não são
306 significativos para o concreto devido ao material não ser homogêneo.

307 Já para as vigas que possuem aberturas no centro, percebe-se que em ambos os casos houveram
308 queda na resistência. A viga V75C apresentou uma queda na carga de ruptura de 6,83 %, enquanto a
309 viga V150C apresentou queda de 13,81 %, quando comparadas à viga VR. Dessa forma, percebe-se
310 que o tamanho da abertura no centro influencia diretamente na carga de ruptura.

311 A adoção de armadura de reforço nas aberturas posicionadas no centro das vigas provou-se
312 muito eficiente, dado que ambas as vigas, V75CR e V150CR, apresentaram resistências superiores à
313 da viga VR. A viga V75CR obteve resistência 12,95 % maior que a da viga VR e a viga V150CR,
314 18,10 % maior, sendo assim, nota-se a viabilidade da abertura, desde que o reforço seja executado.
315 Vale ressaltar que um dos motivos para que a viga V150CR tenha resistência maior que a viga
316 V75CR, mesmo possuindo abertura maior, pode estar relacionado ao fato de que a malha de
317 elementos finitos dessas vigas diferiu na região em que a abertura estava presente.

318

319

Tabela 6. Carga de ruptura da viga referência e vigas com aberturas circulares.

Viga	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$P_{m\acute{a}x}/P_{VR}$ (%)	ΔP (%)
VR	51,28	100	0
V75A	51,50	100,43	+0,43
V75C	47,78	93,17	-6,83
V150A	50,86	99,18	-0,82
V150C	44,20	86,19	-13,81
V75CR	57,92	112,95	+12,95
V150CR	60,56	118,10	+18,10

Fonte: Autor.

Comparando-se os resultados da simulação numérica da viga VARR com os da viga VAR, notou-se uma queda na resistência de 12,26 %, devido à retirada do reforço, o que também corrobora para a importância deste tipo de armadura. A Tabela 7 apresenta a carga máxima de ruptura das vigas com abertura retangular e a relação entre a carga máxima de ruptura da viga VAR com a VARR.

Tabela 7. Carga de ruptura das vigas com abertura retangular.

Viga	$P_{m\acute{a}x,ret}$ (kN)	$P_{m\acute{a}x,ret}/P_{VARR}$ (%)	ΔP (%)
VARR	58,22	100	0
VAR	51,08	87,74	-12,26

Fonte: Autor.

4.2 Rigidez dos elementos

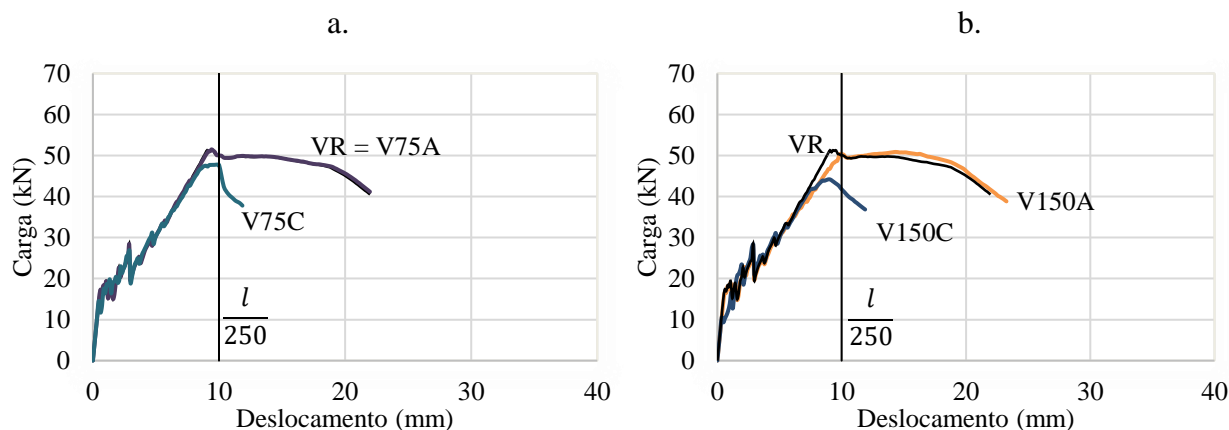
Ao se comparar os gráficos carga *versus* deslocamento é possível verificar qual estrutura apresenta uma maior rigidez analisando a inclinação da reta inicial.

A Figura 10a apresenta o gráfico para as vigas com aberturas de 75 mm, enquanto a Figura 10b apresenta o gráfico para as vigas com aberturas de 150 mm. Deste modo, nota-se que em ambos os casos, não houve alteração muito significativa nas rigidezes dos elementos, uma vez que em ambos os casos as linhas estão bem coincidentes. A viga V150C apresentou uma ligeira queda na rigidez após a carga de aproximadamente 40 kN, conforme apresentado na Figura 10b.

Na Figura 11a é apresentado os gráficos das vigas VR, V75CR e V150CR. Ambas as vigas com reforço apresentaram rigidezes maiores que a da viga VR após a carga de 25 kN. Ainda, nota-se também, que as rigidezes das vigas V75CR e V75CR foram semelhantes, retas com inclinação coincidentes até próximo da carga de 50 kN.

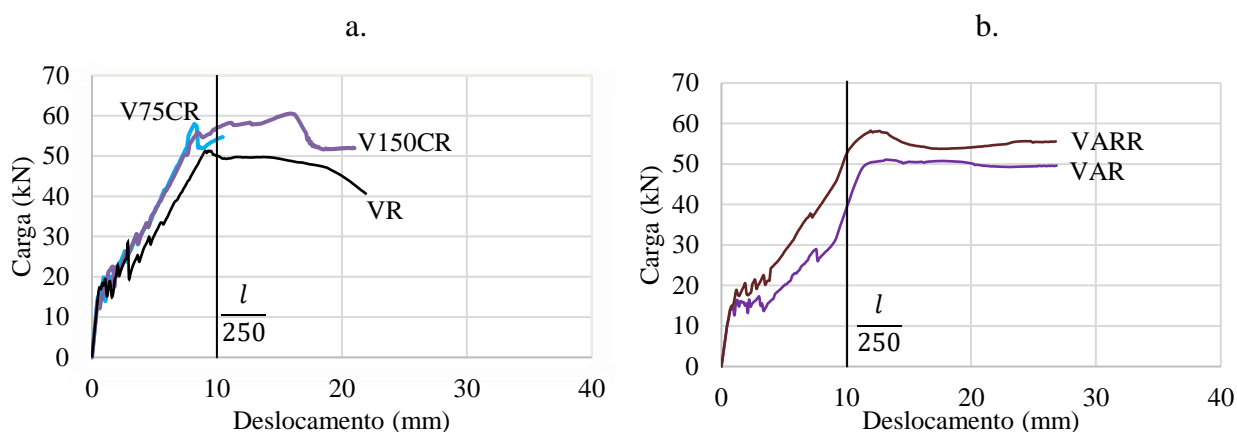
Para as vigas com abertura retangular, a retirada do reforço da viga VAR fez com que a rigidez diminuísse, uma vez que a viga VAR apresenta maior deslocamento a partir da carga de 15 kN, conforme apresentado na Figura 11b.

Figura 10. Gráfico carga x deslocamento das vigas VR, V75A, V75C, V150A e V150C.



Fonte: Autor.

Figura 11. Gráfico carga x deslocamento das vigas VR, V75CR, V150CR, VARR e VAR.



Fonte: Autor.

Observando os gráficos apresentados nas Figuras 10 e 11, nota-se que em todos os casos, exceto nas vigas V150C, VARR e VAR, o deslocamento da viga na carga de ruptura não chegou a atingir o deslocamento máximo conforme o Estado Limite de Serviço, calculado através da Equação 4, uma vez que o rompimento se deu com deslocamentos menores.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{l}{250} \quad (4)$$

Onde:

$\delta_{m\acute{a}x}$ = deslocamento máximo conforme a ABNT NBR 6118:2018;

l = vão da viga.

Assim, adotando o vão da viga de 250 cm, temos que o deslocamento máximo seria a reta vertical no ponto $x = 10$ mm, apresentada nas Figuras 9 e 10.

4.3 Fissuração

O modelo de fissuração variou de acordo com o posicionamento e tamanho da abertura e a presença ou não de armadura de reforço, como apresentado no Apêndice B.

365 4.3.1 Comportamento das fissuras na ruptura

366 Na viga VR as maiores fissuras apareceram na região central, atingindo próximo à metade da
367 altura da viga, assim como as vigas V75A e V150A, conforme Figuras B-2, B-3 e B-4 do Apêndice B,
368 nessa ordem.

369 As vigas V75C e V150C representadas, respectivamente, nas Figuras B-5, e B-6 do
370 Apêndice B, apresentaram as maiores fissuras localizadas no centro, porém posicionadas entre a face
371 inferior da abertura e a face inferior da viga. Na viga V150C, houve um aumento significativo na
372 quantidade de fissuras, além de surgir uma fissura maior, devido à linha ser mais espessa, na parte
373 superior à abertura, o que pode ter sido ocasionada pelo esmagamento do concreto na região
374 comprimida.

375 Nas vigas em que as aberturas eram centrais, mas possuíam reforço (V75CR e V150CR), as
376 maiores fissuras apareceram antes e depois da armadura longitudinal de reforço, resultado esperado
377 devido à presença dessa armadura, também atingindo próximo à metade da altura da viga, como
378 mostram as Figuras B-7 e B-8 do Apêndice B, respectivamente.

379 As Figuras B-9 e B-10 do Apêndice B, apresentam a fissuração nas vigas com aberturas
380 retangulares, que teve comportamento semelhante às vigas VR, V75A e V150A, com as maiores
381 fissuras aparecendo na região central e atingindo próximo à metade da altura.

382 4.3.2 Carga de fissuração

383 A Tabela 8 apresenta as cargas obtidas no início da fissuração para cada viga (P_{FIS}), bem como
384 a relação entre a carga de ruptura e a carga de fissuração. A carga de fissuração de cada viga foi obtida
385 nos gráficos apresentados nas Figuras 10 e 11, e está relacionada ao ponto em que a reta inicial muda
386 de inclinação e apresenta uma descontinuidade devido à perda de resistência à tração do concreto na
387 face tracionada.

388 A viga de referência apresentou a primeira fissura na carga de 14,53 kN. Todas as vigas, exceto
389 a viga V75C e V75CR apresentaram fissuras com cargas mais baixas que a VR. A V75CR, devido à
390 presença do reforço, apresentou carga de fissuração mais alta que a VR.

391 Tabela 8. Cargas de fissuração

Viga	P_{FIS} (kN)	$P_{FIS}/P_{máx}$ (%)
VR	14,53	28,33
V75A	14,44	28,04
V75C	14,56	30,47
V150A	13,80	27,13
V150C	10,55	23,87
V75CR	14,75	25,47
V150CR	14,24	23,51

392 Fonte: Autor.

393 Diante do exposto é possível perceber que as vigas V75CR e V150CR tiveram carga de
394 fissuração maior que as vigas V75C e V150C, respectivamente, devido à presença do reforço.

395 Da mesma forma, as vigas que possuem abertura retangular (VAR e VARR), o reforço
396 proporcionou uma carga de fissuração maior, como está apresentado na Tabela 9.

397 Tabela 9. Cargas de fissuração nas vigas de abertura retangular

Viga	P_{FIS} (kN)	$P_{FIS}/P_{máx,ret}$ (%)
VAR	9,83	19,36
VARR	11,57	21,55

398 Fonte: Autor.

399 A relação da carga de fissuração com a carga máxima de ruptura aconteceu próximo de 25%.
400 A resistência à tração do concreto é na ordem de 10 % da resistência à compressão, após atingir a
401 resistência máxima à tração do concreto, fissuras começam a surgir. Essa diferença pode estar
402 relacionada ao fato que, ao aplicar a carga, começam a surgir as primeiras fissuras no interior do
403 concreto, entretanto, as tensões são distribuídas nos próprios elementos e não há perda de rigidez da
404 estrutura.

405 4.4 Tensões

406 De forma geral, as maiores tensões de tração e compressão aconteceram nos apoios e no centro,
407 respectivamente, conforme Figuras do Apêndice B. Em todos os casos, a maior tensão de compressão
408 apareceu na face superior das vigas, próximas ao centro.

409 Os valores extremos das tensões estão apresentados na Tabela 10.

410 Tabela 10. Tensões de tração e compressão na carga de ruptura das vigas.

Viga	Tração (MPa)	Compressão (MPa)
VR	2,123	1,424
V75A	2,421	1,397
V150A	2,734	1,399
V75C	2,092	1,452
V150C	2,177	1,211
V75CR	2,625	1,607
V150CR	1,945	1,353
VARR	1,961	2,507
VAR	1,967	3,184

411 Fonte: Autor.

412 Quando comparadas as vigas VR, V75A e V150A apresentadas, respectivamente, nas Figuras
413 B-2, B-3 e B-4 do Apêndice B, nota-se que as regiões com os valores maiores de tensões se

414 mantiveram semelhantes, porém, ocorre uma concentração dessas tensões ao redor das aberturas,
415 devido estarem situadas próximas ao apoio.

416 Já nas vigas V75C e V150C, mostradas nas Figuras B-5 e B-6 do Apêndice B, ocorre um
417 aumento da região tracionada quando comparada à viga VR, principalmente no centro e, por
418 consequência, se concentram ao redor da abertura.

419 A presença do reforço nas vigas V75CR e V150CR apresentadas, respectivamente, nas Figuras
420 B-7 e B-8 do Apêndice B, fez com que diminuíssem as tensões de tração próximas ao apoio e ao
421 centro, quando comparadas às mesmas vigas, sem reforço. O mesmo aconteceu para as vigas com
422 aberturas retangulares, como mostram as Figuras B-9 e B-10, do Apêndice B. Neste caso, a retirada
423 da armadura de reforço, fez com que houvesse uma concentração de tensões de compressão na
424 abertura e aumento na tensão de tração no centro da viga.

425 4.5 Verificação de acordo com a ABNT NBR 6118:2014

426 O item 13.2.5.1 da norma ABNT NBR 6118:2014 traz algumas restrições quanto à presença de
427 aberturas na alma da viga. Assim, todas as aberturas executadas estão dentro do limite estabelecido
428 por norma, já que possuíam aberturas a uma distância maior ou igual a 5 cm das faces e duas vezes o
429 cobrimento, considerado 2,5 cm.

430 Com relação à dispensa de verificação da resistência, deve-se atender à todas as condições
431 prescritas. A Tabela 11 apresenta as análises para cada viga.

432 Tabela 11. Análise da dispensa de verificação de resistência.

Viga	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
VR	OK	OK	OK	OK	OK	OK
V75A	OK	NÃO OK	OK	OK	OK	OK
V150A	OK	NÃO OK	NÃO OK	OK	OK	OK
V75C	OK	OK	OK	OK	OK	OK
V150C	OK	OK	NÃO OK	OK	OK	OK
V75CR	OK	OK	OK	OK	OK	OK
V150CR	OK	OK	NÃO OK	OK	OK	OK
VARR	OK	OK	NÃO OK	OK	OK	NÃO OK
VAR	OK	OK	NÃO OK	OK	OK	NÃO OK

(1) Furos em zona de tração.

(2) Furos a uma distância da face do apoio de no mínimo $2h$, onde h é a altura da viga.

(3) Dimensão do furo de no máximo 12 cm e $h/3$.

(4) Distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, de no mínimo $2h$.

(5) Cobrimentos suficientes.

(6) Não seccionamento das armaduras.

433 Fonte: Autor.

434 De acordo com a Tabela 11, percebe-se que somente as vigas V75C e V75CR estariam sujeitas
435 à dispensa de verificação de resistência, enquanto as demais necessitariam serem verificadas.
436 Entretanto, nota-se que os efeitos causados pelas aberturas próximas aos apoios foram menos
437 significativos do que àqueles causados pelas aberturas no centro, indo de encontro ao proposto pela
438 ABNT NBR 6118:2014, quando diz que para ser dispensada a verificação da influência da abertura,
439 a mesma deve estar situada a uma distância mínima do apoio de $2h$. Uma possibilidade seria a
440 presença de armadura de reforço posicionadas próximo às aberturas, onde aumenta a resistência das
441 vigas, conforme apresentado pelo estudo.

442 **5 CONCLUSÃO**

443 A análise do presente trabalho consistiu em realizar uma modelagem numérica de duas vigas
444 de referência e sete vigas de concreto armado com aberturas no sentido da largura e, analisando os
445 resultados obtidos, pôde-se concluir que todas as vigas que possuíam aberturas, apresentaram uma
446 queda na sua resistência, sendo essa mais significativa na viga com abertura de 150 mm no centro, de
447 13,81 %. Houve também, um aumento na fissuração devido a presença da abertura e uma variação
448 das tensões de tração e compressão de acordo com a localização da abertura, principalmente ao redor
449 das aberturas. Com relação à forma de ruptura, analisando as fissuras nas Figuras do Apêndice B,
450 nota-se que todas as vigas romperam por flexão.

451 Ainda, foi possível concluir que a inserção de armadura de reforço nas vigas provou-se muito
452 eficiente, posto que, em todos os casos, as vigas apresentaram um aumento na carga de ruptura de
453 12,95 % para a viga V75CR e 18,10 % para a viga V150CR, diminuição da fissuração na região
454 central, além de propiciar uma maior rigidez ao elemento estrutural, conforme os gráficos carga
455 *versus* deslocamento obtidos. Em contrapartida, a retirada da armadura de reforço na viga com
456 abertura retangular, fez com que a carga de ruptura tivesse uma queda de 12,26 %, a rigidez
457 diminuísse e a fissuração aumentasse.

458 De acordo com a análise numérica, conclui-se que as aberturas que mais causaram prejuízos ao
459 elemento estrutural foram as aberturas retangulares e as circulares no centro. Destarte, têm-se que,
460 apesar da ABNT NBR 6118:2014 permitir a dispensa de verificação nas vigas com aberturas que
461 satisfaçam todas as condições descritas, é importante realizar a análise da influência das mesmas,
462 pois, conforme apresentado, poderá haver prejuízos à segurança dos edifícios.

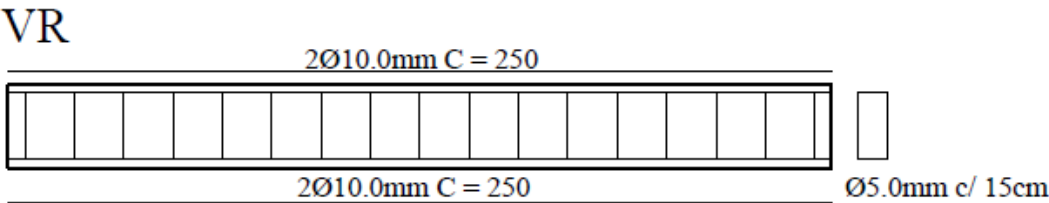
463 Notou-se também que todas as aberturas estavam situadas em zonas de tração, de acordo com
464 as Figuras B-2 a B-10 do Apêndice B. Assim, sugere-se a análise dos efeitos causados pelas aberturas
465 em zonas de compressão, já que haverá a diminuição da área de concreto, e por consequência a
466 resistência à compressão.

467 **6 REFERÊNCIAS**

- 468 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (NBR 6118). **Projeto de Estruturas de**
469 **Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2014.
- 470 BARROS, A. M. B. **Análise de Tensões de Elementos Fletidos de Concreto Armado**. 2014. Artigo.
471 Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2014.
- 472 BITTENCOURT, T. N; LYRA, P. H. C. **Modelagem Numérica de Estruturas de Concreto**
473 **Armado Utilizando o Programa Atena**. 2013. Artigo. Anais do 55º Congresso Brasileiro do
474 Concreto, IBRACON, 2013.
- 475 BRIKNER, D. **Análise teórica e experimental de aberturas horizontais em vigas de concreto**
476 **armado**. 2017. 89f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) –
477 Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, RS, 2017.
- 478 CERVENKA, V., JENDELE, L., CERVENKA, J. (2017) – **ATENA Program Documentation Part**
479 **1 – Theory**. Prague, Czech Republic, 2017, 320p.
- 480 COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU B'ETON. CEB-FIP Model Code 1990. London: Thomas
481 Telford, 1993.
- 482 LYRA, P. H. C. **Modelagem Numérica de Estruturas de Concreto Armado Utilizando o**
483 **Programa Atena**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica,
484 Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.
- 485 OLIVEIRA, V. S. **Aplicação do método dos elementos finitos 3D na caracterização**
486 **eletromagnética estática de motores de relutância variável com validação experimental**. 2013.
487 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza,
488 CE, 2013.
- 489 PONTES, A. E. A; SILVA, R. J. K; SILVA, R. F. **Análise experimental de vigas de concreto**
490 **armado com furos na vertical**. 2016. Artigo. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural,
491 2016.
- 492 SILVA, A. C; ROSA, J. S. **Modelagem de vigas em concreto armado avaliando a presença de**
493 **furos e aberturas através do método dos elementos finitos**. 2015. 129f. Monografia (Trabalho de
494 Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato
495 Branco, PR, 2015.
- 496 SIMÃO, D. W. G. **Análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas na**
497 **alma**. 2014. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal
498 de Pernambuco, Caruaru, PE, 2014.
- 499 SIMOES, Y. S; ROCHA, F. M; MUNAIAR NETO, J. **Comparação numérica entre o**
500 **comportamento termoestrutural de pilares de aço e mistos de aço e concreto parcialmente**
501 **revestidos em situação de incêndio**, REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, v.
502 11, p. 876-901, 2018.

503
504

APÊNDICE A - Detalhamento das vigas.
Figura A-1. Detalhamento da viga VR.

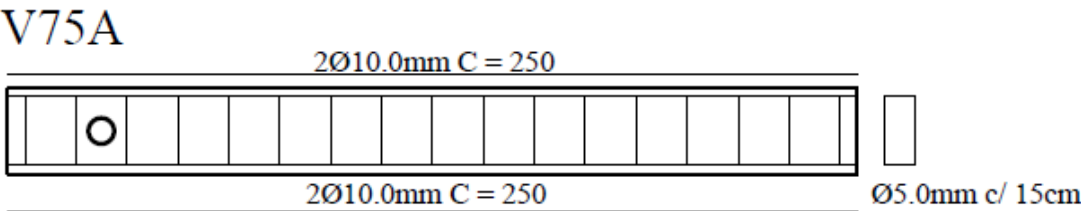


505
506

Fonte: Autor.

507

Figura A-2. Detalhamento da viga V75A.

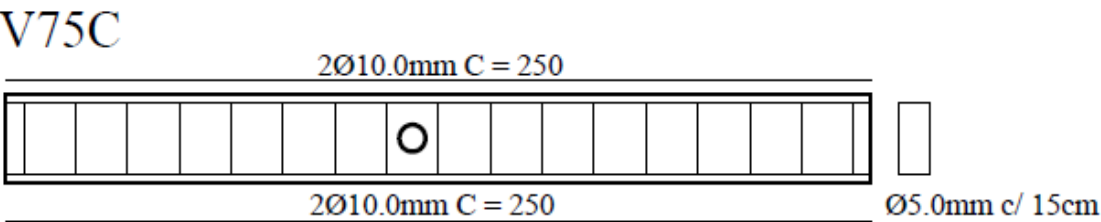


508
509

Fonte: Autor.

510

Figura A-3. Detalhamento da viga V75C.

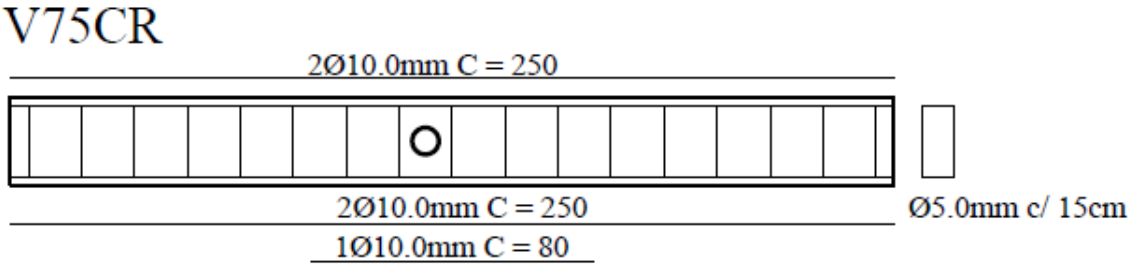


511
512

Fonte: Autor.

513

Figura A-4. Detalhamento da viga V75CR.

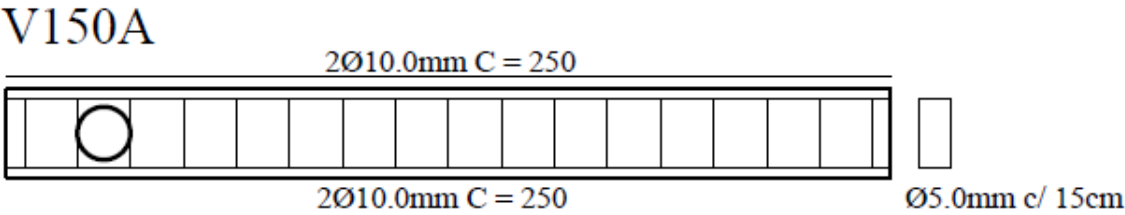


514
515

Fonte: Autor.

516

Figura A-5. Detalhamento da viga V150A.

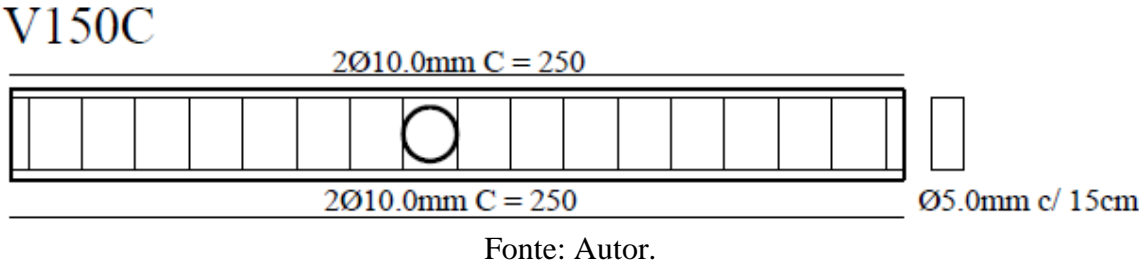


517
518

Fonte: Autor.

519

Figura A-6. Detalhamento da viga V150C.

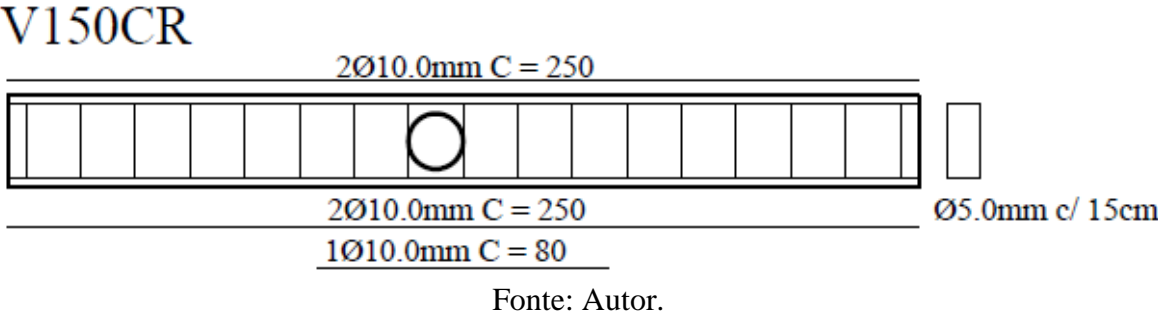


520

521

522

Figura A-7. Detalhamento da viga V150CR.

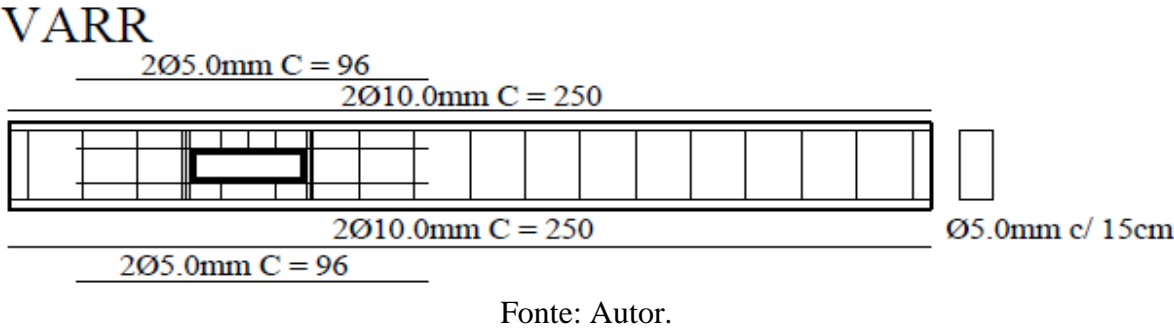


523

524

525

Figura A-8. Detalhamento da viga VARR.

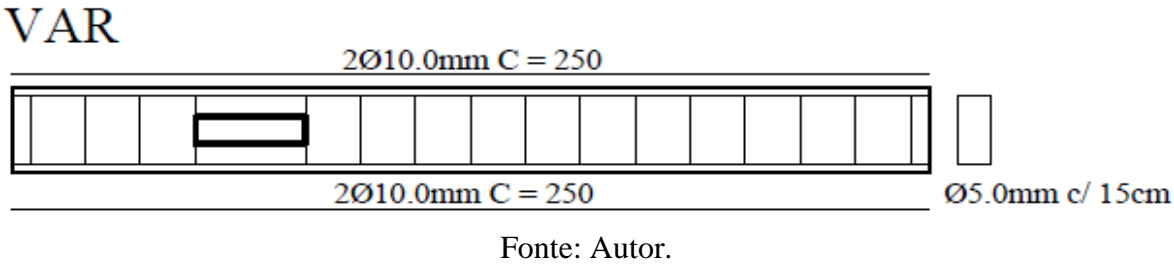


526

527

528

Figura A-9. Detalhamento da viga VAR.

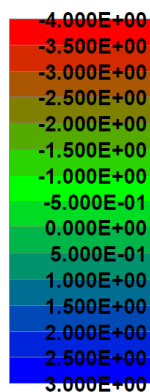


529

530

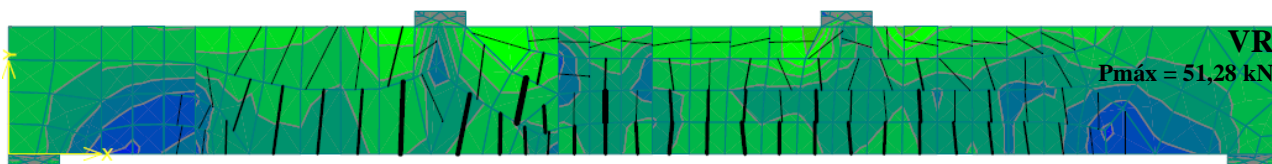
APÊNDICE B - Tensões de tração, tensões de compressão e fissuração nas vigas.

Figura B-1. Valores das tensões de compressão e tração nas vigas. (Unidades em MPa)



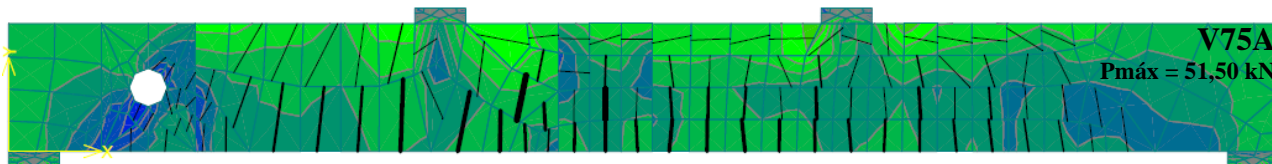
Fonte: Autor.

Figura B-2. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga VR.



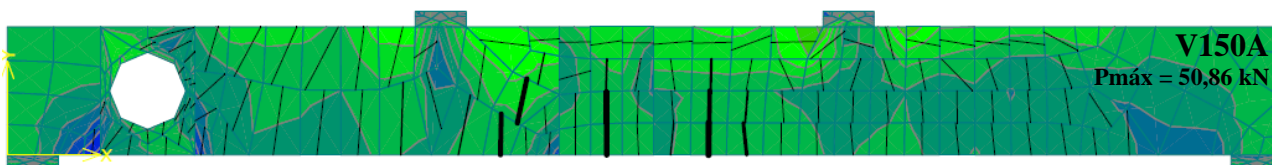
Fonte: Autor.

Figura B-3. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V75A.



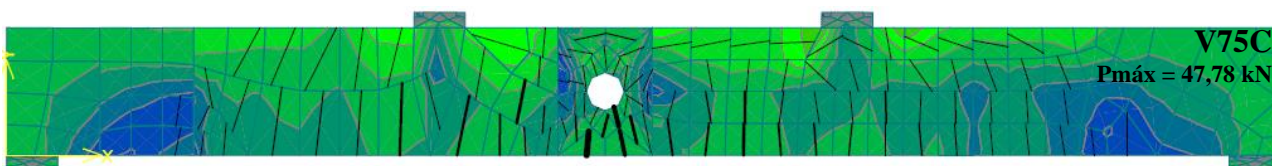
Fonte: Autor.

Figura B-4. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V150A.



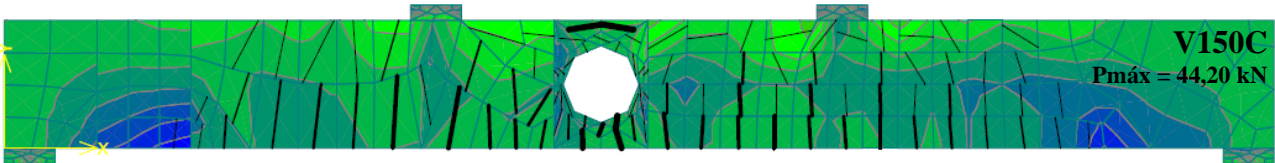
Fonte: Autor.

Figura B-5. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V75C.



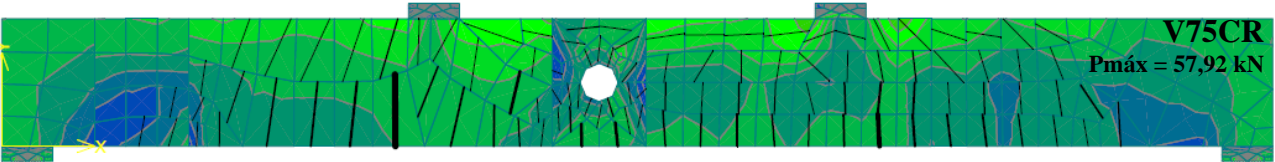
Fonte: Autor.

547 Figura B-6. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V150C.



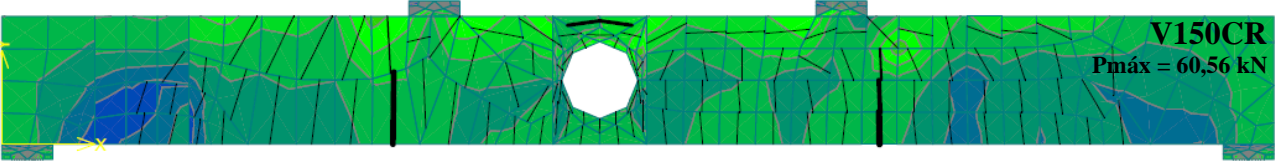
Fonte: Autor.

550 Figura B-7. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V75CR.



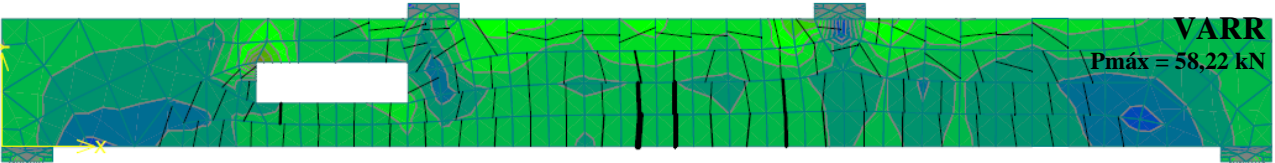
Fonte: Autor.

553 Figura B-8. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga V150CR.



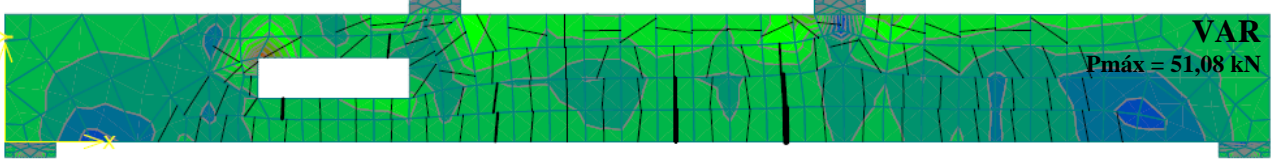
Fonte: Autor.

556 Figura B-9. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga VARR.



Fonte: Autor.

559 Figura B-10. Tensões de tração, tensões de compressão e fissuras da viga VAR.



Fonte: Autor.