Dimensionamento de Consolos Curtos: Avaliação das NBR 6118 e NBR 9062 a Partir de Análise Não Linear

Vinícius Marques Augusto[1]
Sérgio Hampshire de Carvalho Santos[2]
Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva[3]

Resumo

Consolos são elementos em balanço que têm a função de transferir o carregamento entre diferentes partes de uma estrutura. Eles são amplamente utilizados em estruturas de concreto armado, especialmente na conexão entre elementos de concreto pré-moldado e pré-fabricado. Para o dimensionamento de consolos curtos, as NBR 6118:2023 e NBR 9062:2017 apresentam parâmetros de projeto diferentes. Neste artigo são resumidos os resultados do Projeto de Graduação em andamento do primeiro autor, orientado pelos demais, com o objetivo de avaliar a segurança de elementos dimensionados de acordo com diferentes normas. Para isso, é feito o dimensionamento de um consolo curto em concreto armado segundo as normas brasileiras para diferentes carregamentos. Também são considerados critérios de projeto presentes na literatura e na norma europeia EN 1992-1-1:2004. A partir desses projetos, são desenvolvidos modelos numéricos não lineares com o auxílio do programa comercial ATENA. Com isso, são analisadas as cargas de ruptura, as distribuições de fissuras no concreto e as tensões no concreto e nas armaduras. Nos modelos, foi observado que, para consolos pouco solicitados, tanto NBR 6118:2023 quanto a NBR 9062:2017 levaram a cargas de ruptura similares e superiores à carga de projeto. Por outro lado, em consolos com elevadas solicitações, ambas as normas resultaram em elementos com deficiência de armaduras transversais, resultando em uma ruptura precoce por fendilhamento da biela comprimida.

Palavras-chave: Análise não linear; ATENA; Consolo Curto; Concreto Armado; Fendilhamento.

1 Introdução

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), consolos são "elementos em balanço nos quais a distância (*a*) da carga aplicada à face do apoio é menor ou igual à altura útil *d* do consolo". Caso o valor de *a* seja maior do que *d*, o elemento é considerado como uma viga em balanço (ABNT, 2023). Esses elementos são amplamente utilizados em construções de concreto, com especial aplicação na ligação entre elementos pré-moldados e como apoios provisórios para a troca de aparelhos de apoio em pontes.

Para o dimensionamento desses elementos, as normas brasileiras de projeto de estruturas de concreto (NBR 6118) e de projeto de estruturas de concreto pré-moldado (NBR 9062) apresentam considerações similares, porém divergentes. Diante disso, o objetivo deste trabalho é comparar as considerações presentes em ambas as normas e avaliar a segurança dessas metodologias. Ademais, ambas as normas são omissas com relação ao dimensionamento de estribos nos consolos. Por isso, de maneira complementar também são analisados outros dois critérios para o projeto de armaduras secundárias: o dimensionamento para a tração transversal considerando a biela em garrafa e o cálculo dos estribos segundo o Eurocode 2 (EN-1992-1-1).

Para analisar o desempenho dos consolos dimensionados a partir dos diferentes critérios, foram desenvolvidos modelos em elementos finitos utilizando o programa comercial ATENA (2010). Neles, os materiais foram considerados com modelos constitutivos não lineares, permitindo a obtenção de resultados realistas para a distribuição de fissuras, para a carga última e para as tensões no aço e no concreto.

[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro / vinimaugusto@gmail.com
[2] Universidade Federal do Rio de Janeiro / sergiohampshire@gmail.com
[3] Universidade Federal do Rio de Janeiro / anabeatrizgonzaga@poli.ufrj.br

Comportamento Estrutural de Consolos

Os consolos podem ser classificados como curtos ou muito curtos a depender da relação entre *a* e *d*. Caso *a* seja menor ou igual à metade da altura útil, o consolo é definido como muito curto (ABNT, 2023) e, caso o valor de *a* seja maior do que metade de *d* e menor do que *d*, o consolo é classificado como curto. Nesse caso, o seu comportamento pode ser descrito a partir de um modelo de bielas e tirantes composto por um tirante na face tracionada devido à flexão e uma biela inclinada partindo do ponto de aplicação do carregamento até um nó na base do consolo.

Na década de 1960, Kriz e Raths (1965) apresentaram ensaios de 195 consolos, sendo 124 levados à ruptura sob carregamento vertical e 71 sob carregamento inclinado. A partir desses resultados, os autores identificaram quatro mecanismos básicos de ruptura para consolos. São eles:

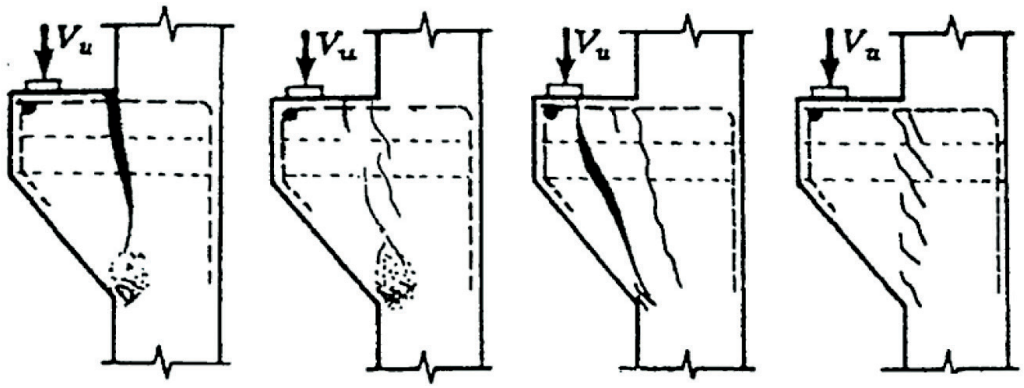
- ruptura por tração devido à flexão (FT): ocorre devido ao escoamento da armadura do tirante sucedido pelo esmagamento do concreto na base do consolo. É caracterizada pela formação de grandes fissuras de flexão na interface entre o consolo e o apoio (Figura 1a);
- ruptura por compressão devido à flexão (FC): ocorre devido ao esmagamento do concreto na base do consolo antes do escoamento da armadura do tirante. Podem ser observadas fissuras de flexão no topo do consolo, mas com pequena abertura e concentração (Figura 1b);
- ruptura por fendilhamento diagonal (DS): antes de atingir o carregamento para a ruptura à flexão, ocorre ruptura por cisalhamento-compressão da biela inclinada. É caracterizada pela formação de uma grande trinca longitudinal na biela do ponto de aplicação do carregamento até a base do consolo (Figura 1c);
- ruptura por cisalhamento (S): ocorre pelo cisalhamento ao longo da interface entre o consolo e o apoio. É caracterizada pelo aparecimento de uma série de fissuras diagonais na interface entre o consolo e o apoio, como pode ser visto na Figura 1d.

Os mecanismos de ruptura por flexão geralmente determinam o dimensionamento dos consolos curtos. E, por isso, são a base do projeto pelas NBR 6118 e NBR 9062. Com isso, é feito o dimensionamento da armadura principal do tirante para evitar a ruptura FT e é feita a verificação das tensões no nó da base do consolo para evitar a ruptura FC. No entanto, como observado nos ensaios realizados por Kriz e Raths (1965), há a possibilidade de a falha do consolo ser comandada pela ruptura cisalhamento-compressão da biela do elemento. As NBR 6118 e NBR 9062 são omissas com relação à verificação desse modo de falha em consolos.

Armaduras de acordo com a NBR 6118:2023 e a NBR 9062:2017

A NBR 6118 estabelece que o dimensionamento da armadura principal dos consolos deva ser feito a partir do método de bielas e tirantes. Na Figura 2, é apresentado o modelo adotado no trabalho, em acordo ao recomendado pela NBR 6118.

Usualmente, o projeto por bielas e tirantes é feito a partir de um processo iterativo no qual são assumidos valores iniciais para as bielas, determinados os esforços



(a) (b) (c) (d)

Figura 1 *– Mecanismos básicos de ruptura de consolos (Kriz e Raths, 1965 e Park e Paulay, 1975 adaptado por Machado e Pimenta, 2000).*

e verificadas as tensões nos nós para validar o modelo. No entanto, Santos (2021) apresenta uma metodologia para a solução do modelo de bielas e tirantes do consolo de maneira direta. Para isso, é determinada a largura da base do nó A k a partir da equação 1, considerando que, nessa região, atua a tensão normativa máxima para um nó totalmente comprimido f_{cd1}.

A distância entre as forças R_A e V_d (a') que formam o binário solicitante no consolo é composta pela distância a acrescida das excentricidade provocadas pela força horizontal e pela força vertical, como indicado na equação 2. Segundo Santos (2021), a área de aço do tirante pode ser determinada a partir da equação 4, sendo a altura do nó A (y) obtida a partir da equação 3.

$$k = \frac{V_d}{b \cdot f_{cd,1}} \tag{1}$$

$$a' = a + e + k/2 \tag{2}$$

$$y = d - \sqrt{d^2 - 2 \cdot a' \cdot k} \tag{3}$$

$$A_{s,tir} = \left(\frac{V_d \cdot y}{k} + H_d\right) \cdot \frac{1}{f_{yd}} \tag{4}$$

Por outro lado, embora também indique a utilização do mesmo modelo de bielas e tirantes da NBR 6118 para a análise dos consolos, a NBR 9062 fornece uma fórmula direta (equação 5) para determinar a área necessária do tirante em função do efeito da força vertical ($A_{s,v}$). A partir desse valor, a área de aço necessária no tirante é calculada pela equação 6.

$$A_{s,v} = \left(0{,}1 + \frac{a}{d}\right) \cdot \frac{V_d}{f_{yd}} \tag{5}$$

$$A_{s,tir} = A_{s,v} + \frac{H_d}{f_{yd}} \tag{6}$$

Com relação à armadura de costura, segundo a NBR 6118, é necessário um valor mínimo de 40% da área do tirante (equação 7). A NBR 9062 prevê que a taxa necessária de armadura de costura deve ser igual a 40% da razão entre $A_{s,v}$ e a altura útil do consolo (d) (equação 8) com valor mínimo de 0,15% de b. Ambas as normas consideram que a armadura de costura deve ser distribuída em uma altura de dois terços de d adjacente ao tirante. Com isso, a área de aço necessária pela NBR 9062 a ser distribuída nessa região, pode ser calculada pela equação 9.

$$A_{s,cost} = 0{,}40 \cdot A_{s,tir} \tag{7}$$

$$(A_s/s)_{cost} = 0{,}40 \cdot \frac{A_{s,v}}{d} \tag{8}$$

$$A_{s,cost} = 0{,}40 \cdot A_{s,v} \cdot 2/3 \tag{9}$$

Ambas as normas consideram o detalhamento típico de um consolo curto com a armadura do tirante e a armadura de costura horizontal, sem a presença de armaduras secundárias verticais para fins estruturais. Na NBR 6118, não há nenhuma menção à utilização de estribos nos consolos. A NBR 9062 se limita a especificar uma armadura mínima de 0,15% da seção

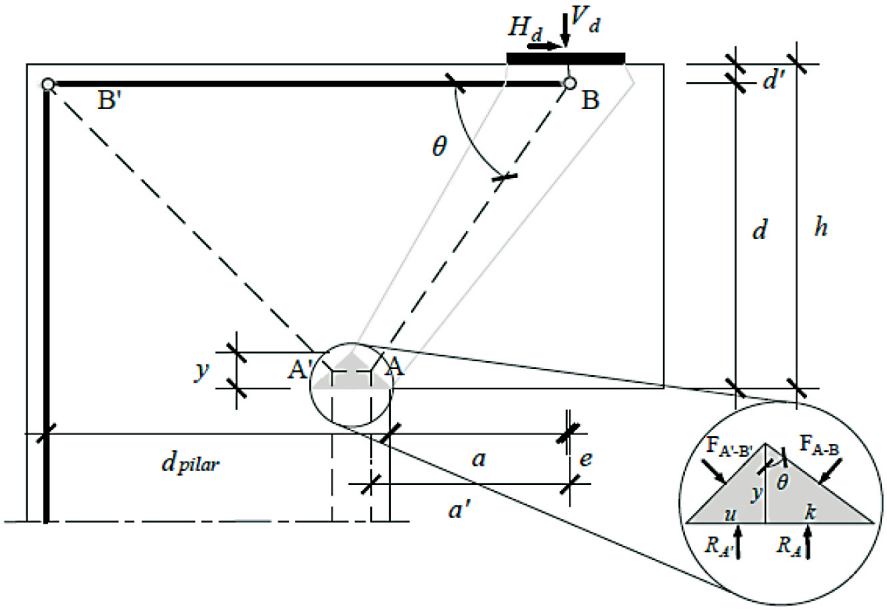


Figura 2 *– Modelo de bielas e tirantes adotado.*

transversal bruta a ser aplicada ao longo do consolo para fins construtivos.

Estribos Verticais de Acordo com a EN-1992-1-1

Ao contrário das normas brasileiras, a EN-1992-1-1 (CEN, 2004) apresenta parâmetros para o projeto de estribos em consolos curtos. Nela é indicado que sejam dimensionados estribos verticais para a força V_d multiplicada por um coeficiente β. Esses estribos devem ser distribuídos entre as faces do aparelho de apoio e do pilar a_v com apenas as barras na faixa central de 0,75 a_v sendo consideradas para o dimensionamento, como indicado na Figura 3.

O coeficiente β corresponde à redução da força cortante para cargas próximas ao apoio e é definido a partir da equação 10.

$$\beta = \frac{a_v}{2 \cdot d} \geq 0{,}25 \tag{10}$$

No anexo J (informativo) do Eurocode 2, é recomendado, de maneira conservadora, que seja adotado o valor de 0,50 para β no dimensionamento de estribos em consolos curtos. No entanto, nos exemplos desenvolvidos ao longo desse trabalho, foi adotada a consideração do texto principal para verificar a segurança da metodologia apresentada na norma europeia, por ela ser menor conservadora.

O Eurocode dispensa a utilização de estribos quando $\beta \cdot V_d$ for menor do que $V_{Rd,c}$ (equação 11). Desconsiderando o eventual efeito favorável da tensão de protensão na seção transversal e utilizando os valores recomendados pelo CEN (2004), a tensão cisalhante resistente na seção pode ser calculada em kN/cm² a partir da equação 12. O coeficiente k e a taxa de armadura longitudinal ρ_l são definidos a partir das equações 13 e 14, com A_{sl} sendo a área de aço longitudinal da seção em cm²:

$$V_{Rd,c} = v \cdot b \cdot d \tag{11}$$

$$v = {}^{0{,}018}/_{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \tag{12}$$

$$k = 1 + \sqrt{{}^{20}/_{d}} \leq 2{,}0 \tag{13}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b \cdot d} \tag{14}$$

Armaduras Secundárias Considerando a Biela em Garrafa

Na resolução do modelo de bielas e tirantes apresentado na Figura 4, a biela do consolo é considerada como uma biela prismática e o seu dimensionamento se limita à verificação das tensões nos nós em suas extremidades. Entretanto, os consolos usualmente são solicitados por cargas elevadas, concentradas em uma pequena região sob o apoio. Por isso, a biela se comporta como um campo de tensões em formato de garrafa com a mobilização de tensões de tração transversais à biela. Como consequência dessas forças, é mobilizado o modo de ruptura por fendilhamento diagonal descrito por Kriz e Raths (1965). Para a consideração desse efeito, pode ser adotado o modelo de bielas e tirantes

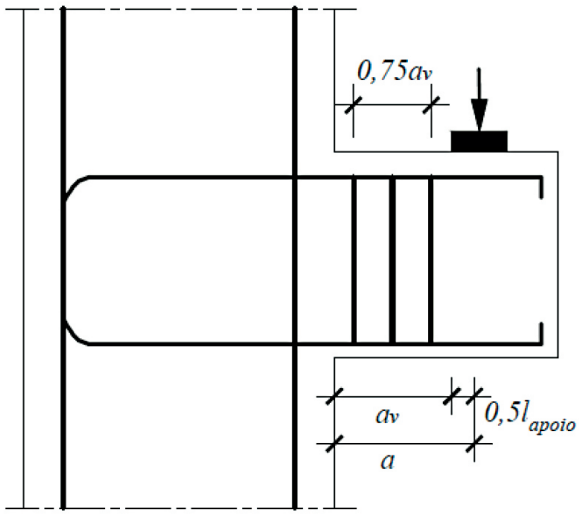


Figura 3 *– Reforço para cargas próximas ao apoio (adaptado de CEN, 2004).*

apresentado na Figura 3 (a), como recomendado por Schlaich *et al*. (1987). Ambos os modelos das Figuras 2 e 3 conduzem aos mesmos resultados para a verificação dos nós e para o dimensionamento do tirante, com a única mudança sendo o comportamento local da biela.

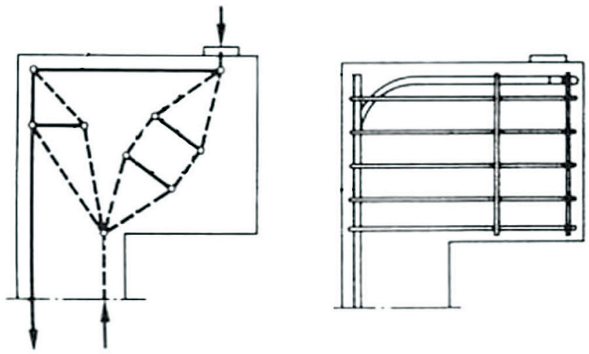


Figura 4 *– Modelo de bielas e tirantes para consolo considerando biela em garrafa (a) e armadura resultante (b) (Adaptado de Schlaich et al., 1987).*

Para a determinação da força de tração transversal na biela (F_{td}), é adotada a abordagem apresentada em Santos (2021), resultando na equação 15. Essa equação é baseada na formulação do Eurocode 2 (CEN, 2004) para a força de fendilhamento em regiões de descontinuidade total, sendo adaptada para considerar a biela inclinada. Uma vez que a largura da biela é variável, Bosc (2008 *apud* SANTOS, 2021) propõe que seja utilizada a largura média entre os nós A e B.

$$F_{td} = 0{,}25 \cdot \left(1 - 1{,}4 \cdot \frac{l_{bie,AB}}{d - y/2} \cdot sen(\theta)\right) \cdot F_{A-B} \tag{15}$$

sendo

F_{td} = força de tração transversal na biela;

$L_{bie,AB}$ = largura da biela inclinada do consolo;

F_{A-B} = força na biela A–B.

A armadura necessária para resistir à tração diagonal é inclinada em relação ao consolo. Uma solução prática para o projeto é detalhar as armaduras como apresentado na Figura 4 (b). Para isso, deve ser feita a decomposição da força na horizontal e na vertical, com as armaduras sendo calculadas pelas equações 16 e 17.

$$A_{s,th} = \frac{2 \cdot F_{td} \cdot sen(\theta)}{f_{yd}} \tag{16}$$

$$A_{s,tv} = \frac{2 \cdot F_{td} \cdot cos(\theta)}{f_{yd}} \tag{17}$$

sendo

$A_{s,th}$ = área de aço necessária transversal horizontal;

$A_{s,tv}$ = área de aço necessária transversal vertical.

Metodologia

Para a avaliação dos diferentes critérios de dimensionamento de consolos curtos, optou-se por analisar um caso típico de consolo com geometria retangular e posicionado no topo de um pilar. O consolo possui altura *h* de 65 cm, largura *b* de 40 cm e os carregamentos são aplicados em um aparelho de apoio com 30 cm x 30 cm a uma distância de 45 cm da face do pilar. Foi adotado um valor de 5 cm para *d'*, resultando em uma razão *a/d* de 0,75 para esse elemento. Para os materiais, foi considerado concreto de classe C30 com armaduras em aço CA-50.

Em uma primeira etapa, foi feito o dimensionamento das armaduras desse elemento a partir dos critérios de projeto apresentados anteriormente para nove carregamentos. O valor adotado para a força vertical variou entre 300 kN e 900 kN. A força horizontal foi considerada para cada caso como sendo 16% da força vertical.

Após o dimensionamento das armaduras, foi realizado o cálculo de $V_{Rd,c}$, seguindo o Eurocode e foi verificada a dispensa de estribos verticais para os diferentes casos de carga. Essa verificação foi utilizada para avaliar o nível de solicitação dos elementos em relação à sua forma. Nos casos em que foi dispensada a utilização de estribos, os consolos foram considerados como pouco solicitados, enquanto nos outros os consolos foram considerados como muito solicitados.

Na etapa seguinte, foram selecionados dois casos de carga, um pouco solicitado (F2) e outro muito solicitado (F6) para serem avaliados. Para cada um deles, foram definidos seis detalhamentos variando a armadura do tirante e as armaduras secundárias, como apresentado na Tabela 2. Dessa forma, foram desenvolvidos doze modelos numéricos analisados no ATENA até a ruptura.

Os modelos foram desenvolvidos no estado plano de tensões com elementos de espessura igual a 40 cm. Para a definição da malha, foram utilizados elementos finitos quadriláteros com funções de interpolação lineares e 1,67 cm de lado. Para o concreto, foi adotado o modelo constitutivo CC3DNonLinCementitious2 que, segundo Cervenka *et al*. (2021), considera a curva tensão-deformação recomendada pelo FIB Model Code 2020 (FIB, 2023) para a análise não linear na compressão que também se encontra na NBR 6118 (ABNT, 2023). Além disso, para as armaduras, foi adotado o modelo elastoplástico perfeito em acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023).

As propriedades do concreto foram consideradas com os valores indicados pelo FIB Model Code (FIB, 2023) para concreto C30. Os parâmetros de resistência foram considerados com seus valores de projeto utilizando γ_c igual a 1,40. A tensão máxima de compressão foi multiplicada pelo coeficiente de 0,85 para consideração do efeito Rüsch. As armaduras também foram consideradas com seus valores de projeto considerando γ_s igual a 1,15.

Nos detalhamentos de armaduras tipo "c" e "d", foram consideradas quatro camadas de armadura de costura e três camadas de estribos. Nos modelos com detalhamento tipo "a", "b" e "e", é adotada a mesma tipologia, retirando as armaduras que não foram adotadas. Nos modelos F2-f e F6-f, foi adotada distribuição similar. Porém, foram consideradas cinco camadas de estribos distribuídos uniformemente ao longo do consolo por se tratar da armadura construtiva mínima.

Como o foco deste trabalho é o comportamento do consolo, a armadura do tirante do pilar foi considerada com um valor superior ao necessário. Isso foi feito para garantir que a ruptura ocorresse na região do consolo. Para cada caso, foi arbitrada uma armadura equivalente a 115% da área calculada pela NBR 6118 para o tirante do consolo. Para controlar a fissuração na região do pilar, também foi adicionado no modelo uma armadura lateral do pilar com duas barras de 16 mm a cada 10 cm. Entretanto, essa armadura não foi adicionada na região onde é previsto o nó da base da biela para que não atuasse como uma armadura de compressão, auxiliando o nó.

Para a solução do sistema de equações não lineares, foi utilizado o método de Newton-Raphson. Nesse método, o carregamento é aplicado de maneira progressiva a partir de etapas de carga com a matriz de rigidez sendo recalculada a partir dos resultados do passo anterior. Neste estudo, as etapas de carga foram considerados como equivalentes à 1% da carga de projeto. Para a definição da carga última, foi considerado o carregamento correspondente a última etapa de carga concluído antes da interrupção da análise por divergência no modelo numérico.

Análise do Dimensionamento Teórico das Armaduras

Na Tabela 1, são apresentadas as armaduras necessárias obtidas para cada carregamento, considerando os diferentes critérios de projeto analisados. Para a comparação dos valores das armaduras secundárias, foi computada apenas a área de aço considerada efetiva pelas normas. No caso da armadura de costura, foi considerada apenas a área de aço a ser distribuída na região de dois terços de d adjacente ao tirante, enquanto que, no caso da armadura transversal, foi considerada a área de aço distribuída na região de 0,75 a_v entre as faces do apoio e do pilar.

A comparação entre a armadura necessária para o tirante a partir do modelo de bielas e tirantes (NBR 6118) e a partir da expressão direta da NBR 9062 é apresentada na Figura 5a. Nela, é possível observar que ambas as soluções apresentam resultados similares para menores carregamentos com as curvas se distanciando conforme é aumentada a solicitação. Para carregamentos de até 600 kN, a divergência se manteve limitada à ordem de 5%, indicando que as simplificações adotadas pela NBR 9062 são adequadas

Tabela 1 – Armaduras necessárias para cada carregamento

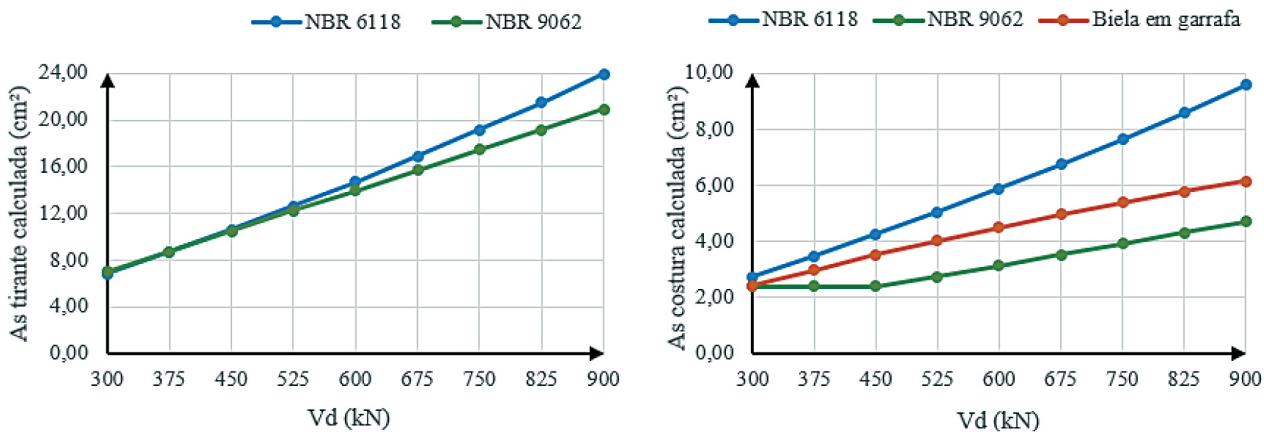
V_d		A_s tirante (cm²)			A_s costura (cm²)		A_s transversal (cm²)	
Caso	(kN)	NBR 6118	NBR 9062	NBR 6118	NBR 9062	Biela em garrafa	EN-1992-1-1	Biela em garrafa
F1	300	6,83	6,97	2,7	2,40	2,43	1,73	2,02
F2	375	8,69	8,71	3,47	2,40	2,98	2,16	2,53
F3	450	10,62	10,45	4,25	2,40	3,51	2,59	3,04
F4	525	12,62	12,20	5,05	2,74	4,02	3,02	3,56
F5	600	14,70	13,94	5,88	3,13	4,50	3,45	4,07
F6	675	16,87	15,68	6,75	3,52	4,95	3,88	4,59
F7	750	19,12	17,42	7,65	3,91	5,38	4,31	5,10
F8	825	21,48	19,16	8,59	4,30	5,78	4,74	5,61
F9	900	3,94	20,91	9,58	4,69	6,14	5,18	6,12

para esses casos. No caso F9, a NBR 9062 conduziu a uma armadura 13% inferior à obtida pela NBR 6118, contra a segurança.

Com relação à armadura de costura, a área de aço necessária segundo a NBR 9062 é significativamente inferior à obtida a partir da NBR 6118 para a maioria dos casos, como apresentado na Figura 5b. A exceção são os casos F1 e F2, nos quais a armadura obtida pela NBR 9062 teve seu valor dimensionado a partir da taxa mínima. Essa diferença já era esperada dada a divergência dos critérios apresentada anteriormente e evidenciada nas equações 7 e 9. Além disso, a armadura de costura calculada considerando biela em garrafa, apresentou valores intermediários entre as duas normas, com o critério de 40% da área do tirante presente na NBR 6118, estando a favor da segurança para todos os casos.

Análise dos Resultados a Partir do ATENA

Na Tabela 2, é apresentada a razão entre a carga última P_u e a carga de projeto P_d para cada modelo, com as armaduras dimensionadas a partir dos diferentes critérios. Na tabela, também são apresentados os modos de ruptura observados para caso. Para classificação



(a) (b)

Figura 5 *– Armadura necessária do tirante (a) e de costura (b) em função do carregamento*

Tabela 2 – Resistência última e modo de ruptura observados nos modelos

Modelo	Critério para armaduras			P_u / P_d	Modo de ruptura
	Tirantes	Costura	Transversal		
F2-a	NBR 6118	–	–	1,06	DS
F2-b	NBR 6118	NBR 6118	–	1,28	FT
F2-c	NBR 6118	NBR 6118	EN-1992-1-1	1,31	FT
F2-d	NBR 6118	Bi. em gar.	Bi. em gar.	1,29	FT
F2-e	NBR 9062	NBR 9062	–	1,22	FT
F2-f	NBR 9062	NBR 9062	$A_{sw,constr.}$	1,24	FT
F6-a	NBR 6118	–	–	0,75	DS
F6-b	NBR 6118	NBR 6118	–	0,91	DS
F6-c	NBR 6118	NBR 6118	EN-1992-1-1	1,03	DS
F6-d	NBR 6118	Bi. em gar.	Bi. em gar.	1,04	DS
F6-e	NBR 9062	NBR 9062	–	0,86	DS
F6-f	NBR 9062	NBR 9062	$A_{sw,constr.}$	0,91	DS

dos modos de falha, foi analisada a distribuição das fissuras e de tensões nos consolos, utilizando os critérios definidos por Kriz e Raths.

Além disso, a inclusão dos estribos calculados seguindo o EN-1992-1-1 (modelo F2-c) produziu um pequeno ganho de resistência em relação ao modelo F2-b. O mesmo ocorreu com a inclusão dos estribos construtivos recomendados pela NBR 9062 (modelo F2-f) e com a consideração das armaduras secundárias a partir do critério de biela em garrafa (modelo F2-d).

Por outro lado, ao se analisar o consolo apenas com as armaduras necessárias para o equilíbrio do modelo de bielas e tirantes (modelo F2-a), foi obtida uma diferença significativa no comportamento do elemento com a ruptura ocorrendo por fendilhamento da biela comprimida (Figura 6). Apesar de as armaduras não terem atingido a tensão de escoamento, ainda assim, o elemento apresentou carga última superior ao valor de projeto.

Ao analisar os casos em que o consolo está sob elevadas solicitações, também foi observado que os modelos armados segundo a NBR 6118 (F6-b) e segundo a NBR 9062 (F6-e) apresentaram cargas últimas próximas com o modelo F6-b, atingindo resistência superior em 5% de P_d. Entretanto, ambos os modelos apresentaram carga última significativamente inferior à carga de projeto devido à ruptura por fendilhamento.

Ao considerar os estribos construtivamente recomendados pela NBR 9062 (modelo F6-f), foi obtido um acréscimo de resistência ao fendilhamento. No entanto, ele foi insuficiente para que o consolo atingisse a carga de projeto. Já no modelo F6-a, que consiste no consolo armado apenas com a armadura do tirante, foi obtida uma carga de projeto significativamente inferior ao modelo F6-b. Com isso, é possível perceber a influência das armaduras secundárias transversais e horizontais na resistência ao fendilhamento dos consolos curtos.

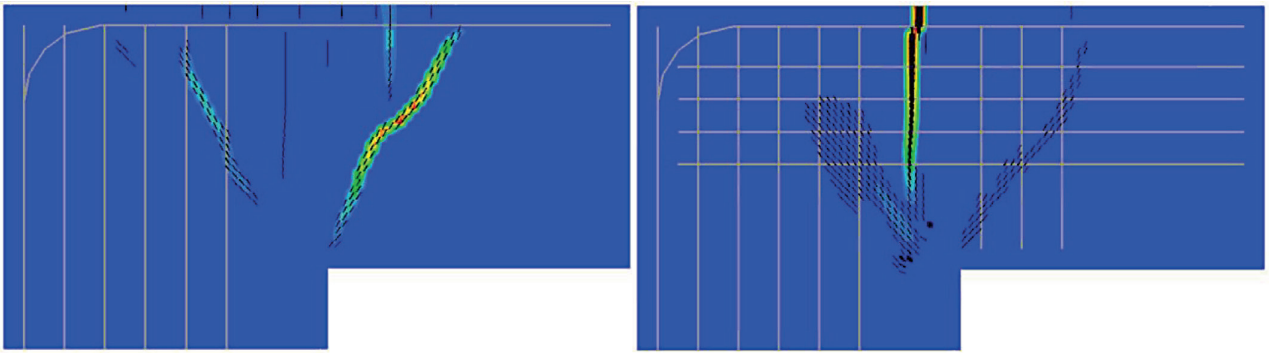
No modelo F6-d, cujas armaduras secundárias foram dimensionadas para resistir ao fendilhamento da biela, foi obtida uma carga última próxima e superior ao valor de projeto. O mesmo ocorreu ao complementar o detalhamento recomendado pela NBR 6118 com os estribos calculados segundo o EN-1992-1-1 (modelo F2c).

Na Figura 7b, verifica-se a mobilização de tensões na armadura de costura devido à tração diagonal na biela. Nela, também pode ser observado que a perda de estabilidade do elemento ocorreu antes do escoamento da armadura do tirante. Na Figura 7a, é apresentada a distribuição das fissuras em P_u com a concentração das fissuras ao longo da biela. Ao analisar a distribuição de tensões no concreto (Figura 6c), percebe-se que os campos de tensão se comportaram como esperado pelo modelo bielas e tirantes, com a formação das bielas diagonais do consolo e do nó de pórtico na região do pilar.

Conclusões

Este artigo teve como objetivo principal comparar as NBR 6118:2023 e NBR 9062:2017 para o projeto de consolos curtos em concreto armado e avaliar a segurança das estruturas projetadas com seus critérios a partir de modelos numéricos não lineares. Para isso, foi realizado o dimensionamento das armaduras de um consolo curto para diversos carregamentos a partir de ambas as normas e de critérios da literatura. Em seguida, foram selecionados dois carregamentos, um considerado baixo e um considerado elevado para a forma analisada. Com isso, foram desenvolvidos modelos numéricos no programa ATENA para avaliar os detalhamentos resultantes dos diferentes critérios considerando ambos os carregamentos.

Foi observado que, ao utilizar as equações 5 e 6 presentes na NBR 9062, há a possibilidade de serem obtidas armaduras consideravelmente inferiores ao



(a) (b)

Figura 6 *– Distribuição de fissuras nos modelos F2-a (a) e F2-c (b)*

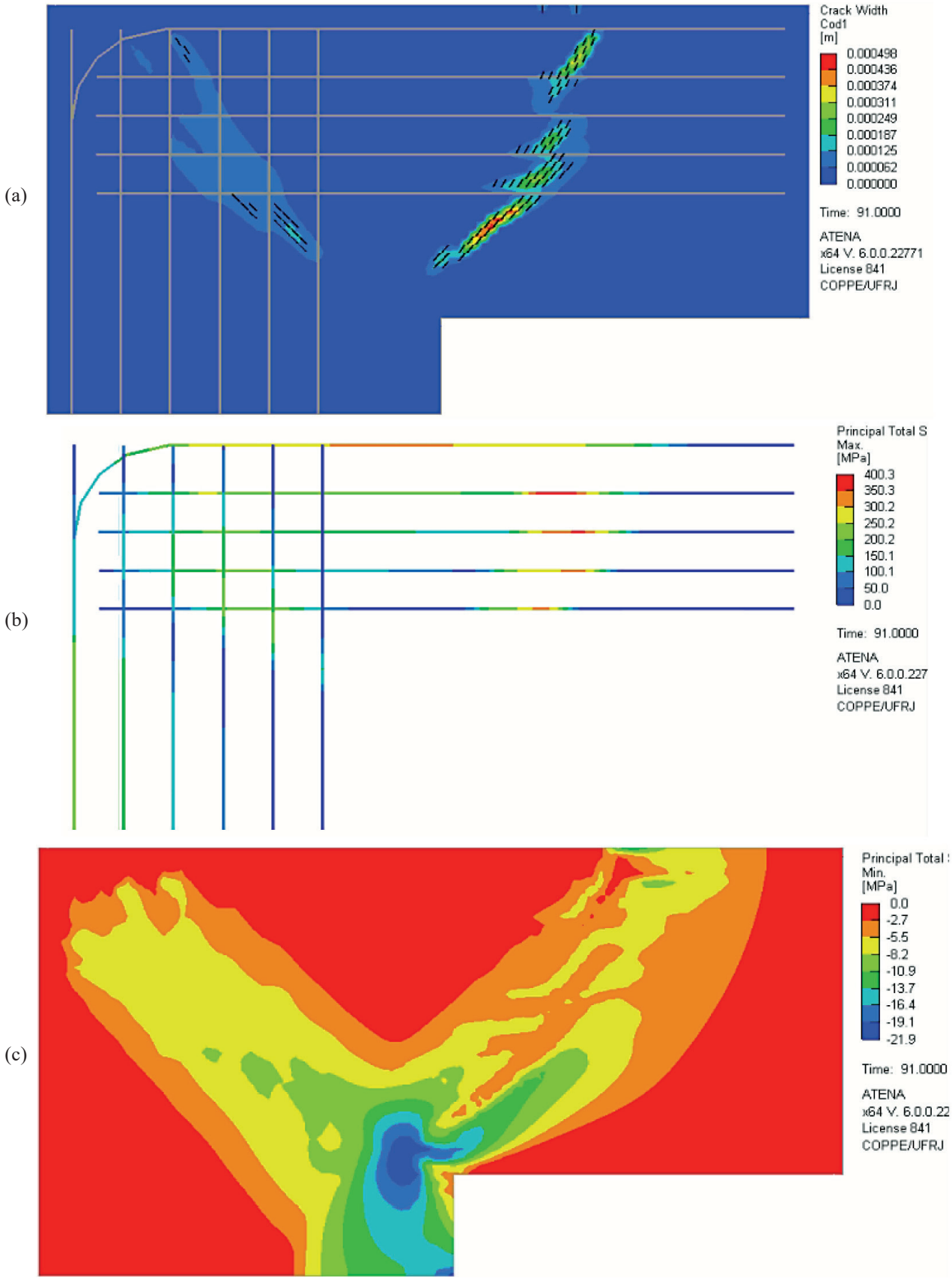


Figura 7 *– Distribuição de fissuras (a), de tensões de tração nas armaduras (b) e de tensões de compressão no concreto e (c) no modelo F6-b sob* P_u.

necessário pelo modelo de bielas e tirantes conforme as solicitações aumentam. Apesar disso, sob a ação de baixos carregamentos, ambas as normas conduziram a armaduras adequadas e a cargas de ruptura superiores ao valor de projeto nos casos analisados.

No entanto, sob a ação de cargas elevadas, os consolos analisados sofreram ruptura precoce por fendilhamento diagonal, não atingindo a carga de projeto. Isso ocorreu devido à deficiência de estribos verticais no consolo, pois ambas as normas brasileiras indicam que, para fins estruturais, não seria necessária a presença dessas armaduras

Para garantir a segurança desses elementos, foram avaliadas duas metodologias presentes na literatura para o dimensionamento das armaduras secundárias: o dimensionamento ao fendilhamento considerando biela em garrafa e o dimensionamento dos estribos a partir do critério de carga próxima ao apoio segundo o Eurocode 2. Com ambos os critérios, foram obtidas armaduras suficientes para impedir que a ruptura por fendilhamento diagonal ocorresse para solicitações inferiores às de projeto.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto, Rio de Janeiro, 2023.

ATENA Program Documentation Part 2-1 User's Manual for ATENA 2D, 2010.

EUROPEAN COMMITEE FOR STANDARDIZATION CEN. Eurocode 2: EN 1992-1-1 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

BOSC, J. L. Dimensionnement des constructions selon l'Eurocode 2 à l'aide des modèles bielles et tirantes: príncipes et applications. Paris: Presses de L'Ècole Nationale des Ponts et Chaussés, 2008.

CERVENKA, V., JENDELE, L. e CERVENKA, J., ATENA Program Documentation, part 1: Theory, Praga, 2021.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON FIB. FIB Model Code for Concrete Structures 2020, Lausane: Ernst & Sohn, 2023.

KRIZ, L. B. e RATHS, C. H., Connections in precast concrete structures – Strength of corbels. PCI Journal, v. 10, n. 1 (fev.), p. 113-125, 1965.

MACHADO, C. P. e PIMENTA, P. M., Consolos curtos de concreto armado: melhoramento de modelos clássicos e novos critérios de análise. in: IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 2000.

PARK, R. e PAULAY, T., Reinforced concrete structures. 1ª ed. New York. Wiley-Interscience, 1975.

SANTOS, D. M., Projeto estrutural por bielas e tirantes. 1ª ed. São Paulo. Oficina dos Textos, 2021.

SCHLAICH, J., SCHAFER, K. e JENNEWEIN, M., Toward a Consistent Design of Structural Concrete, PCI Journal, especial report, (Mai-Jun), p. 74-150, 1987.