

ANÁLISE QUANTITATIVA DA TAXA DE ARMADURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA SUBMETIDOS A FLEXÃO SIMPLES

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE REINFORCEMENT RATE IN ELEMENTS OF HIGH RESISTANCE CONCRETES SUBMITTED TO SIMPLES FLEXION

Elisandra Cristina de Souza¹

Maria Carolina Pereira Alberghini²

Vinicius Slompo Pinto³

RESUMO: A ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto, trouxe inúmeras mudanças e adicionou o comportamento dos concretos de alta resistência (CAR). O objetivo do estudo é avaliar se as alterações, na atual versão, apresentam mudanças significativas no dimensionamento de elementos submetidos a flexão simples. O método de cálculo foi elaborado conforme as equações de equilíbrio de uma seção submetida a flexão simples avaliando elementos com diferentes valores de resistência característica à compressão do concreto. Pode-se concluir que a redução da taxa de armadura em elementos submetidos a flexão simples, com emprego do CAR, ocorre apenas em estruturas que não requererem o uso de armadura dupla. Para armadura simples, ocorre a redução do consumo de concreto e consequentemente das fôrmas utilizadas.

Palavras-chave: Concreto de alta resistência, Estruturas, Dimensionamento, Flexão simples, Área de aço.

ABSTRACT: The ABNT NBR 6118:2014 - Concrete structures design, has brought countless changes and has added the behavior of high strength concrete (CAR). The purpose of the study is to evaluate whether the alterations, in the current version, show meaningful changes in the elements sizing subjected to simple bending. The calculation method was determined in compliance with the equilibrium equations of a section subjected to simple bending assessing elements of assorted resistance values inherent to the concrete compression. It can be concluded that the reduction of the reinforcement ratio applied to elements subjected to simple bending, employing CAR, occurs only in structures which do not require the use of double frames. As to single frames a reduction of concrete usage and consequently molds used can be seen.

Keywords: High resistance concrete, Structures, Sizing, Simple flexion, Steel area.

¹Graduanda em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro, SP. E-mail: elisandra.souzaf@gmail.com.

²Graduanda em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro, SP. E-mail: carolalberghini@hotmail.com.

³Docente no Centro Universitário UNIFAFIBE – Bebedouro, SP. E-mail:vinicius.slompo.p@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Diversas vantagens evidenciam o concreto como um dos principais elementos empregados na construção civil, dentre elas a simplicidade de adaptação, resistência ao fogo, água, aos desgastes mecânicos, entre outras. Sua conduta pode ser analisada como um material constituído de uma fase estável, os agregados, e uma fase evolutiva, a pasta, sujeito a retração ou dilatação no estágio de cura, isto conduz à formação de uma zona de transição. A delimitação água/aglomerante no concreto de alta resistência (CAR), bem como o uso de aditivos minerais, possibilitam um melhor desempenho da resistência na zona de transição, que se reflete em maior resistência mecânica total (TORRICO, 2010).

O progresso científico no seguimento do CAR foi necessário para criação de práticas que possam atender a demanda referente a projetos de maior porte, com apropriado artifício e de maneira economicamente viável. Ainda que o CAR tenha um valor maior comparado a concretos convencionais, deve-se observar parâmetros como a redução significativa na taxa de armadura nas seções em elementos comprimidos, aumentando a área útil dos ambientes e diminuindo o peso próprio da estrutura (BRUSCO, 2014).

A definição de concreto de acordo com sua resistência, citada aos 28 dias de idade, vem sendo estimado em categorias distintas ao decorrer do tempo. Em 1950, especificava-se, concreto de alta resistência cerca de 34 MPa, já na década de 60 intitulou-se a resistência de 41 e 52 MPa, como a linha divisória entre resistência normal e CAR, produzidos comercialmente. Em meados de 70, concreto de resistências à compressão atingiam os 62 MPa. Entre 1980 e 1990, o ápice dos concretos alcançaram 100 MPa de resistência (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1991).

Nos Estados Unidos e Europa, na década atual, concretos com resistência à compressão de até 140 MPa são fabricados frequentemente, uma vez que em alguns laboratórios, concretos de até 315 MPa já foram elaborados de forma experimental, com materiais diferenciados (NAWY, 1996).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8953: 2015, concretos com finalidades estruturais, são determinados por classes, fundamentado na resistência característica à compressão (f_{ck}), em dois grupos. A

classe I compreende concretos entre 20 à 50 MPa, concretos convencionais, já a classe II contempla concretos 55 à 90 MPa, definidos como de alta resistência.

Os pré-requisitos básicos para projeto de estruturas são fixados pela ABNT NBR 6118. A atual versão da Norma foi redigida em abril de 2014, trazendo inúmeras alterações e substituindo a versão anterior de 2007, que até então contemplava apenas concretos normais pertencente a classe I. Deste modo, a versão atualizada da Norma passou a aderir concretos da classe II.

O objetivo do trabalho é avaliar se as alterações na atual versão, que inclui novos parâmetros de cálculos para o diagrama tensão-deformação e domínios de deformação, trazem mudanças significativas ao dimensionamento de elementos submetidas a flexão simples, baseado em um modelo estrutural apropriado seguindo as orientações da ABNT NBR 6118/2014, com a finalidade de realizar a comparação entre os resultados de dimensionamento de seções com concreto de classe I (Concreto normal) e classe II (CAR).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tipos de concretos

A descrição de concreto convencional é indicada pela Norma ABNT NBR 12655 (2006) como um material desenvolvido pela combinação de cimento, agregados e água, podendo ainda conter aditivos na sua composição. Engloba a classe de concretos com resistência característica à de 50 MPa, apresentando ainda massa específica maior de 2000 kg/m³, até 2800 kg/m³.

A definição de CAR é baseada na resistência característica à compressão aos 28 dias, entre 55 MPa e 90 MPa, determinados como classe II (ABNT, 2015).

O aumento de resistência está ligado a uma baixa relação água/cimento. Para concretos convencionais, essa relação varia dentro do intervalo de 0,50 a 0,70, para CAR a mesma fica por volta de 0,28. Para alcançar uma satisfatória trabalhabilidade, é necessário que se empregue superplastificantes, que são aditivos com capacidade de redução de água de até 30%, de maior eficácia que os redutores habituais (PAIVA, 1994).

Uma das principais vantagens da resistência superior do CAR é a redução do consumo de concreto, além do peso de aço, bem como das solicitações nas

fundações. Alves (2000) ainda cita a redução nas áreas de formas e custos de manutenção da estrutura, o que acaba viabilizando o uso do CAR em construções.

2.2 Flexão simples e composta em estruturas de concreto

Nas edificações de concreto armado os elementos estruturais que integram o conjunto estrutural global são compostos por pilares, vigas e lajes. As vigas e as lajes são expostas à flexão simples, já os pilares são submetidos à flexão composta (SANTOS, 1983).

Flexão simples é denominada como a flexão sem força normal dominante. Solicitações normais são originadas por esforços solicitantes que provocam tensões normais, como momento fletor e força normal, em elementos estruturais sendo perpendiculares às seções transversais (BASTOS, 2015).

Para o dimensionamento de peças sujeitas à flexão simples, devem ser seguidas algumas etapas, como: definição das dimensões da seção transversal e área das armaduras, para que seja garantida uma margem de segurança ao Estado Limite Último (ELU), devendo acontecer para um momento de cálculo ou fletor de ruptura (FONSECA, 2015).

Já a flexão composta é estipulada quando um elemento estrutural está recebendo solicitação de flexão (momento fletor) além do esforço normal, ou seja, carregamento axial excêntrico (SMANIOTTO, 2005).

2.3 ABNT: NBR 6118

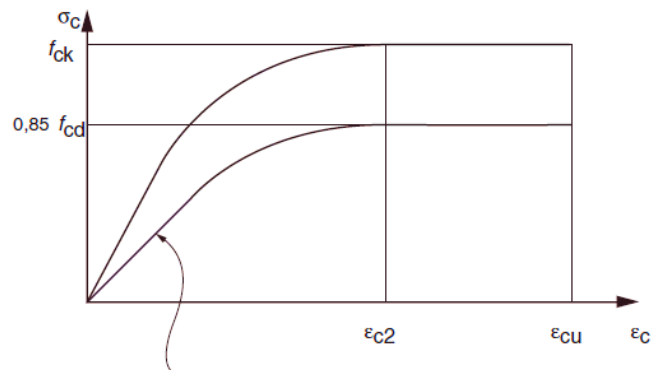
A Norma brasileira para dimensionamento de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118, sofreu alterações ao longo dos anos a procura de aperfeiçoamento. A versão de 2003 passou por atualização de tecnologias e novas exigências de durabilidade que uma estrutura de concreto armado deve possuir. Em 2007 a versão foi atualizada, porém sem grandes alterações no cálculo estrutural. A versão atual da norma, que entrou em vigor no ano de 2014, traz consigo várias mudanças importantes para cálculo estrutural (MONTAGNA, 2014).

A ABNT NBR 6118 (2007) estabelece requisitos fundamentais para estruturas, aplicados a concreto com resistência a compressão de até 50 MPa, denominados convencionais. A versão atualizada além de concretos classe I, insere ainda o comportamento dos concretos de alta resistência, classificados como classe II pela ABNT NBR 8953 (2015), que possui resistência de 55 MPa à 90 MPa.

2.3.1 Diagrama tensão-deformação

Idealizado para concreto, o diagrama tensão-deformação pode ser empregado em análises do ELU, permitindo o cálculo da tensão atuante no concreto conforme sua deformação. Para verificação de tensões de compressão do concreto no ELU, pode ser empregada a versão idealizada do diagrama, exposto na Figura (1), originário do diagrama parábola-retângulo, com finalidade de dimensionamento.

FIGURA 1. Diagrama tensão-deformação idealizado



$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

Para $f_{ck} \leq 50$ MPa: $n=2$
Para $f_{ck} > 50$ MPa:
 $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$

Fonte: Adaptado da ABNT 6118 (2014)

Assim, os valores a serem admitidos para os parâmetros ϵ_{c2} (deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico) e ϵ_{cu} (deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura) são estabelecidos conforme a classe do concreto. Esses parâmetros foram definidos, em concretos com f_{ck} (resistência característica a compressão) de até 50 MPa, conforme a versão de 2007, expressos pelas Equações (1) e (2). A nova versão, que compreende concretos acima de 55 MPa, incluiu novos valores para os parâmetros, conforme apresentado pelas Equações (3) e (4) (ABNT, 2014).

$$\epsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰}; \tag{1}$$

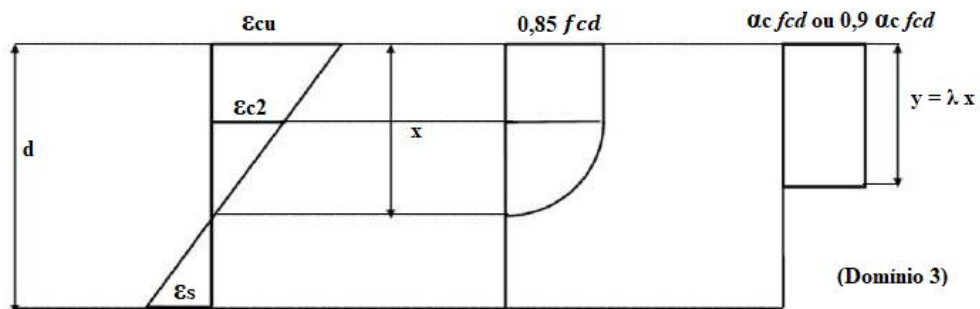
$$\epsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}; \tag{2}$$

$$\epsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰} + 0,085 \text{ ‰} * (f_{ck} - 50)^{0,53}; \tag{3}$$

$$\epsilon_{cu} = 2,6 \text{ ‰} + 35 \text{ ‰} * \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 \quad (4)$$

As especificações de simplificação dos diagramas tensão-deformação foram reformuladas, de forma que forneçam um valor de seu posicionamento utilizado para a determinação da resultante da força resistente do concreto nas seções, ambos ajustados conforme o diagrama real. Na Figura (2) exemplifica-se, para entendimento, esquemas característicos de deformação exclusiva, diagramas simplificado e real de tensões ao decorrer da altura de uma seção em flexão simples no Domínio 3 (CERUTTI; SANTOS, 2015).

FIGURA 2. Diagrama parábola-retângulo simplificado



Fonte: Cerutti e Santos (2015)

No entanto, a norma recomenda que o diagrama apresentado seja substituído pelo retângulo de profundidade $y = \lambda x$, em que o parâmetro λ pode ser tomado como 0,8 para concretos com classe I ou para concretos com classes entre C55 a C90, conforme Equação (5).

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \quad (5)$$

A tensão permanente predominante do concreto (σ_{cd}) é definida como: $\alpha_c * f_{cd}$, uma vez que não ocorra a diminuição da largura da seção a partir da linha neutra à borda mais comprimida. Quando ocorre o contrário, ou seja, a largura da seção diminui a partir da linha neutra, o parâmetro σ_{cd} é estabelecido de acordo com a Equação (6).

$$\sigma_{cd} = 0,9 * \alpha_c * f_{cd} \quad (6)$$

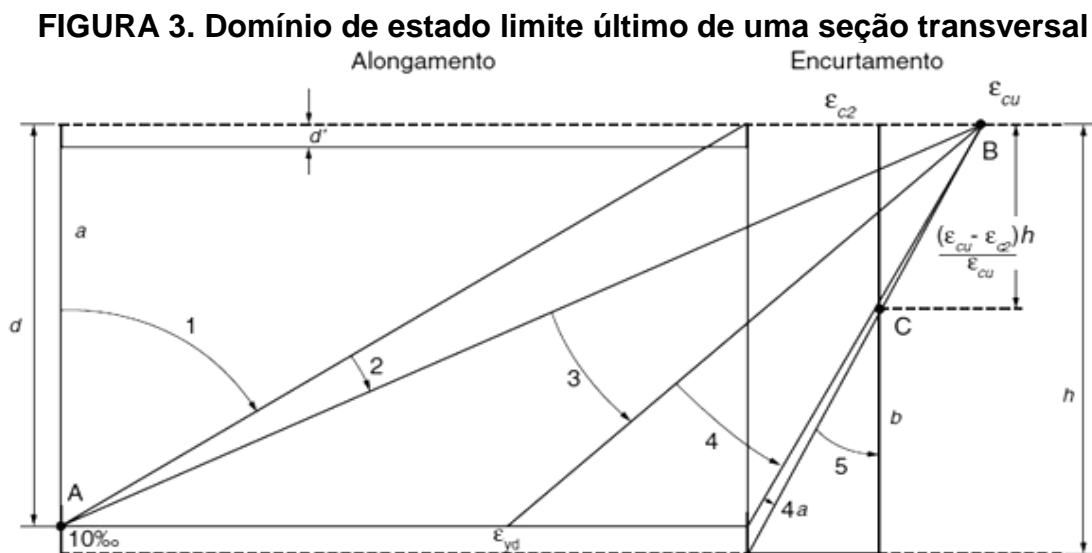
O parâmetro α_c (redução da resistência do concreto na compressão) é estabelecido como 0,85 para concretos classe I, já para concretos entre 55 MPa a 90 MPa o mesmo será conforme Equação (7) (ABNT, 2014).

$$\alpha_c = 0,85 * \left[1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \quad (7)$$

2.3.2 Domínios de deformação

Os domínios distinguem-se pelo modo de ruína, conseqüentemente pelo nível de deformação na armadura e no concreto e pelo tipo de solicitação presentes no elemento estrutural, que se diferenciam em dois tipos de rupturas convencionais, uma por deformação plástica excessiva e a outra por encurtamento do limite do concreto (ABNT, 2007).

O estado-limite último é caracterizado a partir do momento em que as deformações (ϵ_{cu} no concreto ou 10‰ no aço) calculadas na seção transversal pertença a um dos domínios definidos e presente na Figura (3) (ABNT, 2014).



Fonte: Adaptado da ABNT 6118 (2014)

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliados elementos com diferentes valores de f_{ck} , altura útil e momento característico (M_k). Os valores de f_{ck} analisados são: 30 MPa, 40MPa, 55 MPa, 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa e 90 MPa.

Apresentado o método de cálculo conforme o procedimento proposto pela ABNT NBR 6118:2014, o dimensionamento foi realizado através do software de programação *Microsoft Office Excel*.

3.1 Método de cálculo

Conforme as recomendações da ABNT NBR 6118:2014, o método de cálculo para a realização do dimensionamento de estruturas de concreto armado submetidos à flexão simples em seções retangulares, é estipulado pelo procedimento seguinte, em conformidade com os concretos de classe I e II.

3.1.1 Dimensionamento da estrutura para concreto classe I (C20 à C50)

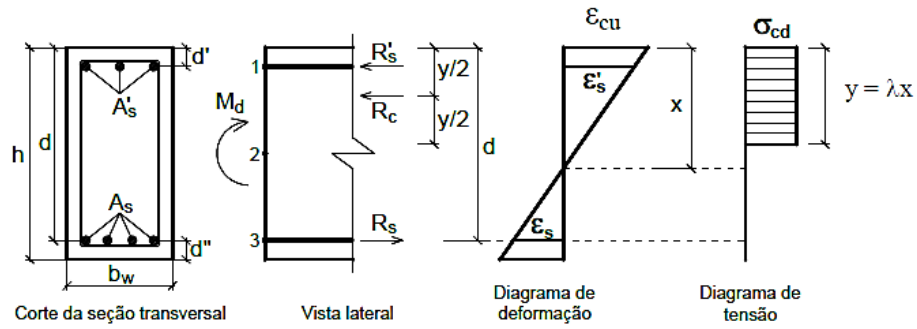
Dado o valor do momento característico (M_k), da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), e o valor da menor largura da seção (b_w) é possível efetuar o dimensionamento da armadura. A Equação (8) é utilizada para encontrar a altura relativa da linha neutra (β_x), que fornece a posição relativa da linha neutra na seção entre os domínios 2 e 3, em que o valor de ε_{cu} corresponde a 3,5 ‰, para concretos classe I.

$$\beta_{x2,3} = \frac{\varepsilon_{cu}}{(10+\varepsilon_{cu})} \quad (8)$$

Para que seja evitado o dimensionamento de elementos no domínio 4, aquele onde ocorre a ruptura brusca, sem aviso, a ABNT NBR 6118:2014 relata que se deve adotar armadura dupla através do valor adequado de $\beta_{x,lim}$, onde para concretos classe I, caso esse valor seja maior 0,45, é necessário o cálculo da armadura de compressão (A'_s).

No dimensionamento de peças na flexão simples, considera-se que as barras que constituem a armadura estão agrupadas conforme apresenta a Figura (4), e a força resistente do aço se encontra concentrada no centro de gravidade dessas barras. Do equilíbrio de forças e de momentos tem-se a Equação (9) definida conforme a resultante de compressão no concreto (R_c), resultante das tensões na armadura tracionada (R_s) e a resultante das tensões na armadura comprimida (R'_s). A Equação (10) é composta por: momento solicitante de cálculo (Md), altura útil (d), cobrimento da armadura (d') e altura da zona comprimida de concreto (y).

FIGURA 4. Resistências e deformações na seção



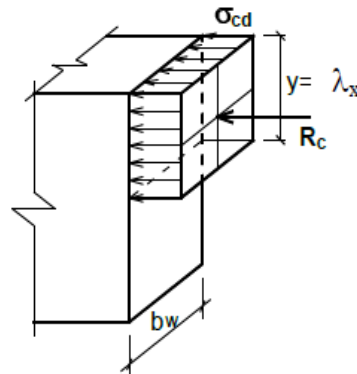
Fonte: Adaptado de Pinheiro. L. M. et al. (2016)

$$R_c + R'_s - R_s = 0 \quad (9)$$

$$M_d = R_c * \left(d - \frac{y}{2} \right) + R'_s * (d - d') \quad (10)$$

A força resultante no concreto (R_c), representada na Figura 5, é dada pela Equação (11) em função da menor largura da seção (b_w), altura da zona comprimida do concreto (y) e da tensão de compressão do concreto (σ_{cd}). Utiliza-se os parâmetros das Equações (12) e (13) para obter os resultados da Equação (11), (14) e (15) representam as forças resultantes da armadura inferior e superior, respectivamente.

FIGURA 5. Resultante no concreto



Fonte: Adaptado de Pinheiro. L. M. et al. (2016)

$$R_c = b_w * y * \sigma_{cd} \quad (11)$$

$$y = \lambda * x \quad (12)$$

$$\sigma_{cd} = a_c * f_{cd} \quad (13)$$

$$R_s = A_s * \sigma_s \quad (14)$$

$$R'_s = A'_s * \sigma'_s \quad (15)$$

Substituindo esses valores nas equações de equilíbrio, obtêm-se a Equação (16), empregada para descobrir a altura útil da seção. Com todos os valores já encontrados, a Equação (17) é utilizada para obter a área da seção transversal da armadura. Considerando que para armadura simples $A'_s = 0$, onde A'_s corresponde a área da armadura de compressão. O uso da armadura dupla é definido conforme a altura relativa da linha neutra (β_x), em que a ABNT NBR 6118:2014 relata que caso esse valor seja maior 0,45, para concretos classe I, é necessário o cálculo de armadura dupla. Caso contrário adota-se $A'_s \neq 0$, sendo válidas as Equações (16) e (17). Os parâmetros y e a_c , foram determinados conforme o item 2.3.1 do trabalho.

$$M_d = 0,68 * b_w * d^2 * \beta_x * f_{cd} * (1 - 0,4 * \beta_x) + A'_s * \sigma'_s * (d - d') \quad (16)$$

$$0,68 * b_w * d * \beta_x * f_{cd} + A'_s * \sigma'_s + A_s * \sigma_s = 0 \quad (17)$$

3.1.2 Dimensionamento da estrutura para concreto classe II (C55 à C90)

Para concretos classe II, o início de cálculo será o mesmo do CAR, com o valor do momento característico, da resistência de cálculo, e valor da menor largura da seção. A Equação (18) é utilizada para encontrar a altura relativa da linha neutra, que fornece a posição relativa da mesma na seção entre os domínios 2 e 3, em que o valor de ϵ_{cu} para concretos classe II é expresso conforme com a Equação (19).

$$\beta_{x2,3} = \frac{\epsilon_{cu}}{(10 + \epsilon_{cu})} \quad (18)$$

$$\epsilon_{cu} = 2,6 \text{ ‰} + 35 \text{ ‰} * \left[\frac{90 - f_{ck}}{100} \right]^4 \quad (19)$$

Para que seja evitado o dimensionamento de elementos no domínio 4, a ABNT NBR 6118:2014 relata que se deve adotar armadura dupla através do valor adequado de $\beta_{x,lim}$, onde para concretos classe II, caso esse valor seja maior 0,35, é necessário

o cálculo da armadura de compressão (A'_s).

Substituindo-se esses valores nas equações de equilíbrio, obtêm-se a Equação (20), que é utilizada para encontrar a altura útil da seção. Com todos os valores já encontrados, a Equação (21) é utilizada para obter a área da seção transversal da armadura. Considerando que para armadura simples $A'_s = 0$. O uso da armadura dupla é definido conforme a altura relativa da linha neutra (β_x), em que a ABNT NBR 6118:2014 relata que caso esse valor seja maior 0,35, para concretos classe II, é necessário o cálculo de armadura dupla. Caso contrário adota-se $A'_s \neq 0$, sendo válidas as Equações (24) e (25). Os parâmetros y e a_c , foram determinados conforme apresenta o item 2.3.1 do presente trabalho.

$$M_d = b_w * d^2 * \beta_x * f_{cd} * \left\{ 0,8 - \left[\frac{f_{ck} - 50}{400} \right] \right\} * \left\{ 0,85 * \left[1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \right\} * \left\{ 1 \left[0,8 - \left[\frac{f_{ck} - 50}{400} \right] \right] * \beta_x \right\} + A'_s * \sigma'_s * (d - d') \quad (20)$$

$$b_w * d * \beta_x * f_{cd} * \left\{ 0,8 - \left[\frac{f_{ck} - 50}{400} \right] \right\} * \left\{ 0,85 * \left[1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \right\} + A'_s * \sigma'_s + A_s * \sigma_s = 0 \quad (21)$$

3.2 Comparação de métodos

O comparativo entre os métodos se dá a partir da variação de parâmetros, como: momento fletor, altura relativa da linha neutra (β_x) e tipo de concreto. Já que a armadura de um determinado elemento de concreto é função desses parâmetros.

O método de comparação é baseado em um valor fixo de momento fletor, com isso constata-se como a taxa de armadura varia em função do β_x . A seguir, para esse mesmo valor de momento fletor, varia-se os tipos de concreto, verificando também como isso influi na taxa de armadura. Com o resultado final de cada método, será conferido a influência desses parâmetros na taxa de armadura.

4 RESULTADOS

Os resultados gerados pelos cálculos, feitos através das equações de equilíbrio mencionados nos itens 3.1.1 e 3.1.2, podem ser divididos, de forma geral, em três grupos. O primeiro grupo é direcionado a armadura simples, a fim de se obter um comparativo entre a altura útil do elemento e a área de aço tracionada. O segundo

grupo foi baseado na armadura dupla para diferentes classes do concreto, com objetivo de comparar as áreas de aço na tração e compressão para três distintas alturas úteis e momentos solicitantes de cálculo. No terceiro grupo foram realizados cálculos baseados na aproximação média da armadura comprimida para diferentes classes de concretos e um único momento solicitante, a fim de comparar a altura útil do elemento com a área de aço total do mesmo.

4.1 Grupo 1: armadura simples

Dentre os parâmetros fixos de cálculos usados para compor o gráfico comparativo têm-se: momento solicitante de projeto (25.760 kN.cm), largura da seção (25 cm), altura relativa da linha neutra (0,35), aço (CA 50 kN/cm²) e cobrimento da armadura (4 cm). O cálculo teve por objetivo encontrar a altura útil do elemento, bem como sua área de aço, feito por meio das equações de equilíbrio expressas a seguir, de acordo com a classe do concreto. Para esse comparativo foi utilizado diferentes resistências de concreto: C30, C40, C55, C60, C70, C80 e C90.

4.1.1 Concreto classe I

O cálculo da altura útil (d) do elemento é encontrado por meio da Equação (22), que varia em função da classe do concreto, além da altura relativa da linha neutra (β_x), valor da largura da seção (b_w), momento solicitante de projeto (M_d) e a resistência de cálculo à compressão do concreto (f_{cd}).

$$d = \sqrt{\frac{M_d}{0,68 * b_w * f_{cd} * \beta_x * (1 - 0,4 * \beta_x)}} \quad (22)$$

Para o cálculo da área de aço (A_s) em concretos classe I, utiliza-se a Equação (23) que é composta pela multiplicação dos seguintes parâmetros: altura útil (d), valor da largura da seção (b_w), altura relativa da linha neutra (β_x), resistência de cálculo à compressão do concreto (f_{cd}) e resistência de cálculo de escoamento do aço (f_{yd}).

$$A_s = f_{yd} * 0,68 * b_w * d * f_{cd} * \beta_x \quad (23)$$

4.1.2 Concreto classe II

Para concretos entre 55 e 90 MPa o cálculo da altura útil (d) é feito por meio da Equação (24), que varia em função da classe do concreto além da altura relativa da linha neutra (β_x), valor da largura da seção (b_w), momento solicitante de projeto (M_d) e a resistência de cálculo à compressão do concreto (f_{cd}) a Equação também conta com a variação da resistência característica a compressão do concreto (f_{ck}).

$$d = \sqrt{\frac{M_d}{0,85 \cdot \left[0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400}\right] \cdot b_w \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200}\right] \cdot \left(1 - \frac{\left[0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400}\right] \cdot \beta_x}{2}\right)}} \quad (24)$$

Assim como o cálculo da altura útil, os parâmetros para cálculo da área de aço da seção comprimida de armadura simples, também variam em função na resistência do concreto, encontrado através da Equação (25).

$$A_s = f_{yd} \cdot 0,85 \cdot \left[0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400}\right] \cdot b_w \cdot d \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200}\right] \quad (25)$$

4.1.3 Apresentação dos resultados

A Tabela (1) apresenta os dados coletados através das equações mencionadas nos itens 4.1.1 e 4.1.2, calculados para concretos classe I e classe II, com altura relativa da linha neutra (0,35), momento solicitante de projeto (25760 kN.cm), largura da seção (25 cm), cobrimento da armadura (4 cm) e aço CA-50.

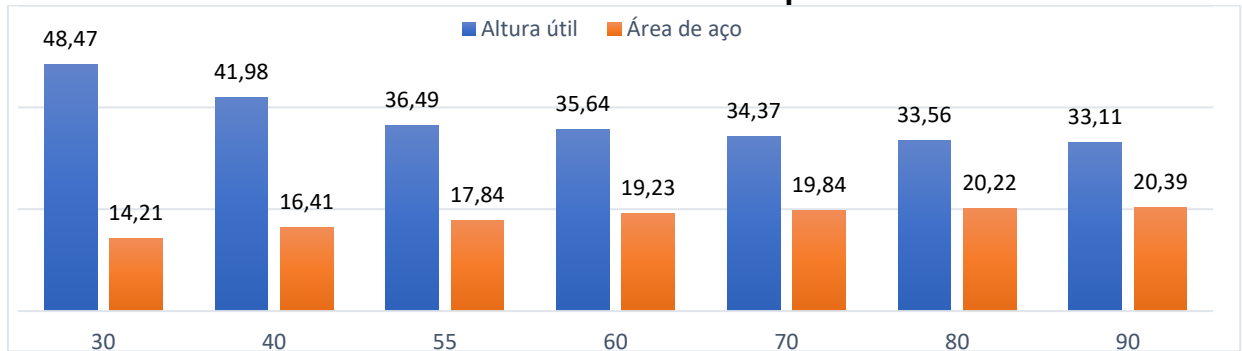
Concreto	β_x	Altura útil (cm)	Altura (cm)	A_s (cm ²)
C30	0,35	48,47	52,47	14,21
C40	0,35	41,98	45,98	16,41
C55	0,35	36,49	40,49	17,84
C60	0,35	35,64	39,64	19,23
C70	0,35	34,37	38,37	19,84
C80	0,35	33,56	37,56	20,22
C90	0,35	33,11	37,11	20,39

Fonte: Próprio Autor (2018)

O Gráfico (1) apresenta a comparação entre a altura útil do elemento e a área de aço de acordo com a classe do concreto. Percebe-se que quanto menor a classe

de resistência do concreto, maior será a altura útil do elemento e em contrapartida o valor da área de aço calculada será menor, se comparado com CAR.

GRÁFICO 1. Armadura simples



Fonte: Próprio Autor (2018)

4.2 Grupo 2: armadura dupla

Para esse grupo o comparativo foi feito através da variação da altura útil do elemento, sendo as alturas analisadas: 25 cm, 35 cm e 45 cm. Para cada altura foram determinados diversos parâmetros de cálculo, porém alguns dados foram fixos para os diferentes contextos. Os elementos pré-fixados para as três alturas foram: aço (CA-50), cobertura da armadura (4 cm), largura da seção (25 cm), altura relativa da linha neutra para cada classe de concreto, sendo ele 0,45 para concreto classe I e 0,35 para concretos classe II (Valores de $\beta_{x,lim}$ para cálculo de armadura dupla), resistência de cálculo de escoamento do aço (43,48 kN.cm²).

Para altura útil de 25 cm foi estabelecido o momento solicitante de projeto (16800 kN.cm), assim como para 35 cm o valor foi de 33600 kN.cm e 45 cm o valor pré-determinado foi de 55300 kN.cm. Os valores foram estabelecidos a fim de não ultrapassar o limite máximo da taxa de armadura, delimitado a 4% da área de concreto.

Para elementos que necessitem de armadura dupla é necessário o cálculo da armadura de compressão, que é dada pela Equação (26) para concretos classe I e pela Equação (27) para concretos classe II. Para o cálculo da armadura de tração e da área de aço as equações utilizadas foram as mesmas contidas nos itens 4.1.1 e 4.1.2 apresentados anteriormente

$$A'_s = \frac{Md - (0,68 * b_w * d^2 * f_{cd} * \beta_x * (1 - 0,4 * \beta_x))}{f_{yd} * (d - d')} \quad (26)$$

$$A'_s = \frac{Md - 0,85 \cdot \left[0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400} \right] \cdot b_w \cdot d^2 \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} \right] \cdot \left(1 - \frac{\left[0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400} \right] \cdot \beta_x}{2} \right)}{f_{yd} \cdot (d - d')} \quad (27)$$

4.2.1 Apresentação dos resultados

As Tabelas (2), (3) e (4) apresentam os dados coletados após os cálculos mencionados acima. Essas tabelas contêm informações referente ao limite máximo da taxa de armadura, onde o mesmo consiste em a área de aço total não ultrapassar 4% da área de concreto do elemento.

TABELA 2. Altura útil: 25 cm

Concreto	β_x	AC (cm ²)	A's (cm ²)	As (cm ²)	As total (cm ²)	Limite da taxa de arm.
30	0,45	725	9,20	18,62	27,82	29
40	0,45	725	6,13	18,70	24,83	29
55	0,35	725	5,16	18,06	23,22	29
60	0,35	725	4,51	18,01	22,52	29
70	0,35	725	3,47	17,91	21,38	29
80	0,35	725	2,75	17,81	20,55	29
90	0,35	725	2,32	17,71	20,03	29

Fonte: Próprio Autor (2018)

TABELA 3. Altura útil: 35 cm

Concreto	β_x	AC (cm ²)	A's (cm ²)	As (cm ²)	As total (cm ²)	Limite da taxa de arm.
30	0,45	975	12,71	25,91	38,62	39
40	0,45	975	8,64	26,23	34,87	39
55	0,45	975	7,35	25,41	32,76	39
60	0,35	975	6,49	25,38	31,88	39
70	0,35	975	5,11	25,32	30,43	39
80	0,35	975	4,15	25,23	29,37	39
90	0,35	975	3,58	25,13	28,70	39

Fonte: Próprio Autor (2018)

TABELA 4. Altura útil: 45 cm

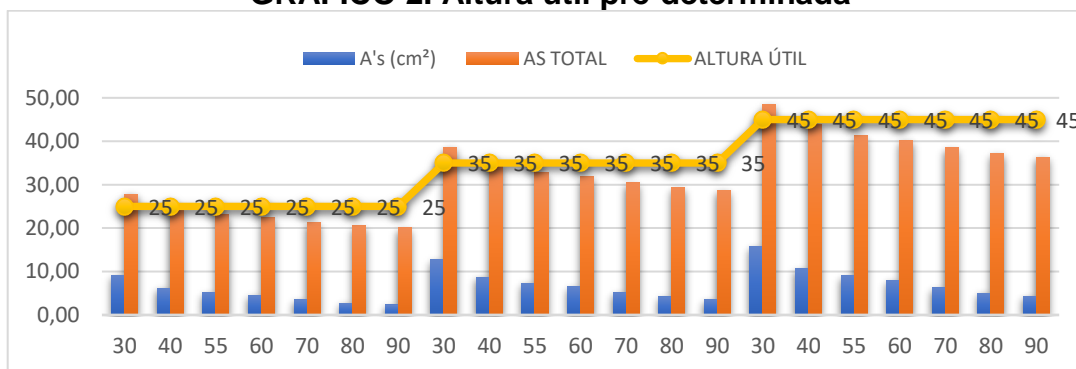
Concreto	β_x	AC (cm ²)	A's (cm ²)	As (cm ²)	As total (cm ²)	Limite da taxa de arm.
30	0,45	1225	15,75	32,72	48,47	49
40	0,45	1225	10,66	33,28	43,95	49
55	0,35	1225	9,05	32,27	41,32	49
60	0,35	1225	7,98	32,27	40,25	49
70	0,35	1225	6,25	32,23	38,48	49
80	0,35	1225	5,04	32,15	37,20	49
90	0,35	1225	4,33	32,04	36,38	49

Fonte: Próprio Autor (2018)

O Gráfico (2) apresenta a comparação entre a área total de aço ($A_s \text{ total}$) e a armadura de compressão (A'_s) de acordo com a classe do concreto e a altura útil. O mesmo apresenta que, para todas as alturas úteis pré-estabelecidas, conforme aumenta-se f_{ck} do concreto, os dois parâmetros sofrem um decréscimo de valores calculados. Sendo assim, os valores destes parâmetros para armadura dupla, em concretos classe II, sempre serão menores se comparado a concretos classe I.

Já em relação a variação da altura útil, pode-se observar que a armadura de compressão, bem como a área total de aço são maiores em 45 cm, se comparado a altura útil de 25 cm.

GRÁFICO 2. Altura útil pré-determinada



Fonte: Próprio Autor (2018)

4.3 Grupo 3: aproximação média da armadura comprimida

Dentre os parâmetros fixos de cálculos usados para o comparativo estão: momento solicitante de projeto (55.300 kN.cm), largura da seção (25 cm), aço (CA 50 kN/cm²) e cobrimento da armadura (4 cm), além da altura relativa da linha neutra para cada classe do concreto, sendo ele 0,45 para concreto classe I e 0,35 para concretos classe II (Valores de $\beta_{x,lim}$ para cálculo de armadura dupla), além da resistência de cálculo de escoamento do aço (43,48 kN.cm²).

O cálculo teve por objetivo encontrar a altura útil do elemento, bem como sua área de aço total, por meio de um valor médio da armadura de compressão sendo adotados valores entre 8,83 cm² e 9,95 cm². Com a atenção para não ultrapassar o limite máximo da taxa de armadura para cada concreto. Para esse comparativo foi utilizado diferentes classes de concreto: C30, C40, C55, C60, C70, C80 e C90. As equações utilizadas para os cálculos foram as mesmas mencionais nos itens 4.1 e 4.2. O intuito principal do cálculo foi observar a variação da altura útil, bem como a área de aço total conforme o aumento do f_{ck} do concreto.

4.3.1 Apresentação dos resultados

A Tabela (5) reúne os dados encontrados através dos cálculos citados acima, apresentando a altura útil do elemento, que teve uma queda considerável de acordo com o aumento da resistência característica do concreto. A armadura de tração, bem como a área total de aço, foi o oposto, ou seja, com o aumento da resistência característica do concreto, houve o aumento da mesma.

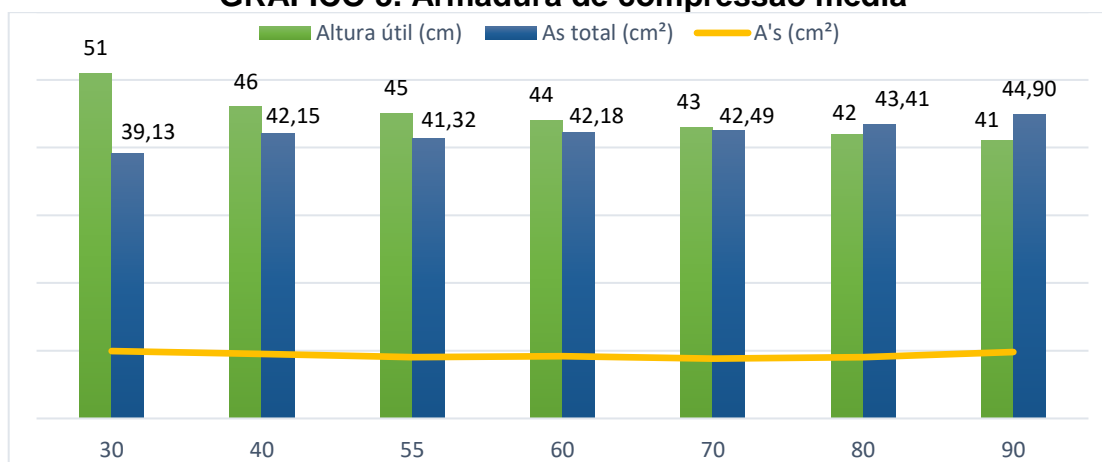
TABELA 5. Valor médio da armadura de compressão

Concreto	β_x	d (cm)	A's (cm ²)	As (cm ²)	As total (cm ²)	Limite da taxa de arm.
30	0,45	51	9,95	29,18	39,13	55
40	0,45	46	9,52	32,64	42,15	50
55	0,35	45	9,05	32,27	41,32	49
60	0,35	44	9,22	32,97	42,18	48
70	0,35	43	8,83	33,66	42,49	48
80	0,35	42	9,06	34,36	43,41	46
90	0,35	41	9,82	35,07	44,90	45

Fonte: Próprio Autor (2018)

O Gráfico (3) apresenta a comparação entre a altura útil do elemento e a área total de aço, submetidos a diferentes resistências características do concreto. Pode-se observar que com a área da armadura de compressão média (A's) pré-estabelecida, a altura útil dos elementos apresenta queda conforme o aumento do f_{ck} do concreto, com essa mesma condição, a área total de aço, se comparado com CAR, apresenta um aumento.

GRÁFICO 3. Armadura de compressão média



Fonte: Próprio Autor (2018)

5 DISCUSSÃO

A Tabela (6) apresenta, para um elemento submetido à flexão simples, que necessitem do emprego de armaduras duplas, para uma mesma altura útil (no caso 45 cm), a redução da quantidade de aço chega a cerca de 24,95% para uso de concreto classe II, se comparado ao uso de concreto classe I.

TABELA 6. Altura útil de 45 cm

Concreto	Área total de aço	Variação	Comparativo
C30	48,47	-	-
C40	43,95	-9,33%	C40 com C30
C55	41,32	-14,76%	C55 com C30
C60	40,25	-16,97%	C60 com C30
C70	38,48	-20,61%	C70 com C30
C80	37,20	-23,26%	C80 com C30
C90	36,38	-24,95%	C90 com C30

Fonte: Próprio Autor (2018)

O contrário acontece para elementos submetidos a flexão simples, que não necessitem do emprego de armadura dupla. A Tabela (7) apresenta que há um aumento considerável na área de aço total, cerca de 43,49%, conforme aumenta-se a resistência característica à compressão do concreto, em contrapartida, há uma redução de cerca de 31,69% na altura útil do elemento.

TABELA 7. Elementos com armadura simples

Concreto	Área de aço total	Variação	Altura útil	Variação	Comparativo
C30	14,21	-	48,47	-	-
C40	16,41	15,48%	41,98	-13,39%	C40 com C30
C55	17,84	25,55%	36,49	-24,72%	C55 com C30
C60	19,23	35,33%	35,64	-26,47%	C60 com C30
C70	19,84	39,62%	34,37	-29,09%	C70 com C30
C80	20,22	42,29%	33,56	-30,76%	C80 com C30
C90	20,39	43,49%	33,11	-31,69%	C90 com C30

Fonte: Próprio Autor (2018)

Assim como Alves (2000) já havia relatado, e o presente trabalho constatou, embora houve o aumento considerável da taxa de armadura, ocorreu a redução do consumo de concreto. A Tabela (8) apresenta, à exemplo, um elemento submetido a um momento característico de 25760 kN.cm, com a altura da linha neutra em 0,35. A

redução do consumo de concreto girou em torno de 29,27% para concretos classe II, se comparado a concretos classe I.

TABELA 8. Altura da linha neutra de 0,35

Concreto	Área de concreto	Variação	Comparativo
C30	1311,74	-	-
C40	1149,40	-12,38%	C40 com C30
C55	1012,33	-22,83%	C55 com C30
C60	990,89	-24,46%	C60 com C30
C70	959,24	-26,87%	C70 com C30
C80	939,08	-28,41%	C80 com C30
C90	927,80	-29,27%	C90 com C30

Fonte: Próprio Autor (2018)

Além da redução do consumo de concreto, Alves (2000) cita a possibilidade da redução nas áreas de fôrma. O estudo comprovou a redução na seção dos elementos e a Tabela (9) mostra que essa redução, se comparada com concretos classe I, chega a cerca de 29,27 % para CAR, o que viabiliza o uso do mesmo em edificações.

TABELA 9. Variação da altura útil

Concreto	Altura do elemento	Variação	Comparativo
C30	52,47	-	-
C40	45,98	-12,37%	C40 com C30
C55	40,49	-22,83%	C55 com C30
C60	39,64	-24,45%	C60 com C30
C70	38,37	-26,87%	C70 com C30
C80	37,56	-28,42%	C80 com C30
C90	37,11	-29,27%	C90 com C30

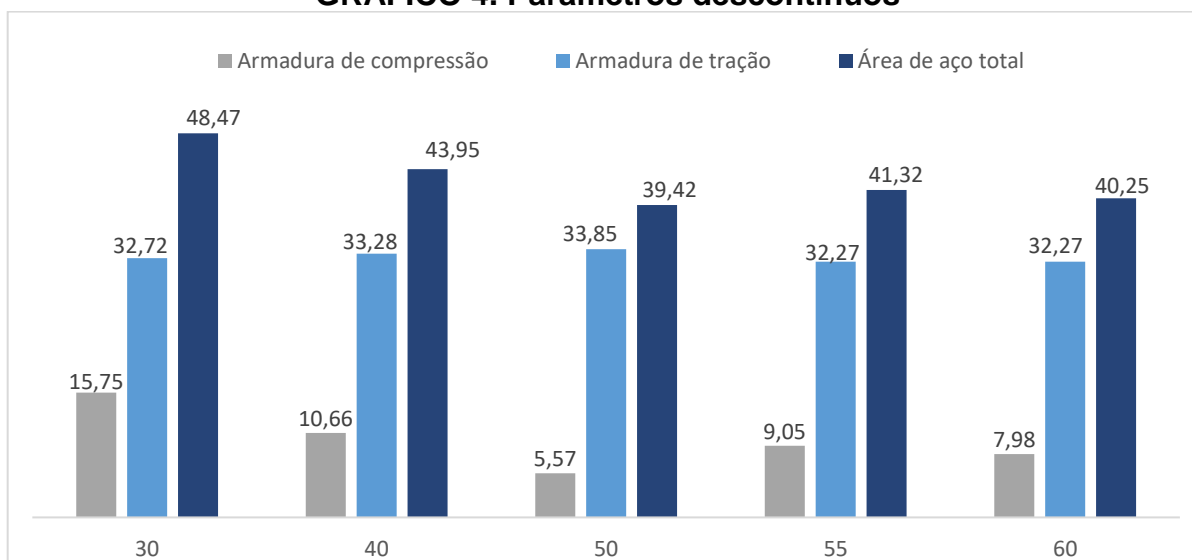
Fonte: Próprio Autor (2018)

5.1 Revisão das equações proposta pela norma

Sobre os parâmetros de cálculos relacionados aos concretos classe I, para concretos C50, ocorre uma descontinuidade de cálculo comparado a concretos C40 ou C55. O Gráfico (4) demonstra a diferenciação dos parâmetros, sendo que há um considerável aumento da taxa de armadura total. Para esse caso, foi dimensionado um elemento com as mesmas características apresentadas no item 4.3.1 do presente trabalho. Pode-se observar, ao se comparar a taxa de armadura obtida com concreto C40 ou C55, que a queda dessa taxa não é mantida. Cita-se como exemplo a armadura de compressão, quando em lógica essa armadura era para se manter entre

10,66 cm² e 9,05 cm². Porém, ela caiu para 5,57 cm², demonstrando uma descontinuidade de cálculo presente no dimensionamento dos parâmetros relacionados a tal concreto.

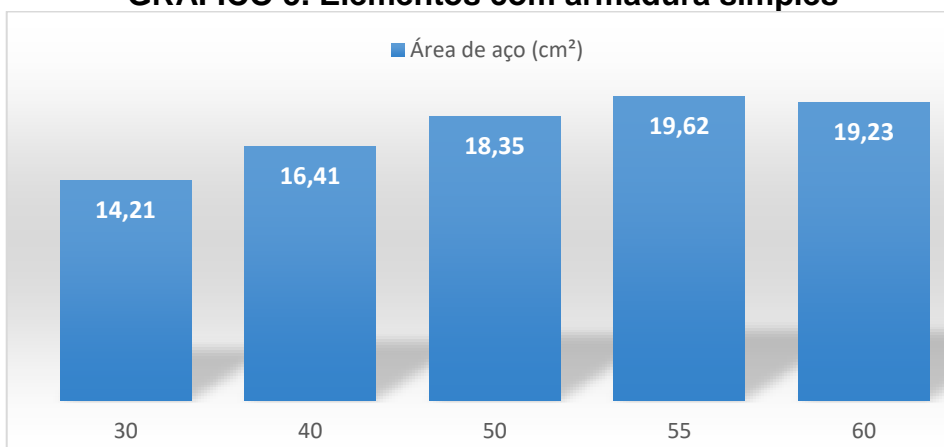
GRÁFICO 4. Parâmetros descontínuos



Fonte: Próprio Autor (2018)

Essa descontinuidade tem causa devido ao valor de $\beta_{x,lim}$ proposto pela ABNT NBR 6118:2014, o que gera a necessidade de armadura dupla. A mudança no comportamento do valor da área total de aço não ocorre tão brusca se aplicado a elementos que não necessitem de emprego de armadura dupla como apresenta o Gráfico (5).

GRÁFICO 5. Elementos com armadura simples



Fonte: Próprio Autor (2018)

6 CONCLUSÃO

As atualizações da norma tornaram-na mais adequada à necessidade e a realidade prática do projeto. Sobre a utilização dos concretos de alta resistência conclui-se que sua utilização em elementos submetidos a flexão simples, vigas e lajes, depende da finalidade do projeto. De acordo com os resultados obtidos, foi apresentado que há uma redução significativa na taxa de armadura apenas para estruturas que necessitem do uso de armaduras duplas. Caso contrário, ou seja, quando a estrutura não necessita do emprego de armadura dupla, há um aumento considerável na taxa de armadura, acompanhado de uma redução do consumo de concreto.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo apurado de custos referentes ao consumo de concreto, aço e fôrmas para elementos dimensionados com uso de concretos de alta resistência, para a verificação da eficácia do uso do CAR em elementos que necessitem ou não de armadura dupla.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 363**. State-of-the-art report on High-Strength Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, part. 1, 48p, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655: 2006**: Concreto de cimento Portland: Preparo, controle e recebimento: Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NBR 6118: 2007**: Projetos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **ABNT NBR 6118:2014**: Projetos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 8953: 2015**: Concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência**. 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BASTOS, P. S. dos S. **Flexão normal simples - Vigas**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2015. Notas de aula.

BRUSCO, G. L. **Concreto de alta resistência**: estudo comparativo entre a Norma 6118 e a Norma americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas. 2014. 168 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CERUTTI, R. M.; SANTOS, S. H. C. Impacts in the structural design of the 2014 revision of the Brazilian standard ABNT NBR 6118. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.547-566, ago. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/riem/v8n4/pt_1983-4195-riem-08-04-00547.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2018.

FONSECA, L. A. **Estudo de caso**: dimensionamento e comparação de vigas de concreto armado utilizando classes de resistência dos grupos I e II segundo a NBR 6118:2014. 2015. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

MONTAGNA, E. P. **Análise comparativa entre a NBR 6118/2007 e a NBR 6118/2014**: Estudo da ductilidade de vigas hiperestáticas. 2014. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PAIVA, N. M. B. **Pilares de concreto de alta resistência com seção transversal retangular solicitados a compressão simples**. 1994. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

PINHEIRO, L. M. et al. Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios. In: _____. **Flexão simples na ruína**: equações. Apostila - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2016.

SANTOS, L. M. **Cálculo de concreto armado**: segundo a nova NB-1 e o CEB. 2. ed. São Paulo: LMS, 1983. v. 1.

SMANIOTTO, A. **Dimensionamento e detalhamento automático de pilares retangulares submetidos à flexão composta oblíqua**. 2005. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TORRICO, F. A. **Análise teórica e experimental do comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (USP–EESC), São Carlos, 2010.