

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Gustavo Largura Brusco**

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE A NOVA NORMA NBR 6118 E A  
NORMA AMERICANA QUANTO AS SUAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS**

Porto Alegre  
junho 2014

**GUSTAVO LARGURA BRUSCO**

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE A NOVA NORMA NBR 6118 E A  
NORMA AMERICANA QUANTO AS SUAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Roberto Domingo Rios**

Porto Alegre  
junho 2014

**GUSTAVO LARGURA BRUSCO**

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE A NOVA NORMA NBR 6118 E A  
NORMA AMERICANA QUANTO AS SUAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2014

Prof. Roberto Domingo Rios  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande Do Sul  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Ronald José Ellwanger**  
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Roberto Domingo Rios**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Telmo e Solange, e ao meu irmão Guilherme, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado especialmente durante o período do meu Curso de Graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Roberto Rios, orientador deste trabalho, pela disposição e paciência em transmitir seu conhecimento para a realização desse trabalho, assim como nas disciplinas em que tive a oportunidade de ser seu aluno durante a graduação.

Agradeço à Professora Carin Schmitt, pelo comprometimento e disposição com os alunos na realização do Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço aos meus pais, Telmo e Solange, pelo apoio, carinho e incentivo que me deram durante todos esses anos.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram presentes nos bons e também nos difíceis momentos durante essa caminhada.

Agradeço a toda equipe da Carpeggiani Engenharia, pelos ensinamentos transmitidos e pela oportunidade de estágio.

Por fim, agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha formação profissional e que contribuíram para a realização desse trabalho.

Sonhos determinam o que você quer.  
Ação determina o que você conquista.

*Aldo Novak*

## RESUMO

Devido ao crescente uso de concretos de alta resistência nas edificações brasileiras, foi imprescindível a revisão da NBR 6118 para a inclusão dessa categoria. Assim, o trabalho em questão tem como objetivo a análise das novas formulações para a obtenção das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e em paralelo compará-las com as da Norma Americana ACI 318, sempre procurando destacar as suas semelhanças e divergências. Foram abordadas como propriedades mecânicas as resistências à compressão e à tração do concreto, módulo de elasticidade e diagramas de deformações do aço e concreto. Destacaram-se também as particularidades de cada Norma em relação aos critérios de dimensionamento, como as deformações admitidas do concreto e do aço para os cálculos da obtenção da área de aço necessária, os coeficientes de ponderação de resistência, que possuem conceitos distintos em cada Norma e algumas combinações de carga para projeto. No caso da NBR 6118:2014, procurou-se também salientar as mudanças ocorridas em relação à Norma anterior. Após essa etapa, foram estudados os equacionamentos para o dimensionamento de vigas retangulares sujeitas a esforços de flexão simples e cortante no estado limite último, tanto pela NBR 6118:2014 como pela ACI 318-08. Assim, foi realizada uma comparação no consumo de aço para a situação proposta, de uma viga biapoiada mantida sob seção constante e variando a resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ), os esforços atuantes e as dimensões da peça. Para fins de análise, a nova Norma NBR 6118:2014 foi comparada com a versão anterior de 2007, utilizando apenas concretos do grupo I de resistência, de 20 a 50 MPa. De acordo com alguns critérios de projeto, importantes modificações ocorreram no dimensionamento à flexão simples, como por exemplo, o uso de armadura de compressão nos vãos das vigas não apenas no domínio 4, mas também no domínio 3. Nos casos de armadura dupla, houve um acréscimo no consumo total de aço na viga dimensionada, enquanto que nos casos de armadura simples não houve alteração nos resultados. Já para os esforços cortantes, as duas Normas mantiveram-se com os mesmos resultados. Em relação aos concretos do grupo II de resistência, de 55 a 90 MPa, a análise do consumo de aço restringiu-se entre a NBR 6118:2014 e a ACI 318-08. Os resultados obtidos na flexão simples mostram a Norma Americana mais econômica do que a Brasileira, porém mais conservadora em relação aos esforços cortantes.

Palavras-chave: NBR 6118:2014. ACI 318-08. Concreto de Alta Resistência.  
Propriedades Mecânicas do Concreto. Dimensionamento de Vigas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa.....	24
Figura 2 – Relação entre a resistência média à tração e a resistência característica à compressão do concreto.....	33
Figura 3 – Módulo de elasticidade em função da resistência do concreto para diferentes tipos de agregado.....	35
Figura 4 – Diagrama tensão deformação idealizado.....	41
Figura 5 – Limites de deformação para diferentes resistências do concreto.....	43
Figura 6 – Diagrama tensão-deformação para diferentes resistências do concreto.....	43
Figura 7 – Diagrama tensão-deformação bilinear na tração.....	44
Figura 8 – Relação entre os parâmetros $\lambda$ e $\alpha_c$ em função do $f_{ck}$ .....	46
Figura 9 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas.....	46
Figura 10 – Domínios de estado limite último de uma seção transversal.....	48
Figura 11 – Distribuição de tensões para seções consideradas tracionadas e para seções consideradas comprimidas.....	63
Figura 12 – Variação do coeficiente $\phi$ .....	64
Figura 13 – Diagrama tensão-deformação para o aço.....	65
Figura 14 – Definição de $\varepsilon_t$ e $d_t$ .....	66
Figura 15 – Figuras típicas da relação tensão deformação para concretos com densidade normal.....	67
Figura 16 – Diagrama tensão-deformação idealizado do concreto.....	68
Figura 17 – Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura simples.....	70
Figura 18 – Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura dupla.....	74
Figura 19 – Gráficos demonstrativos da variação entre $V_c$ e $V_{sd}$ .....	82
Figura 20 – Passos da análise de $M_n$ para seções retangulares com armadura simples....	85
Figura 21 – Passos da análise de $M_n$ para seções retangulares com armadura dupla.....	89



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.....	30
Quadro 2 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o granito como agregado graúdo).....	37
Quadro 3 – Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ .....	38
Quadro 4 – Valores do coeficiente $\gamma_{f2}$ .....	38
Quadro 5 – Combinações últimas.....	39
Quadro 6 – Fator de redução do desvio padrão para amostras com menos de 30 ensaios.....	56
Quadro 7 – Resistência média à compressão requerida quando há dados disponíveis para estabelecer um desvio padrão da amostra.....	56
Quadro 8 – Resistência média a compressão requerida quando não há dados disponíveis para estabelecer um desvio padrão da amostra.....	57
Quadro 9 – Taxas mínimas de armaduras de flexão para vigas.....	76

## **LISTA DE SIGLAS**

*ACI – American Concrete Institute*

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CAR – Concreto de Alta Resistência

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{cj}$  = resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de  $j$  dias (MPa)

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão (MPa)

$S_d$  = desvio-padrão da dosagem (MPa)

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa)

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto

$f_{ckj}$  = resistência característica à compressão do concreto aos  $j$  dias (MPa)

$\beta_1$  = relação  $f_{ckj} / f_{ck}$

$s$  = coeficiente de ponderação em função do tipo de cimento

$t$  – idade efetiva do concreto (dias)

$f_{ct,m}$  = resistência média à tração do concreto (MPa)

$f_{ctk,inf}$  = resistência característica inferior à tração do concreto (MPa)

$f_{ck}$  – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$f_{ctk,sup}$  = resistência característica superior à tração do concreto (MPa)

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade do concreto no instante zero (MPa)

$\alpha_E$  = coeficiente de ponderação devido ao tipo de agregado

$E_{ci}(t)$  = estimativa do módulo de elasticidade do concreto em uma idade entre 7 e 28 dias (MPa)

$f_c(t)$  = resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade (MPa)

$f_c$  = resistência à compressão do concreto (MPa)

$E_{cs}(t)$  = módulo de elasticidade secante do concreto (MPa)

$\alpha_i$  = coeficiente de ponderação em função da resistência do concreto

$E_{cs}(t)$  = módulo de elasticidade secante do concreto (MPa)

$\gamma_f$  = coeficiente de ponderação das ações

$\gamma_{f1}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera a variabilidade das ações

$\gamma_{f2}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera a simultaneidade de atuação das ações

$\gamma_{f3}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera desvios gerados na construções e aproximações de projeto em relação a solicitações

$\sigma_c$  = tensão à compressão no concreto (MPa)

$\epsilon_c$  = deformação específica do concreto submetido à compressão

$\epsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico

$n$  = expoente dependente da resistência do concreto

$\epsilon_{cu}$  = deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura

$\sigma_{ct}$  = tensão à tração no concreto (MPa)

$f_{ctk}$  = resistência característica à tração do concreto (MPa)

$\epsilon_{ct}$  = deformação específica do concreto submetido à tração

$\lambda$  = relação entre a profundidade  $y$  do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva  $x$  da linha neutra

$\sigma_{cd}$  = tensão de cálculo à compressão no concreto (MPa)

$\alpha_c$  = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão

$\sigma_s$  = tensão normal do aço de armadura passiva (MPa)

$f_{yk}$  = resistência característica de escoamento do aço de armadura passiva (MPa)

$f_{yd}$  = resistência de cálculo ao escoamento do aço de armadura passiva (MPa)

$\varepsilon_s$  = deformação específica do aço da armadura passiva

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço de armadura passiva (MPa)

$\gamma_s$  = coeficiente estatístico de redução da resistência do aço

$\varepsilon_{s2}'$  = deformação específica da armadura menos tracionada

$\varepsilon_{su}$  = deformação específica limite da armadura

$d'$  = distância da face menos tracionada da seção até o eixo da armadura menos tracionada (cm)

$x$  = posição da linha neutra (cm)

$d$  = distância da face menos tracionada da seção até o eixo da armadura mais tracionada (cm)

$\varepsilon_{s1}$  = deformação específica da armadura tracionada

$\varepsilon_{s2}$  = deformação específica da armadura comprimida

$x_{23}$  = posição limite da linha neutra do domínio 2 com o domínio 3 (cm)

$x_{lim}$  = posição limite da linha neutra do domínio 3 com o domínio 4 (cm)

$\varepsilon_{yd}$  = deformação específica do aço no início do escoamento

$h$  = altura do elemento estrutural (cm)

$\delta$  = coeficiente de redistribuição de momentos fletores

$f_{cr'}$  = resistência requerida (MPa)

$f_c'$  = resistência característica à compressão (MPa)

$s_s$  = desvio padrão da amostra (MPa)

$f_{ct}$  = resistência média à tração (MPa)

$\lambda$  = constante de ponderação em relação à densidade do concreto utilizado

$f_t$  = módulo de ruptura do concreto (MPa)

$E_c$  = módulo de elasticidade do concreto (MPa)

$w_c$  = peso específico do concreto ( $\text{kg/m}^3$ )

$\phi$  = fator de redução de resistência

$U$  = resistência requerida pelo elemento para suportar as cargas majoradas (MPa)

$D$  = peso próprio da estrutura (MPa)

$E$  = ação devido aos abalos sísmicos (MPa)

$F$  = peso e pressão de fluidos com densidade definida (MPa)

$H$  = cargas devido ao peso e pressão do solo, de água no solo ou outros materiais (MPa)

$L$  = cargas acidentais (MPa)

$L_r$  = cargas acidentais em coberturas (MPa)

$R$  = carga causada pela chuva (MPa)

$S$  = carga causada pela neve (MPa)

$T$  = efeitos causados pelas variações de temperatura, retração e deformações do concreto (MPa)

$W$  = carga devido aos esforços de vento (MPa)

$\epsilon_t$  = deformação específica na armadura tracionada na fibra mais externa

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra (cm)

$d_t$  = a distância desde a última fibra comprimida até a última fibra de aço tracionada (cm)

$\epsilon_s$  = deformação específica da armadura comprimida

$f_y$  = resistência característica de escoamento do aço (MPa)

$\varepsilon_0$  = deformação específica do concreto na tensão máxima, geralmente fixado em 2‰ para concretos de densidade normal

$R_{cc}$  = força resultante de compressão do concreto (kN)

$\sigma_{cd}$  = tensão de cálculo à compressão do concreto ( kN/cm<sup>2</sup>)

$A'_c$  = área de concreto comprimido correspondente ao diagrama retangular simplificado com altura  $\lambda x$  (cm<sup>2</sup>)

$R_{st}$  = força resultante de tração da armadura (kN)

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada (cm<sup>2</sup>)

$b_w$  = largura da viga (cm)

$M_d$  = momento fletor solicitante de cálculo equivalente aos momentos internos resistentes, proporcionados pelo concreto comprimido e pela armadura tracionada (kNcm)

$z_{cc}$  = braço de alavanca do binário (cm)

$R_{sc}$  = força resultante de compressão da armadura (kN)

$A'_s$  = área de aço da armadura comprimida (cm<sup>2</sup>)

$\sigma'_{sd}$  = tensão de cálculo na armadura comprimida (kN/cm<sup>2</sup>)

$M_{d,min}$  = momento fletor mínimo (kNcm)

$W_0$  = módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada (cm<sup>3</sup>)

$V_{sd}$  = força cortante solicitante de cálculo na seção (kN)

$V_{Rd2}$  = força cortante resistente de cálculo relativo à ruína à compressão diagonal do concreto (kN)

$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo por tração diagonal (kN)

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida pela resistência à tração do concreto (kN)

$V_{sw}$  = parcela de força cortante absorvida pela armadura transversal do elemento estrutural (kN)

$\alpha_{v2}$  = coeficiente em função da resistência do concreto

$A_{sw}$  = área da seção transversal dos estribos (cm<sup>2</sup>)

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal  $A_{sw}$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural (cm)

$f_{ywd}$  = tensão da armadura passiva, limitada ao valor de  $f_{yd}$  e não ultrapassando o valor de 435 MPa no caso dos estribos (cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de 45° à 90°

$V_{c0}$  = definido na equação 83 (kN)

$M_o$  = valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção (kNcm)

$M_{sd,máx}$  = momento fletor máximo de cálculo (kNcm)

$\theta$  = ângulo de inclinação das bielas de compressão consideradas no dimensionamento à força cortante

$V_{c1}$  = definido nas condições do dimensionamento (kN)

$\rho_{sw}$  = taxa geométrica de armadura transversal

$f_{ywk}$  = tensão da armadura passiva, limitada ao valor de 500 MPa no caso dos estribos (kN/cm)

$M_n$  = momento resistente nominal da viga (kNcm)

$M_u$  = momento requerido atuante na viga (kNcm)

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto

$C_c$  = força resultante de compressão do concreto (kN)

$b$  = largura da viga (cm)



$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular (cm)

$T$  = força resultante de tração da armadura (kN)

$j$  = parâmetro para o dimensionamento.

$C_s$  = força resultante de compressão da armadura (kN)

$f_s'$  = tensão na armadura comprimida (kN/cm<sup>2</sup>)

$A_{s,min}$  = área de aço mínima para elementos sujeitos à flexão (cm<sup>2</sup>)

$V_n$  = esforço cortante nominal resistente da viga (kN)

$V_u$  = esforço cortante requerido atuante na viga (kN)

$V_s$  = esforço cortante nominal resistente proveniente da armadura (kN)

$A_v$  = área da seção transversal dos estribos (cm<sup>2</sup>)

$f_{yt}$  = resistência característica à tração do aço para estribos, não excedendo 420 MPa (kN/m<sup>2</sup>)

$A_{v,min}$  = área da seção transversal mínima dos estribos (cm<sup>2</sup>)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>22</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	22
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	22
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2 Objetivo Secundário .....</b>	<b>22</b>
2.3 PRESSUPOSTO .....	23
2.4 DELIMITAÇÕES .....	23
2.5 LIMITAÇÕES .....	23
2.6 DELINEAMENTO .....	23
<b>3 CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR).....</b>	<b>26</b>
<b>4 NBR 6118:2014 – PROPRIEDADES E GENERALIDADES.....</b>	<b>29</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	29
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	32
4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	34
4.4 CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESES DE CÁLCULO.....	37
<b>4.4.1 Diagramas tensão-deformação do concreto.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4.2 Hipóteses básicas .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4.3 Domínios do estado limite último.....</b>	<b>47</b>
<b>5 ACI 318-08: PROPRIEDADES E GENERALIDADES.....</b>	<b>55</b>
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	55
5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	57
5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	58
5.4 CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESES DE CÁLCULO.....	59
<b>6 NBR 6118:2014 – DIMENSIONAMENTO DE VIGAS.....</b>	<b>70</b>
6.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES.....	70
<b>6.1.1 Armadura simples.....</b>	<b>70</b>
<b>6.1.2 Armadura dupla.....</b>	<b>73</b>
<b>6.1.3 Armadura longitudinal de tração mínima.....</b>	<b>75</b>
6.2 DIMENSIONAMENTO AO CORTE.....	76
<b>6.2.1 Modelo de cálculo I.....</b>	<b>77</b>
<b>6.2.2 Modelo de cálculo II.....</b>	<b>80</b>
<b>6.2.3 Armadura transversal mínima.....</b>	<b>82</b>

<b>7 ACI 318-08 – DIMENSIONAMENTO DE VIGAS.....</b>	<b>84</b>
7.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES.....	84
7.1.1 Armadura simples.....	84
7.1.2 Armadura dupla.....	89
7.1.3 Armadura longitudinal de tração mínima.....	92
7.2 DIMENSIONAMENTO AO CORTE.....	93
7.2.1 Armadura transversal mínima.....	95
<b>8 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO PROPOSTO.....</b>	<b>97</b>
8.1 CONCRETOS DO GRUPO I – NBR 6118:2007 E NBR 6118:2014.....	97
8.1.1 Considerações iniciais para a análise.....	97
8.1.2 Considerações finais.....	98
8.2 CONCRETOS DO GRUPO II – NBR 6118:2014 E ACI 318-08.....	99
8.2.1 Considerações iniciais para a análise.....	99
8.2.2 Considerações finais.....	100
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A.....	104
APÊNDICE B.....	125
APÊNDICE C.....	146



## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda e da competitividade na construção civil, no Brasil na última década, surgiram novas exigências do mercado consumidor por obras de maior porte e complexidade arquitetônica. Assim, houve a necessidade de materiais que conseguissem suprir essa produção com bom desempenho e que fossem economicamente viáveis. O avanço tecnológico no desenvolvimento de concretos de alto desempenho (CAD), ao qual pertence o grupo de concretos de alta resistência (CAR), foi um dos grandes responsáveis por acompanhar esse crescimento de maneira eficiente e de acordo com os novos conceitos e parâmetros construtivos das edificações.

Os concretos de alta resistência se tornaram comuns em edificações convencionais de grande porte e não apenas em obras de arte. A redução do fator água cimento é fundamental para o aumento da resistência do concreto, além do tipo de cimento, granulometria dos agregados e dosagem entre os componentes. Também em consequência do baixo teor de água na dosagem, reduz-se a porosidade do concreto, garantindo uma maior durabilidade para a estrutura devido a menor penetração de agentes químicos presentes no meio ambiente que causam a corrosão da armadura. No entanto, para se obter a trabalhabilidade desejável do concreto na obra, utilizam-se aditivos superplastificantes, fundamentais na produção do CAR.

Apesar de o CAR ter um custo mais elevado em relação aos concretos convencionais, deve-se analisar o custo global da obra. Por exemplo, podem-se constatar reduções significativas na taxa de aço da estrutura, nas seções das peças comprimidas aumentando a área útil dos ambientes, no peso próprio da estrutura, no volume de concreto e na área de fôrmas, além de ganhos no comprimento dos vãos das vigas. Assim, é importante sempre analisar o tipo de empreendimento a ser construído para então, optar ou não pelo CAR.

Devido a esse atual contexto da construção civil, fez-se necessário a revisão da Norma responsável por fixar as condições básicas de projetos de estruturas de concreto armado, que até então contemplava apenas os concretos normais pertencentes ao grupo I, com resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) de 10 até 50 MPa. Sendo assim, a atual Norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) passou a incluir concretos do grupo II, com resistência à compressão de 55 até 90 MPa.

No Brasil, antes da nova Norma englobar concretos de alta resistência, a solução adotada por engenheiros calculistas era a utilização de normas internacionais, como por exemplo, a Norma Americana ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) que limita a resistência mínima do concreto estrutural em 17 MPa, mas não impõe um limite para a resistência máxima. Baseando-se nisso, o trabalho teve como principal objetivo a análise das principais propriedades mecânicas e mudanças ocorridas na NBR 6118:2014, como também o estudo comparativo dessas propriedades com a ACI 318, necessárias para o dimensionamento de estruturas em concreto armado no estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS).

No capítulo 2, são apresentadas as diretrizes da pesquisa, onde são descritas a questão da pesquisa, os objetivos do trabalho, pressuposto, delimitações, limitações e o delineamento. Já no capítulo 3, através da revisão bibliográfica, apresentam-se conceitos gerais sobre o concreto estrutural e principalmente sobre concretos de alta resistência. São apresentadas as principais características e vantagens do CAR, como também algumas informações sobre o seu desempenho.

Nos capítulos 4 e 5, são apresentadas as propriedades mecânicas e generalidades em relação a alguns critérios de projetos e hipóteses de cálculos das Normas NBR 6118:2014 e ACI 318-08, respectivamente. As propriedades mecânicas estudadas para cada Norma foram a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade. Essas são as principais propriedades para se realizar o dimensionamento e verificação de peças de concreto. Através dessas propriedades, analisaram-se os diagramas tensão-deformação, tanto para o concreto como para o aço, e o desempenho admitido desses materiais para se projetar estruturas de concreto armado de acordo com cada Norma. Além disso, são descritas as principais combinações de carga e coeficientes de segurança assumidos em projeto.

Os capítulos 6 e 7, referentes às Normas NBR 6118:2014 e ACI 318-08 respectivamente, mostram os equacionamentos para o dimensionamento de vigas retangulares frente a esforços de flexão simples e cortante.

Por fim, o capítulo 8 trata da obtenção e análise dos resultados referentes ao dimensionamento de cada viga proposta. Através da planilha em *Excel* elaborada pelo autor, foi extraído o consumo de aço para cada situação proposta.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: quais as principais mudanças que ocorreram nas propriedades mecânicas e suas consequências no dimensionamento de vigas de concreto armado frente ao referencial normativo até então utilizado?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal do trabalho é o estudo das principais mudanças e inclusões na nova versão da NBR 6118 em relação as suas propriedades mecânicas para o dimensionamento e verificação de estruturas de concreto.

#### **2.2.2 Objetivo Secundário**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) análise das formulações empregadas tanto na NBR 6118:2014 quanto na ACI 318-08 para a determinação das principais propriedades mecânicas e como elas afetam no dimensionamento e verificação das peças de concreto;
- b) análise comparativa do consumo de aço entre a antiga e a nova Norma Brasileira, no dimensionamento de vigas à flexão e corte, utilizando concretos do grupo I;
- c) análise comparativa do consumo de aço entre a Norma Brasileira e Americana no dimensionamento de vigas à flexão e corte, utilizando concretos do grupo II.



## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as formulações e os critérios de dimensionamento empregados estão de acordo com as exigências e restrições das Normas NBR 6118:2014 e ACI 318-08, assegurando o bom desempenho das estruturas de concreto armado.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho limita-se ao estudo da Norma Brasileira NBR 6118 de 2007 e 2014, como também da Norma Americana ACI 318:2008, ambas para estruturas de concreto armado.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) as propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão e à tração do concreto, módulo de elasticidade e diagramas de deformações do aço e concreto;
- b) para o dimensionamento, as vigas são biapoiadas mantidas sob seção constante com variações na resistência do concreto, nos esforços atuantes e nas dimensões do elemento estrutural;
- c) os esforços atuantes nas vigas foram de flexão e corte;
- d) os cálculos de consumo de aço foram desenvolvidos em planilhas do *software Microsoft Excel* e foi realizado apenas a verificação no estado limite último.

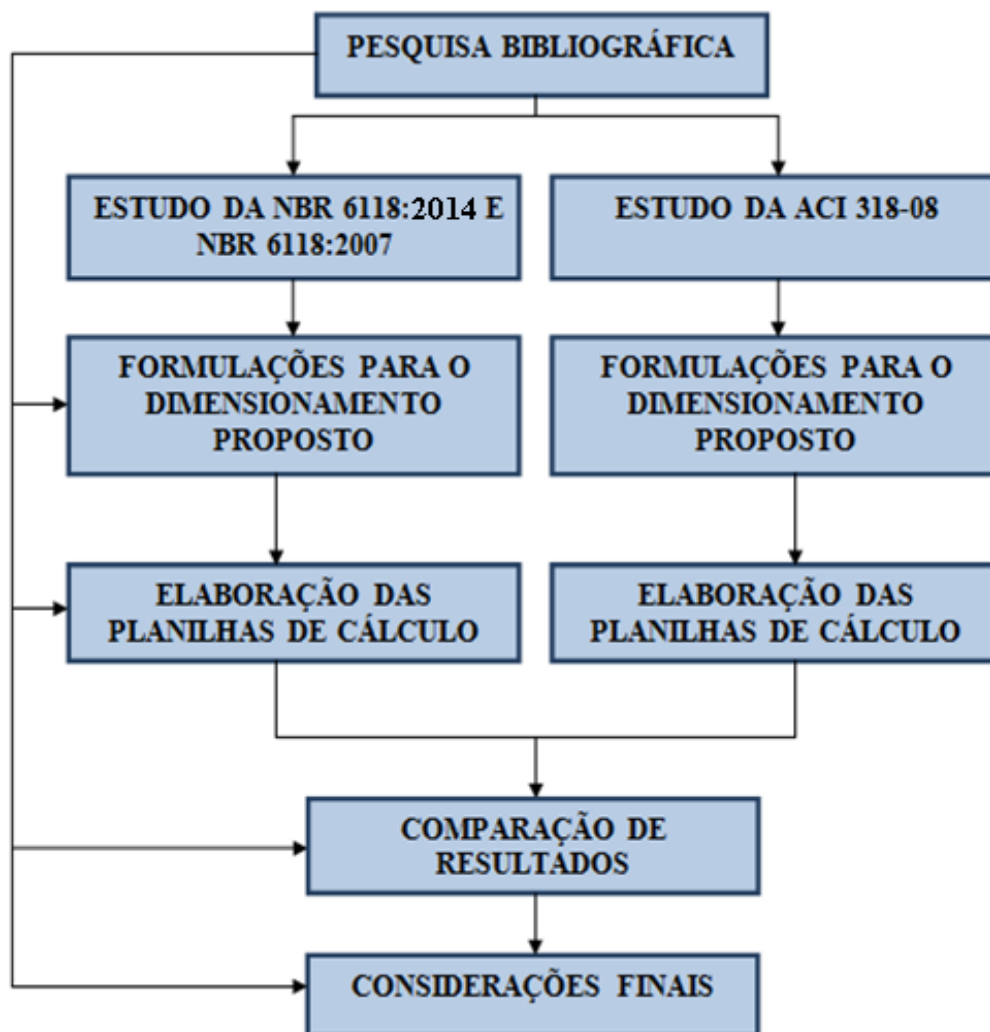
## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) estudo das principais propriedades mecânicas do concreto e das mudanças da Norma Brasileira;
- c) estudo das principais propriedades mecânicas do concreto da Norma Americana;
- d) dimensionamento no ELU de vigas de acordo com a NBR 6118:2014 e NBR 6118:2007;

- e) dimensionamento no ELU de vigas de acordo com a ACI 318-08;
- f) comparações do consumo de aço no dimensionamento da viga proposta;
- g) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

Na primeira fase do trabalho, foi realizada a **pesquisa bibliográfica**. Essa primeira parte é de extrema importância, pois esteve presente no decorrer de todo o trabalho como pode ser observado na figura 1. Através dela foi possível adquirir mais conhecimento e embasamento teórico sobre o assunto proposto para realizar as etapas posteriores.

As etapas seguintes foram **o estudo da nova Norma Brasileira e da Norma Americana**. Essas etapas estão intimamente ligadas com a pesquisa bibliográfica, pois nelas discorreu-se sobre as considerações de projeto e também a análise das principais propriedades mecânicas

de cada Norma em relação aos materiais utilizados para projetar estruturas em concreto armado.

Já na etapa posterior, prosseguiu-se um estudo das formulações para o **dimensionamento de vigas de acordo com a Norma Brasileira e Americana**. O dimensionamento foi descrito para vigas submetidas aos esforços de flexão e corte. Essa etapa também está diretamente ligada à pesquisa bibliográfica, quando foram expostos os critérios e formulações adotados para o dimensionamento de vigas.

Na etapa final, foram realizados os **cálculos e comparações no consumo de aço para o dimensionamento da viga proposta**, de seção fixa e com variações das cargas atuantes, resistência do concreto e do vão o qual ela está submetida. Para a análise comparativa no consumo de aço entre a antiga e a nova Norma Brasileira, foram utilizadas resistências do grupo I (10 a 50 MPa). Já os concretos do grupo II (55 a 90 MPa) que, recentemente foram incluídos na Norma Brasileira, utilizou-se para a comparação entre a NBR 6118:2014 e ACI 318-08. Para o dimensionamento, foi criada uma planilha no *software Microsoft Excel* a fim de facilitar os cálculos e análises dos resultados.

### 3 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

O concreto simples é um material composto por cimento, agregados finos como a areia, agregados graúdos como a pedra britada ou o pedregulho natural e água. A água é responsável pelas reações de hidratação do cimento e o endurecimento do material formando a pasta de cimento. Com a adição dos agregados finos, forma-se a argamassa de cimento e, com a posterior adição dos agregados graúdos, tem-se o concreto simples, que possui boas características de resistência à compressão (FUSCO, 2008).

Já o concreto armado, é um material formado por concreto simples e barras de aço devidamente dispostas dentro do elemento estrutural. O uso de aço nas estruturas está relacionado predominantemente com a baixa resistência à tração do concreto simples. Assim, admite-se na teoria do concreto armado que os dois materiais trabalham de maneira conjunta e perfeitamente solidária, não ocorrendo o escorregamento relativo entre eles. Fusco (2008, p. 13) ainda afirma que:

O correto tratamento das estruturas de concreto exige que elas sejam consideradas como formadas por dois materiais diferentes: o concreto e o aço. Para o trabalho conjunto desses dois materiais, devem ser respeitadas as condições de compatibilidade de seu emprego solidário. O concreto armado não deve ser imaginado como um material unitário, no qual as armaduras de aço se constituem em simples fibras resistentes à tração.

A ideia de que o concreto armado é um material composto sempre deve estar presente, a fim de garantir o perfeito funcionamento solidário do concreto (material frágil, de baixa resistência e de menor rigidez) com o aço (material dúctil, de grande resistência e de maior rigidez).

Segundo Araújo (2010, p. 1), a resistência do concreto está diretamente relacionada ao consumo de cimento e a quantidade de água utilizada, ou seja, à relação água-cimento. Outros fatores importantes são o grau de adensamento, tipos de agregados e eventuais aditivos. Na questão da quantidade de água e cimento, quanto mais cimento é utilizado e menos água, maior é a resistência à compressão do concreto. A relação água-cimento também determina a porosidade da pasta de cimento já endurecida, e conseqüentemente as propriedades mecânicas do concreto.

Além desses fatores na dosagem, de acordo com a ABESC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL, 2007, p. 18), os aditivos superplastificantes foram os responsáveis pelo avanço tecnológico do concreto, surgindo assim, os concretos de alto desempenho (CAD) que incluem os concretos de alta resistência (CAR). Com esses aditivos, é possível fabricar concretos com baixíssima relação água-cimento, podendo reduzir em até 30% a quantidade de água e, conseqüentemente, ter um aumento na sua resistência. Hervé Neto (2002) ainda afirma que esses aditivos são de grande importância para manter uma boa trabalhabilidade e consistência da mistura, sem ocorrer a segregação ou exsudação. Esses fatores são indispensáveis para se ter um bom adensamento e compacidade do concreto, que, juntamente com uma menor deformabilidade, resulta numa estrutura de maior durabilidade.

Já em relação às características mecânicas do CAR, os concretos de alta resistência são materiais nitidamente frágeis e, quando o  $f_{ck}$  é maior que 80 MPa, são considerados extremamente frágeis. Isso foi constatado através de ensaios a compressão que indicam a ocorrência da ruptura de modo explosivo, e não através da microfissuração progressiva (rompimento da matriz de argamassa) como acontece em concretos de baixa e média resistência (até 40 MPa). Essa ruptura explosiva é consequência da maior resistência da matriz de argamassa do que do agregado graúdo, que rompe por tração transversal na microestrutura. No caso de concretos com resistência acima de 80 MPa, foi verificado o rompimento por tração transversal também do agregado fino (FUSCO, 2008, p. 67).

Em referência à inclusão do CAR no mercado brasileiro, Hervé Neto (2002) salienta que essa nova tecnologia não é apenas exclusividade de obras especiais, com vãos muito grandes, altura e cargas excepcionais, mas também para obras de edificações convencionais sempre quando há um estudo técnico-econômico profundo (custos das alternativas técnicas e de longo prazo, como consequência da durabilidade e redução da manutenção) da viabilidade do uso ou não do CAR. Assim, tornou-se imprescindível a revisão da Norma Brasileira para a inclusão dos concretos de alta resistência.

Porém, Araújo (2010, p. 56) adverte que:

[...] o emprego de um concreto de maior resistência pode resultar em economia da estrutura como um todo, mesmo que haja um aumento de custo do concreto. [...] Por outro lado, o projetista deve levar em conta as condições de desenvolvimento tecnológico da região onde a estrutura será executada. De nada adianta elaborar um

projeto com base em um concreto de alta resistência, para uma obra de pequeno porte, que será executada em uma localidade onde não há adequadas condições de produção e controle da qualidade do concreto. Ao contrário, tal procedimento pode resultar em um verdadeiro desastre.

Em relação aos concretos convencionais, o CAR possui diversas vantagens que são destacadas por Hervé Neto (2002) no decorrer do texto:

- a) maior durabilidade da estrutura (menor porosidade);
- b) menor taxa de aço nos elementos estruturais;
- c) redução de patologias decorrentes da fissuração do concreto;
- d) menor consumo de área de formas;
- e) elevado módulo de elasticidade;
- f) menores gastos com manutenção devido ao aumento da durabilidade;
- g) maiores vãos das vigas;
- h) menor custo global da obra.

## 4 NBR 6118:2014 – PROPRIEDADES E GENERALIDADES

Nesse capítulo são abordadas as principais propriedades mecânicas e considerações iniciais de cálculo definidos de acordo com a NBR 6118:2014.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A NBR 6118:2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) aplica-se ao dimensionamento de estruturas com concretos normais, com massa específica seca entre 2000 e 2800 kg/m<sup>3</sup> e pertencentes aos grupos I (10 a 50 MPa) e II (55 a 90 MPa) de resistência à compressão. A Norma ainda limita-se ao uso dos concretos simples, armado (classes acima de C20) e protendido (classes acima de C25), excluindo estruturas projetadas com concretos leve e pesado, concreto massa e concreto sem finos. Já as classes C10 e C15 são definidas apenas para obras provisórias ou sem fins estruturais.

A resistência média do concreto é obtida através de ensaios de corpos de prova cilíndricos que devem satisfazer a resistência característica à compressão adotada pelo projetista. Esses ensaios quando não especificados, indicam idade de 28 dias da amostra. Segundo a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 14), a resistência média é calculada a partir da equação 1:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em MPa;

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

$S_d$  = desvio-padrão da dosagem, em MPa.

A equação acima é baseada numa distribuição normal de probabilidade na qual o valor de  $f_{ck}$  tem apenas 5% de chances de estar abaixo do estipulado. A Norma ainda prevê duas condições de cálculo: quando o desvio-padrão é conhecido e quando não o é.

Para os casos em que o valor é conhecido, a NBR 12655 afirma que o desvio-padrão  $S_d$  deve ser obtido a partir de resultados de ensaios anteriores, com uma amostra que possua os mesmos materiais, equipamentos e condições de preparo equivalentes ao concreto desejado. A Norma ainda exige que essa amostra tenha no mínimo 20 resultados consecutivos não anteriores há 30 dias. Entretanto, limita-se em 2 MPa o valor mínimo para  $S_d$ .

Já nos casos em que o valor do desvio-padrão é desconhecido, a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 14-15) estabelece valores fixos de  $S_d$  em função das condições de preparo e produção do concreto:

- a) condição A: aplicada às classes de resistência C10 até C80 onde o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com correção em função da umidade dos agregados;
- b) condição B: esta condição é aplicável a duas faixas de resistência.
  - aplicável às classes C10 até C25 onde o cimento é medido em massa, a água de amassamento medida em volume e os agregados medidos em massa combinada com volume;
  - aplicável às classes C10 até C20 onde o cimento é medido em massa e a água de amassamento e os agregados são medidos em volume. Durante o mesmo turno do processo de concretagem, é medido no mínimo 3 vezes a umidade do agregado miúdo, que tem seu volume corrigido através da curva de inchamento do material.

Definidas as condições de preparo, o quadro 1 fornece os valores de desvio-padrão.

Quadro 1 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão MPa
A	4,0
B	5,5
C <sup>1)</sup>	7

<sup>1)</sup> Para a condição de preparo C, e enquanto não se conhece o desvio-padrão, exige-se para os concretos de classe C15 o consumo mínimo de 350 kg de cimento por metro cúbico de concreto.

(fonte: ASSOCIASSÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 15)

A partir da resistência característica à compressão, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 74-75) estipula a resistência de cálculo que é dada pela equação 2:



$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, em MPa;

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

A equação 2 refere-se a resistência característica obtida com idade de 28 dias ou mais, valor recomendado pela Norma. No caso em que a verificação de resistência se faz aos  $j$  dias, inferior a 28, a NBR 6118:2014 adota a equação 3:

$$f_{cd} = \frac{f_{ckj}}{\gamma_c} = \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$f_{cd}$  = resistência à compressão de cálculo, em MPa;

$f_{ckj}$  = resistência característica à compressão do concreto aos  $j$  dias, em MPa;

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

$\beta_1$  = relação  $f_{ckj}/f_{ck}$ ;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias, em MPa.

O valor de  $\beta_1$  pode ser calculado pela equação 4:

$$\beta_1 = \exp \{ s [ 1 - ( 28/t )^{1/2} ] \} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$s = 0,38$  para concreto de cimento C-III e IV;

$s = 0,25$  para concreto de cimento C-I e II;

$s = 0,20$  para concreto de cimento CPV-ARI;

$t$  = idade efetiva do concreto, em dias.

Para a obtenção do valor do coeficiente de ponderação  $\gamma_c$ , consideram-se os seguintes aspectos: variabilidade da resistência dos materiais envolvidos, diferença de resistência entre corpo de prova e estrutura, desvios gerados na construção e aproximações feitas em projeto em relação à resistência. Assim, a NBR 6118:2014 estabelece os seguintes valores de  $\gamma_c$  considerando os tipos de combinações de cargas utilizadas:

- a) normais:  $\gamma_c = 1,4$ ;
- b) especial ou de construção:  $\gamma_c = 1,2$ ;
- c) excepcionais:  $\gamma_c = 1,2$ .

## 4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 27) indica que o valor da resistência à tração indireta  $f_{ct,sp}$  e da resistência à tração na flexão  $f_{ct,f}$ , devem ser obtidas mediante a ensaios padronizados. Sendo assim, a resistência à tração direta  $f_{ct}$  pode ser considerada  $0,9f_{ct,sp}$  ou  $0,7f_{ct,f}$ .

Na falta de resultados de ensaios à tração, é possível calcular a resistência média e característica à tração por meio de equações. A NBR 6118:2014 define as equações da resistência média para concretos de classes até C50 como sendo:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{equação 5})$$

E para concretos de classes C50 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11f_{ck}) \quad (\text{equação 6})$$

Já para o cálculo da resistência característica à tração, as equações 7 e 8 estão definidas para todas as classes de resistência:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (\text{equação 7})$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$f_{ct,m}$  = resistência média à tração do concreto, em MPa;

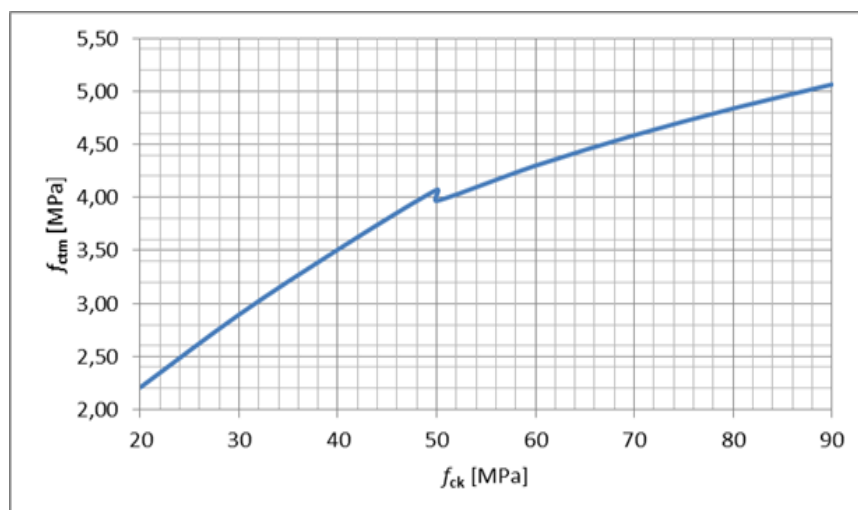
$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto; em MPa

$f_{ctk,inf}$  = resistência característica inferior à tração do concreto, em MPa;

$f_{ctk,sup}$  = resistência característica superior à tração do concreto, em MPa;

Segundo Neville (1997, p. 315), a resistência à tração do concreto aumenta com o aumento do  $f_{ck}$ , porém não de maneira diretamente proporcional, ou seja, na medida em que a resistência à compressão aumenta, também aumenta a resistência à tração, mas a uma razão decrescente. Essa relação sofre influência de diversos fatores, como da granulometria e propriedade dos agregados, como também do tipo de ensaio realizado. A figura 2 demonstra a relação entre as resistências à compressão e à tração média do concreto acordo com as equações da NBR 6118:2014.

Figura 2 – Relação entre a resistência média à tração e a resistência característica à compressão do concreto



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014 p. 27)

### 4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Conforme indica a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 28-29), quando não houver resultados de ensaios, o módulo de elasticidade pode ser obtido através de equações que estimam o resultado referente à idade de 28 dias do concreto. Assim, para concretos com resistência característica de 20 até 50 MPa, tem-se a equação 9:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{equação 9})$$

E para concretos com resistência característica de 55 até 90 MPa, tem-se a equação 10:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E (f_{ck}/10 + 1,25)^{1/3} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade do concreto no instante zero, em MPa;

$\alpha_E$  = coeficiente de ponderação devido ao tipo de agregado;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Sendo que os valores de  $\alpha_E$  são definidos por:

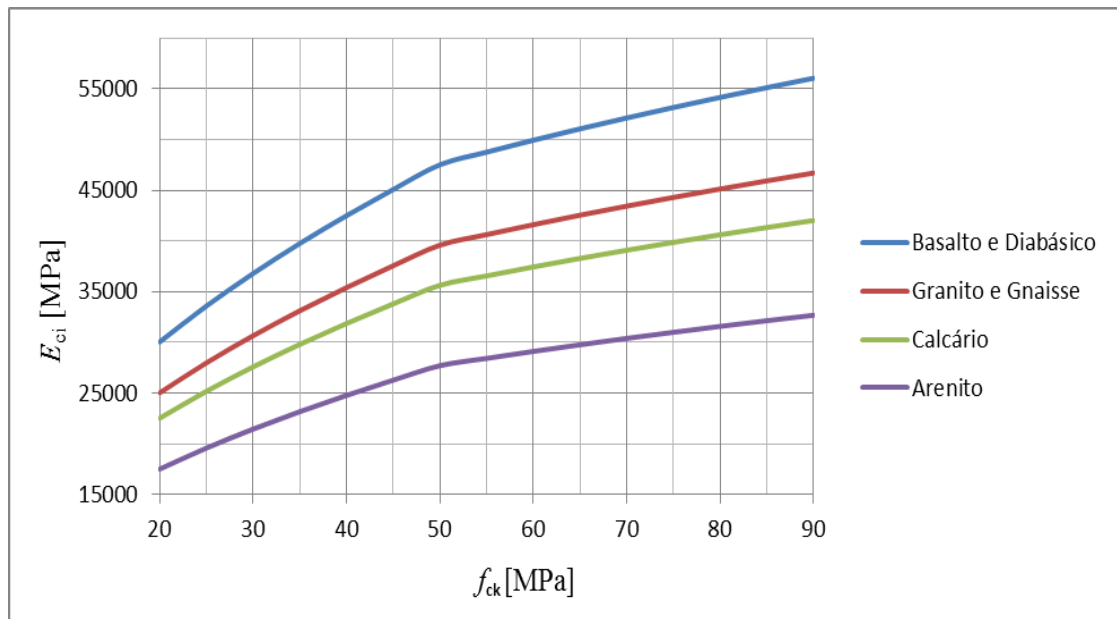
- a) basalto e diabásico com  $\alpha_E = 1,2$ ;
- b) granito e gnaisse com  $\alpha_E = 1,0$ ;
- c) calcário com  $\alpha_E = 0,9$ ;
- d) arenitos com  $\alpha_E = 0,7$ ;

A inclusão do  $\alpha_E$  indica que o tipo de agregado tem influência direta no valor do módulo de elasticidade, uma importante modificação da NBR 6118:2014 em relação à Norma de 2007 que não levava em conta explicitamente esse fator. Segundo Helene e Andrade (2007, p. 935-936), além da natureza da rocha e da dimensão máxima característica do agregado graúdo, existem outros fatores importantes que exercem influência no valor do módulo de elasticidade, dentre eles estão: a resistência à compressão do concreto, consistência do

concreto fresco, volume de pasta de concreto por metro cúbico, teor de umidade, dimensão e temperatura dos corpos de prova no momento do ensaio.

Através da figura 3, observa-se a influência que a resistência do concreto e os diferentes tipos de agregados englobados na NBR 6118:2014 exercem no módulo de elasticidade.

Figura 3 – Módulo de elasticidade em função da resistência do concreto para diferentes tipos de agregados



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014 p. 28)

No caso de concretos com idade menor que 28 dias, a Norma recomenda a equação 11 para concretos com resistência de 20 até 45 MPa:

$$E_{ci(t)} = \left( \frac{f_c(t)}{f_c} \right)^{0,5} E_{ci} \quad (\text{equação 11})$$

E para concretos com resistência de 50 até 90 MPa é recomendada a equação 12:

$$E_{ci}(t) = \left( \frac{f_c(t)}{f_c} \right)^{0,3} E_{ci} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$E_{ci}(t)$  = estimativa do módulo de elasticidade do concreto em uma idade entre 7 e 28 dias, em MPa;

$f_c(t)$  = resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade, em MPa;

$f_c$  = resistência à compressão do concreto, em MPa.

Já o módulo de elasticidade secante, é uma importante propriedade para análises elásticas de projeto, principalmente na determinação de esforços solicitantes e na verificação da estrutura no estado limite de serviço (HELENE; ANDRADE, 2007, p. 935). Conforme a NBR 6118:2014, possui a seguinte equação:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (\text{equação 13})$$

Sendo  $\alpha_i$  definido pela equação 14:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 (f_{ck}/80) \leq 1,0 \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

$E_{cs}(t)$  = módulo de elasticidade secante do concreto, em MPa;

$\alpha_i$  = coeficiente de ponderação em relação à resistência do concreto;

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade do concreto no instante zero, em MPa.

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

A Norma ainda apresenta um resumo dos valores estimados para ambos módulos de elasticidade e para o coeficiente de ponderação  $\alpha_i$ , conforme mostrado no quadro 2.

Quadro 2 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
$E_{ci}$ (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
$E_{cs}$ (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
$\alpha_i$	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014 p. 29)

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESES CÁLCULO

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 60-71) divide as ações solicitantes de projeto basicamente em permanentes e variáveis. Essas ações devem ser combinadas de maneira a englobar todos os esforços considerados significativos para a segurança da estrutura, analisando-os no estado limite último e de serviço.

A Norma define como ações permanentes aquelas que ocorrem ao longo de toda vida útil da estrutura, com valores praticamente constantes. Entre as principais cargas permanentes estão: o peso próprio da estrutura, peso dos materiais de construção fixos na estrutura e empuxos devido ao solo e outros materiais. Já as ações variáveis são definidas como aquelas formadas por cargas acidentais, ou seja, cargas previstas para o tipo a que será destinado a construção, ações provenientes do vento e da água como também ações variáveis durante o processo construtivo.

Os valores de cálculo  $F_d$  das ações devem ser majorados por um coeficiente  $\gamma_f$ , calculado de acordo com a equação 15:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3} \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

$\gamma_f$  = coeficiente de ponderação das ações;

$\gamma_{f1}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera a variabilidade das ações;

$\gamma_{f2}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera a simultaneidade de atuação das ações;

$\gamma_{f3}$  = parcela do coeficiente de ponderação das ações  $\gamma_f$ , que considera desvios gerados na construções e aproximações de projeto em relação a solicitações.

Os valores dos coeficientes estão definidos nos quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Coeficiente  $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
<b>Normais</b>	1,4 <sup>a</sup>	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
<b>Especiais ou de construção</b>	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
<b>Excepcionais</b>	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

onde  
*D* é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.

<sup>a</sup> Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 69)

Quadro 4 – Valores do coeficiente  $\gamma_{f2}$

Ações		$\gamma_{f2}$		
		$\psi_0$	$\psi_1^a$	$\psi_2$
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>b</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas <sup>c</sup>	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

<sup>b</sup> Para os valores de  $\psi_1$  relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.  
<sup>c</sup> Edifícios residenciais.  
<sup>d</sup> Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 69)



As colunas  $\Psi_0$ ,  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  indicam os valores de  $\gamma_{f2}$  para combinações no estado limite último e combinações com carregamentos frequentes e quase permanentes no estado limite de serviço, respectivamente. O quadro 5 mostra algumas combinações de ações para o dimensionamento no estado limite último, devendo-se sempre determinar os efeitos mais desfavoráveis das ações de cargas que atuam simultaneamente na estrutura.

Quadro 5 – Combinações últimas

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado <sup>a</sup>	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \Psi_{0\epsilon} F_{eqk}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{k\max}$ e $P_{k\min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na Seção 9
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,\min}, \text{ onde } Q_{nk} = Q_{1k} + \sum \Psi_{0j} Q_{jk}$
Especiais ou de construção <sup>b</sup>	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \Psi_{0\epsilon} F_{eqk}$	
Excepcionais <sup>b</sup>	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \Psi_{0j} F_{qjk} + \gamma_{eq} \Psi_{0\epsilon} F_{eqk}$	
<p>onde</p> <p><math>F_d</math> é o valor de cálculo das ações para combinação última;</p> <p><math>F_{gk}</math> representa as ações permanentes diretas;</p> <p><math>F_{ek}</math> representa as ações indiretas permanentes como a retração <math>F_{eqk}</math> e variáveis como a temperatura <math>F_{eqk}</math>;</p> <p><math>F_{qk}</math> representa as ações variáveis diretas das quais <math>F_{q1k}</math> é escolhida principal;</p>		

continua

continuação

$\gamma_g, \gamma_{eg}, \gamma_q, \gamma_{eq}$	
$\psi_{0j}, \psi_{0E}$	ver Tabela 11.2;
$F_{sd}$	representa as ações estabilizantes;
$F_{nd}$	representa as ações não estabilizantes;
$G_{sk}$	é o valor característico da ação permanente estabilizante;
$R_d$	é o esforço resistente considerado estabilizante, quando houver;
$G_{nk}$	é o valor característico da ação permanente instabilizante;
$Q_{nk} = Q_{1k} + \sum_{j=2}^m \psi_{0j} Q_{jk}$	
$Q_{nk}$	é o valor característico das ações variáveis instabilizantes;
$Q_{1k}$	é o valor característico da ação variável instabilizante considerada principal;
$\psi_{0j}$ e $Q_{jk}$	são as demais ações variáveis instabilizantes, consideradas com seu valor reduzido;
$Q_{s,min}$	é o valor característico mínimo da ação variável estabilizante que acompanha obrigatoriamente uma ação variável instabilizante.
<sup>a</sup>	No caso geral, devem ser consideradas inclusive combinações onde o efeito favorável das cargas permanentes seja reduzido pela consideração de $\gamma_g = 1,0$ . No caso de estruturas usuais de edifícios, essas combinações que consideram $\gamma_g$ reduzido (1,0) não precisam ser consideradas.
<sup>b</sup>	Quando $F_{q1k}$ ou $F_{q1exc}$ atuarem em tempo muito pequeno ou tiverem probabilidade de ocorrência muito baixa $\psi_{0j}$ , pode ser substituído por $\psi_{2j}$ . Este pode ser o caso para ações sísmicas e situação de incêndio.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 71-72)

Para Araújo (2010, p. 60), os estados limites últimos “[...] são aqueles relacionados ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.”. O autor ainda destaca as verificações em relação à segurança que devem ser admitidas no ELU:

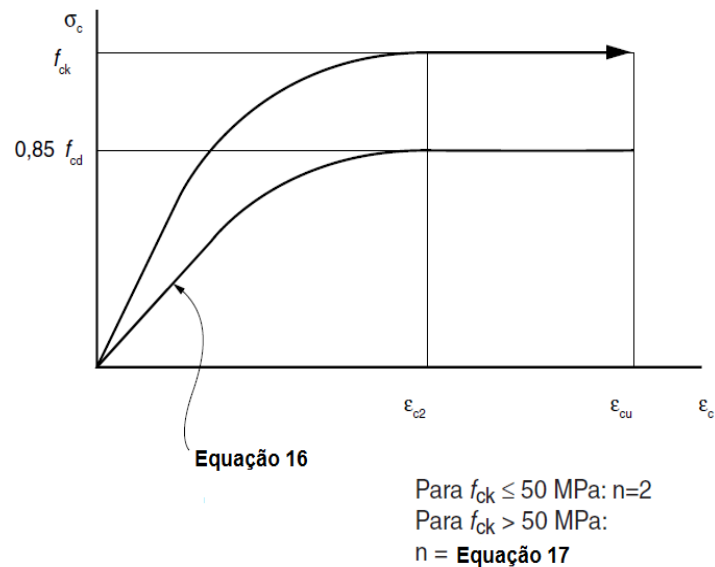
- a) ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;
- b) instabilidade do equilíbrio, considerando os efeitos de segunda ordem;
- c) perda de equilíbrio da estrutura, admitida como um corpo rígido;
- d) estado limite último provocado por solicitações dinâmicas;
- e) transformação da estrutura, no todo ou em parte, em um sistema hipostático.

#### 4.4.1 Diagramas tensão-deformação do concreto

Para a análise das deformações do concreto no ELU, a Norma afirma que para tensões de compressão menores que  $0,5f_c$ , pode-se admitir uma relação linear entre tensões e

deformações, adotando-se para o módulo de elasticidade o valor secante conforme a equação 13. Já para os casos mais gerais, considera-se o diagrama tensão-deformação conforme mostra a figura 4.

Figura 4 – Diagrama tensão deformação idealizado



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 30)

Sendo a equação 16:

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right) \quad (\text{equação 16})$$

Com  $n$  fixado em 2 para concretos de classes até C50 e conforme a equação 17 para classes maiores que C50:

$$n = 1,4 + 23,4 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

$\sigma_c$  = tensão à compressão no concreto, em MPa;

$f_{cd}$  = resistência à compressão de cálculo, em MPa;

$\varepsilon_c$  = deformação específica do concreto submetido à compressão;

$\varepsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico;

$n$  = expoente dependente da resistência do concreto;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Os valores limites das deformações  $\varepsilon_{c2}$  e  $\varepsilon_{cu}$  para concretos com resistência até 50 MPa tem seus valores definidos em 2,0‰ e 3,5‰, respectivamente. Para os concretos de resistência entre 50 e 90 MPa, os valores das deformações são calculados segundo as equações 18 e 19:

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (\text{equação 18})$$

$$\varepsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 35\text{‰} ((90 - f_{ck})/100)^4 \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

$\varepsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico;

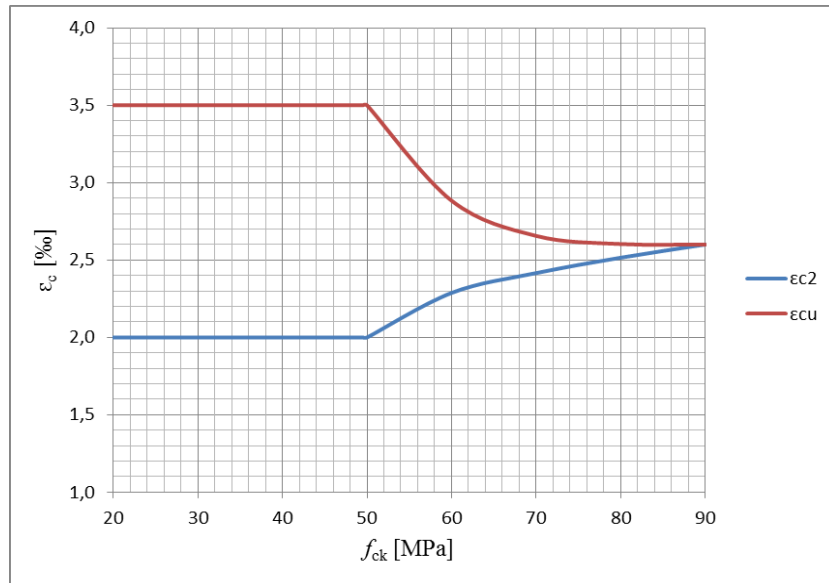
$\varepsilon_{cu}$  = deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

A figura 5 ilustra os valores limites dessas deformações tanto para concretos do grupo I como do grupo II de resistência. Já a figura 6, demonstra a relação entre as tensões e as deformações do concreto conforme a equação 16. De acordo com os resultados obtidos, Aguiar e Pinheiro (2008, p. 112) afirmam que:

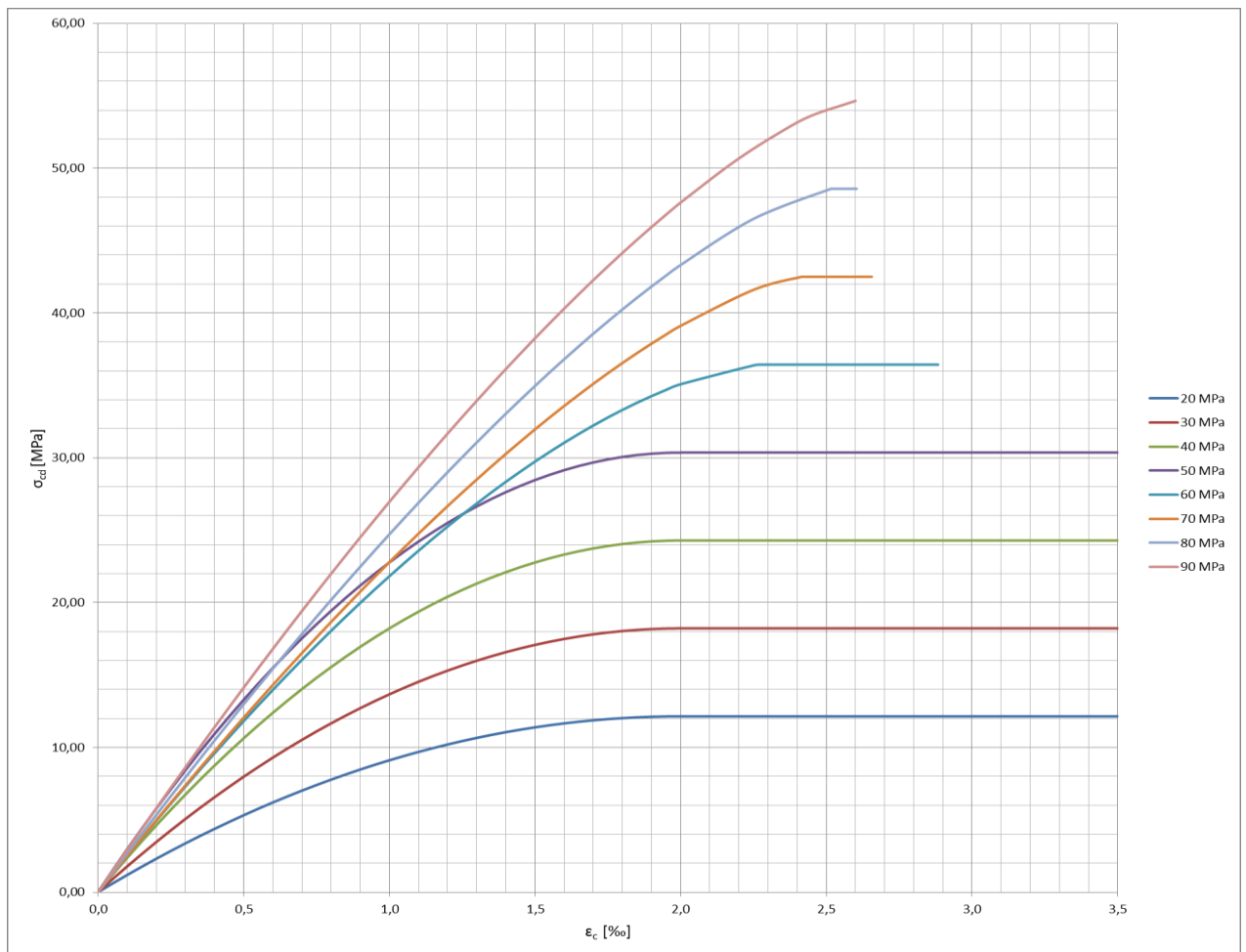
A resistência do concreto à compressão influencia diretamente a forma do diagrama tensão-deformação, pois quanto maior for a resistência, mais íngreme e mais linear será o ramo ascendente da curva tensão-deformação, tendo como consequência o aumento do módulo de deformação longitudinal. Além disso, com resistências maiores, aumentará a deformação correspondente à tensão máxima e diminuirá a deformação última do concreto, denotando a necessidade de utilização de valores diferentes dos usualmente adotados.

Figura 5 – Limites de deformação para diferentes resistências do concreto



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 30)

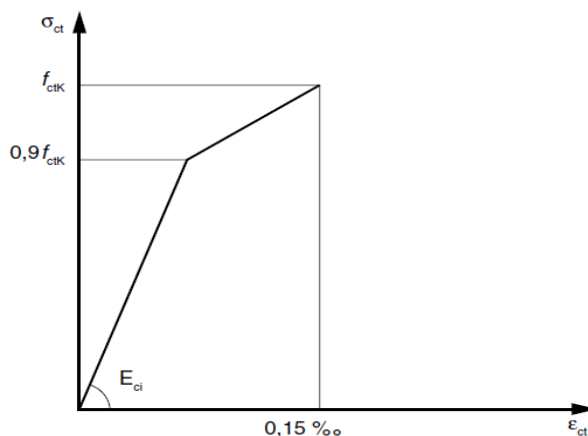
Figura 6 – Diagrama tensão-deformação para diferentes resistências do concreto



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 30)

Para o concreto não fissurado a Norma adota o diagrama tensão-deformação bilinear de tração, conforme indicado na figura 7.

Figura 7 – Diagrama tensão-deformação bilinear na tração



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 31)

Onde:

$\sigma_{ct}$  = tensão à tração no concreto, em MPa;

$f_{ctk}$  = resistência característica à tração do concreto, em MPa;

$\epsilon_{ct}$  = deformação específica do concreto submetido à tração;

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade do concreto no instante zero, em MPa.

#### 4.4.2 Hipóteses básicas

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) define algumas hipóteses básicas para a determinação dos esforços resistentes das seções das vigas:

- as seções transversais se mantêm planas após a deformação;
- a deformação da armadura em esforços de tração e compressão deve ter o mesmo valor da deformação do concreto no seu entorno;
- as tensões de tração do concreto devem ser desprezadas no ELU quando são normais à seção transversal;

A distribuição de tensões no concreto deve ser obtida pelo diagrama tensão-deformação do tipo parábola-retângulo, com tensão de pico igual a  $0,85f_{cd}$ . Porém, para simplificação dos cálculos, pode-se substituir o diagrama pelo equivalente retângulo de profundidade  $y = \lambda x$ ,

onde o parâmetro  $\lambda$  é fixado em 0,8 para concretos de classe até C50 e para classes acima de C50 conforme a equação 20:

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

$\lambda$  = relação entre a profundidade  $y$  do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva  $x$  da linha neutra;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Já a tensão de pico, definida em  $0,85f_{cd}$  no diagrama parábola-retângulo, passa a ter o valor constante conforme a equação 21, para o caso em que a largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não diminuir a partir desta para a borda comprimida:

$$\sigma_{cd} = \alpha_c f_{cd} \quad (\text{equação 21})$$

E para os outros casos:

$$\sigma_{cd} = 0,9\alpha_c f_{cd} \quad (\text{equação 22})$$

Sendo  $\alpha_c$  fixado em 0,85 para concretos com resistência de até 50 MPa e, para concretos de 50 até 90 MPa, segundo a equação 23:

$$\alpha_c = 0,85 (1,0 - (f_{ck} - 50) / 200) \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

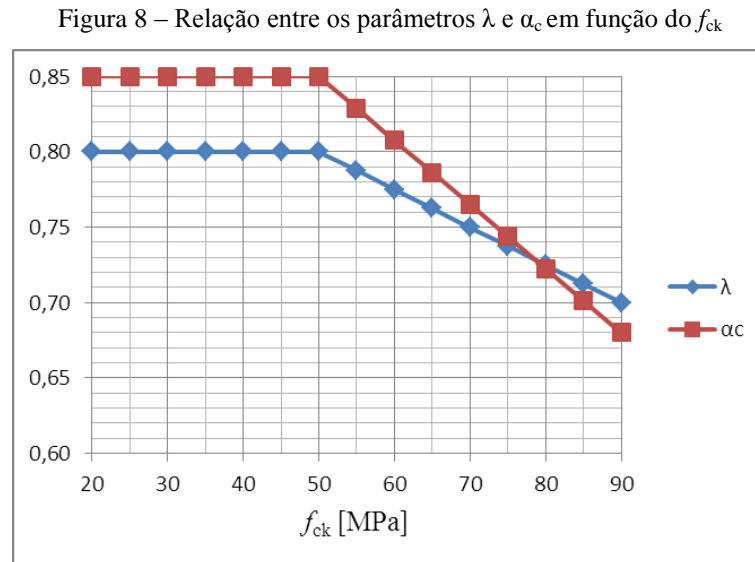
$\sigma_{cd}$  = tensão de cálculo à compressão no concreto, em MPa;

$\alpha_c$  = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

$f_{cd}$  = resistência à compressão de cálculo, em MPa;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

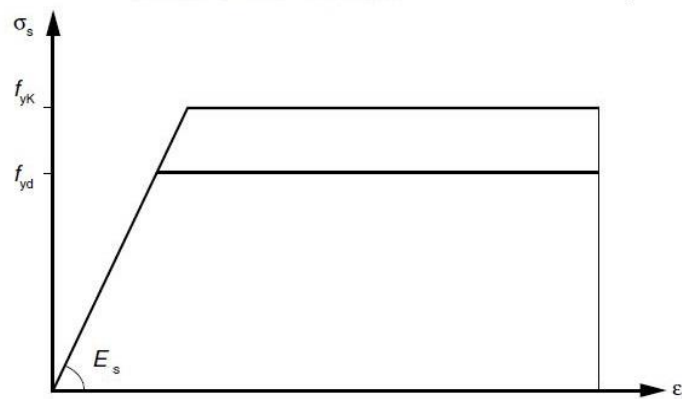
A relação entre os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha_c$  conforme aumenta o  $f_{ck}$ , é mostrado na figura 8:



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 125)

Já a tensão do aço é obtida através do diagrama tensão-deformação simplificado, utilizado tanto para aços com ou sem patamar de escoamento, conforme mostra a figura 9.

Figura 9 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 33)



Sendo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (\text{equação 24})$$

Onde:

$\sigma_s$  = tensão normal do aço de armadura passiva, em MPa;

$f_{yk}$  = resistência característica de escoamento do aço de armadura passiva, em MPa;

$f_{yd}$  = resistência de cálculo ao escoamento do aço de armadura passiva, em MPa;

$\varepsilon_s$  = deformação específica do aço da armadura passiva;

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço de armadura passiva, em MPa;

$\gamma_s$  = coeficiente estatístico de redução da resistência do aço.

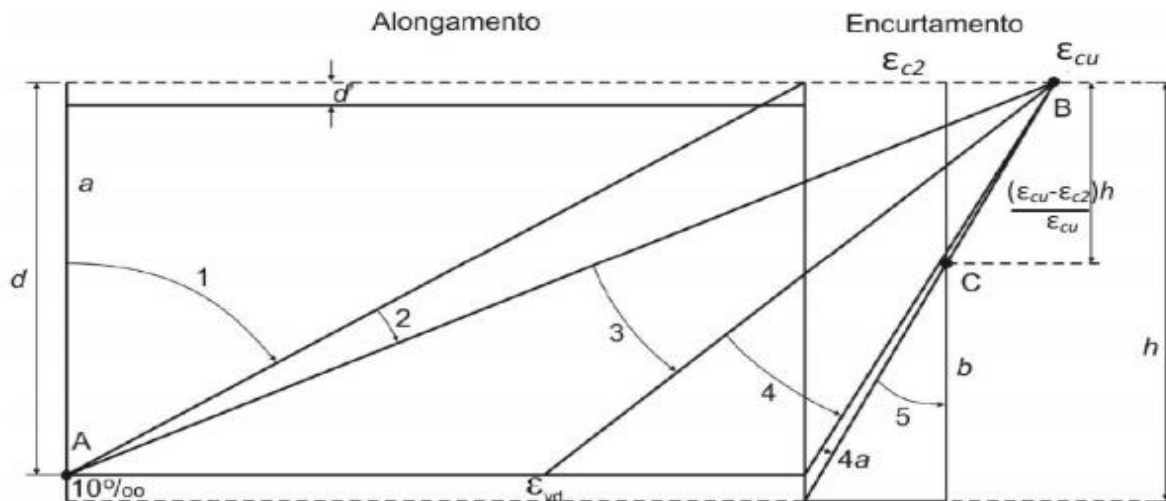
Os valores do coeficiente de redução da resistência do aço, como o do concreto, também são estipulados de acordo com o tipo de combinação de carga utilizado, porém são menores devido a menor variabilidade no processo de fabricação:

- a) normais:  $\gamma_s = 1,15$ ;
- b) especial ou de construção:  $\gamma_s = 1,15$ ;
- c) excepcionais:  $\gamma_s = 1,0$ ;

#### 4.4.3 Domínios do estado limite último

Segundo a NBR 6118:2014, o estado limite último é caracterizado quando a distribuição de deformações no concreto e na armadura tracionada da seção transversal pertencer a um dos seis diferentes domínios definidos pela Norma. Para se determinar a resistência de cálculo de uma determinada seção, é necessário determinar em qual domínio ela pertence (FUSCO, 1981, p. 6). A figura 10 ilustra os domínios de deformação, mostrando as deformações limites tanto do concreto como do aço.

Figura 10 – Domínios de estado limite último de uma seção transversal



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 126)

O domínio 1 é caracterizado pelo elemento estrutural que se enquadra nos casos de tração axial e tração excêntrica com pequena excentricidade, sendo a posição da linha neutra  $x$  externa à seção transversal. Seu limite é dado pela reta  $a$  (tração uniforme) até alcançar o domínio seguinte, conforme vai aumentando a excentricidade dos esforços. Nesse domínio, o concreto é considerado completamente fissurado, ou seja, sem participação na seção resistente (FUSCO, 1981, p. 7). Assim, a ruína da estrutura ocorre por deformação plástica excessiva da armadura mais tracionada  $\varepsilon_{s1} = 10\text{‰}$  (valor limite  $\varepsilon_{su}$ ) e a armadura menos tracionada  $\varepsilon_{s2}$  varia de 0 a 10‰.

Para se obter as deformações específicas dos materiais, é necessário fazer relações de compatibilidade entre elas, decorrentes das hipóteses de que as seções permanecem planas até a ruptura e dos domínios estabelecidos pela Norma. (CAMPOS FILHO, 2014, p. 6-7).

$$\varepsilon_{s2}' = \varepsilon_{su} \left( \frac{d' - x}{d - x} \right) \quad (\text{equação 25})$$

$$\varepsilon_c = -\varepsilon_{su} \left( \frac{x}{d - x} \right) \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$\varepsilon_{s2}'$  = deformação específica da armadura menos tracionada;

$\varepsilon_{su}$  = deformação específica limite da armadura;

$d'$  = distância da face menos tracionada da seção até o eixo da armadura menos tracionada, em cm;

$x$  = posição da linha neutra, em cm;

$\varepsilon_c$  = deformação específica no concreto (região menos tracionada);

$d$  = distância da face menos tracionada da seção até o eixo da armadura mais tracionada, em cm.

O domínio 2 caracteriza-se pela seção sofrer esforços de flexão simples ou composta (tração ou compressão com grandes excentricidades) sem ocorrer ruptura à compressão do concreto, ou seja, a deformação  $\varepsilon_c$  é menor que a deformação limite  $\varepsilon_{cu}$ . Dessa maneira, a seção possui uma região comprimida e outra tracionada, com a posição  $x$  da linha neutra já dentro do elemento estrutural, variando de zero até o limite com o domínio 3. Nesse domínio, a ruína da seção também ocorre pela deformação plástica excessiva da armadura com  $\varepsilon_{s1} = 10\%$ .

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{su} \left( \frac{x - d'}{d - x} \right) \quad (\text{equação 27})$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{su} \left( \frac{x}{d - x} \right) \quad (\text{equação 28})$$

$$x_{23} = d \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{su} + \varepsilon_{cu}} \right) \quad (\text{equação 29})$$

Onde:

$\varepsilon_{s2}$  = deformação específica da armadura comprimida;

$\varepsilon_c$  = deformação específica do concreto na compressão;

$x_{23}$  = posição limite da linha neutra do domínio 2 com o domínio 3, em cm;

$\varepsilon_{cu}$  = deformação específica limite do concreto na ruptura;

No domínio 3, o elemento estrutural possui uma região comprimida e outra tracionada, com a posição  $x$  da linha neutra variando de  $x_{23}$  à  $x_{lim}$  e consequentemente dentro da seção transversal. Nesse caso, estão incluídos esforços tanto de flexão simples como de flexão composta, com ruptura à compressão do concreto ( $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ) simultaneamente com o escoamento do aço. Por esse motivo, o domínio 3 é considerado o mais econômico para um projeto, pois ambos os materiais são totalmente aproveitados sem que haja ruína não avisada da estrutura (FUSCO, 1981, p. 9). A NBR 6118:2014 denomina as seções pertencentes a esse domínio como *subarmadas*. As equações a seguir demonstram as relações de compatibilidade de deformações.

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d - x}{x} \right) \quad (\text{equação 30})$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{x - d'}{x} \right) \quad (\text{equação 31})$$

$$x_{lim} = d \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{yd} + \varepsilon_{cu}} \right) \quad (\text{equação 32})$$

Sendo que:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (\text{equação 33})$$

Onde:

$\varepsilon_{s1}$  = deformação específica da armadura tracionada;

$x_{lim}$  = posição limite da linha neutra do domínio 3 com o domínio 4, em cm;

$\varepsilon_{yd}$  = deformação específica do aço no início do escoamento;

$f_{yd}$  = deformação específica no concreto na região menos tracionada, em MPa;

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço, em MPa.

O domínio 4 é caracterizado pelo ruptura à compressão do concreto  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ , porém, ao contrário do domínio 3, não há escoamento da armadura tracionada. As situações típicas desse domínio segundo a NBR 6118:2014, são a flexão simples (caracterizando uma seção *superarmada*) ou composta. Fusco (1981, p. 10) ainda afirma que:

No estado último, a deformação da armadura é inferior à deformação de início de escoamento. A ruptura da peça ocorre, portanto, de forma frágil, não-avisada, pois o concreto rompe sem que a armadura tracionada possa provocar uma fissuração que sirva de advertência. As peças que chegam ao estado último do domínio 4 são ditas *superarmadas*, devendo ser evitadas tanto quando possível.

As equações apresentadas no domínio 3 também valem para o domínio 4, com exceção da abrangência da posição  $x$  da linha neutra, que vai do  $x_{lim}$  até o valor de  $d$ .

Já o domínio 4a, possui as duas armaduras comprimidas e incluem-se apenas casos de flexão composta. A ruína da seção também ocorre por deformação excessiva devido à compressão do concreto, com  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ . Como a posição da linha neutra situa-se entre os valores de  $d$  e  $h$  (altura total da peça), considera-se desprezível as tensões na armadura menos comprimida, pois o aço está numa região muito próxima da linha neutra. A relação de compatibilização para a armadura mais comprimida,  $\varepsilon_{s2}$ , é igual à equação 31, enquanto que a armadura menos comprimida,  $\varepsilon_{s1}$ , é descrita pela equação 34.

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{x - d}{x} \right) \quad (\text{equação 34})$$

Por fim, a NBR 6118:2014 define o domínio 5 como sendo os casos de compressão não uniforme (flexo-compressão com pequena excentricidade) e no caso limite, reta  $b$ , de compressão uniforme. Nesse domínio, admite-se que a deformação última do concreto é igual a  $\varepsilon_{c2}$  para a compressão uniforme e  $\varepsilon_{cu}$  para a flexo-compressão, com a posição da linha neutra externa à seção, pois possui um valor maior do que  $h$ . Os casos limites, divisa entre domínio 4 e 5 e a reta  $b$ , possuem o ponto  $C$  em comum (ponto medido a partir da borda mais comprimida da seção), com seu valor determinado pela relação entre as deformações do

concreto e a altura  $h$  do elemento estrutural. As relações de compatibilidade de deformações para esse domínio estão explicitadas nas equações 35, 36 e 37.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c2} \left( \frac{x}{x - \left( \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu}} \right) h} \right) \quad (\text{equação 35})$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{c2} \left( \frac{x - d}{x - \left( \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu}} \right) h} \right) \quad (\text{equação 36})$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{c2} \left( \frac{x - d'}{x - \left( \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu}} \right) h} \right) \quad (\text{equação 37})$$

Onde:

$\varepsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico;

$h$  = altura do elemento estrutural, em cm.

Para o método de análise estrutural linear, admite-se um comportamento elástico-plástico para os materiais, sendo que, para o dimensionamento no ELU, deve-se garantir a ductilidade mínima às peças. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 95), determina um valor limite da linha neutra para melhorar o comportamento dúctil em vigas e lajes. Segundo a Norma, a capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU, sendo que quanto menor a relação  $x/d$ , maior será essa capacidade rotacional. Para concretos com resistência à compressão de até 50 MPa, o valor limite da linha neutra, para garantir as boas condições de ductilidade, é dado pela equação 38.

$$x \leq 0,45d \quad (\text{equação 38})$$

Já para concretos com resistências entre 55 MPa e 90 MPa, o limite da linha neutra é determinado pela equação 39.

$$x \leq 0,35d \quad (\text{equação 39})$$

Esses valores limites mudaram em relação à NBR 6118:2007, onde a relação era  $x/d \leq 0,50$  e  $x/d \leq 0,40$ , para concretos com resistências até 35 MPa e acima de 35 MPa, respectivamente. Além disso, essa consideração era feita apenas nos apoios intermediários de vigas contínuas, ou seja, nos momentos negativos.

Nos casos de análise estrutural linear com redistribuição de momentos fletores, em que os esforços da seção determinados em uma análise linear, são redistribuídos na estrutura, os valores limites de  $x$  para resistências de até 50 MPa e acima de 50 até 90 MPa, passam a ser de acordo com as equações 40 e 41, respectivamente.

$$x = d \left( \frac{\delta - 0,44}{1,25} \right) \quad (\text{equação 40})$$

$$x = d \left( \frac{\delta - 0,56}{1,25} \right) \quad (\text{equação 41})$$

Sendo que:

- a)  $\delta \geq 0,90$ , para estruturas de nós móveis;
- b)  $\delta \geq 0,75$ , para qualquer outro caso.

Onde:

$x$  = posição da linha neutra na seção transversal, em cm;

$d$  = distância da face menos tracionada da seção até o eixo da armadura mais tracionada, em cm;

$\delta$  = coeficiente de redistribuição de momentos fletores.



## 5 ACI 318-08: PROPRIEDADES E GENERALIDADES

Nesse capítulo são abordadas as principais propriedades mecânicas e considerações de cálculo definidos de acordo com a ACI 318-08.

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

De acordo com a ACI 318, o conceito de concreto estrutural inclui tanto concreto simples como concreto armado, desde que exerça função estrutural. Na Norma Americana, não há limite máximo de resistência característica à compressão para o dimensionamento, mas apenas limite mínimo de 17 MPa (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 9).

No capítulo 5 da ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 66-68), são descritas as considerações sobre a resistência à compressão do concreto, devendo sempre satisfazer os critérios de durabilidade exigidos na Norma. A resistência requerida,  $f_{cr}$ , é a resistência média à compressão que deve ser alcançada nos ensaios de corpos de prova, a fim de se obter a resistência característica à compressão,  $f_c'$ , especificada em projeto.

Os ensaios laboratoriais são realizados com corpos de prova cilíndricos aos 28 dias, salvo exceções determinadas pelo projetista, e são estabelecidos dois critérios para que os resultados sejam satisfatórios:

- a) a cada três resultados de corpos de prova, deve-se fazer a média aritmética e obter um valor de resistência igual ou maior que o valor de  $f_c'$ ;
- b) nenhum resultado individual deve ser menor que a diferença de 3,5 MPa de  $f_c'$ , para concretos de 35 MPa ou menos, ou  $0,1f_c'$  de  $f_c'$ , para concretos com resistência maior que 35 MPa.

Análogo a NBR 6118:2014, a Norma Americana expõem duas hipóteses para obter o valor da resistência média  $f_{cr}'$ : com o desvio padrão conhecido e desconhecido.

A primeira hipótese baseia-se na premissa que a concreteira responsável pela dosagem e ensaio do concreto, possua uma amostragem de dados referentes a ensaios realizados não anteriores há 12 meses para o cálculo do desvio padrão  $s_s$ . Além disso, a amostra deve ser

obtida a partir de concretos que foram fabricados com resistência semelhante ao desejado (variação máxima de 7 MPa no valor de  $f'_c$ ), como também materiais, processos de qualidade e controle semelhantes. Deve-se consistir em pelo menos 30 ensaios consecutivos do mesmo grupo ou somando dois grupos e, caso essa última condição não seja cumprida, a Norma estabelece os seguintes coeficientes de correção do  $s_s$ , conforme apresentado no quadro 6.

Quadro 6 – Fator de redução do desvio padrão para amostras com menos de 30 ensaios

Número de testes	Fator de correção do desvio padrão
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 ou mais	1.00

(fonte: adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 66)

Assim, a resistência média a compressão requerida  $f'_{cr}$ , usada como base para a dosagem e obtenção do  $f'_c$ , deve ser calculada de acordo com a quadro 7.

Quadro 7 – Resistência média à compressão requerida quando há dados disponíveis para estabelecer um desvio padrão da amostra

Resistência característica à compressão, MPa	Resistência média à compressão requerida, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar o maior valor obtido entre as equações $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (Eq. 42) $f'_{cr} = f'_c + 2.33s_s - 3.5$ (Eq. 43)
$f'_c > 35$	Usar o maior valor obtido entre as equações $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ $f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33s_s$ (Eq. 44)

(fonte: adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 67)

A equação 42 indica uma probabilidade de 0,01% de que as médias de 3 ensaios consecutivos sejam inferiores a resistência característica  $f_c'$ , enquanto a equação 43 tem uma probabilidade semelhante de que um ensaio individual tenha resistência 3,5 MPa menor que  $f_c'$ . Já a equação 44, possui a probabilidade de 0,01% de que um ensaio individual possua valor inferior a 0,9  $f_c'$ .

No caso em que a concreteira não possua amostra, ou uma amostragem com um número de ensaios consecutivos menor do que 15, não é possível obter um valor de desvio padrão ou de valor confiável. Assim, o cálculo de  $f_{cr}'$  é realizado de acordo com a quadro 8.

Quadro 8 – Resistência média a compressão requerida quando não há dados disponíveis para estabelecer um desvio padrão da amostra

Resistência característica à compressão, MPa	Resistência média à compressão requerida, MPa
$f_c' < 21$	$f_{cr}' = f_c' + 7.0$
$3000 \leq f_c' \leq 35$	$f_{cr}' = f_c' + 8.3$
$f_c' > 35$	$f_{cr}' = 1.10f_c' + 5.0$

(fonte: adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 68)

## 5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Através de testes de compressão diametral, com corpos de prova cilíndricos, obtém-se uma relação de proporcionalidade entre as resistências à compressão e à tração do concreto. Essa proporcionalidade diminui na medida em que se aumenta a resistência à compressão  $f_c'$  (WIGHT; MACGREGOR, 2012 p. 60). Dessa maneira, a ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 107) estipula a equação 45 como sendo a resistência média à tração para concretos:

$$f_{ct} = 0,56\lambda\sqrt{f_c'} \quad (\text{equação 45})$$

Sendo que  $\lambda$  é definido segundo o peso específico do concreto:

- a) concretos com densidade normal  $\lambda = 1,0$ ;
- b) concretos leves com areia como agregado fino  $\lambda = 0,85$ ;
- c) concretos leves sem areia como agregado fino  $\lambda = 0,75$ ;

Onde:

$f_{ct}$  = resistência média à tração, em MPa;

$\lambda$  = constante de ponderação em relação à densidade do concreto utilizado;

$f_c'$  = resistência característica à compressão, em MPa.

Já para o módulo de ruptura  $f_r$  (resistência à tração quando o elemento está submetido à flexão), ensaios mostram que o seu valor é de aproximadamente 10 a 15% do valor da resistência à compressão do concreto e, não são considerado no dimensionamento à flexão no estado limite último, mas apenas nas verificações do estado limite de serviço. A equação que define o valor de  $f_r$  de acordo com a Norma é dada pela equação 46:

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (\text{equação 46})$$

Onde:

$f_r$  = módulo de ruptura do concreto, em MPa;

$\lambda$  = constante de ponderação em relação à densidade do concreto utilizado;

$f_c'$  = resistência característica à compressão, em MPa.

Assim, a resistência à tração considerada nos equacionamentos em que a parcela de tração do concreto exerce papel importante no dimensionamento da estrutura, como nas seções submetidas a esforços de corte e torsão, é em função da  $\sqrt{f_c'}$ , como pôde ser observado nas relações acima.

A Norma ainda define um valor máximo para  $\sqrt{f_c'}$  de 8,3 MPa, devido a escassez de dados ensaiados com concretos de resistência à compressão acima de 70 MPa. Apenas em casos específicos descritos na Norma é possível usar valores maiores.

### 5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 107) define o módulo de elasticidade  $E_c$  como sendo a inclinação da reta do diagrama tensão-deformação do concreto

(ver p. 68), que parte do ponto zero até a tensão de compressão equivalente a  $0,45f_c'$ . De acordo com a Norma, o módulo de elasticidade é função dependente do peso específico e da resistência à compressão do concreto, sendo calculado pela equação 47, válida para concretos com densidade entre 1440 e 2560 kg/m<sup>3</sup>:

$$E_c = w_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f_c'} \quad (\text{equação 47})$$

Onde:

$E_c$  = módulo de elasticidade do concreto, em MPa;

$w_c$  = peso específico do concreto, em kg/m<sup>3</sup>;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Para concretos com densidade normal, o valor do módulo de elasticidade pode ser calculado através da equação 48:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad (\text{equação 48})$$

Onde:

$E_c$  = módulo de elasticidade do concreto, em MPa;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE CÁLCULO

A resistência nominal, de acordo com a ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 115-117), é a resistência de um elemento ou de uma seção transversal calculado a partir das hipóteses de projeto presentes na Norma, sem a aplicação dos fatores de redução de resistência. Assim, multiplicando-se a resistência nominal por um fator de redução tem-se a resistência de projeto, que deve ser no mínimo igual a resistência requerida pelo elemento, calculada a partir das combinações de carregamentos:

$$\phi \text{ (Resistência nominal)} \geq U \quad \text{(equação 49)}$$

Onde:

$\phi$  = fator de redução de resistência;

$U$  = resistência requerida pelo elemento para suportar as cargas majoradas;

Segue abaixo, formulações para se obter a resistência requerida da peça, levando em consideração algumas combinações dos diversos tipos de carregamento considerados na Norma e seus respectivos fatores ponderadores de carga:

$$U = 1,4 (D + F) \quad \text{(equação 50)}$$

$$U = 1,2(D + F + T) + 1,6(L + H) + 0,5(L_r \text{ ou } S \text{ ou } R) \quad \text{(equação 51)}$$

$$U = 1,2 D + 1,6 (L_r \text{ ou } S \text{ ou } R) + (1,0L \text{ ou } 0,8W) \quad \text{(equação 52)}$$

$$U = 1,2 D + 1,6W + 1,0L + 0,5(L_r \text{ ou } S \text{ ou } R) \quad \text{(equação 53)}$$

$$U = 1,2 D + 1,0E + 1,0L + 0,2S \quad \text{(equação 54)}$$

$$U = 0,9 D + 1,6W + 1,6H \quad \text{(equação 55)}$$

$$U = 0,9 D + 1,0E + 1,6H \quad (\text{equação 56})$$

Onde:

$U$  = resistência requerida pelo elemento para suportar as cargas majoradas;

$D$  = peso próprio da estrutura;

$E$  = ação devido aos abalos sísmicos;

$F$  = peso e pressão de fluidos com densidade definida;

$H$  = cargas devido ao peso e pressão do solo, de água no solo ou outros materiais;

$L$  = cargas acidentais;

$Lr$  = cargas acidentais em coberturas;

$R$  = carga causada pela chuva;

$S$  = carga causada pela neve;

$T$  = efeitos causados pelas variações de temperatura, retração e deformações do concreto;

$W$  = carga devido aos esforços de vento.

Vale salientar que essas combinações presentes na norma não estão abrangendo todos os casos possíveis, cabe ao projetista avaliar cada situação. Já os fatores de cargas, variam de acordo com a probabilidade de ocorrência simultânea e relevância das cargas consideradas no projeto.

A ACI 318, ainda salienta os seguintes aspectos em relação às fórmulas apresentadas anteriormente:

- a) o fator de carga das cargas acidentais  $L$  na equação 52 a 54 pode ser reduzido para 0,5, com exceção de garagens, áreas ocupadas como lugares de reuniões públicas e em todas as áreas onde  $L$  é superior a 4,8 KN/m<sup>2</sup>;
- b) é permitido usar 1,3 $W$  ao invés de 1,6 $W$  nas equações 53 e 55 quando a carga de vento  $W$  não tenha sido reduzida por um fator de direcionalidade;
- c) nas equações 54 e 56 pode-se usar 1,4 $E$  ao invés de 1,0 $E$ , quando os efeitos de carga por sismo se baseiam nos níveis de serviço das forças sísmicas;
- d) o fator de carga para as cargas devido ao peso e pressão do solo, água e outros materiais no solo,  $H$ , deve ser igual a zero nas equações 55 e 56 se o esforço estrutural causado por  $H$  neutraliza as causadas por  $W$  ou  $E$ . Quando as pressões laterais exercidas por empuxo do solo proporcionam resistência a outras forças, essas não devem ser incluídas em  $H$ , mas devem ser incluídas na resistência de projeto;

- e) se a estrutura for projetada para resistir a forças de impactos, esses esforços devem ser incluídos em  $L$ , assim nas equações acima  $L$  é substituído por  $(L + \text{impacto})$ .

No apêndice C da Norma estão descritas outras combinações de cargas, sendo que a combinação de peso próprio (carga permanente) mais carga acidental, combinação comum de projeto, é explicitada com o valor mínimo de:

$$U = 1,4 D + 1,7L \quad (\text{equação 57})$$

Além da majoração das cargas a Norma define valores de coeficientes  $\phi$ , minoradores da resistência nominal, com a finalidade de:

- a) levar em consideração a probabilidade da presença de elementos com uma menor resistência do que a requerida, devido a variações na resistência dos materiais e nas dimensões;
- b) levar em consideração as imprecisões das equações de projeto;
- c) levar em consideração o grau de utilidade e a confiabilidade necessária para o elemento frente às cargas em que está submetido;
- d) exprimir a importância do elemento na estrutura.

Nota-se aqui a diferença dos coeficientes de redução de resistência em relação à norma brasileira. Na NBR 6118:2014 os coeficientes de redução reduzem apenas a resistência característica do concreto e do aço levando em conta fatores principalmente estatísticos, enquanto a ACI 318-08 leva em consideração o elemento estrutural como um todo, analisando o tipo de elemento e a importância dele na estrutura.

Sendo assim, a ACI 318 estabelece como fator de redução de 0,90 para seções consideradas de tração, 0,70 para seções consideradas de compressão com armadura em espiral e 0,65 para seções também consideradas de compressão, mas que possuem outra configuração da armadura que não em espiral. Já as seções submetidas a cortante e torção, tem um coeficiente redutor de 0,75 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 118-119).

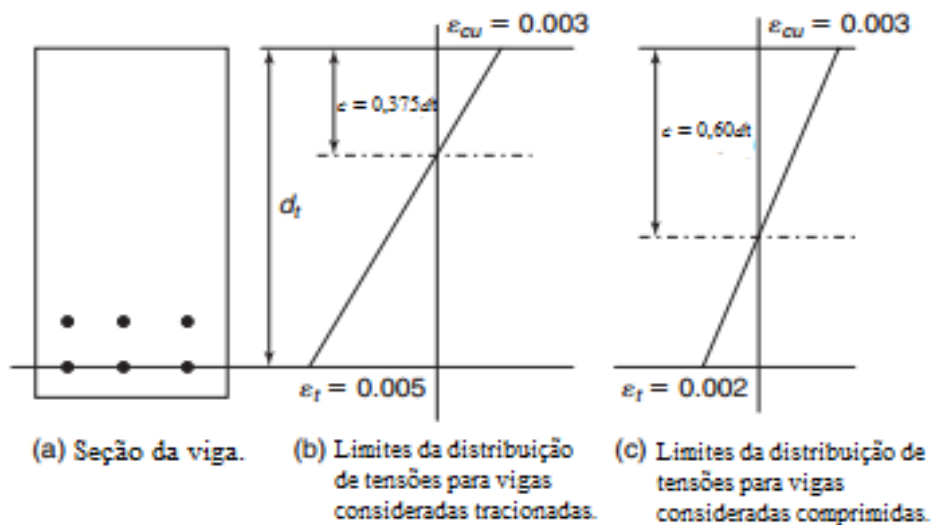
A ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 118, tradução nossa) ainda afirma que:



Usa-se um fator  $\phi$  mais baixo para as seções submetidas à compressão que as seções tracionadas porque as seções de compressão tem menor ductilidade, são mais sensíveis em relação as variações na resistência do concreto e, em geral, são elementos que suportam maiores cargas que elementos submetidos à tração. Aos elementos com armadura em espiral se admite um  $\phi$  mais alto que para as colunas com estribos já que possuem maior ductilidade ou tenacidade.

A definição de seções comprimidas ou tracionadas refere-se à posição da linha neutra  $c$ , e à deformação da armadura  $\epsilon_t$ , calculada em relação à  $d_t$ , que é a distância desde a última fibra comprimida do concreto até a última fibra de aço tracionada. Sendo assim, de acordo com a Norma, uma seção de viga submetida a esforços de flexão é considerada tracionada quando  $\epsilon_t$  assume valor igual ou maior que 5%. Já para ser considerada de compressão,  $\epsilon_t$  assume valores igual ou menores que 2%. Entre esses dois valores limites, a seção é considerada de transição. A figura 11 ilustra esses valores para a classificação do elemento estrutural.

Figura 11 – Distribuição de tensões para seções consideradas tracionadas e para seções consideradas comprimidas



(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 134)

Fazendo uma relação através de semelhanças de triângulos, obtém-se a equação 58 que determinam a deformação  $\epsilon_t$  da armadura:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_t - c}{c} \right) \quad (\text{equação 58})$$

Onde:

$\varepsilon_t$  = deformação específica na armadura tracionada na fibra mais externa;

$\varepsilon_{cu}$  = deformação específica do concreto na ruptura;

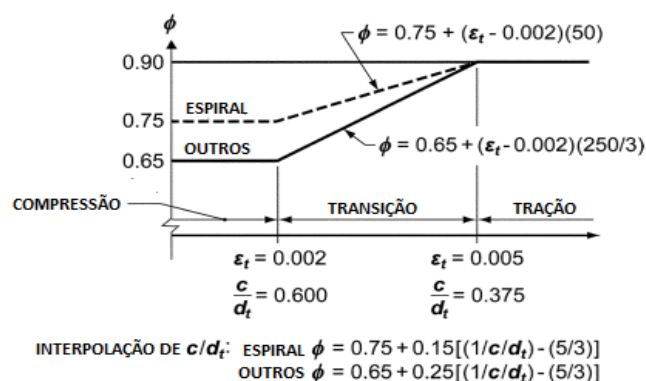
$d_t$  = distância desde a última fibra comprimida do concreto até a última fibra de aço tracionada, em cm;

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm;

De acordo com a figura 11, observa-se que se a posição da linha neutra  $c$  assumir valores menores que  $0,375d_t$  no caso de seções tracionadas, é possível ter deformações da armadura maiores que 5%. Já para o caso de seções comprimidas, a deformação da armadura pode ser menor que 2% se  $c$  assumir valores maiores que  $0,60d_t$ . Portanto, ao contrário da NBR 6118:2014, a Norma Americana admite qualquer deformação para o aço.

Já para os elementos que se encontram na zona de transição, é permitido que o  $\phi$  aumente linearmente desde o valor das seções comprimidas até o valor máximo de 0,90 das seções tracionadas, como mostra a figura 12.

Figura 12 – Variação do coeficiente  $\phi$



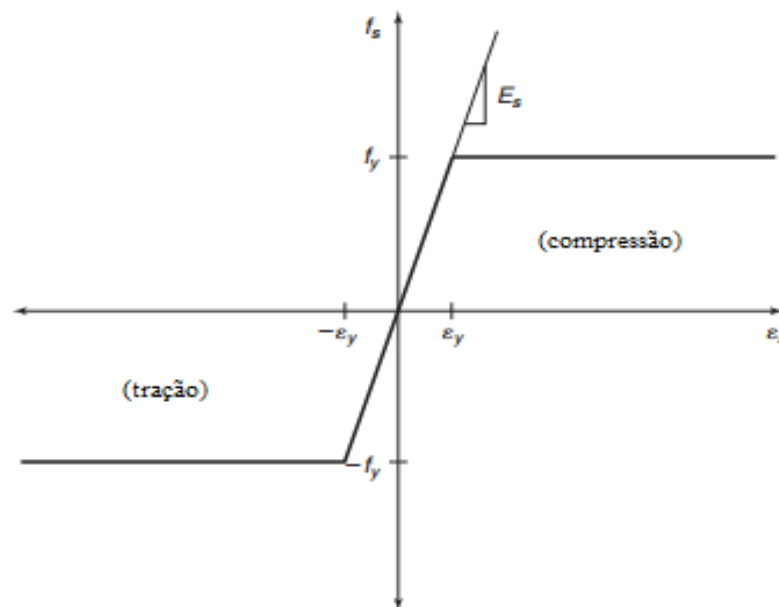
(fonte: adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 118)

De acordo a ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 129), as deformações do concreto e do aço devem ser proporcionais até a linha neutra da seção (exceto

para vigas paredes), ou seja, as deformações aumentam de forma linear a partir da linha neutra até a região mais tracionada ou comprimida. Essa suposição é baseada em diversos ensaios de laboratórios e com ela simplifica-se os cálculos para a obtenção das deformações e tensões dos materiais.

A Norma limita o valor máximo da deformação do concreto por compressão  $\epsilon_{cu}$  em 3‰, na sua fibra mais externa. Já o aço tem a tensão limitada com o valor da resistência de escoamento ( $f_y$ ), sendo que para os casos onde a tensão na armadura é menor que  $f_y$ , multiplica-se o módulo de elasticidade  $E_s$  do aço pelo valor da deformação específica, numa relação linear como mostra a figura 13.

Figura 13 – Diagrama tensão-deformação para o aço



(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 112)

Nos casos de vigas com armadura simples, a deformação da armadura tracionada é calculada conforme a equação 59, já para os casos de armadura dupla, a deformação da armadura comprimida é obtida de acordo com a equação 60, ambas deduzidas através de semelhança de triângulos. (WIGHT; MACGREGOR, 2012).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d - c}{c} \right) \quad (\text{equação 59})$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left( \frac{c - d'}{c} \right) \quad (\text{equação 60})$$

Onde:

$\varepsilon_s$  = deformação específica na armadura tracionada;

$\varepsilon_{cu}$  = deformação específica do concreto na ruptura;

$d$  = distância da face comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

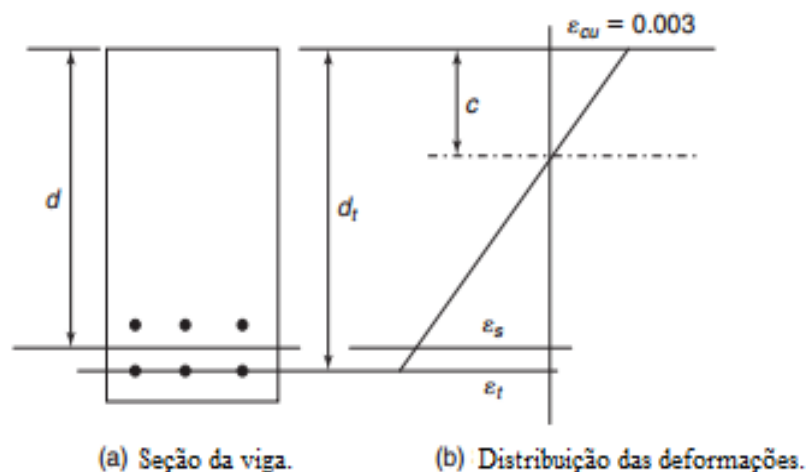
$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm;

$\varepsilon_s'$  = deformação específica da armadura comprimida;

$d'$  = distância da face comprimida da seção até o eixo da armadura comprimida, em cm.

A figura 14 demonstra a diferença entre as variáveis  $d_t$  e  $\varepsilon_t$ , usadas apenas para classificar a seção e determinar  $\phi$ , e  $d$  e  $\varepsilon_s$ , utilizadas na obtenção da deformação da armadura.

Figura 14 – Definição de  $\varepsilon_t$  e  $d_t$

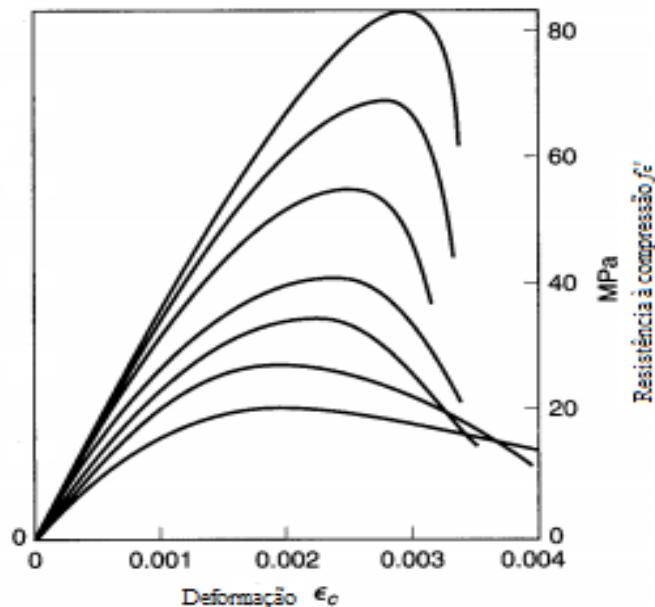


(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 133)

Para as deformações do concreto, os testes à compressão com corpos de prova cilíndricos na idade de 28 dias e com densidade normal, resultam nas curvas típicas da relação tensão-

deformação para diferentes valores de  $f_c'$ , ilustradas na figura 15. Todas as curvas possuem comportamento semelhante, consistindo numa relação inicial linear, que determina a região de deformação elástica do concreto, até a curva começar a se aproximar da horizontal, onde atinge a tensão máxima com deformação  $\epsilon_0$ , geralmente entre 2 e 3‰ para concretos de densidade normal, e entre 3 e 3,5‰ para concretos leves (NILSON et al., 2010, p. 40). Observa-se na figura um comportamento característico do concreto, também presente na NBR 6118:2014, onde conforme se aumenta a resistência à compressão, aumenta a deformação na tensão máxima e diminui a deformação na ruptura.

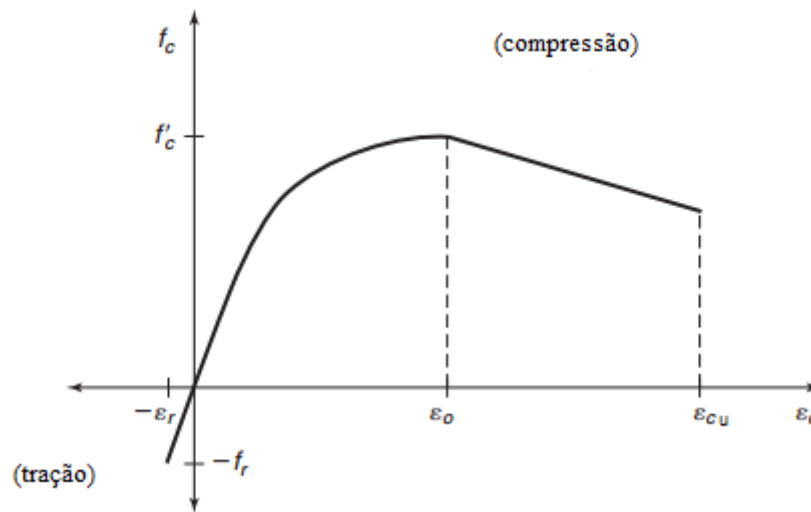
Figura 15 – Curvas típicas da relação tensão-deformação para concretos com densidade normal



(fonte: adaptado de NILSON et al., 2010, p. 41)

Assim, o diagrama tensão-deformação idealizado para o concreto é fornecido pela figura 16.

Figura 16 – Diagrama tensão-deformação idealizado do concreto



(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 113)

A parábola da curva idealizada é fornecida pela equação 61, enquanto que, após a deformação  $\varepsilon_0$  no pico de tensão, a curva decresce linearmente conforme a equação 62, até atingir a ruptura na deformação  $\varepsilon_{cu}$ .

$$f_c = f'_c \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (\text{equação 61})$$

$$f_c = f'_c \left[ 1 - \frac{Z}{1000} \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right) \right] \quad (\text{equação 62})$$

Sendo que  $Z$  é uma constante que controla a inclinação da reta, normalmente fixada em 150. Valores menores podem ser adotados se armaduras longitudinal e transversal são adicionadas para manter o concreto na zona de compressão (WIGHT, MACGREGOR, 2012, p. 112 – 113).

Onde:

$f_c$  = tensão do concreto na compressão, em MPa;

$f'_c$  = tensão máxima do concreto na compressão, em MPa;

$\varepsilon_0$  = deformação específica do concreto na tensão máxima, geralmente fixado em 2‰ para concretos de densidade normal;

$\varepsilon_c$  = deformação específica do concreto na compressão.

## 6 NBR 6118:2014 – DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

Nesse capítulo é apresentado o equacionamento necessário para o dimensionamento à flexão simples e cortante de vigas retangulares conforme os critérios da NBR 6118:2014.

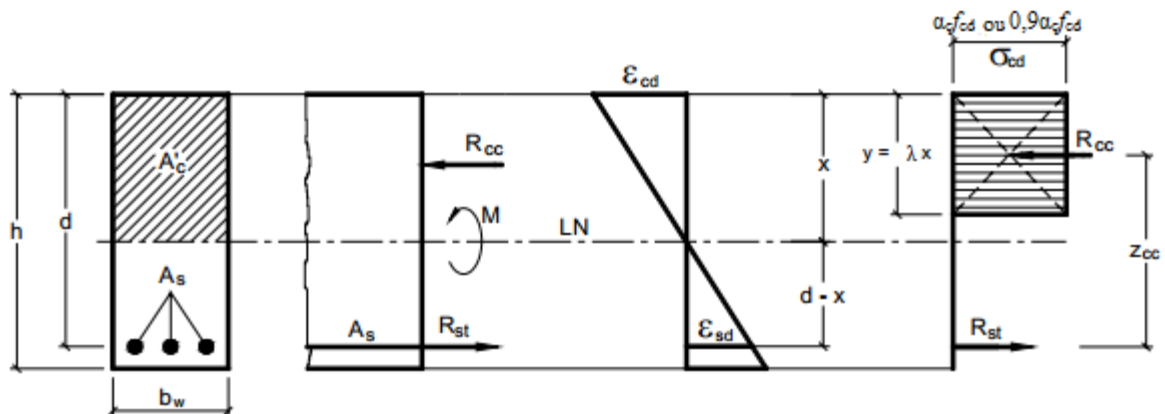
### 6.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

A seguir são deduzidas as equações para o dimensionamento à flexão simples de vigas retangulares para os casos de armadura simples e armadura dupla.

#### 6.1.1 Armadura Simples

O dimensionamento à flexão de vigas, conforme a dedução abaixo, é realizado de acordo com os critérios e considerações de projeto adotados pela Norma (ver p. 40). A figura 17 representa a distribuição de tensões no diagrama retangular simplificado e as deformações em uma viga de seção retangular com armadura simples.

Figura 17 – Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura simples



(fonte: adaptado de BASTOS, 2013, p. 9)

Considerando apenas esforços de flexão simples, para o elemento estrutural se manter no equilíbrio, deve-se igualar a força resultante de compressão do concreto ( $R_{cc}$ ) com a força resultante de tração da armadura ( $R_{st}$ ). Sabendo que a tensão num material qualquer é dada



por uma força aplicada sobre uma determinada área, os valores de  $R_{cc}$  e  $R_{st}$  são obtidos através das equações 63 e 64 respectivamente.

$$R_{cc} = \sigma_{cd}A'_c \quad (\text{equação 63})$$

$$R_{st} = \sigma_{sd}A_s \quad (\text{equação 64})$$

Sendo que:

$$A'_c = b_w(\lambda x) \quad (\text{equação 65})$$

Onde:

$R_{cc}$  = força resultante de compressão do concreto, em kN;

$\sigma_{cd}$  = tensão de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$A'_c$  = área de concreto comprimido correspondente ao diagrama retangular simplificado com altura  $\lambda x$ , em cm<sup>2</sup>;

$R_{st}$  = força resultante de tração da armadura, em kN;

$\sigma_{sd}$  = tensão de cálculo na armadura tracionada, em kN/cm<sup>2</sup>;

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$\lambda$  = relação entre a profundidade  $y$  do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva  $x$  da linha neutra;

$x$  = posição da linha neutra, em cm.

Com isso, deve-se estabelecer o equilíbrio dos momentos fletores na viga, onde o esforço causado pelo momento fletor solicitante ( $M_d$ ) deve ser equilibrado pelo momento fletor resistente de compressão do concreto e também pelo momento fletor resistente de tração proporcionado pelo aço (BASTOS, 2013). Esses momentos resistentes, cujo braço de alavanca é dado por  $z_{cc}$ , formam um binário de módulo igual ao  $M_d$ , sendo definidos pelas equações 66 e 67.

$$M_d = R_{cc} z_{cc} \quad (\text{equação 66})$$

$$M_d = R_{st} z_{cc} \quad (\text{equação 67})$$

Sendo que:

$$z_{cc} = d - \lambda x / 2 \quad (\text{equação 68})$$

Onde:

$M_d$  = momento fletor solicitante de cálculo equivalente aos momentos internos resistentes, proporcionados pelo concreto comprimido e pela armadura tracionada, em kNcm;

$z_{cc}$  = braço de alavanca do binário, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm.

Fazendo as devidas substituições nas equações acima, obtêm-se as equações 69 e 70, deduzidas a partir do momento resistente à compressão do concreto e do momento resistente à tração da armadura, respectivamente. Com a equação 69, calcula-se a posição  $x$  da linha neutra, enquanto que com a equação 70 determina-se a área de aço necessária para a viga.

$$M_d = (d - \lambda x / 2) \alpha_c f_{cd} b_w \lambda x \quad (\text{equação 69})$$

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_{sd} \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right)} \quad (\text{equação 70})$$

Onde:

$M_d$  = momento fletor solicitante de cálculo, em kNcm;

$\alpha_c$  = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>.

As equações acima estão deduzidas para os casos em que a largura da seção do elemento estrutural, medida paralelamente à linha neutra, não diminui a partir desta para a borda comprimida.

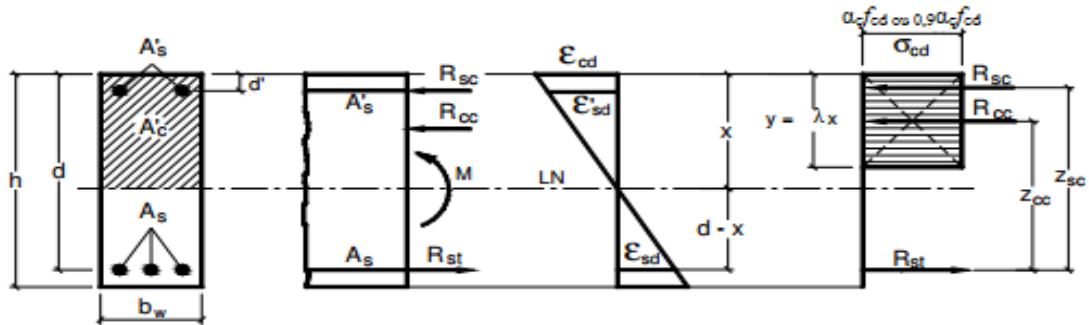
### 6.1.2 Armadura Dupla

Segundo a NBR 6118:2014, utiliza-se armadura dupla em basicamente dois casos: quando a viga pertence ao domínio 4 do estado limite último ou quando deseja-se melhorar as condições de ductilidade da viga de acordo com a limitação da linha neutra  $x/d$ .

No primeiro caso, quando não é possível alterar os parâmetros iniciais de dimensionamento, utiliza-se a armadura dupla para auxiliar o concreto na compressão e prevenir o risco de ruptura frágil sem aviso prévio por fissuração do concreto, característica do domínio 4. Casos assim geralmente ocorrem nos apoios intermediários de vigas contínuas, onde ocorrem os momentos fletores negativos que são significativamente maiores do que os momentos máximos positivos nos vãos. Dessa maneira, seriam necessárias alturas maiores da viga nos apoios, problema que é solucionado com armadura dupla. (BASTOS, 2013).

Já no segundo caso, os novos limites para a posição da linha neutra  $x/d$  que visam garantir boas condições de ductilidade, tanto nos vãos como nos apoios intermediários de vigas contínuas, faz com que seja necessário o uso de armadura de compressão. Sendo assim, o uso de armadura dupla nesse caso não se restringe apenas ao domínio 4, mas também aos domínios 2 e 3, ambos sem a ocorrência de ruptura frágil. A figura 18 representa a distribuição de tensões no diagrama retangular simplificado e as deformações em uma viga de seção retangular com armadura dupla.

Figura 18 – Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura dupla



(fonte: adaptado de BASTOS, 2013, p. 32)

Análogo aos equacionamentos de vigas com armadura simples, para os esforços de flexão simples, deve-se obter o equilíbrio das forças atuantes. No caso da armadura dupla, soma-se à equação de equilíbrio a parcela da força de compressão proporcionada pela armadura comprimida.

$$R_{st} = R_{cc} + R_{sc} \quad (\text{equação 71})$$

Sendo que:

$$R_{sc} = A'_s \sigma'_{sd} \quad (\text{equação 72})$$

Onde:

$R_{st}$  = força resultante de tração da armadura, em kN;

$R_{cc}$  = força resultante de compressão do concreto, em kN;

$R_{sc}$  = força resultante de compressão da armadura, em kN;

$A'_s$  = área de aço da armadura comprimida, em cm<sup>2</sup>;

$\sigma'_{sd}$  = tensão de cálculo na armadura comprimida, em kN/cm<sup>2</sup>.

Fazendo as devidas substituições das forças resistentes na equação 71, obtém-se a seguinte equação:

$$\sigma_{sd}A_s = \alpha_c f_{cd} b_w \lambda x + A'_s \sigma'_{sd} \quad (\text{equação 73})$$

E, estabelecendo o equilíbrio dos momentos fletores internos de compressão, tanto do concreto como da armadura, com o momento solicitante de cálculo, obtém-se a equação 74.

$$M_d = \alpha_c f_{cd} b_w \lambda x (d - \lambda x/2) + A'_s \sigma'_{sd} (d - d') \quad (\text{equação 74})$$

Onde:

$M_d$  = momento fletor solicitante de cálculo, em kNcm;

$\alpha_c$  = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$\lambda$  = relação entre a profundidade  $y$  do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva  $x$  da linha neutra;

$x$  = posição da linha neutra, em cm;

$A'_s$  = área de aço da armadura comprimida, em cm<sup>2</sup>;

$\sigma'_{sd}$  = tensão de cálculo na armadura comprimida, em kN/cm<sup>2</sup>;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$d'$  = distância da face comprimida da seção até o eixo da armadura comprimida, em cm.

Observa-se que o sistema acima possui duas equações, 73 e 74, e três incógnitas,  $x$ ,  $A'_s$  e  $A_s$ , o que o torna impossível de resolver. Porém, como o uso de armadura dupla está associado essencialmente à posição da linha neutra, deve-se fixar  $x$  no valor máximo do domínio 3,  $x_{lim}$ , ou de acordo com as limitações impostas pela Norma referentes a ductilidade da viga ( $x/d$ ), que devem ser sempre respeitadas no dimensionamento à flexão independente do domínio em que o elemento estrutural pertence.

### 6.1.3 Armadura Longitudinal de Tração Mínima

A NBR 6118:2014 determina uma armadura longitudinal mínima à tração para as vigas, calculada a partir do dimensionamento da seção sujeita a um momento fletor mínimo dado

pela equação 75. Juntamente a isso, deve-se respeitar a taxa mínima absoluta de 0,15% da área transversal de concreto da seção.

$$M_{d,\min} = 0,8W_0f_{ctk,sup} \quad (\text{equação 75})$$

Onde:

$M_{d,\min}$  = momento fletor mínimo, em kNm;

$W_0$  = módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada, em cm<sup>3</sup>;

$f_{ctk,sup}$  = resistência característica à tração superior do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

Segundo a NBR 6118:2014, a taxa mínima de armadura longitudinal,  $\rho_{\min}$ , é satisfeita se a viga respeitar os valores fixados no quadro 9, não havendo necessidade de dimensionamento do elemento ao momento fletor mínimo  $M_{d,\min}$ .

Quadro 9 – Taxas mínimas de armaduras de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^1$ ( $A_{s,\min}/A_c$ )														
	%														
$f_{ck}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256
<sup>1)</sup> Os valores de $\rho_{\min}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$ . Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{\min}$ deve ser recalculado.															

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 134)

## 6.2 DIMENSIONAMENTO AO CORTE

A NBR 6118:2014 dimensiona os elementos lineares sujeitos a esforços cortantes baseando-se na analogia da viga fissurada com uma treliça de banzos paralelos, proposta por Ritter – Morsch. A partir disso, a Norma propõem dois modelos de cálculo para o dimensionamento de vigas, ambos devendo satisfazer as seguintes verificações:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (\text{equação 76})$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} \quad (\text{equação 77})$$

Sendo que:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{Sw} \quad (\text{equação 78})$$

Onde:

$V_{Sd}$  = força cortante solicitante de cálculo na seção, em kN;

$V_{Rd2}$  = força cortante resistente de cálculo relativo à ruína à compressão diagonal do concreto, em kN;

$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo por tração diagonal, em kN;

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida pela resistência à tração do concreto, em kN;

$V_{Sw}$  = parcela de força cortante absorvida pela armadura transversal do elemento estrutural, em kN.

### 6.2.1 Modelo de Cálculo I

O modelo de cálculo I admite apenas o ângulo de  $\theta = 45^\circ$  para as diagonais de compressão do concreto (analogia da treliça) em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e admite que a parcela do concreto considerada na resistência à tração ( $V_c$ ), possui um valor constante e independente do valor de  $V_{Sd}$ . Assim, a verificação da diagonal comprimida do concreto pelo modelo I é fornecida pela equação 79:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad (\text{equação 79})$$

Sendo que:

$$\alpha_{v2} = (1 - f_{ck}/250) \quad (\text{equação 80})$$

Onde:

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$\alpha_{v2}$  = coeficiente em função da resistência do concreto;

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão, em MPa.

Já a verificação à tração da diagonal é fornecida pela equação 81:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{Sw} \quad (\text{equação 81})$$

Sendo que:

$$V_{Sw} = (A_{sw}/s)0,9df_{ywd}(\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (\text{equação 82})$$

Para os elementos estruturais tracionados em que a linha neutra se situa fora da seção, a Norma admite que  $V_c = 0$ . Nos casos de flexão simples e de flexo-tração com a linha neutra cortando a seção admite-se  $V_c = V_{c0}$ , calculado conforme a equação 83:

$$V_c = 0,6f_{ctd}b_wd \quad (\text{equação 83})$$



Sendo que:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c \quad (\text{equação 84})$$

E na flexo-compressão:

$$V_c = V_{c0}(1 + M_o/M_{sd,m\acute{a}x}) \leq 2V_{c0} \quad (\text{equação 85})$$

Onde:

$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo por tração diagonal, em kN;

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida pela resistência à tração do concreto, em kN;

$V_{sw}$  = parcela de força cortante absorvida pela armadura transversal do elemento estrutural, em kN;

$A_{sw}$  = área da seção transversal dos estribos, em cm<sup>2</sup>;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal  $A_{sw}$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$f_{ywd}$  = tensão da armadura passiva, limitada ao valor de  $f_{yd}$  e não ultrapassando o valor de 435 MPa no caso dos estribos, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de 45° à 90°;

$f_{ctd}$  = resistência à tração de cálculo do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$f_{ctk,inf}$  = resistência característica inferior à tração do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto ;

$V_{c0}$  = definido na equação 83, em kN;

$M_o$  = valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção, em kNcm;

$M_{sd,m\acute{a}x}$  = momento fletor máximo de cálculo, em kNcm.

## 6.2.2 MODELO DE CÁLCULO II

O modelo II de dimensionamento admite diagonais de compressão inclinadas de ângulo  $\theta$ , que pode variar livremente entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . Outra diferença em relação ao modelo I, é a redução da parcela que o concreto absorve da força cortante por tração  $V_c$  conforme aumenta a sollicitação  $V_{sd}$ . Assim, a verificação da diagonal comprimida do concreto é dada pela equação 86:

$$V_{Rd2} = 0,54\alpha_{v2}f_{cd}b_wd\text{sen}^2\theta(\text{cotg}\alpha + \text{cotg}\theta) \quad (\text{equação 86})$$

Onde:

$V_{Rd2}$  = força cortante resistente de cálculo relativo à ruína à compressão diagonal do concreto, em kN;

$\alpha_{v2}$  = coeficiente em função da resistência do concreto;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$\theta$  = ângulo de inclinação das bielas de compressão consideradas no dimensionamento à força cortante;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de  $45^\circ$  à  $90^\circ$ .

Para a verificação da ruína por tração diagonal, a NBR 6118:2014 define a equação 87:

$$V_{Rd3} = V_c + V_{Sw} \quad (\text{equação 87})$$

Sendo que:

$$V_{Sw} = (A_{sw}/s)0,9df_{ywd}(\text{ctoga} + \text{cotg}\theta)\text{sen}\alpha \quad (\text{equação 88})$$

Onde:

$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo por tração diagonal, em kN;

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida pela resistência à tração do concreto, em kN;

$V_{sw}$  = parcela de força cortante absorvida pela armadura transversal do elemento estrutural, em kN;

$A_{sw}$  = área da seção transversal dos estribos, em  $\text{cm}^2$ ;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal  $A_{sw}$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$f_{ywd}$  = tensão da armadura passiva, limitada ao valor de  $f_{yd}$  e não ultrapassando o valor de 435 MPa no caso dos estribos, em  $\text{kN}/\text{cm}^2$ ;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de  $45^\circ$  à  $90^\circ$ ;

$\theta$  = ângulo de inclinação das bielas de compressão consideradas no dimensionamento à força cortante.

Como no modelo I, para os elementos estruturais tracionados em que a linha neutra se situa fora da seção, a Norma define  $V_c = 0$ . Nos casos de flexão simples e de flexo-tração com a linha neutra cortando a seção,  $V_c$  é calculado conforme a equação 89:

$$V_c = V_{c1} \quad (\text{equação 89})$$

E na flexo-compressão conforme a equação 90, satisfazendo a condição limite:

$$V_c = V_{c1} (1 + M_o/M_{sd,\text{máx}}) < 2V_{c1} \quad (\text{equação 90})$$

Sendo que, quando  $V_{sd} \leq V_{c0}$ ,  $V_{c1}$  é calculado pela equação 91:

$$V_{c1} = V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd \quad (\text{equação 91})$$

E para o caso de  $V_{sd} = V_{Rd2}$ , define-se  $V_{c1} = 0$ , interpolando-se linearmente para valores intermediários.

Onde:

$V_c$  = parcela de força cortante absorvida pela resistência à tração do concreto, em kN;

$V_{c1}$  = definido nas condições acima, em kN;

$M_o$  = valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção, em kNcm;

$M_{sd,máx}$  = momento fletor máximo de cálculo, em kNcm;

$V_{c0}$  = definido na equação 91, em kN;

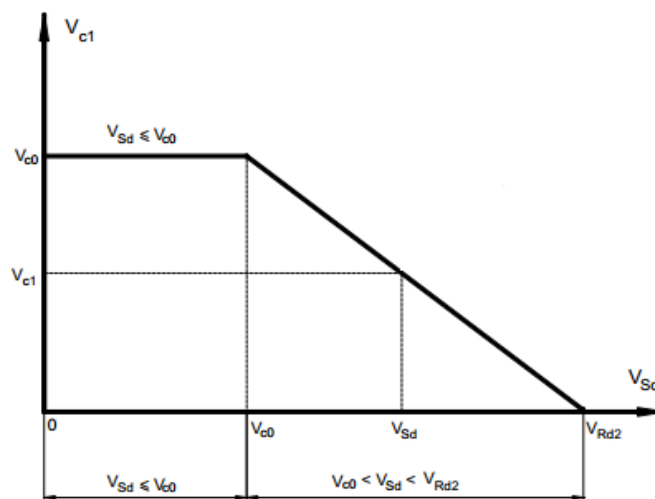
$f_{ctd}$  = resistência à tração de cálculo do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm.

A figura 19 ilustra as condições de cálculo descritas acima para a obtenção do valor de  $V_{c1}$ .

Figura 19 – Gráficos demonstrativos da variação entre  $V_{c1}$  e  $V_{Sd}$



(fonte: adaptado de BASTOS, 2008, p. 43)

### 6.2.3 Armadura Transversal Mínima

Segundo Garcia (2002, p. 55), a armadura mínima transversal em vigas tem como função atender pelo menos um dos seguintes objetivos:

- fazer com que, na eventualidade da existência de sobrecargas não previstas, as vigas não apresentem ruptura brusca assim que ocorra a fissuração diagonal;
- limitar a inclinação das bielas e a abertura de fissuras inclinadas;
- evitar flambagem da armadura longitudinal comprimida.

No caso das vigas submetidas a forças cortantes, deve-se respeitar a armadura transversal mínima constituída por estribos, com taxa geométrica definida pela equação 92.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s (\text{sen}\alpha)} \geq 0,2 \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}} \quad (\text{equação 92})$$

Onde:

$\rho_{sw}$  = taxa geométrica de armadura transversal;

$A_{sw}$  = área da seção transversal dos estribos, em cm<sup>2</sup>;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal  $A_{sw}$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, em cm;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de 45° à 90°;

$f_{ct,m}$  = resistência média à tração do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$f_{ywk}$  = tensão da armadura passiva, limitada ao valor de 500 MPa no caso dos estribos, em kN/cm<sup>2</sup>.

## 7 ACI 318-08 – DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

Nesse capítulo é apresentado o equacionamento necessário para o dimensionamento à flexão simples e cortante de vigas retangulares conforme os critérios da ACI 318-08.

### 7.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES

Para o cálculo de dimensionamento à flexão simples de vigas, três princípios básicos são admitidos para o comportamento do elemento estrutural. Segundo Wight e MacGregor (2012, p. 111), esses princípios são:

- a) as seções transversais que são perpendiculares ao eixo de flexão continuam planas antes e após a flexão;
- b) a deformação específica da armadura é igual a deformação do concreto, pois ambos os materiais devem trabalhar de maneira conjunta dado um carregamento;
- c) as tensões do aço e do concreto podem ser obtidas através das deformações dos materiais, usando as curvas tensão-deformação de cada material.

#### 7.1.1 Armadura Simples

Para o dimensionamento de vigas a esforços de flexão, a ACI 318:08 determina que se satisfaça a seguinte condição:

$$\phi (M_n) \geq M_u \quad (\text{equação 93})$$

Onde:

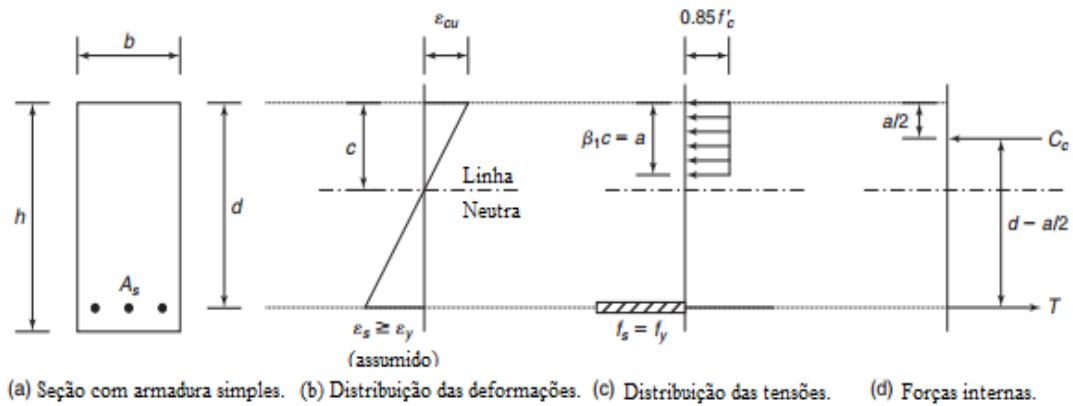
$\phi$  = fator de redução de resistência;

$M_n$  = momento resistente nominal da viga, em kNcm;

$M_u$  = momento requerido atuante na viga, em kNcm.

Deste modo, as formulações para essa verificação podem ser obtidas a partir do modelo simplificado retangular de distribuição de tensões do concreto, ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Passos da análise de  $M_n$  para seções retangulares com armadura simples



(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 113)

A partir desse modelo, são assumidas as seguintes hipóteses (WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 122):

- a tensão máxima de compressão assumida de  $0,85f_c'$  deve ser distribuída uniformemente na zona comprimida da viga, delimitada lateralmente pelas bordas da seção e com altura total partindo da fibra mais comprimida do concreto até a profundidade  $a = \beta_1 c$ ;
- a distância  $c$ , que parte da fibra mais comprimida do concreto até o eixo linha neutra, é medida perpendicularmente a esse eixo;

O fator  $\beta_1$  é calculado conforme as seguintes condições impostas pela ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 130):

- para concretos com  $f_c' \leq 28$  MPa, utiliza-se a equação 94:

$$\beta_1 = 0,85 \quad (\text{equação 94})$$

- para concretos com resistências entre  $28 \text{ MPa} < f_c' \leq 55 \text{ MPa}$ :

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f_c' - 28}{7} \quad (\text{equação 95})$$

- para concretos com resistências acima de 55 MPa:

$$\beta_1 = 0,65 \quad (\text{equação 96})$$

Onde:

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Já as forças internas atuantes de compressão do concreto e tração da armadura, são dadas pelas equações 97 e 98, respectivamente (WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 125):

$$C_c = 0,85f_c' b\beta_1 c = 0,85f_c' ba \quad (\text{equação 97})$$

$$T = A_s f_y \quad (\text{equação 98})$$

Onde:

$C_c$  = força resultante de compressão do concreto, em kN;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b$  = largura da viga, em cm;

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto;

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm;

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em cm;

$T$  = força resultante de tração da armadura, em kN;

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência característica à tração do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

Igualando as equações 97 e 98, condição necessária para se manter o equilíbrio do elemento estrutural, e isolando a incógnita  $a$ , obtém-se a equação 99:



$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b} \quad (\text{equação 99})$$

Sendo que:

$$a = \beta_1 c \quad (\text{equação 100})$$

Onde:

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em cm;

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência característica à tração do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b$  = largura da viga, em cm;

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto;

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm.

Sabendo que as forças internas atuantes na seção, compressão e tração, multiplicadas pela distância entre si (braço de alavanca), formam um binário de módulo igual ao momento resistente nominal da peça, obtém-se a equação 101.

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (\text{equação 101})$$

Onde:

$M_n$  = momento resistente nominal da viga, em kNcm;

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência característica à tração do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm.

Assim, satisfazendo a condição da equação 93 e substituindo o braço de alavanca da equação resultante pelas incógnitas  $jd$ , obtém-se a equação 103 (WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 204-205):

$$A_s \geq \frac{M_u}{\phi f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)} \quad (\text{equação 102})$$

$$A_s \geq \frac{M_u}{\phi f_y j d} \quad (\text{equação 103})$$

Onde:

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em  $\text{cm}^2$ ;

$M_u$  = momento requerido atuante na viga, em  $\text{kNcm}$ .

$\phi$  = fator de redução de resistência;

$f_y$  = resistência característica à tração do aço, em  $\text{kN/cm}^2$ ;

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em  $\text{cm}$ ;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em  $\text{cm}$ ;

$j$  = parâmetro para o dimensionamento.

Primeiramente, inicia-se o dimensionamento da viga calculando o  $A_s$  através da equação 103. Para isso, é necessário estimar as incógnitas  $j$  e  $\phi$ . De acordo com Wight e MacGregor (2012, p. 204), para taxas usuais de armadura em vigas retangulares os valores de  $j$  variam entre 0,87 e 0,91, sendo que para iniciar o processo iterativo e obter uma boa aproximação da área de aço, utiliza-se 0,90. Esse valor inicial de  $j$  remete a uma seção de viga considerada tracionada (ideal para vigas retangulares), com maior exigência do aço e, portanto, estima-se  $\phi = 0,90$ . Com a área de armadura calculada, aplica-se o resultado na equação 102 para calcular o valor de  $a$ . Após isso, refina-se o valor da área de aço utilizando a equação 99, onde é confirmado o  $A_s$  para a viga.

É importante lembrar que deve-se fazer a verificação da hipótese de seção tracionada estipulada anteriormente. Assim, com o  $A_s$  já calculado, define-se a armadura efetiva da viga

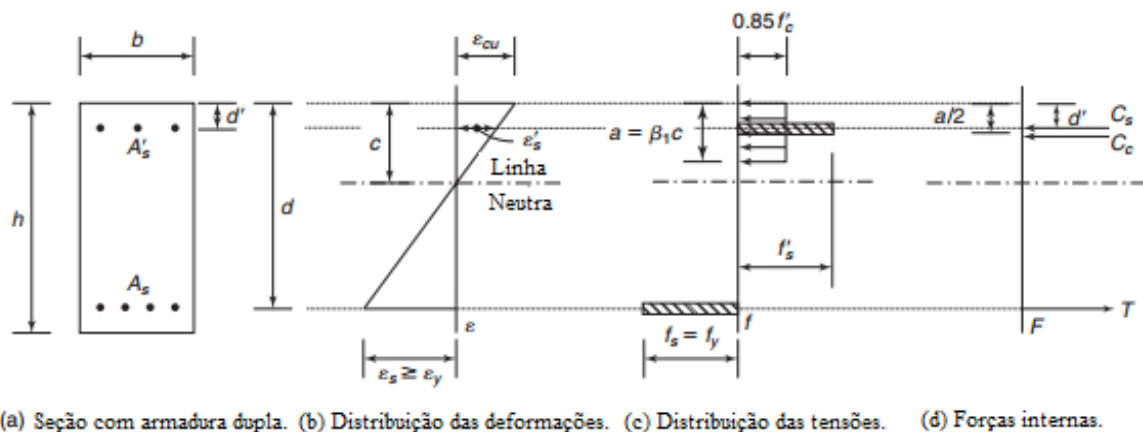
e calcula-se novamente o valor de  $a$  pela equação 99 e, posteriormente, a posição da linha neutra pela equação 100. Para a hipótese ser aceita,  $c$  deve ser igual ou menor que  $0,375d_t$  (ver p. 58-59).

### 7.1.2 Armadura Dupla

A utilização de armadura dupla no dimensionamento pela Norma Americana está relacionada mais ao desempenho da viga do que um aumento na sua resistência nominal. De acordo com Wight e MacGregor (2012, p. 144-145), há 4 razões básicas para se fazer o uso de armadura de compressão em vigas: redução da flecha, aumento da ductilidade, mudança no modo de ruptura e auxílio para a colocação da armadura transversal.

As distribuições de deformações e de tensões no diagrama retangular simplificado para armadura dupla, são basicamente as mesmas para o caso de armadura simples. Porém, acrescenta-se a parcela resistente de compressão da armadura dupla, conforme mostra a figura 21.

Figura 21 – Passos da análise de  $M_n$  para seções retangulares com armadura dupla



(fonte: adaptado de WIGHT; MACGREGOR, 2012, p. 146)

A força interna de compressão proporcionada pelo concreto é a mesma para armadura simples, fornecida pela equação 104:

$$C_c = 0,85f_c' b\beta_1 c = 0,85f_c' ba \quad (\text{equação 104})$$

Já a força resistente de compressão proporcionada pela armadura, é fornecida pela equação 105:

$$C_s = A_s'(f_s' - 0,85f_c') \quad (\text{equação 105})$$

Sendo a tensão  $f_s'$  expressa por:

$$f_s' = E_s \varepsilon' \leq f_y \quad (\text{equação 106})$$

Onde:

$C_c$  = força resultante de compressão do concreto, em kN;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b$  = largura da viga, em cm;

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto;

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm;

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em cm;

$C_s$  = força resultante de compressão da armadura, em kN;

$A_s'$  = área de aço da armadura comprimida, em cm<sup>2</sup>;

$f_s'$  = tensão na armadura comprimida, em kN/cm<sup>2</sup>;

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\varepsilon'$  = deformação específica na armadura comprimida;

$f_y$  = resistência característica à tração do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

Fazendo o equilíbrio de forças conforme a equação 107 e substituindo os termos, obtém-se a equação 108:

$$T = C_c + C_s \quad (\text{equação 107})$$

$$A_s f_y = 0,85 f_c' b \beta_1 c + A_s' (f_s' - 0,85 f_c') \quad (\text{equação 108})$$

Onde:

$T$  = força resultante de tração da armadura, em kN;

$A_s$  = área de aço da armadura tracionada, em cm<sup>2</sup>;

Como se pode observar,  $C_c$  tem uma parcela menor de contribuição no equilíbrio de forças do que para o caso de armadura simples, pois agora há a parcela de contribuição da armadura de compressão. Assim, a profundidade da zona de compressão do concreto na distribuição de tensões,  $a$ , diminui, reduzindo o valor da posição da linha neutra  $c$  e conseqüentemente proporcionando um comportamento mais dútil da viga. Esse é um dos principais objetivos dos projetistas no uso da armadura dupla, pois uma viga dimensionada com armadura simples e considerada um elemento de compressão ou transição, segundo a classificação da norma, com a redução de  $c$  pode passar a ser considerada de tração, que é o comportamento desejável de uma viga. Dessa maneira, altera-se o modo de rompimento da viga, pois se ela for um elemento de compressão ou transição, não há escoamento da armadura de tração e apenas o rompimento sem aviso prévio do concreto, enquanto que com a armadura dupla, o aço tracionado escoava ( $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ ) antes do rompimento do concreto.

Já o valor do momento resistente da viga é determinado pela equação 109:

$$M_n = (0,85 f_c' b \beta_1 c) \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' (f_s' - 0,85 f_c') (d - d') \quad (\text{equação 109})$$

Onde:

$M_n$  = momento resistente nominal da viga, em kNcm;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em kN/cm<sup>2</sup>;

$b$  = largura da viga, em cm;

$\beta_1$  = fator de ponderação em decorrência da resistência do concreto;

$c$  = distância da última fibra comprimida até a linha neutra, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$a$  = profundidade da zona de compressão do concreto no diagrama simplificado retangular, em cm;

$A_s'$  = área de aço da armadura comprimida, em cm<sup>2</sup>;

$f_s'$  = tensão na armadura comprimida, em kN/cm<sup>2</sup>;

$d'$  = distância da face comprimida da seção até o eixo da armadura comprimida, em cm.

Para o dimensionamento através das equações de armadura dupla, deve-se estimar a posição da linha neutra entre  $d/4$  e  $d/3$  (WIGHT; MACGREGOR, 2012 p. 150). Sempre após os cálculos de  $A_s$  e  $A_s'$ , deve-se verificar se o tipo de seção considerada para se obter o valor de  $\phi$ .

### 7.1.3 Armadura Longitudinal de Tração Mínima

De acordo com a ACI 318-08, deve-se respeitar a área de aço mínima para elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, determinada pela equação 110:

$$A_{s,\min} = \frac{(0,25\sqrt{f_c'})b_w d}{f_y} \quad (\text{equação 110})$$

Sendo que:

$$A_{s,\min} \geq \frac{1,4b_w d}{f_y} \quad (\text{equação 111})$$

Onde:

$A_{s,\min}$  = área de aço mínima para elementos sujeitos à flexão, em cm<sup>2</sup>;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;  
 $f_y$  = resistência característica à tração do aço, em MPa.

## 7.2 DIMENSIONAMENTO AO CORTE

O dimensionamento de vigas submetidas à esforços cortantes deve satisfazer a seguinte equação (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008, p. 155):

$$\phi (V_n) \geq V_u \quad (\text{equação 112})$$

Sendo que:

$$V_n = V_c + V_s \quad (\text{equação 113})$$

Onde:

$\phi$  = fator de redução de resistência;

$V_n$  = esforço cortante nominal resistente da viga, em kN;

$V_u$  = esforço cortante requerido atuante na viga, em kN;

$V_c$  = esforço cortante nominal resistente proveniente do concreto, em kN;

$V_s$  = esforço cortante nominal resistente proveniente da armadura, em kN.

Para vigas em que atuam somente esforços cortante e de flexão, a Norma define  $V_c$  de acordo com a equação 114:

$$V_c = 0,17\lambda(\sqrt{f_c'})b_wd \quad (\text{equação 114})$$

Onde:

$V_c$  = esforço cortante nominal resistente proveniente do concreto, em N;

$\lambda$  = constante de ponderação em relação à densidade do concreto utilizado;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

$b_w$  = largura da viga, em mm;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em mm.

Em relação a armadura utilizada na viga, a Norma contempla as seguintes configurações:

- a) estribos fazendo um ângulo de 45° ou mais em relação ao eixo da viga;
- b) fios de aço soldados dispostos perpendicularmente ao eixo da viga;
- c) espirais e laços circulares.

Nesse trabalho, são demonstrados apenas os equacionamentos e considerações para vigas armadas com estribos, pois é o tipo utilizado no Brasil. Assim, a porção resistente ao corte da armadura  $V_s$ , é calculada conforme a equação 115.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} (\sen \alpha + \cos \alpha) d}{s} \quad (\text{equação 115})$$

Onde:

$V_s$  = esforço cortante nominal resistente proveniente da armadura, em kN;

$A_v$  = área da seção transversal dos estribos, em cm<sup>2</sup>;

$f_{yt}$  = resistência característica à tração do aço, não excedendo 420 MPa, em kN/m<sup>2</sup>;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da viga, podendo variar de 45° à 90°;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal  $A_s$ , medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural em cm;

Sendo que  $V_s$  deve satisfazer a equação 116:

$$V_s \leq 0,66(\sqrt{f_c'}) b_w d \quad (\text{equação 116})$$

Onde:

$V_s$  = esforço cortante nominal resistente proveniente da armadura, em N;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

$b_w$  = largura da viga, em mm;



$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em mm;

Substituindo a equação 115 na condição de dimensionamento da equação 112, e, atribuindo a  $\alpha = 90^\circ$  para que os estribos sejam perpendiculares ao eixo da viga, obtém-se a equação 117, que fornece diretamente a armadura necessária:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_{yt} d} \quad (\text{equação 117})$$

Onde:

$A_v$  = área da seção transversal dos estribos, em cm<sup>2</sup>;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, em cm;

$V_u$  = esforço cortante requerido atuante na viga, em kN;

$\phi$  = fator de redução de resistência;

$V_n$  = esforço cortante nominal resistente da viga, em kN;

$f_{yt}$  = resistência característica à tração do aço, não excedendo 420 MPa, em kN/cm<sup>2</sup>;

$d$  = distância da face mais comprimida da seção até o eixo da armadura tracionada, em cm.

### 7.2.1 Armadura Transversal Mínima

De acordo com a ACI 318:08, quando  $V_u$  exceder o valor de  $0,5\phi V_c$ , deve-se adotar uma armadura mínima, exceto para os casos em que a viga satisfaça um ou mais itens a seguir:

- a) vigas com altura menores que 25 cm;
- b) vigas integradas com a laje, vigas T, com altura menor que 60 cm e menor que 2,5 vezes o tamanho da espessura da mesa, e 0,5 vezes a largura da alma;
- c) vigas construídas com concreto de densidade normal reforçado com de fibras de aço e não ultrapassando 40 MPa de resistência à compressão, com altura menor que 60 cm e  $V_c$  não maior que  $\phi 0,17\sqrt{f'_c} b_w d$ .

Atendendo as condições de armadura mínima e desconsiderando os efeitos de torsão, o  $A_{v,min}$  é calculado conforme a equação 118:

$$A_{v,\min} = 0,062\sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (\text{equação 118})$$

Sendo que:

$$A_{v,\min} \geq \frac{0,35b_w s}{f_{yt}} \quad (\text{equação 119})$$

Onde:

$A_{v,\min}$  = área da seção transversal mínima dos estribos, em cm<sup>2</sup>;

$f_c'$  = resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

$b_w$  = largura da viga, em cm;

$s$  = espaçamento dos elementos da armadura transversal, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, em cm;

$f_{yt}$  = resistência característica à tração do aço, não excedendo 420 MPa, em MPa.

## 8 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO PROPOSTO

Para a análise dos resultados, foram padronizados 3 seções (base x altura) diferentes de vigas biapoiadas: 20 cm x 40 cm, 20 cm x 50 cm e 20 cm x 60 cm. Em todas as situações de cálculo, o cobrimento adotado para a seção foi de acordo com a NBR 6118:2014, com classe de agressividade ambiental I e igual a 2,5 cm. Os cálculos foram realizados em planilha *Excel*, e para melhor visualização dos resultados, plotados em gráficos com o valor de  $f_{ck}$  fixo, variando os esforços atuantes no eixo das abscissas e a área de aço necessária no eixo das ordenadas.

### 8.1 CONCRETOS DO GRUPO I – NBR 6118:2007 E NBR 6118:2014

Para os concretos do grupo I, os resultados obtidos estão apresentados nos apêndices A, B e C.

#### 8.1.1 Considerações iniciais para a análise

Para cada seção de viga proposta foram determinadas as áreas de aço, tanto na flexão simples como nos esforços cortantes, para as resistências características à compressão do concreto de 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa. Já para o aço, foi utilizado o CA50, com resistência ao escoamento de 500 MPa, sendo que os coeficientes de ponderação de resistência, foram estipulados conforme os valores de carregamento normal.

Em relação aos esforços atuantes na flexão simples, o intervalo escolhido para o valor característico  $M_k$  foi determinado de acordo com um ou mais dos seguintes critérios, para ambas as Normas:

- a) valor mínimo do intervalo com a seção pertencente ao domínio 2, e o valor máximo ao domínio 4;
- b) valor mínimo do intervalo com a seção pertencente ao domínio 2, e o valor máximo de acordo com a taxa máxima admitida de armadura de 4%;

Já para os esforços cortantes, os cálculos foram realizados apenas de acordo com o Modelo I de dimensionamento, sendo que o valor mínimo do intervalo de  $V_k$  deve satisfazer a condição  $V_{sw} > 0$  e o valor máximo não causar o rompimento das bielas comprimidas ( $V_{rd2} \geq V_{sd}$ ), também para ambas as Normas.

### 8.1.2 Considerações finais

Analisando os cálculos das seções submetidas à flexão simples, como visto no decorrer do trabalho, não houve mudanças nos parâmetros de dimensionamento para concretos de até 50 MPa, mantendo-se os mesmos limites de deformações  $\epsilon_{c2}$  e  $\epsilon_{cu}$ , e assim não ocasionando mudanças na classificação do elemento estrutural quanto ao seu domínio do estado limite último. Apesar de modificados os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha_c$  para o dimensionamento à flexão com concretos de alta resistência, estes se mantiveram com os mesmos valores constantes, 0,80 e 0,85 respectivamente, não ocorrendo diferenças no consumo de aço em relação à Norma de 2007.

Porém, a NBR 6118:2014 implementou uma importante mudança em relação aos critérios de projeto adotados. A nova Norma estipula um novo limite para a posição da linha neutra, através da relação  $x/d$  válida tanto para os apoios intermediários de vigas contínuas como para os vãos, ao contrário da NBR 6118:2007 que determinava essa relação apenas para os apoios intermediários de vigas contínuas. Com isso, observa-se nos gráficos gerados que a NBR 6118:2014 atinge a condição de armadura dupla sempre antes que a NBR 6118:2007, pois o limite  $x/d = 0,45$  é mais rigoroso que o limite  $x_{lim} = 0,628d$ , garantindo melhores condições de utilidade do elemento estrutural. Além disso, nota-se o uso da armadura comprimida nos domínios 3 e 4, condição que anteriormente se verificava apenas no domínio 4 nos vãos das vigas. Assim, pode-se concluir que, no instante em que a NBR 6118:2014 atinge a condição de armadura dupla, passa a ter um consumo maior de aço em relação à NBR 6118:2007, com aumentos de até 7,31% na área de aço total necessária. Outra mudança importante da NBR 6118:2014, são os valores de taxas mínimas de armadura longitudinal tracionada, que tiveram seus valores reajustados de maneira mais econômica a partir do  $f_{ck}$  de 30 MPa.

No dimensionamento das seções para esforços cortantes, não houve diferença no consumo de aço em todos os casos analisados, pois os critérios e o equacionamento para o cálculo da armadura necessária permanecem os mesmos em relação à NBR 6118:2007. Além disso, as

equações em relação à resistência à tração do concreto, também permanecem inalteradas para  $f_{ck}$  até 50 MPa, importante propriedade para o dimensionamento ao corte.

## 8.2 CONCRETOS DO GRUPO II – NBR 6118:2014 E ACI 318-08

Para os concretos do grupo II, os resultados obtidos estão apresentados nos apêndices A, B e C.

### 8.2.1 Considerações iniciais para a análise

Para cada seção de viga proposta foram determinadas as áreas de aço, tanto na flexão simples como nos esforços cortantes, para as resistências características à compressão do concreto de 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa e 90 MPa. Já para o aço, foi utilizado o CA-50, com resistência ao escoamento de 500 MPa.

Devido as diferentes abordagens da Norma Brasileira e Americana em relação às combinações de cargas de projeto, foi necessário considerar a carga total, tanto para os esforços de momento como de cortante, composta por 80% de carga permanente e 20% por carga acidental. Assim, de acordo com a NBR 6118:2014 o coeficiente de majoração de esforços para essa combinação simples de cargas permanente e acidental, é igual a 1,4. Já para a ACI 318-08, essa combinação de cargas possui coeficientes distintos de acordo com a natureza da carga, sendo a permanente multiplicada pelo fator 1,4 e a acidental pelo fator 1,7. Dessa maneira, o coeficiente resultante de majoração dos esforços característicos pela Norma Americana torna-se 1,46.

Outra consideração importante para a validação dos resultados são os critérios de projeto adotados pelo projetista. Em todos os casos de dimensionamento pela ACI 318-08, a seção foi classificada como tracionada, ou seja, limitou-se a linha neutra no valor de  $0,375d_t$  e foi fixado o coeficiente  $\phi$  igual a 0,90. De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, esse é o melhor comportamento para elementos de vigas, além de ter o limite da linha neutra semelhante com o da NBR 6118:2014 na relação  $x/d = 0,35$ . Na flexão simples, quando os esforços de momento tornaram-se muito altos e a linha neutra ultrapassou o limite  $0,375d_t$ , acrescentou-se armadura dupla para se obter uma melhor utilidade do elemento estrutural. Para isso, foi fixado o valor da linha neutra entre  $d/3$  e  $d/4$ , seguindo as recomendações dos

autores. Já na NBR 6118:2014, os coeficientes de ponderação de resistência, tanto do concreto como do aço, foram determinados conforme os valores de carregamento normal.

Em relação aos esforços atuantes na flexão simples, o intervalo escolhido para o valor característico  $M_k$  foi determinado de acordo com um ou mais dos seguintes critérios, para ambas as Normas:

- a) valor mínimo do intervalo com a seção pertencente ao domínio 2, e o valor máximo ao domínio 4, segundo a NBR 6118:2014;
- b) valor mínimo do intervalo com a seção pertencente ao domínio 2, e o valor máximo de acordo com a taxa máxima admitida de armadura de 4%, segundo a NBR 6118:2014;

Já para os esforços cortantes, os cálculos da NBR 6118:2014 foram realizados apenas de acordo com o Modelo I de dimensionamento, sendo que o valor mínimo do intervalo de  $V_k$  deve satisfazer as condições  $V_{sw} > 0$  e  $V_s > 0$  o valor máximo não causar o rompimento das bielas comprimidas ( $V_{rd2} \geq V_{sd}$ ) e também satisfazer a condição  $\phi(V_n) \geq V_u$ .

### 8.2.2 Considerações finais

O comportamento das duas Normas para as diferentes seções de vigas e  $f_{ck}$ , conforme foi aumentando gradualmente o momento característico, obteve resultados semelhantes em todos os casos calculados. Pode-se generalizar que, a NBR 6118:2014 atinge a condição de armadura dupla antes da ACI 318-08, e praticamente sempre com valores maiores de  $A_s'$  e  $A_s$  nesses casos. Apenas para a viga de dimensões 20 cm x 40 cm e com  $f_{ck}$  60 MPa, a Norma Americana teve maior consumo na área de aço da armadura dupla, porém já diminuindo o consumo em relação a Norma Brasileira no  $f_{ck}$  de 70 MPa. Para os consumos de armadura tracionada nos casos de armadura simples, as Normas tiveram resultados muito semelhantes, os quais a ACI 318-08 mostrou-se com até 4,11 % menos área de aço em relação à NBR 6118:2014.

Mesmo com a redução da posição do  $x_{lim}$ , devido a redução do  $\epsilon_{cu}$  para concretos de alta resistência, conforme aumentou-se o  $f_{ck}$ , em todos os casos a NBR 6118:2014 atingiu a taxa máxima de 4% de aço antes mesmo de atingir o domínio 4 de deformações, situação que não se verifica nos concretos do grupo I. Isso pode ser observado a partir do  $f_{ck}$  80 MPa para as vigas 20 cm x 40 cm e 20 cm x 50 cm, e a partir do  $f_{ck}$  70 MPa para as vigas de 20 cm x 60

cm. Um dos motivos são os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha_c$ , responsáveis pela altura do retângulo de tensões do diagrama tensão-deformação idealizado e pela redução do valor da tensão máxima do concreto, respectivamente, que diminuem os seus valores conforme aumenta a resistência à compressão. Assim, é reduzida a contribuição do concreto no equilíbrio de forças do diagrama de distribuição de tensões, visto no capítulo 6, e aumentada a contribuição do aço no equilíbrio.

Outro motivo é atribuído ao limite da posição da linha neutra imposto pela nova Norma, relação  $x/d = 0,35$ , mais rigoroso que nos concretos do grupo I de resistências, condicionando o elemento estrutural a utilizar armadura de compressão para momentos fletores menores, a fim de se obter melhores condições de ductilidade através do aumento da taxa de aço. Como a taxa máxima da NBR 6118:2014 era um dos limitantes para a escolha do intervalo dos valores de momentos fletores característicos, observa-se que para altas resistências a ACI 318-08 nem utilizou armadura dupla. Portanto, para os casos de armadura dupla, a Norma Americana obteve um consumo com até 22,89 % menos área de aço total em relação à Norma Brasileira.

Para o dimensionamento ao corte, as Normas apresentaram resultados bastante distintos. Em todos os casos de dimensionamento, o valor máximo do intervalo analisado de  $V_k$ , foi decorrente da não verificação da condição  $\phi(V_n) \geq V_u$  pela ACI 318-08, sendo esse valor muito inferior ao máximo suportado pela NBR 6118:2014 no rompimento das bielas comprimidas do concreto. Além dos diferentes coeficientes de ponderação de resistências e dos esforços atuantes entre as Normas, há também o limite admitido para a resistência característica ao escoamento do aço dos estribos, sendo de 500 MPa para a NBR 6118:2014 e 420 MPa para a ACI 318-08. A limitação do valor de  $V_s$  na ACI 318 também limita muito a resistência do elemento aos esforços cortantes, limitação que não há na Norma Brasileira. Observa-se também que, para uma mesma seção de viga e a partir da resistência à compressão de 70 MPa, não há mudança na resistência nominal do elemento estrutural, consequência da limitação imposta pela Norma Americana do valor de  $\sqrt{f_c}$  em 8,3 MPa para concretos a partir de 70 MPa de resistência.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E. A. B.; PINHEIRO, L. M. Pilares de Concreto de Alto Desempenho: particularidades sobre o projeto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos-SP, v. 10, n. 42, p. 111-127, 2008. Disponível em: <[http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova\\_versao/pdf/cee42.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee42.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, MI/USA, 2008.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010, v. 1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL. **Manual do Concreto Dosado em Central**. São Paulo, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento portland – preparo, controle e recebimento – procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BASTOS, P. S. **Flexão Normal Simples**: vigas. Bauru, 2013. Apostila da disciplina 2117 – UNESP. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2014.
- \_\_\_\_\_. **Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado à Força Cortante**. Bauru, 2008. Apostila da disciplina 1309 – UNESP. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2014.
- CAMPOS FILHO, A. **Dimensionamento de Seções Retangulares de Concreto Armado à Flexão Composta Normal**. Porto Alegre, 2014. Apostila da disciplina ENG 1112 – UFRGS. Disponível em <[http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/solicitacoes\\_normais.pdf](http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/solicitacoes_normais.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto**: solicitações normais. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- \_\_\_\_\_. **Tecnologia do Concreto Estrutural**: tópicos aplicados. 1 ed. São Paulo: Pini, 2008.
- GARCIA, S. L. G. **Taxa de Armadura Transversal Mínima em Vigas de Concreto Armado**. 2002. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós – Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 905-944. v. 2.
- HERVÉ NETO, P. E. **A Nova Engenharia do Concreto**. São Paulo, 2002. Disponível em: <[http://www.ventuscore.com.br/artigos.htm#A Nova Engenharia do Concreto](http://www.ventuscore.com.br/artigos.htm#A%20Nova%20Engenharia%20do%20Concreto)>. Acesso em: 25 out. 2013.



NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed, São Paulo: Pini, 1997.

NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design of Concrete Structures**. 14<sup>th</sup> ed. New York-USA: McGraw-Hill, 2010.

WIGHT, J. K; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: mechanics & design**. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey-USA: Pearson Education, 2012.

## **APÊNDICE A – Resultados das vigas com seção 20x40**

Quadro A1 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	107
	$x$ calculado (cm)	7,66	8,88	10,15	11,47	12,84	14,27	15,78	17,36	19,04	20,84	22,78	24,91	27,29	30,05	35,13
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	7,66	8,88	10,15	11,47	12,84	14,27	15,78	17,36	19,04	20,84	22,61	22,61	22,61	22,61	22,61
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,42	3,97	4,54	5,13	5,74	6,38	7,05	7,76	8,51	9,31	10,14	10,64	11,14	11,63	12,32
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,54	1,03	1,53	2,22
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	3,42	3,97	4,54	5,13	5,74	6,38	7,05	7,76	8,51	9,31	10,19	11,18	12,17	13,16	14,55
	Taxa (%)	0,43	0,50	0,57	0,64	0,72	0,80	0,88	0,97	1,06	1,16	1,27	1,40	1,52	1,64	1,82
	$A_{s\min}$ (cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
	$V_{rd2}$ (kN)	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50
	$V_c$ (kN)	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75
	$V_{sw}$ (kN)	8,25	22,25	36,25	50,25	64,25	78,25	92,25	106,25	120,25	134,25	148,25	162,25	176,25	190,25	204,25
	$V_{rd3}$ (kN)	56,00	70,00	84,00	98,00	112,00	126,00	140,00	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,59	1,58	2,57	3,57	4,56	5,56	6,55	7,54	8,54	9,53	10,52	11,52	12,51	13,51	14,50
	$A_{sw\min}$ (cm <sup>2</sup> )	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

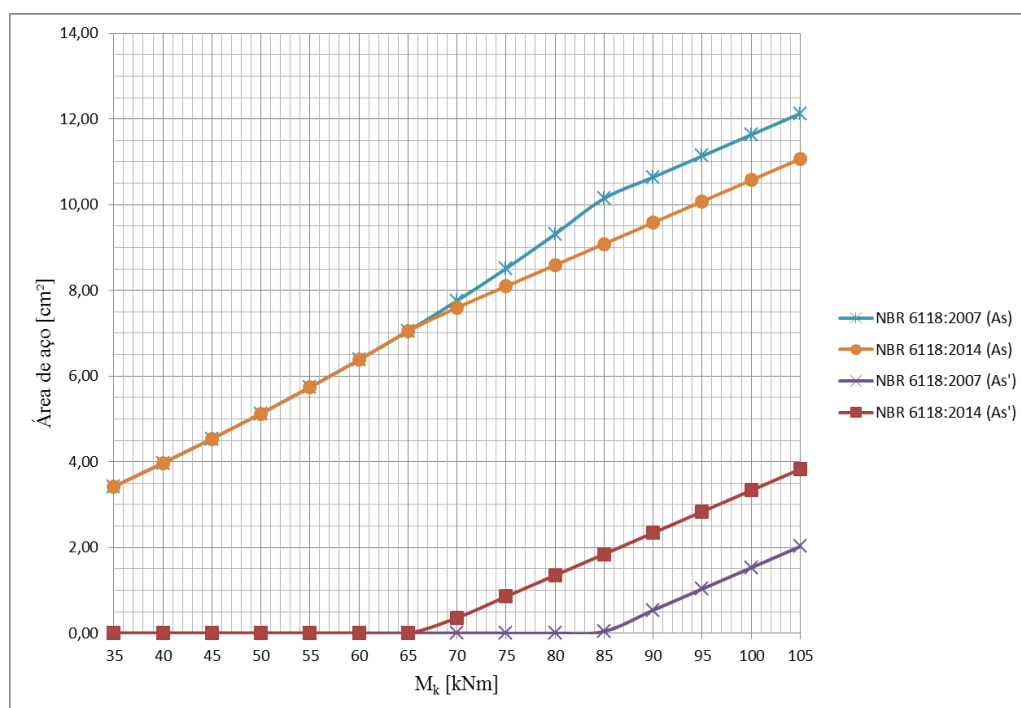
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A2 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	107
	$x$ calculado (cm)	7,66	8,88	10,15	11,47	12,84	14,27	15,78	17,36	19,04	20,84	22,78	24,91	27,29	30,05	35,13
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$x$ utilizado (cm)	7,66	8,88	10,15	11,47	12,84	14,27	15,78	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,42	3,97	4,54	5,13	5,74	6,38	7,05	7,60	8,09	8,59	9,09	9,58	10,08	10,57	11,26
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,86	1,35	1,85	2,34	2,84	3,33	4,03
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	3,42	3,97	4,54	5,13	5,74	6,38	7,05	7,96	8,95	9,94	10,93	11,92	12,91	13,90	15,29
	Taxa (%)	0,43	0,50	0,57	0,64	0,72	0,80	0,88	0,99	1,12	1,24	1,37	1,49	1,61	1,74	1,91
	$A_{s\min}$ (cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
	$V_{rd2}$ (kN)	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50	255,50
	$V_c$ (kN)	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75	47,75
	$V_{sw}$ (kN)	8,25	22,25	36,25	50,25	64,25	78,25	92,25	106,25	120,25	134,25	148,25	162,25	176,25	190,25	204,25
	$V_{rd3}$ (kN)	56,00	70,00	84,00	98,00	112,00	126,00	140,00	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,59	1,58	2,57	3,57	4,56	5,56	6,55	7,54	8,54	9,53	10,52	11,52	12,51	13,51	14,50
	$A_{sw\min}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

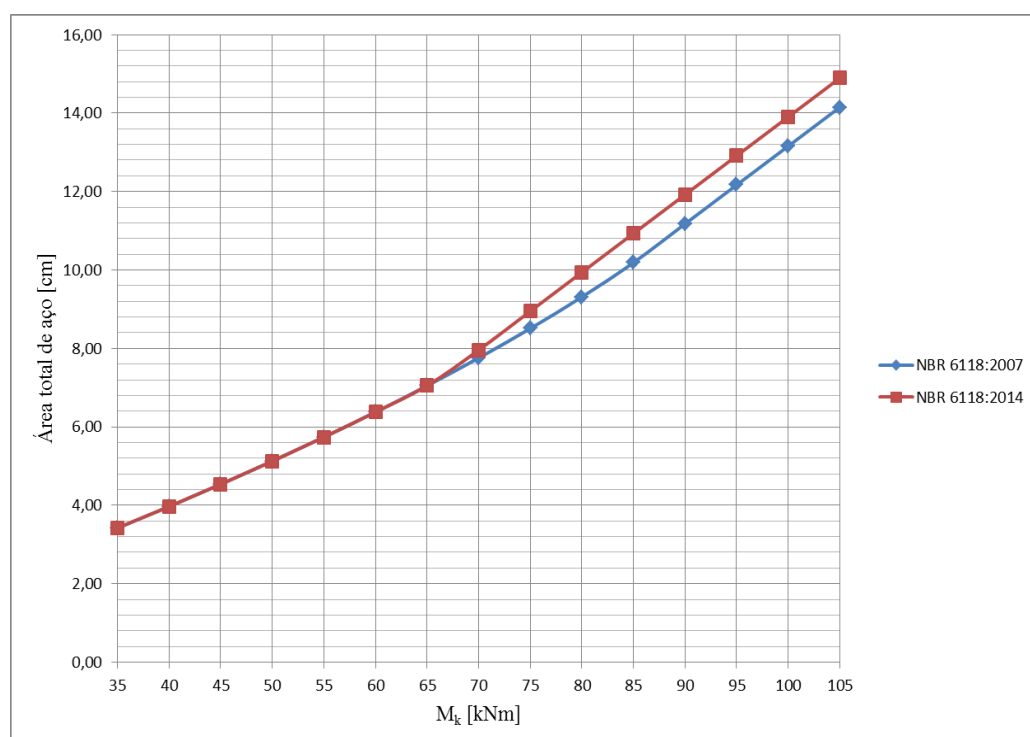
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura A1 – Consumo de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



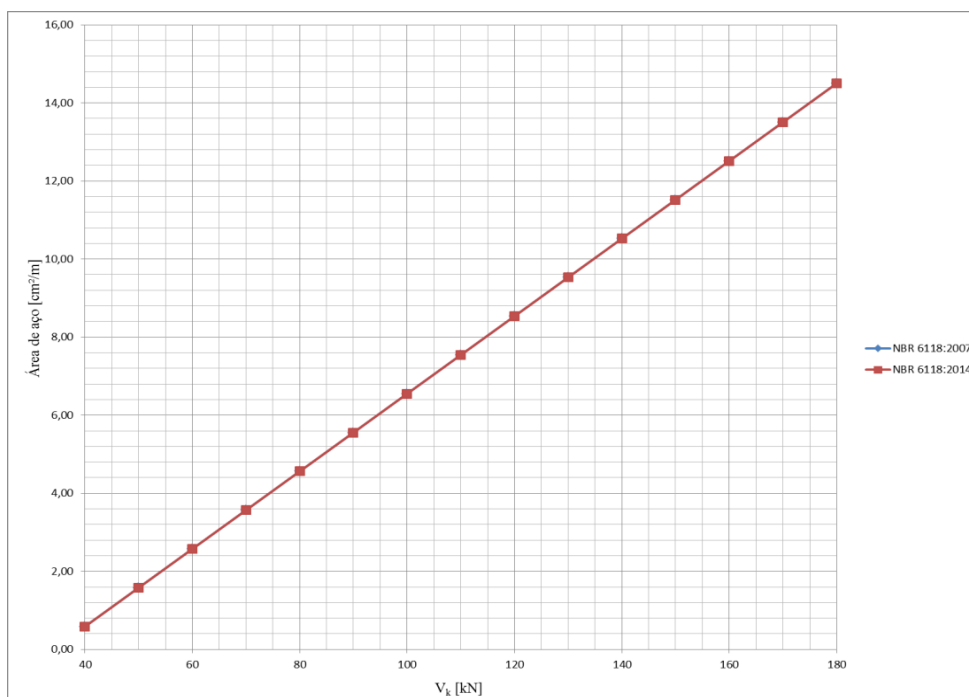
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A2 – Consumo total de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A3 – Consumo de aço no dimensionamento ao corte com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A3 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	161
	$x$ calculado (cm)	2,75	4,20	5,70	7,26	8,88	10,59	12,38	14,27	16,29	18,47	20,84	23,47	26,46	30,05	35,44
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	2,75	4,20	5,70	7,26	8,88	10,59	12,38	14,27	16,29	18,47	20,84	22,61	22,61	22,61	22,61
	$A_s$ (cm²)	1,85	2,81	3,82	4,86	5,95	7,10	8,30	9,57	10,92	12,38	13,97	15,46	16,46	17,45	18,54
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	1,30	2,29	3,38
	$A_s$ total (cm²)	1,85	2,81	3,82	4,86	5,95	7,10	8,30	9,57	10,92	12,38	13,97	15,78	17,76	19,74	21,92
	Taxa (%)	0,23	0,35	0,48	0,61	0,74	0,89	1,04	1,20	1,37	1,55	1,75	1,97	2,22	2,47	2,74
	$A_{s\min}$ (cm²)	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245	260
	$V_{rd2}$ (kN)	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58
	$V_c$ (kN)	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56
	$V_{sw}$ (kN)	7,44	28,44	49,44	70,44	91,44	112,44	133,44	154,44	175,44	196,44	217,44	238,44	259,44	280,44	301,44
	$V_{rd3}$ (kN)	70,00	91,00	112,00	133,00	154,00	175,00	196,00	217,00	238,00	259,00	280,00	301,00	322,00	343,00	364,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	0,53	2,02	3,51	5,00	6,49	7,98	9,47	10,96	12,45	13,94	15,44	16,93	18,42	19,91	21,40
	$A_{sw\min}$ (cm²)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32

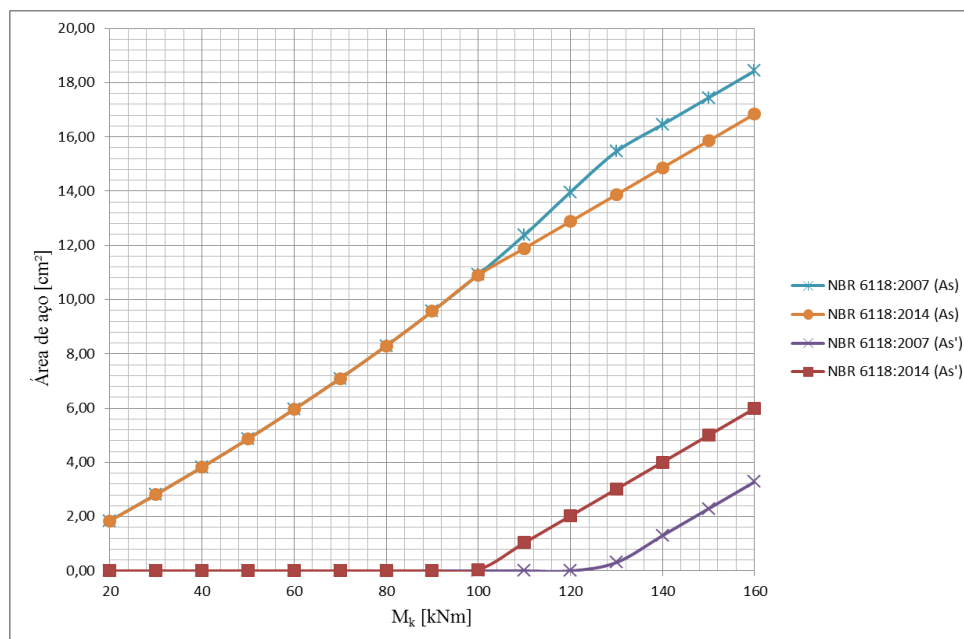
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A4 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	161
	$x$ calculado (cm)	2,75	4,20	5,70	7,26	8,88	10,59	12,38	14,27	16,29	18,47	20,84	23,47	26,46	30,05	35,44
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$x$ utilizado (cm)	2,75	4,20	5,70	7,26	8,88	10,59	12,38	14,27	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	1,85	2,81	3,82	4,86	5,95	7,10	8,30	9,57	10,90	11,89	12,88	13,88	14,87	15,86	16,95
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	1,04	2,03	3,02	4,01	5,00	6,09
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	1,85	2,81	3,82	4,86	5,95	7,10	8,30	9,57	10,95	12,93	14,91	16,89	18,87	20,86	23,04
	Taxa (%)	0,23	0,35	0,48	0,61	0,74	0,89	1,04	1,20	1,37	1,62	1,86	2,11	2,36	2,61	2,88
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245	260
	$V_{rd2}$ (kN)	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58	366,58
	$V_c$ (kN)	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56
	$V_{sw}$ (kN)	7,44	28,44	49,44	70,44	91,44	112,44	133,44	154,44	175,44	196,44	217,44	238,44	259,44	280,44	301,44
	$V_{rd3}$ (kN)	70,00	91,00	112,00	133,00	154,00	175,00	196,00	217,00	238,00	259,00	280,00	301,00	322,00	343,00	364,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,53	2,02	3,51	5,00	6,49	7,98	9,47	10,96	12,45	13,94	15,44	16,93	18,42	19,91	21,40
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32

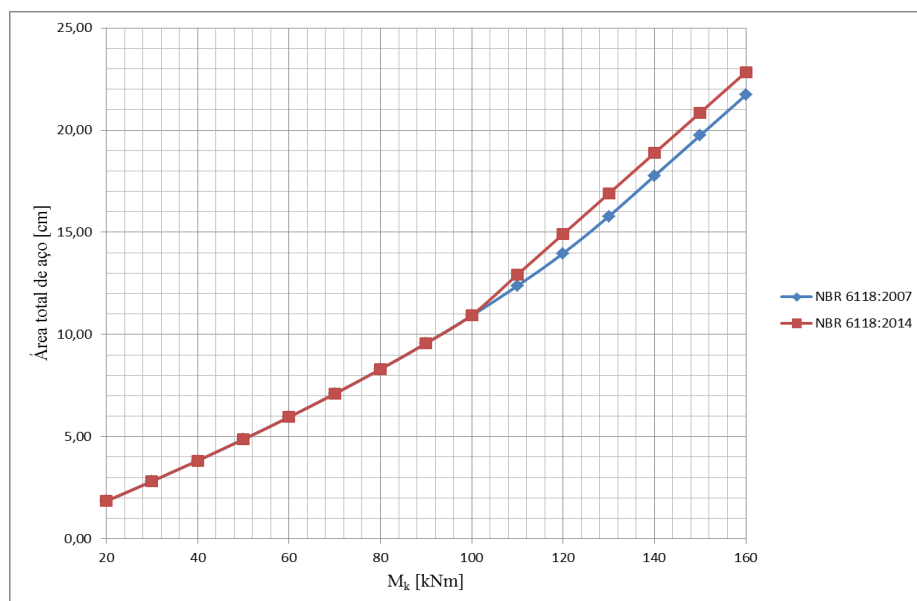
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura A4 – Consumo de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



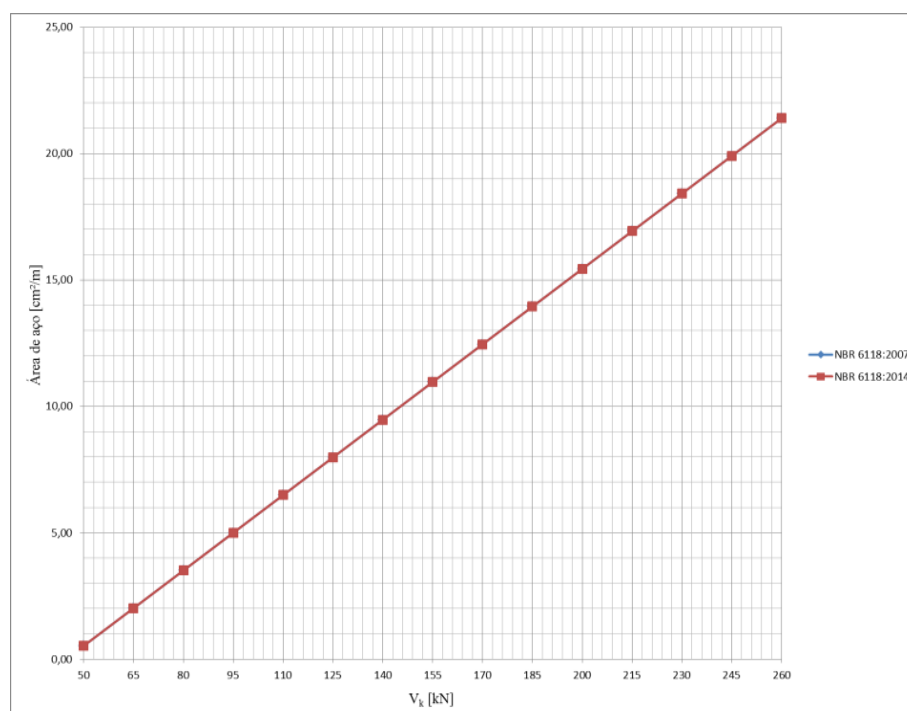
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A5 – Consumo total de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A6 – Consumo de aço no dimensionamento ao corte com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A5 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	195	205	215
	$x$ calculado (cm)	1,01	2,58	4,20	5,89	7,66	9,51	11,47	13,55	15,78	18,19	20,84	23,82	28,61	31,64	35,60
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	1,01	2,58	4,20	5,89	7,66	9,51	11,47	13,55	15,78	18,19	20,84	22,61	22,61	22,61	22,61
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	0,90	2,30	3,75	5,26	6,84	8,50	10,25	12,11	14,10	16,25	18,62	20,78	22,77	23,76	24,75
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	2,56	3,55	4,54
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	0,90	2,30	3,75	5,26	6,84	8,50	10,25	12,11	14,10	16,25	18,62	21,36	25,33	27,31	29,29
	Taxa (%)	0,11	0,29	0,47	0,66	0,86	1,06	1,28	1,51	1,76	2,03	2,33	2,67	3,17	3,41	3,66
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330
	$V_{rd2}$ (kN)	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56
	$V_c$ (kN)	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79
	$V_{sw}$ (kN)	92,21	113,21	134,21	155,21	176,21	197,21	218,21	239,21	260,21	281,21	302,21	323,21	344,21	365,21	386,21
	$V_{rd3}$ (kN)	168,00	189,00	210,00	231,00	252,00	273,00	294,00	315,00	336,00	357,00	378,00	399,00	420,00	441,00	462,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	6,55	8,04	9,53	11,02	12,51	14,00	15,49	16,98	18,47	19,96	21,45	22,94	24,43	25,93	27,42
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

(fonte: elaborado pelo autor)

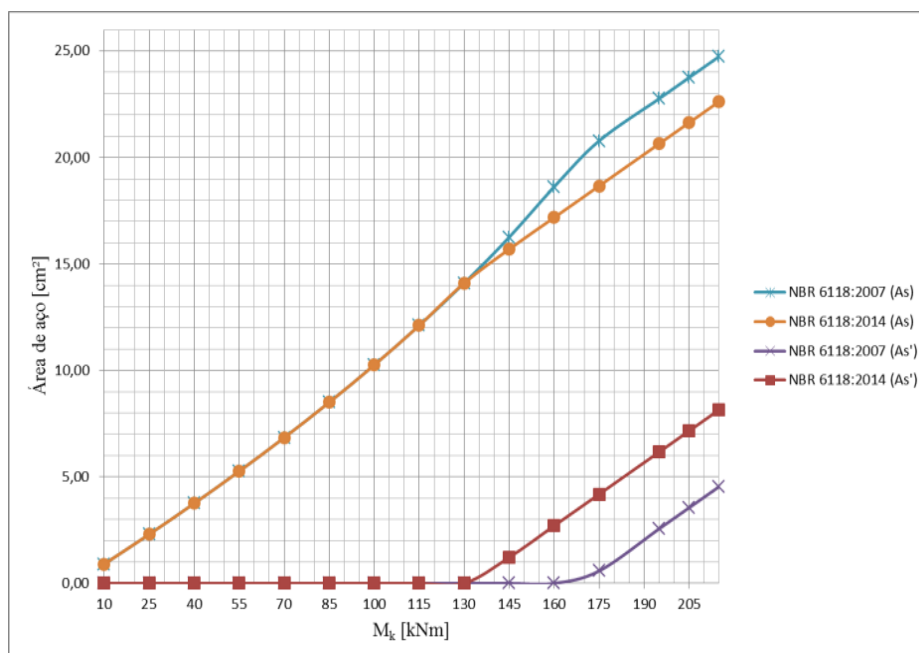
Quadro A6 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	195	205	215
	$x$ calculado (cm)	1,01	2,58	4,20	5,89	7,66	9,51	11,47	13,55	15,78	18,19	20,84	23,82	28,61	31,64	35,60
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$x$ utilizado (cm)	1,01	2,58	4,20	5,89	7,66	9,51	11,47	13,55	15,78	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	0,90	2,30	3,75	5,26	6,84	8,50	10,25	12,11	14,10	15,69	17,18	18,67	20,65	21,64	22,63
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,22	2,70	4,19	6,17	7,16	8,15
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	0,90	2,30	3,75	5,26	6,84	8,50	10,25	12,11	14,10	16,91	19,88	22,85	26,82	28,80	30,78
	Taxa (%)	0,11	0,29	0,47	0,66	0,86	1,06	1,28	1,51	1,76	2,11	2,49	2,86	3,35	3,60	3,85
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330
	$V_{rd2}$ (kN)	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56	466,56
	$V_c$ (kN)	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79	75,79
	$V_{sw}$ (kN)	92,21	113,21	134,21	155,21	176,21	197,21	218,21	239,21	260,21	281,21	302,21	323,21	344,21	365,21	386,21
	$V_{rd3}$ (kN)	168,00	189,00	210,00	231,00	252,00	273,00	294,00	315,00	336,00	357,00	378,00	399,00	420,00	441,00	462,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	6,55	8,04	9,53	11,02	12,51	14,00	15,49	16,98	18,47	19,96	21,45	22,94	24,43	25,93	27,42
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

(fonte: elaborado pelo autor)

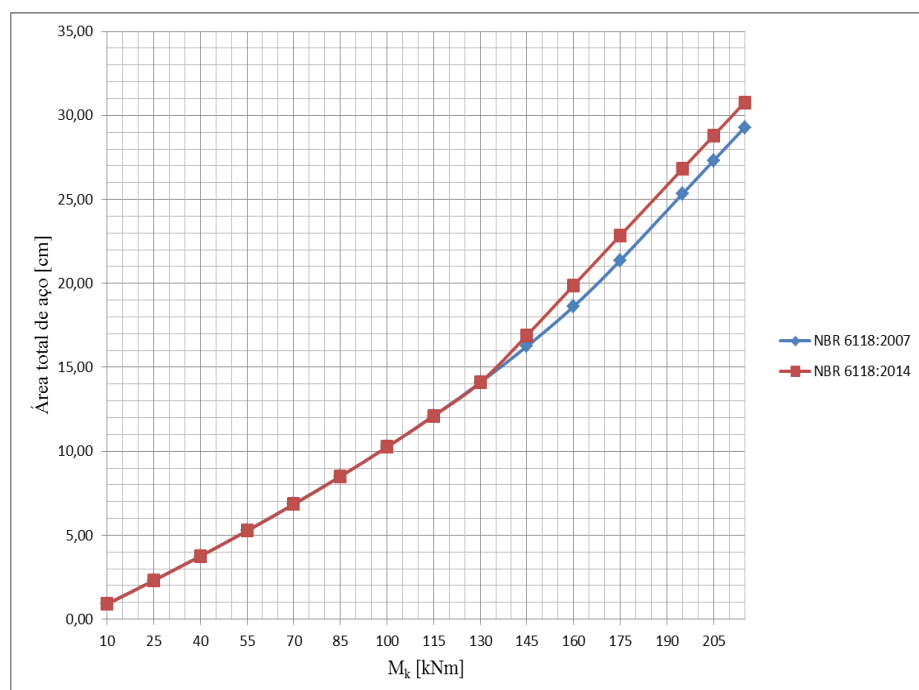


Figura A7 – Consumo de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



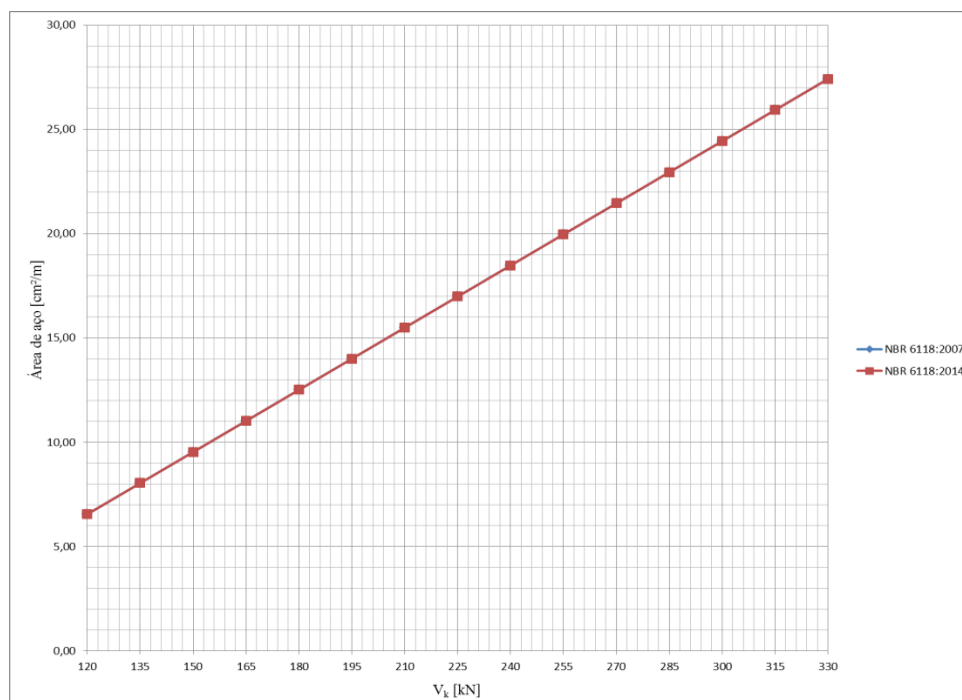
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A8 – Consumo total de aço no dimensionamento à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A9 – Consumo de aço no dimensionamento ao corte com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A7 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
		$f_{ck}$ (MPa)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	236
	$x$ calculado (cm)	2,05	3,33	4,64	6,01	7,42	8,88	10,41	12,01	13,69	15,47	17,36	19,39	21,59	24,03	26,99
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	2,05	3,33	4,64	6,01	7,42	8,88	10,41	12,01	13,69	15,47	17,36	19,39	21,59	22,61	22,61
	$A_s$ (cm²)	2,29	3,72	5,19	6,71	8,29	9,92	11,63	13,42	15,30	17,28	19,39	21,66	24,12	26,10	27,69
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	2,43
	$A_s$ total (cm²)	2,29	3,72	5,19	6,71	8,29	9,92	11,63	13,42	15,30	17,28	19,39	21,66	24,12	26,95	30,12
	Taxa (%)	0,29	0,46	0,65	0,84	1,04	1,24	1,45	1,68	1,91	2,16	2,42	2,71	3,02	3,37	3,77
	$A_{s\min}$ (cm²)	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395
	$V_{rd2}$ (kN)	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43
	$V_c$ (kN)	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95
	$V_{sw}$ (kN)	73,05	101,05	129,05	157,05	185,05	213,05	241,05	269,05	297,05	325,05	353,05	381,05	409,05	437,05	465,05
	$V_{rd3}$ (kN)	161,00	189,00	217,00	245,00	273,00	301,00	329,00	357,00	385,00	413,00	441,00	469,00	497,00	525,00	553,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	5,19	7,17	9,16	11,15	13,14	15,12	17,11	19,10	21,09	23,07	25,06	27,05	29,04	31,03	33,01
	$A_{sw\min}$ (cm²)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

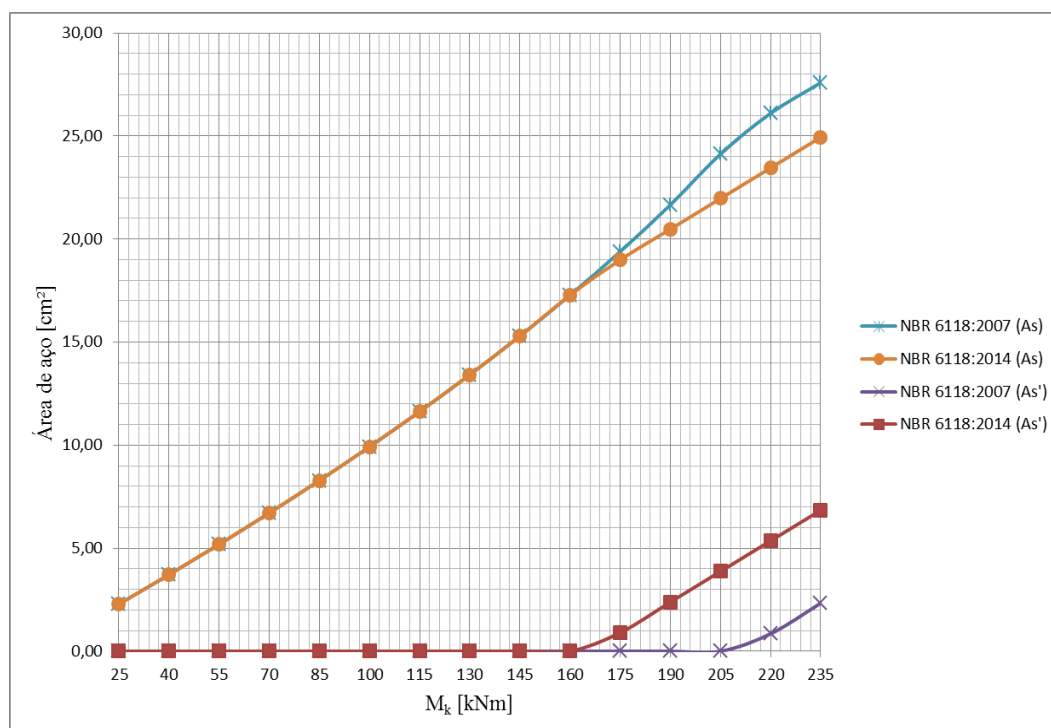
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A8 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	236
	$x$ calculado (cm)	2,05	3,33	4,64	6,01	7,42	8,88	10,41	12,01	13,69	15,47	17,36	19,39	21,59	24,03	26,99
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	$x$ utilizado (cm)	2,05	3,33	4,64	6,01	7,42	8,88	10,41	12,01	13,69	15,47	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20
	As (cm <sup>2</sup> )	2,29	3,72	5,19	6,71	8,29	9,92	11,63	13,42	15,30	17,28	19,00	20,48	21,97	23,46	25,04
	As' (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	2,39	3,87	5,36	6,94
	As total (cm <sup>2</sup> )	2,29	3,72	5,19	6,71	8,29	9,92	11,63	13,42	15,30	17,28	19,90	22,87	25,84	28,81	31,99
	Taxa (%)	0,29	0,46	0,65	0,84	1,04	1,24	1,45	1,68	1,91	2,16	2,49	2,86	3,23	3,60	4,00
	As <sub>min</sub> (cm <sup>2</sup> )	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395
	$V_{rd2}$ (kN)	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43	555,43
	$V_c$ (kN)	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95	87,95
	$V_{sw}$ (kN)	73,05	101,05	129,05	157,05	185,05	213,05	241,05	269,05	297,05	325,05	353,05	381,05	409,05	437,05	465,05
	$V_{rd3}$ (kN)	161,00	189,00	217,00	245,00	273,00	301,00	329,00	357,00	385,00	413,00	441,00	469,00	497,00	525,00	553,00
	Asw (cm <sup>2</sup> /m)	5,19	7,17	9,16	11,15	13,14	15,12	17,11	19,10	21,09	23,07	25,06	27,05	29,04	31,03	33,01
	Asw <sub>min</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

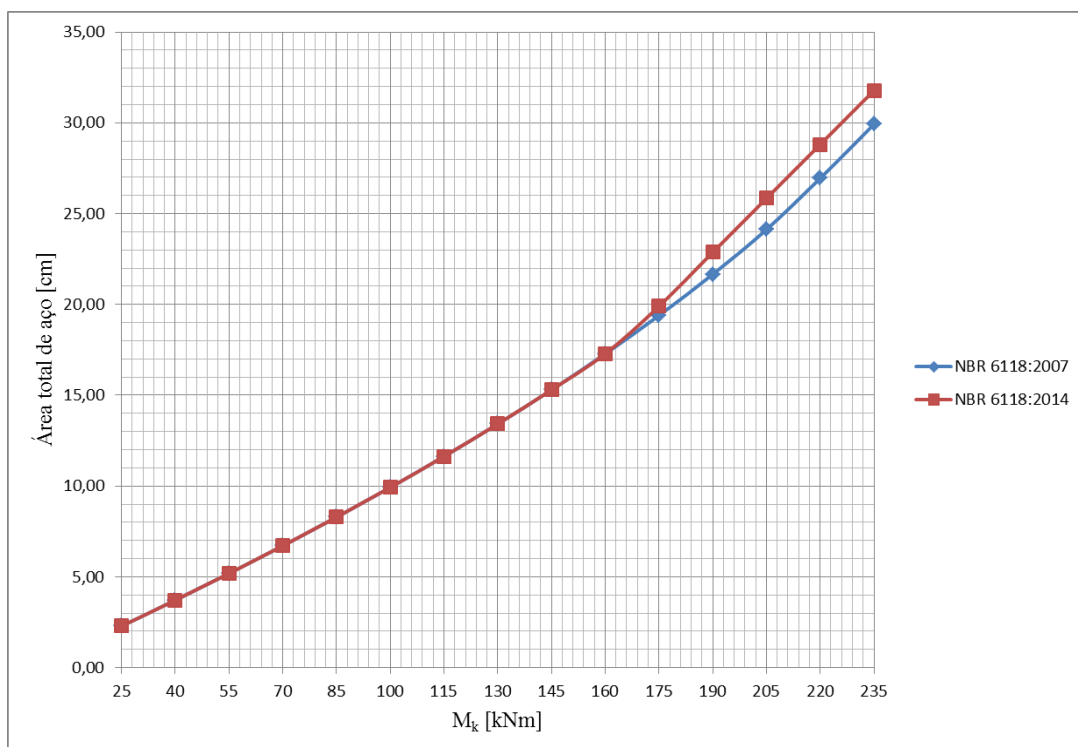
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura A10 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



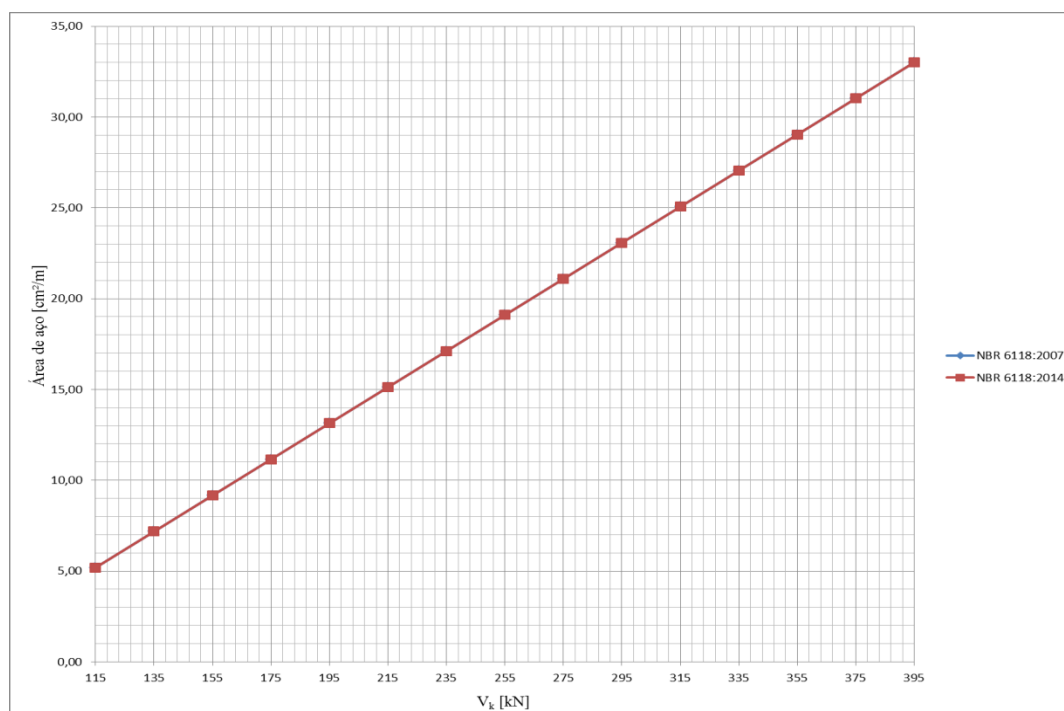
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A11 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A12 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A9 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	20	35	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	233
	$x$ calculado (cm)	1,47	2,61	3,78	4,98	6,22	7,49	8,81	10,18	11,60	13,08	14,63	16,26	17,98	19,81	22,19
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$x_{23}$ (cm)	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06
	$x_{lim}$ (cm)	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95	20,95
	$x$ utilizado (cm)	1,47	2,61	3,78	4,98	6,22	7,49	8,81	10,18	11,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229
	$\epsilon_{cu}$	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288
	$\lambda$	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
	$\alpha_c$	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd'}$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	1,82	3,22	4,66	6,14	7,67	9,24	10,87	12,56	14,31	16,02	17,50	18,99	20,48	21,96	23,75
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	1,96	3,45	4,93	6,42
$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	1,82	3,22	4,66	6,14	7,67	9,24	10,87	12,56	14,31	16,49	19,46	22,44	25,41	28,38	31,95	
Taxa (%)	0,23	0,40	0,58	0,77	0,96	1,16	1,36	1,57	1,79	2,06	2,43	2,80	3,18	3,55	3,99	
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235
	$V_{ed}$ (kN)	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19	633,19
	$V_c$ (kN)	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87	92,87
	$V_{sw}$ (kN)	40,13	54,13	68,13	82,13	96,13	110,13	124,13	138,13	152,13	166,13	180,13	194,13	208,13	222,13	236,13
	$V_{ed}$ (kN)	133,00	147,00	161,00	175,00	189,00	203,00	217,00	231,00	245,00	259,00	273,00	287,00	301,00	315,00	329,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,85	3,84	4,84	5,83	6,82	7,82	8,81	9,81	10,80	11,79	12,79	13,78	14,77	15,77	16,76
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44

(fonte: elaborado pelo autor)

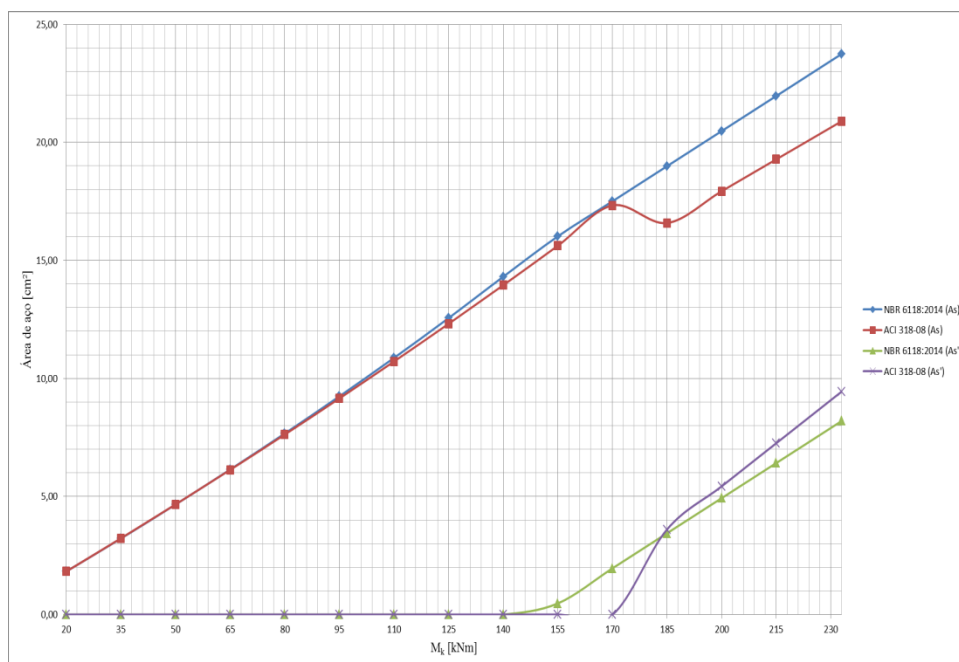
Quadro A10 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
$f_c'$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	20	35	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	233	
	$M_u$ (kNm)	29,20	51,10	73,00	94,90	116,80	138,70	160,60	182,50	204,40	226,30	248,20	270,10	292,00	313,90	340,18	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	$c$	1,38	2,44	3,52	4,62	5,75	6,90	8,08	9,29	10,52	11,78	13,07	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	
	$0,375dt$	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	
	$f$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$\epsilon_t$	0,0775	0,0425	0,0285	0,0210	0,0163	0,0131	0,0107	0,0090	0,0076	0,0064	0,0055	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
	$f_y'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	420	420	420
	$\epsilon_s$	0,0754	0,0413	0,0277	0,0204	0,0158	0,0126	0,0104	0,0086	0,0073	0,0062	0,0053	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	
	$c$ (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,50	10,50	10,50	10,50	
	$a$	0,90	1,58	2,29	3,00	3,74	4,49	5,25	6,04	6,84	7,66	8,49	6,83	6,83	6,83	6,83	
	$A_s$	1,83	3,23	4,67	6,13	7,63	9,15	10,72	12,31	13,95	15,62	17,33	16,58	17,93	19,28	20,90	
$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61	5,43	7,26	9,45		
$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	1,83	3,23	4,67	6,13	7,63	9,15	10,72	12,31	13,95	15,62	17,33	19,08	20,87	22,70	24,96		
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79		
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235	
	$V_u$ (kN)	138,7	153,3	167,9	182,5	197,1	211,7	226,3	240,9	255,5	270,1	284,7	299,3	313,9	328,5	343,1	
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	$V_c$ (kN)	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	
	$V_f$ (MPa)	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	
	$V_u$ (kN)	90,12	109,59	129,06	148,52	167,99	187,46	206,92	226,39	245,86	265,32	284,79	304,26	323,72	343,19	362,66	
	$V_u$ (kN)	184,93	204,40	223,87	243,33	262,80	282,27	301,73	321,20	340,67	360,13	379,60	399,07	418,53	438,00	457,47	
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	5,96	7,25	8,54	9,82	11,11	12,40	13,69	14,97	16,26	17,55	18,84	20,12	21,41	22,70	23,99	
	$\phi(V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29		

(fonte: elaborado pelo autor)

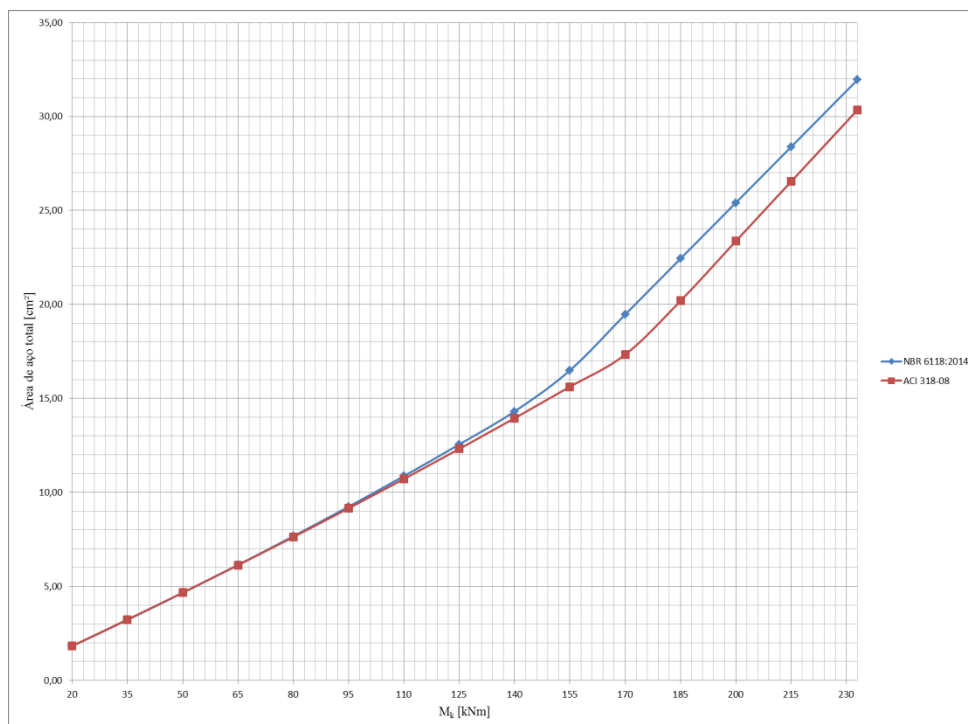
Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova Norma NBR 6118 e a Norma Americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas

Figura A13 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



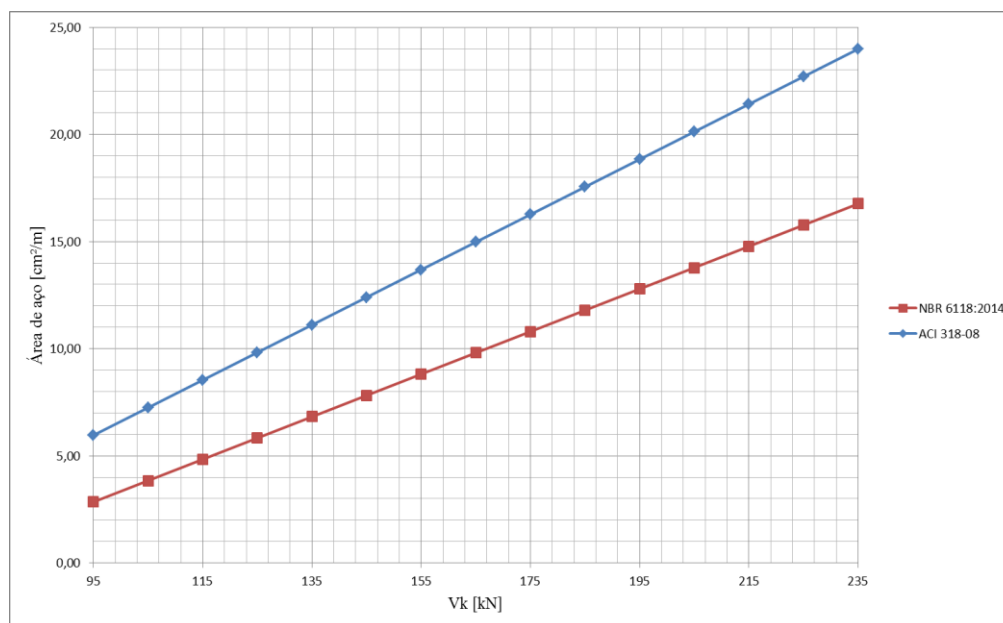
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A14 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A15 – Consumo de aço no dimensionamento ao corte com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A11 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	236
	$x$ calculado (cm)	1,73	2,79	3,89	5,01	6,16	7,34	8,56	9,81	11,12	12,46	13,86	15,32	16,85	18,46	20,28
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$x_{23}$ (cm)	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55
	$x_{lim}$ (cm)	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23
	$x$ utilizado (cm)	1,73	2,79	3,89	5,01	6,16	7,34	8,56	9,81	11,12	12,46	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242
	$\epsilon_{cu}$	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266
	$\lambda$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\alpha_c$	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	402,83	402,83	402,83	402,83	402,83
	$A_s$ (cm²)	2,28	3,68	5,13	6,61	8,12	9,68	11,29	12,95	14,67	16,45	17,97	19,45	20,94	22,42	24,01
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	3,05	4,65	6,26	7,97
$A_s$ Total (cm²)	2,28	3,68	5,13	6,61	8,12	9,68	11,29	12,95	14,67	16,45	19,41	22,50	25,59	28,68	31,98	
Taxa (%)	0,28	0,46	0,64	0,83	1,02	1,21	1,41	1,62	1,83	2,06	2,43	2,81	3,20	3,58	4,00	
$A_{s_{min}}$ (cm²)	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	$V_{rd2}$ (kN)	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84	699,84
	$V_c$ (kN)	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06	99,06
	$V_{sw}$ (kN)	54,94	68,94	82,94	96,94	110,94	124,94	138,94	152,94	166,94	180,94	194,94	208,94	222,94	236,94	250,94
	$V_{rd3}$ (kN)	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00	266,00	280,00	294,00	308,00	322,00	336,00	350,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	3,90	4,89	5,89	6,88	7,88	8,87	9,86	10,86	11,85	12,84	13,84	14,83	15,83	16,82	17,81
	$A_{sw_{min}}$ (cm²/m)	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67

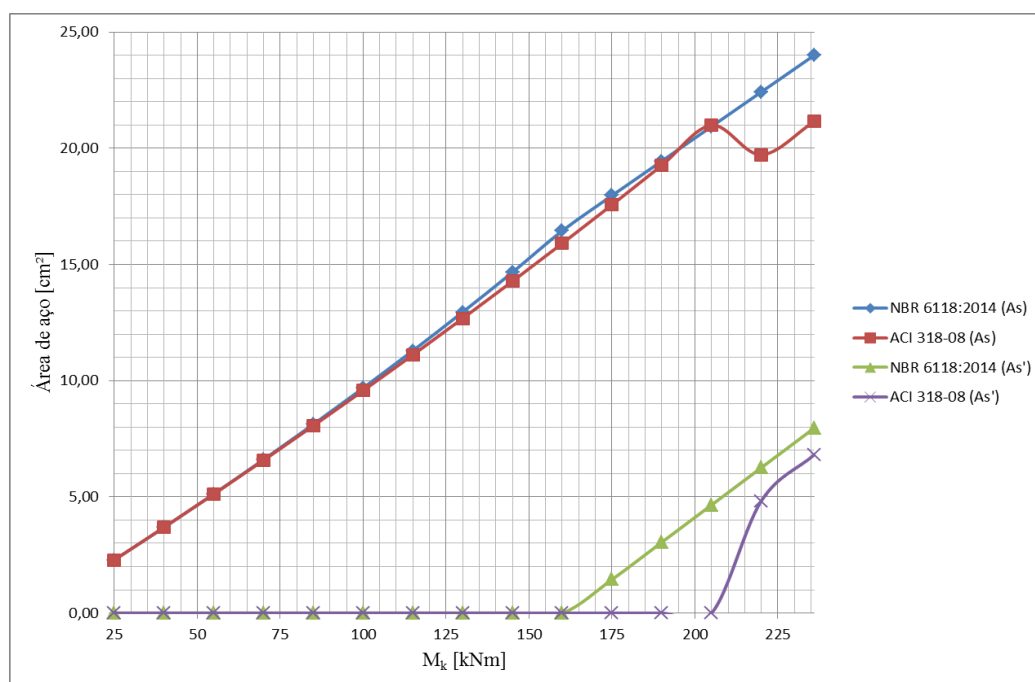
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A12 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
$f_c'$ (MPa)		70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70		
Mk (kNm)		25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	236	
Armadura Longitudinal	$M_u$ (kNm)	36,50	58,40	80,30	102,20	124,10	146,00	167,90	189,80	211,70	233,60	255,50	277,40	299,30	321,20	344,56	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	c	1,48	2,39	3,31	4,25	5,21	6,19	7,18	8,20	9,23	10,28	11,36	12,45	13,57	Armadura dupla!	Armadura dupla!	
	$0,375dt$	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	et	0,0721	0,0435	0,0305	0,0231	0,0183	0,0149	0,0125	0,0105	0,0090	0,0078	0,0068	0,0059	0,0052	0,0076	0,0076	0,0076
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	420
	es	0,0701	0,0423	0,0296	0,0224	0,0177	0,0145	0,0120	0,0102	0,0087	0,0075	0,0065	0,0057	0,0050	0,0073	0,0073	0,0073
	es'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0020	0,0020
	c (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,50	10,50
	a	0,96	1,55	2,15	2,76	3,39	4,02	4,67	5,33	6,00	6,68	7,38	8,09	8,82	6,83	6,83	6,83
	$A_s$	2,29	3,69	5,12	6,58	8,06	9,57	11,11	12,68	14,28	15,91	17,57	19,26	20,99	19,72	21,16	21,16
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,83	6,82
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,29	3,69	5,12	6,58	8,06	9,57	11,11	12,68	14,28	15,91	17,57	19,26	20,99	22,75	24,67	24,67
	$A_{s,min}$ (cm <sup>2</sup> )	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01
Armadura Transversal (estribos)	Vk	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	
	$V_u$ (kN)	160,6	175,2	189,8	204,4	219	233,6	248,2	262,8	277,4	292	306,6	321,2	335,8	350,4	365	
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	$V_c$ (kN)	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	
	$V_f c'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	
	$V_s$ (kN)	112,54	132,01	151,47	170,94	190,41	209,87	229,34	248,81	268,27	287,74	307,21	326,67	346,14	365,61	385,07	
	$V_u$ (kN)	214,13	233,60	253,07	272,53	292,00	311,47	330,93	350,40	369,87	389,33	408,80	428,27	447,73	467,20	486,67	
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	7,44	8,73	10,02	11,31	12,59	13,88	15,17	16,46	17,74	19,03	20,32	21,61	22,89	24,18	25,47	
	$\phi (V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{sw,min}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

(fonte: elaborado pelo autor)

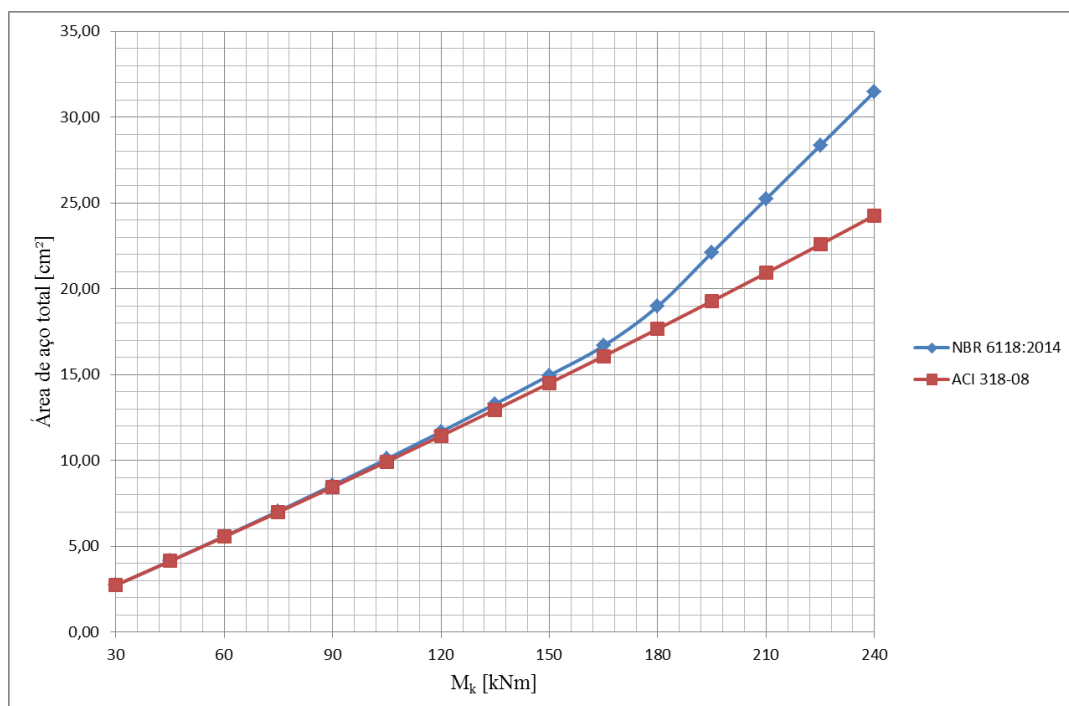
Figura A16 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

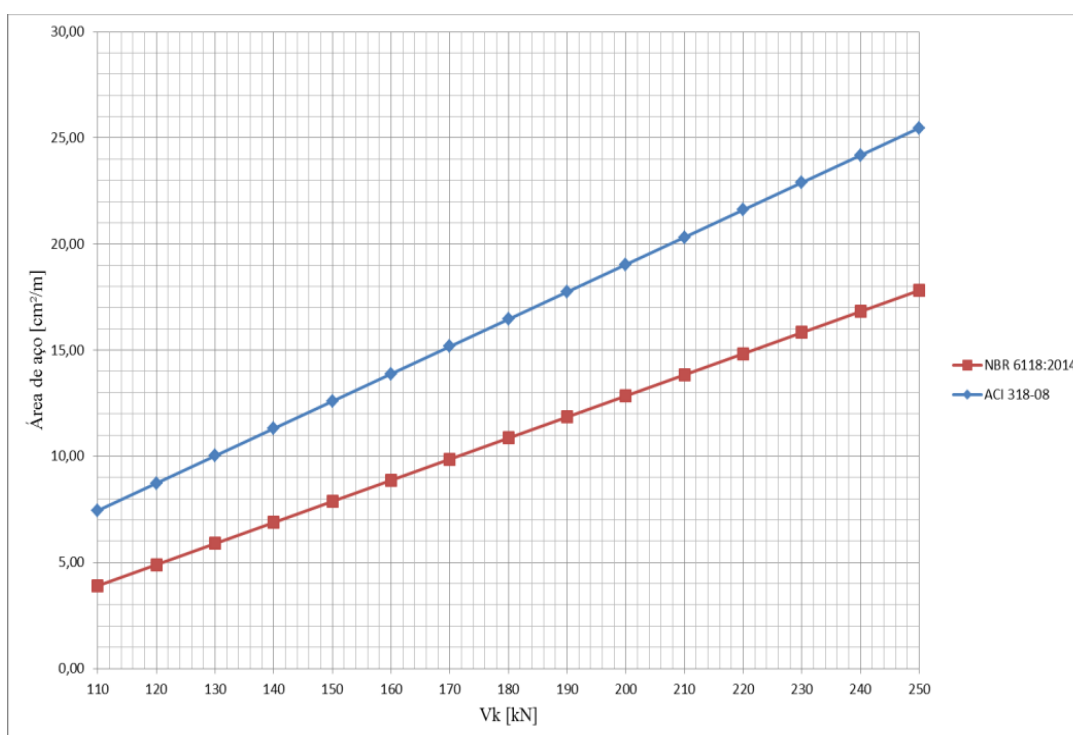


Figura A17 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A18 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A13 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	239
	$x$ calculado (cm)	1,65	2,67	3,71	4,78	5,87	6,99	8,14	9,32	10,54	11,79	13,10	14,44	15,85	17,31	19,26
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$x_{23}$ (cm)	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44
	$x_{lim}$ (cm)	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05	20,05
	$x$ utilizado (cm)	1,65	2,67	3,71	4,78	5,87	6,99	8,14	9,32	10,54	11,79	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
	$\alpha_c$	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}^*$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	394,86	394,86	394,86	394,86	394,86
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	2,27	3,68	5,11	6,58	8,08	9,62	11,20	12,83	14,51	16,24	17,91	19,39	20,88	22,37	24,25
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	2,25	3,89	5,53	7,60
	$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	2,27	3,68	5,11	6,58	8,08	9,62	11,20	12,83	14,51	16,24	18,52	21,65	24,77	27,89	31,85
	Taxa (%)	0,28	0,46	0,64	0,82	1,01	1,20	1,40	1,60	1,81	2,03	2,32	2,71	3,10	3,49	3,98
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	$V_{rd2}$ (kN)	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38	755,38
	$V_c$ (kN)	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51	104,51
	$V_{sw}$ (kN)	49,49	63,49	77,49	91,49	105,49	119,49	133,49	147,49	161,49	175,49	189,49	203,49	217,49	231,49	245,49
	$V_{rd3}$ (kN)	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00	266,00	280,00	294,00	308,00	322,00	336,00	350,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,51	4,51	5,50	6,49	7,49	8,48	9,48	10,47	11,46	12,46	13,45	14,44	15,44	16,43	17,43
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87

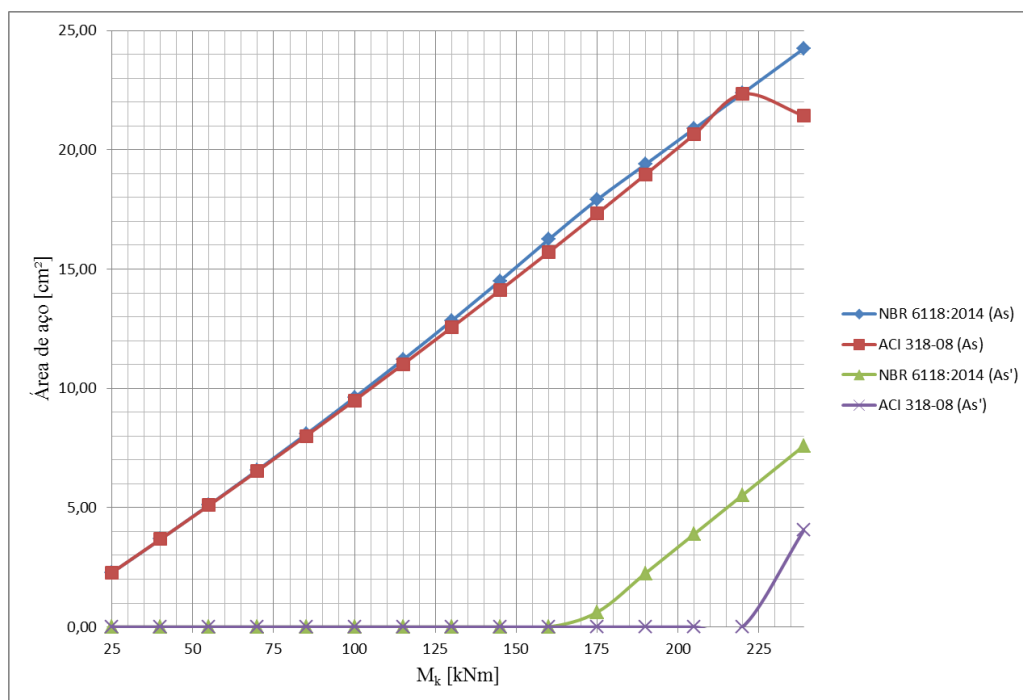
(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A14 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08														
$f_c'$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	239
	$M_u$ (kNm)	36,50	58,40	80,30	102,20	124,10	146,00	167,90	189,80	211,70	233,60	255,50	277,40	299,30	321,20	348,94
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	$c$	1,29	2,08	2,88	3,70	4,53	5,37	6,23	7,10	7,98	8,88	9,80	10,73	11,67	12,64	13,88
	$0,375d$	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\epsilon_t$	0,0830	0,0503	0,0355	0,0270	0,0215	0,0177	0,0148	0,0126	0,0109	0,0095	0,0083	0,0073	0,0065	0,0058	0,0076
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420
	$\epsilon_s'$	0,0807	0,0489	0,0344	0,0262	0,0208	0,0171	0,0143	0,0122	0,0105	0,0092	0,0080	0,0071	0,0063	0,0055	0,0073
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0020
	$c$ (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,50
	$a$	0,84	1,35	1,88	2,41	2,94	3,49	4,05	4,61	5,19	5,77	6,37	6,97	7,59	8,21	8,83
	$A_s$	2,28	3,68	5,10	6,54	8,01	9,50	11,01	12,55	14,11	15,70	17,32	18,97	20,64	22,34	24,06
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,06
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,28	3,68	5,10	6,54	8,01	9,50	11,01	12,55	14,11	15,70	17,32	18,97	20,64	22,34	24,54
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	$V_u$ (kN)	160,6	175,2	189,8	204,4	219	233,6	248,2	262,8	277,4	292	306,6	321,2	335,8	350,4	365
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59
	$\sqrt{f_c}'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
	$V_s$ (kN)	112,54	132,01	151,47	170,94	190,41	209,87	229,34	248,81	268,27	287,74	307,21	326,67	346,14	365,61	385,07
	$V_u$ (kN)	214,13	233,60	253,07	272,53	292,00	311,47	330,93	350,40	369,87	389,33	408,80	428,27	447,73	467,20	486,67
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	7,44	8,73	10,02	11,31	12,59	13,88	15,17	16,46	17,74	19,03	20,32	21,61	22,89	24,18	25,47
	$\phi(V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

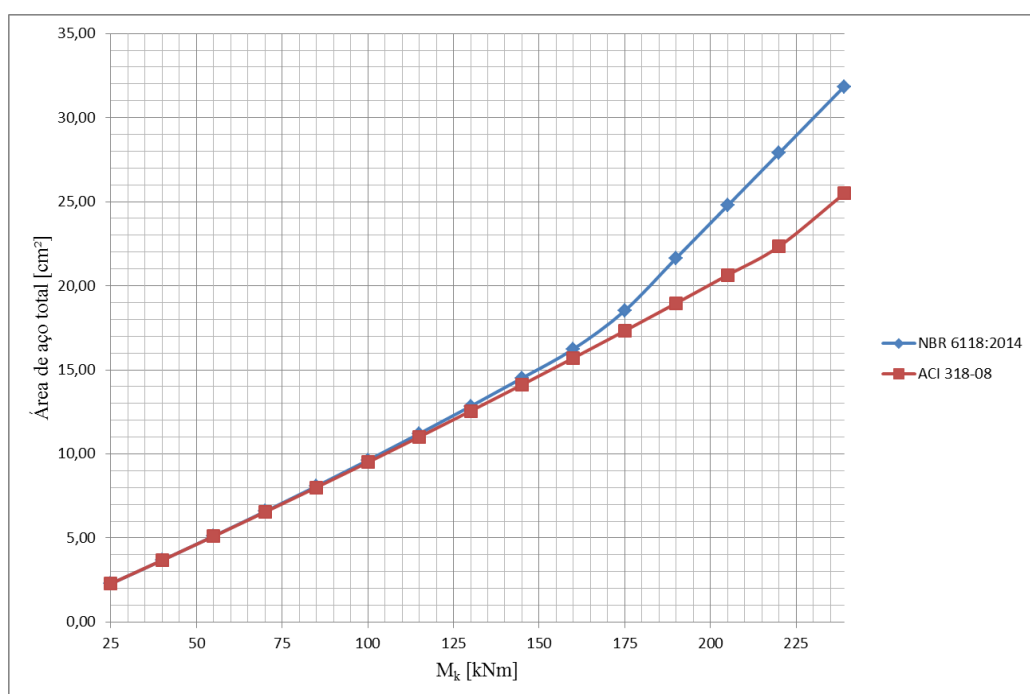
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura A19 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



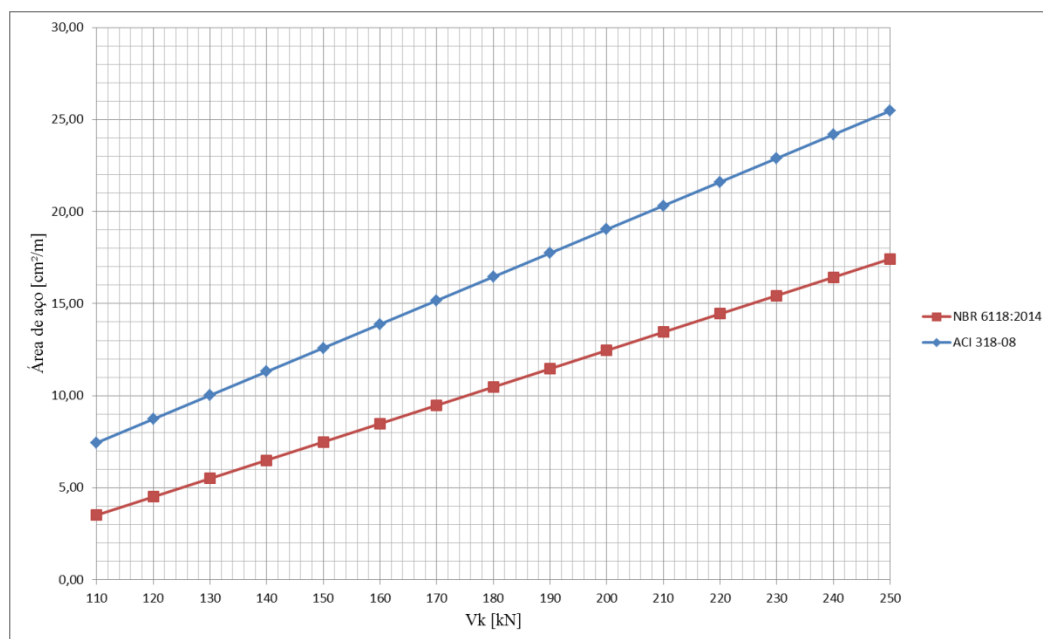
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A20 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A21 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro A15 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
		$f_{ck}$ (MPa)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	242
	$x$ calculado (cm)	1,94	2,94	3,97	5,01	6,08	7,17	8,29	9,45	10,63	11,85	13,11	14,41	15,76	17,16	18,82
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$x_{23}$ (cm)	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43
	$x_{lim}$ (cm)	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04
	$x$ utilizado (cm)	1,94	2,94	3,97	5,01	6,08	7,17	8,29	9,45	10,63	11,85	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	$\alpha_c$	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	394,33	394,33	394,33	394,33
	$A_s$ (cm²)	2,73	4,14	5,58	7,05	8,56	10,10	11,67	13,30	14,96	16,68	18,33	19,82	21,30	22,79	24,47
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	2,29	3,93	5,57
$A_s$ Total (cm²)	2,73	4,14	5,58	7,05	8,56	10,10	11,67	13,30	14,96	16,68	18,99	22,11	25,24	28,36	31,90	
Taxa (%)	0,34	0,52	0,70	0,88	1,07	1,26	1,46	1,66	1,87	2,09	2,37	2,76	3,15	3,55	3,99	
$A_{smin}$ (cm²)	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	$V_{rd2}$ (kN)	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82	799,82
	$V_c$ (kN)	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39	109,39
	$V_{sw}$ (kN)	44,61	58,61	72,61	86,61	100,61	114,61	128,61	142,61	156,61	170,61	184,61	198,61	212,61	226,61	240,61
	$V_{rd5}$ (kN)	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00	266,00	280,00	294,00	308,00	322,00	336,00	350,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	3,17	4,16	5,15	6,15	7,14	8,14	9,13	10,12	11,12	12,11	13,11	14,10	15,09	16,09	17,08
	$A_{swmin}$ (cm²/m)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05

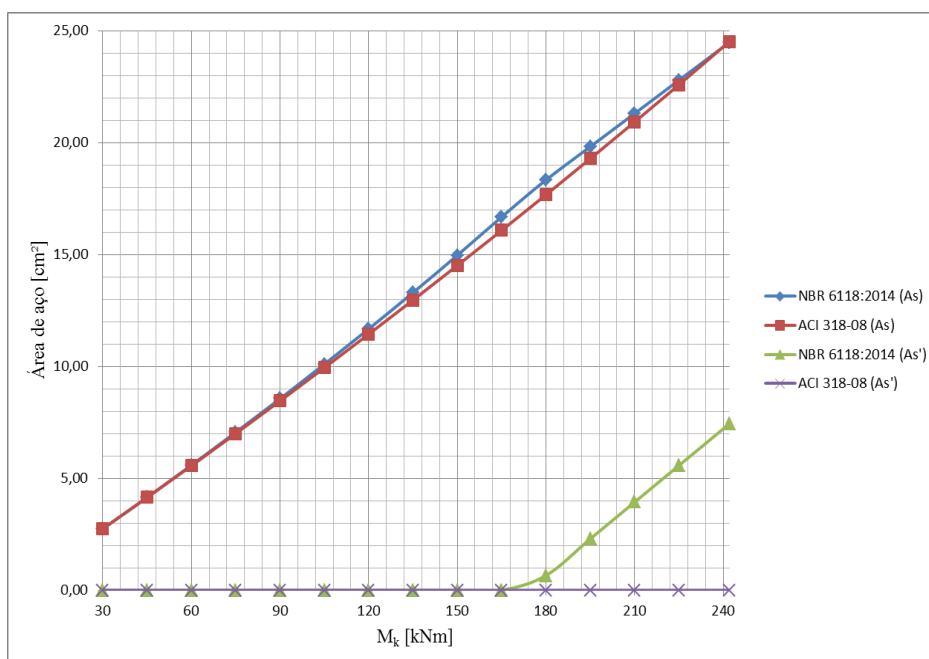
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A16 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08														
$f_c'$ (MPa)		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Mk (kNm)		30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	242
Armadura Longitudinal	$M_u$ (kNm)	43,80	65,70	87,60	109,50	131,40	153,30	175,20	197,10	219,00	240,90	262,80	284,70	306,60	328,50	353,32
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	c	1,38	2,08	2,79	3,52	4,25	5,00	5,75	6,52	7,29	8,08	8,88	9,69	10,52	11,36	12,32
	$0,375dt$	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88	13,88
	j	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\epsilon_t$	0,0775	0,0503	0,0367	0,0285	0,0231	0,0192	0,0163	0,0140	0,0122	0,0107	0,0095	0,0084	0,0076	0,0068	0,0060
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\epsilon_s$	0,0754	0,0489	0,0356	0,0277	0,0224	0,0186	0,0158	0,0136	0,0118	0,0104	0,0092	0,0081	0,0073	0,0065	0,0058
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	c (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	a	0,90	1,35	1,82	2,29	2,76	3,25	3,74	4,24	4,74	5,25	5,77	6,30	6,84	7,38	8,01
	$A_s$	2,74	4,14	5,56	7,00	8,46	9,94	11,44	12,96	14,51	16,08	17,67	19,28	20,92	22,59	24,51
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$A_{s\text{ total}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,74	4,14	5,56	7,00	8,46	9,94	11,44	12,96	14,51	16,08	17,67	19,28	20,92	22,59	24,51
$A_{s\text{ min}}$ (cm <sup>2</sup> )	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	$V_u$ (kN)	160,6	175,2	189,8	204,4	219	233,6	248,2	262,8	277,4	292	306,6	321,2	335,8	350,4	365
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59	101,59
	$\sqrt{f_c'}$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
	$V_n$ (kN)	112,54	132,01	151,47	170,94	190,41	209,87	229,34	248,81	268,27	287,74	307,21	326,67	346,14	365,61	385,07
	$V_u$ (kN)	214,13	233,60	253,07	272,53	292,00	311,47	330,93	350,40	369,87	389,33	408,80	428,27	447,73	467,20	486,67
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	7,44	8,73	10,02	11,31	12,59	13,88	15,17	16,46	17,74	19,03	20,32	21,61	22,89	24,18	25,47
	$\phi (V_n \geq V_u)$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{s\text{ min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

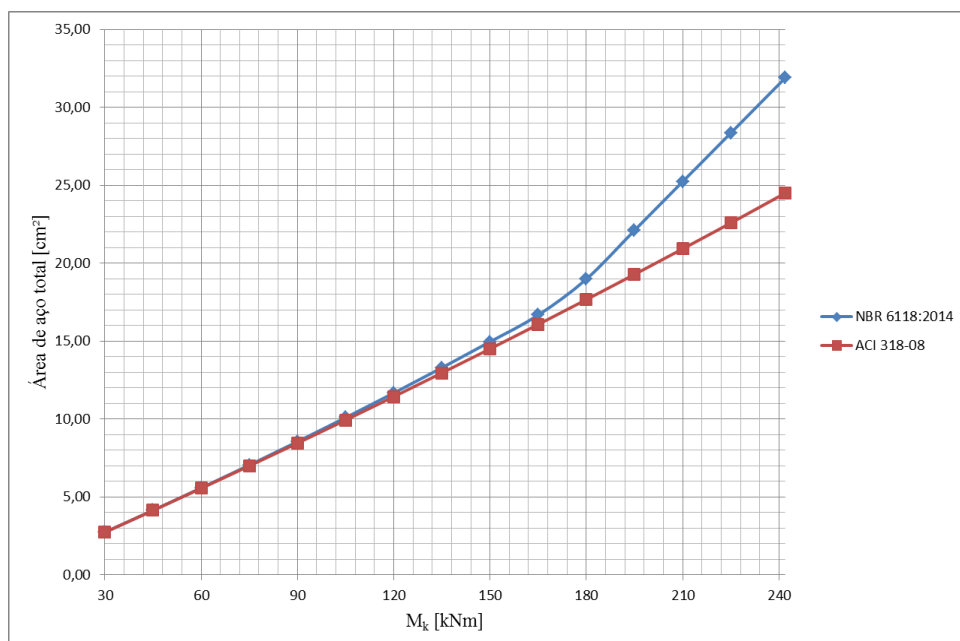
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura A22 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



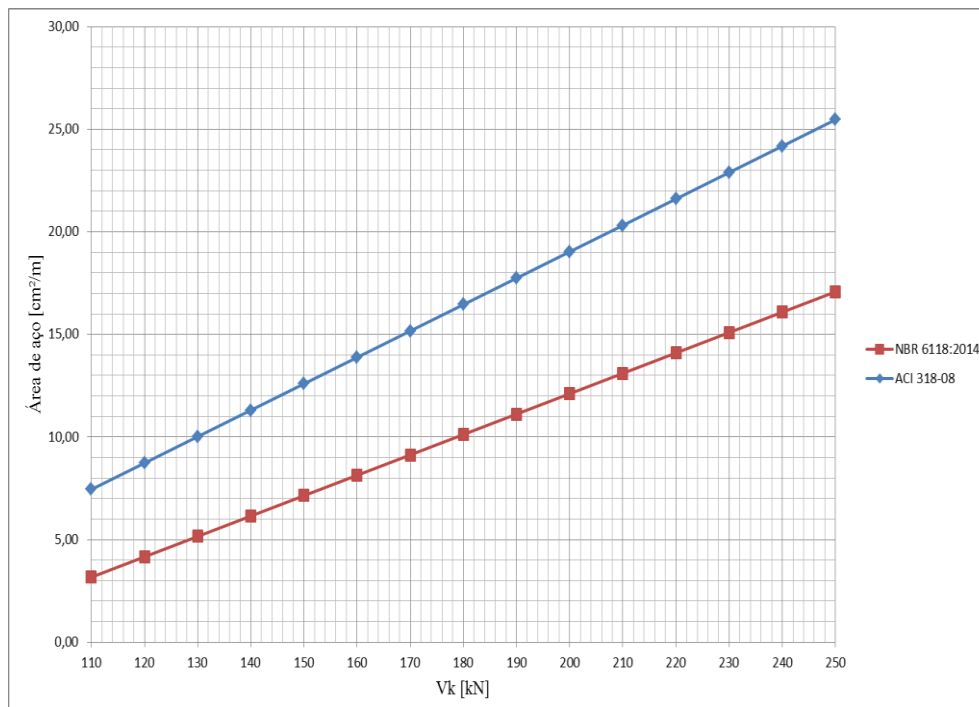
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A23 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A17 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

## **APÊNDICE B – Resultados das vigas com seção 20x50**

Quadro B1 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	176
	$x$ calculado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	31,15	34,83	39,23	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	28,89	28,89	28,89	28,89
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	2,58	3,37	4,19	5,05	5,94	6,87	7,85	8,89	9,99	11,18	12,48	13,43	14,19	14,95	15,78
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	1,28	2,04	2,87
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,58	3,37	4,19	5,05	5,94	6,87	7,85	8,89	9,99	11,18	12,48	13,96	15,47	16,99	18,65
	Taxa (%)	0,26	0,34	0,42	0,50	0,59	0,69	0,78	0,89	1,00	1,12	1,25	1,40	1,55	1,70	1,87
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
	$V_{rd2}$ (kN)	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47
	$V_c$ (kN)	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01
	$V_{sw}$ (kN)	64,99	78,99	92,99	106,99	120,99	134,99	148,99	162,99	176,99	190,99	204,99	218,99	232,99	246,99	260,99
	$V_{rd3}$ (kN)	126,00	140,00	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00	266,00	280,00	294,00	308,00	322,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,61	4,39	5,17	5,94	6,72	7,50	8,28	9,06	9,83	10,61	11,39	12,17	12,94	13,72	14,50
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

(fonte: elaborado pelo autor)

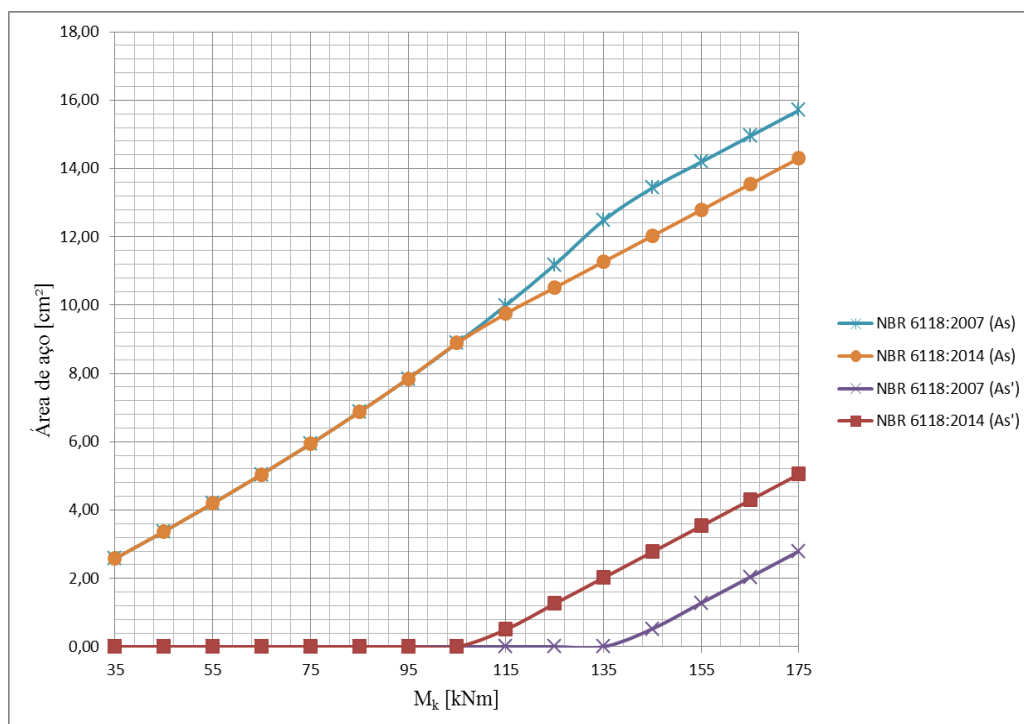
Quadro B2 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	176
	$x$ calculado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	31,15	34,83	39,23	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$x$ utilizado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	2,58	3,37	4,19	5,05	5,94	6,87	7,85	8,89	9,75	10,51	11,27	12,03	12,78	13,54	14,37
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,26	2,02	2,78	3,53	4,29	5,12
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,58	3,37	4,19	5,05	5,94	6,87	7,85	8,89	10,26	11,77	13,29	14,80	16,32	17,83	19,50
	Taxa (%)	0,26	0,34	0,42	0,50	0,59	0,69	0,78	0,89	1,03	1,18	1,33	1,48	1,63	1,78	1,95
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
	$V_{rd2}$ (kN)	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47	326,47
	$V_c$ (kN)	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01	61,01
	$V_{sw}$ (kN)	64,99	78,99	92,99	106,99	120,99	134,99	148,99	162,99	176,99	190,99	204,99	218,99	232,99	246,99	260,99
	$V_{rd3}$ (kN)	126,00	140,00	154,00	168,00	182,00	196,00	210,00	224,00	238,00	252,00	266,00	280,00	294,00	308,00	322,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,61	4,39	5,17	5,94	6,72	7,50	8,28	9,06	9,83	10,61	11,39	12,17	12,94	13,72	14,50
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

(fonte: elaborado pelo autor)

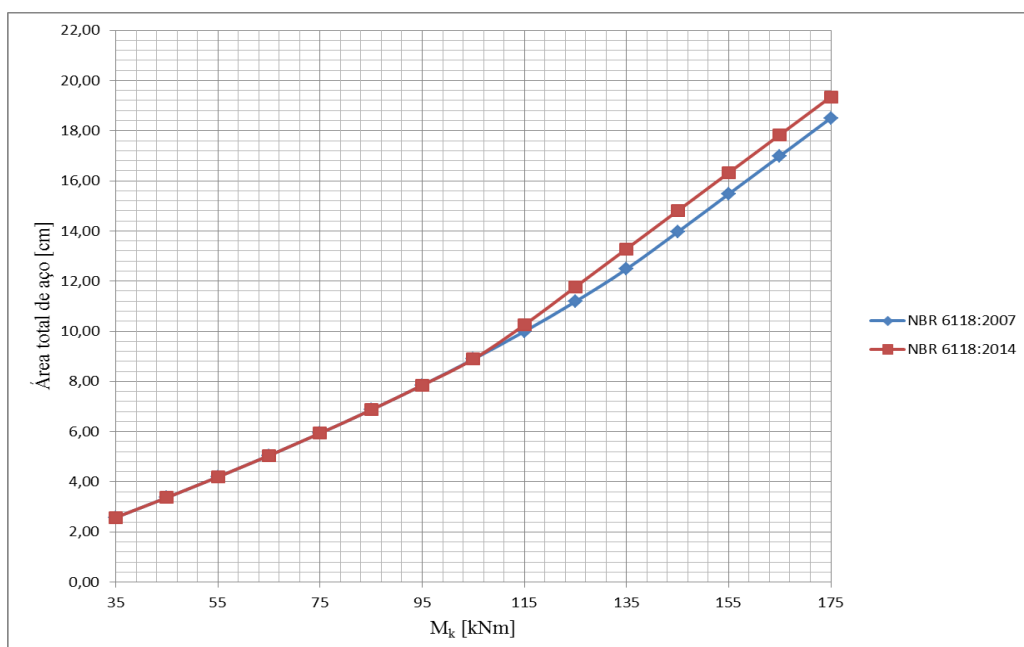


Figura B1 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



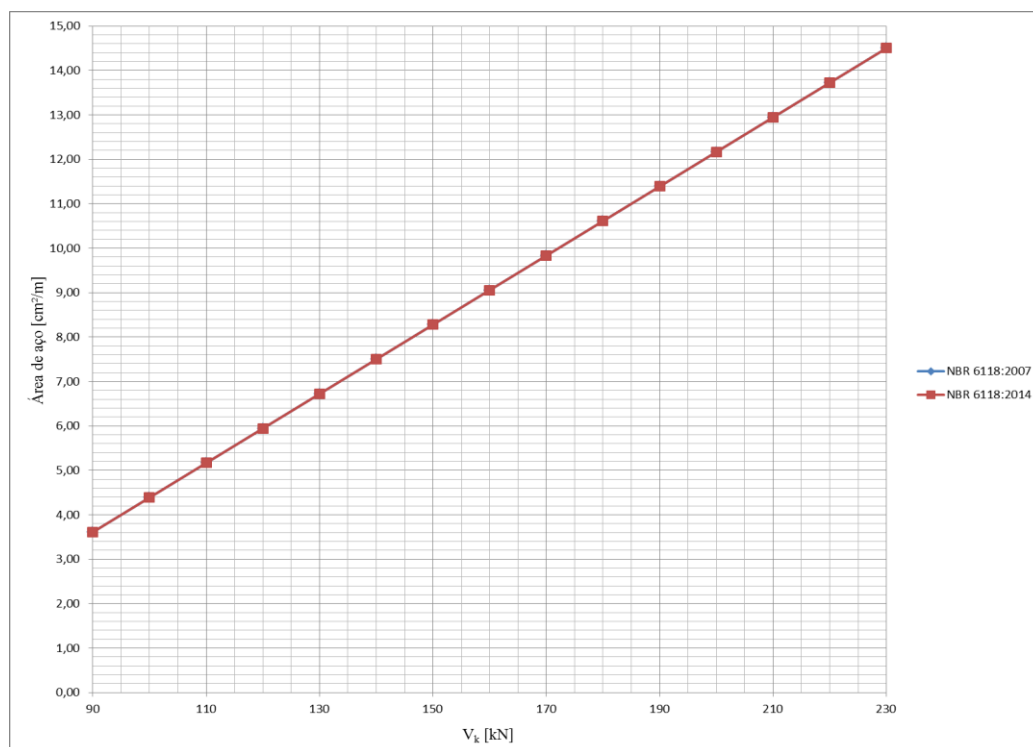
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B2 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B3 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B3 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
		$f_{ck}$ (MPa)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245	264
	$x$ calculado (cm)	5,48	7,24	9,07	10,97	12,94	15,01	17,19	19,49	21,94	24,57	27,43	30,59	34,18	38,43	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	5,48	7,24	9,07	10,97	12,94	15,01	17,19	19,49	21,94	24,57	27,43	28,89	28,89	28,89	28,89
	$A_s$ (cm²)	3,68	4,86	6,08	7,35	8,68	10,06	11,52	13,06	14,71	16,47	18,38	19,96	21,10	22,23	23,67
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	1,73	2,87	4,31
	$A_s$ total (cm²)	3,68	4,86	6,08	7,35	8,68	10,06	11,52	13,06	14,71	16,47	18,38	20,56	22,83	25,10	27,98
	Taxa (%)	0,37	0,49	0,61	0,74	0,87	1,01	1,15	1,31	1,47	1,65	1,84	2,06	2,28	2,51	2,80
$A_{s_{min}}$ (cm²)	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330
	$V_{rd2}$ (kN)	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41
	$V_c$ (kN)	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94
	$V_{sw}$ (kN)	88,06	109,06	130,06	151,06	172,06	193,06	214,06	235,06	256,06	277,06	298,06	319,06	340,06	361,06	382,06
	$V_{rd3}$ (kN)	168,00	189,00	210,00	231,00	252,00	273,00	294,00	315,00	336,00	357,00	378,00	399,00	420,00	441,00	462,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	4,89	6,06	7,23	8,39	9,56	10,73	11,89	13,06	14,23	15,39	16,56	17,73	18,89	20,06	21,23
	$A_{sw_{min}}$ (cm²)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32

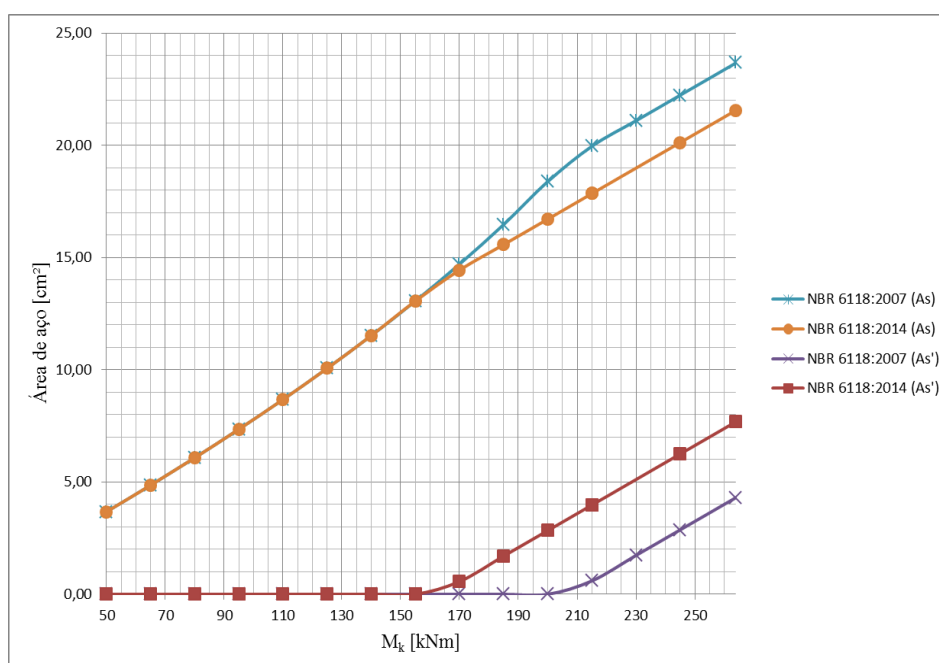
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro B4 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	215	245	264
	$x$ calculado (cm)	5,48	7,24	9,07	10,97	12,94	15,01	17,19	19,49	21,94	24,57	27,43	30,59	30,59	38,43	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$x$ utilizado (cm)	5,48	7,24	9,07	10,97	12,94	15,01	17,19	19,49	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,68	4,86	6,08	7,35	8,68	10,06	11,52	13,06	14,44	15,58	16,71	17,85	17,85	20,12	21,56
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	1,70	2,84	3,98	3,98	6,25	7,69
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	3,68	4,86	6,08	7,35	8,68	10,06	11,52	13,06	15,01	17,28	19,55	21,82	21,82	26,37	29,25
	Taxa (%)	0,37	0,49	0,61	0,74	0,87	1,01	1,15	1,31	1,50	1,73	1,96	2,18	2,18	2,64	2,92
$A_{s\ min}$ (cm <sup>2</sup> )	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330
	$V_{rd2}$ (kN)	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41	468,41
	$V_c$ (kN)	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94	79,94
	$V_{sw}$ (kN)	88,06	109,06	130,06	151,06	172,06	193,06	214,06	235,06	256,06	277,06	298,06	319,06	340,06	361,06	382,06
	$V_{rd3}$ (kN)	168,00	189,00	210,00	231,00	252,00	273,00	294,00	315,00	336,00	357,00	378,00	399,00	420,00	441,00	462,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	4,89	6,06	7,23	8,39	9,56	10,73	11,89	13,06	14,23	15,39	16,56	17,73	18,89	20,06	21,23
	$A_{sw\ min}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32

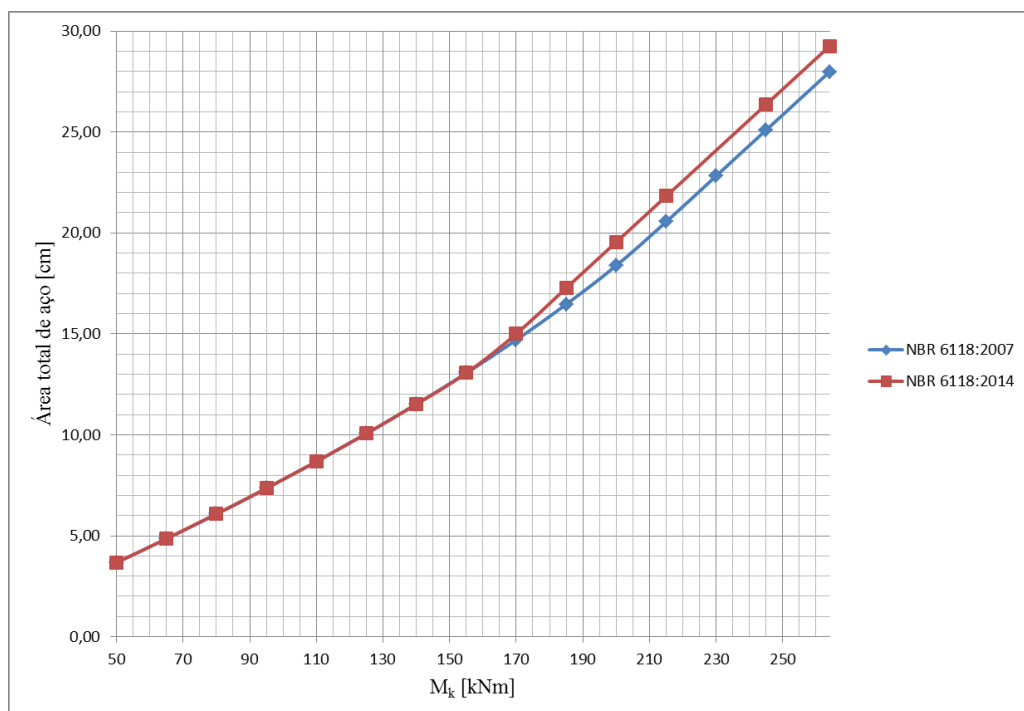
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura B4 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



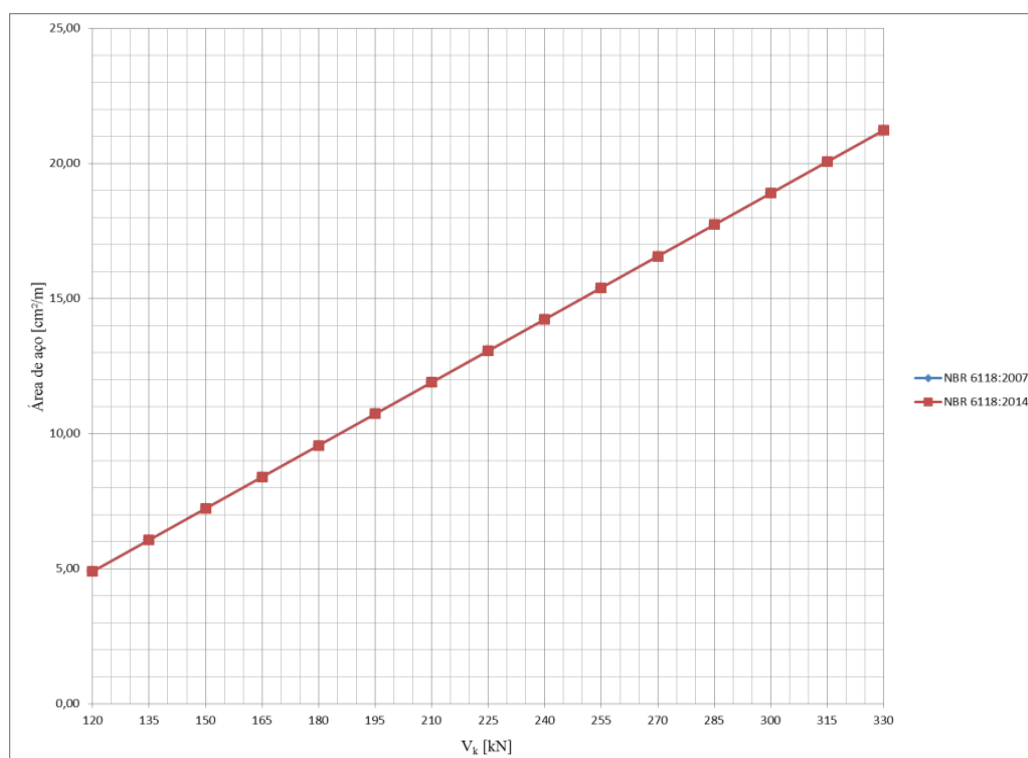
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B5 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B6 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B5 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	352
	$x$ calculado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	31,15	34,83	39,23	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	28,89	28,89	28,89	28,89
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	5,16	6,74	8,38	10,09	11,87	13,74	15,70	17,77	19,99	22,37	24,96	26,87	28,38	29,90	31,56
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	2,56	4,08	5,74
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	5,16	6,74	8,38	10,09	11,87	13,74	15,70	17,77	19,99	22,37	24,96	27,91	30,94	33,97	37,31
	Taxa (%)	0,52	0,67	0,84	1,01	1,19	1,37	1,57	1,78	2,00	2,24	2,50	2,79	3,09	3,40	3,73
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
	$V_{rd2}$ (kN)	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16
	$V_c$ (kN)	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84
	$V_{sw}$ (kN)	8,16	43,16	78,16	113,16	148,16	183,16	218,16	253,16	288,16	323,16	358,16	393,16	428,16	463,16	498,16
	$V_{rd3}$ (kN)	105,00	140,00	175,00	210,00	245,00	280,00	315,00	350,00	385,00	420,00	455,00	490,00	525,00	560,00	595,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,45	2,40	4,34	6,29	8,23	10,18	12,12	14,06	16,01	17,95	19,90	21,84	23,79	25,73	27,68
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

(fonte: elaborado pelo autor)

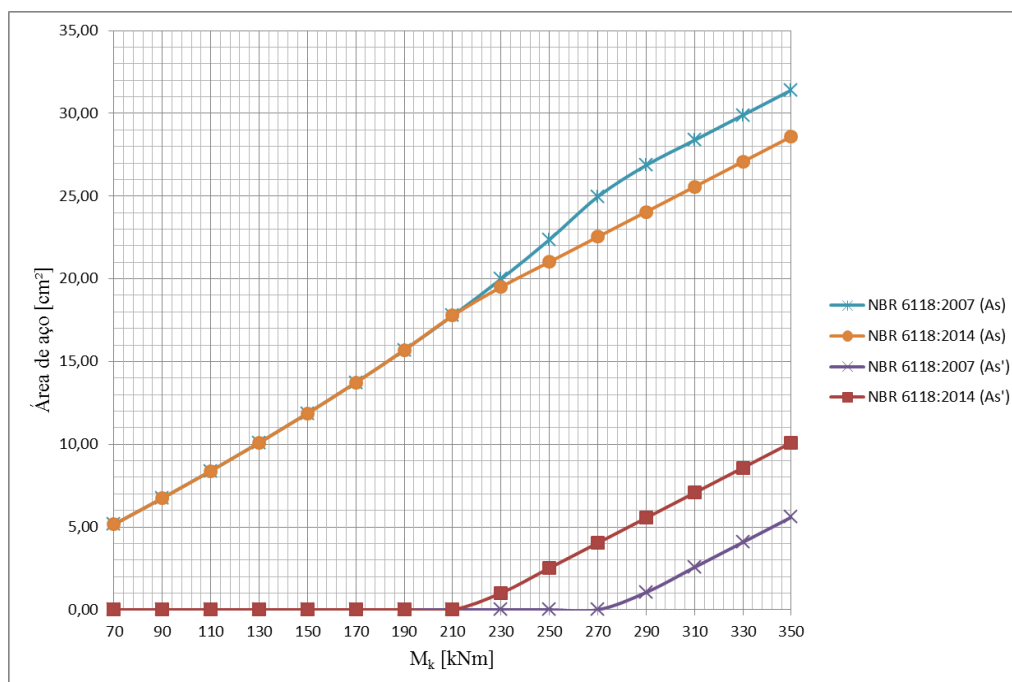
Quadro B6 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	352
	$x$ calculado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	22,36	25,03	27,93	31,15	34,83	39,23	45,85
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$x$ utilizado (cm)	5,77	7,54	9,38	11,29	13,28	15,37	17,56	19,89	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	5,16	6,74	8,38	10,09	11,87	13,74	15,70	17,77	19,51	21,02	22,54	24,05	25,57	27,08	28,75
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	2,52	4,04	5,55	7,07	8,58	10,25
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	5,16	6,74	8,38	10,09	11,87	13,74	15,70	17,77	20,51	23,54	26,57	29,61	32,64	35,67	39,00
	Taxa (%)	0,52	0,67	0,84	1,01	1,19	1,37	1,57	1,78	2,05	2,35	2,66	2,96	3,26	3,57	3,90
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
	$V_{rd2}$ (kN)	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16	596,16
	$V_c$ (kN)	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84	96,84
	$V_{sw}$ (kN)	8,16	43,16	78,16	113,16	148,16	183,16	218,16	253,16	288,16	323,16	358,16	393,16	428,16	463,16	498,16
	$V_{rd3}$ (kN)	105,00	140,00	175,00	210,00	245,00	280,00	315,00	350,00	385,00	420,00	455,00	490,00	525,00	560,00	595,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,45	2,40	4,34	6,29	8,23	10,18	12,12	14,06	16,01	17,95	19,90	21,84	23,79	25,73	27,68
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

(fonte: elaborado pelo autor)

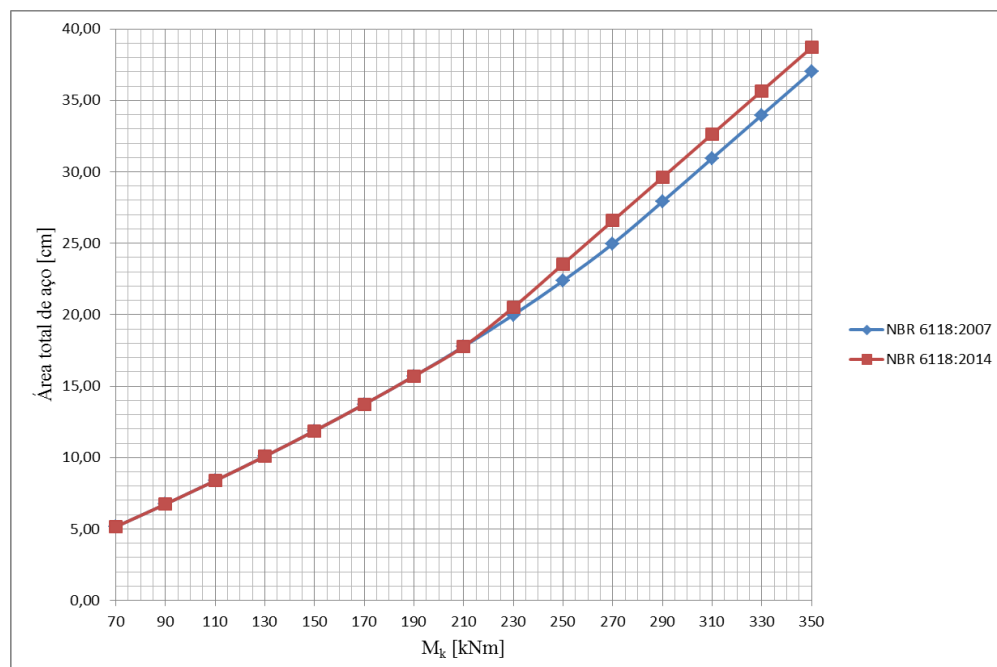
Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova Norma NBR 6118 e a Norma Americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas

Figura B7 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



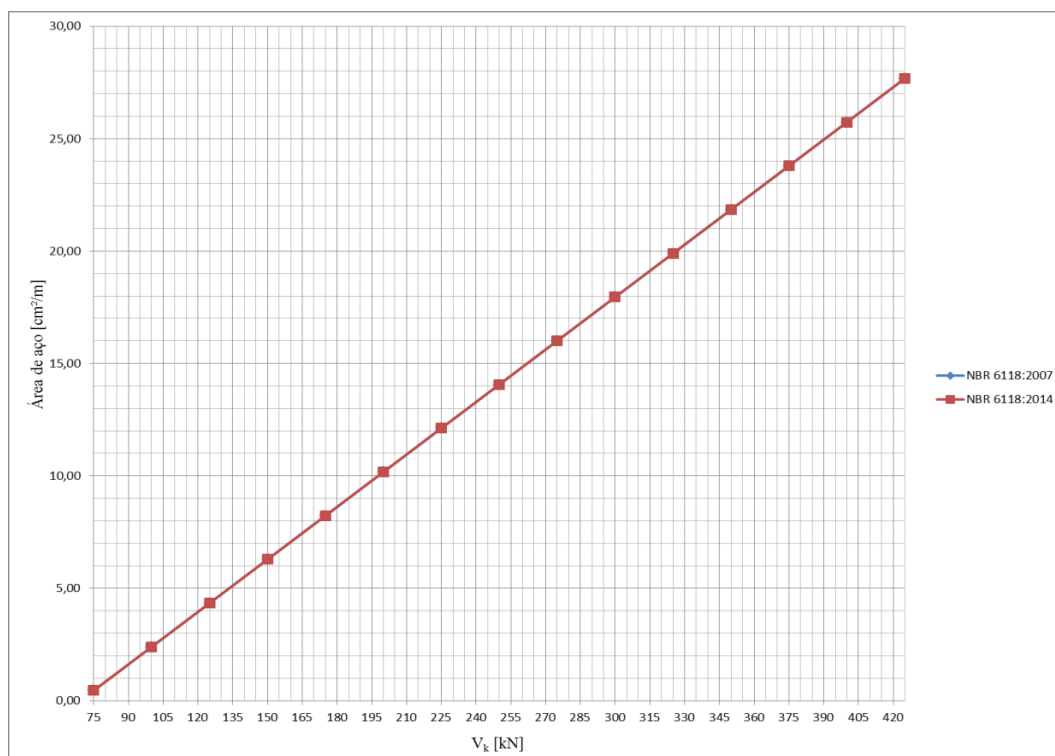
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B8 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B9 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B7 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
		$f_{ck}$ (MPa)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	30	55	80	105	130	155	180	205	230	255	280	305	330	355	382
	$x$ calculado (cm)	1,91	3,56	5,25	7,01	8,82	10,71	12,68	14,73	16,89	19,18	21,60	24,21	27,03	30,15	33,97
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	1,91	3,56	5,25	7,01	8,82	10,71	12,68	14,73	16,89	19,18	21,60	24,21	27,03	28,89	28,89
	$A_s$ (cm²)	2,14	3,97	5,87	7,83	9,86	11,96	14,16	16,46	18,87	21,42	24,13	27,04	30,20	33,01	35,06
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	2,79
	$A_s$ total (cm²)	2,14	3,97	5,87	7,83	9,86	11,96	14,16	16,46	18,87	21,42	24,13	27,04	30,20	33,75	37,85
	Taxa (%)	0,21	0,40	0,59	0,78	0,99	1,20	1,42	1,65	1,89	2,14	2,41	2,70	3,02	3,38	3,78
$A_{s_{min}}$ (cm²)	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	85	115	145	175	205	235	265	295	325	355	385	415	445	475	505
	$V_{rd2}$ (kN)	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71
	$V_c$ (kN)	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38
	$V_{sw}$ (kN)	6,62	48,62	90,62	132,62	174,62	216,62	258,62	300,62	342,62	384,62	426,62	468,62	510,62	552,62	594,62
	$V_{rd3}$ (kN)	119,00	161,00	203,00	245,00	287,00	329,00	371,00	413,00	455,00	497,00	539,00	581,00	623,00	665,00	707,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	0,37	2,70	5,03	7,37	9,70	12,03	14,37	16,70	19,03	21,37	23,70	26,03	28,37	30,70	33,03
	$A_{sw_{min}}$ (cm²)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

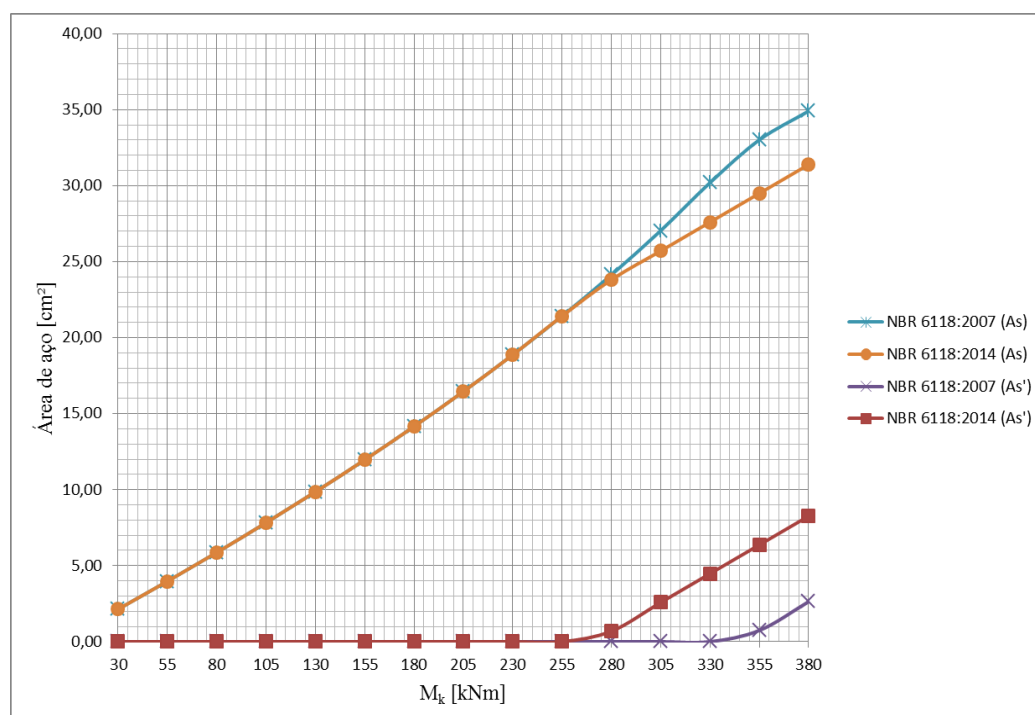
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro B8 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	30	55	80	105	130	155	180	205	230	255	280	305	330	355	382
	$x$ calculado (cm)	1,91	3,56	5,25	7,01	8,82	10,71	12,68	14,73	16,89	19,18	21,60	24,21	27,03	30,15	33,97
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$x$ utilizado (cm)	1,91	3,56	5,25	7,01	8,82	10,71	12,68	14,73	16,89	19,18	20,70	20,70	20,70	20,70	20,70
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	2,14	3,97	5,87	7,83	9,86	11,96	14,16	16,46	18,87	21,42	23,81	25,71	27,60	29,50	31,54
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	2,58	4,48	6,37	8,42
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,14	3,97	5,87	7,83	9,86	11,96	14,16	16,46	18,87	21,42	24,51	28,29	32,08	35,87	39,96
	Taxa (%)	0,21	0,40	0,59	0,78	0,99	1,20	1,42	1,65	1,89	2,14	2,45	2,83	3,21	3,59	4,00
	$A_{s\min}$ (cm <sup>2</sup> )	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	85	115	145	175	205	235	265	295	325	355	385	415	445	475	505
	$V_{rd2}$ (kN)	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71	709,71
	$V_c$ (kN)	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38	112,38
	$V_{sw}$ (kN)	6,62	48,62	90,62	132,62	174,62	216,62	258,62	300,62	342,62	384,62	426,62	468,62	510,62	552,62	594,62
	$V_{rd3}$ (kN)	119,00	161,00	203,00	245,00	287,00	329,00	371,00	413,00	455,00	497,00	539,00	581,00	623,00	665,00	707,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,37	2,70	5,03	7,37	9,70	12,03	14,37	16,70	19,03	21,37	23,70	26,03	28,37	30,70	33,03
	$A_{sw\min}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

(fonte: elaborado pelo autor)

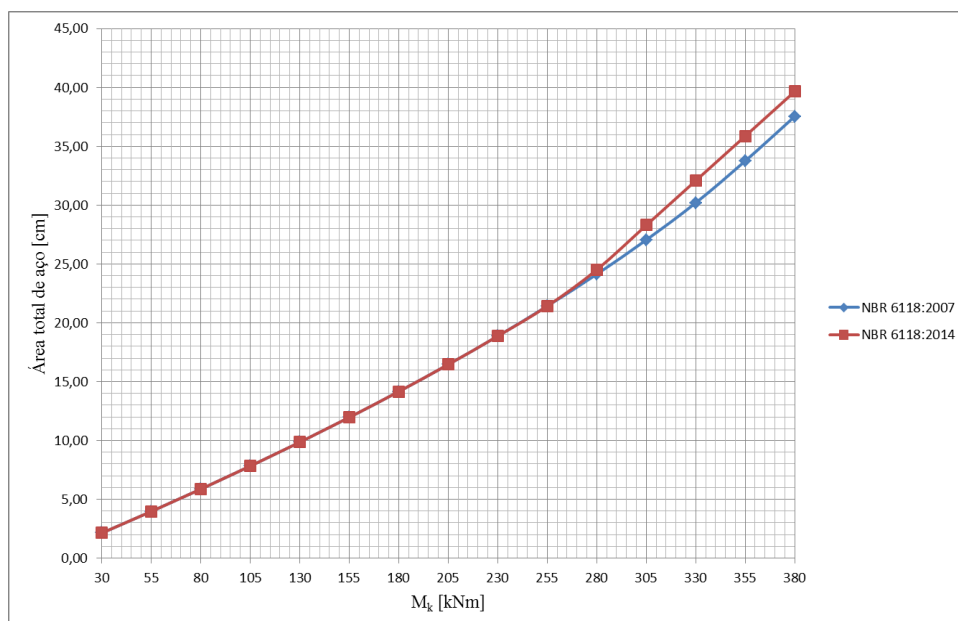
Figura B10 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

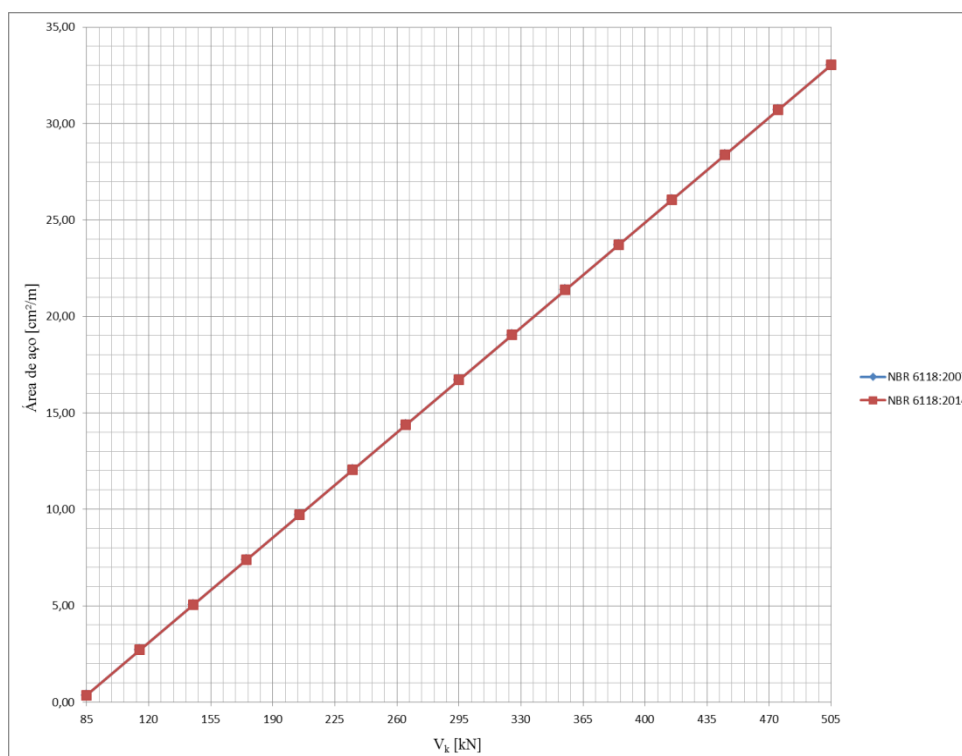


Figura B11 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B12 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B9 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	95	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	378
	$x$ calculado (cm)	5,66	6,93	8,23	9,57	10,94	12,35	13,80	15,31	16,86	18,48	20,16	21,92	23,76	25,71	28,10
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$x_{23}$ (cm)	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30	10,30
	$x_{lim}$ (cm)	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78	26,78
	$x$ utilizado (cm)	5,66	6,93	8,23	9,57	10,94	12,35	13,80	15,31	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$\epsilon_{c2}$	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229
	$\epsilon_{cu}$	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288
	$\lambda$	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
	$\alpha_c$	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	6,98	8,55	10,15	11,80	13,49	15,23	17,03	18,89	20,60	22,12	23,63	25,15	26,66	28,18	29,92
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	2,25	3,77	5,28	6,80	8,31	10,06
	$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	6,98	8,55	10,15	11,80	13,49	15,23	17,03	18,89	21,34	24,37	27,40	30,43	33,46	36,49	39,97
	Taxa (%)	0,70	0,85	1,02	1,18	1,35	1,52	1,70	1,89	2,13	2,44	2,74	3,04	3,35	3,65	4,00
	$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300
	$V_{rd2}$ (kN)	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07	809,07
	$V_c$ (kN)	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67	118,67
	$V_{sw}$ (kN)	7,33	28,33	49,33	70,33	91,33	112,33	133,33	154,33	175,33	196,33	217,33	238,33	259,33	280,33	301,33
	$V_{rd3}$ (kN)	126,00	147,00	168,00	189,00	210,00	231,00	252,00	273,00	294,00	315,00	336,00	357,00	378,00	399,00	420,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	0,41	1,57	2,74	3,91	5,07	6,24	7,41	8,57	9,74	10,91	12,07	13,24	14,41	15,57	16,74
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44

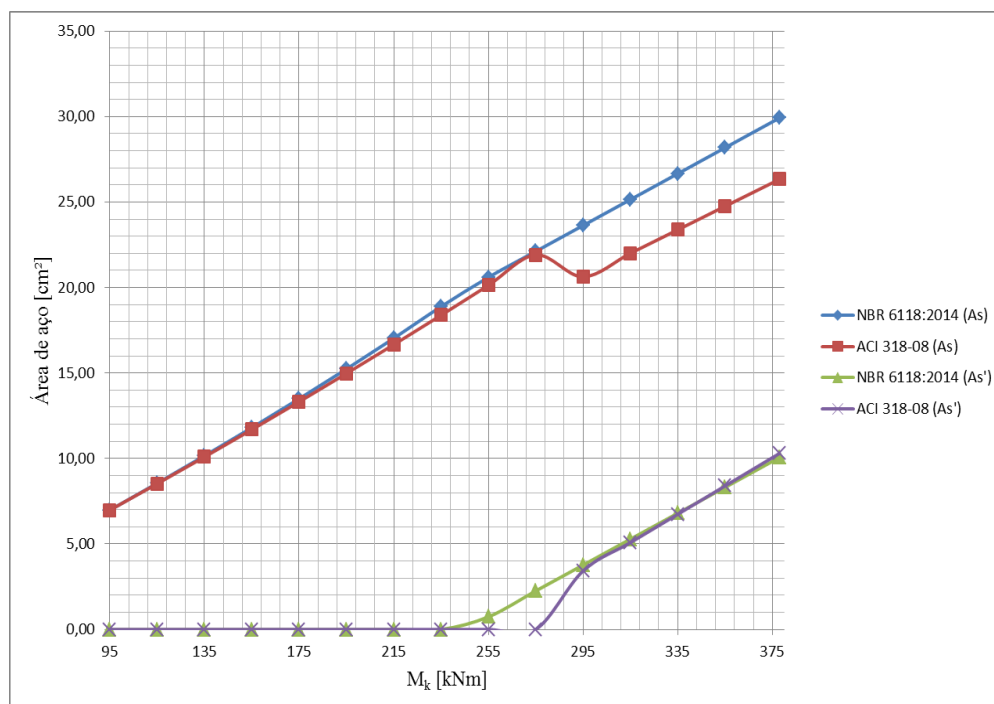
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro B10 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08														
$f'_c$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	95	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	378
	$M_u$ (kNm)	138,70	167,90	197,10	226,30	255,50	284,70	313,90	343,10	372,30	401,50	430,70	459,90	489,10	518,30	551,88
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	$c$	5,26	6,43	7,61	8,82	10,04	11,29	12,56	13,86	15,18	16,53	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!
	$0,375dt$	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$et$	0,0238	0,0189	0,0155	0,0130	0,0110	0,0095	0,0082	0,0072	0,0063	0,0055	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	466	466	466	466	466
	$es$	0,0232	0,0185	0,0151	0,0127	0,0107	0,0092	0,0080	0,0061	0,0054	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073
	$es'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022
	$c$ (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42
	$a$	3,42	4,18	4,95	5,73	6,53	7,34	8,17	9,01	9,87	10,74	8,72	8,72	8,72	8,72	8,72
	$A_s$	6,98	8,52	10,09	11,69	13,32	14,97	16,66	18,38	20,13	21,91	20,63	22,00	23,38	24,75	26,33
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	5,08	6,74	8,39	10,30
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	6,98	8,52	10,09	11,69	13,32	14,97	16,66	18,38	20,13	21,91	23,73	25,58	27,47	29,40	31,66
	$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300
	$V_u$ (kN)	131,4	153,3	175,2	197,1	219	240,9	262,8	284,7	306,6	328,5	350,4	372,3	394,2	416,1	438
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15	121,15
	$\sqrt{f'_c}$ (MPa)	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75
	$V_s$ (kN)	54,05	83,25	112,45	141,65	170,85	200,05	229,25	258,45	287,65	316,85	346,05	375,25	404,45	433,65	462,85
	$V_u$ (kN)	175,20	204,40	233,60	262,80	292,00	321,20	350,40	379,60	408,80	438,00	467,20	496,40	525,60	554,80	584,00
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,80	4,31	5,82	7,33	8,84	10,35	11,87	13,38	14,89	16,40	17,91	19,42	20,93	22,45	23,96
	$\phi(V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29

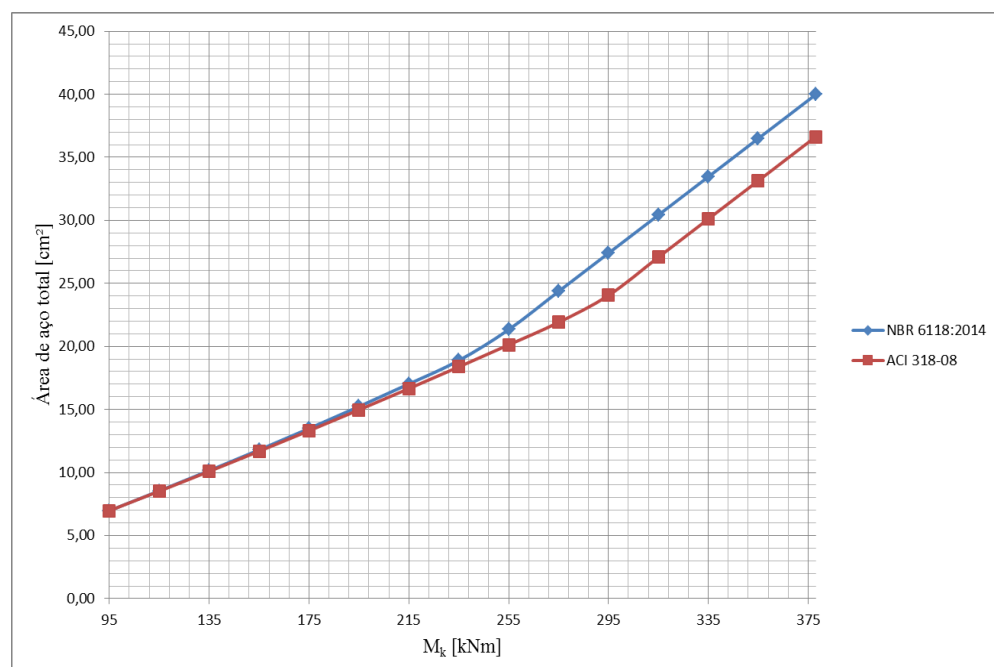
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura B13 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



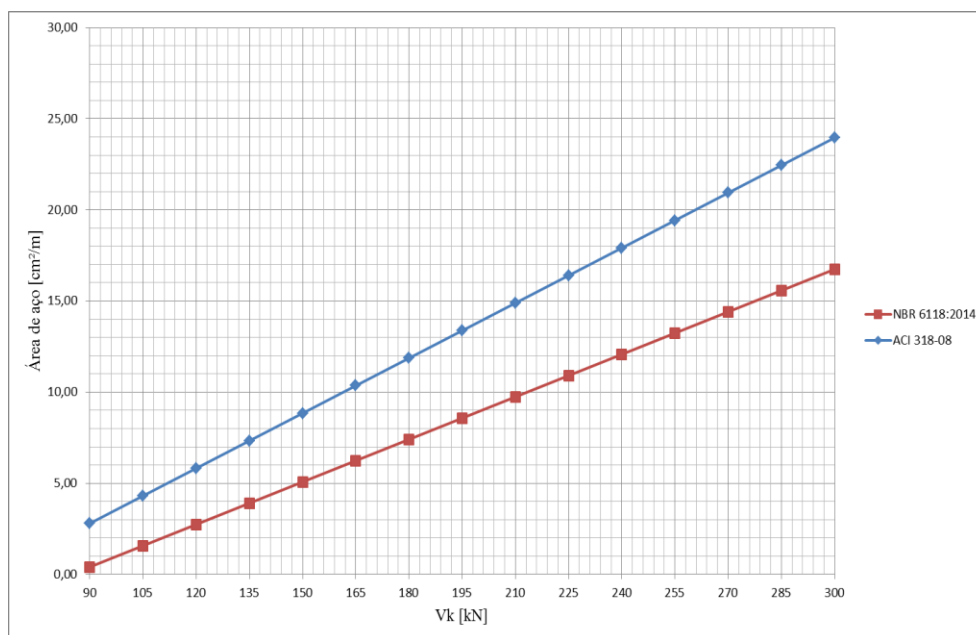
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B14 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B15 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B11 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiaada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	105	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	387
	$x$ calculado (cm)	5,85	7,03	8,25	9,49	10,76	12,06	13,40	14,78	16,20	17,66	19,18	20,75	22,39	24,09	26,07
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$x_{23}$ (cm)	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65	9,65
	$x_{lim}$ (cm)	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85	25,85
	$x$ utilizado (cm)	5,85	7,03	8,25	9,49	10,76	12,06	13,40	14,78	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$\epsilon_{c2}$	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242
	$\epsilon_{cu}$	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266
	$\lambda$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\alpha_c$	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$A_s$ (cm²)	7,72	9,28	10,88	12,52	14,19	15,91	17,68	19,50	21,35	22,86	24,38	25,89	27,41	28,92	30,59
$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1,62	3,13	4,65	6,16	7,68	9,34	
$A_s$ Total (cm²)	7,72	9,28	10,88	12,52	14,19	15,91	17,68	19,50	21,45	24,48	27,51	30,54	33,57	36,60	39,93	
Taxa (%)	0,77	0,93	1,09	1,25	1,42	1,59	1,77	1,95	2,14	2,45	2,75	3,05	3,36	3,66	3,99	
$A_{smin}$ (cm²)	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325
	$V_{rd}$ (kN)	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24
	$V_c$ (kN)	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58	126,58
	$V_{sw}$ (kN)	34,42	55,42	76,42	97,42	118,42	139,42	160,42	181,42	202,42	223,42	244,42	265,42	286,42	307,42	328,42
	$V_{rd}$ (kN)	161,00	182,00	203,00	224,00	245,00	266,00	287,00	308,00	329,00	350,00	371,00	392,00	413,00	434,00	455,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	1,91	3,08	4,25	5,41	6,58	7,75	8,91	10,08	11,25	12,41	13,58	14,75	15,91	17,08	18,25
	$A_{swmin}$ (cm²/m)	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67

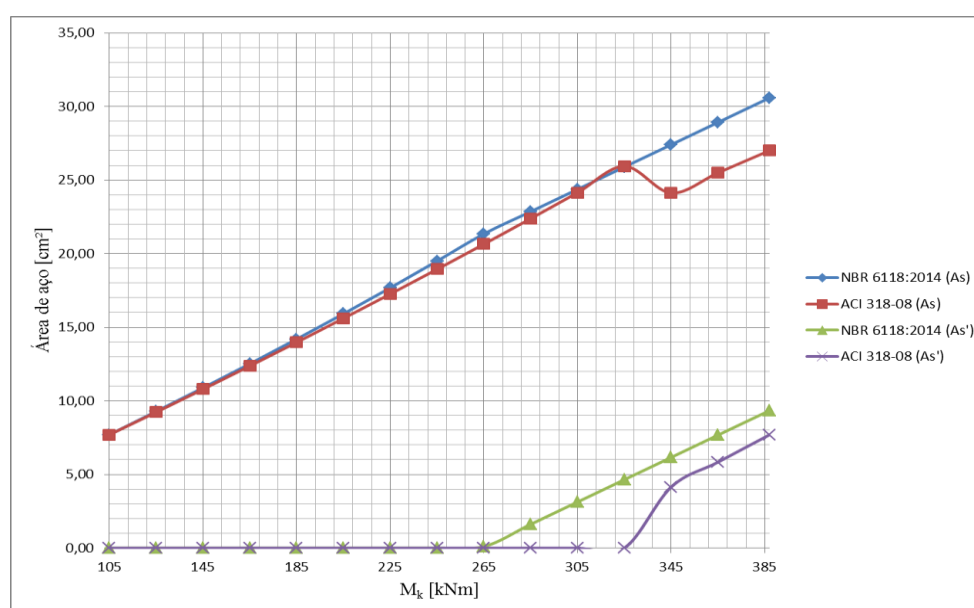
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro B12 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
$f_c'$ (MPa)		70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70		
Mk (kNm)		105	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	387	
Armadura Longitudinal	$M_n$ (kNm)	153,30	182,50	211,70	240,90	270,10	299,30	328,50	357,70	386,90	416,10	445,30	474,50	503,70	532,90	565,02	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	c	4,97	5,97	6,97	7,99	9,03	10,09	11,16	12,24	13,35	14,47	15,61	16,77	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	
	$0,375dt$	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$et$	0,0253	0,0206	0,0172	0,0146	0,0126	0,0110	0,0096	0,0085	0,0076	0,0067	0,0060	0,0054	0,0054	0,0075	0,0075	
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	466	466	466
	$es$	0,0247	0,0201	0,0168	0,0143	0,0123	0,0107	0,0094	0,0083	0,0073	0,0065	0,0058	0,0052	0,0052	0,0073	0,0073	0,0073
	$es'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0022	0,0022	0,0022
	c (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,42	13,42	13,42
	a	3,23	3,88	4,53	5,20	5,87	6,56	7,25	7,96	8,68	9,41	10,15	10,90	8,72	8,72	8,72	
	$A_s$	7,69	9,23	10,79	12,37	13,97	15,60	17,26	18,94	20,65	22,38	24,15	25,94	24,12	25,50	27,01	
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,15	5,84	7,70	
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	7,69	9,23	10,79	12,37	13,97	15,60	17,26	18,94	20,65	22,38	24,15	25,94	27,76	29,61	31,68	
	$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325	
	$V_u$ (kN)	167,9	189,8	211,7	233,6	255,5	277,4	299,3	321,2	343,1	365	386,9	408,8	430,7	452,6	474,5	
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	$V_c$ (kN)	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	
	$\phi f_c'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	
	$V_s$ (kN)	94,05	123,25	152,45	181,65	210,85	240,05	269,25	298,45	327,65	356,85	386,05	415,25	444,45	473,65	502,85	
	$V_n$ (kN)	223,87	253,07	282,27	311,47	340,67	369,87	399,07	428,27	457,47	486,67	515,87	545,07	574,27	603,47	632,67	
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	4,87	6,38	7,89	9,40	10,91	12,43	13,94	15,45	16,96	18,47	19,98	21,49	23,00	24,52	26,03	
	$\phi(V_n) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	

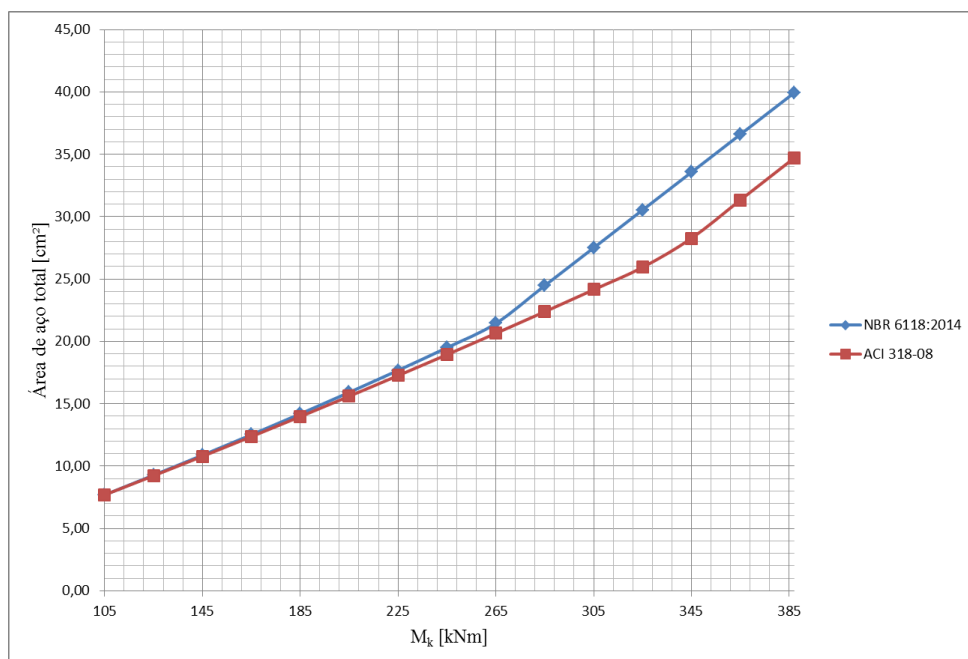
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura B16 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



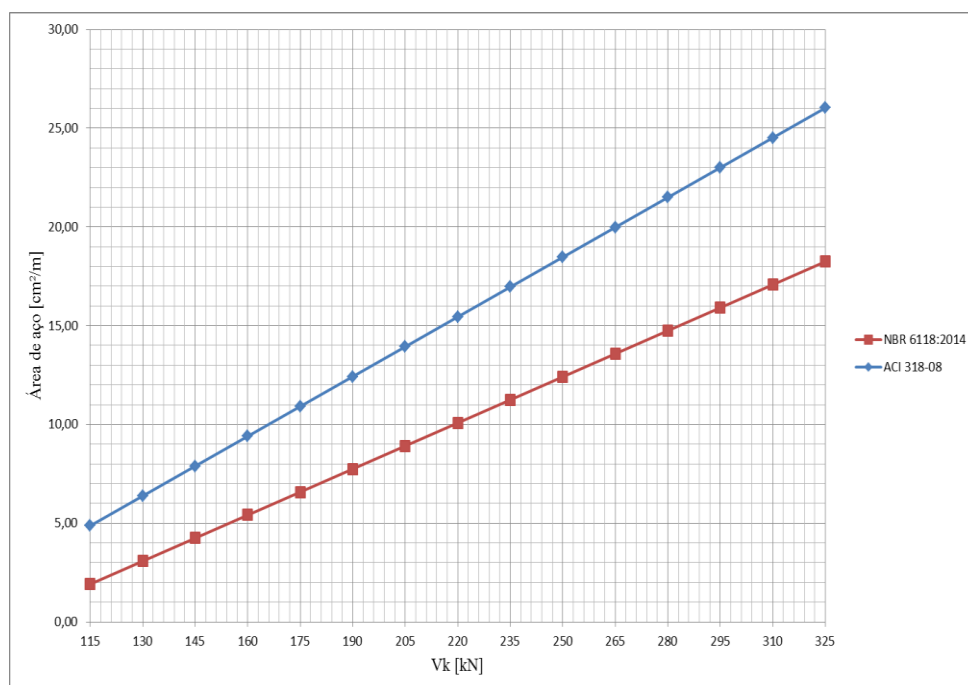
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B17 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B18 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B13 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Armatura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	393
	$x$ calculado (cm)	5,86	6,99	8,15	9,33	10,53	11,77	13,03	14,33	15,66	17,03	18,44	19,90	21,40	22,97	24,84
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$x_{23}$ (cm)	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
	$x_{lim}$ (cm)	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62	25,62
	$x$ utilizado (cm)	5,86	6,99	8,15	9,33	10,53	11,77	13,03	14,33	15,66	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$\epsilon_{c2}$	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
	$\alpha_c$	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	427,88	427,88	427,88	427,88	427,88	427,88
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	8,07	9,63	11,22	12,84	14,50	16,20	17,94	19,73	21,56	23,19	24,71	26,22	27,74	29,25	30,99
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,04	2,58	4,12	5,66	7,20	8,97
	$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	8,07	9,63	11,22	12,84	14,50	16,20	17,94	19,73	21,56	24,23	27,28	30,34	33,39	36,45	39,96
Taxa (%)	0,81	0,96	1,12	1,28	1,45	1,62	1,79	1,97	2,16	2,42	2,73	3,03	3,34	3,64	4,00	
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	
Armatura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325
	$V_{rd}$ (kN)	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21	965,21
	$V_c$ (kN)	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55	133,55
	$V_{sw}$ (kN)	27,45	48,45	69,45	90,45	111,45	132,45	153,45	174,45	195,45	216,45	237,45	258,45	279,45	300,45	321,45
	$V_{rd}$ (kN)	161,00	182,00	203,00	224,00	245,00	266,00	287,00	308,00	329,00	350,00	371,00	392,00	413,00	434,00	455,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,53	2,69	3,86	5,03	6,19	7,36	8,53	9,69	10,86	12,03	13,19	14,36	15,53	16,69	17,86
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87

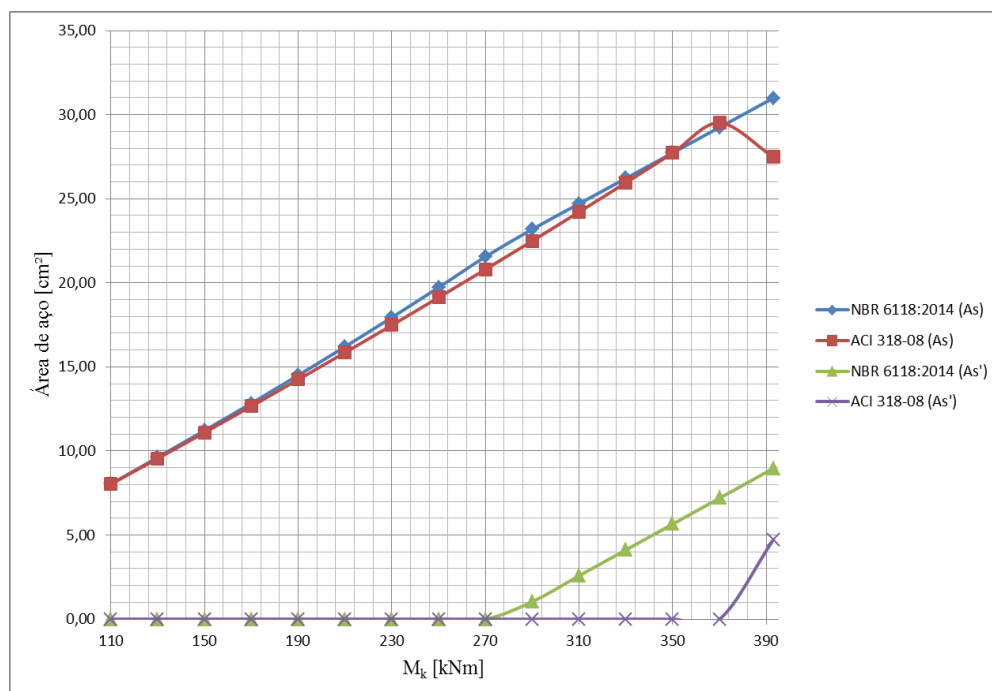
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro B14 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08														
$f_c'$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Armatura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	393
	$M_u$ (kNm)	160,60	189,80	219,00	248,20	277,40	306,60	335,80	365,00	394,20	423,40	452,60	481,80	511,00	540,20	573,78
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	$c$	4,54	5,41	6,28	7,16	8,06	8,97	9,89	10,82	11,77	12,72	13,70	14,68	15,68	16,70	17,63
	$0,375dt$	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$et$	0,0280	0,0231	0,0195	0,0167	0,0145	0,0127	0,0113	0,0100	0,0090	0,0081	0,0073	0,0066	0,0060	0,0054	0,0047
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	466
	$es$	0,0274	0,0225	0,0190	0,0163	0,0141	0,0124	0,0110	0,0098	0,0087	0,0078	0,0071	0,0064	0,0058	0,0053	0,0047
	$es'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0022
	$c$ (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,42
	$a$	2,95	3,51	4,08	4,66	5,24	5,83	6,43	7,03	7,65	8,27	8,90	9,54	10,19	10,85	8,72
	$A_s$	8,04	9,56	11,10	12,66	14,25	15,85	17,48	19,13	20,80	22,50	24,22	25,96	27,72	29,52	27,48
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,73
$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	8,04	9,56	11,10	12,66	14,25	15,85	17,48	19,13	20,80	22,50	24,22	25,96	27,72	29,52	31,61	
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	
Armatura Transversal (estribos)	$V_k$	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325
	$V_u$ (kN)	167,9	189,8	211,7	233,6	255,5	277,4	299,3	321,2	343,1	365	386,9	408,8	430,7	452,6	474,5
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81
	$V_f'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
	$V_u$ (kN)	94,05	123,25	152,45	181,65	210,85	240,05	269,25	298,45	327,65	356,85	386,05	415,25	444,45	473,65	502,85
	$V_u$ (kN)	223,87	253,07	282,27	311,47	340,67	369,87	399,07	428,27	457,47	486,67	515,87	545,07	574,27	603,47	632,67
	$A_w$ (cm <sup>2</sup> /m)	4,87	6,38	7,89	9,40	10,91	12,43	13,94	15,45	16,96	18,47	19,98	21,49	23,00	24,52	26,03
	$\phi(V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

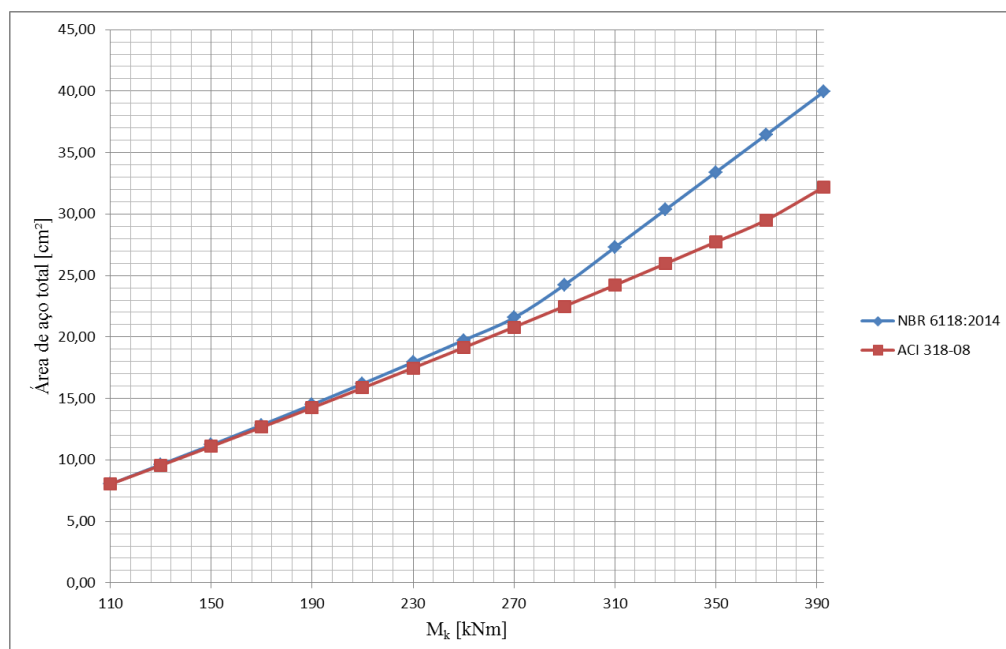
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura B19 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

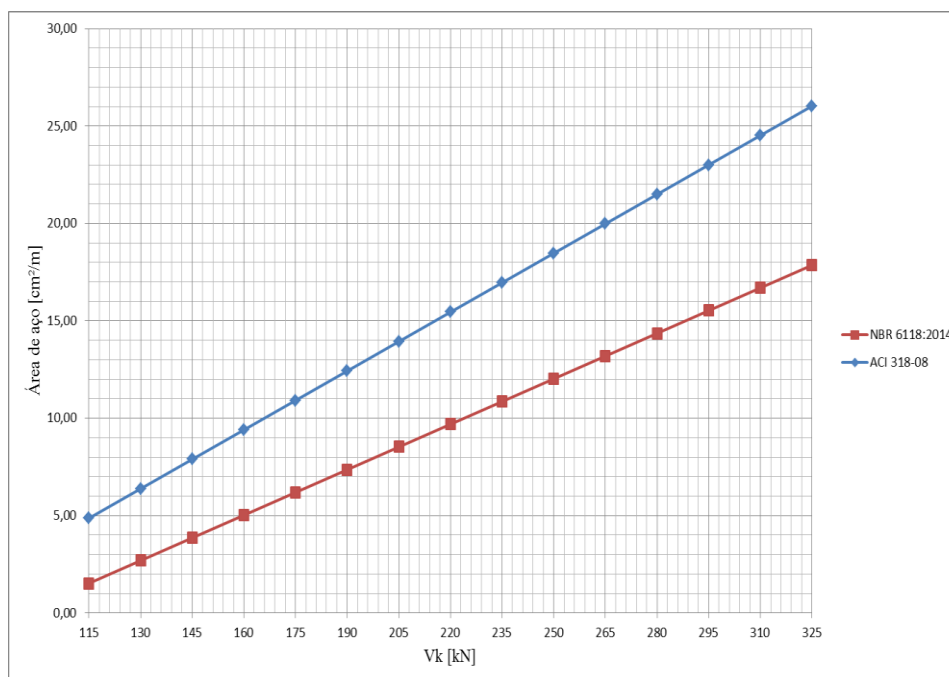
Figura B20 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)



Figura B21 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro B15 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Armadura Longitudinal	$f_{ck}$ (MPa)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
	$M_k$ (kNm)	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	397
	$x$ calculado (cm)	5,99	7,10	8,22	9,37	10,54	11,74	12,97	14,22	15,50	16,82	18,18	19,58	21,01	22,50	24,20
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$x_{23}$ (cm)	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49
	$x_{lim}$ (cm)	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61	25,61
	$x$ utilizado (cm)	5,99	7,10	8,22	9,37	10,54	11,74	12,97	14,22	15,50	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10	16,10
	$\epsilon_{c2}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	$\alpha_c$	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	427,30	427,30	427,30	427,30	427,30
	$A_s$ (cm²)	8,43	9,99	11,57	13,19	14,84	16,53	18,25	20,02	21,82	23,49	25,00	26,52	28,03	29,55	31,22
$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	2,38	3,92	5,47	7,01	8,70
$A_s$ Total (cm²)	8,43	9,99	11,57	13,19	14,84	16,53	18,25	20,02	21,82	24,33	27,39	30,44	33,50	36,56	39,92	
Taxa (%)	0,84	1,00	1,16	1,32	1,48	1,65	1,83	2,00	2,18	2,43	2,74	3,04	3,35	3,66	3,99	
$A_{smin}$ (cm²)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325
	$V_{rd}$ (kN)	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99	1021,99
	$V_c$ (kN)	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77	139,77
	$V_{sw}$ (kN)	21,23	42,23	63,23	84,23	105,23	126,23	147,23	168,23	189,23	210,23	231,23	252,23	273,23	294,23	315,23
	$V_{rd3}$ (kN)	161,00	182,00	203,00	224,00	245,00	266,00	287,00	308,00	329,00	350,00	371,00	392,00	413,00	434,00	455,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	1,18	2,35	3,51	4,68	5,85	7,01	8,18	9,35	10,51	11,68	12,85	14,01	15,18	16,35	17,51
	$A_{swmin}$ (cm²/m)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05

(fonte: elaborado pelo autor)

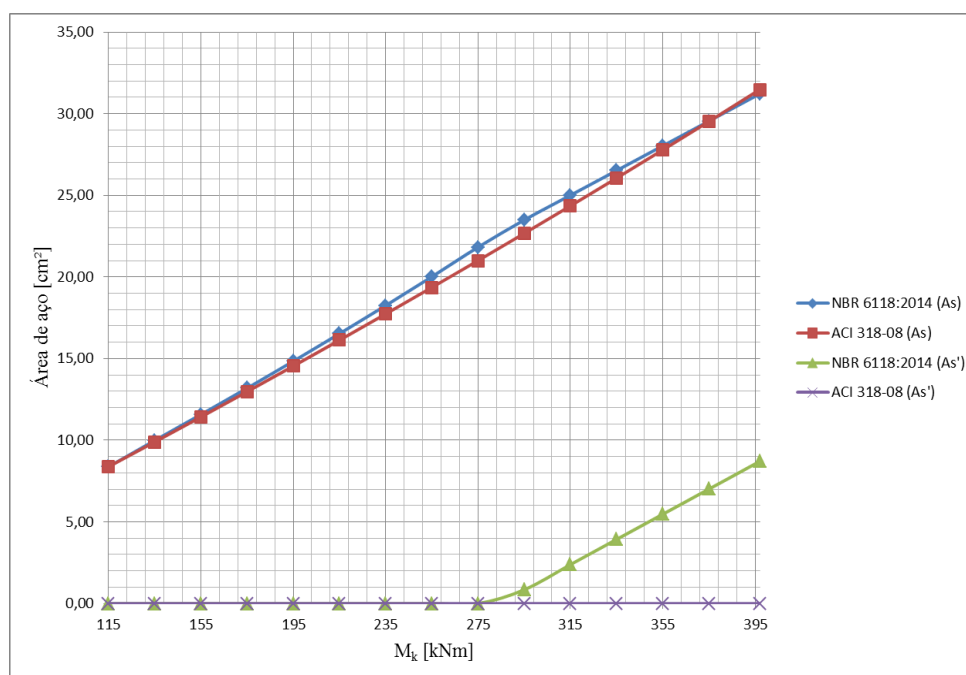
Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova Norma NBR 6118 e a Norma Americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas

Quadro B16 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90		
	$f_c'$ (MPa)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90		
	Mk (kNm)	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	397	
Armadura Longitudinal	$M_u$ (kNm)	167,90	197,10	226,30	255,50	284,70	313,90	343,10	372,30	401,50	430,70	459,90	489,10	518,30	547,50	579,62	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	c	4,21	4,97	5,74	6,52	7,31	8,11	8,92	9,73	10,56	11,40	12,24	13,10	13,97	14,85	15,83	
	0,375dt	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63	17,63
	j	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	et	0,0305	0,0253	0,0215	0,0186	0,0163	0,0144	0,0128	0,0115	0,0104	0,0094	0,0085	0,0078	0,0071	0,0065	0,0059	0,0057
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\epsilon_s$	0,0298	0,0247	0,0210	0,0182	0,0159	0,0140	0,0125	0,0112	0,0101	0,0091	0,0083	0,0075	0,0069	0,0063	0,0057	0,0057
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	c (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	a	2,74	3,23	3,73	4,24	4,75	5,27	5,80	6,33	6,86	7,41	7,96	8,52	9,08	9,65	10,29	10,99
	$A_s$	8,38	9,89	11,43	12,98	14,54	16,13	17,74	19,36	21,00	22,67	24,35	26,06	27,78	29,53	31,48	33,64
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	8,38	9,89	11,43	12,98	14,54	16,13	17,74	19,36	21,00	22,67	24,35	26,06	27,78	29,53	31,48	33,64
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36
Armadura Transversal (estribos)	Vk	50	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280	295	310	325	
	$V_u$ (kN)	73	189,8	211,7	233,6	255,5	277,4	299,3	321,2	343,1	365	386,9	408,8	430,7	452,6	474,5	496,4
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81	129,81
	$\sqrt{f_c}'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
	$V_u$ (kN)	-32,48	123,25	152,45	181,65	210,85	240,05	269,25	298,45	327,65	356,85	386,05	415,25	444,45	473,65	502,85	532,05
	$V_n$ (kN)	97,33	253,07	282,27	311,47	340,67	369,87	399,07	428,27	457,47	486,67	515,87	545,07	574,27	603,47	632,67	661,87
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	-1,68	6,38	7,89	9,40	10,91	12,43	13,94	15,45	16,96	18,47	19,98	21,49	23,00	24,52	26,03	27,54
	$\phi(V_n) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

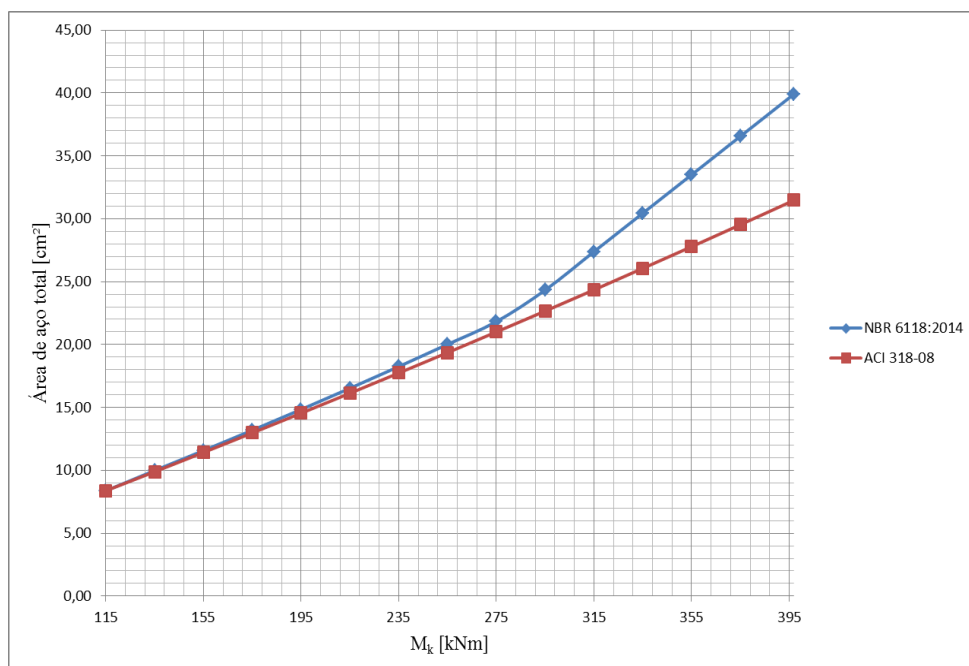
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura B22 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



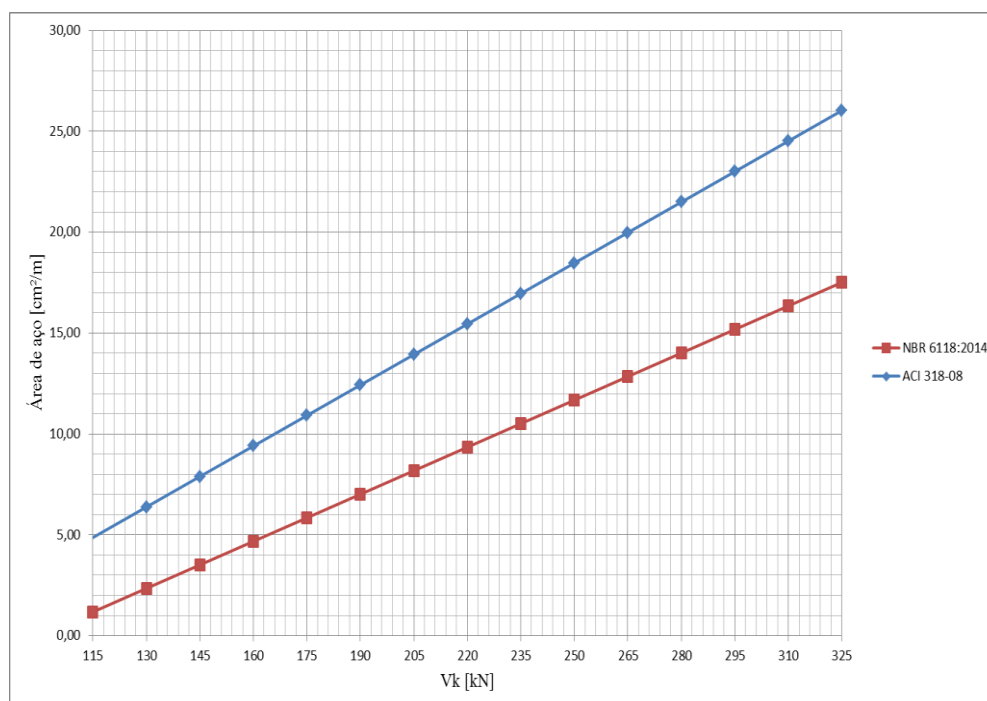
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B23 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B22 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

## **APÊNDICE C – Resultados das vigas 20x60**

Quadro C1 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245	261
	$x$ calculado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	37,96	42,49	47,95	55,92
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	35,17	35,17	35,17	35,17
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,02	3,99	5,00	6,05	7,14	8,28	9,49	10,76	12,12	13,59	15,19	16,35	17,27	18,19	19,17
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	1,55	2,47	3,46
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	3,02	3,99	5,00	6,05	7,14	8,28	9,49	10,76	12,12	13,59	15,19	16,98	18,82	20,66	22,63
	Taxa (%)	0,25	0,33	0,42	0,50	0,59	0,69	0,79	0,90	1,01	1,13	1,27	1,42	1,57	1,72	1,89
$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280
	$V_{rd2}$ (kN)	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44
	$V_c$ (kN)	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27
	$V_{sw}$ (kN)	23,73	44,73	65,73	86,73	107,73	128,73	149,73	170,73	191,73	212,73	233,73	254,73	275,73	296,73	317,73
	$V_{rd3}$ (kN)	98,00	119,00	140,00	161,00	182,00	203,00	224,00	245,00	266,00	287,00	308,00	329,00	350,00	371,00	392,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,08	2,04	3,00	3,96	4,92	5,87	6,83	7,79	8,75	9,71	10,67	11,62	12,58	13,54	14,50
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

(fonte: elaborado pelo autor)

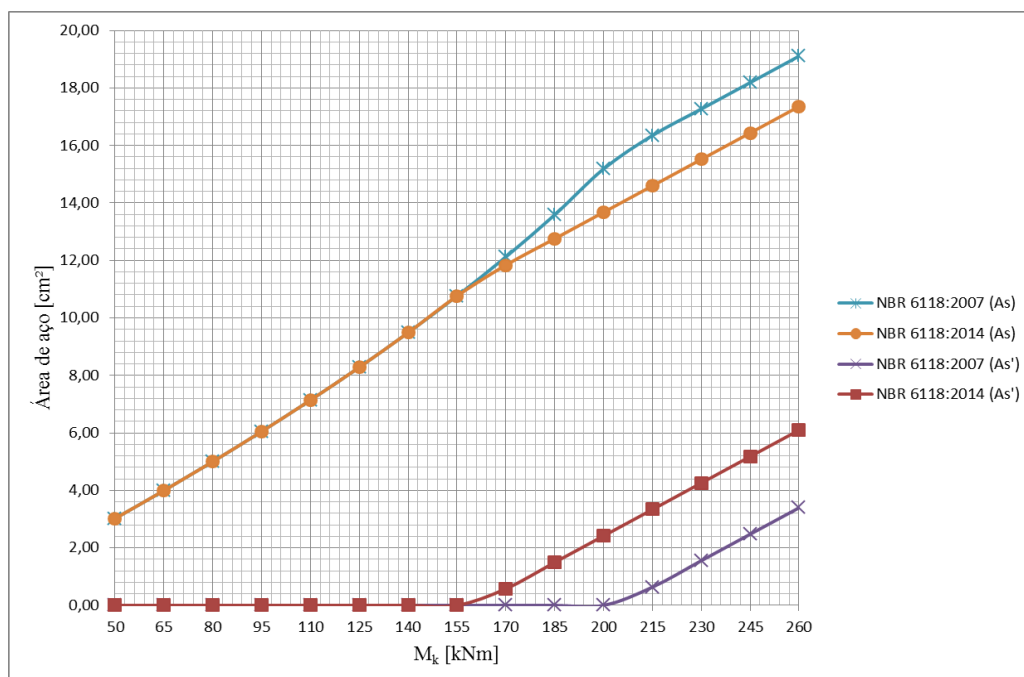
Quadro C2 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 20 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245	261
	$x$ calculado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	37,96	42,49	47,95	55,92
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$x$ utilizado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,02	3,99	5,00	6,05	7,14	8,28	9,49	10,76	11,84	12,76	13,68	14,60	15,52	16,44	17,42
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	1,50	2,42	3,34	4,26	5,18	6,16
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	3,02	3,99	5,00	6,05	7,14	8,28	9,49	10,76	12,42	14,26	16,10	17,94	19,78	21,62	23,58
	Taxa (%)	0,25	0,33	0,42	0,50	0,59	0,69	0,79	0,90	1,03	1,19	1,34	1,49	1,65	1,80	1,96
$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	70	85	100	115	130	145	160	175	190	205	220	235	250	265	280
	$V_{rd2}$ (kN)	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44	397,44
	$V_c$ (kN)	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27	74,27
	$V_{sw}$ (kN)	23,73	44,73	65,73	86,73	107,73	128,73	149,73	170,73	191,73	212,73	233,73	254,73	275,73	296,73	317,73
	$V_{rd3}$ (kN)	98,00	119,00	140,00	161,00	182,00	203,00	224,00	245,00	266,00	287,00	308,00	329,00	350,00	371,00	392,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,08	2,04	3,00	3,96	4,92	5,87	6,83	7,79	8,75	9,71	10,67	11,62	12,58	13,54	14,50
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77

(fonte: elaborado pelo autor)

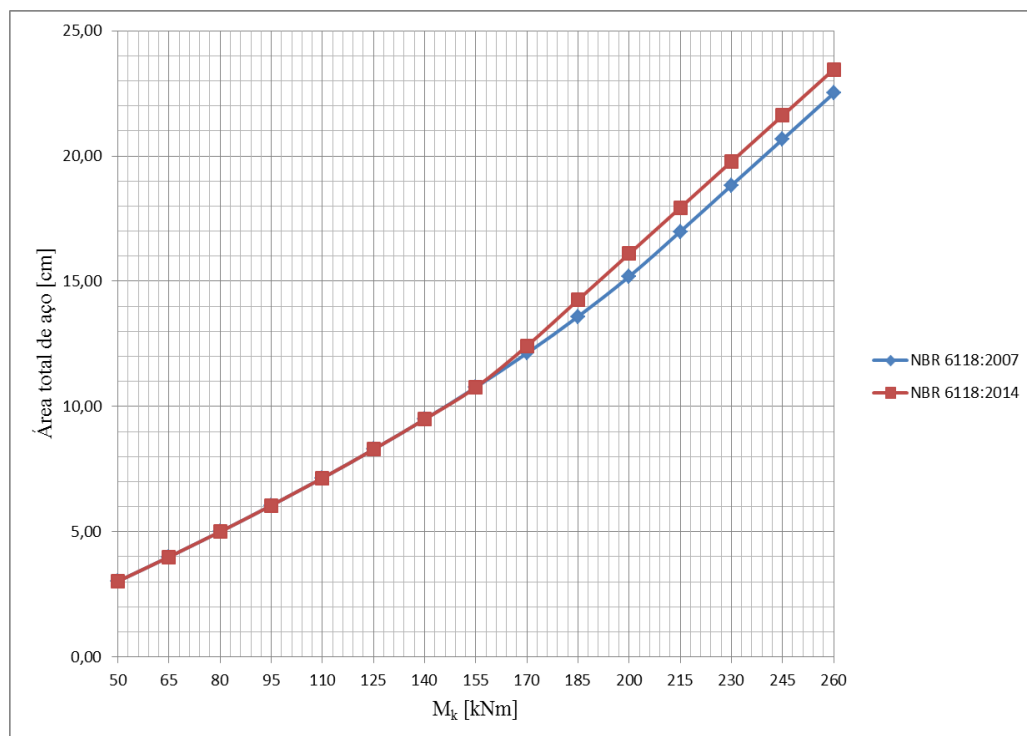
Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova Norma NBR 6118 e a Norma Americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas

Figura C1 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



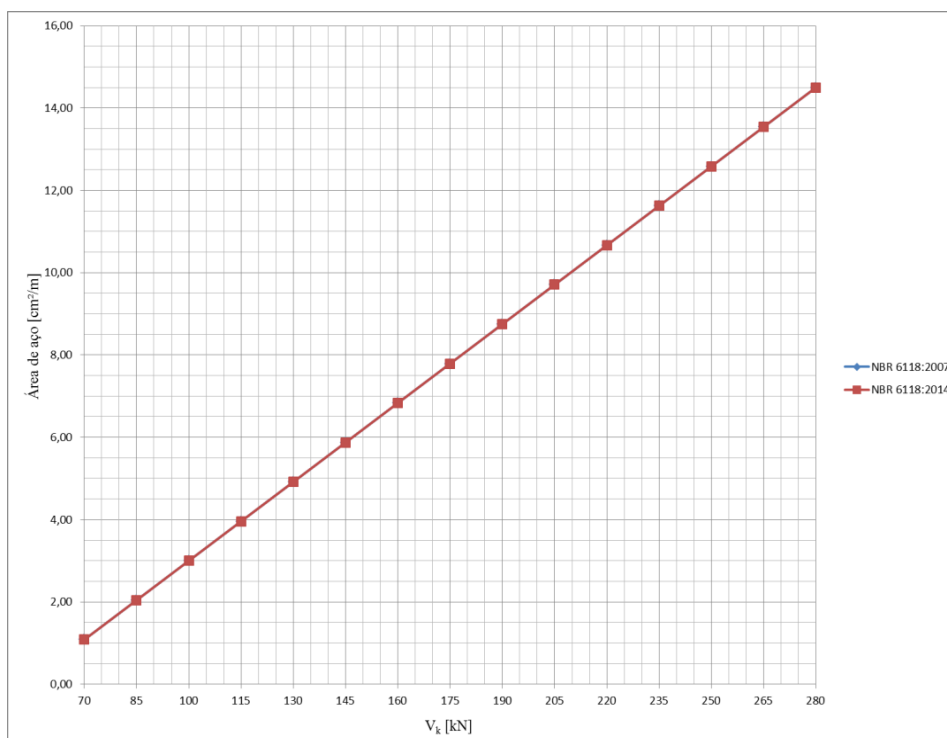
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C2 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C3 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  20 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C3 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Armadura Longitudinal	$f_{ck}$ (MPa)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	$M_k$ (kNm)	40	65	90	115	140	165	190	215	240	265	290	315	340	365	391
	$x$ calculado (cm)	3,52	5,82	8,20	10,68	13,27	15,98	18,83	21,86	25,08	28,56	32,35	36,58	41,42	47,28	55,71
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	3,52	5,82	8,20	10,68	13,27	15,98	18,83	21,86	25,08	28,56	32,35	35,17	35,17	35,17	35,17
	$A_s$ (cm²)	2,36	3,90	5,50	7,16	8,89	10,71	12,62	14,65	16,81	19,14	21,69	24,06	25,60	27,13	28,73
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	2,03	3,56	5,15
	$A_s$ total (cm²)	2,36	3,90	5,50	7,16	8,89	10,71	12,62	14,65	16,81	19,14	21,69	24,56	27,62	30,69	33,88
Taxa (%)	0,20	0,32	0,46	0,60	0,74	0,89	1,05	1,22	1,40	1,60	1,81	2,05	2,30	2,56	2,82	
$A_{s_{min}}$ (cm²)	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385	405
	$V_{rd2}$ (kN)	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24
	$V_c$ (kN)	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32
	$V_{sw}$ (kN)	77,68	105,68	133,68	161,68	189,68	217,68	245,68	273,68	301,68	329,68	357,68	385,68	413,68	441,68	469,68
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	203,00	231,00	259,00	287,00	315,00	343,00	371,00	399,00	427,00	455,00	483,00	511,00	539,00	567,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	3,54	4,82	6,10	7,38	8,66	9,93	11,21	12,49	13,77	15,04	16,32	17,60	18,88	20,16	21,43
	$A_{sw_{min}}$ (cm²)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32

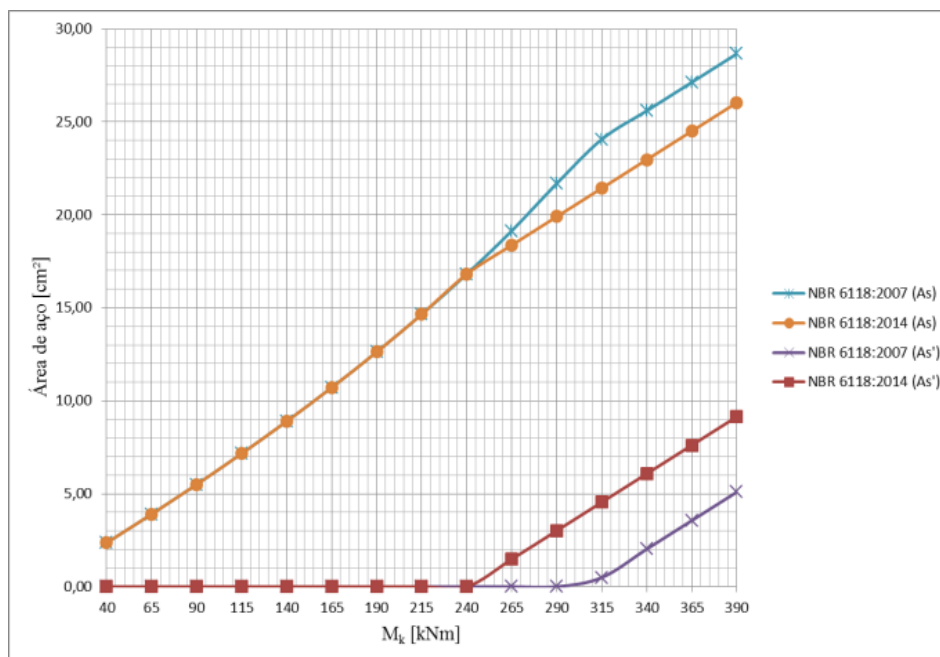
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro C4 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 30 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014															
$f_{ck}$ (MPa)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	40	65	90	115	140	165	190	215	240	265	290	315	340	365	391	
	$x$ calculado (cm)	3,52	5,82	8,20	10,68	13,27	15,98	18,83	21,86	25,08	28,56	32,35	36,58	41,42	47,28	55,71	
	Domínio	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	
	$x \leq 0,45d$	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	
	$x$ utilizado (cm)	3,52	5,82	8,20	10,68	13,27	15,98	18,83	21,86	25,08	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	2,36	3,90	5,50	7,16	8,89	10,71	12,62	14,65	16,81	18,37	19,90	21,44	22,97	24,50	26,10	
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,48	3,01	4,55	6,08	7,61	9,21
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	2,36	3,90	5,50	7,16	8,89	10,71	12,62	14,65	16,81	19,85	22,92	25,98	29,05	32,12	35,31	
	Taxa (%)	0,20	0,32	0,46	0,60	0,74	0,89	1,05	1,22	1,40	1,65	1,91	2,17	2,42	2,68	2,94	
	$A_{s\min}$ (cm <sup>2</sup> )	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385	405	
	$V_{rd2}$ (kN)	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	570,24	
	$V_c$ (kN)	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	97,32	
	$V_{sw}$ (kN)	77,68	105,68	133,68	161,68	189,68	217,68	245,68	273,68	301,68	329,68	357,68	385,68	413,68	441,68	469,68	
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	203,00	231,00	259,00	287,00	315,00	343,00	371,00	399,00	427,00	455,00	483,00	511,00	539,00	567,00	
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,54	4,82	6,10	7,38	8,66	9,93	11,21	12,49	13,77	15,04	16,32	17,60	18,88	20,16	21,43	
	$A_{sw\min}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	

(fonte: elaborado pelo autor)

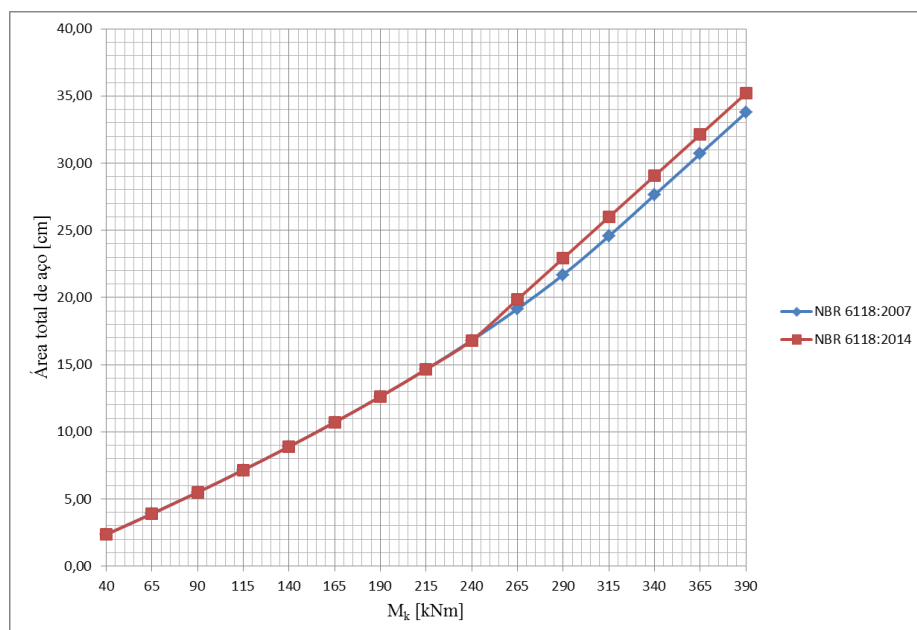
Figura C4 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

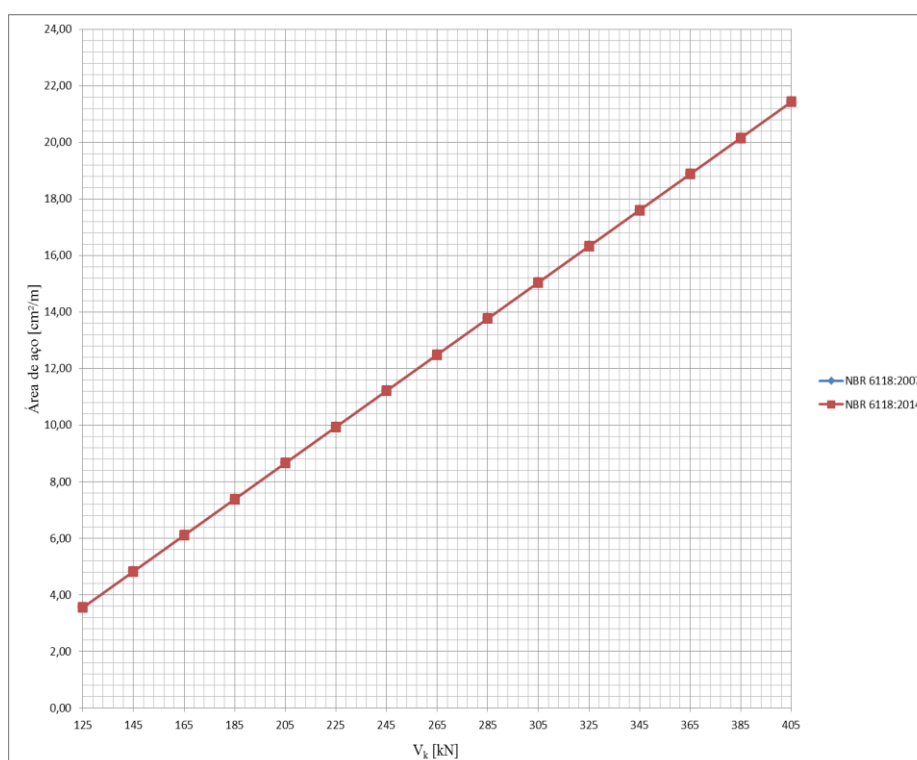


Figura C5 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C6 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  30 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C5 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	100	130	160	190	220	250	280	310	340	370	400	430	460	490	522
	$x$ calculado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	37,96	42,49	47,95	55,92
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	35,17	35,17	35,17	35,17
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	6,04	7,98	10,00	12,09	14,28	16,57	18,98	21,53	24,25	27,18	30,37	32,70	34,54	36,38	38,34
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,27	3,11	4,95	6,91
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	6,04	7,98	10,00	12,09	14,28	16,57	18,98	21,53	24,25	27,18	30,37	33,97	37,65	41,33	45,25
	Taxa (%)	0,50	0,67	0,83	1,01	1,19	1,38	1,58	1,79	2,02	2,26	2,53	2,83	3,14	3,44	3,77
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385	405
	$V_{rd2}$ (kN)	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76
	$V_c$ (kN)	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90
	$V_{sw}$ (kN)	57,10	85,10	113,10	141,10	169,10	197,10	225,10	253,10	281,10	309,10	337,10	365,10	393,10	421,10	449,10
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	203,00	231,00	259,00	287,00	315,00	343,00	371,00	399,00	427,00	455,00	483,00	511,00	539,00	567,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,61	3,88	5,16	6,44	7,72	8,99	10,27	11,55	12,83	14,11	15,38	16,66	17,94	19,22	20,49
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

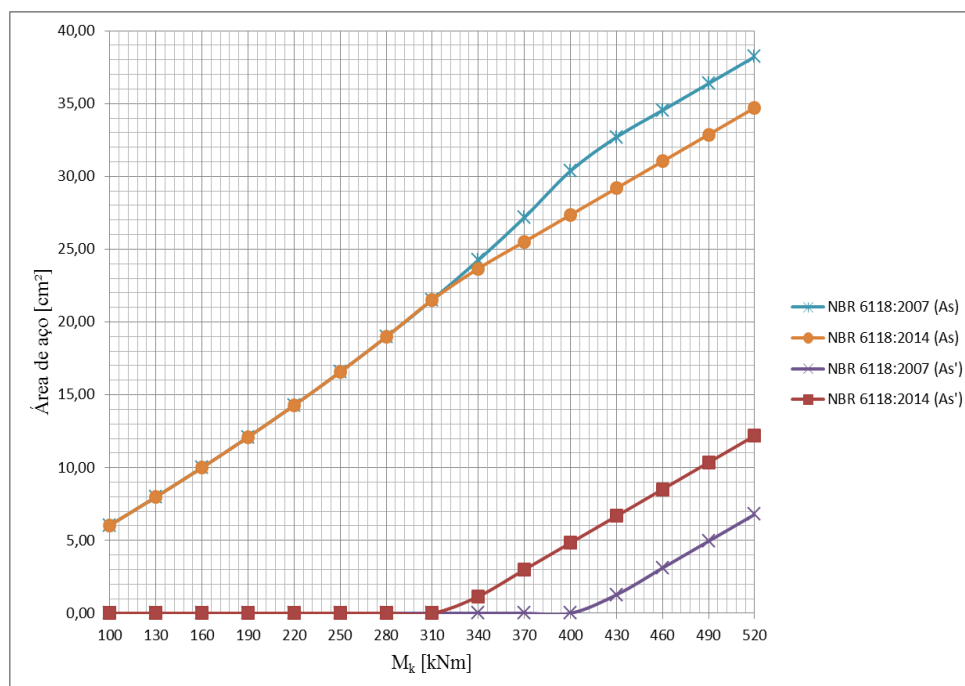
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro C6 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 40 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	100	130	160	190	220	250	280	310	340	370	400	430	460	490	522
	$x$ calculado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	27,13	30,41	33,99	37,96	42,49	47,95	55,92
	Domínio	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	$x \leq 0,45d$	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$x$ utilizado (cm)	6,76	8,93	11,19	13,53	15,98	18,54	21,24	24,09	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	6,04	7,98	10,00	12,09	14,28	16,57	18,98	21,53	23,68	25,52	27,36	29,20	31,04	32,88	34,84
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	2,99	4,83	6,67	8,51	10,35	12,32
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	6,04	7,98	10,00	12,09	14,28	16,57	18,98	21,53	24,83	28,51	32,19	35,87	39,55	43,23	47,16
	Taxa (%)	0,50	0,67	0,83	1,01	1,19	1,38	1,58	1,79	2,07	2,38	2,68	2,99	3,30	3,60	3,93
	$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385	405
	$V_{rd2}$ (kN)	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76	725,76
	$V_c$ (kN)	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90	117,90
	$V_{sw}$ (kN)	57,10	85,10	113,10	141,10	169,10	197,10	225,10	253,10	281,10	309,10	337,10	365,10	393,10	421,10	449,10
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	203,00	231,00	259,00	287,00	315,00	343,00	371,00	399,00	427,00	455,00	483,00	511,00	539,00	567,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,61	3,88	5,16	6,44	7,72	8,99	10,27	11,55	12,83	14,11	15,38	16,66	17,94	19,22	20,49
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81

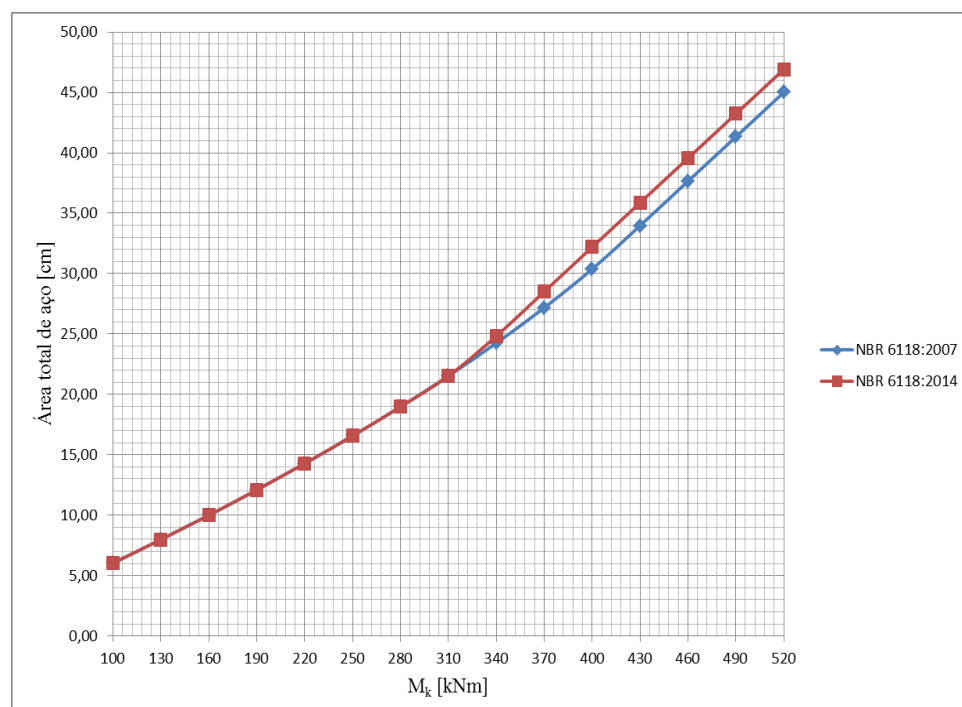
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C7 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



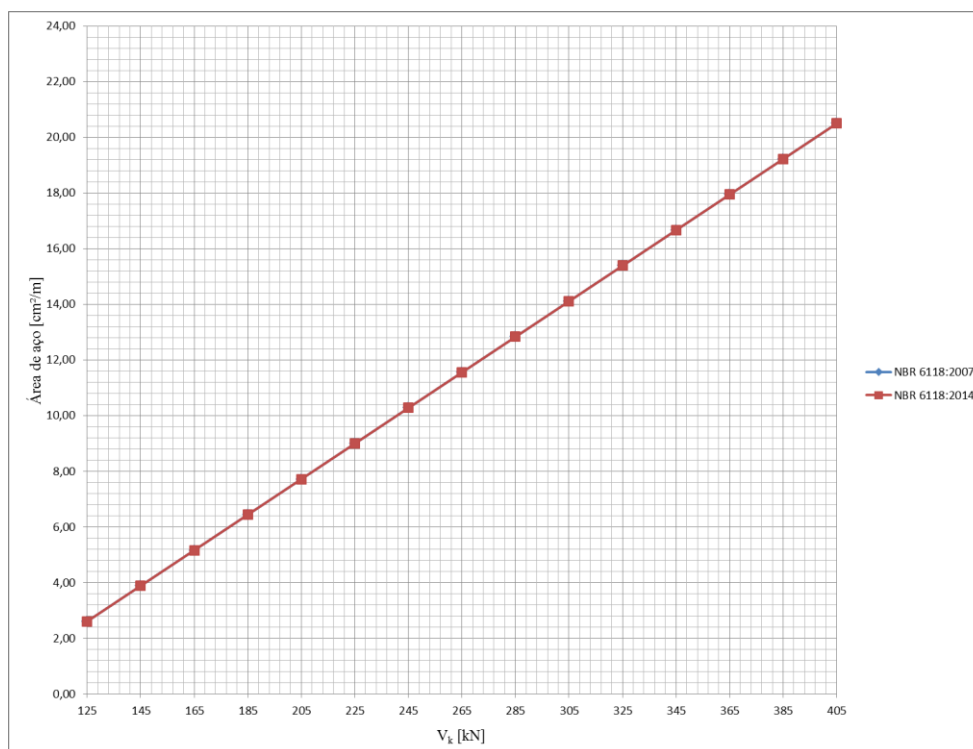
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C8 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C9 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  40 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C7 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2007

		NBR 6118:2007														
		$f_{ck}$ (MPa)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	70	105	140	175	210	245	280	315	350	385	420	455	490	525	563
	$x$ calculado (cm)	3,70	5,63	7,62	9,68	11,80	14,01	16,31	18,72	21,24	23,89	26,72	29,73	33,00	36,58	40,96
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$x$ utilizado (cm)	3,70	5,63	7,62	9,68	11,80	14,01	16,31	18,72	21,24	23,89	26,72	29,73	33,00	35,17	35,17
	$A_s$ (cm²)	4,13	6,29	8,51	10,81	13,19	15,65	18,22	20,91	23,72	26,69	29,85	33,22	36,86	40,11	42,44
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	3,15
	$A_s$ total (cm²)	4,13	6,29	8,51	10,81	13,19	15,65	18,22	20,91	23,72	26,69	29,85	33,22	36,86	40,93	45,59
	Taxa (%)	0,34	0,52	0,71	0,90	1,10	1,30	1,52	1,74	1,98	2,22	2,49	2,77	3,07	3,41	3,80
	$A_{s_{min}}$ (cm²)	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	160	195	230	265	300	335	370	405	440	475	510	545	580	615
	$V_{rd2}$ (kN)	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00
	$V_c$ (kN)	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81
	$V_{sw}$ (kN)	38,19	87,19	136,19	185,19	234,19	283,19	332,19	381,19	430,19	479,19	528,19	577,19	626,19	675,19	724,19
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	224,00	273,00	322,00	371,00	420,00	469,00	518,00	567,00	616,00	665,00	714,00	763,00	812,00	861,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	1,74	3,98	6,22	8,45	10,69	12,92	15,16	17,40	19,63	21,87	24,10	26,34	28,58	30,81	33,05
	$A_{sw_{min}}$ (cm²)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

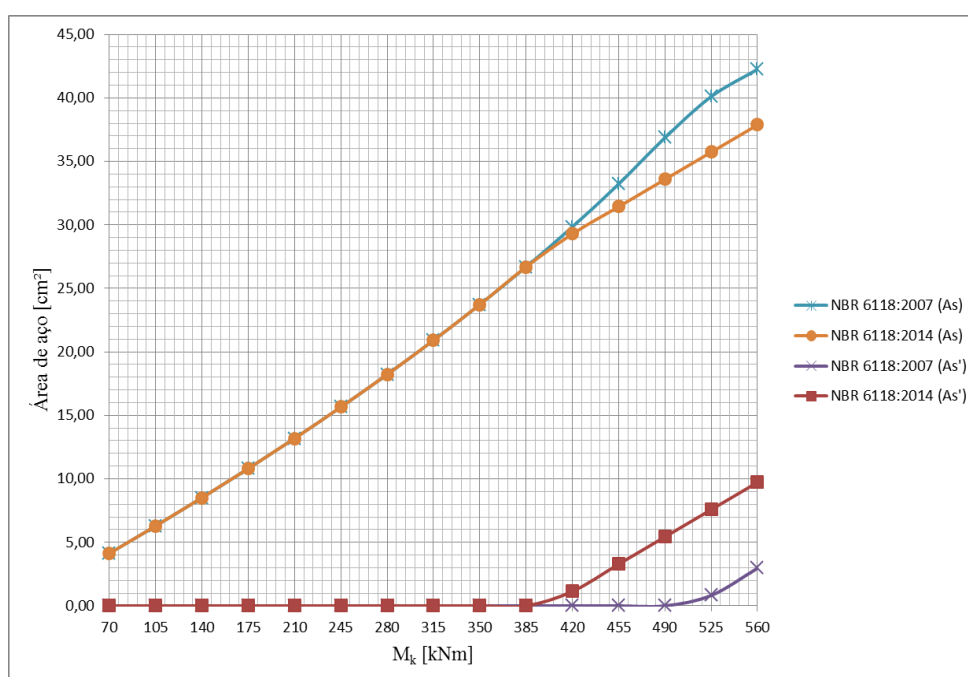
(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C8 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 50 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	70	105	140	175	210	245	280	315	350	385	420	455	490	525	563
	$x$ calculado (cm)	3,70	5,63	7,62	9,68	11,80	14,01	16,31	18,72	21,24	23,89	26,72	29,73	33,00	36,58	40,96
	Domínio	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
	$x \leq 0,45d$	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$x$ utilizado (cm)	3,70	5,63	7,62	9,68	11,80	14,01	16,31	18,72	21,24	23,89	25,20	25,20	25,20	25,20	25,20
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	4,13	6,29	8,51	10,81	13,19	15,65	18,22	20,91	23,72	26,69	29,29	31,44	33,58	35,73	38,06
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,14	3,28	5,43	7,58	9,91
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	4,13	6,29	8,51	10,81	13,19	15,65	18,22	20,91	23,72	26,69	30,42	34,72	39,01	43,30	47,97
	Taxa (%)	0,34	0,52	0,71	0,90	1,10	1,30	1,52	1,74	1,98	2,22	2,54	2,89	3,25	3,61	4,00
$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	125	160	195	230	265	300	335	370	405	440	475	510	545	580	615
	$V_{rd2}$ (kN)	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00
	$V_c$ (kN)	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81	136,81
	$V_{sw}$ (kN)	38,19	87,19	136,19	185,19	234,19	283,19	332,19	381,19	430,19	479,19	528,19	577,19	626,19	675,19	724,19
	$V_{rd3}$ (kN)	175,00	224,00	273,00	322,00	371,00	420,00	469,00	518,00	567,00	616,00	665,00	714,00	763,00	812,00	861,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	1,74	3,98	6,22	8,45	10,69	12,92	15,16	17,40	19,63	21,87	24,10	26,34	28,58	30,81	33,05
	$A_{sw_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26

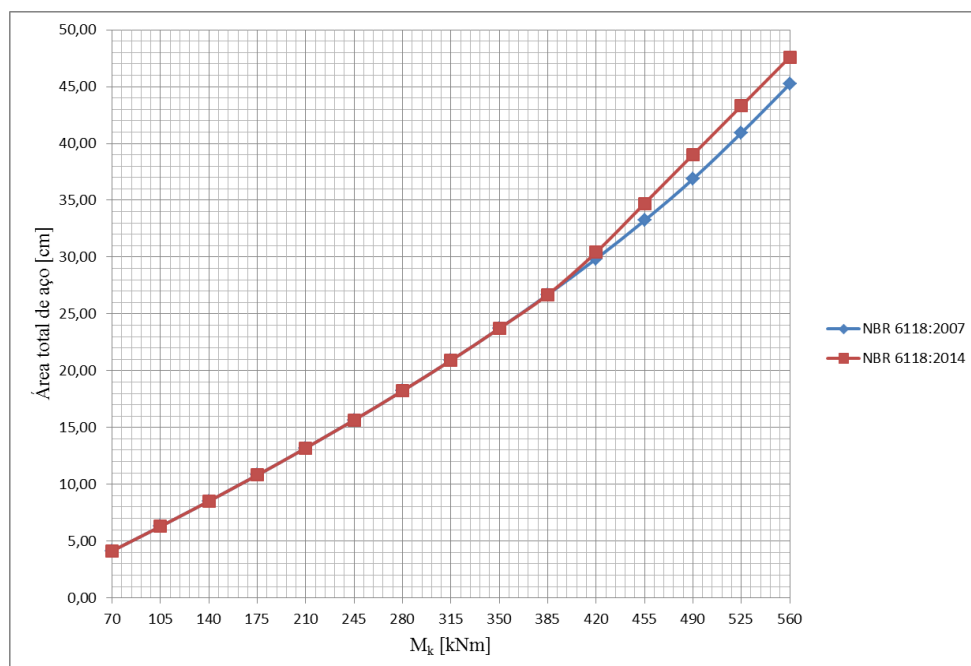
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C10 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



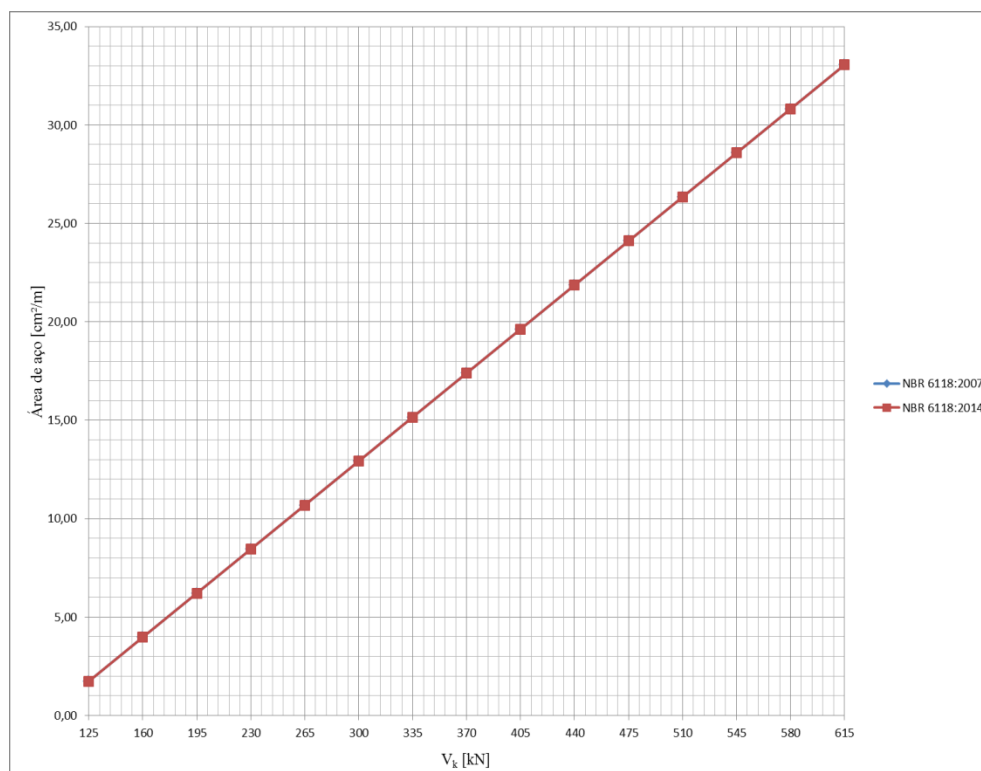
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C11 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C12 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  50 MPa conforme a NBR 6118:2007 e NBR 6118:2014



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C9 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	205	230	255	280	305	330	355	380	405	430	455	480	505	530	557
	$x$ calculado (cm)	10,29	11,66	13,07	14,51	15,98	17,50	19,06	20,67	22,32	24,04	25,82	27,67	29,60	31,62	33,92
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$x_{23}$ (cm)	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53
	$x_{lim}$ (cm)	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60
	$x$ utilizado (cm)	10,29	11,66	13,07	14,51	15,98	17,50	19,06	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229	0,00229
	$\epsilon_{cu}$	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288	0,00288
	$\lambda$	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
	$\alpha_c$	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	12,69	14,39	16,12	17,90	19,72	21,59	23,51	25,49	26,73	28,26	29,79	31,33	32,86	34,39	36,05
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	2,54	4,08	5,61	7,14	8,68	10,21	11,87
	$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	12,69	14,39	16,12	17,90	19,72	21,59	23,51	26,20	29,27	32,34	35,40	38,47	41,54	44,60	47,92
	Taxa (%)	1,06	1,20	1,34	1,49	1,64	1,80	1,96	2,18	2,44	2,69	2,95	3,21	3,46	3,72	3,99
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	155	170	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365
	$V_{u0}$ (kN)	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96	984,96
	$V_c$ (kN)	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47	144,47
	$V_{sw}$ (kN)	72,53	93,53	114,53	135,53	156,53	177,53	198,53	219,53	240,53	261,53	282,53	303,53	324,53	345,53	366,53
	$V_{u0}$ (kN)	217,00	238,00	259,00	280,00	301,00	322,00	343,00	364,00	385,00	406,00	427,00	448,00	469,00	490,00	511,00
	$As_w$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,31	4,27	5,23	6,18	7,14	8,10	9,06	10,02	10,98	11,93	12,89	13,85	14,81	15,77	16,73
	$As_{wmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44

(fonte: elaborado pelo autor)

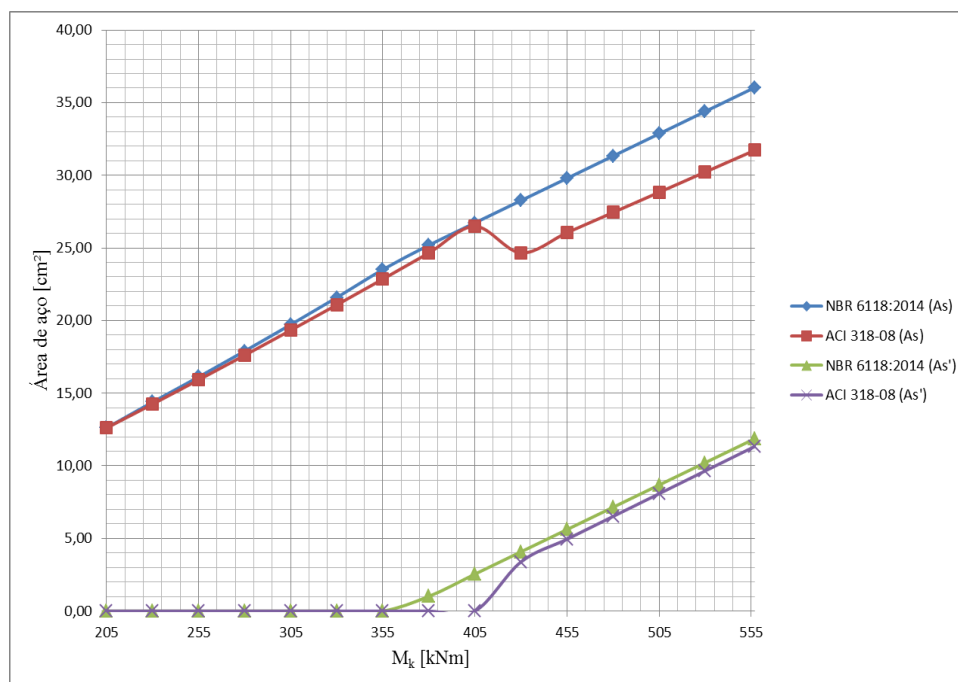
Quadro C10 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoada utilizando  $f_{ck}$  de 60 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
$f'_c$ (MPa)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60		
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	205	230	255	280	305	330	355	380	405	430	455	480	505	530	557	
	$M_u$ (kNm)	299,30	335,80	372,30	408,80	445,30	481,80	518,30	554,80	591,30	627,80	664,30	700,80	737,30	773,80	813,22	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	$c$	9,51	10,75	12,00	13,28	14,58	15,90	17,23	18,59	19,97	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	
	$0,375d$	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	
	$f$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$et$	0,0150	0,0129	0,0112	0,0099	0,0087	0,0078	0,0069	0,0062	0,0056	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	495	495	495	495	495	495	
	$\epsilon_s$	0,0147	0,0126	0,0110	0,0096	0,0085	0,0076	0,0067	0,0060	0,0054	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	
	$c$ (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,33	16,33	16,33	16,33	16,33	16,33	
	$\alpha$	6,18	6,98	7,80	8,63	9,48	10,33	11,20	12,09	12,98	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62	10,62	
	$A_s$	12,61	14,25	15,92	17,61	19,33	21,08	22,85	24,66	26,49	24,66	26,05	27,44	28,83	30,22	31,73	
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	4,95	6,51	8,08	9,65	11,34	
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	12,61	14,25	15,92	17,61	19,33	21,08	22,85	24,66	26,49	28,35	30,24	32,16	34,11	36,10	38,28	
	$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34	
	Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	155	170	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365
		$V_u$ (kN)	226,3	248,2	270,1	292	313,9	335,8	357,7	379,6	401,5	423,4	445,3	467,2	489,1	511	532,9
		$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$\lambda$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
$V_c$ (kN)		147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	147,48	
$V_f'$ (MPa)		7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	7,75	
$V_u$ (kN)		154,25	183,45	212,65	241,85	271,05	300,25	329,45	358,65	387,85	417,05	446,25	475,45	504,65	533,85	563,05	
$V_u$ (kN)		301,73	330,93	360,13	389,33	418,53	447,73	476,93	506,13	535,33	564,53	593,73	622,93	652,13	681,33	710,53	
$A_w$ (cm <sup>2</sup> /m)		6,56	7,80	9,04	10,28	11,52	12,77	14,01	15,25	16,49	17,73	18,97	20,21	21,46	22,70	23,94	
$\phi(V_u) \geq V_u$		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
$As_{wmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)		2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	

(fonte: elaborado pelo autor)

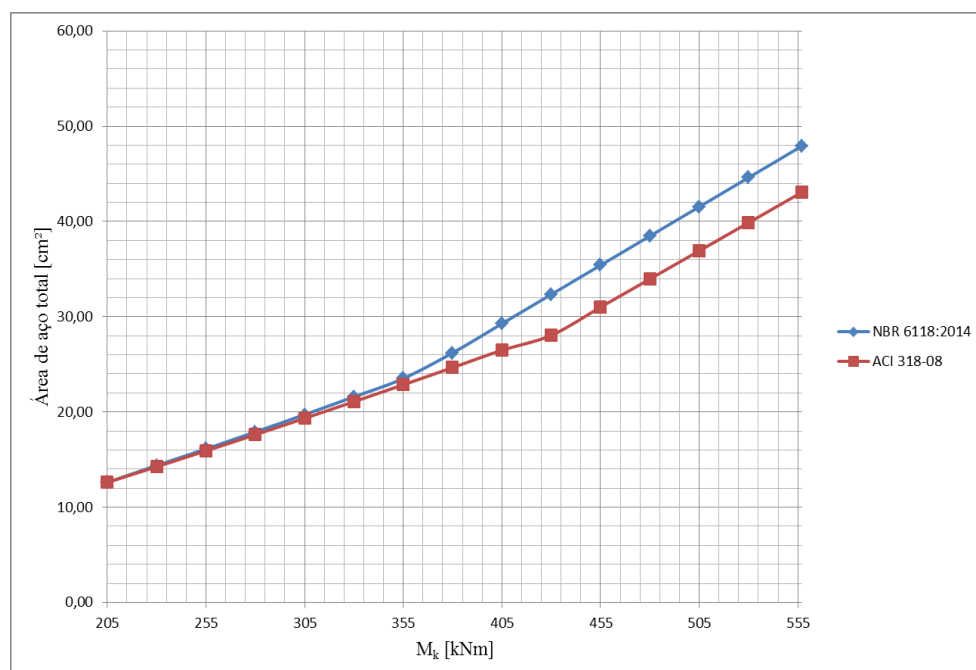
Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova Norma NBR 6118 e a Norma Americana quanto as suas propriedades mecânicas e ao dimensionamento de vigas

Figura C13 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

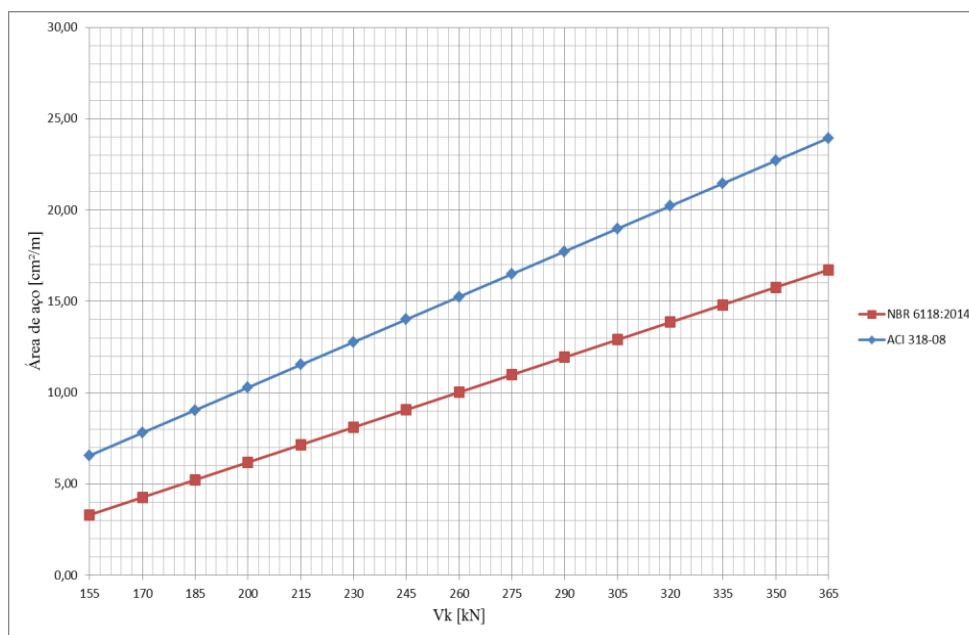
Figura C14 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)



Figura C15 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  60 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C11 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
		$f_{ck}$ (MPa)	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	220	245	270	295	320	345	370	395	420	445	470	495	520	545	571
	$x$ calculado (cm)	10,30	11,57	12,87	14,21	15,57	16,96	18,39	19,85	21,35	22,90	24,50	26,15	27,85	29,62	31,54
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	$x \leq 0,35d$ (cm)	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$x_{23}$ (cm)	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75
	$x_{lim}$ (cm)	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47	31,47
	$x$ utilizado (cm)	10,30	11,57	12,87	14,21	15,57	16,96	18,39	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242	0,00242
	$\epsilon_{cu}$	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266	0,00266
	$\lambda$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\alpha_c$	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$A_s$ (cm²)	13,59	15,27	16,99	18,75	20,54	22,38	24,26	26,12	27,66	29,19	30,72	32,26	33,79	35,32	36,92
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	1,79	3,33	4,86	6,39	7,93	9,46	11,05
$A_s$ Total (cm²)	13,59	15,27	16,99	18,75	20,54	22,38	24,26	26,38	29,45	32,52	35,58	38,65	41,72	44,78	47,97	
Taxa (%)	1,13	1,27	1,42	1,56	1,71	1,86	2,02	2,20	2,45	2,71	2,97	3,22	3,48	3,73	4,00	
$A_{smin}$ (cm²)	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395
	$V_{rd}$ (kN)	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	1088,64	
	$V_c$ (kN)	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	154,10	
	$V_{sw}$ (kN)	6,90	34,90	62,90	90,90	118,90	146,90	174,90	202,90	230,90	258,90	286,90	314,90	342,90	370,90	398,90
	$V_{rd3}$ (kN)	161,00	189,00	217,00	245,00	273,00	301,00	329,00	357,00	385,00	413,00	441,00	469,00	497,00	525,00	553,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	0,31	1,59	2,87	4,15	5,43	6,70	7,98	9,26	10,54	11,81	13,09	14,37	15,65	16,93	18,20
	$A_{swmin}$ (cm²/m)	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67

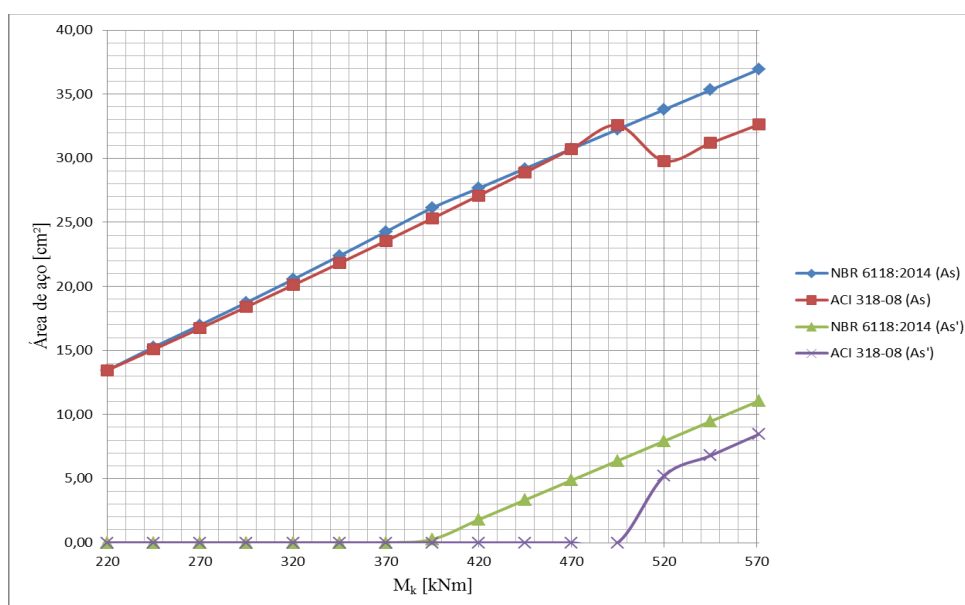
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro C12 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 70 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08															
$f_c'$ (MPa)		70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70		
Mk (kNm)		220	245	270	295	320	345	370	395	420	445	470	495	520	545	571	
Armadura Longitudinal	$M_u$ (kNm)	321,20	357,70	394,20	430,70	467,20	503,70	540,20	576,70	613,20	649,70	686,20	722,70	759,20	795,70	833,66	
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	c	8,70	9,75	10,82	11,90	12,99	14,09	15,22	16,35	17,50	18,67	19,86	21,06	Armadura dupla!	Armadura dupla!	Armadura dupla!	
	$0,375dt$	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	$et$	0,0167	0,0145	0,0128	0,0114	0,0102	0,0091	0,0082	0,0075	0,0068	0,0062	0,0056	0,0051	0,0075	0,0075	0,0075	
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	495	495	495
	$\epsilon_s$	0,0163	0,0142	0,0125	0,0111	0,0099	0,0089	0,0080	0,0073	0,0066	0,0060	0,0055	0,0050	0,0073	0,0073	0,0073	
	$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0024	0,0024	0,0024
	c (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,33	16,33	16,33
	a	5,66	6,34	7,03	7,73	8,44	9,16	9,89	10,63	11,38	12,14	12,91	13,69	10,62	10,62	10,62	
	$A_s$	13,46	15,09	16,73	18,40	20,09	21,80	23,54	25,30	27,08	28,89	30,72	32,57	29,79	31,18	32,63	
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,19	6,79	8,45
$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	13,46	15,09	16,73	18,40	20,09	21,80	23,54	25,30	27,08	28,89	30,72	32,57	34,45	36,36	38,37		
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69	4,69		
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395	
	$V_u$ (kN)	167,9	197,1	226,3	255,5	284,7	313,9	343,1	372,3	401,5	430,7	459,9	489,1	518,3	547,5	576,7	
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	$V_c$ (kN)	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	
	$v f_c'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	
	$V_s$ (kN)	65,83	104,77	143,70	182,63	221,57	260,50	299,43	338,37	377,30	416,23	455,17	494,10	533,03	571,97	610,90	
	$V_n$ (kN)	223,87	262,80	301,73	340,67	379,60	418,53	457,47	496,40	535,33	574,27	613,20	652,13	691,07	730,00	768,93	
	$A_w$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,80	4,45	6,11	7,77	9,42	11,08	12,73	14,39	16,04	17,70	19,35	21,01	22,66	24,32	25,97	
	$\phi(V_n) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	

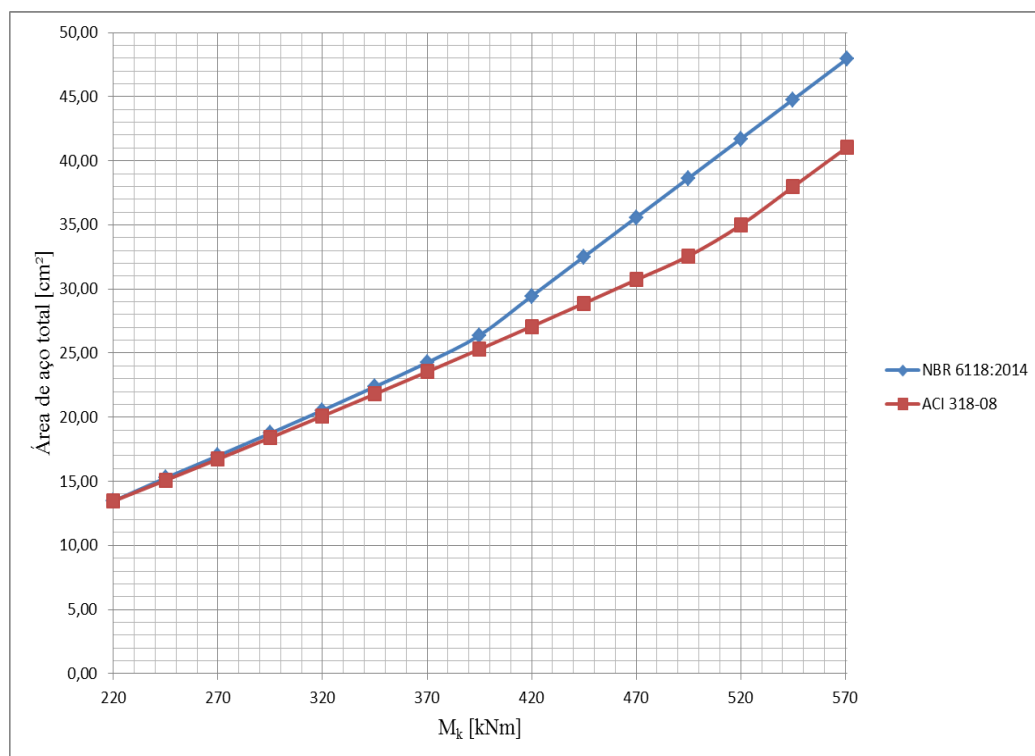
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C16 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



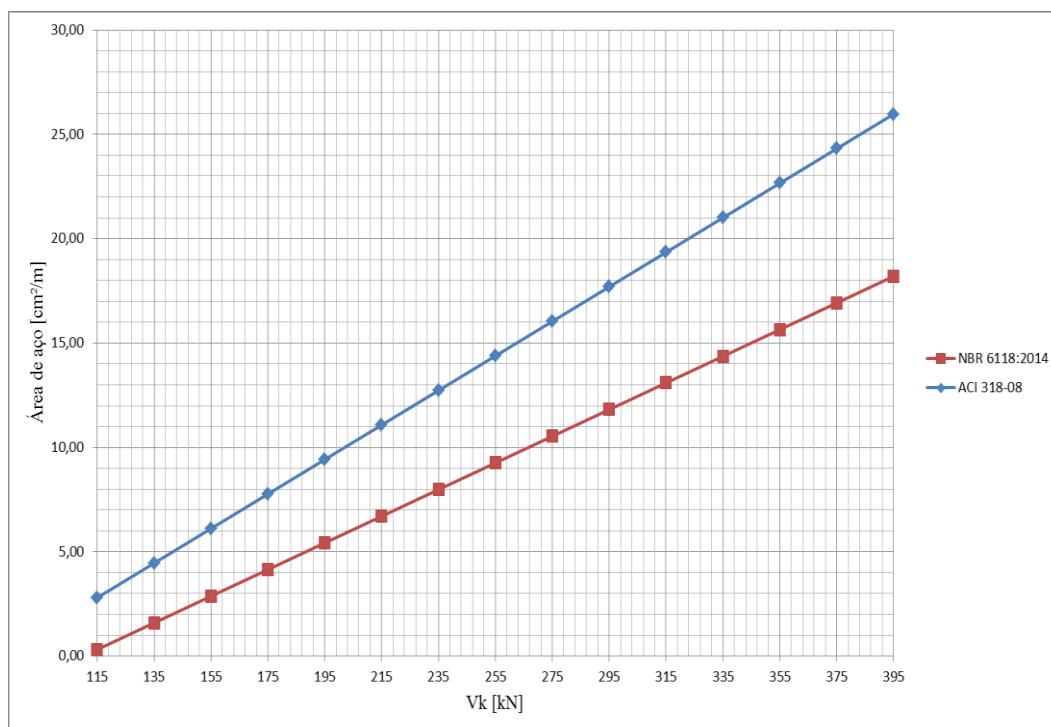
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C17 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C16 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  70 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C13 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
$f_{ck}$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	230	255	280	305	330	355	380	405	430	455	480	505	530	555	580
	$x$ calculado (cm)	10,29	11,51	12,74	14,01	15,30	16,61	17,96	19,33	20,74	22,19	23,67	25,20	26,77	28,40	30,08
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$x_{23}$ (cm)	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57	11,57
	$x_{lim}$ (cm)	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19	31,19
	$x$ utilizado (cm)	10,29	11,51	12,74	14,01	15,30	16,61	17,96	19,33	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252	0,00252
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
	$\alpha_c$	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	14,17	15,84	17,55	19,29	21,06	22,87	24,72	26,62	28,23	29,76	31,29	32,83	34,36	35,89	37,43
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,24	2,77	4,31	5,84	7,37	8,91	10,44
	$A_s$ Total (cm <sup>2</sup> )	14,17	15,84	17,55	19,29	21,06	22,87	24,72	26,62	29,47	32,53	35,60	38,67	41,73	44,80	47,87
	Taxa (%)	1,18	1,32	1,46	1,61	1,76	1,91	2,06	2,22	2,46	2,71	2,97	3,22	3,48	3,73	3,99
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365	380	395
	$V_{rd2}$ (kN)	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04	1175,04
	$V_c$ (kN)	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58	162,58
	$V_w$ (kN)	96,42	117,42	138,42	159,42	180,42	201,42	222,42	243,42	264,42	285,42	306,42	327,42	348,42	369,42	390,42
	$V_{rd3}$ (kN)	259,00	280,00	301,00	322,00	343,00	364,00	385,00	406,00	427,00	448,00	469,00	490,00	511,00	532,00	553,00
	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	4,40	5,36	6,32	7,28	8,23	9,19	10,15	11,11	12,07	13,03	13,98	14,94	15,90	16,86	17,82
	$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87

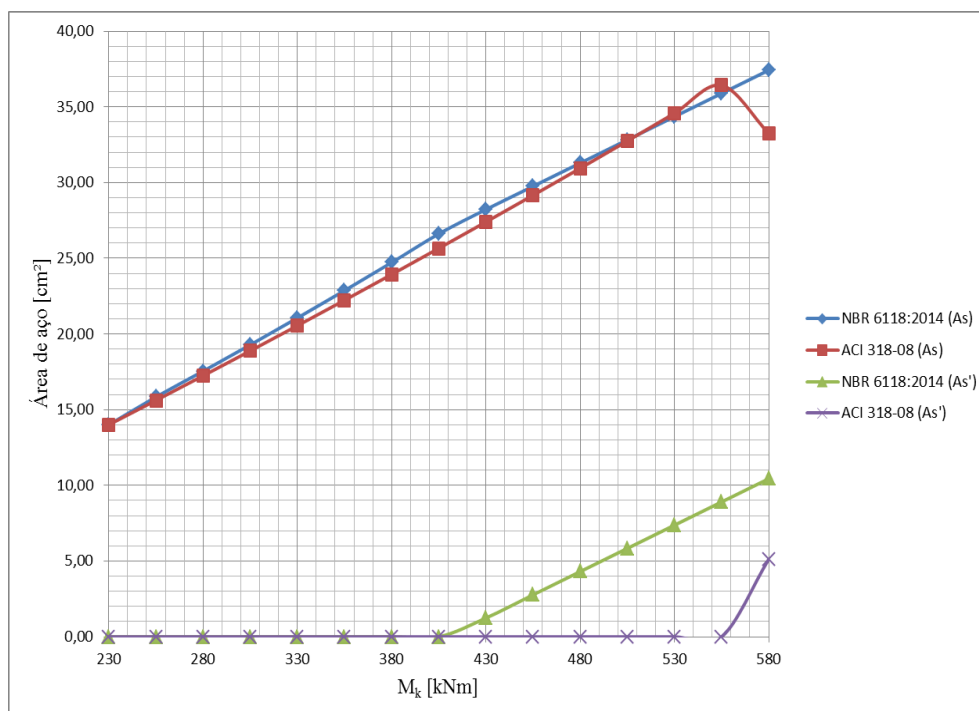
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro C14 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 80 MPa conforme a ACI 318-08

		ACI 318-08														
$f'_c$ (MPa)		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	230	255	280	305	330	355	380	405	430	455	480	505	530	555	580
	$M_u$ (kNm)	335,80	372,30	408,80	445,30	481,80	518,30	554,80	591,30	627,80	664,30	700,80	737,30	773,80	810,30	846,80
	$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	$c$	7,92	8,83	9,75	10,68	11,62	12,58	13,54	14,51	15,50	16,50	17,50	18,53	19,56	20,60	Armadura dupla!
	$0,375d$	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38
	$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	$et$	0,0186	0,0164	0,0145	0,0130	0,0117	0,0106	0,0096	0,0088	0,0080	0,0074	0,0068	0,0062	0,0057	0,0053	0,0075
	$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	495
	$es$	0,0182	0,0160	0,0142	0,0127	0,0115	0,0104	0,0094	0,0086	0,0078	0,0072	0,0066	0,0061	0,0056	0,0052	0,0073
	$es'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0024
	$c$ (entre $d/4$ e $d/3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,33
	$a$	5,15	5,74	6,34	6,94	7,56	8,17	8,80	9,43	10,07	10,72	11,38	12,04	12,71	13,39	10,62
	$A_s$	14,01	15,62	17,24	18,89	20,55	22,24	23,94	25,66	27,40	29,17	30,95	32,75	34,58	36,43	33,25
	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,12
	$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	14,01	15,62	17,24	18,89	20,55	22,24	23,94	25,66	27,40	29,17	30,95	32,75	34,58	36,43	38,30
$A_{smin}$ (cm <sup>2</sup> )	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	
Armadura Transversal (estribos)	$V_k$	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365	380	395
	$V_u$ (kN)	270,1	292	313,9	335,8	357,7	379,6	401,5	423,4	445,3	467,2	489,1	511	532,9	554,8	576,7
	$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	$V_c$ (kN)	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03
	$\sqrt{f'_c}$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
	$V_u$ (kN)	202,10	231,30	260,50	289,70	318,90	348,10	377,30	406,50	435,70	464,90	494,10	523,30	552,50	581,70	610,90
	$V_u$ (kN)	360,13	389,33	418,53	447,73	476,93	506,13	535,33	564,53	593,73	622,93	652,13	681,33	710,53	739,73	768,93
	$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	8,59	9,83	11,08	12,32	13,56	14,80	16,04	17,28	18,52	19,77	21,01	22,25	23,49	24,73	25,97
	$\phi (V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
$A_{swmin}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	

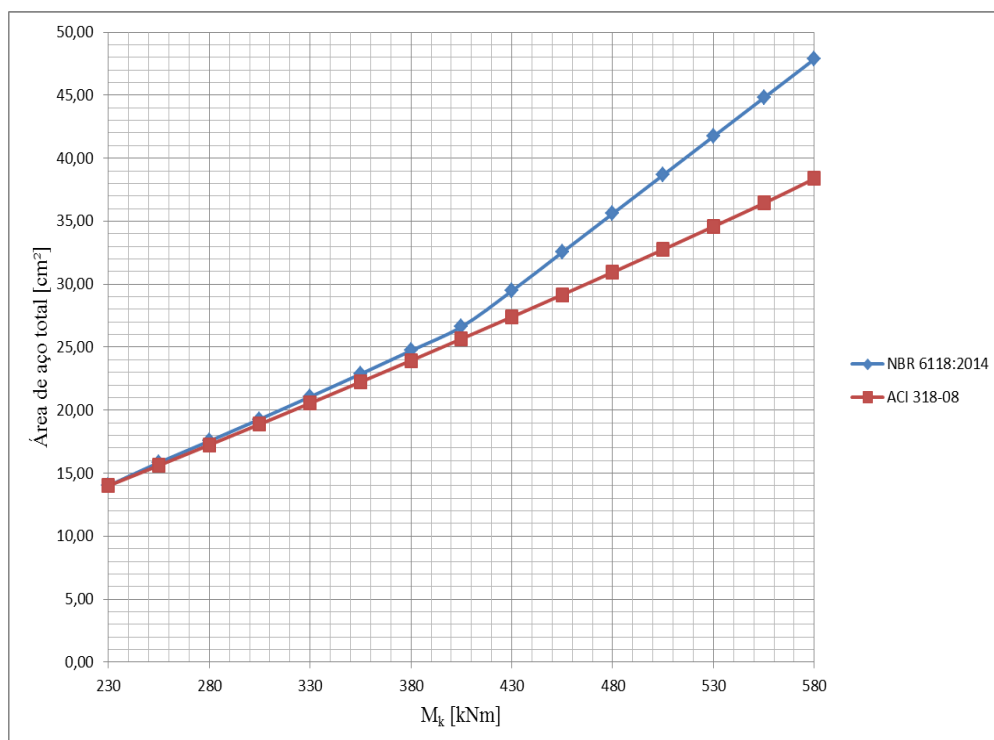
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C17 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



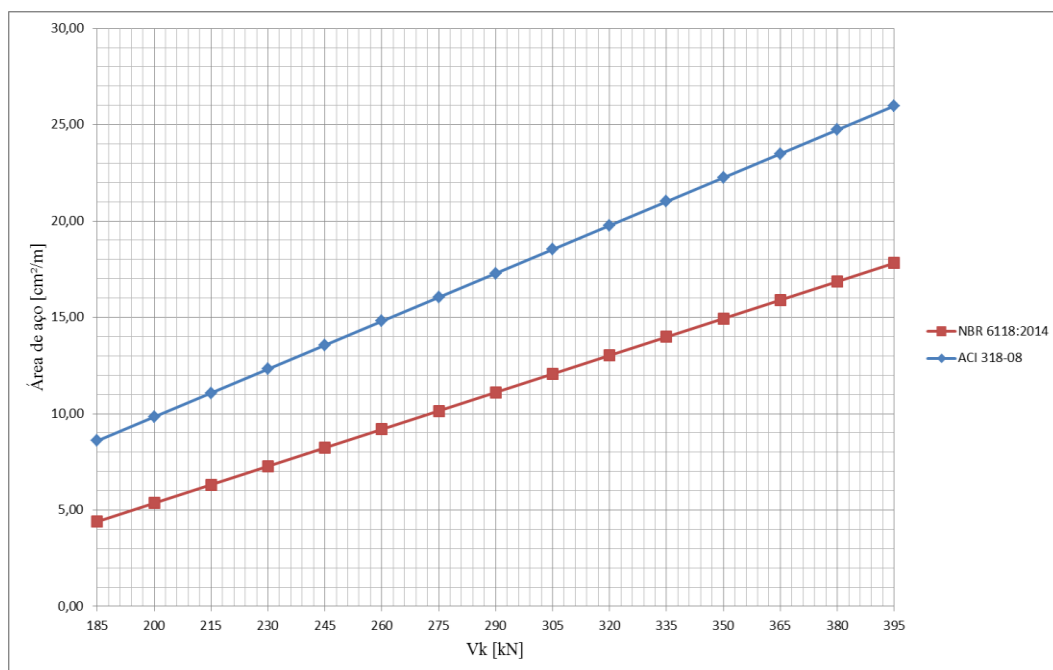
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C18 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C19 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  80 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Quadro C15 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a NBR 6118:2014

		NBR 6118:2014														
		$f_{ck}$ (MPa)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Armadura Longitudinal	$M_k$ (kNm)	235	260	285	310	335	360	385	410	435	460	485	510	535	560	585
	$x$ calculado (cm)	10,26	11,44	12,64	13,86	15,11	16,38	17,68	19,01	20,36	21,75	23,17	24,62	26,12	27,66	29,24
	Domínio	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$x \leq 0,35d$ (cm)	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$x_{23}$ (cm)	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56	11,56
	$x_{lim}$ (cm)	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18	31,18
	$x$ utilizado (cm)	10,26	11,44	12,64	13,86	15,11	16,38	17,68	19,01	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
	$\epsilon_{c2}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\epsilon_{cu}$	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260	0,00260
	$\lambda$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	$\alpha_c$	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	$f_{yd}$ (MPa)	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$f_{yd}'$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78	434,78
	$A_s$ (cm²)	14,44	16,10	17,79	19,52	21,27	23,06	24,89	26,75	28,45	29,98	31,51	33,05	34,58	36,11	37,65
	$A_s'$ (cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	2,39	3,92	5,46	6,99	8,52	10,06
$A_s$ Total (cm²)	14,44	16,10	17,79	19,52	21,27	23,06	24,89	26,75	29,30	32,37	35,44	38,50	41,57	44,64	47,70	
Taxa (%)	1,20	1,34	1,48	1,63	1,77	1,92	2,07	2,23	2,44	2,70	2,95	3,21	3,46	3,72	3,98	
$A_{s_{min}}$ (cm²)	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	
Armadura Transversal (Modelo I)	$V_k$ (kN)	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365	380	395
	$V_{uz}$ (kN)	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16
	$V_c$ (kN)	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16	170,16
	$V_{sw}$ (kN)	88,84	109,84	130,84	151,84	172,84	193,84	214,84	235,84	256,84	277,84	298,84	319,84	340,84	361,84	382,84
	$V_{rd}$ (kN)	259,00	280,00	301,00	322,00	343,00	364,00	385,00	406,00	427,00	448,00	469,00	490,00	511,00	532,00	553,00
	$A_{sw}$ (cm²/m)	4,05	5,01	5,97	6,93	7,89	8,85	9,80	10,76	11,72	12,68	13,64	14,60	15,55	16,51	17,47
	$A_{sw_{min}}$ (cm²/m)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05

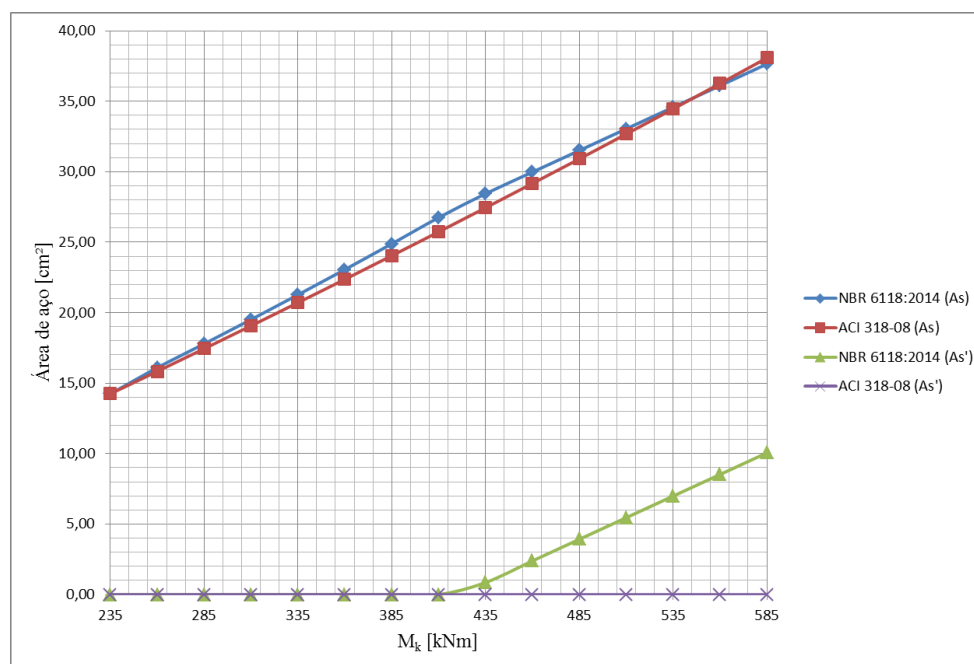
(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro C16 – Resultados do dimensionamento da viga retangular biapoiada utilizando  $f_{ck}$  de 90 MPa conforme a ACI 318-08

	ACI 318-08														
	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
$f_c'$ (MPa)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Mk (kNm)	235	260	285	310	335	360	385	410	435	460	485	510	535	560	585
$M_u$ (kNm)	343,10	379,60	416,10	452,60	489,10	525,60	562,10	598,60	635,10	671,60	708,10	744,60	781,10	817,60	854,10
$\beta_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
c	7,16	7,96	8,77	9,59	10,41	11,25	12,09	12,94	13,80	14,67	15,54	16,43	17,32	18,23	19,14
$0,375dt$	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38	21,38
$j$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\phi$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\epsilon_t$	0,0209	0,0185	0,0165	0,0148	0,0134	0,0122	0,0111	0,0102	0,0094	0,0087	0,0080	0,0074	0,0069	0,0064	0,0059
$f_y$ (MPa)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
$f_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_s$	0,0205	0,0181	0,0162	0,0145	0,0131	0,0119	0,0109	0,0100	0,0092	0,0085	0,0078	0,0072	0,0067	0,0062	0,0058
$\epsilon_s'$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
c (entre d/4 e d/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
a	4,65	5,18	5,70	6,23	6,77	7,31	7,86	8,41	8,97	9,53	10,10	10,68	11,26	11,85	12,44
$A_s$	14,24	15,84	17,45	19,07	20,71	22,37	24,04	25,74	27,44	29,17	30,92	32,68	34,46	36,26	38,08
$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$A_s$ total (cm <sup>2</sup> )	14,24	15,84	17,45	19,07	20,71	22,37	24,04	25,74	27,44	29,17	30,92	32,68	34,46	36,26	38,08
$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> )	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$V_k$	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365	380	395
$V_u$ (kN)	270,1	292	313,9	335,8	357,7	379,6	401,5	423,4	445,3	467,2	489,1	511	532,9	554,8	576,7
$\phi$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$\lambda$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$V_c$ (kN)	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03	158,03
$V_f c'$ (MPa)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
$V_s$ (kN)	202,10	231,30	260,50	289,70	318,90	348,10	377,30	406,50	435,70	464,90	494,10	523,30	552,50	581,70	610,90
$V_u$ (kN)	360,13	389,33	418,53	447,73	476,93	506,13	535,33	564,53	593,73	622,93	652,13	681,33	710,53	739,73	768,93
$A_v$ (cm <sup>2</sup> /m)	8,59	9,83	11,08	12,32	13,56	14,80	16,04	17,28	18,52	19,77	21,01	22,25	23,49	24,73	25,97
$\phi (V_u) \geq V_u$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
$A_{s_{min}}$ (cm <sup>2</sup> /m)	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

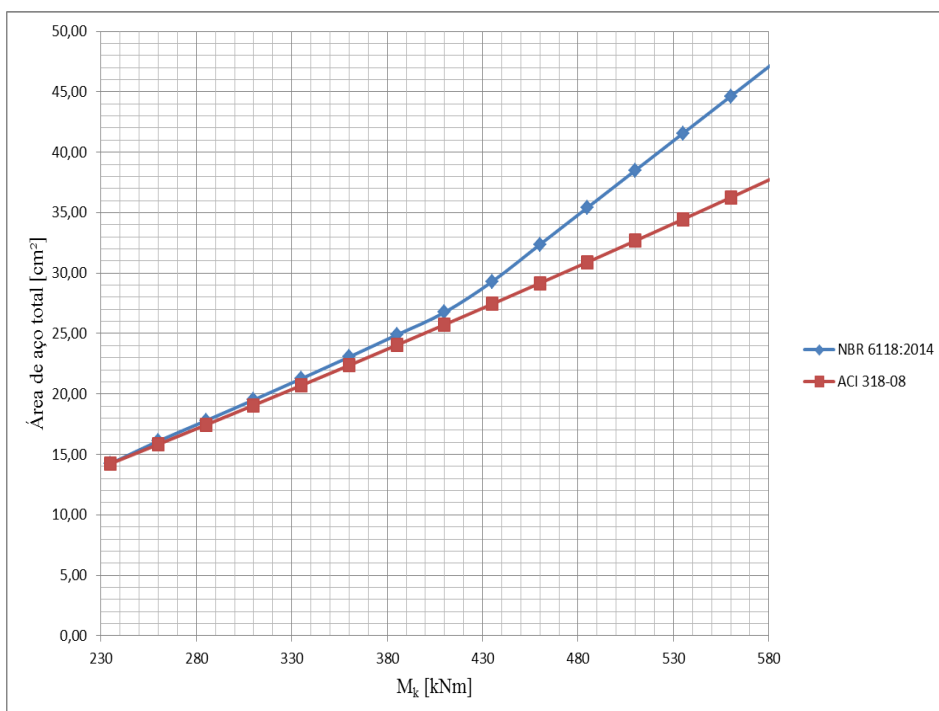
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C20 – Consumo de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



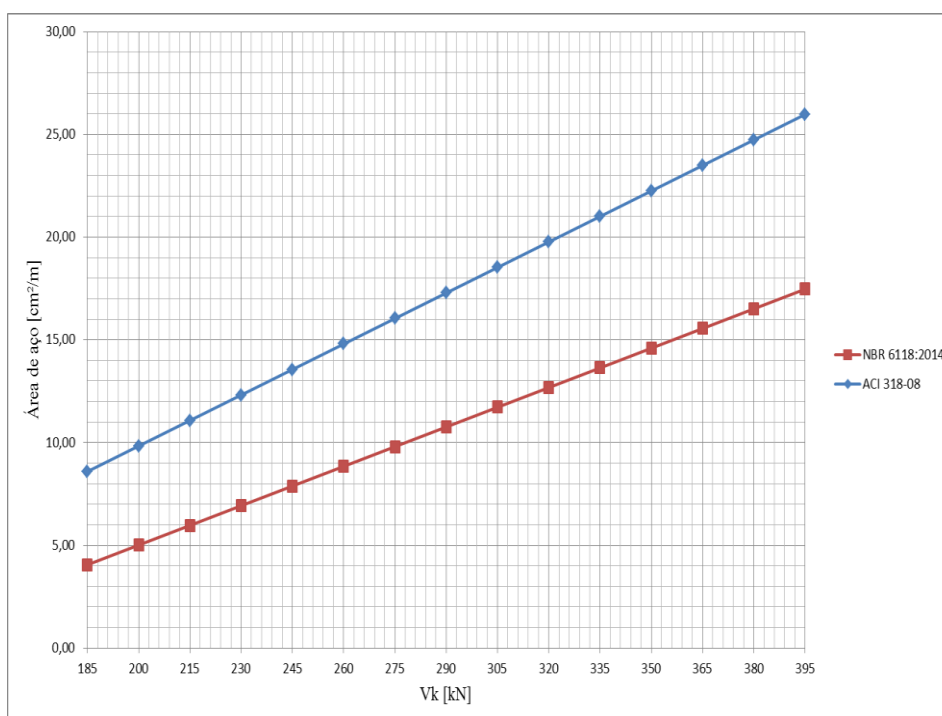
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C21 – Consumo total de aço no dimensionamento da viga à flexão simples com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C22 – Consumo de aço no dimensionamento da viga ao corte com  $f_{ck}$  90 MPa conforme a NBR 6118:2014 e ACI 318-08



(fonte: elaborada pelo autor)