

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO VITOR SIQUEIRA SANTOS

**COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE VIGA SEGUNDO
TRÊS ANÁLISES DA NBR 6118:2014: ANÁLISE LINEAR, ANÁLISE
LINEAR COM REDISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE PLÁSTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

JOÃO VITOR SIQUEIRA SANTOS

**COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE VIGA SEGUNDO
TRÊS ANÁLISES DA NBR 6118:2014: ANÁLISE LINEAR, ANÁLISE
LINEAR COM REDISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE PLÁSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE VIGA SEGUNDO TRÊS ANÁLISES DA NBR 6118:2014: ANÁLISE LINEAR, ANÁLISE LINEAR COM REDISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE PLÁSTICA

por
João Vitor Siqueira Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às ____ do dia ____ de _____ de _____ como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

(aprovado, aprovado com restrições, ou reprovado)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
(UTFPR)

Prof. Me. Nery Knöner
(UTFPR)

**Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Marcelo Guelbert

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Aos meus pais, meu irmão e à Giovana.

AGRADECIMENTOS

Não sendo possível citar todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, peço desculpas por seus nomes não constarem aqui. Ainda sim, sou imensamente grato.

Agradeço ao Professor Angelo Giovanni Bonfim Corelhano, por se dedicar em orientar este trabalho e se mostrar sempre acessível para esclarecer minhas dúvidas.

Sou grato aos membros da Banca Examinadora, Professores Jorge Luís Nunes de Góes e Nery Knöner, por suas críticas, que só fizeram engrandecer este trabalho, e ao Professor Valdomiro Lubachevski Kurta por viabilizar a avaliação deste trabalho.

Agradeço a Professora Vera Lúcia Barradas Moreira, por auxiliar a adequação deste trabalho às Normas para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos da UTFPR, ao lecionar a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, e aos Professores Leandro Waidemam e Ronaldo Rigobello, por suas críticas sempre construtivas como membros da Banca Examinadora da referida disciplina.

Agradeço aos meus amigos, familiares e minha namorada por sempre me apoiarem e serem compreensivos.

RESUMO

SANTOS, João V. S. **Comparativo entre o dimensionamento de viga segundo três análises da NBR 6118:2014: Análise Linear, Análise Linear com Redistribuição e Análise Plástica.** 2015. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

Este trabalho apresenta uma comparação entre o dimensionamento de uma viga conforme prescrito pela NBR 6118:2003 e pela NBR 6118:2014. Visa assim determinar as diferenças obtidas no cálculo estrutural, quando o mesmo é realizado ora segundo a NBR 6118:2003 ora segundo a NBR 6118:2014. Para tanto, faz uso de diversos exemplos nos quais é efetuada uma variação dos parâmetros chave no cálculo estrutural. Revela os aspectos teóricos subjacentes referenciando-se na literatura específica. Expõe as análises estruturais aceitas pela normativa e estabelece, para cada exemplo calculado, um paralelo entre três delas: Análise Elástica, Análise Elástica com Redistribuição e Análise Plástica. Determina o consumo de aço para as armaduras em cada situação, assim como pondera sobre as alternativas mais interessantes do ponto de vista econômico.

Palavras-chave: NBR 6118. Cálculo estrutural de viga. Análise Elástica. Análise Elástica com Redistribuição. Análise Plástica. Consumo de aço em armaduras.

ABSTRACT

SANTOS, João V.S. **Comparative beam design according to three analyzes of NBR 6118: 2014: Linear Analysis, Linear Analysis with Redistribution and Plastic Analysis.** 2015. 62 pages. Completion of course work (Bachelor of Civil Engineering). Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2015.

This paper presents a comparative design of a beam as prescribed by NBR 6118: 2003 and by NBR 6118: 2014. In this way, it aims to determine the differences in structural calculation, as it is sometimes carried out according to either NBR 6118: 2003 or NBR 6118: 2014. Many examples will be presented which demonstrate variations in the key parameters of structural calculation. The paper thus aims to reveal the underlying theoretical aspects, with reference to the key literature. In each example of structural analysis methods which follow the relevant rules and standards, one can see a parallel between three aspects: Elastic Analysis, Elastic Analysis with Redistribution and Plastic Analysis. This paper also aims to determine the amount of steel required in the production of steel-armoured beams in varying situations, and questions the most viable alternative from an economic perspective.

Keywords: NBR 6118. structural beam calculation. Elastic analysis. Elastic analysis with redistribution. Plastic analysis. Steel consumption in armor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Não linearidade geométrica.....	17
FIGURA 2 – Diagrama de tensão versus deformação de um material não linear (NLM).....	19
FIGURA 3 – Redistribuição de momentos fletores em viga contínua.....	21
FIGURA 4 – Capacidade de rotação de rótulas plásticas.....	24
FIGURA 5 – Viga equivalente.....	25
FIGURA 6 – Viga utilizada por Fontes.....	27
FIGURA 7 – Viga utilizada para realizar a variação paramétrica.....	28
FIGURA 8 – Interpolação linear para a determinação de V_{c1} conforme prescreve a NBR 6118:2014.....	52
QUADRO 1 – Equações da NBR 6118:2003 que sofreram alteração na NBR 6118: 2014 e que influenciam o consumo de aço.....	30
QUADRO 2 – Alterações nos limites da profundidade da linha neutra e coeficiente de redistribuição referentes à NBR 6118: 2014 quando comparada à NBR 6118: 2003.....	31
GRÁFICO 1 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 50 cm.....	33
GRÁFICO 2 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 60 cm.....	34
GRÁFICO 3 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 70 cm.....	34
GRÁFICO 4 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 20MPa.....	35
GRÁFICO 5 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 30MPa.....	36
GRÁFICO 6 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 40MPa.....	36
GRÁFICO 7 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 50 cm.....	39
GRÁFICO 8 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 60 cm.....	40

GRÁFICO 9 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 70 cm.....	40
GRÁFICO 10 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 20 MPa.....	41
GRÁFICO 11 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 30 MPa.....	41
GRÁFICO 12 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 40 MPa.....	42
GRÁFICO 13 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 50 cm.....	44
GRÁFICO 14 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 60 cm.....	44
GRÁFICO 15 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 70 cm.....	45
GRÁFICO 16 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 20 MPa.....	45
GRÁFICO 17 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 30 MPa.....	46
GRÁFICO 18 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 40 MPa.....	46
GRÁFICO 19 – Efeitos da variação paramétrica na armadura transversal e nas armaduras complementares em seção de 20 x 50 cm.....	49
GRÁFICO 20 – Efeitos da variação paramétrica na armadura transversal e nas armaduras complementares em seção de 20 x 60 cm.....	49
GRÁFICO 21 – Efeitos da variação paramétrica na armadura transversal e nas armaduras complementares em seção de 20 x 70 cm.....	50
GRÁFICO 22 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 20 MPa.....	50
GRÁFICO 23 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 30 MPa.....	51
GRÁFICO 24 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 40 MPa.....	51
GRÁFICO 25 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 50 cm.....	58
GRÁFICO 26 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 60 cm.....	58

GRÁFICO 27 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 70 cm.....	59
GRÁFICO 28 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 20 MPa.....	59
GRÁFICO 29 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 30 MPa.....	60
GRÁFICO 30 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 40 MPa.....	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Consumo de aço para a viga especificada conforme as prescrições da NBR 6118:2003 e da NBR 6118: 2014.....	29
TABELA 2 – Variação paramétrica realizada com a viga especificada utilizando as referidas análises e de acordo com a NBR 6118: 2014.....	32
TABELA 3 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço nos vãos.....	39
TABELA 4 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço no apoio intermediário.....	43
TABELA 5 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço da Armadura Transversal e Armaduras Complementares.....	48
TABELA 6 – Resultante do consumo de aço combinado de todas as armaduras dimensionadas.....	55
TABELA 7 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço quando efetuadas as demais análises.....	57

LISTA DE SIGLAS

CEB Comité Euro-international du Béton

ELS Estado Limite de Serviço

ELU Estado Limite de Utilização

NBR Norma Brasileira Técnica

NLM Não Linearidade de Material

NLG Não Linearidade Geométrica

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo da armadura passiva
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência de cálculo de compressão do concreto
$f_{ct,d}$	Resistência de cálculo do concreto à tração direta
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração do concreto
f_{yd}	Tensão de escoamento de cálculo do aço
f_{ywd}	Tensão na armadura transversal passiva
C50	Classe de resistência 50 MPa
C55	Classe de resistência 55 MPa
C90	Classe de resistência 90 MPa
b_w	Largura da alma da viga
b_f	Largura colaborante
δ	Coefficiente de redistribuição
x	Profundidade da linha neutra
d	Altura útil da seção transversal
h	Altura da seção transversal
a	Deslocamento horizontal / distância entre pontos de momento nulo
H	Ação horizontal
L	Altura do pilar / comprimento teórico do vão / comprimento da viga equivalente / distância entre pontos onde o momento fletor é nulo
P	Ação vertical
$E \cdot I$	Rigidez
E_{ci}	Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto
E_{cs}	Módulo de deformação secante do concreto

α	Ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado
σ	Tensão
ε	Deformação
p	Carregamento distribuído
M'	Momento fletor na seção crítica
M_1	Momento fletor na seção 1
M_2	Momento fletor na seção 2
$\delta \cdot M'$	Momento da seção crítica minorado pelo coeficiente de redistribuição
M_{1c}	Momento na seção 1 recalculado após redistribuição
M_{2c}	Momento na seção 2 recalculado após redistribuição
M_p	Momento totalmente plástico
M_{2p}	Momento na seção 2 recalculado após formação da primeira rótula plástica na seção crítica
p_{1r}	Ação distribuída responsável pela formação da primeira rótula plástica na seção crítica
Δp_{2r}	Acréscimo de carga necessário à formação da segunda rótula plástica
p_d	Valor de cálculo do carregamento
M_{4p}	Momento de plastificação na seção 4
M_{5p}	Momento de plastificação na seção 5
θ	Ângulo de inclinação das diagonais de concreto
θ_{2p}	Rotação necessária na seção 2 para a formação do mecanismo de colapso
θ_{2pe}	Rotação plástica à esquerda da seção 2
θ_{2pd}	Rotação plástica à direita da seção 2
θ_{pl}	Capacidade de rotação plástica
CA – 50	Resistência ao escoamento do aço de 500 MPa

$CA - 60$	Resistência ao escoamento do aço de 600 MPa
q_d	Carregamento de cálculo
q_u	Carregamento último
q_y	Carregamento no início do escoamento da armadura tracionada
M_u	Momento último na seção crítica
M	Momento fletor atuante em uma seção no início do escoamento da armadura tracionada
M_y	Momento na seção crítica
L_y	Comprimento equivalente da zona plastificada
Q	Reação de apoio sob a seção crítica
A_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
M_d	Momento de cálculo
V_{sd}	Força solicitante de cálculo na seção
$V_{sd/2}$	Força cortante solicitante de cálculo em seção localizada à distância $d/2$ da face do apoio
V_{Rd2}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
V_{Rd3}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal
V_C	Parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo de treliça
V_{Sw}	Parcela de força cortante resistida pela armadura transversal
V_{C1}	Valor de referência para V_C , quando $30^\circ \leq \Theta \leq 45^\circ$
V_{C0}	Valor de referência para V_C , quando $\Theta = 45^\circ$
l_b	Comprimento de ancoragem básico
$l_{b,disp}$	Comprimento de ancoragem disponível
$l_{b,nec}$	Comprimento de ancoragem necessário

$A_{S,calc}$	Área de aço calculada
$A_{S,ef}$	Área de aço efetiva
ϕ	Diâmetro da barra
A_C	Área de concreto
A_{Sw}	Área da seção transversal dos estribos de força cortante
F_{Sd}	Força não ancorada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 JUSTIFICATIVA.....	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
4.1 NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA (NLG).....	16
4.2 NÃO LINEARIDADE DE MATERIAL (NLM).....	18
4.3 ANÁLISE LINEAR.....	20
4.4 ANÁLISE LINEAR COM REDISTRIBUIÇÃO.....	20
4.5 ANÁLISE PLÁSTICA.....	21
4.5.1 Rótulas Plásticas e Capacidade de Rotação Plástica.....	21
4.6 ANÁLISE NÃO LINEAR RIGOROSA.....	25
4.7 ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELOS FÍSICOS.....	25
5 METODOLOGIA.....	27
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE AÇO DE UMA VIGA CALCULADA ORA SEGUNDO A NBR 6118:2003 ORA SEGUNDO A NBR 6118:2014.....	27
5.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DAS ANÁLISES EM VIGA SOB AS PRESCRIÇÕES DA NBR 6118:2014.....	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.1 COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE AÇO DE UMA VIGA CALCULADA ORA SEGUNDO A NBR 6118:2003 ORA SEGUNDO A NBR 6118:2014.....	29
6.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DAS ANÁLISES EM VIGA SOB AS PRESCRIÇÕES DA NBR 6118:2014.....	32
6.2.1 Resultados globais da variação paramétrica.....	32
6.2.2 Impacto da variação paramétrica no consumo de aço dos vãos.....	37
6.2.3 Impacto da variação paramétrica no consumo de aço do apoio intermediário.....	43

6.2.4 Influência da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares (Secundárias).....	47
6.2.4.1 Armadura Transversal.....	52
6.2.4.2 Grampos.....	53
6.2.4.3 Armadura de Pele.....	54
6.2.4.4 Armadura Negativa nos Apoios Extremos.....	54
6.2.5 Sobreposição do consumo de aço das Armaduras Longitudinais (Principais e Secundárias) e Transversal.....	55
6.2.6 Desempenho das diferentes análises.....	57
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	64

1 INTRODUÇÃO

A disseminação do uso de softwares voltados para o cálculo estrutural, em razão do aumento da capacidade computacional, tem sido marcante nas últimas décadas. A facilidade que os mesmos proporcionam à elaboração de projetos é acompanhada por sua imensa utilidade ao facilitar o dimensionamento estrutural, diminuindo o esforço requerido na realização do grande número de cálculos necessários. Assim, atualmente, a análise estrutural pode ser efetuada de maneira mais completa, abordando aspectos que, outrora, por uma questão de praticidade, eram aproximados.

Ainda assim, uma análise estrutural pode ser resumida em uma idealização do modelo real através de um modelo físico aproximado, podendo o mesmo ter um maior ou menor nível de refinamento. Para a resolução desse modelo físico empregam-se técnicas matemáticas, que também podem, por sua vez, ter um maior ou menor nível de refinamento. Então, tem-se dois níveis de aproximações e a relevância de tais aproximações deve ser avaliada, pois as mesmas resultam em impactos tanto no custo da obra como na segurança por ela apresentada. O modelo de cálculo adotado deve, portanto, ser o mais fiel ao comportamento real da estrutura, de modo a não a onerar.

Para se estabelecer um paralelo entre os tipos de análises estruturais permitidas pela NBR 6118:2014 e, assim, determinar o mais adequado a uma dada situação, é válido variar parâmetros significativos no dimensionamento. No caso de uma viga contínua, tais parâmetros são o formato da seção transversal e o valor da resistência característica de cálculo (f_{ck}).

Algumas das modificações na NBR 6118, da versão de 2003 para a de 2014, agora vigente, afetam diretamente a análise estrutural de vigas contínuas. As referidas alterações, mais especificamente o cálculo da profundidade da linha neutra e o acréscimo de classes de concreto de alta resistência, serão de grande valia na variação de parâmetros proposta, não só para comparar os resultados das diferentes análises estruturais, como também avaliar o impacto da atualização da normativa citada no dimensionamento de vigas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal do trabalho é comparar o consumo total de aço resultante do dimensionamento de uma viga contínua conforme as determinações da NBR 6118:2003 com o efetuado segundo a NBR 6118:2014. Além disso, estabelecer um paralelo entre o consumo total de aço apresentado por três diferentes análises estruturais no dimensionamento de uma viga contínua, conforme as determinações da NBR 6118:2014. As análises aludidas são a Análise Elástica, a Análise Elástica com Redistribuição e a Análise Plástica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o intuito de obter comparativos adicionais referentes ao consumo total de aço, os objetivos específicos consistem em realizar, para cada uma das referidas avaliações, variações dos seguintes parâmetros: a altura da seção transversal (seção retangular e T) e o valor de resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}).

3 JUSTIFICATIVA

Em vista da relevância do setor da Construção Civil no âmbito da economia nacional devido à maciça movimentação de recursos gerada pelo mesmo, qualquer alteração nas normativas que regulamentem o dimensionamento de elementos estruturais e, conseqüentemente, os gastos com insumos, é de suma importância financeira.

A ponderação acerca das diferenças entre os resultados obtidos segundo cada análise terá grande valor ao se inferir qual delas produzirá elemento estrutural mais eficiente. É vital que a estrutura dimensionada atenda às solicitações para as quais fora projetada. O dimensionamento ideal é aquele que atenda às condições de segurança com o menor custo possível.

Ao serem solicitadas, as estruturas podem responder de modo não linear ao esforço aplicado. Em seções denominadas críticas, o concreto assumirá comportamento plástico, i.e, não linear, quando a tensão for suficientemente elevada, sem que, no entanto, ocorra o colapso da estrutura. Tal comportamento poderá invalidar os resultados do modelo adotado ao tornar irreais as hipóteses no qual o mesmo se baseou. Impõe-se então a necessidade de se utilizar o modelo cujas hipóteses nas quais se fundamenta sejam as corretas.

O modelo adotado deve simular adequadamente o comportamento real da estrutura. A flexão causada pelos carregamentos aos quais as vigas são submetidas, por exemplo, pode se tornar crítica em determinadas seções. É o caso dos apoios intermediários, onde o momento fletor solicitante de cálculo poderá alcançar o momento resistente de cálculo da seção, acarretando na ruptura da seção ou na sua plastificação. Nas seções onde esse fenômeno ocorrer, se formarão rótulas plásticas, (incremento de giros sem acréscimo de momentos). Assim, a depender do grau de estaticidade da estrutura, a introdução de uma rótula poderá tornar a estrutura hipostática e, conseqüentemente, ocorrer o colapso, ou, se houver possibilidade de equilíbrio da estrutura com a introdução dessas rótulas haverá a chamada redistribuição de esforços de forma a equilibrar as solicitações aplicadas.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

O dimensionamento de uma estrutura deve ser efetuado mediante uma análise do seu comportamento estrutural quando submetida a determinadas ações que, estima-se, ocorrerão ao longo da vida útil da estrutura. Conforme a NBR 6118:2014, cinco modelos de análise estrutural são possíveis, sendo que qualquer projeto desse âmbito deve ser concebido em concordância com pelo menos uma das referidas análises. Segundo FONTES (2005, p.21), o modelo a ser adotado é uma função do estado limite a ser avaliado, assim como de sua complexidade.

Toda estrutura deve ser dimensionada para apresentar uma resistência de cálculo maior ou igual às ações de cálculo às quais estará submetida. Caso contrário, a mesma não irá atender ao critério de segurança, podendo até mesmo entrar em estado de ruína. Assim, se faz necessário adotar análises consagradas e passíveis de verificação. Ainda de acordo com BUCHAIM (2001, p.1), além do critério citado de adequação às condições de equilíbrio e resistência, os modelos se caracterizam pelas diferentes leis constitutivas supostas dos materiais, assim como o atendimento das condições de compatibilidade.

Com a nova versão da NBR 6118, de 2014, introduziram-se algumas modificações com implicações relevantes para o dimensionamento de vigas. Mais especificamente, trata-se de alterações no cálculo da profundidade da linha neutra e da inclusão de classes de resistência mais elevadas para o concreto (até C90). Tais mudanças afetam diretamente as análises estruturais sobre as quais versa a referida normativa, especialmente no que concerne ao uso da redistribuição de momentos, cujo coeficiente δ depende da profundidade da linha neutra adotada. Segundo a NBR 6118:2003, para elementos lineares, são impostos os seguintes valores máximos para o referido coeficiente: $\delta=0,75$ e $\delta=0,90$ para estruturas de nós fixos e nós móveis, respectivamente. A obtenção desse coeficiente se dá, conforme consta na versão de 2003 da NBR 6118, através das equações (1) e (2):

$$\delta \geq 0,44 + 1,25 \times x/d \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 35MPa; \text{ ou} \quad (1)$$

$$\delta \geq 0,56 + 1,25 \times x/d \text{ para concretos com } f_{ck} > 35MPa. \quad (2)$$

Nota-se que essas equações são dependentes da profundidade da linha neutra x no ELU, que, ainda de acordo com a referida versão da normativa, determina-se para vigas nos apoios e nas regiões de ligações com outros elementos estruturais conforme (3) e (4):

$$x/d \leq 0,50 \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 35MPa; \text{ ou} \quad (3)$$

$$x/d \leq 0,40 \text{ para concretos com } f_{ck} > 35MPa. \quad (2)$$

Quanto à região dos vãos, admite-se um valor limite de $x/d=0,628$.

Já na NBR 6118:2014, o coeficiente de redistribuição é determinado de acordo com as equações (5) e (6) abaixo:

$$\delta \geq 0,44 + 1,25 \times x/d \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50MPa; \text{ ou} \quad (5)$$

$$\delta \geq 0,56 + 1,25 \times x/d \text{ para concretos com } 50MPa < f_{ck} \leq 90MPa. \quad (6)$$

Consta na referida versão que a posição da linha neutra deve ser delimitada conforme (7) e (8):

$$x/d \leq 0,45 \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50MPa; \text{ ou} \quad (7)$$

$$x/d \leq 0,35 \text{ para concretos com } 50MPa < f_{ck} \leq 90MPa. \quad (8)$$

Assim, por meio das modificações referentes ao cálculo da altura da linha neutra, a NBR 6118:2014 entra em consonância com o que é determinado pela normativa europeia (CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1993, p.135).

Em vista de sua importância, é necessário se atentar às particularidades de cada tipo de análise contida na NBR 6118:2014, sendo que a mesma ressalta que todas elas admitem apenas pequenos deslocamentos.

4.1 NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA (NLG)

Segundo FONTES (2005, p.41), a NLG é consequência da consideração dos efeitos de segunda ordem, isto é, daqueles resultantes da análise da estrutura em posição deformada e que se somam aos efeitos de primeira ordem. Em geral, ainda de acordo com o mesmo autor, as estruturas respondem de maneira não linear aos efeitos de segunda ordem, i.e, os deslocamentos extras não possuem relação diretamente proporcional com o carregamento incidente. Um exemplo, ainda de

acordo com o referido autor, são os pilares de edifícios, que sofrem efeitos de segunda ordem resultantes da combinação de ações verticais com os deslocamentos provocados por ações horizontais (neste caso específico, o vento). O momento na seção da base desses pilares sofrerá o incremento da parcela referente ao produto das ações verticais pelos deslocamentos horizontais.

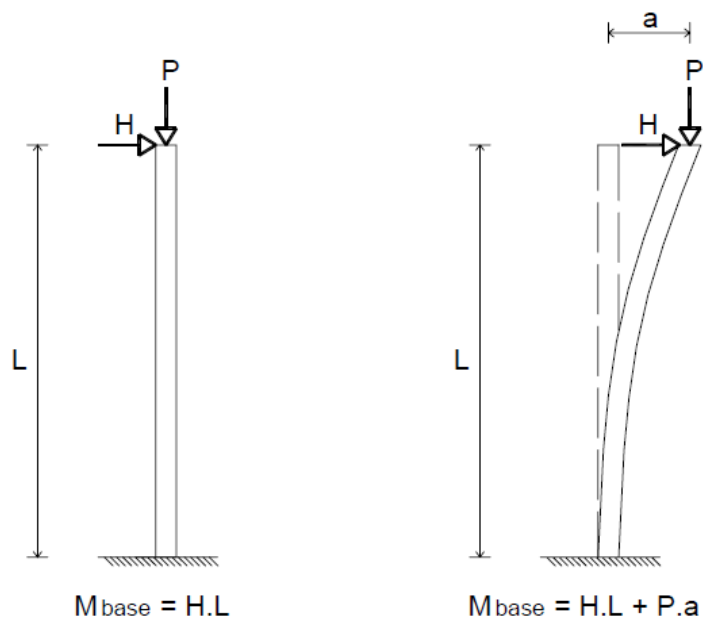


Figura 1 – Não linearidade geométrica

Fonte: Fontes (2005, p.42)

O nível de precisão obtido para os resultados da análise não linear geométrica independem da ordem de grandeza dos deslocamentos, mas é consequência das aproximações adotadas, conforme afirma BRANCO (2002, p.30). No entanto, a grandeza dos deslocamentos é inversamente proporcional à rigidez da estrutura. Nas estruturas rígidas, portanto, os efeitos de segunda ordem são pequenos e podem ser desprezados, enquanto que nas flexíveis, denominadas estruturas de nós móveis, os mesmos são significativos e devem ser considerados, de acordo com PINTO (1997, p.34).

Segundo CORRÊA (1991, p.71), a NLG se caracteriza pelo fato de não existir uma relação linear entre os deslocamentos ocorridos em uma estrutura e as consequentes deformações, de modo que haverá alterações na rigidez da mesma proporcional a magnitude das deformações.

Para FONTES (2005, p.41), a consideração da NLG, assim como da não linearidade de material (NLM), deve ser efetuada por meio de uma análise incremental, iterativa ou incremental-iterativa, sendo que em cada iteração se dá uma atualização da geometria deformada. CORELHANO (2010, p.26) apresenta um histórico da incorporação da NLG, via método dos elementos finitos, à análise estrutural e faz uso do método de iteração direta através das matrizes de rigidez secante, também presente em CORRÊA (1991, p.85).

Segundo CORELHANO (2010, p.66), o baixo nível de NLG das estruturas usuais de edifícios permite, no método citado anteriormente, dispensar o caráter incremental dos carregamentos, sendo suficiente um único incremento de carregamento. Mas em situações onde tanto a NLG como a NLF devem ser consideradas de forma rigorosa, existe a necessidade de divisão do carregamento, devido a um maior nível de não linearidade introduzida principalmente pela NLF, e, portanto, faz-se necessário o tratamento incremental dos carregamentos. De acordo com o referido autor, em uma análise com carregamento incremental, ao se passar de um nível de carregamento para o próximo, deve-se, além de atualizar as coordenadas da estrutura, considerar o nível de tensões às quais a estrutura se submete até se iniciar o novo incremento.

4.2 NÃO LINEARIDADE DE MATERIAL (NLM)

De acordo com BRANCO (2002, p.27), a análise não linear física pauta-se na perda de rigidez (EI) do material ao longo de seu histórico de carregamento. Assim, atingida uma determinada carga, os elementos não mais retornam à sua configuração original quando descarregados, ou seja, vão crescendo-se deformações permanentes, denominadas deformações plásticas. Estimar-se a rigidez do material, por meio do uso de procedimentos que considerem a NLM, é, para PINTO (1997, p.6), imperativo.

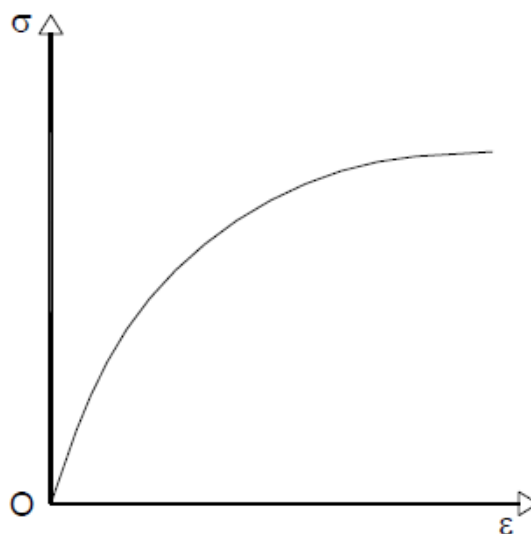


Figura 2 - Diagrama de tensão versus deformação de um material não linear (NLM)

Fonte: Fontes (2005, p.38)

No entanto, levar em consideração a NLM é, ainda segundo PINTO (1997, p.6), uma tarefa difícil de implementar em estruturas de concreto armado de grande porte. Além de demandar em demasia esforços computacionais, uma análise totalmente não linear é complexa, pois, de acordo com FONTES (2005, p.38), deve-se conhecer de antemão a geometria da estrutura e de sua armadura, estas estimadas por análise linear. Assim, desponta a necessidade de um cálculo iterativo. Finalizada a análise não linear, obtêm-se novos esforços que possibilitam o dimensionamento de uma nova armadura, a ser utilizada em mais uma iteração. Repete-se o processo até os valores convergirem (FONTES, 2005, p.38).

De acordo com CORELHANO (2010, p.27), é crescente o número de códigos que visam contemplar a NLM de forma rigorosa. Tais modelos, segundo BRANCO (2002, p.27), no intuito de representar o comportamento dos materiais, só conseguem fazê-lo de modo aproximado, sendo que devem apresentar aproximações compatíveis com o material a ser analisado. CORELHANO (2010, p.81) descreve um desses modelos, o das fatias, que consiste na divisão da seção do elemento em fatias paralelas à linha neutra, de aço e concreto, de modo que o somatório das contribuições de cada uma delas resulte no comportamento total da seção e viabilize a utilização de um modelo constitutivo independente para cada camada. Assim, se efetuará a integração ao longo da seção transversal nas

extremidades de cada elemento constituinte, por meio do somatório discreto das propriedades de cada um deles.

4.3 ANÁLISE LINEAR

Segundo CORRÊA (1991, p.30), a mais simples idealização do comportamento das estruturas é a linear, que se caracteriza pela relação diretamente proporcional entre ações e efeitos, ou seja, entre tensões e deformações (linearidade de material) e entre deformações e deslocamentos (linearidade geométrica).

Ainda de acordo com CORRÊA (1991, p.30), a linearidade física expressa, desde que não se atinja os limites característicos do material, a validade da Lei de Hooke, que afirma a proporção direta entre tensões (σ) e deformações (ε), sendo o coeficiente de proporcionalidade o módulo de Young (E):

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (9)$$

Já a linearidade geométrica, conforme afirma o mesmo autor, só constitui uma hipótese aceitável se as alterações na geometria da estrutura forem suficientemente pequenas, de modo que sua influência possa ser omitida na análise do comportamento estrutural.

CORRÊA (1991, p.30) também salienta a primazia do modelo linear, citando algumas de suas vantagens se comparado às outras análises, como, por exemplo, o fato de ser o modelo de mais fácil compreensão e utilização. No entanto, em virtude da evolução dos métodos de análise e do crescente poder de processamento dos microcomputadores, conforme CORELHANO (2010, p.26), a NLG tem sido gradualmente incorporada ao dimensionamento de edifícios, não mais se justificando dispensá-la.

4.4 ANÁLISE LINEAR COM REDISTRIBUIÇÃO

Os efeitos das ações são redistribuídos, devendo os esforços internos ser recalculados. Quanto aos momentos em uma viga contínua, em geral os máximos valores absolutos ocorrem nas seções dos apoios. Assim, o concreto da região plastificada não mais oferecerá resistência, sendo que a mesma caberá aos vãos, que receberão essa parcela de momento, conforme FONTES (2005, p.24). No

entanto, as verificações do ELS permanecerão sendo efetuadas segundo a análise linear sem redistribuição, pois no ELS admite-se que o concreto esteja nos estádios I ou II. LEONAHARDT (1981, p.180) sugere que, particularmente no caso de vigas T contínuas, quando da análise de lajes nervuradas, a redistribuição produz resultados com vantagens econômicas ao reduzir a armadura nos apoios.

A redistribuição poderá ser efetuada multiplicando-se o momento das seções dos apoios pelo coeficiente de redistribuição δ . A partir disso, é preciso recalcular as reações de apoio e, conseqüentemente, o momento fletor nas demais seções de interesse. Notar-se-á que o momento nos vãos sofrerá um acréscimo proporcional à redução do mesmo nas seções de momento crítico.

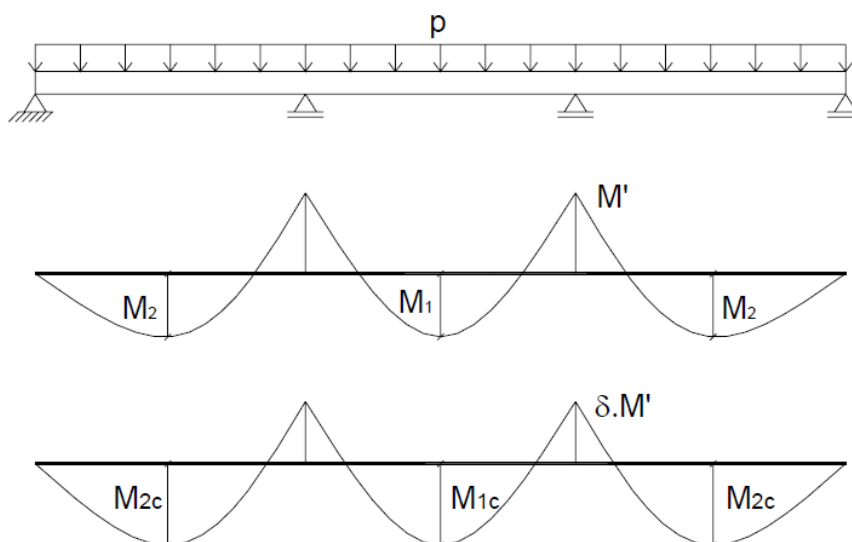


Figura 3 – Redistribuição de momentos fletores em viga contínua

Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p.74)

4.5 ANÁLISE PLÁSTICA

Devendo ser utilizada somente para verificações de ELU, essa análise supõe o comportamento elastoplástico perfeito dos materiais, que ocorre devido à NLM dos mesmos.

4.5.1 Rótulas Plásticas e Capacidade de Rotação Plástica

Quando, em determinados pontos de uma viga contínua, particularmente sobre apoios intermediários ou sob carregamentos concentrados, é atingido um momento suficientemente grande para que ocorra o escoamento da armadura

longitudinal tracionada, verifica-se a ocorrência de rótulas plásticas. Esse fenômeno se caracteriza pelo aumento da curvatura sem correspondente incremento de momento, que passa a ser denominado momento plástico (M_p).

FONTES (2005, p.32) cita o fato de que, para estruturas hiperestáticas, haverá, mesmo após a formação da primeira rótula plástica, uma preservação da capacidade de resistência, a depender do nível de estaticidade original, antes que se forme um mecanismo de colapso. Até a formação de tal mecanismo, haverá uma rotação da estrutura (aumento de sua curvatura), que pode ser determinada pela diferença da rotação no colapso e aquela que se dá quando iniciar a plastificação. LEONAHARDT (1981, p.182) também comenta a formação de rótulas:

Uma viga contínua [...] não rompe, quando o momento limite M for ultrapassado apenas em uma seção, ou no vão ou no apoio. A deformação plástica em tais pontos conduz a uma maior sollicitação nas zonas adjacentes. Somente quando se inicia o escoamento em um vão e nas zonas dos apoios que a ele estão ligadas é que se perde a capacidade resistente – surge então um “mecanismo” instável [...] ou uma cadeia de rótulas plásticas ou de pontos de ruptura. (LEONAHARDT, 1981, p.182).

Em FONTES e PINHEIRO (2005, p.82), encontra-se o exemplo de análise plástica com redistribuição de esforços em uma viga T contínua, sendo que na seção do apoio de continuidade (seção 2), onde o momento é crítico, faz-se necessária a verificação da capacidade de rotação. Reduzido o valor de M_2 , determina-se M_{2p} , o momento correspondente à formação da primeira rótula plástica:

$$M_{2p} = \delta \times M_2 \quad (10)$$

Neste caso, de acordo com os mesmos autores, o carregamento, correspondente à formação da primeira rótula e o acréscimo de carregamento necessário para se formarem as subsequentes rótulas em uma viga contínua de carregamento de cálculo p_d são, respectivamente,

$$p_{1r} = 8M_{2p} / L^2 \text{ e } \Delta p_{2r} = p_d - p_{1r} \cdot \quad (11)$$

De acordo com FONTES e PINHEIRO (2005, p.82), ao se isolar os tramos da viga e se aplicar o carregamento p_d ao longo da barra e o momento M_{2p} adjacente ao apoio da seção 2, é possível obter os momentos plásticos para a formação das próximas rótulas plásticas, nas seções 4 e 5:

$$M_{4p} = M_{5p} = pL^2/8 - M_{2p}/2 + M_{2p}^2/2pL^2 \quad (12)$$

Os referidos autores prosseguem determinando a rotação necessária, na seção 2, para a formação de um mecanismo de colapso através do acréscimo de carregamento Δp_{2r} (diferença entre a rotação no colapso e a rotação quando se inicia a plastificação). Considerando os dois tramos biapoiados e calculando-se a rotação à esquerda e à direita da seção 2, os mesmos autores deduzem que a rotação necessária, para ações uniformemente distribuídas, é:

$$\theta_{2p} = \theta_{2pe} + \theta_{2pd} = 2(\Delta p_{2r} L^3 / 24EI). \quad (13)$$

FONTES e PINHEIRO (2005, p.83) consideraram a rigidez EI no estádio II, sendo que no limiar da plastificação a seção encontra-se fissurada. O produto de inércia EI é dependente da armadura calculada para a seção 2, que por sua vez depende do valor prefixado de x/d e de M_{2p} . De acordo com os referidos autores, a capacidade de rotação θ_{pl} depende igualmente do valor de x/d, assim como da distância a entre pontos de momento nulo, da região que contém a seção do apoio 2. Tais valores serão obtidos através das equações (14) e (15):

$$a = 4M_{2p} / pL \text{ e} \quad (14)$$

$$\theta_{pl} = 0,0035 d/x \sqrt{a/d/6}. \quad (15)$$

A NBR 6118:2014 fornece curvas onde é possível determinar o limite da rotação plástica solicitante – isto é, no caso de flexão simples para o momento fletor solicitante M_{sd} na seção crítica -, sendo a mesma função da profundidade da linha neutra (x/d) no ELU. Nessa figura, $a/d = 3$, sendo $a = M_{sd}/V_{sd}$, onde V_{sd} é a força cortante na seção em questão. A referida normativa indica que, para outras relações de a/d, basta que os valores extraídos sejam multiplicados pelo fator $\sqrt{(a/d)/3}$.

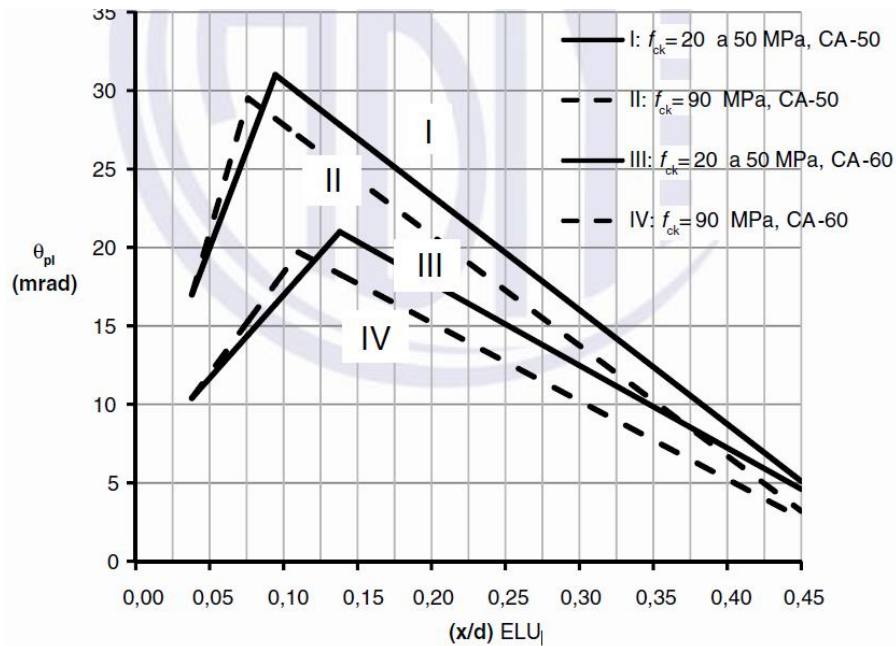


Figura 4 - Capacidade de rotação de rótulas plásticas

Fonte: NBR 6118:2014 (2014, p.92)

Em decorrência da natureza frágil do concreto armado, de acordo com FONTES (2005, p.35), é necessária a verificação da capacidade de rotação do mesmo. A capacidade de rotação, conforme BUCHAIM (2006, p.146) é determinada através da viga equivalente, correspondente a uma dada viga contínua. Segundo o autor citado anteriormente, a viga equivalente representa o segmento que contém a seção crítica onde ocorrem as deformações plásticas, sendo seu comprimento tomado como a distância entre os pontos de momentos nulos adjacentes ao apoio de continuidade para as cargas de cálculo (q_d), assim como para as cargas últimas (q_u) e de início de escoamento (q_y). Tais carregamentos, isto é, q_u e q_y , correspondem a uma deformação limite (última) em um dos materiais (aço ou concreto) e à deformação de início de escoamento da armadura tracionada na seção crítica (apoios de continuidade). A diferença entre os referidos carregamentos ($q_u - q_y$) representa o acréscimo de carga e, portanto, a máxima rotação plástica, ou seja, a capacidade de rotação plástica (BUCHAIM, 2006, p.146).

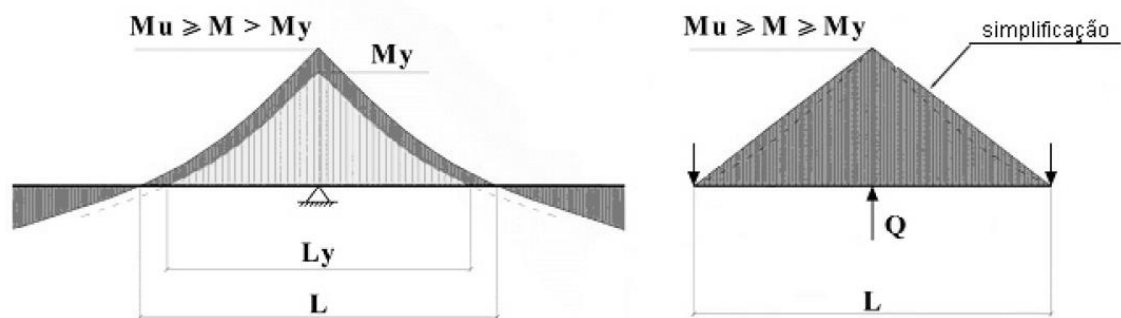


Figura 5 - Viga equivalente

Fonte: Buchaim (2006, p.146)

Segundo BUCHAIM (2006, p.146), os diversos fatores que afetam a rotação plástica da viga equivalente dificultam a determinação de uma função geral e segura, e, portanto, busca-se estimar a capacidade de rotação de maneira mais simples no caso de seção retangular, flexão simples e armadura simples. Isto é feito assumindo o comprimento equivalente da zona plastificada igual à altura útil d da seção transversal, o que, segundo o referido autor, reduz a análise da viga equivalente à análise da seção transversal.

Também na análise plástica se efetuará a redistribuição dos momentos, já que nas rótulas é nula a resistência aos mesmos, de tal sorte que serão redistribuídos para as demais partes da estrutura que ainda possuem a capacidade de resistir a esforços adicionais, isto é, aquelas nas quais o carregamento limite ainda não foi atingido.

4.6 ANÁLISE NÃO LINEAR RIGOROSA

Para a referida análise, usada tanto em ELU quanto em ELS, são levadas em conta as não linearidades geométrica e física.

4.7 ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELOS FÍSICOS

Caracterizada pela realização de ensaios em modelos físicos de concreto mecanicamente equivalente à estrutura idealizada. Os resultados obtidos, conforme o número de ensaios realizados deve ser submetido à avaliação estatística, sendo só então extrapoladas as conclusões à estrutura desejada. Obrigatoriamente se faz a checagem dos estados-limites últimos e de serviço. Tal análise costuma ser

utilizada em casos não abarcados pela normativa, ou nos quais as demais análises se mostram inconclusivas.

5 METODOLOGIA

A execução deste trabalho se baseou na teoria anteriormente abordada, sendo as análises propostas efetuadas segundo os procedimentos expostos no Referencial Teórico.

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE AÇO DE UMA VIGA CALCULADA ORA SEGUNDO A NBR 6118:2003 ORA SEGUNDO A NBR 6118:2014

Fazendo uso do dimensionamento de uma viga apresentado por FONTES (2005, p.66), em conformidade com as prescrições da NBR 6118:2003, foi efetuada a comparação proposta. O procedimento de cálculo do autor citado anteriormente foi implementado em planilha do software *Microsoft Excel* e, na sequência, os cálculos foram repetidos adotando as determinações da NBR 6118:2014 visando obter um paralelo entre as prescrições das referidas normas. Todas as análises de interesse deste estudo foram adotadas e, ao final, foi obtido o consumo de aço para a viga em questão.

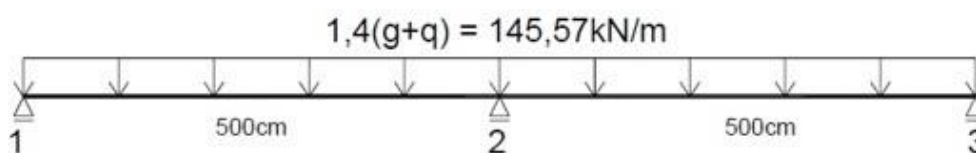


Figura 6 - Viga utilizada por Fontes

Fonte: Fontes (2005, p.66)

5.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DAS ANÁLISES EM VIGA SOB AS PRESCRIÇÕES DA NBR 6118:2014

Na sequência, com auxílio do software *Microsoft Excel*, foi realizada a variação dos parâmetros f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto) e altura da seção transversal ao serem adotadas cada uma das seguintes análises: Análise Linear, Análise Linear com Redistribuição e Análise Plástica. A viga utilizada foi a da Figura 7, sendo adotados três valores de f_{ck} (20, 30 e 40 MPa), assim como três alturas para a seção transversal (50, 60 e 70 centímetros). É necessário enfatizar que, apesar de serem adotadas seções transversais cada vez maiores

conforme se efetua a variação paramétrica, o conseqüente incremento no peso próprio da viga não foi considerado, sendo o carregamento de cálculo considerado fixo. Para cada combinação de f_{ck} e altura da seção transversal foram feitas Análise Linear em seção retangular e Análise Linear, Análise Linear com Redistribuição e Análise Plástica em seção T. Tal procedimento se pauta em FONTES (2005, p.65-74), e visa maximizar, adotando a seção T, a redução do consumo de aço com a redistribuição do momento fletor.

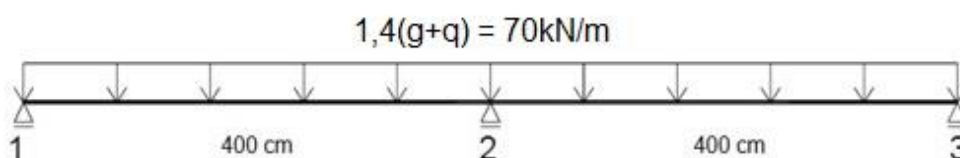


Figura 7 - Viga utilizada para realizar a variação paramétrica

Fonte: Adaptado de Fontes (2005, p.66)

Assim, ao todo, seriam obtidas trinta e seis combinações de f_{ck} , altura da seção transversal e análise (a Análise Linear foi efetuada duas vezes, uma para seção retangular e outra para seção T, em cada combinação de f_{ck} e altura). Cada combinação, por sua vez, apresentaria um valor próprio de consumo total de aço. Esses valores seriam, finalmente, usados verificar tendências e extrair conclusões. No entanto, tal procedimento foi realizado com apenas vinte e sete combinações, já que os momentos fletores utilizados na obtenção das armaduras são os mesmos para a Análise Linear com Redistribuição e a Análise Plástica. Esta última consiste apenas em uma verificação da capacidade de rotação das rótulas plásticas.

Por fim, os valores de consumo de aço foram plotados em gráficos relacionando os mesmos com a variação ora dos valores de f_{ck} em cada uma das seções ora das alturas das seções adotando-se cada um dos valores de f_{ck} . Com isso, pretendia-se identificar padrões característicos de cada análise.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE AÇO DE UMA VIGA CALCULADA ORA SEGUNDO A NBR 6118:2003 ORA SEGUNDO A NBR 6118:2014

Para uma viga contínua com dois tramos de 5 metros submetida a um carregamento de cálculo de 145,57 kN/m, conforme FONTES (2005, p.66), foram realizadas as verificações prescritas e determinado o consumo de aço, em quilogramas, para as armaduras principais (longitudinal e transversal), sendo desnecessário o uso de armaduras secundárias. Os resultados obtidos utilizando-se as NBR 6118:2003 e NBR 6118:2014 foram coligidos na tabela abaixo.

Tabela 1 – Consumo de aço para a viga especificada conforme as prescrições da NBR 6118:2003 e da NBR 6118: 2014

Versão da norma	Seção (cm x cm)	f _{ck} (MPa)	Arm. Longitudinal (kg)	Arm. Transversal (kg)	Arm. Secundária (kg)	Total (kg)
NBR 6118:2003	25 x 50	25	288,5218	31,556	0	320,0778
NBR 6118:2014	25 x 50	25	288,5218	31,556	0	320,0778

Fonte: Autoria própria

Foi possível observar que os valores obtidos são idênticos para ambas as versões da normativa. Tal constatação era esperada pois a formulação do roteiro de cálculo para a determinação das armaduras permanece inalterada com a atualização da norma para f_{ck} igual ou inferior a 55 MPa. Este era o caso da referida viga. No Quadro 1 constam as equações que sofreram alteração com a atualização da norma.

Quadro 1 – Equações da NBR 6118:2003 que sofreram alteração na NBR 6118: 2014 e que influenciam o consumo de aço

NBR 6118	2003	2014	
		Até C50	C55 a C90
$f_{ct,m}$	$0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	$0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	$2,12 \cdot \ln(1+0,11f_{ck})$
E_{ci}	$5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$	$\alpha_E \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$	$21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot (f_{ck}/10+1,25)^{1/3}$
E_{cs}	$0,85 \cdot E_{ci}$	$\alpha_i \cdot E_{ci}$	
Parâmetros introduzidos pela NBR 6118:2014			
	2003	2014	
α_E	-	1,2 para basalto e diabásio 1,0 para granito e gnaisse 0,9 para calcário 0,7 para arenito	
α_i	-	$0,8+0,2 \cdot f_{ck}/80 \leq 1,0$	

Fonte: Adaptado da NBR 6118:2003 e NBR 6118:2014

De maneira análoga, os limites referentes à profundidade da linha neutra (x/d) e determinação do coeficiente δ de redistribuição sofreram modificações na NBR 6118: 2014, em comparação à NBR 6118: 2003. Essas alterações estão sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Alterações nos limites da profundidade da linha neutra e coeficiente de redistribuição referentes à NBR 6118: 2014 quando comparada à NBR 6118: 2003.

NBR 6118	2003	2014
x/d	$\leq 0,50$ para concretos com $f_{ck} \leq 35MPa$	$x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50MPa$
	$\leq 0,40$ para concretos com $f_{ck} > 35MPa$	$x/d \leq 0,35$ para concretos com $50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$
	$\leq 0,628$ para a região dos vãos	
δ	$\geq 0,44 + 1,25 \times x/d$ para concretos com $f_{ck} \leq 35MPa$	$\geq 0,44 + 1,25 \times x/d$ para concretos com $f_{ck} \leq 50MPa$
	$\geq 0,56 + 1,25 \times x/d$ para concretos com $f_{ck} > 35MPa$	$\geq 0,56 + 1,25 \times x/d$ para concretos com $50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$

Fonte: Adaptado da NBR 6118:2003 e NBR 6118:2014

A viga em questão se classifica, na versão de 2003 da NBR 6118, na categoria de classe de resistência à compressão do concreto inferior a 35 MPa, já que apresenta f_{ck} igual a 25 MPa. A profundidade da linha neutra apresentada pela mesma, igual à 0,248, está em conformidade com o limite especificado, isto é, x/d menor ou igual à 0,5. Situação análoga ocorre quando se considera a versão de 2014 da NBR 6118.

Quanto à determinação do valor mínimo para δ , o equacionamento é idêntico para a viga em questão, quando submetida às versões de 2003 e 2014 da NBR 6118, pois apresenta f_{ck} inferior à 35 MPa e 50 MPa, respectivamente.

Assim, em razão de todo o equacionamento ser idêntico para a referida viga quando submetida às duas versões da normativa em questão, tem-se que os valores de consumo total de aço apresentados pela viga são, necessariamente, semelhantes.

6.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DAS ANÁLISES EM VIGA SOB AS PRESCRIÇÕES DA NBR 6118:2014

6.2.1 Resultados globais da variação paramétrica

Os valores de consumo de aço, em quilogramas, foram determinados tanto para armaduras longitudinais principais e secundárias quanto para a armadura transversal e, ao final, obteve-se um valor total. Tal procedimento foi adotado em cada uma das variações de parâmetros realizadas, que, por sua vez, abrangem todas as análises supracitadas. Os valores de consumo total foram plotados em gráficos, de modo a tornar evidente as tendências que surgem ao se efetuar a variação de parâmetros.

Tabela 2 – Variação paramétrica realizada com a viga especificada utilizando as referidas análises e de acordo com a NBR 6118: 2014 para obtenção do consumo total de aço

Seção (cm x cm)	Valor de f_{ck} (MPa)	Tipo de seção	Tipo de análise	Consumo total de aço (kg)
20 X 50	20	Retangular	Análise Linear	59,2778
		T	Análise Linear	54,6843
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	52,4751
	30	Retangular	Análise Linear	52,9664
		T	Análise Linear	48,5270
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	47,4540
	40	Retangular	Análise Linear	51,0616
		T	Análise Linear	46,6222
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	46,3205
20 X 60	20	Retangular	Análise Linear	64,9176
		T	Análise Linear	60,4011
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	54,1249
	30	Retangular	Análise Linear	61,3691
		T	Análise Linear	56,9297
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	51,7915
	40	Retangular	Análise Linear	61,6713
		T	Análise Linear	57,2319
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	52,3964
20 X 70	20	Retangular	Análise Linear	57,4869
		T	Análise Linear	54,6734
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	48,8924
	30	Retangular	Análise Linear	51,1762
		T	Análise Linear	48,4121
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	47,6417
	40	Retangular	Análise Linear	51,5614
		T	Análise Linear	48,7973
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	48,3350

Fonte: Autoria própria

Ao todo, foram criados doze gráficos relacionando o consumo total de aço em cada uma das análises, variando ora o valor de f_{ck} (20, 30 e 40 MPa) ora a seção transversal (alturas de 50, 60 e 70 centímetros).

Fixando a altura da seção transversal (uma altura em cada gráfico) e variando os valores de f_{ck} , obtemos os Gráficos 1 ao 3. No primeiro deles, é perceptível que,

quanto maior o valor de f_{ck} , menor o consumo total de aço, isto é, há uma tendência de queda no consumo. Nos outros dois gráficos, percebe-se que a queda no consumo total de aço quando da variação paramétrica é seguida por um ligeiro incremento no mesmo. Nota-se também que, para cada seção, o consumo de aço é menor adotando as Análise Linear em seção T e Análise Linear com Redistribuição em seção T se comparado ao resultado apresentado pela Análise Linear em seção Retangular.

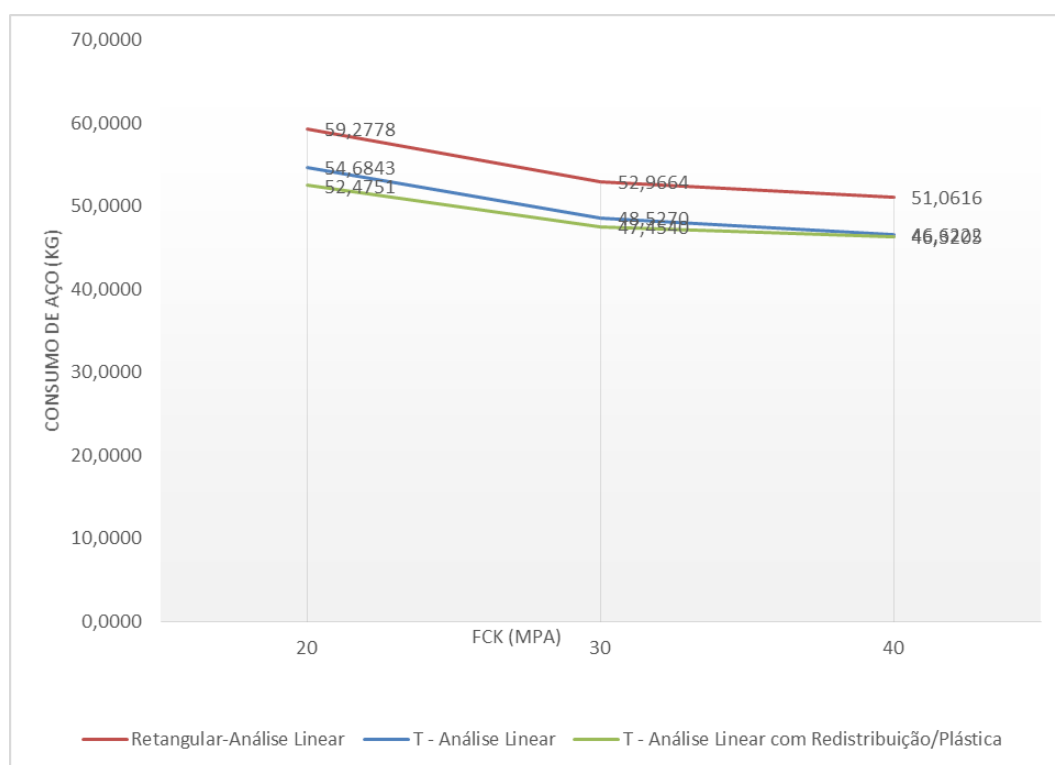


Gráfico 1 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 50 cm

Fonte: Autoria própria

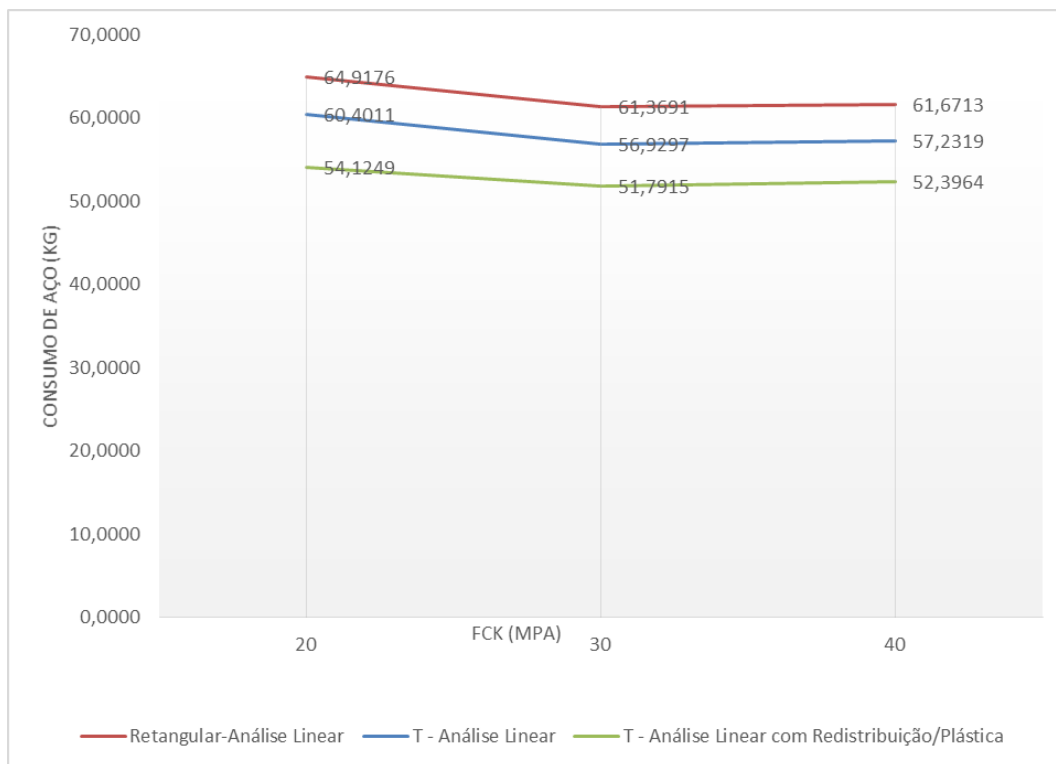


Gráfico 2 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 60 cm

Fonte: Autoria própria

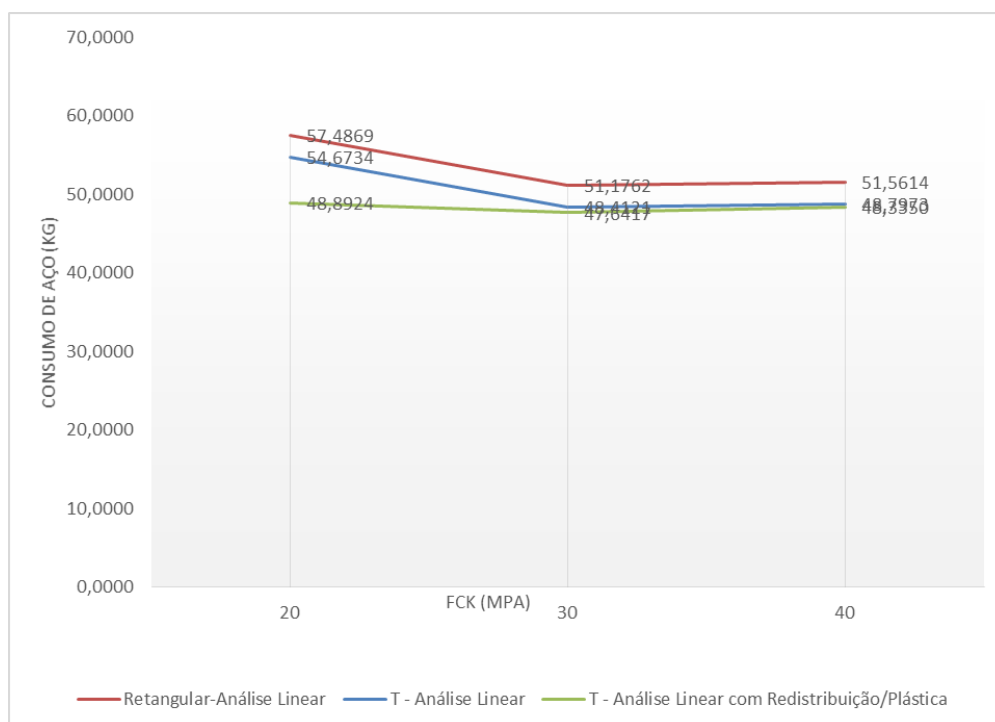


Gráfico 3 – Efeito da variação do valor de f_{ck} no consumo total de aço em seção 20 x 70 cm

Fonte: Autoria própria

O mesmo procedimento adotado nos três primeiros gráficos foi adotado nos três que se seguem, sendo que, em vez de fixada a altura da seção transversal, foi fixado em cada gráfico o valor de f_{ck} . Então, variou-se a altura da seção transversal para se determinar o consumo de aço, assim como a redução do mesmo em comparação à Análise Linear em seção Retangular quando das demais análises.

Inicialmente, fixando os valores de f_{ck} (cada qual em um gráfico), foi possível avaliar que conforme se elevava a altura da seção transversal, também crescia o consumo de aço, sendo esse crescimento seguido de uma queda no consumo.

Para cada valor de f_{ck} fixado, de maneira análoga aos Gráficos 1 ao 3 onde a seção foi fixada, nota-se nos Gráficos 4 ao 6 que o consumo de aço é menor com a Análise Linear com seção T e a Análise Linear com Redistribuição em seção T se comparado aos valores apresentados pela Análise Linear com seção Retangular.

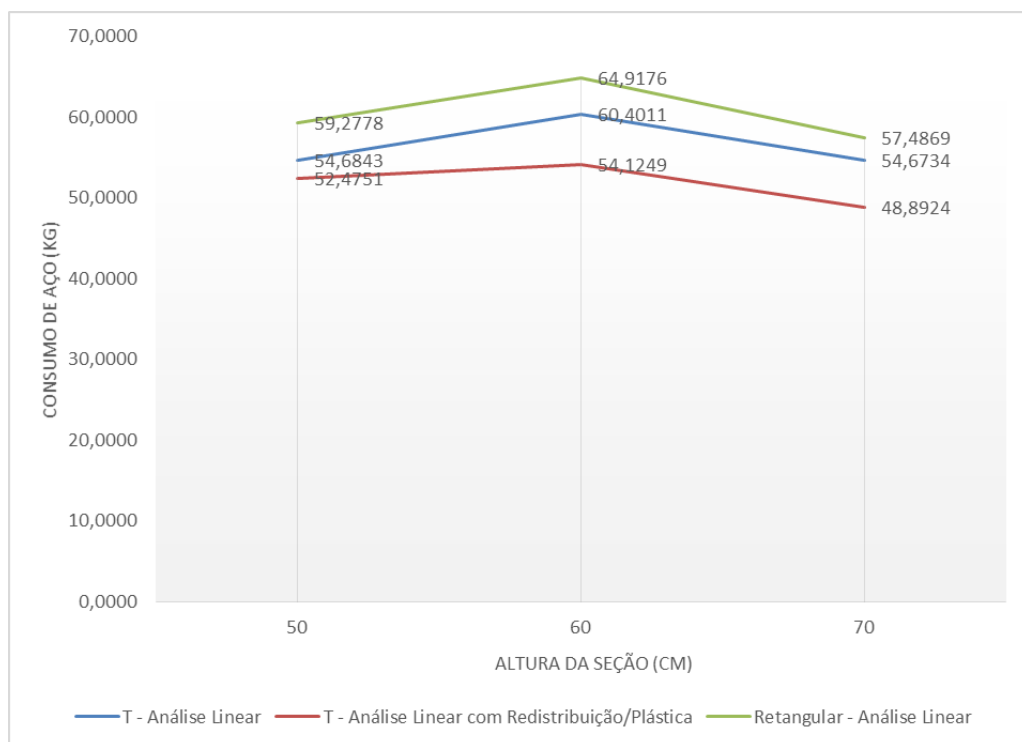


Gráfico 4 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 20 MPa

Fonte: Autoria própria

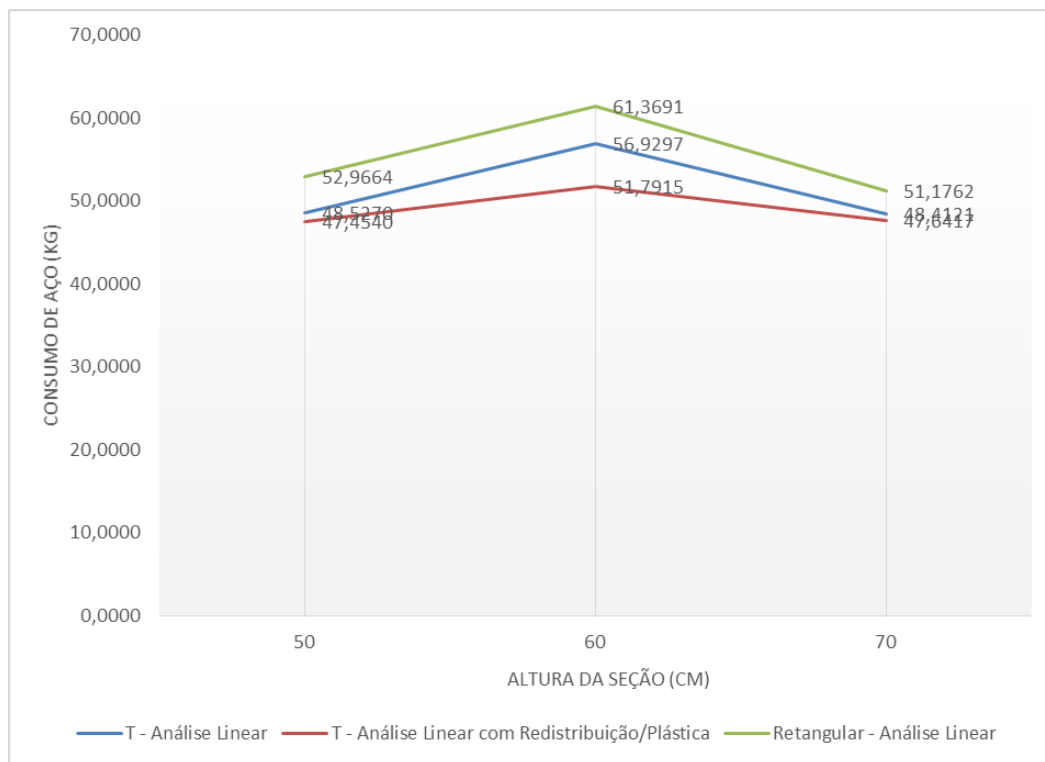


Gráfico 5 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 30 MPa

Fonte: Autoria própria

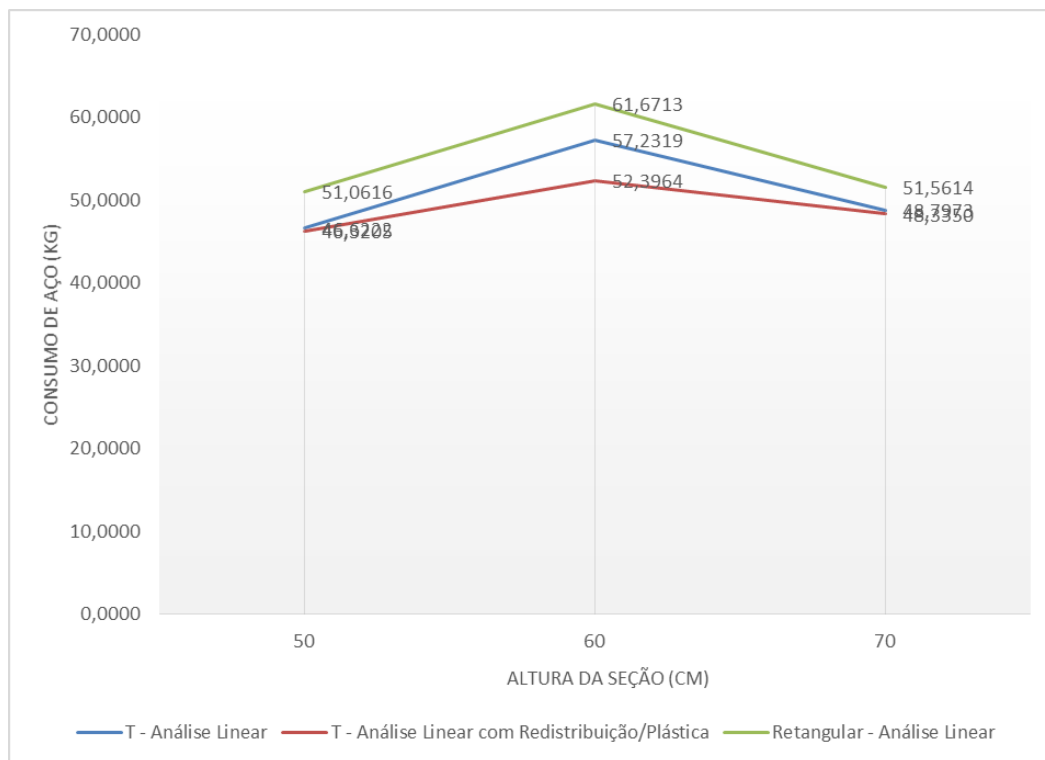


Gráfico 6 – Efeito da variação da altura da seção transversal no consumo total de aço adotando f_{ck} 40 MPa

Fonte: Autoria própria

O conjunto de fenômenos anteriormente descritos, referentes ao consumo total de aço quando da variação paramétrica, pode ser melhor compreendido quando se observa o modo como a variação dos parâmetros de interesse (f_{ck} e altura da seção transversal) afetam o resultado das equações utilizadas no dimensionamento das armaduras. Assim, é mister avaliar separadamente o impacto da variação paramétrica em cada equação determinante para o consumo de aço para que se compreenda o somatório desses efeitos, isto é, as flutuações no consumo total de aço. Isso, portanto, é o que se fará a seguir.

6.2.2 Impacto da variação paramétrica no consumo de aço dos vãos

Quanto aos resultados nos vãos, adquirem sentido à luz da identificação das relações de proporcionalidade entre o valor de f_{ck} e altura da seção adotados, presentes na formulação da qual se extrai a área de aço nas seções críticas. As equações que determinam a quantidade de aço são duas: a que se refere à profundidade da linha neutra (16), da qual depende aquela que determina a área de aço em uma seção (17).

$$x = 1,25 \times d \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(M_d / (0,425 \times b_w \times d^2 \times f_{cd}) \right)} \right) \quad (16)$$

$$A_s = M_d / \left((d - (0,4 \times x)) \times f_{yd} \right) \quad (17)$$

Conforme a Equação 16, percebemos que quanto maior o valor de f_{cd} (resistência de cálculo à compressão do concreto) menor a razão dentro da raiz. Tal razão é subtraída da unidade e, quanto menor o valor da razão, tanto maior será o valor da subtração e, conseqüentemente, de sua raiz quadrada. Esta, por sua vez, será subtraída da unidade e, quanto maior o seu valor, menor o resultado da subtração e, conseqüentemente, menor a profundidade da linha neutra x (ver Gráficos 7,8 e 9). O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao valor da altura útil d , dependente da altura da seção transversal, que aparece elevado ao quadrado no denominador da razão dentro da raiz.

A altura útil d também multiplica o valor proveniente da subtração da raiz à unidade. Aqui, seu efeito é o de elevar o valor de x conforme prossegue a variação paramétrica. No entanto, como se nota na Tabela 3 e nos Gráficos 10 ao 12, isso

não é o suficiente para impedir a queda no consumo de aço nos vãos conforme se efetua a variação paramétrica.

A área de aço em uma seção, de acordo com a equação 17, é dependente dos valores de d e x . De acordo com o que foi visto anteriormente, a profundidade da linha neutra x (equação 16) é, por sua vez, dependente dos valores de d e f_{cd} . Assim, se faz necessário analisar conjuntamente os efeitos da variação da altura da seção e da variação do f_{ck} no consumo final de aço.

Temos que, quanto maior o valor de d e f_{ck} , tanto menor o valor de x . No denominador da Equação 17 encontra-se x sendo subtraído de d . Quanto maior o valor de d e, por conseguinte, menor o valor de x , maior o resultado da subtração. Quanto maior o valor desta, por sua vez, menor o valor de A_s , já que a subtração encontra-se no denominador do quociente em questão. Essa queda no valor de A_s repercute na diminuição do consumo de aço nos vãos evidenciada na Tabela 3 e nos Gráficos 7 ao 12, dela derivados.

Tabela 3 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço nos vãos

Seção (cm x cm)	Valor de fck (MPa)	Tipo de seção	Tipo de análise	Consumo de aço nos vãos (kg)
20 X 50	20	Retangular	Análise Linear	27,0892
		T	Análise Linear	22,4957
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	22,4957
	30	Retangular	Análise Linear	26,0106
		T	Análise Linear	21,5712
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	21,5712
	40	Retangular	Análise Linear	25,4714
		T	Análise Linear	21,0319
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	21,1090
20 X 60	20	Retangular	Análise Linear	26,3958
		T	Análise Linear	21,8794
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	21,8794
	30	Retangular	Análise Linear	25,6254
		T	Análise Linear	21,1860
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	21,1860
	40	Retangular	Análise Linear	25,1632
		T	Análise Linear	20,7238
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	20,7238
20 X 70	20	Retangular	Análise Linear	16,8811
		T	Análise Linear	14,0676
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	14,0676
	30	Retangular	Análise Linear	16,3382
		T	Análise Linear	13,5740
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	13,5740
	40	Retangular	Análise Linear	16,0420
		T	Análise Linear	13,2778
		T	L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	13,2778

Fonte: Autoria própria

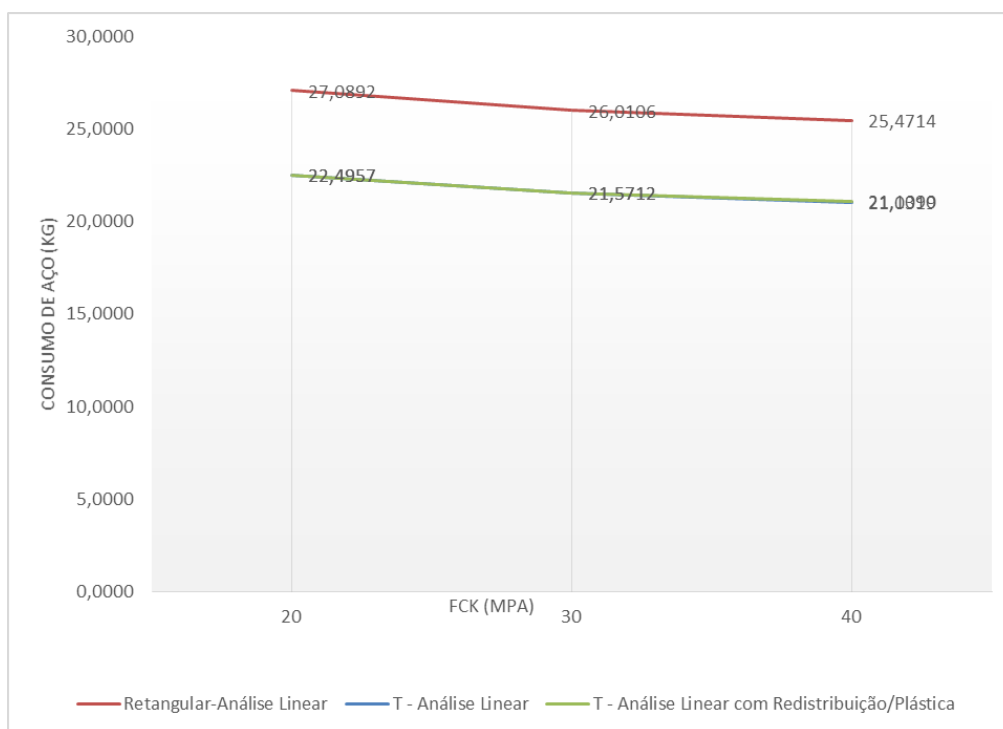


Gráfico 7 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 50 cm

Fonte: Autoria própria

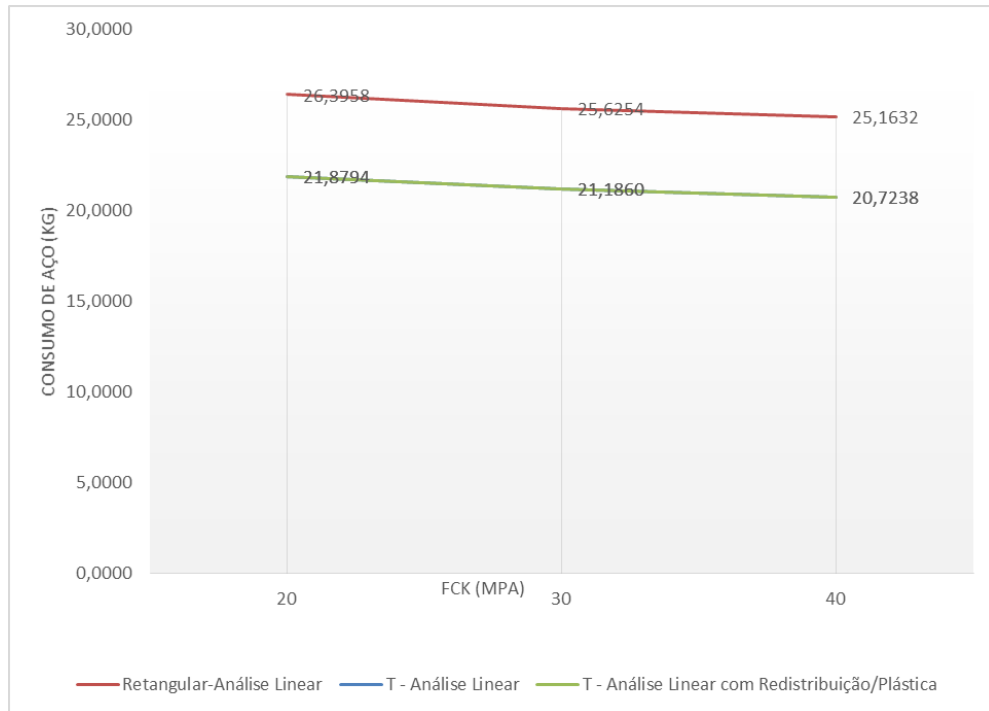


Gráfico 8 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 60 cm

Fonte: Autoria própria

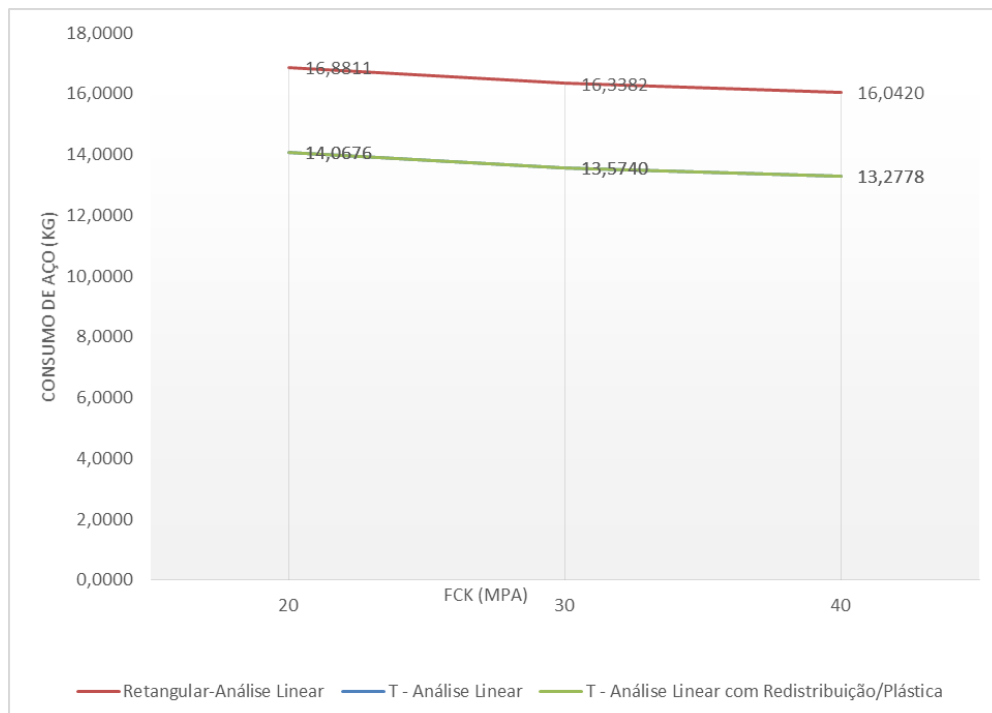


Gráfico 9 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 70 cm

Fonte: Autoria própria

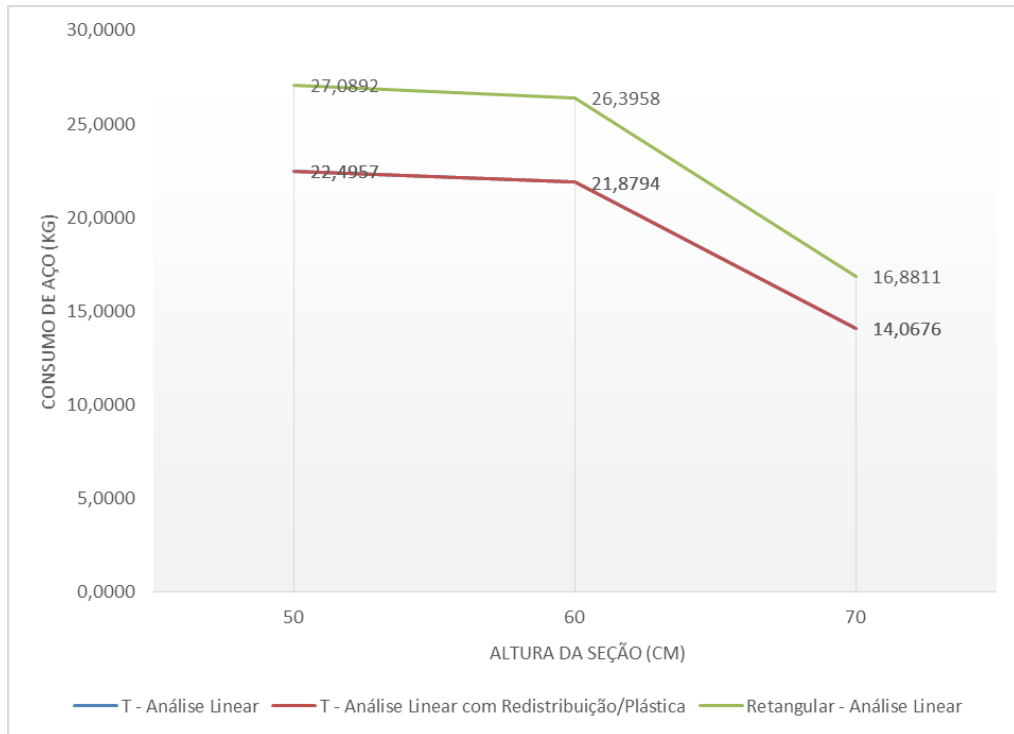


Gráfico 10 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 20 MPa

Fonte: Autoria própria

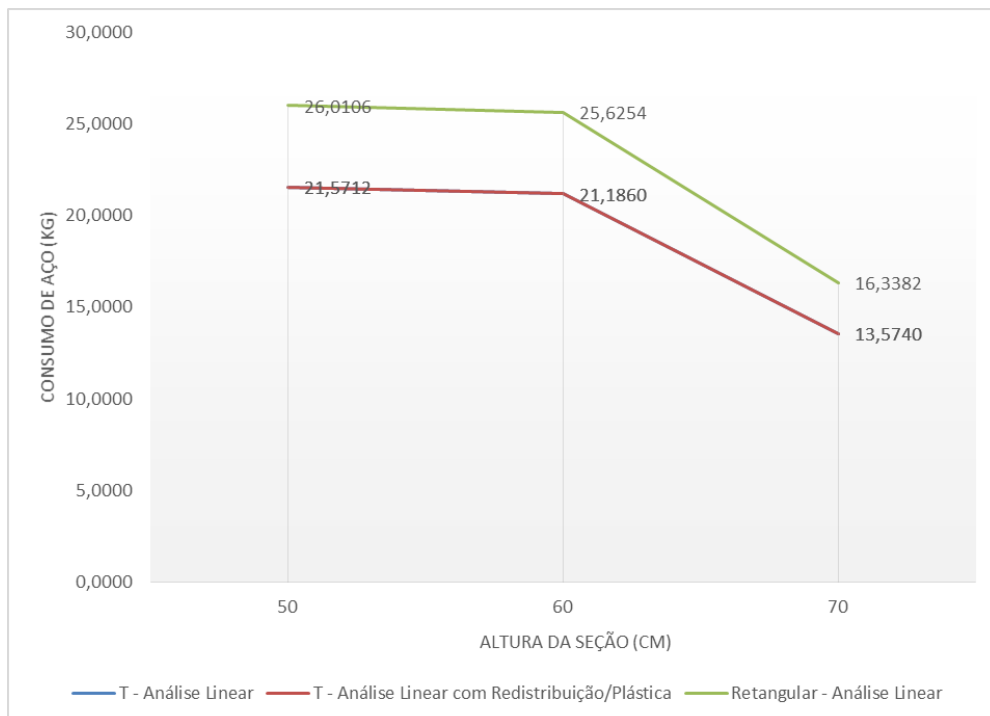


Gráfico 11 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 30 MPa

Fonte: Autoria própria

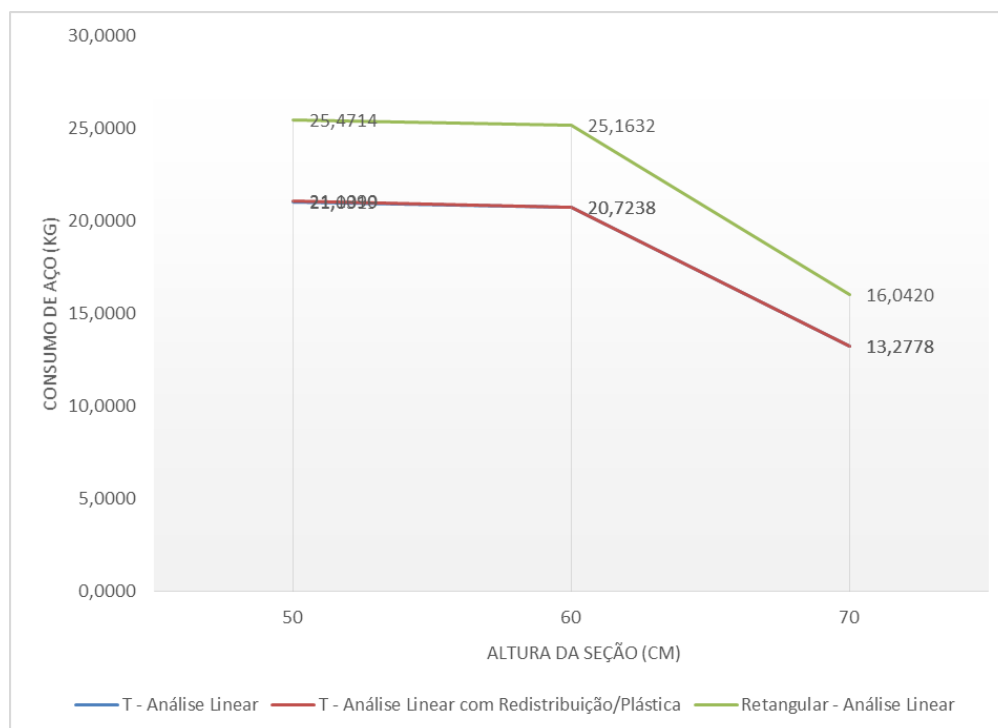


Gráfico 12 – Decréscimo do consumo de aço nos vãos com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 40 MPa

Fonte: Autoria própria

Nos Gráficos 7 ao 12 nota-se que a Análise Linear em Seção T e a Análise Linear com Redistribuição em Seção T apresentam curvas idênticas de consumo de aço nos vãos, sendo este sempre menor do que aquele referente à Análise Linear em Seção Retangular, conforme previsto no Referencial Teórico. Tal observação pode ser justificada pelo fato de o valor de b_w (largura da alma da viga) da seção retangular ser substituído, na seção T, por b_f (largura colaborante), sendo este último sempre maior que o primeiro.

Assim, tem-se que o valor maior de b_f reduz a razão dentro da raiz e, conseqüentemente, aumenta o valor da mesma. Elevando o valor da raiz, diminui-se o valor da subtração e, portanto, o da profundidade da linha neutra x . Diminuindo-se o valor de x , aumenta-se o do denominador na Equação 19 e, desta maneira, é reduzido o valor do quociente que representa A_s (área de aço na seção). Portanto, menor o consumo de aço nos vãos com a Análise Linear em Seção T.

$$x = 1,25 \times d \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(M_d / (0,425 \times b_f \times d^2 \times f_{cd}) \right)} \right) \quad (18)$$

$$A_s = M_d / \left((d - (0,4 \times x)) \times f_{yd} \right) \quad (19)$$

6.2.3 Impacto da variação paramétrica no consumo de aço do apoio intermediário

No que se refere ao consumo de aço na seção sobre o apoio intermediário, tem-se que o mesmo é decrescente conforme é aumentada a altura da seção transversal, podendo-se dizer o mesmo quando do aumento do valor de fck. Esses resultados estão representados na Tabela 4, assim como nos Gráficos 13 ao 18.

Tabela 4 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço no apoio intermediário

Seção (cm x cm)	Valor de fck (MPa)	Tipo de seção	Tipo de análise	Consumo de aço no apoio interm. (kg)
20 X 50	20	Retangular	Análise Linear	17,8630
		T	Análise Linear	17,8630
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	15,6538
	30	Retangular	Análise Linear	14,3282
		T	Análise Linear	14,3282
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	13,2552
40	Retangular	Análise Linear	12,5609	
	T	Análise Linear	12,5609	
		L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	12,1822	
20 X 60	20	Retangular	Análise Linear	15,9062
		T	Análise Linear	15,9062
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	9,6300
	30	Retangular	Análise Linear	13,3814
		T	Análise Linear	13,3814
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	8,2433
40	Retangular	Análise Linear	12,3084	
	T	Análise Linear	12,3084	
		L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	7,4729	
20 X 70	20	Retangular	Análise Linear	14,8332
		T	Análise Linear	14,8332
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	9,0522
	30	Retangular	Análise Linear	8,6670
		T	Análise Linear	8,6670
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	7,8966
40	Retangular	Análise Linear	7,8196	
	T	Análise Linear	7,8196	
		L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	7,3573	

Fonte: Autoria própria

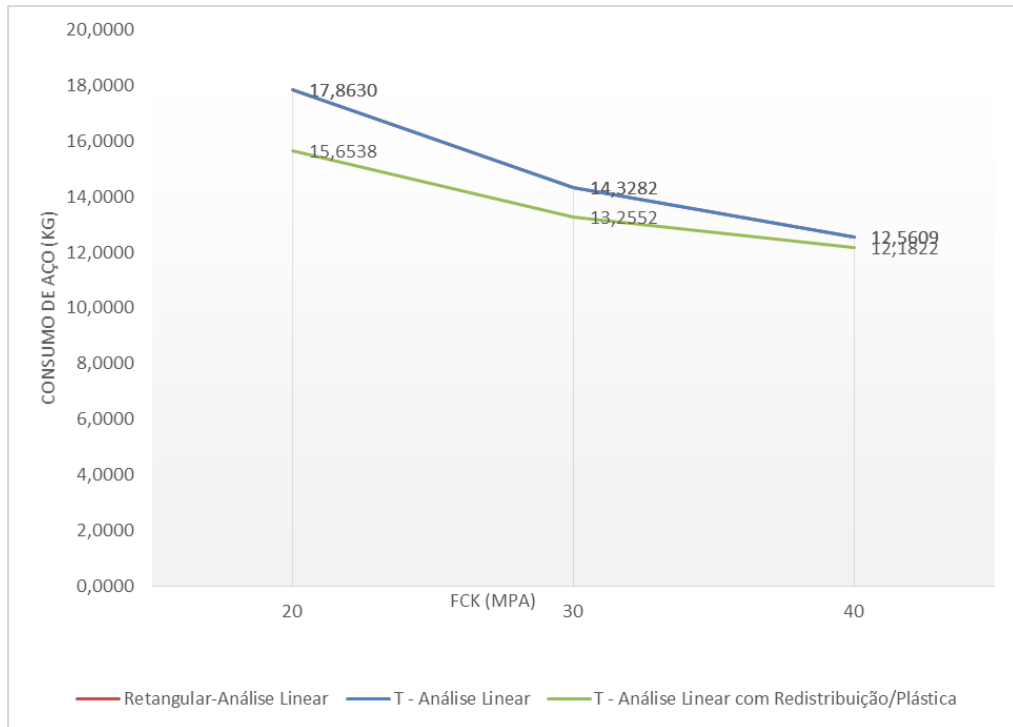


Gráfico 13 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 50 cm

Fonte: Autoria própria

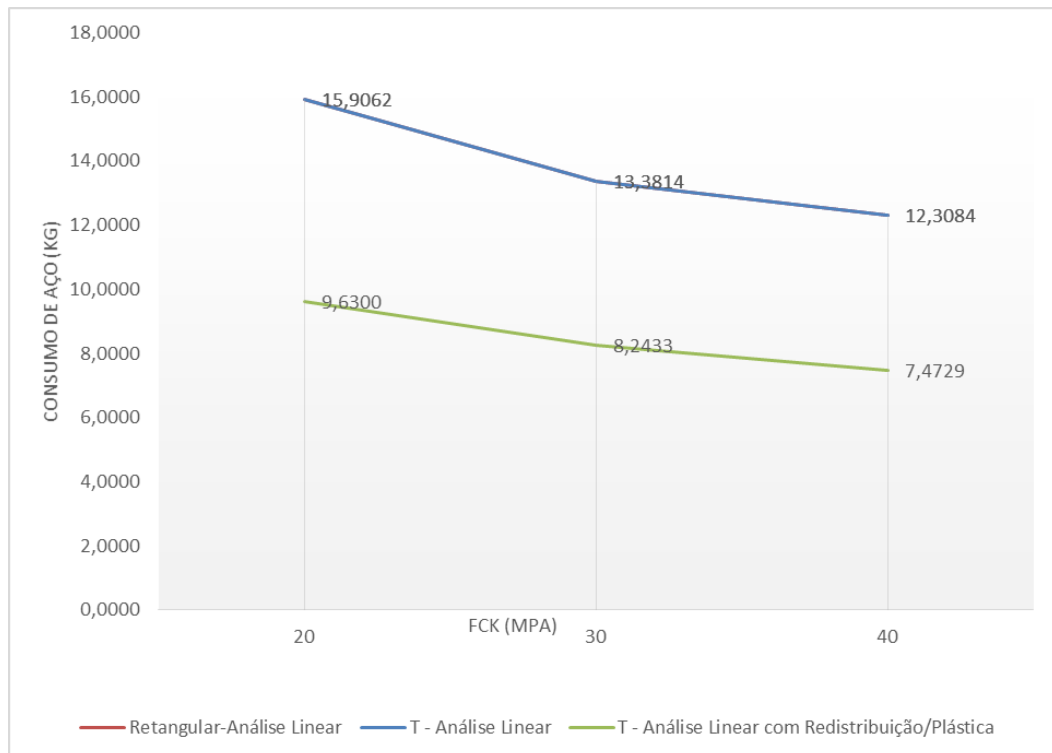


Gráfico 14 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 60 cm

Fonte: Autoria própria

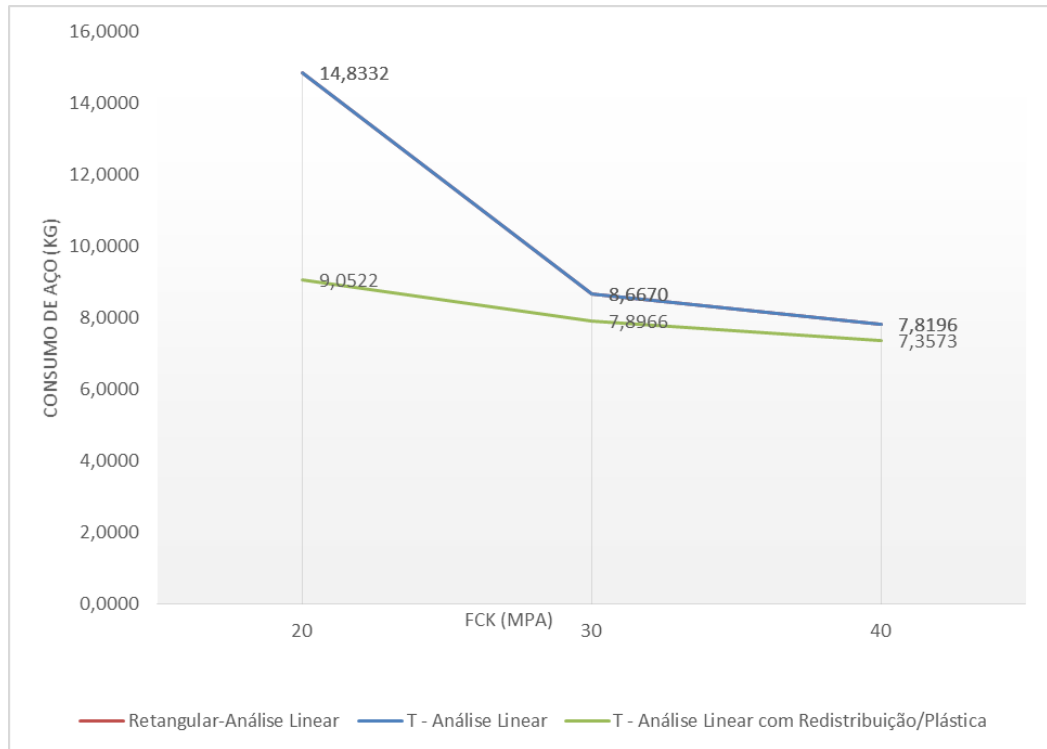


Gráfico 15 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento do f_{ck} em seção 20 x 70 cm

Fonte: Autoria própria

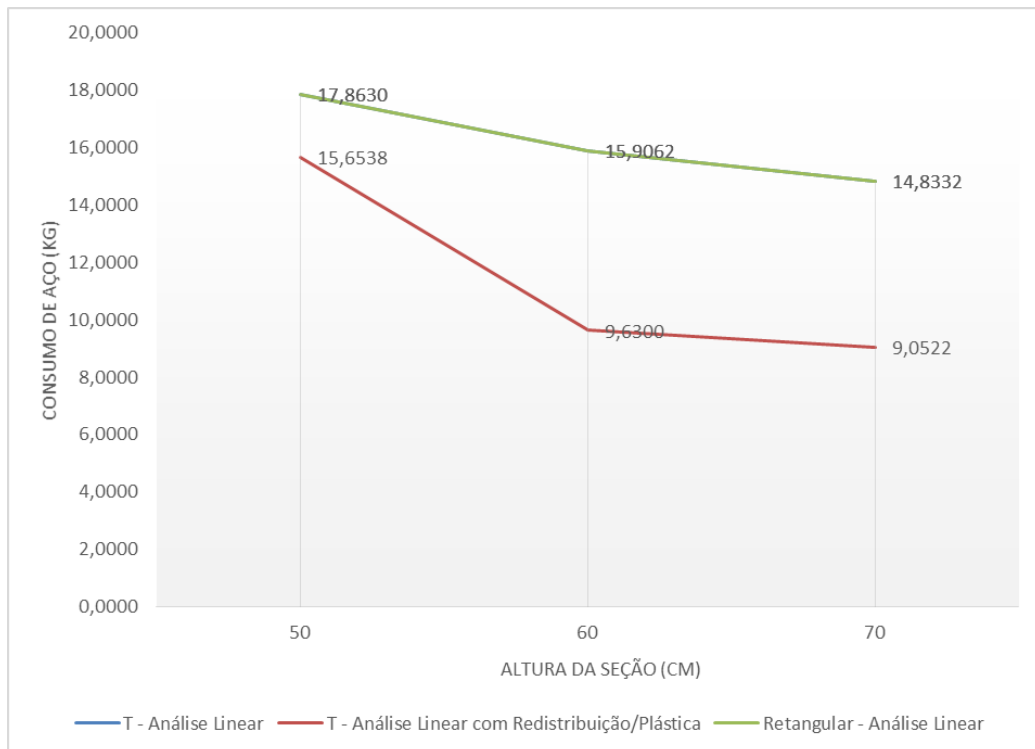


Gráfico 16 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 20 MPa

Fonte: Autoria própria

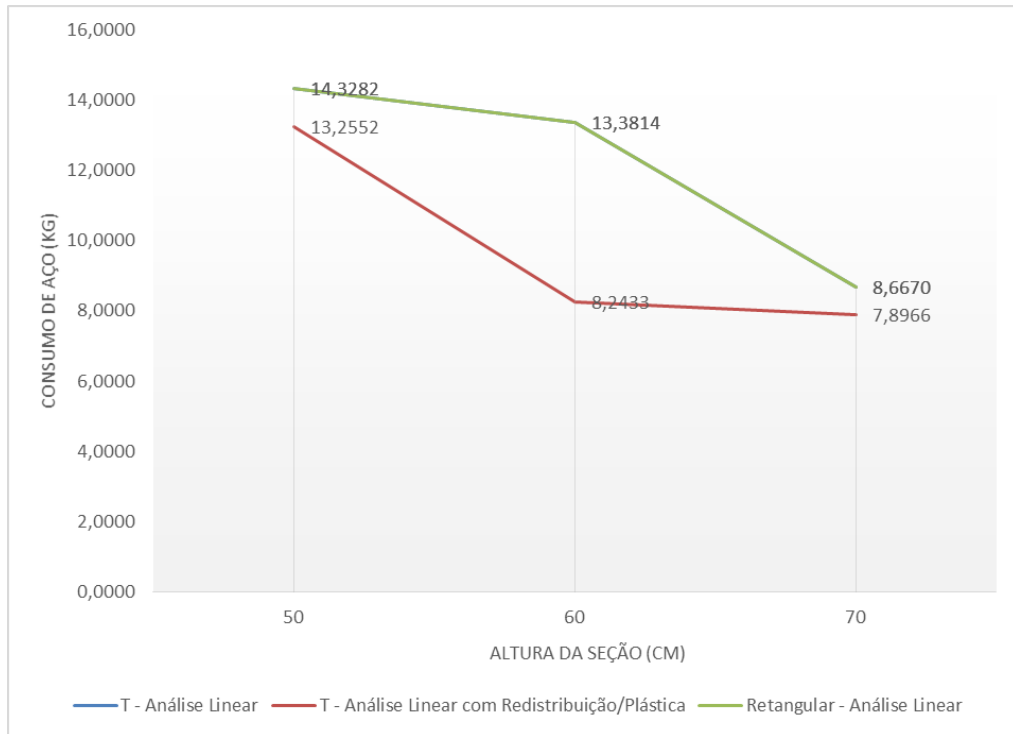


Gráfico 17 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 30 MPa

Fonte: Autoria própria

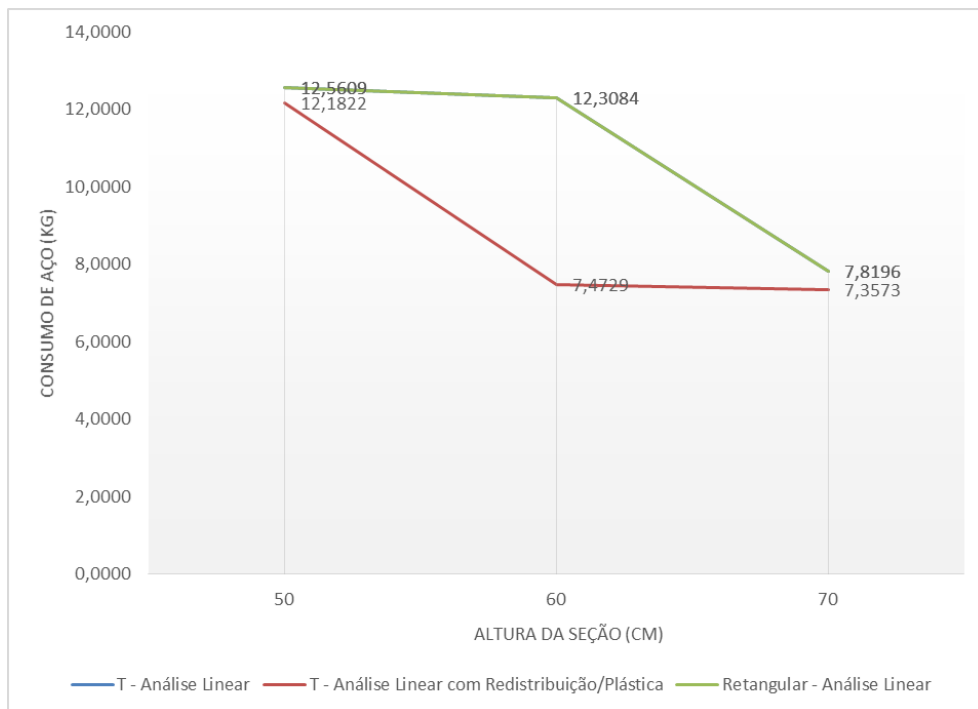


Gráfico 18 – Crescimento do consumo de aço no apoio intermediário com o aumento da altura da seção transversal adotando f_{ck} 40 MPa

Fonte: Autoria própria

O fato de que o consumo de aço na seção crítica do apoio intermediário ser decrescente conforme efetua-se a variação paramétrica possui a mesma explicação apresentada no item 6.2.2, referente aos vãos. Além disso, nota-se que, para o apoio intermediário, as curvas de consumo de aço são idênticas para a Análise Linear em Seção Retangular e para a Análise Linear em Seção T, diferindo dos resultados apresentados pela Análise Linear com Redistribuição em Seção T, sempre menores.

Isso se dá porque, conforme pode ser observado na Equação 20, o momento solicitante M_d foi minorado na Análise Linear com Redistribuição em Seção T, quando multiplicado por um coeficiente de redistribuição δ máximo de 0,75. A equivalência entre valores de consumo de aço no apoio intermediário referentes à Análise Linear em Seção Retangular e à Análise Linear em Seção T se deve ao fato de, ao contrário do que se dá nos vãos, o valor de b_w não é alterado para b_f quando se adota a seção T. Portanto, para a seção crítica sobre o apoio intermediário, essas duas análises são idênticas na prática (Equação 21). O mesmo não pode ser dito da Análise Linear com Redistribuição em Seção T, que tem seu efeito de redução do consumo de aço intensificado pela adoção de b_f , conforme a Equação 20:

$$x = 1,25 \times d \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(M_d / (0,425 \times b_f \times d^2 \times f_{cd}) \right)} \right) \quad (20)$$

$$x = 1,25 \times d \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(M_d / (0,425 \times b_w \times d^2 \times f_{cd}) \right)} \right) \quad (21)$$

6.2.4 Influência da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares (Secundárias)

A variação dos parâmetros de interesse deste estudo, ou seja, f_{ck} e altura da seção transversal, também afetam as demais armaduras requeridas por uma viga contínua. O efeito da variação paramétrica no consumo de aço dessas armaduras está representado na Tabela 5, assim como nos Gráficos 19 ao 24, e será analisado de maneira análoga ao que foi feito nos itens 6.2.2 e 6.2.3, isto é, através das

relações de proporcionalidade dos parâmetros f_{ck} e h inseridos nas equações de consumo de aço.

Tabela 5 – Efeito da variação paramétrica no consumo de aço da Armadura Transversal e Armaduras Complementares

Seção (cm x cm)	f_{ck} (MPa)	Tipo de seção	Tipo de análise	Arm. Transv. (kg)	Grampos (kg)	Arm. Pele (kg)	Arm. negativa apoios extrem. (kg)
20 X 50	20	Retangular	Análise Linear	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189
		T	Análise Linear	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189
			L. com Redistr./Plást.	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189
	30	Retangular	Análise Linear	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819
		T	Análise Linear	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819
			L. com Redistr./Plást.	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819
	40	Retangular	Análise Linear	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819
		T	Análise Linear	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819
			L. com Redistr./Plást.	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819
20 X 60	20	Retangular	Análise Linear	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957
		T	Análise Linear	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957
			L. com Redistr./Plást.	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957
	30	Retangular	Análise Linear	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298
		T	Análise Linear	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298
			L. com Redistr./Plást.	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298
	40	Retangular	Análise Linear	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298
		T	Análise Linear	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298
			L. com Redistr./Plást.	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298
20 X 70	20	Retangular	Análise Linear	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883
		T	Análise Linear	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883
			L. com Redistr./Plást.	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883
	30	Retangular	Análise Linear	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224
		T	Análise Linear	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224
			L. com Redistr./Plást.	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224
	40	Retangular	Análise Linear	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224
		T	Análise Linear	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224
			L. com Redistr./Plást.	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224

Fonte: Autoria própria

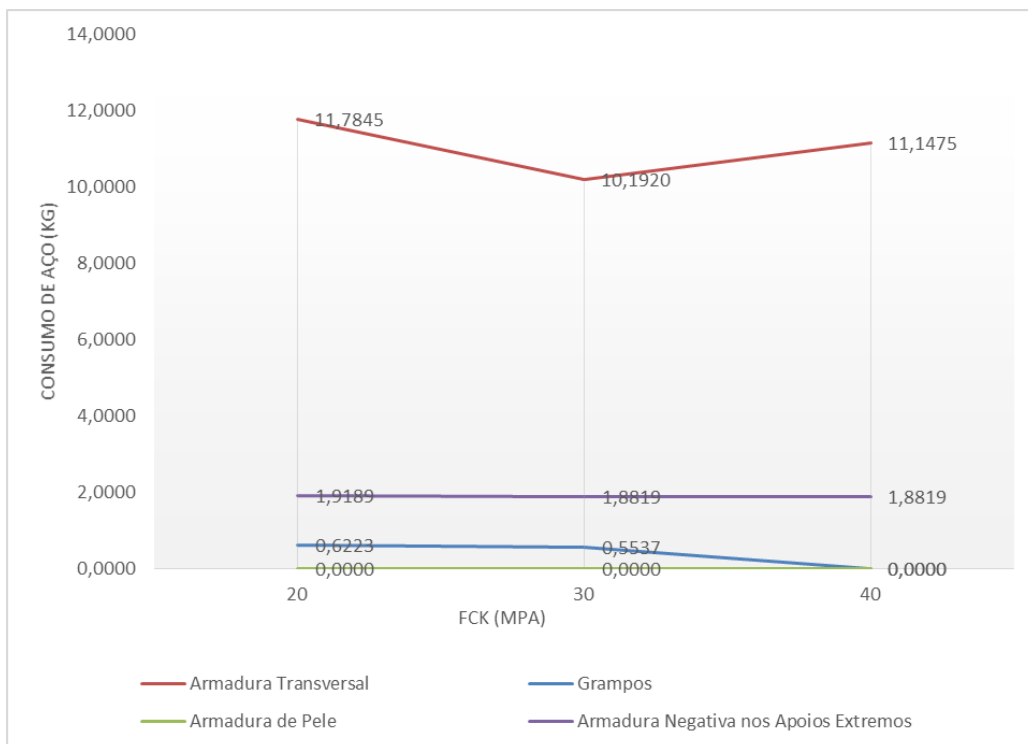


Gráfico 19 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares em seção de 20 x 50 cm

Fonte: Autoria própria

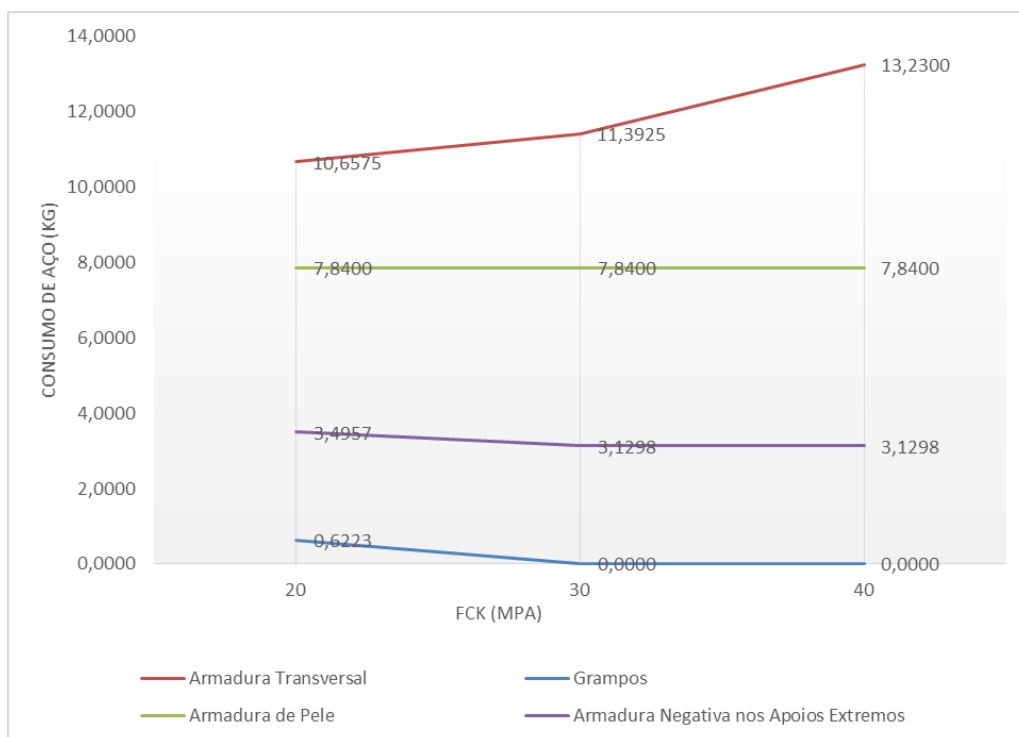


Gráfico 20 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares em seção de 20 x 60 cm

Fonte: Autoria própria

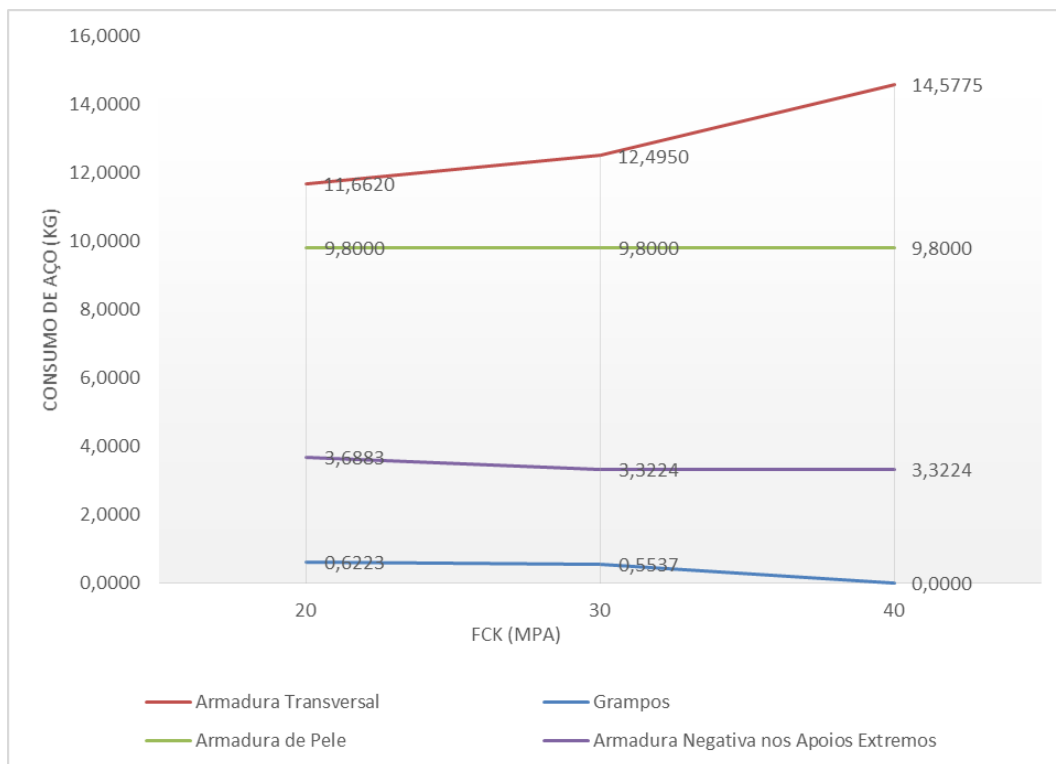


Gráfico 21 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares em seção de 20 x 70 cm

Fonte: Autoria própria

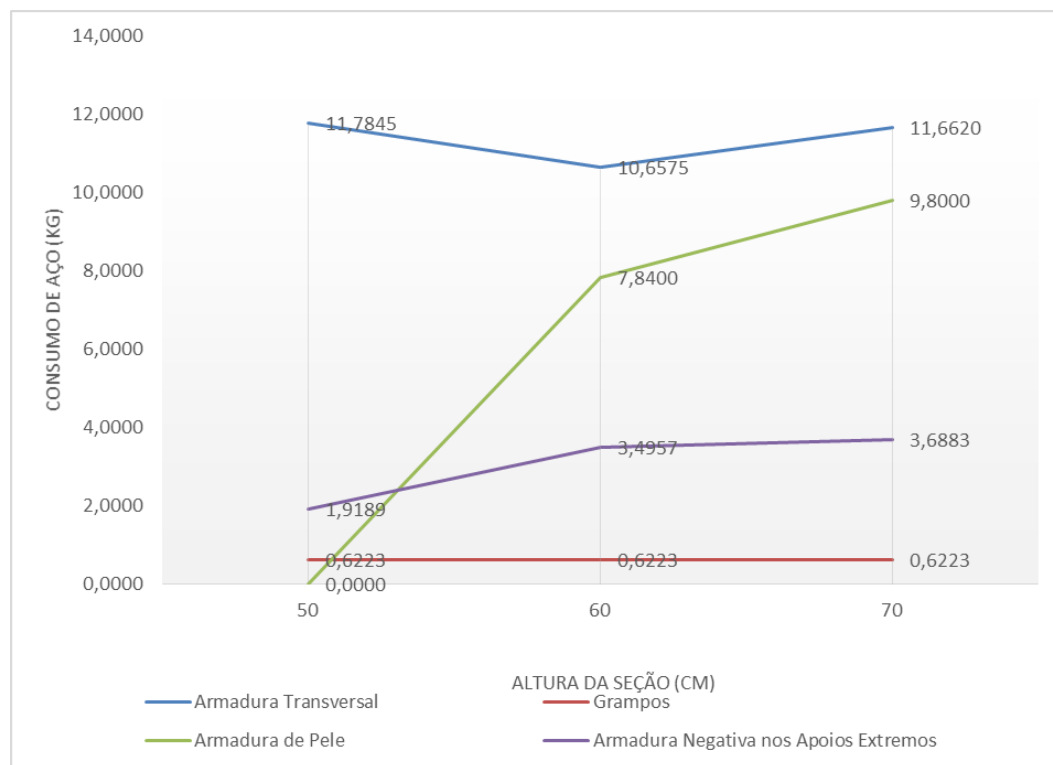


Gráfico 22 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 20 MPa

Fonte: Autoria própria

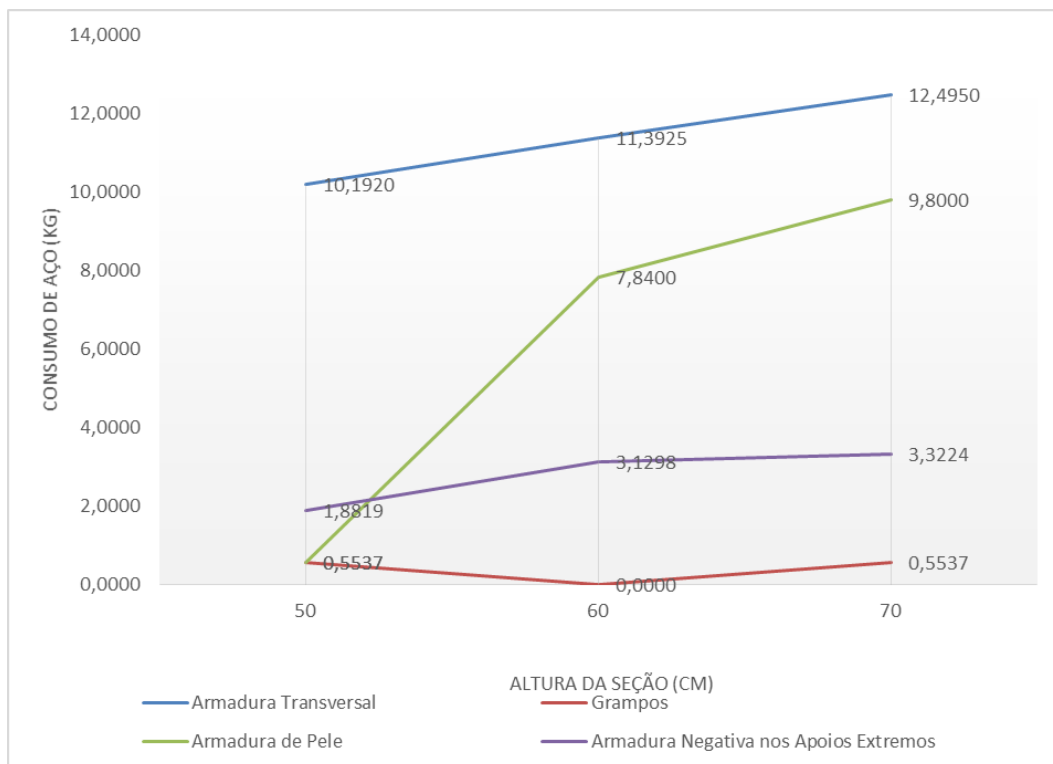


Gráfico 23 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 30 MPa

Fonte: Autoria própria

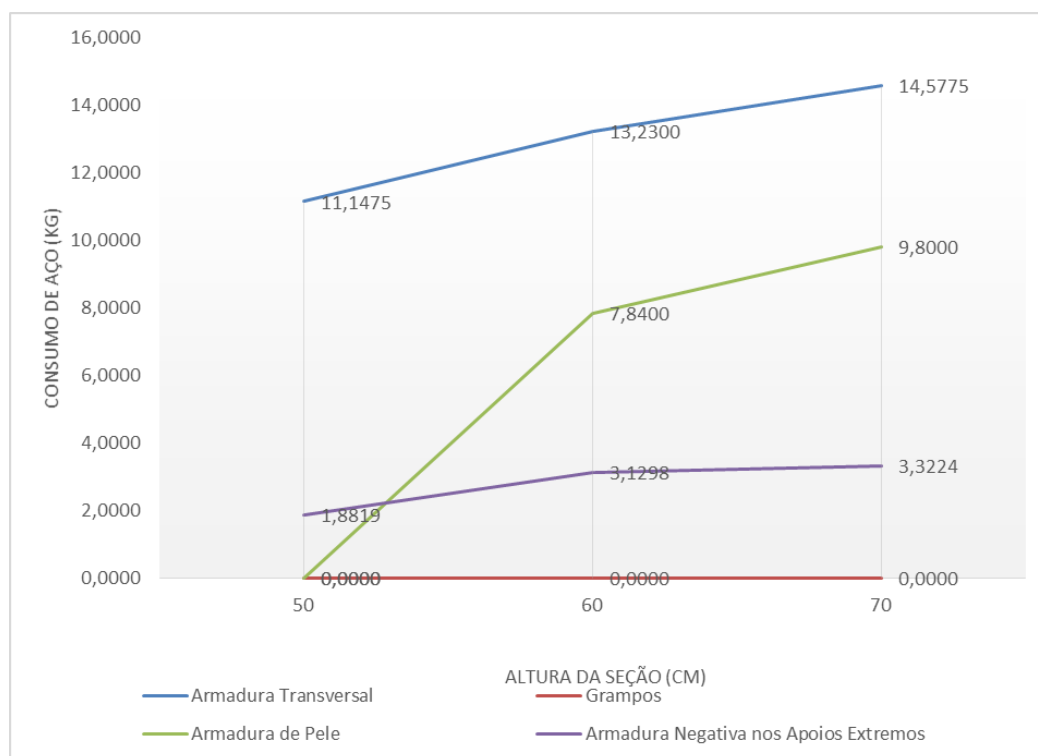


Gráfico 24 – Efeitos da variação paramétrica na Armadura Transversal e nas Armaduras Complementares utilizando f_{ck} 40 MPa

Fonte: Autoria própria

6.2.4.1 Armadura Transversal

No que se refere à Armadura Transversal, foi adotado o Modelo de cálculo II da NBR 6118:2014, o qual prescreve que a cortante solicitante de cálculo V_{Sd} (que deve ser o valor localizado a uma distância $d/2$ do eixo do apoio considerado e, portanto, aqui denominada $V_{Sd/2}$) deve ser menor que a força cortante resistente de cálculo V_{Rd3} . No intuito de obter o máximo aproveitamento da armadura transversal, iguala-se $V_{Sd/2}$ à V_{Rd3} , o que possibilita isolar a parcela de esforço cortante resistida pela armadura transversal (V_{SW}), da qual depende a determinação da área da seção transversal dos estribos de força cortante (A_{SW}).

$$V_{Sd} = V_{Sd/2} \leq V_{Rd3} = V_C + V_{SW} \quad (22)$$

$$V_{SW} = V_{Rd3} - V_C = V_{Sd/2} - V_{C1} \quad (23)$$

A NBR 6118:2014 permite fazer V_C (parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao mecanismo em treliça) igual a V_{C1} , quando se tratar de flexão simples. Assim, para determinar V_{SW} , necessita-se antes obter V_{C1} . Este último é assim delimitado pela referida norma:

$$V_{C1} = V_{C0} \quad \text{quando} \quad V_{Sd} \leq V_{C0}$$
$$V_{C1} = 0 \quad \text{quando} \quad V_{Sd} = V_{Rd2}$$

Assim, por interpolação linear, é possível determinar o valor de V_{C1} :

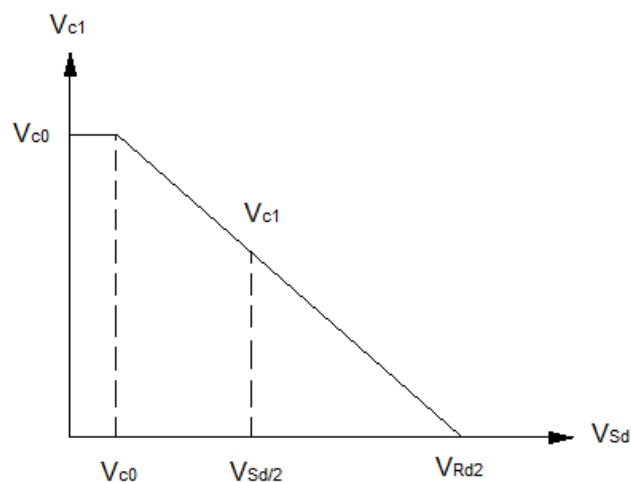


Figura 8 – Interpolação linear para a determinação de V_{C1} conforme prescreve a NBR 6118:2014

Fonte: Adaptado da NBR 6118:2014 (2014, p.138)

$$V_{C1} = (V_{C0} \times (V_{Rd2} - V_{Sd/2})) / (V_{Rd2} - V_{C0}) \quad (24)$$

$$\text{onde } V_{C0} = 0,6 \times f_{ctd} \times b_w \times d \quad (25)$$

$$\text{e } V_{Rd2} = 0,54 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} \times b_w \times d \times \text{sen}^2(\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (26)$$

$$\text{com: } \alpha_{v2} = 1 - (f_{ck}/250), \text{ em megapascal} \quad (27)$$

Nota-se nas Equações 24 a 27 que os fatores dos quais V_{C1} é dependente são função, por sua vez, dos parâmetros que são objeto de variação neste estudo. E, conforme são elevados os valores de f_{ck} (e, conseqüentemente, f_{cd} e f_{ctd}) e h (por conseguinte, o mesmo ocorre com d), elevam-se os valores de V_{C0} , V_{Rd3} e V_{C1} . Sendo que quanto maior o valor de d , menor o de $V_{Sd/2}$ (a cortante decresce conforme se afasta do apoio), tem-se que V_{SW} apresenta tendência de crescimento do seu valor absoluto (o sinal do cisalhamento não possui importância prática, sendo apenas uma convenção).

Assim, como é possível notar na Equação 28, assim como na Tabela 5 e nos Gráficos 19 ao 24, a tendência de A_{SW} é assumir valores cada vez maiores conforme prossegue a variação paramétrica. Essa tendência, porém, não é perfeitamente linear, já que existe um refreamento do crescimento ora na forma da constante α_{v2} (Equação 27) ora na presença de d no denominador da equação que determina A_{SW} :

$$A_{SW}/s = V_{SW} / (0,9 \times d \times f_{ywd} \times \text{sen} \alpha \times (\cotg \alpha + \cotg \theta)) \quad (28)$$

6.2.4.2 Grampos

Quanto aos Grampos, sua função é resistir à força F_{Sd} não ancorada nos apoios, sendo a mesma assim determinada:

$$F_{Sd} = V_{Sd} \times (1 - (l_{b,disp} / l_{b,nec})) \quad (29)$$

$$\text{onde } l_{b,nec} = \alpha_1 \times l_b \times (A_{S,calc} / A_{S,ef}) \quad (30)$$

$$\text{com } l_b = (\phi/4) \times (f_{yd} / f_{bd}) \quad (31)$$

É possível notar que, quanto maior o valor de $l_{b,nec}$, menor o quociente da Equação 29 e, sendo o mesmo subtraído da unidade, maior o valor da subtração e, conseqüentemente, de F_{Sd} . O valor de $l_{b,nec}$, entretanto, é inversamente proporcional

ao valor de f_{ck} (e, por conseguinte, f_{bd}). Assim, conforme se eleva o valor de f_{ck} na variação paramétrica, decresce o de F_{Sd} , do qual depende a área de aço da seção dos grampos:

$$A_s = F_{Sd} / f_{yd} \quad (32)$$

O comprimento de ancoragem dos grampos é dado por l_b . Sendo o mesmo inversamente proporcional ao valor de f_{ck} , sua redução conforme prossegue a variação paramétrica amplia o efeito de decréscimo no consumo de aço dos grampos proveniente da redução de A_s . Essa tendência de queda pode ser observada na Tabela 5, assim como nos Gráficos 19 ao 24. Também se nota que, conforme prossegue a variação paramétrica, os grampos tornam-se desnecessários. A razão disso é que, aumentando o valor de f_{ck} , decresce o de $l_{b,nec}$ até que o mesmo tornar-se menor que $l_{b,disp}$ e o quociente na Equação 29 igual a 1 e, portanto, F_{Sd} nula (se o quociente ultrapassar 1, F_{Sd} continuará sendo considerada igual a zero, pois um valor negativo significa, para os propósitos deste trabalho, que não há força que não esteja ancorada nos apoios).

6.2.4.3 Armadura de Pele

Esta armadura, necessária quando a altura da seção transversal é igual ou superior a 60 centímetros, tem sua área de aço por face da viga assim determinada:

$$A_{S,pele} = 0,1\% A_c \quad (32)$$

Portanto, quanto maior a altura da seção transversal, maior o valor da Armadura de Pele, que é independente do valor de f_{ck} (seu valor mantém-se inalterado nos Gráficos 19 ao 21).

6.2.4.4 Armadura Negativa nos Apoios Extremos

Esta armadura existe com fins meramente construtivos, sendo a área da seção de suas barras correspondente à 25% daquele referente à seção crítica dos vãos e seu comprimento total dependente de l_b . Assim, quando efetuada a variação paramétrica, o consumo da Armadura Negativa nos Apoios Extremos decresce conforme aumenta o valor de f_{ck} , pois l_b lhe é inversamente proporcional (Gráficos 19 ao 21). O contrário acontece quando se eleva a altura da seção transversal, isto é,

crece o consumo de aço da armadura em questão, pois também cresce o consumo de aço da Armadura Longitudinal nos Vãos.

6.2.5 Sobreposição do consumo de aço das Armaduras Longitudinais (Principais e Secundárias) e Transversal

Conhecendo o comportamento do consumo de aço para cada armadura quando da variação paramétrica, é possível entender as peculiaridades das curvas de consumo total de aço para cada análise ao serem sobrepostos tais comportamentos. Para tanto, a Tabela 6, abaixo, reúne os consumos por armadura e o total:

Tabela 6 – Resultante do consumo de aço combinado de todas as armaduras dimensionadas

Seção (cm x cm)	fck (MPa)	Seção tipo	Análise	Vãos (kg)	Ap. Int. (kg)	Trans. (kg)	Grampos (kg)	Pele (kg)	Ap. extr. neg. (kg)	Total (kg)
20 X 50	20	Retangular	Linear	27,0892	17,8630	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189	59,2778
			Linear	22,4957	17,8630	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189	54,6843
			Redist./Plást.	22,4957	15,6538	11,7845	0,6223	0,0000	1,9189	52,4751
	30	Retangular	Linear	26,0106	14,3282	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819	52,9664
			Linear	21,5712	14,3282	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819	48,5270
			Redist./Plást.	21,5712	13,2552	10,1920	0,5537	0,0000	1,8819	47,4540
	40	Retangular	Linear	25,4714	12,5609	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819	51,0616
			Linear	21,0319	12,5609	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819	46,6222
			Redist./Plást.	21,1090	12,1822	11,1475	0,0000	0,0000	1,8819	46,3205
20 X 60	20	Retangular	Linear	26,3958	15,9062	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957	64,9176
			Linear	21,8794	15,9062	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957	60,4011
			Redist./Plást.	21,8794	9,6300	10,6575	0,6223	7,8400	3,4957	54,1249
	30	Retangular	Linear	25,6254	13,3814	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298	61,3691
			Linear	21,1860	13,3814	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298	56,9297
			Redist./Plást.	21,1860	8,2433	11,3925	0,0000	7,8400	3,1298	51,7915
	40	Retangular	Linear	25,1632	12,3084	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298	61,6713
			Linear	20,7238	12,3084	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298	57,2319
			Redist./Plást.	20,7238	7,4729	13,2300	0,0000	7,8400	3,1298	52,3964
20 X 70	20	Retangular	Linear	16,8811	14,8332	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883	57,4869
			Linear	14,0676	14,8332	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883	54,6734
			Redist./Plást.	14,0676	9,0522	11,6620	0,6223	9,8000	3,6883	48,8924
	30	Retangular	Linear	16,3382	8,6670	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224	51,1762
			Linear	13,5740	8,6670	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224	48,4121
			Redist./Plást.	13,5740	7,8966	12,4950	0,5537	9,8000	3,3224	47,6417
	40	Retangular	Linear	16,0420	7,8196	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224	51,5614
			Linear	13,2778	7,8196	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224	48,7973
			Redist./Plást.	13,2778	7,3573	14,5775	0,0000	9,8000	3,3224	48,3350

Fonte: Autoria própria

A Tabela 6 torna explícito que, fixada uma altura para a seção transversal e um valor de f_{ck} , ocorre um decréscimo no consumo de aço da Análise Linear em Seção Retangular, passando pela Análise Linear em Seção T e culminando no menor valor com a Análise Linear com Redistribuição em Seção T. Nos vãos, o

consumo é maior para a Análise Linear em Seção Retangular que para as demais análises, sendo idêntico para as últimas duas. No entanto, acrescentando o consumo proveniente do apoio intermediário, percebe-se que o mesmo é idêntico para as duas primeiras análises, decrescendo com a Análise Linear com Redistribuição em Seção T. Em virtude de o consumo das demais armaduras ser invariável para as três análises, quando se fixa h e f_{ck} , ao considerá-lo apenas se obtém o consumo total. A causa da queda no consumo, quando se considera as três análises na ordem anteriormente mencionada, se origina apenas na sobreposição do comportamento de consumo dos vãos ao do apoio intermediário.

Outra conclusão extraída da Tabela 6 e comprovada nos Gráficos 1 ao 3 é a de que, embora haja incremento no consumo de aço da Armadura Transversal conforme se eleva o valor de f_{ck} , isso não é suficiente para contrabalançar a queda no consumo das demais armaduras, resultando assim no decréscimo do consumo total. No entanto, o crescimento do consumo pela Armadura Transversal, assim como a estabilização do mesmo para a Armadura Negativa nos Apoios Extremos quando se eleva o valor de f_{ck} de 30 para 40 MPa, ameniza a queda no consumo, chegando até mesmo a inverter essa tendência para as seções de 60 e 70 centímetros (ver Gráficos 1 ao 3).

Por fim, nos Gráficos 4 ao 6 se observa que, elevando a altura da seção de 50 para 60 centímetros, ocorre um acréscimo no consumo total de aço. No entanto, prosseguir com o aumento da altura de 60 para 70 centímetros acarreta numa queda no consumo total. Isso se deve ao fato, que pode ser averiguado na Tabela 6, de que, ao ser atingida a altura de 60 centímetros, torna-se necessário o uso de Armadura de Pele. Além disso, cresce a demanda de Armadura Negativa nos Apoios Extremos. Assim, ainda que haja uma queda no consumo das demais armaduras, o incremento devido às duas citadas anteriormente eleva o consumo total de aço. A medida que prossegue o aumento da altura da seção de 60 para 70 centímetros, no entanto, ocorre uma queda no consumo total de aço, que se deve ao fato de, como pode ser visto na Tabela 6, o incremento na demanda de aço das Armaduras de Pele e Negativa nos Apoios Extremos ser menor que a queda apresentada pelas demais armaduras, resultando numa queda global do consumo de aço.

6.2.6 Desempenho das diferentes análises

De acordo com o exposto nos itens 6.2.1 ao 6.2.5, nota-se a vantagem do uso da seção T, sendo que apenas o fato de alterar-se o formato da seção nos vãos de retangular para T é suficiente para acarretar em ligeira diminuição no consumo total de aço. Ao associar-se o uso da seção T com a máxima redistribuição permitida do momento fletor sobre o apoio intermediário obtém-se uma amplificação dessa redução no consumo total de aço: algumas combinações dentro da variação paramétrica apresentaram queda superior a 15% no consumo total, como pode ser observado na Tabela 7 e nos Gráficos 25 ao 30. As flutuações nas curvas dos referidos gráficos, que representam a redução percentual no consumo total de aço das demais análises quando comparadas à Análise Linear em Seção Retangular, são apenas um reflexo das já percorridas peculiaridades do consumo total de cada análise quando efetuada a variação paramétrica.

Tabela 7 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço quando efetuadas as demais análises

Seção (cm x cm)	Valor de fck (MPa)	Tipo de seção	Tipo de análise	Redução percentual do consumo de aço (%)
20 X 50	20	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-7,7491
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-11,4760
	30	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-8,3816
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-10,4075
	40	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-8,6943
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-9,2851
20 X 60	20	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-6,9572
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-16,6253
	30	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-7,2340
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-15,6065
	40	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-7,1985
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-15,0393
20 X 70	20	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-4,8942
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-14,9504
	30	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-5,4013
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-6,9066
	40	Retangular	Análise Linear	0,0000
		T	Análise Linear	-5,3609
			L. com Redistribuição/Plástica $\delta = 0,75$	-6,2574

Fonte: Autoria própria

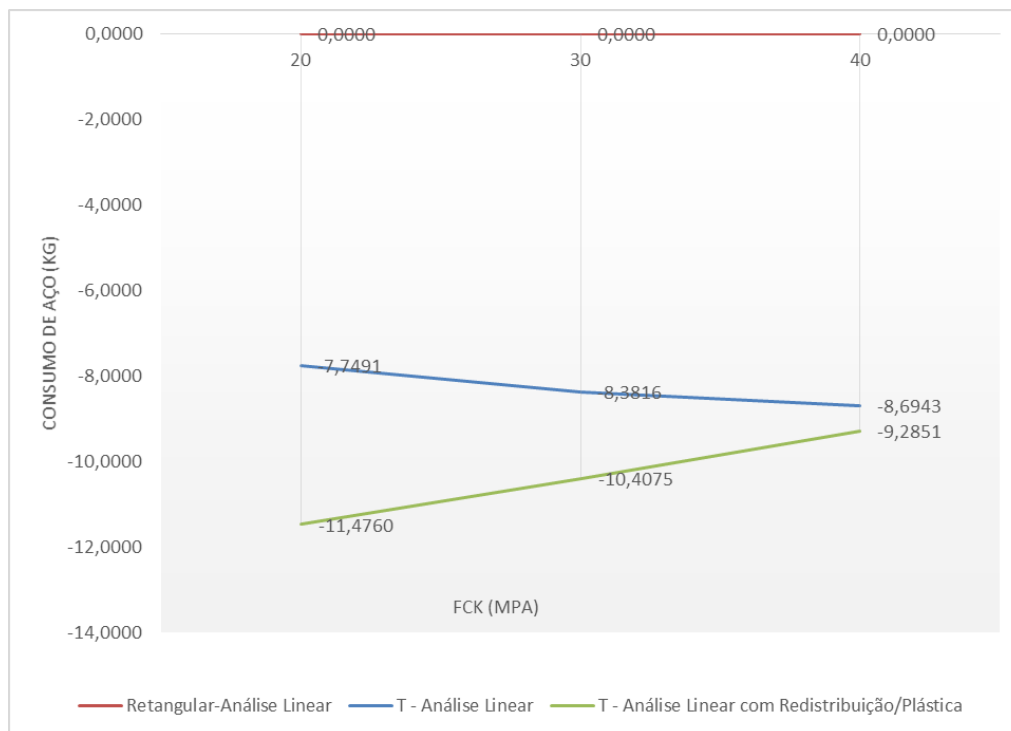


Gráfico 25 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 50 cm

Fonte: Autoria própria

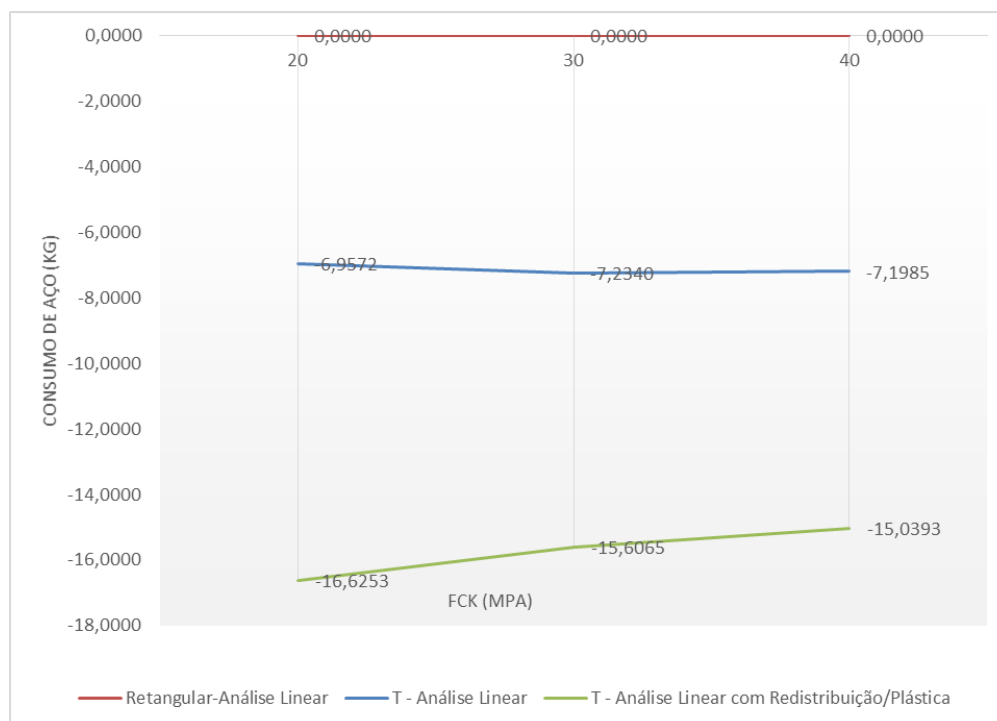


Gráfico 26 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 60 cm

Fonte: Autoria própria

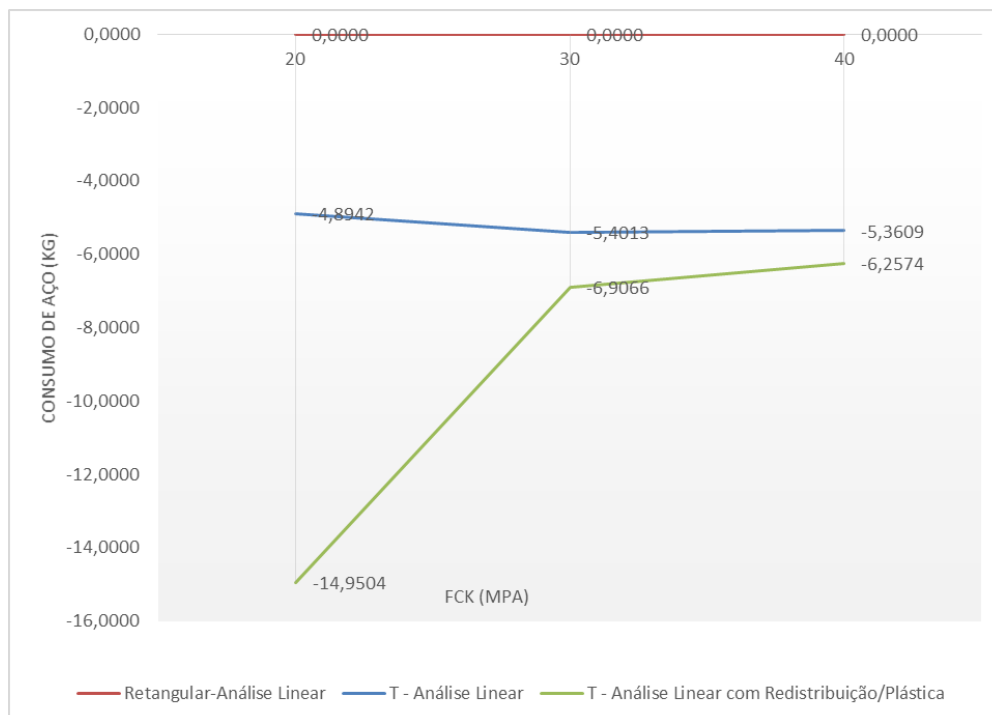


Gráfico 27 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica em seção 20 x 70 cm

Fonte: Autoria própria

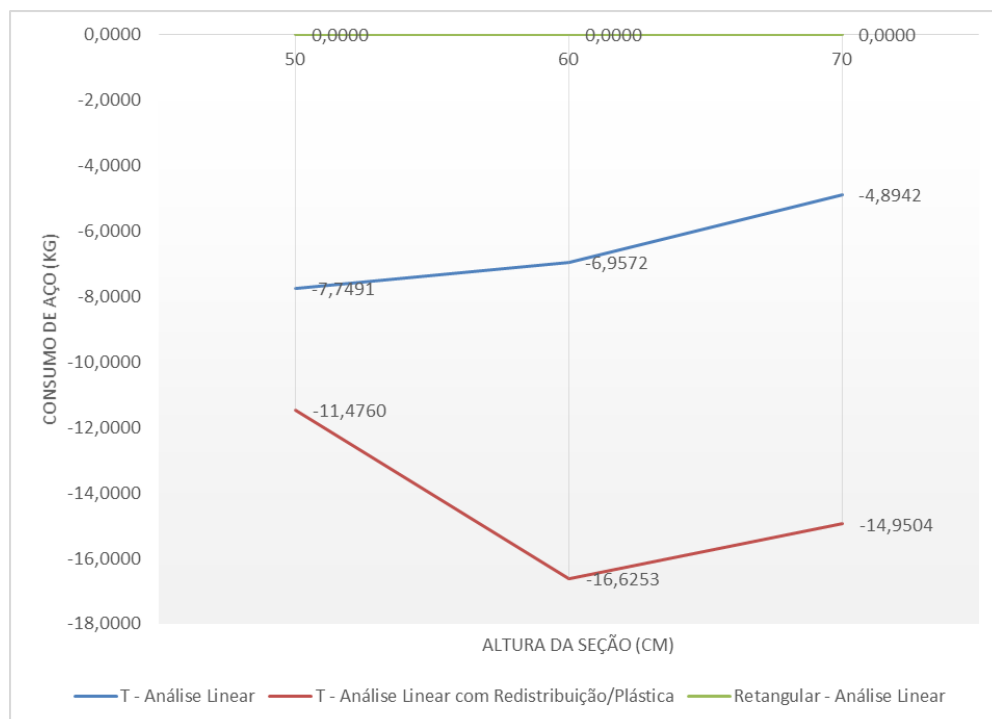


Gráfico 28 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 20 MPa

Fonte: Autoria própria

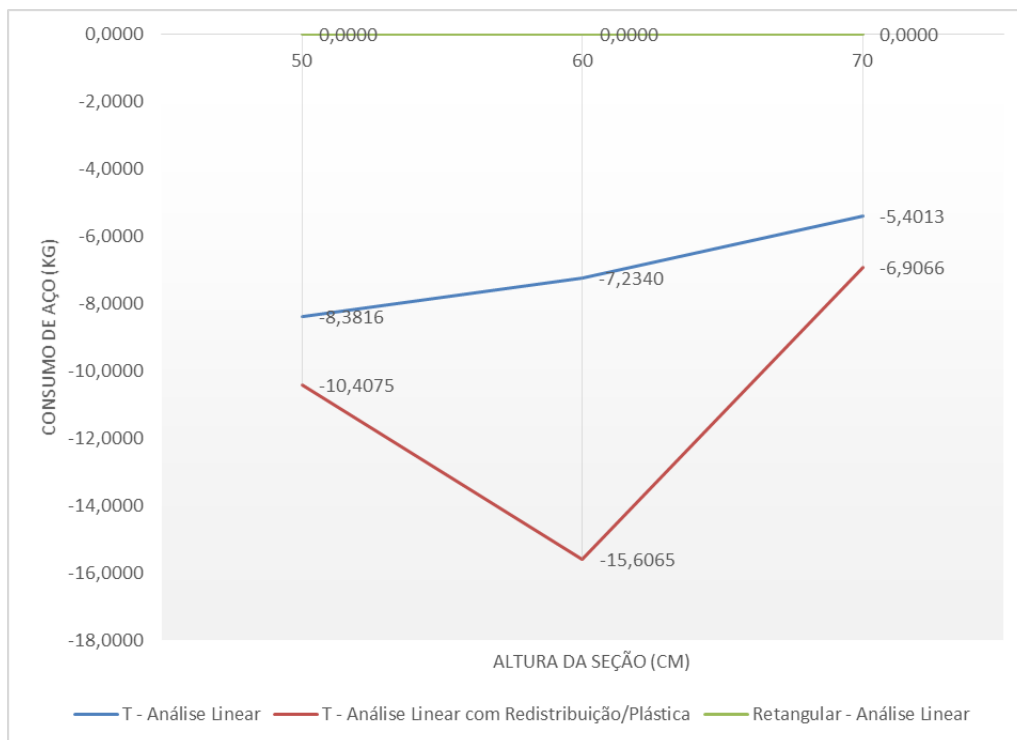


Gráfico 29 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 30 MPa

Fonte: Autoria própria

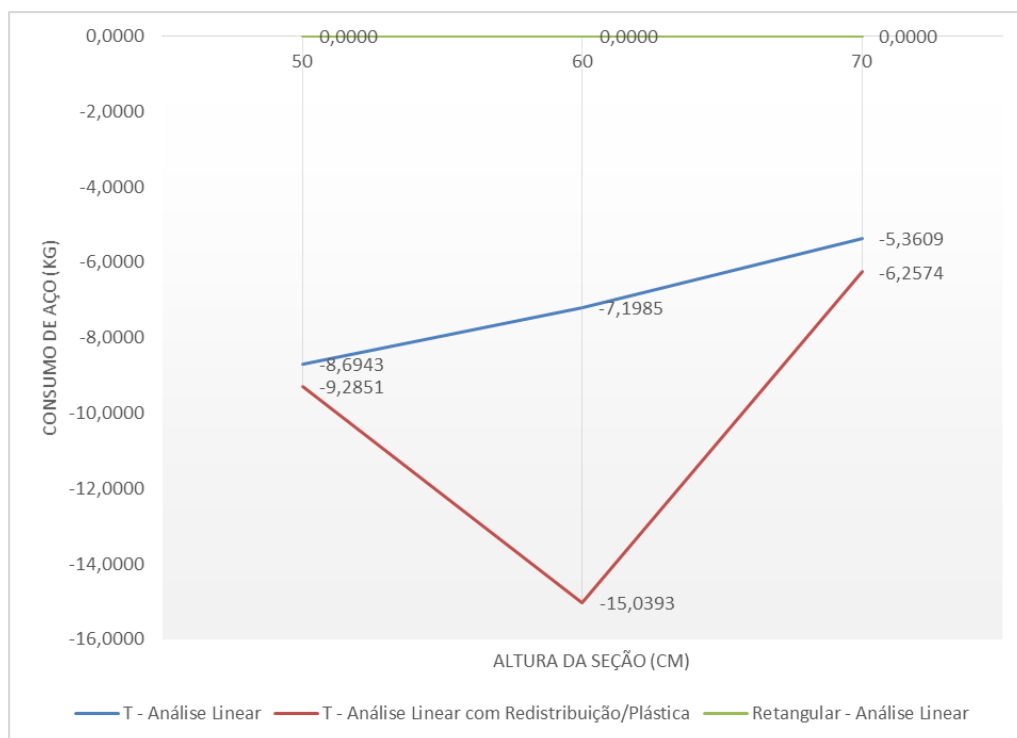


Gráfico 30 – Redução percentual em relação à Análise Linear em Seção Retangular do consumo total de aço nas demais análises quando efetuada a variação paramétrica fixando o f_{ck} em 40 MPa

Fonte: Autoria própria

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo pode ser dividido em duas partes. Na primeira, efetuou-se uma comparação entre o consumo total de aço de uma viga contínua quando a mesma é dimensionada ora segundo as prescrições da NBR 6118:2003 ora de acordo com aquelas da NBR 6118:2014. Quanto à segunda parte, consistiu na realização de variação paramétrica no dimensionamento de uma viga contínua, conforme as determinações da NBR 6118:2014, para diferentes análises e determinado para cada uma delas o consumo de aço em cada combinação dos parâmetros f_{ck} e altura da seção transversal.

Dado o que foi exposto no item 6.1, nota-se que não houve diferença no consumo de aço quando aplicadas a versões em questão da referida norma. Isso se deve ao fato de que só existe diferença no roteiro de dimensionamento de modo a afetar o consumo de aço quando utilizados valores de f_{ck} superiores ao adotado neste estudo. Mais precisamente, para valores de f_{ck} acima de 35 MPa, há alterações nas equações determinantes para o consumo de aço que, possivelmente, se adotados valores superiores a esse limite, acarretariam em diferença no consumo final de aço. Sugere-se, assim, que outro estudo seja feito englobando valores de f_{ck} superiores a 35 MPa de modo a se efetuar um comparativo com valores inferiores a este limite através da determinação do consumo total de aço.

Quanto aos demais resultados, relativos a variação paramétrica, tornam evidente o benefício financeiro de utilizar-se a Análise Linear com Redistribuição em Seção T quando do dimensionamento de vigas contínuas. A utilização dessa análise não implica por si só em qualquer prejuízo à segurança da estrutura, contanto que a mesma seja aprovada em todas as verificações de Estado Limite de Utilização (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), além das demais medidas restritivas presentes no roteiro de cálculo prescrito. Portanto, conclui-se a vantagem da utilização dessa análise em relação às demais.

Por fim, sugere-se que, havendo interesse em dar prosseguimento a este estudo, adote-se um método iterativo, que possibilite a convergência mais eficiente das dimensões e carregamento da viga para que então se efetue a variação paramétrica. Além disso, realizar o orçamento da viga em questão para que se

avale o impacto financeiro da variação paramétrica aplicada nas análises abordadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2003. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

BRANCO, A. L. L. V. (2002). *Análise não-linear de pórticos planos, considerando os efeitos do cisalhamento no cálculo de esforços e deslocamentos*. Dissertação (Mestrado). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BUCHAIM, R. (2001). *A influência da não-linearidade física do concreto armado na rigidez à flexão e na capacidade de rotação plástica*. Tese (Doutorado). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo.

BUCHAIM, R.(2006). *Análise elástica com redistribuição limitada de solicitações. Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação da NB-1 NBR 6118:2003 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. São Paulo, Ibracon. 2006.

Comité Euro-International Du Béton. *CEB-FIP Model Code 1990*. Published by Thomas Telford, London, 1993.

CORELHANO, A. G. B. (2010). *Análise não linear geométrica e física de núcleos rígidos de edifícios altos em concreto armado*. Dissertação (Mestrado). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CORRÊA, M. R. S. (1991). *Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios*. Tese (Doutorado). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, R. S. (1997). *Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado*. Dissertação (Mestrado). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FONTES,F.F. (2005). *Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003*. Dissertação (Mestrado). São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

FONTES,F.F; PINHEIRO,L.M. (2005). *Análise linear com redistribuição e análise plástica de vigas de edifícios*. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47, Recife. Anais.

LEONHARDT,F. (1981). *Construções de concreto, volume 4: verificação da capacidade de utilização*. Rio de Janeiro, Interciência.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BOTELHO, M.H.C. (1983). *Concreto armado eu te amo*. Uma versão descontraída e altamente didática sobre resistência dos materiais e concreto armado (Cálculo e dimensionamento de estruturas segundo a NB-1/78). São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.

CARVALHO,R.C.;FIGUEIREDO FILHO,J.R. (2012). *Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado segundo a NBR 6118:2003*. São Carlos, EdUFSCar.

LEONHARDT,F.;MÖNNING,E. (1979). *Construções de concreto, volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro, Interciência.