Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2018

Abril de 2018

DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL À FLEXÃO COM TECIDOS E LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO: UM PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

G. R. THOMÉ
Engenheiro Civil
MF Engenharia
Florianópolis/SC; Brasil
gustavorintzelthome@gmail.com

I. SPONHOLZ
Professor Mestre em Engenharia Civil
Universidade do Sul de Santa Catarina
São José/SC; Brasl
ildo.sponholz@unisul.br

RESUMO

O reforço estrutural normalmente não é um tema estudado em quantidade suficiente em sala de aula para engenheiros recém-formados desenvolverem projetos de reforço, todavia é uma área em constante crescimento, haja vista o envelhecimento das estruturas de concretos no Brasil aliado à manutenção deficiente das habitações. Além do aumento da vida útil de uma estrutura, intervenções deste tipo podem ser necessárias quando há falha na execução ou no projeto e casos onde há mudança da utilização da estrutura. Compósitos e tecidos de fibra de carbono apresentam alta resistência mecânica, bom comportamento à fadiga e cargas cíclicas, baixo peso próprio além de grande velocidade na execução. Diante deste cenário este artigo apresenta um procedimento simplificado para o dimensionamento de reforço estrutural à flexão com o uso da fibra de carbono. A simplificação se deve ao fato da quebra no processo de iteração dos cálculos, utilizado nos exemplos da ACI 440 e preconizado pelos autores brasileiros. Através deste método, mais simples e didático, este trabalho procura incentivar o ensino do dimensionamento de reforço em cursos de graduação e também busca a colaborar com o desenvolvimento de uma norma específica para intervenções em estruturas de concreto armado com fibras de carbono no Brasil.
Palavras-chave: Reforço Estrutural. Flexão Normal Simples. Fibra de Carbono

ABSTRACT

Structural strengthening is not usually a subject studied in sufficient quantity at the classroom for newly engineers to develop strengthening projects, but it is an area in constant growth, given the aging of the concrete structures in Brazil together with the poor maintenance of the dwellings. In addition to increasing the useful life of a structure, interventions of this type may be necessary in cases where there is a failure in the execution or design and cases where there is a change in the use of the structure. Carbon fiber composites have high mechanical strength, good fatigue behavior and cyclic loads, low weight and high speed in execution. In view of this scenario this paper presents a simplified procedure for the dimensioning of structural flexural reinforcement with the use of the carbon fiber. The simplification is due to the fact that the process of iteration of calculations, used in the examples of ACI 440 and recommended by the Brazilian authors, is broken. Through this method, simpler and didatc, this work seeks to envourage the teaching of sizing strengthening in undergraduate courses and also seeks to collaborate with the development of a specific standard for interventions in reinforced concrete structures with carbon fibers in Brazil.
Keywords: Structural Strengthening. Flexural Loading. Carbon Fiber.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é largamente utilizado em todos os países do mundo e em todos os tipos de construção graças a suas características positivas como economia, conservação, adaptabilidade etc. (BASTOS, 2006)
É de aceitação geral que tanto nas construções como em suas estruturas, devem-se realizar inspeções periódicas, cujas características e frequências dependem da finalidade, localização e importância da obra. (HUSNI, 2013).
A partir das inspeções pode-se constatar a necessidade de intervenções nas estruturas para torna-las novamente aptas a desempenhar sua função com segurança. O reforço (aumento da capacidade

resistente), é necessário em casos onde haverá um aumento da solicitação, seja este causado pela mudança de utilização ou alteração na concepção estrutural da edificação.

Sistemas compostos estruturados que utilizam fibras carbono apresentam características como: elevada resistência mecânica, grande rijeza, bom comportamento à fadiga e cargas cíclicas, elevada resistência a diversos ataques químicos, etc. (MACHADO, 2015).

Este tipo de solução estrutural, costuma ser mais caro do que reforços feitos com materiais usuais da construção civil, porém em uma análise econômica mais preciosa, onde se leva o tempo de execução em consideração, por exemplo, pode-se considerar a melhor opção dentro do ponto de vista financeiro. Outro ponto atrativo é a pequena área de material aplicado, sendo uma solução ideal para casos onde a arquitura se apresenta como fator limitador.

2. METODOLOGIA

2.1 Dimensionamento com processo de iteração

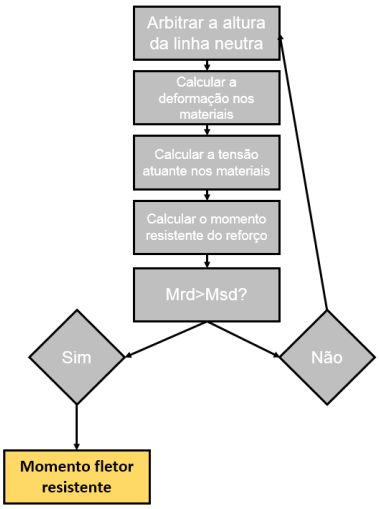
As recomendações de projeto são baseadas nos princípios dos projetos no estado limite último. (MACHADO, 2015).

Admitindo que a viga necessitará de reforço, o procedimento para o dimensionamento é o seguinte:

> 1 - Arbitra se a profundidade da linha neutra (c) em conformidade com o modo de ruptura.
> 2 - Calculam-se as deformações dos diversos materiais admitindo-se a linearidade da variação das mesmas.
> 3 - Conhecidas as deformações calculam-se as tensões atuantes nos diversos materiais.
> 4 - A partir do conhecimento das forças se faz as verificações do equilíbrio das mesmas. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo de cálculo ($Mref.maj.$) o processo está completo.
> O procedimento descrito é iterativo, uma vez que a etapa 1 que determina o resultado final é arbitrada, podendo ou não atender simultaneamente às condições de resistência necessária e economia, devendo ser repetida tantas vezes quanto necessário para a consecução desses objetivos.
> Uma vez concluído o processo iterativo faz-se a verificação da ductilidade do sistema FRP. (MACHADO, 2015, p. 129-130).

O processo descrito pode ser apreciado em forma de fluxograma conforme Figura 1:

Figura 1 – Processo de dimensionamento com iteração



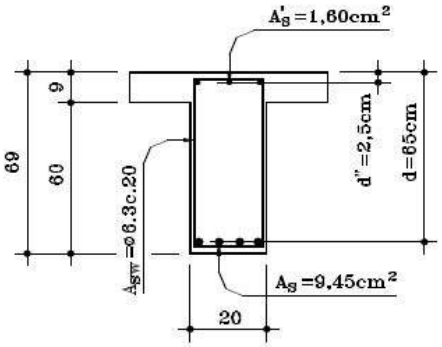
Fonte: Autores.

A fim de demonstrar numericamente o procedimento, apresentar-se-á um exemplo retirado do "Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono" publicado pela Viapol, conforme enunciado:

> Uma viga existente de concreto armado deverá ser reforçada para receber carregamentos majorados que a solicitam com um momento fletor máximo de $Mref$=20,592 $tfxm$. O momento fletor devido ao peso próprio da viga é Mg=2,90 $tfxm$. Deverá ser utilizado para o reforço a fibra de carbono. (VIAPOL).

Sugere ainda considerar concreto com fck = 20 Mpa, aço CA-50, altura útil de 65 centímetros, d' = 4 cm e apresenta a seção:

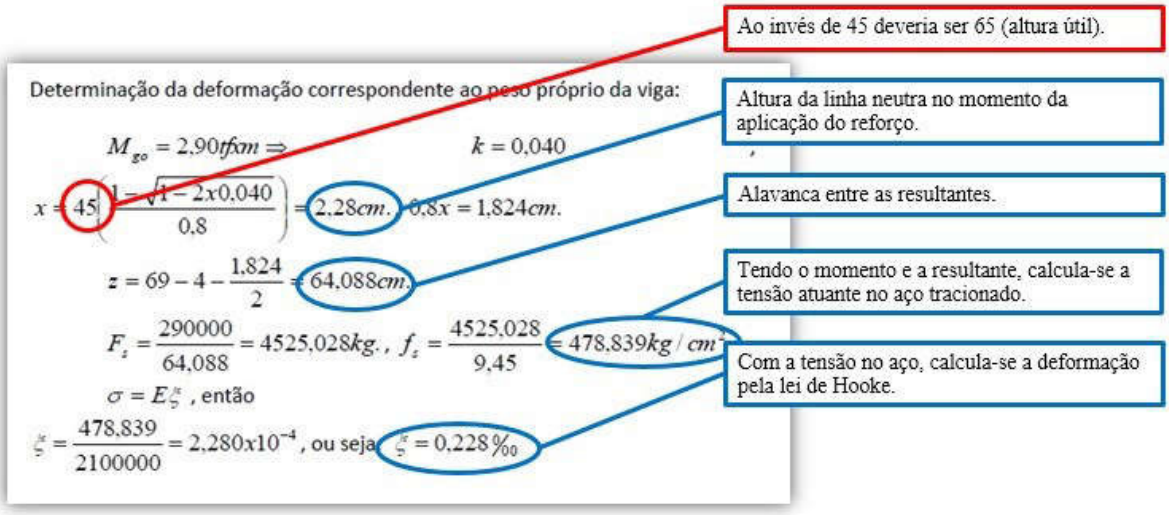
Figura 2 - Seção da viga do Exemplo 4.1 do manual da Viapol



Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono, VIAPOL.

Na sequência de figuras, os autores apresentam a resolução do problema conforme a literatura consultada e adicionam comentários a fim de clarear o raciocínio:

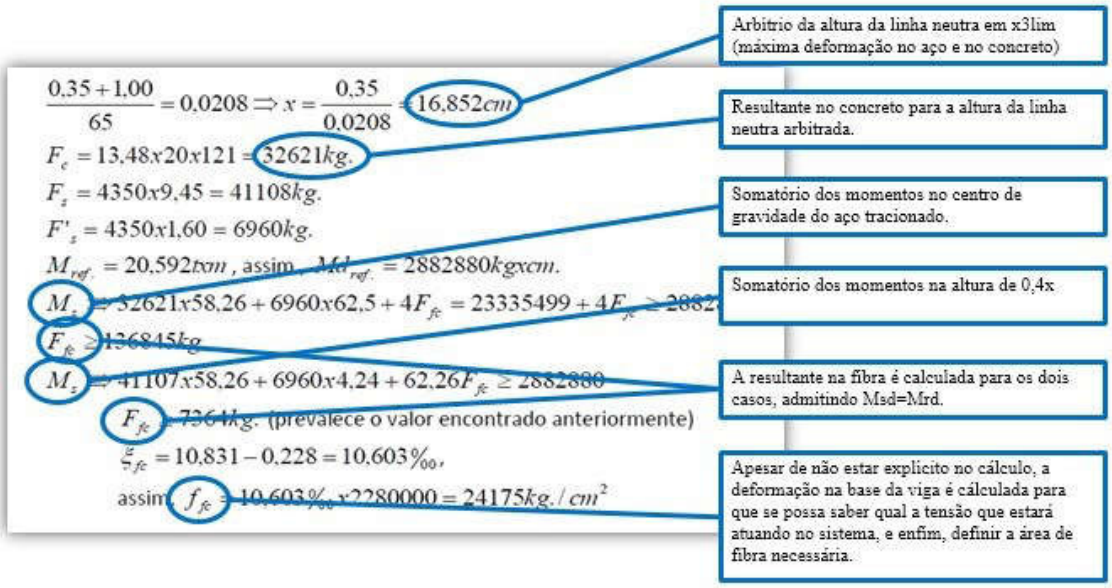
Figura 3 - Determinação da deformação inicial na base da viga



Fonte: Autores, adaptado de Viapol.

Inicialmente calcula-se a deformação inicial na base da viga, que deve ser subtraída da deformação final, a diferença será aplicada na lei de Hooke para definir a tensão atuante na fibra.

Figura 4 - Cálculo da resultante na fibra de carbono

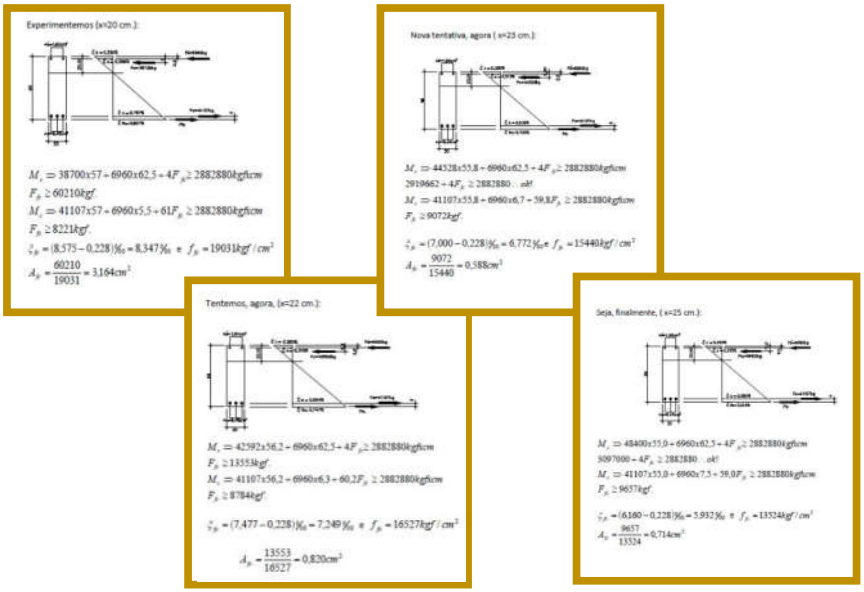


Fonte: Autores, adaptado de Viapol.

Adotando a maior resultante, e dividindo-a pela tensão atuante, encontra-se a área de fibra de carbono igual à 5,661 cm².

Nota-se que a resultante na fibra de carbono foi calculada de modo a igualar Mrd=Msd, mas o somatório das forças resultantes de todosos materiais não é igual a zero, não satisfazendo o equilíbrio das forças. Este método ainda admite valor negativo para a força da fibra, que acontece quando o novo momento solicitante é menor do que o originalmente resistente pela viga. Na Figura 5 outras tentativas são expostas:

Figura 5 - Iteração para a determinação da altura da linha neutra

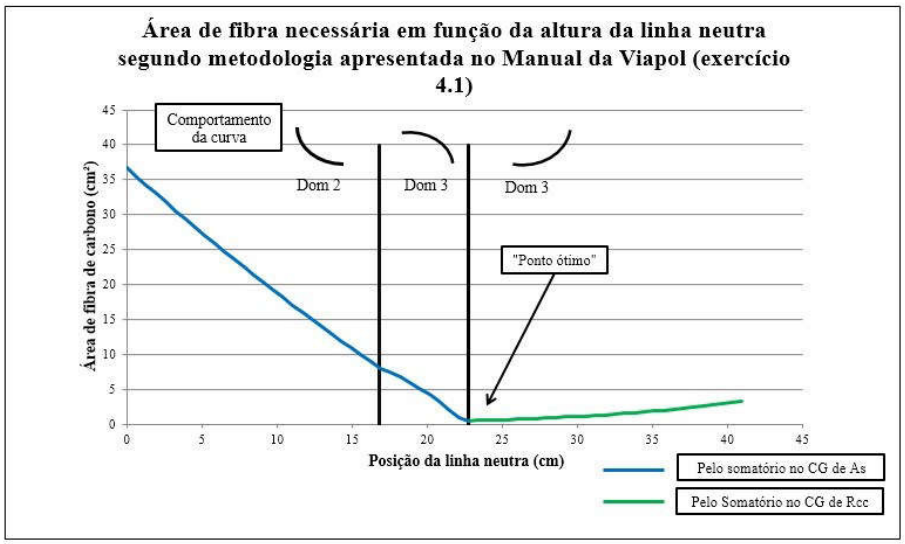


Fonte: Autores, adaptado de Viapol.

A menor área de fibra ocorreu na terceira tentativa, com a altura da linha neutra igual a 23 cm, segundo o manual, este é o “ponto ótimo”, mas em realidade é o local onde a resultante calculada tanto pelo somatório dos momentos no centro de gravidade da armadura como na altura de 0,4x se torna mais próxima, igualando o somatório das resultantes e satisfazendo as condições de equilíbrio.

Para este exercício pode-se comparar o comportamento da resultante na fibra em função da altura da linha neutra e da maneira que ela foi calculada conforme os gráficos das Figuras 6 e 7.

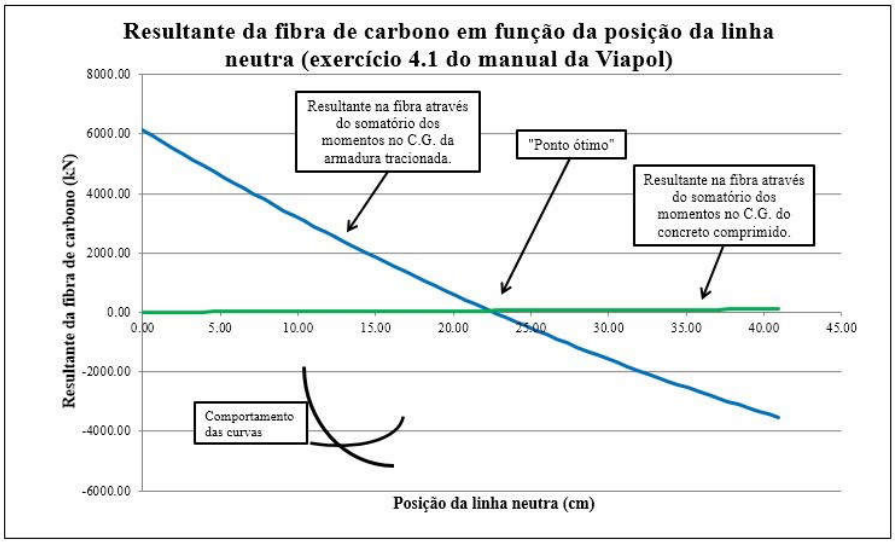
Figura 6 - Área de fibra de carbono em função da altura da linha neutra (exercício 4.1 do manual da Viapol)



Fonte: Autores, adaptado de Viapol.

.

Figura 6 - Resultante na fibra de carbono em função da altura da linha neutra (exercício 4.1 do manual da Viapol)



Fonte: Autores, adaptado de Viapol.

2.2 Dimensionamento com processo simplificado

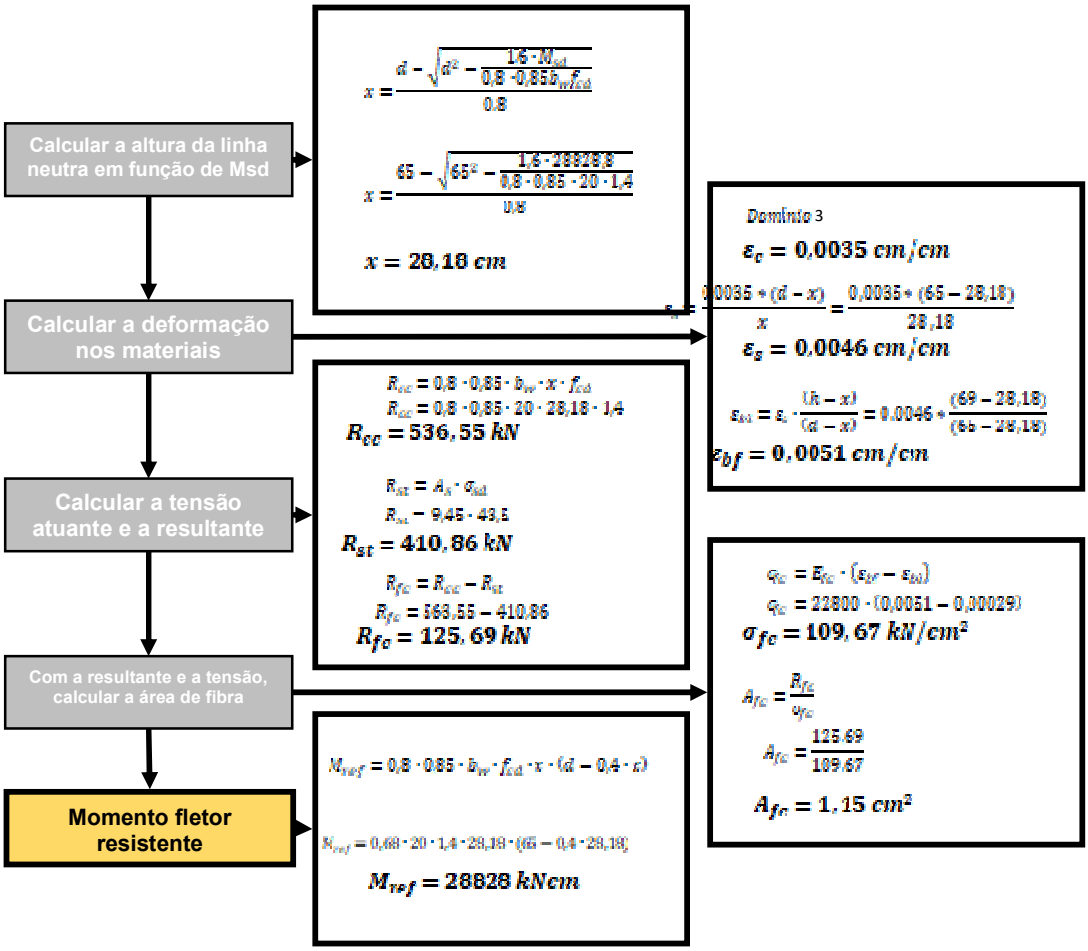
Partindo do pensamento de que não há “ponto ótimo” e sim, o ponto que satisfaz tanto o somatório das forças quanto o dos momentos, entende-se que há apenas uma solução “correta” para o problema, portanto, pode-se encontrar uma maneira de alcançar direto este valor sem a necessidade do exaustivo processo de iteração utilizado tanto nos exemplos da literatura brasileira (Machado (2015), por exemplo), na própria norma americana (ACI 440).

Este processo simplificado, parte das equações teóricas do estudo da flexão normal simples, onde encontra-se a altura da linha neutra não por tentativas, mas em função do momento solicitante de cálculo.

Tendo o momento solicitante, consequentemente tem-se a altura da linha neutra, e observadas as deformações limites, tem-se também a deformação ao longo de toda a altura da viga. (hipótese de Bernoulli).

Admitindo que a resultante da fibra, possui mesmo centro de gravidade da armadura tracionada, pode-se encontrar a resultante necessária na fibra de carbono subtraindo a resultante do concreto pela do aço, e já tendo definida as deformações nos materiais, encontrar pela lei de Hooke a área de fibra necessária para safisfazer tal resultante. A Figura 7 apresenta o fluxograma deste processo e ao mesmo tempo a resolução do mesmo exercício visto anteriormente:

Figura 7 - Processo de cálculo sem iteração



Fonte: Autores

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos são bastante divergentes, mas isso pode ser facilmente explicado: essa diferença é causada principalmente pela desconsideração da armadura de compressão, que fez com que a linha neutra ficasse a uma altura de 28,18 cm ao invés de 23,00 cm. Isso faz com que as resultantes sejam maiores para compensar a diminuição da alavanca do momento. Além desta observação, com a linha neutra "mais para baixo", a deformação na base da viga torna-se menor, portanto a tensão atuante, regida pela lei de Hooke também diminui, sendo necessário uma maior área de fibra de carbono para uma mesma resultante. Outro ponto que explica parte desta diferença é a deformação inicial considerada: no primeiro método considerou-a igual à deformação do aço, sem levar em consideração o aumento da deformação causado pela diferença da distância entre a altura total da viga e a altura útil. Por fim, esta mesma distância foi utilizada para o cálculo da alavanca entre as resultantes da fibra e do concreto, que no segundo caso foi desconsiderado.

De maneira geral, o método proposto é mais conservador do que apresentado na bibliografia, por desconsiderar o pequeno aumento da alavanca entre as resultantes e considerar a armadura de compressão apenas em casos onde a altura da linha neutra tenha de ser limitada em função da ductilidade da viga.

Apesar deste aparente conservadorismo exagerado, cabe o questionamento: se na flexão simples, ao menos na literatura, considera-se no cálculo do momento resistente a armadura de compressão apenas em casos onde a altura da linha neutra teria de ficar acima do limite de 0,45x/d, porque então no procedimento reverso, esta contribuição seria levada em consideração? Para o cálculo do reforço, os autores sugerem considera-la apenas em casos onde a resultante no aço for maior do que a resultante do concreto em x=0,45x/d, assim como no processo de dimensionamento a flexão normal simples.

Além de simplificar o processo, tornando-o mais didático embora mais conservador, foi possível, e até certo ponto fácil, automatiza-lo em planilha eletrônica desenvolvida em ambiente Excel. Apesar de não ser o objetivo deste trabalho, os autores apresentam neste capítulo, parte do relatório de cálculo gerado pela ferramenta desenvolvida, onde podem ser vistas todas as equações utilizadas para o dimensionamento do reforço e o passo a passo mais detalhado do que apresentado em 2.2:

Figura 8 – Relatório de cálculo parcial (parte 1)

Equação 20: Máximo momento resistente de cálculo da seção (kN*cm):

CASO 1	$M_{ref-máx} = 0{,}8 * 0{,}85 * B_w * f_{cd} * x_{máx} * (d - 0{,}4 * x_{máx}) + A'_s * \sigma' * (d - d')$
CASO 2	$M_{ref-máx} = 0{,}8 * 0{,}85 * B_f * f_{cd} * x_{máx} * (d - 0{,}4 * x_{máx}) + A'_s * \sigma' * (d - d')$
CASO 3	$M_{ref-máx} = 0{,}8 * 0{,}85 * B_w * f_{cd} * x_{máx} * (d - 0{,}4 * x_{máx}) + (B_f - B_w) * h_f * 0{,}85 * f_{cd} * (d - 0{,}5 * h_f) + A'_s * \sigma' * (d - d')$

0.8 * 0.85 * 20 * 1.42 * 40.19 * (63.96 - 0.4 * 40.19) + 0 * 43.5 * (63.96 - 4.13) = 37390.78 kN*cm

Equação 21: Altura da linha neutra no momento da aplicação do reforço (cm):

CASO 1	CASO 2	CASO 3
$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{1{,}6 * M_{sd}}{0{,}8 * 0{,}85 * B_w * f_{cd}}}}{0{,}8}$	$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{1{,}6 * M_{sd}}{0{,}8 * 0{,}85 * B_f * f_{cd}}}}{0{,}8}$	$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - 1{,}6 * \left[\frac{M_{sd} - (B_f - B_w) * h_f * 0{,}85 * f_{cd} * (d - 0{,}5 * h_f)}{0{,}8 * 0{,}85 * B_w * f_{cd}}\right]}}{0{,}8}$

(63.96 - (63.96 * 63.96 - ((1.6 * 2900.8) / (0.8 * 0.85 * 20 * 1.42))) ^ 0.5) / 0.8 = 2.36 cm

Fonte: Autores

Figura 9 – Relatório de cálculo parcial (parte 2)

Equação 22: Resultante no concreto no momento da aplicação do reforço (kN):

CASO 1	$R_{cc} = 0,8 * 0,85 * B_w * x * f_{cd}$
CASO 2	$R_{cc} = 0,8 * 0,85 * B_f * x * f_{cd}$
CASO 3	$R_{cc} = (B_f - B_w) * h_f * 0,85 * f_{cd} + 0,8 * 0,85 * B_w * x * f_{cd}$

0,8 * 0,85 * 20 * 2.36 * 1.4285 = 46.03 kN

Equação 23: Deformação no aço tracionado no momento de aplicação do reforço (cm/cm):

$\varepsilon_s = \frac{R_{cc}}{A_s * E_s}$	46.03 / (9.55 * 21000) = 0.00023 cm/cm

Equação 24: Deformação na base da viga na aplicação do reforço (cm/cm):

$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_s * \frac{(h - x)}{(d - x)}$	0.00023 * (69 - 2.36) / (63.96 - 2.36) = 0.00025 cm/cm

Equação 25: Necessita reforço (ABNT NBR 6118:2014)?:

$(Eq.25) = se(M_{rd(antes)} \geq M_{sd(novo)}; NÃO; SIM)$	se (23008.18 maior ou igual a 28828.8; "NÃO" ; "SIM") = SIM

Equação 26: Reforço atende à ductibilidade estabelecida (0,45/x3lim x/d)?:

$(Eq.26) = se((Eq.20) \geq M_{sd(novo)}; SIM; NÃO)$	se (37390.78 maior ou igual a 28828.8; "SIM" ; "NÃO") = SIM

Equação 27 Nova combinação de solicitação atende ao critério ACI 440?:

$(Eq.27) = se(M_{sd(antes)} \geq (1,2 * permanentes + 0,8 * acidentais); SIM; NÃO)$	se (23008.18 maior ou igual a (1.2 * 10296 + 0.8 * 10296); "SIM" ; "NÃO") = SIM

Equação 28. Mínima altura da linha neutra para a nova solicitação (cm).

CASO 1	CASO 2	CASO 3
$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{1,6 * M_{sd}}{0,8 * 0,85 * B_w * f_{cd}}}}{0,8}$	$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{1,6 * M_{sd}}{0,8 * 0,85 * B_f * f_{cd}}}}{0,8}$	$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - 1,6 * \left[\frac{M_{sd} - (B_f - B_w) * h_f * 0,85 * f_{cd} * (d - 0,5 * h_f)}{0,8 * 0,85 * B_w * f_{cd}}\right]}}{0,8}$

(63.96 - (63.96 * 63.96 -((1.6 * 28828.8) / (0.8 * 0.85 * 20 * 1.41))) ^ 0.5) / 0.8 = 28.15 cm

Equação 29: Armadura de compressão passa a ser considerada?:

$(Eq.29) = se(M_{rd(cc)} \geq M_{sd}; NÃO; SIM)$	se (37390.78 maior ou igual a 28828.8; "NÃO" ; "SIM") =NÃO

Md(cc) = Momento resistente proporcionado pelo concreto comprimido (kN*cm)

Equação 30: Máxima tensão de cálculo da armadura de compressão (kN/cm²):

$\sigma'_{sd} = \frac{\varepsilon'_s * E_s}{\gamma_s} \leq f'_{yd}$	(0.00314 * 21000) / 1.15 menor ou igual a 43.47 portanto, (Eq. 30) = 43.47 kN/cm²

Equação 31: Tensão considerada na armadura de compressão (kN/cm²):

$\sigma'_{sd} = \frac{(M_{sd} - M_{rd(cc)}) * A'_s}{d - d'}$	((28828.8 - 37390.78) * (0)) / (63.96 - 4.13) = -

Fonte: Autores

Figura 10 – Relatório de cálculo parcial (parte 3)

Equação 32: Deformação na base da viga após o reforço (cm/cm):

$\varepsilon_{bf} = \varepsilon_s + \frac{(h-x)}{(d-x)}$	((69 - 28.15) / (63.96 - 28.15)) * 0.00445 = 0.00507 cm/cm

Equação 33: Tensão de cálculo atuante na fibra de carbono (kN/cm²):

$\sigma_{fc} = C_e * \phi * E_{fc} * (\varepsilon_{bf} - \varepsilon_{bi}) \leq C_e * \phi * \sigma_{fu}$	0.95 * 1 * 24000 * (0.00507 - 0.00025) menor ou igual a 0.95 * 1 * 300, portanto (Eq. 33) = 109.89 kN/cm²

Equação 34: Mínima resultante na fibra de carbono (kN):

$R_{fc} = R_{cc} + A'_s * \sigma'_{sd} - A_s * \varepsilon_{sd}$	547.06 + (0 * -) - 9.55 * 43.47 = 131.84 kN

Equação 35: Mínima área necessária de fibra de carbono (cm²):

$A_{fc} = \frac{R_{fc}}{\sigma_{fc}}$	131.84 / 109.89 = 1.2 cm²

Equação 36: Domínio:

(Eq. 36) = se((Eq. 28) ≤ x_{2lim}; DOM 2; DOM 3)	se (28.15 menor ou igual a 16.58 ; "DOM 2" ; "DOM 3") = DOM 3

Equação 37: Verificação da deformação máxima da fibra:

se((Eq. 32) ≤ $\left(0{,}45\sqrt{\frac{f_{cd}}{n * E_f * t_f}} \leq 0{,}9 * \varepsilon_{fu}\right)$; SIM; NÃO)	se (0.00507 menor ou igual a ((0.41 * ((20 / (1 * 240000 * 1)) <= (0.9 * 0.019)); "SIM" ; "NÃO") = NÃO

Fonte: Autores

Nas figuras 8, 9 e 10, parte do relatório gerado pela ferramenta desenvolvida pode ser visto, na versão original outros dados são incluídos, como os dados de entrada (neste caso foi o exemplo 4.1 do Manual da Viapol) e alguns parâmetros de otimização.

As equações são enumeradas de 20 a 37 pois as de 1 a 19 se referem exclusivamente a parte do concreto armado, que não é o objetivo principal deste artigo. Para um entendimento mais amplo, sugere-se a leitura de Thomé (2017). A área de fibra de carbono encontrada foi de 1,2 cm² (Equação 35 da Figura 10), diferente de 1,15 cm² conforme apresentado em 2.2, diferença causada por arredondamentos.

4. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foi possível entender um pouco melhor sobre o dimensionamento de reforço à flexão normal simples com o uso de fibra de carbono. Analisando o processo preconizado pela literatura, pôde-se desenvolver um método híbrido simplificado de dimensionamento, onde se mesclam as equações contidas na ACI 440 e na NBR 6118.

A simplificação exposta neste artigo, assim como de costume em simplificações de cálculo, torna o dimensionamento mais conservador, pois desconsidera pequenos ganhos de resistência na seção da viga da mesma maneira como é desconsiderado no processo clássico de dimensionamento à flexão normal simples do concreto armado.

Este processo, por ser mais simples, torna-se mais didático, o que se considera de grande valia em um cenário onde aparentemente o dimensionamento é feito exclusivamente por *softwares* robustos e/ou com forte cunho comercial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos membros da banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso de Gustavo R. Thomé, orientado pelo Professor Ildo Sponholz, Msc, que originou este artigo, são eles:

Eng. Civil Marcelo Cechinel, Esp. Universidade do Sul de Santa Catarina e ArCec Engenharia.
Eng. Civil e Sanitarista Marco Antônio Teixeira Lomba, Esp. Caixa Econômica Federal.
Eng. Civil Fabrícrio Martins, Esp. GeoEnergy Engenharia.

Agradecem ainda a SC Pisos, ao Eng. De Produção Civil Márcio França, da MF Engenharia e ao Profº Dr. Daniel Ecco do Instituto Federal Catarinense.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE**. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures** (ACI 440.2R). Farmington Hills, 2008.

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

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado.** Notas de aula da disciplina de Estruturas de concreto I. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006. 92p.

HUSNI, R. Reparacíon y refuerzo. **Boletín Técnico 02.** Merida: ALCONPAT Internacional, 2013. Disponível em < http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/bol2_capa.pdf>. Acesso em: 07 jun 2017.

MACHADO, A. de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP teoria e prática.** São Paulo: PINI, 2015.

THOMÉ, G. R. **Reforço estrutural à flexão com fibras de carbono:** automatização do modelo de cálculo de dimensionamento . 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Sul de Santa Catarina, PALHOÇA, 2017.

VIAPOL**. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** Disponível em < http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 19 maio 2017.