

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA A DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO

LEANDRO CANDIDO DE LEMOS PINHEIRO¹, MAURO DE VASCONCELLOS REAL²

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de cálculo simplificado para a determinação da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC). Inicialmente definiu-se um modelo de viga com armaduras superior e inferior e com uma ou mais camadas de reforço coladas na face inferior da viga. A seguir determinaram-se as expressões para o cálculo das tensões que cada material que compõe a viga pode absorver. A partir destas expressões determinaram-se as equações que regem a posição da linha neutra nos Estádios I e II, a curvatura e o momento fletor de fissuração do concreto e a curvatura e o momento fletor de escoamento do aço. A seguir, através de um processo iterativo, determinaram-se as expressões que regem a posição da linha neutra, a curvatura e o momento fletor último da viga. Com os resultados obtidos a partir das expressões citadas anteriormente, foi possível determinar os deslocamentos verticais da viga para diferentes carregamentos. Para finalizar, a validação do modelo de cálculo simplificado foi conseguida a partir de uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e resultados, teóricos e experimentais, obtidos por outros autores.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estrutural. PRFC. Vigas de concreto armado. Reforço estrutural.

SIMPLIFIED METHOD FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF CONCRETE BEAMS REINFORCED POLYMERS REINFORCED WITH CARBON FIBER

ABSTRACT

The objective of this work is to propose a simplified method for determining the bearing capacity of reinforced concrete beams strengthened with polymers reinforced with carbon fiber (CFRP). Initially, it was established a model for a beam with upper and lower steel and one or more CFRP layers bonded to the lower face of the beam. Expressions were deduced for the determination of the stresses that each material that composes the beam can absorb. From these expressions were determined equations governing the position of the neutral line in Stadiums I and II, the curvature and the bending moment corresponding to the initial concrete cracking and bending moment and curvature corresponding to the tension steel reinforcement yielding. Then, via an iterative process, we determined the expression governing the position of the neutral axis, the ultimate bending moment and curvature of the beam. With the results obtained from the expressions mentioned above, it was possible to determine the vertical displacements of the beam for different loads. Finally, the validation of

¹ Mestrando em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Email: leandro_lemos_pinheiro@yahoo.com.br

² Professor Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Email: mauroreal@furg.br

the simplified method was achieved through a comparison between the results obtained in this study and results, theoretical and experimental, obtained by other authors.

KEYWORDS: CFRP. Reinforced concrete beams. Structural analysis. Structural strengthening.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil tem atualmente um papel de destaque na economia brasileira. Isto se justifica pelo fato de que, conforme progride a tecnologia, a demanda pela infraestrutura cresce. O crescimento da engenharia como um todo, e sua consequente valorização, fez com que fosse necessária uma maior atenção por parte das pessoas envolvidas diretamente com o tema, buscando novos métodos construtivos, materiais alternativos e tudo que tornasse a construção mais eficiente em relação a tempo, custo e qualidade.

Em relação a materiais, o concreto é, sem dúvidas, um dos materiais estruturais mais importantes da engenharia. Quando combinado com o aço, resultando no concreto armado, este material é seguramente um dos mais utilizados em construções atualmente. Por ter tamanha importância, o concreto vem sendo exaustivamente estudado, assim como alternativas ao seu uso e até possíveis melhorias em estruturas construídas a partir dele. Um fator importante de ser abordado sobre o concreto armado é sua utilização em ambientes agressivos. A qualidade do concreto depende de vários fatores, sendo os principais a qualidade dos materiais que o compõe e a relação água/cimento. Um concreto de má qualidade, ou seja, materiais de baixa qualidade ou alta relação água /cimento, tende a apresentar maior fissuração. Levando em consideração que o aço é suscetível à corrosão quando exposto a determinados agentes, a armadura de uma estrutura construída com concreto de má qualidade e exposta a agentes presentes em ambientes marítimos, por exemplo, tende a apresentar falhas por corrosão ao longo do tempo.

A cidade de Rio Grande tem atualmente, no Polo Naval, uma perspectiva de crescimento nunca antes imaginada. Porém, mais que a cidade, o governo federal em conjunto com diversos grupos empresariais privados, vem investindo uma grande quantidade de recursos no Polo Naval, o que faz com que cada vez mais se busquem alternativas que visem aumentar a rentabilidade e a segurança do processo como um todo. Considerando que a construção civil está na estrutura do Polo Naval, tudo que está ligado à engenharia também deve apresentar um nível de segurança elevado. É com base nesta consideração que este trabalho foi elaborado.

Existe hoje no Polo Naval de Rio Grande um número muito grande de estruturas de concreto armado, e ao longo do tempo, certamente estas estruturas irão sofrer deterioração, especialmente por estarem localizadas em um ambiente marítimo. Dentre estas estruturas, o alvo das análises deste trabalho são as vigas.

Já se tem conhecimento de alguns métodos de reforços de vigas de concreto armado, dentre eles o reforço com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC). Esta técnica (FIGURA 1) vem sendo muito estudada, porém ainda não se dispõe no Brasil de normas técnicas que regulamentem o seu uso. Contudo, atualmente existem diversos estudos que tratam da utilização de PRFC no reforço de vigas de concreto armado, e um grande número destes estudos mostram que esta técnica agrega uma maior capacidade de resistência à flexão às vigas [1,2].



Figura 1 – Viga reforçada com PRFC. [4]

Desta forma, devido às deteriorações de vigas de concreto armado expostas a ambientes marítimos, o reforço destas vigas com PRFC, buscando a recuperação de sua capacidade resistente original, é uma possibilidade real e muitas vezes vantajosa economicamente. Para que isto possa ser feito, o conhecimento da capacidade resistente da viga após o reforço é fundamental.

Com base nisto, este trabalho apresenta um modelo simplificado para a determinação da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC. Os resultados obtidos por este modelo foram comparados aos resultados teóricos e experimentais obtidos por outros autores, o que validou o modelo simplificado proposto neste trabalho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

a. Modelo de Vigas em Estudo

As vigas estudadas neste trabalho podem ser representadas conforme a FIGURA

2.

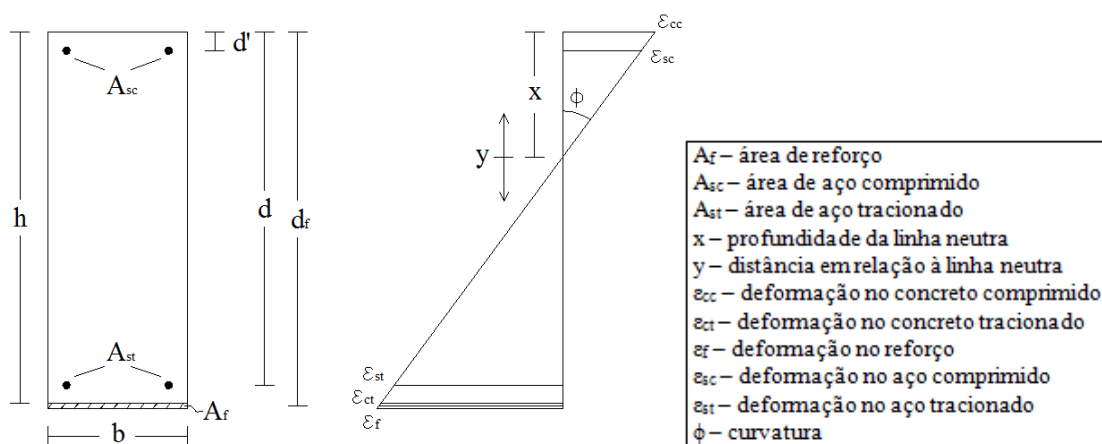


Figura 2 – Modelo de vigas estudadas.

As distribuições das tensões e forças resultantes nas vigas para os Estádios I e II estão apresentadas na FIGURA 3. Contudo deve-se observar que no Estádio II a resistência à tração do concreto é desprezada, ou seja, tensão no concreto tracionado (σ_{ct}) deve ser igual a zero.

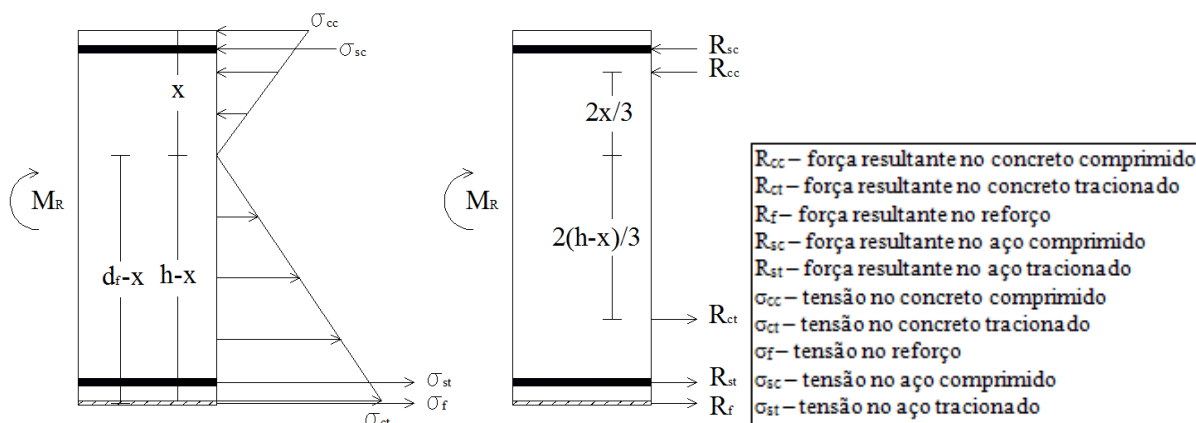


Figura 3 – Distribuição de tensões e forças resultantes para os Estádios I e II.

As distribuições das tensões e forças resultantes nas vigas para o Estádio III estão apresentadas na FIGURA 4.

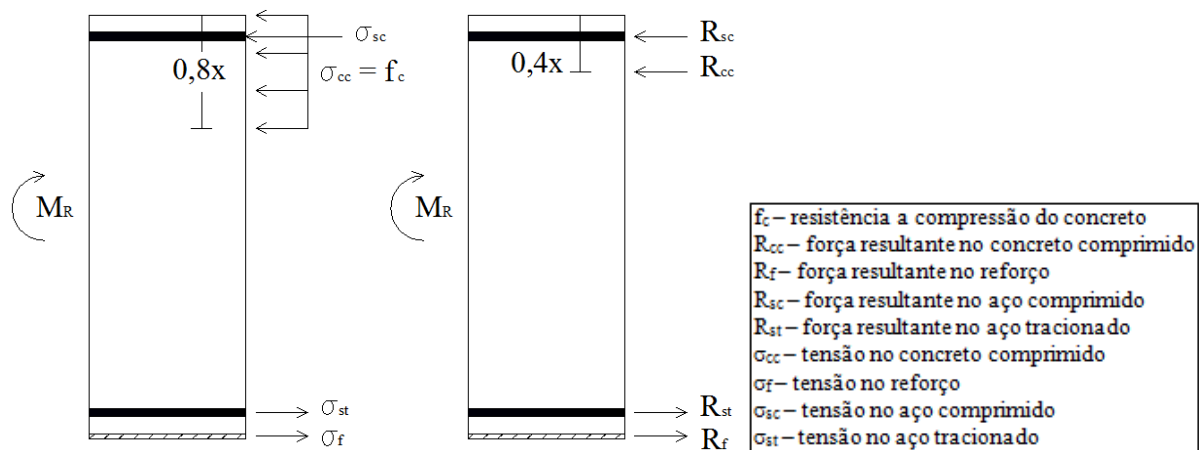


Figura 4 – Distribuição de tensões e forças resultantes para o Estádio III.

b. Esforços resistidos por cada material

As equações que regem as deformações (ϵ) mostradas na FIGURA 2 foram obtidas a partir da Equação (1).

$$\epsilon = \phi \cdot y \quad (1)$$

Na Equação (1), ϵ é a deformação de cada material, ϕ é a curvatura e y distância entre o centroide do material e a posição da linha neutra.

As equações que regem as tensões (σ) mostradas na FIGURA 3 foram obtidas a partir da Equação (2).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2)$$

Na Equação (2), σ é a tensão de cada material e E é o módulo de elasticidade de cada material.

As equações que regem as forças resultantes (R) mostradas na FIGURA 3 e na FIGURA 4 foram obtidas a partir da Equação (3).

$$R = \int_A \sigma \cdot dA \quad (3)$$

Na Equação (3), R é a força resultante de cada material e A é a área de cada material.

c. Estádio I

Primeiramente, fez-se o equilíbrio das forças resultantes mostradas na FIGURA 3 e isolando-se a variável “x” (posição da linha neutra), encontrou-se, de forma direta, a equação que rege a posição da linha neutra no Estádio I, conforme a Equação (4).

$$x_1 = \frac{(bE_c h^3/2) + (A_{sc}d' + A_{st}d)E_s + A_f d_f E_f}{bE_c h + (A_{st} + A_{sc})E_s + A_f E_f} \quad (4)$$

Na Equação (4), x_1 é a posição da linha neutra no Estádio I, b é a largura da viga, h é a altura da viga, d' é a profundidade da armadura superior, d é a profundidade da armadura inferior, d_f é a profundidade do reforço, A_{sc} é a área de aço comprimido, A_{st} é a área de aço tracionado, A_f é a área de reforço, E_c é o módulo de elasticidade do concreto, E_s é o módulo de elasticidade do aço e E_f é o módulo de elasticidade do reforço.

Com a posição da linha neutra determinada, pode-se calcular o momento fletor de fissuração do concreto, conforme a Equação (5).

$$M_{cr} = \frac{I_c f_{ct}}{(h - x_1)} \quad (5)$$

Na Equação (5), M_{cr} é o momento fletor de fissuração do concreto, I_c é o momento de inércia da seção de concreto e f_{ct} é a resistência à tração do concreto.

A seguir, fez-se o equilíbrio de momentos fletores em relação à posição da linha neutra no Estádio I e isolando-se a variável “ ϕ ” (curvatura de fissuração do concreto), encontrou-se, de forma direta, a equação que rege a curvatura de fissuração do concreto, conforme a Equação (6).

$$\phi_{cr} = \frac{M_{cr}}{K_1} \quad (6)$$

Na Equação (6), ϕ_{cr} é a curvatura de fissuração do concreto e K_1 é a rigidez no Estádio I, que pode ser determinada conforme a Equação (7).

$$K_I = [bE_c h + (A_{sc} + A_{st})E_s + E_f A_f] x_I^2 - 2 \left[\frac{bE_c h^2}{2} + (A_{sc} d' + A_{st} d)E_s + E_f d_f A_f \right] x_I + \frac{bE_c h^3}{3} + (A_{sc} d'^2 + A_{st} d^2)E_s + E_f d_f^2 A_f \quad (7)$$

d. Estádio II

No Estádio II, o procedimento adotado foi semelhante ao adotado no Estádio I, porém desprezando-se o efeito do concreto tracionado ($R_{ct} = 0$).

Fez-se o equilíbrio de forças resultantes e determinou-se a equação que rege a posição da linha neutra no Estádio II, conforme a Equação (8).

$$x_{II} = \frac{\sqrt{2A_f b E_r E_f d_f + (A_{sr} + A_{sr})^2 E_s^2 + [(A_{sr} + A_{sr}) A_f E_f + (A_{sr} d + A_{sr} d') b E_r] 2E_s + A_f^2 E_f^2 - (A_{sr} + A_{sr}) E_s - A_f E_f}}{b E_c} \quad (8)$$

Na Equação (8), x_{II} é a posição da linha neutra no Estádio II.

A curvatura de escoamento do aço pode ser determinada pela Equação (9) [2].

$$\phi_y = \frac{f_y/E_s}{(d - x_{II})} \quad (9)$$

Na Equação (9), ϕ_y é a curvatura de escoamento do aço.

A seguir, fez-se o equilíbrio de momentos fletores em relação à posição da linha neutra no Estádio II e determinou-se a equação que rege o momento fletor de escoamento do aço, conforme a Equação (10).

$$M_y = \phi_y \cdot K_{II} \quad (10)$$

Na Equação (10), M_y é o momento fletor de escoamento do aço e K_{II} é a rigidez no Estádio II, que pode ser determinada conforme a Equação (11).

$$K_{II} = \frac{bE_c}{3}x_{II}^3 + [(A_{sc} + A_{st})E_s + A_fE_f]x_{II}^2 - 2[(A_{sc}d' + A_{st}d)E_s + d_fA_fE_f]x_{II} + (A_{sc}d'^2 + A_{st}d^2)E_s + d_f^2A_fE_f \quad (11)$$

e. Estádio III

No Estádio III, a posição da linha neutra é determinada a partir de um processo iterativo conforme o domínio de ruptura [3]. Determinada a posição da linha neutra no Estádio III, determinou-se a curvatura última da viga conforme a Equação (12).

$$\begin{cases} \phi_u = \frac{109\epsilon_c}{d-x_{III}} \rightarrow 0 \leq \frac{x_{III}}{d} \leq 0,259 \\ \phi_u = \frac{3,69\epsilon_c}{x_{III}} \rightarrow \frac{x_{III}}{d} > 0,259 \end{cases} \quad (12)$$

Determinadas as curvaturas, as deformações foram calculadas a partir da Equação (1), e a seguir determinaram-se as tensões mostradas na FIGURA 4, conforme a Equação (13).

$$\begin{cases} \sigma = E_s \cdot \epsilon \rightarrow \epsilon < (f/E) \\ \sigma = f \rightarrow \epsilon \geq (f/E) \end{cases} \quad (13)$$

Na Equação (13), f é a resistência do material, que é válida para o aço e para o reforço, sendo a tensão no concreto considerada constante e igual a $0,80$ de f_c .

A seguir foram determinadas as forças resultantes a partir da Equação (3) e logo após o momento fletor último da viga conforme a Equação (14).

$$\begin{cases} M_u = (0,4x_{III} - d')R_{sc} + (d - 0,4x_{III})R_{st} + (d_f - 0,4x_{III})R_f \rightarrow R_f < F_{m\acute{a}x} \\ M_u = (0,4x_{III} - d')R_{sc} + (d - 0,4x_{III})R_{st} + (d_f - 0,4x_{III})F_{m\acute{a}x} \rightarrow R_f > F_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad (14)$$

Na Equação (14), M_u é o momento fletor último da viga, R_{sc} é a força resultante do aço comprimido, R_{st} é a força resultante do aço tracionado, R_f é a força resultante do reforço e $F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima antes do descolamento do reforço [1].

f. Deslocamentos Verticais

Os deslocamentos verticais (flechas) foram determinados pela Equação (15) [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{\text{máx}} = \frac{\phi_a}{24} (3L^2 - 4L_a^2) \rightarrow \text{Estádio I} \\ \delta_{\text{máx}} = \frac{\phi_a}{24} (3L^2 - 4L_a^2) + \frac{(L_a - L_g)}{6} (\phi_{cr} L_a - \phi_a L_g) \rightarrow \text{Estádio II} \\ \delta_{\text{máx}} = \frac{\phi_a}{24} (3L^2 - 4L_a^2) + \frac{L_y}{6} [\psi_{cr}(L_y + L_g) - \phi_a(L_y + L_a)] + \frac{\phi_y(L_a - L_g)(L_a + L_y + L_g)}{6} \rightarrow \text{Estádio III} \end{array} \right. \quad (15)$$

Na Equação (15), $\delta_{\text{máx}}$ é o deslocamento vertical máximo correspondente ao carregamento aplicado, ϕ_a é a curvatura correspondente ao carregamento aplicado, L é o comprimento da viga, L_a é o vão de cisalhamento, L_y trecho onde não teve escoamento do aço e L_g trecho onde não teve fissuração do concreto, sendo estes determinados a partir da Equação (16).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_g = \frac{2M_{cr}}{P} \\ L_y = \frac{2M_y}{P} \end{array} \right. \quad (16)$$

Na Equação (16), P é o carregamento aplicado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Vigas ensaiadas por Beber (1999)

A comparação entre os resultados obtidos pelo modelo simplificado e os resultados experimentais e teóricos obtidos por Beber [1], estão apresentados neste capítulo. Na TABELA 1 estão apresentadas as propriedades dos materiais.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais das vigas ensaiadas por Beber [1].

Materiais	Propriedades	Valores [MPa]
Concreto	Resistência à compressão	33,58
	Resistência à tração	3,14
	Módulo de elasticidade	38311
Aço	Resistência (6 mm)	738
	Resistência (10 mm)	565
	Módulo de elasticidade	210000

Reforço	Resistência	3400
	Módulo de elasticidade	230000

Na FIGURA 5 está apresentado o modelo de viga ensaiada [1].

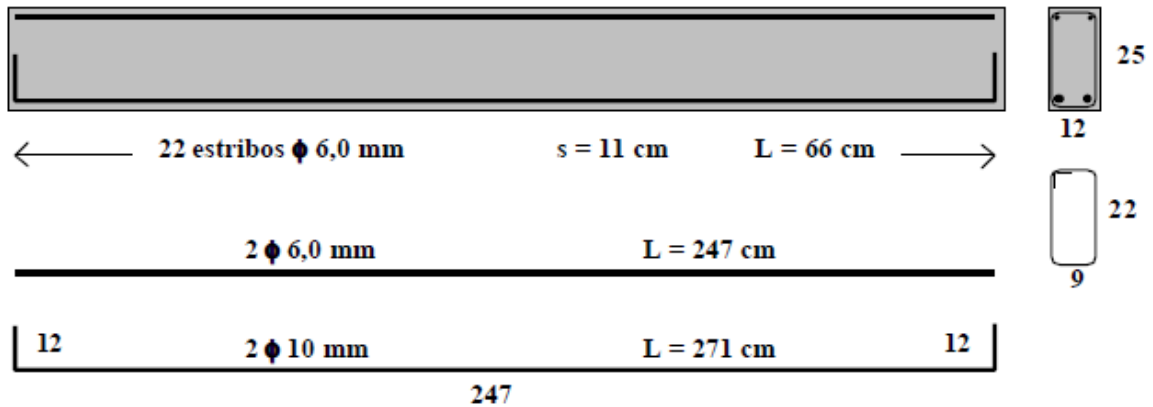


Figura 5 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Beber [1].

Na FIGURA 6, onde esta apresentada a comparação para 1 camada de reforço, os resultados teóricos têm uma ótima concordância na maior parte do carregamento. Já nos carregamentos finais, os resultados obtidos pelo modelo simplificado aproximam-se significativamente dos resultados experimentais.

Na FIGURA 7, onde esta apresentada a comparação para 4 camadas de reforço, os resultados teóricos apresentam ótima concordância e ainda estão próximos aos resultados experimentais.

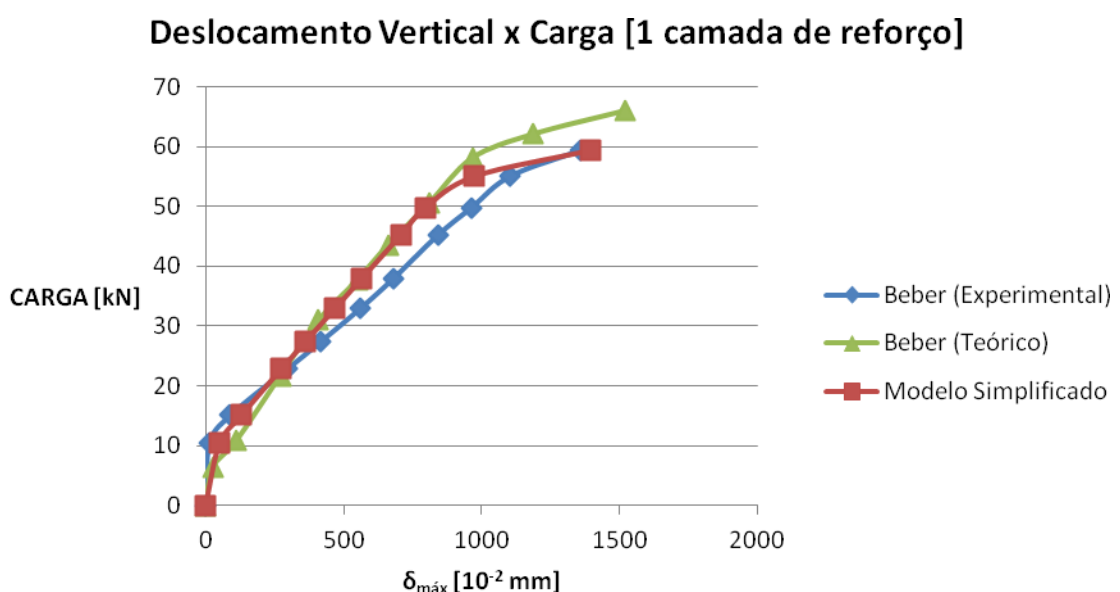


Figura 6 – Comparação de resultados para vigas com 1 camada de reforço.

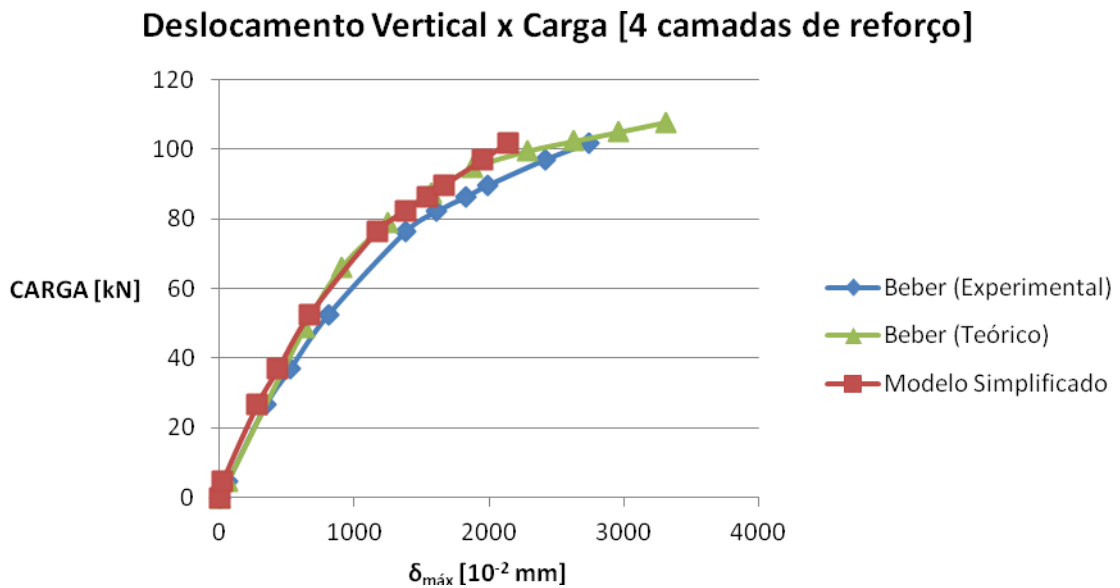


Figura 7– Comparação de resultados para vigas com 4 camadas de reforço.

Na FIGURA 8, onde esta apresentada a comparação para 7 camadas de reforço, todos os resultados apresentam boa concordância.

E por fim, na FIGURA 9, onde está apresentada a comparação para 10 camadas de reforço, os resultados apresentam boa concordância, porém cabe destacar que o escoamento do aço se apresenta mais evidente do que nos demais modelos.

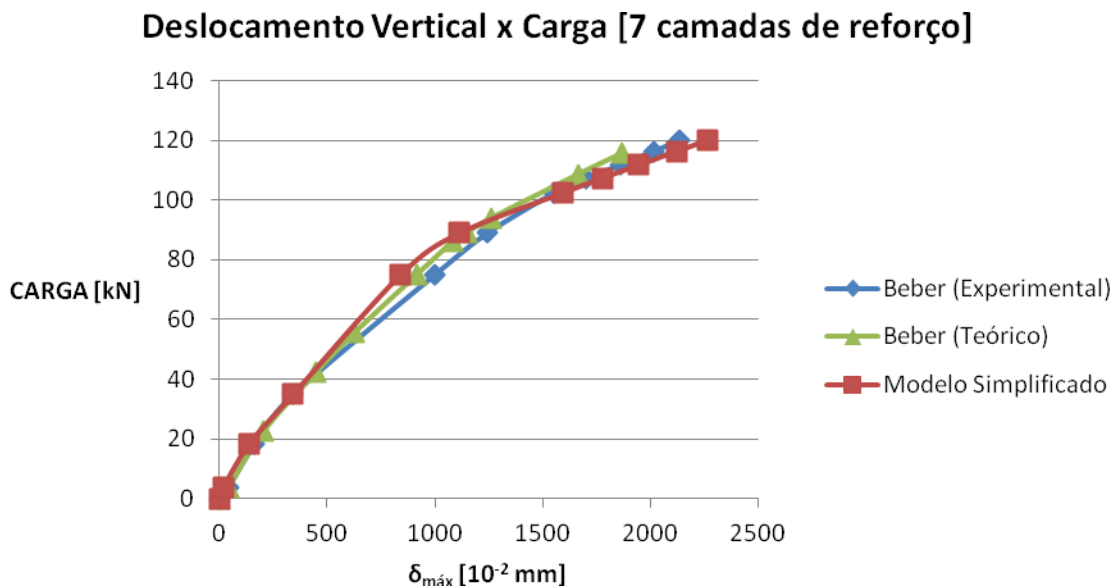


Figura 8 – Comparação de resultados para vigas com 7 camadas de reforço.

Deslocamento Vertical x Carga [10 camadas de reforço]

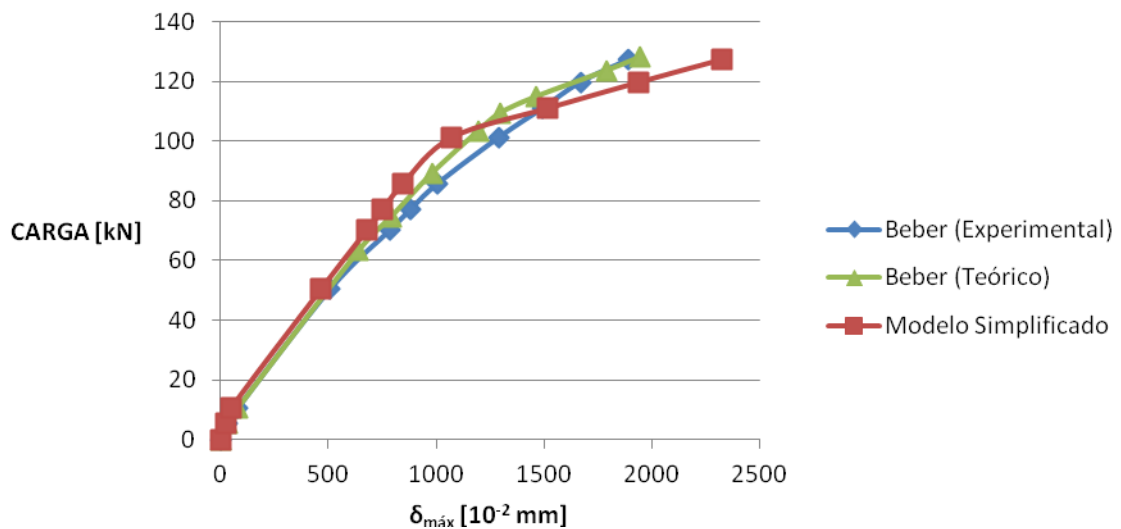


Figura 9 – Comparação de resultados para vigas com 10 camadas de reforço.

3,2 Vigas ensaiadas por Zarnic et al. [4]

Na FIGURA 10 está apresentado o detalhamento das vigas ensaiadas [5].

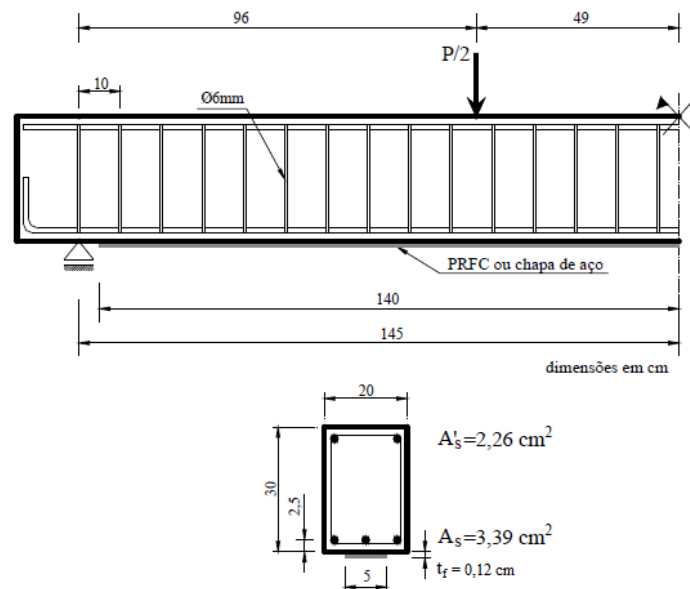


Figura 10 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Zarnic et. al. [4].

Na TABELA 2 estão apresentadas as propriedades dos materiais que compõe as vigas ensaiadas [5].

Tabela 2 – Propriedades dos materiais das vigas ensaiadas por Zarnic et. al. [4].

Materiais	Propriedades	Valores	Unidades
Concreto	Resistência à compressão	25	MPa
	Módulo de elasticidade	27000	MPa
Aço	Resistência	460	MPa
	Módulo de elasticidade	210000	MPa
Reforço	Resistência	2400	MPa
	Módulo de elasticidade	150000	MPa
	Espessura	0,12	Cm
Interface	Tensão máxima admissível	5	MPa

Percebe-se na FIGURA 11 que a curva gerada pelo modelo proposto neste trabalho, se mantém alinhada com a curva gerada pelos resultados obtidos por Aprile et al. [6] até determinado ponto, onde passa a ficar mais próxima as curvas obtidas por Zarnic et al. [4] e Paliga [5].

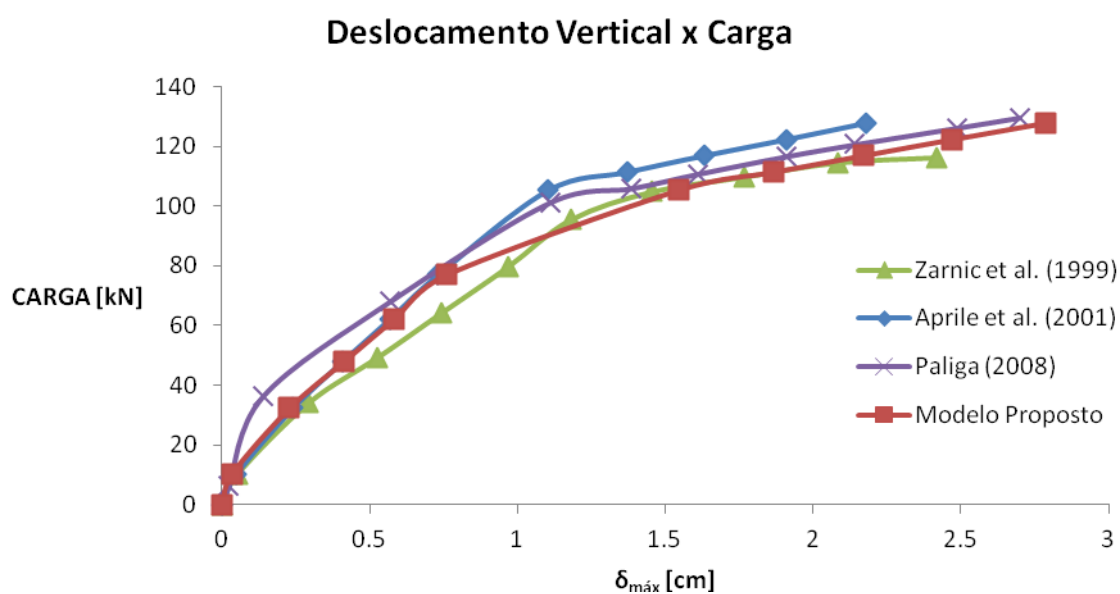


Figura 11 – Comparação de resultados: vigas ensaiadas por Zarnic et al. [4].

3.3 Vigas ensaiadas por Arduini et. al. [7]

Na FIGURA 12 está apresentado o detalhamento das vigas ensaiadas [5].

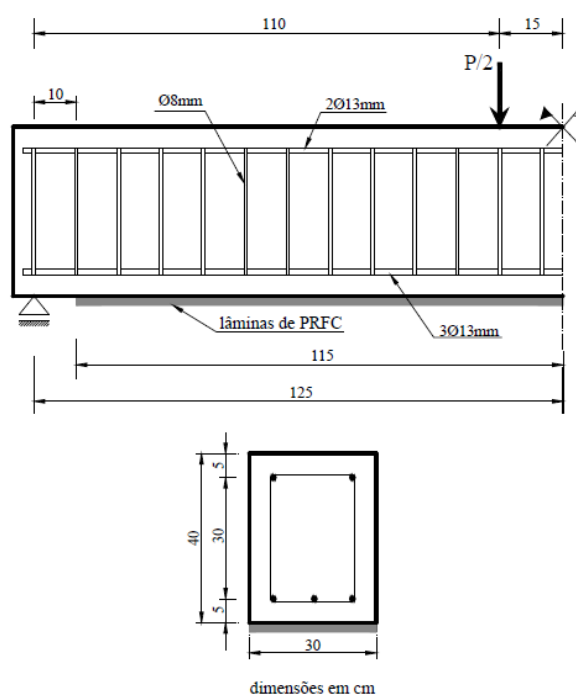


Figura 12 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Arduini et al. [7].

Na TABELA 3 estão apresentadas as propriedades dos materiais que compõe as vigas ensaiadas [5].

Tabela 3 – Propriedades dos materiais das vigas ensaiadas por Arduini et al. [7].

Materiais	Propriedades	Valores	Unidades
Concreto	Resistência à compressão	30	MPa
	Módulo de elasticidade	26000	MPa
Aço	Resistência	340	MPa
	Módulo de elasticidade	200000	MPa
Reforço	Resistência	3000	MPa
	Módulo de elasticidade	400000	MPa
	Espessura	0,017	cm
Interface	Tensão máxima admissível	4,5	MPa

A comparação de resultados obtidos está apresenta na FIGURA 13.

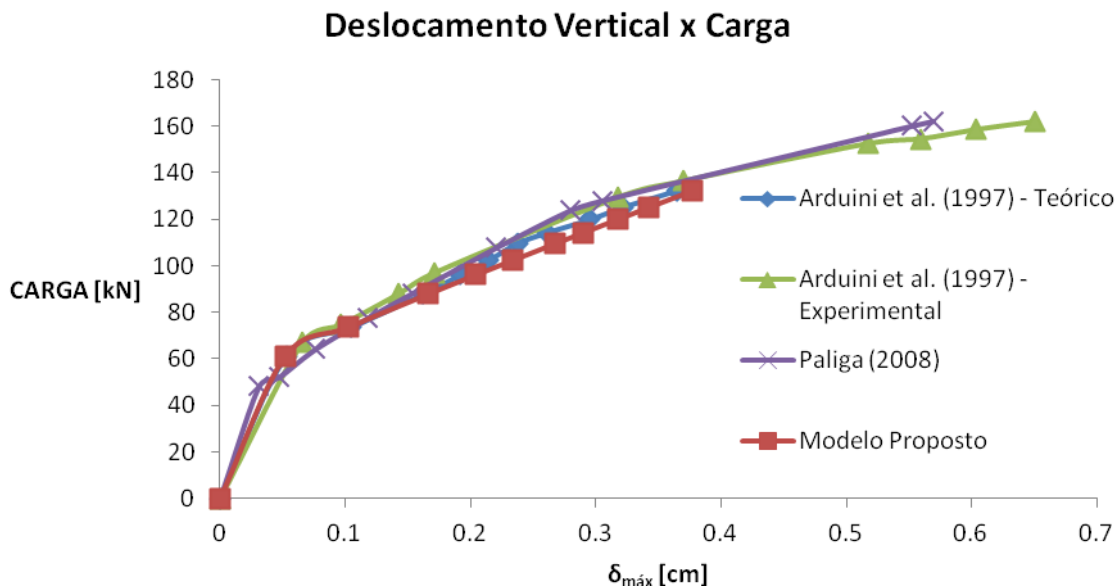


Figura 13 – Comparação de resultados: vigas ensaiadas por Arduini et al. [7].

Percebe-se analisando a FIGURA 13 que a curva relativa aos resultados obtidos pelo modelo proposto por este trabalho apresentam uma ótima aproximação com os resultados, teóricos e experimentais, obtidos por Arduini et al. [7]. Nota-se ainda que a curva obtida por Paliga [5] não se apresenta distante das demais.

4. CONCLUSÃO

Após a apresentação dos resultados obtidos pelo modelo simplificado e a comparação com os resultados teóricos e experimentais obtidos por outros autores se faz necessária uma breve discussão sobre estes resultados.

Conforme observado no item anterior, todos os resultados apresentam, no mínimo, boa concordância, o que nos permite validar o modelo simplificado proposto por este trabalho. As pequenas diferenças de resultados se devem aos diferentes modelos de cálculos e até incertezas na obtenção dos resultados experimentais.

Quando se trata de concreto, nenhum resultado será muito exato, isto porque o concreto não é um material homogêneo. Portanto, o fato de se conseguir obter resultados tão aproximados em diferentes métodos, é alentador e dá margem para a realização de novos estudos para que, cada vez mais, se possa entender este material tão importante no mundo.

O modelo simplificado apresentado neste trabalho pode ser importante para as mais variadas áreas da construção civil, porém destacam-se os ambientes marítimos devido

à alta tendência de deterioração de estruturas de concreto armado situadas nestes ambientes.

A partir deste trabalho é possível a análise da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono, de uma forma simplificada, permitindo assim avaliar se é possível o reforço de vigas já danificadas e qual a quantidade de reforço necessária.

O próximo passo desta pesquisa será avaliar a confiabilidade de vigas reforçadas com PRFC empregando-se o modelo simplificado apresentado neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono.** 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1999

[2] GARCEZ, M. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras.** 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

[3] ARAÚJO, J. **Curso de concreto armado.** 2ª ed. Rio Grande: Dunas, 2003. 222 p. v.1. ISBN 85-86717-01-0.

[4] ZARNIC, R.; GOSTIC, S.; BOSILJKOV, V.; BOKAN- BOSILJKOV, V. Improvement of bending load-bearing capacity by externally bonded plates. **Proc., CREATING WITH CONCRETE**, Thomas Telford, London, p.433-442, 1999.

[5] PALIGA, C. M. **Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do Método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos.** 249 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

[6] APRILE, A.; SPACONE, E.; LIMKATANYU, S. Role of bond in RC beams strengthened with steel and FRP plates. **Journal of Structural Engineering**, v.127, n.12, p.1445-1452, 2001.

[7] ARDUINI, M.; Di TOMMASO, A.; NANNI, A. Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams. **ACI Structural Journal**, v.94, n.4. p.363-370, 1997.