

DESENVOLVIMENTO DE ROTINA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

SPHOR, Daniel Ludwig¹; BOHN, Kátia Aline¹; GARCEZ, Mônica Regina²

¹Universidade Federal de Pelotas, Acadêmicos do Curso de Engenharia Civil; ² Universidade Federal de Pelotas, Professora Adjunta do Curso de Engenharia Civil, mrgarcez@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Os reforços com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) têm sido bastante utilizados para melhorar o desempenho de estruturas de concreto armado como pilares de pontes e viadutos e para o aumento da capacidade de resistência à flexão e ao esforço cortante em vigas e lajes. Os polímeros reforçados com fibras (PRF) podem ser utilizados tanto para o aumento na capacidade portante de elementos estruturais existentes quanto para recuperação da capacidade estrutural de elementos danificados.

Na última década, a *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE), o *Japan Concrete Institute* (JCI) e o *Railway Technical Research Institute* (RTRI) do Japão, publicaram diversos documentos relativos à utilização de PRF em estruturas de concreto. Na Europa, a *International Federation for Structural Concrete* (FIB) publicou um boletim sobre o dimensionamento de estruturas de concreto armado reforçadas externamente com PRF colados. Na América do Norte, a *Canadian Standards Association* (CSA) têm sido ativa no desenvolvimento de códigos e normas para utilização de sistemas PRF. Em 2000, foi finalizado o *Canadian Highway Bridge Design Code*, que contém uma seção dedicada a PRF, e a *Canadian Standards Association*, recentemente, aprovou o código “*Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers*”. Além disso, o *Structural Composites and Plastic Committee* (SCAP) da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) está desenvolvendo diversos documentos normativos sobre a utilização de PRF e o *American Concrete Institute* (ACI) formou, em 1993, o Comitê ACI 440, para o desenvolvimento de guias de dimensionamento, especificações e aplicações de PRF como reforço externo e interno em estruturas de concreto.

O dimensionamento dos reforços com PRF requer, independente da norma utilizada, uma ampla rotina de cálculos. Neste sentido, este trabalho busca sistematizar os processos de cálculo propostos na norma ACI 440-2R-08 para o dimensionamento de vigas de concreto bi-apoiadas. Desta forma, procura-se obter uma rotina de cálculo que auxilie no dimensionamento com simplicidade, agilidade e objetividade no tratamento dos dados.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho envolveu diversas etapas, descritas a seguir:

Inicialmente foram analisados os requisitos de *software*, tarefa esta que requer habilidade e experiência em engenharia de *software* para reconhecer redundâncias e contradições nos requisitos.

Na etapa posterior foi estudada a arquitetura de software, para garantir que o sistema vai ao encontro de requisitos do produto, remetendo a uma representação abstrata.

Em seguida, foi trabalhada a codificação, usando as ferramentas Borland Delphi 6 em linguagem orientada à objetos (Object Pascal), Firebird 2.1 como banco de dados e IBExpert como gerenciador desse banco. Em um Data Module foi feita a conexão SQL e os componentes usados para facilitar a interatividade entre o software e o banco foram os da paleta DBExpress.

Finalmente, foi realizada a etapa de testes, que permitiu encontrar e corrigir erros (bugs) antes de concluir o desenvolvimento do software.

A implementação foi elaborada de acordo com os seguintes formulários (conectados ao Data Module), onde o usuário entra com os dados da estrutura e o sistema se encarrega de fazer os cálculos:

- Cálculo do momento resistente da viga sem reforço
- Dados dos materiais da viga e dos reforços
- Determinação da deformação inicial resistente
- Níveis de deformação e tensão
- Cálculo do momento resistente da seção reforçada
- Verificação das tensões no aço e no reforço
- Verificação da resistência ao cisalhamento

A Figura 1 mostra a tela inicial da rotina de cálculo, com o menu criado para auxiliar o usuário.

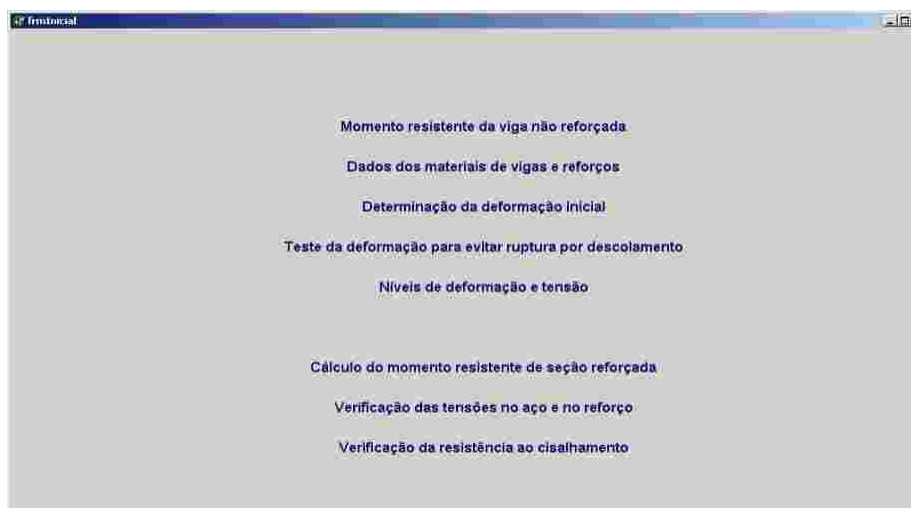


Figura 1. Tela Inicial com menu.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No formulário de cálculo do momento resistente da viga sem reforço (Figura 2) são informados os coeficientes de segurança e alguns dados da viga, como as dimensões de sua seção transversal, e a armadura existente, por exemplo. Feita a entrada destes dados, o sistema faz o cálculo do momento resistente sem reforço.

Momento resistente da viga não reforçada

Dados da viga Concreto: 35 kN/cm ² Aço: 50 kN/cm ² Altura: 18 cm Base: 14 cm Cobrimento: 1,5 cm Bitola arm. superior: 8 mm Bitola arm. inferior: 12,5 mm Salvar dados	Cálculo da altura útil Dist do centro da armadura inferior até o topo da viga: 15,0749998092651 cm Dist do centro da armadura superior até o topo da viga: 2,70000004768372 cm Cálculo da área de aço Nº de barras de compressão: 2 Nº de barras de tração: 2 Calcular Área de aço superior: 1,00530970096588 cm ² Área de aço inferior: 2,45436930656433 cm ²	Coefficientes de segurança Coeficiente do concreto: 0,97615814 Coeficiente do aço: 0,99997615814 Coeficiente das cargas: 1 Determinação Coef de cálculo Calcular fcd: 2,5 MN/cm ² fyd: 43,4762600402632 MN/cm ² k: 0,237940177321434 kc: 1,49627420711517 Domínio	Cálculo do momento Momento sem reforço (Mn): 14,1729431152344 kN.m Linha neutra e limite Calcular x: 4,46366501663208 x lim: 9,45956230163574
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 2. Formulário do momento resistente da viga não reforçada.

O formulário de dados dos materiais da viga e dos reforços (Figura 3) usa novos dados somados aos já informados no formulário anterior para posteriormente realizar o cálculo da capacidade resistente da viga reforçada. Neste formulário, o usuário indica também o incremento de carga que a viga deverá receber.

Dados dos materiais de vigas e reforços

Dados da viga Concreto: 35 kN/cm ² Aço: 57,7999992370605 kN/cm ² Altura: 30 cm Base: 15 cm Cobrimento: 1,5 cm Bitola arm. superior: 9,073486 mm Bitola arm. inferior: 12,5 mm Vão: 2,70000004768372 m Mód elasticidade: 3721,65625 Mpa bt: 0,810000002384186 ecu: 0,0030000002607703 Mód elasticidade aço: 210 Gpa esy: 0,00275238091126084 fcd: 3,5 kN/cm ² Salvar dados	Cálculo da altura útil Dist do centro da armadura inferior até o topo da viga: 27,2450008392334 cm Dist do centro da armadura superior até o topo da viga: 2,444999332428 cm Cálculo da área de aço Nº de barras de compressão: 2 Nº de barras de tração: 2 Calcular Área de aço superior: 0,623449067142944 cm ² Área de aço inferior: 2,45436930656433 cm ² Taxa de armadura: 0,00600567506826248 Momento resistente da viga sem reforço Mn: 14,1729431152344 kN.m Momento resistente da viga com reforço Incremento da carga (%): 25 Calcular Mu (com reforço): 17,716176894043 kN.m	Propriedades da fibra - Carbono CF 130 Espessura: 0,165000006556511 mm Largura: 20 mm Mód elasticidade: 227 Mpa Resistência última: 3500 Gpa Deformação última: 0,014999996647239 me CE: 0,94999988079071 Nº de camadas: 1 Calcular Rigidez: 11236500 N/mm ² ftu: 3325 Mpa etu: 0,014249999076128 me Área da fibra: 33 mm ² Taxa da fibra: 0,000607487638667226
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3. Formulário de dados dos materiais de vigas e reforços.

Posteriormente, a norma solicita que se determine a deformação inicial existente no concreto, devido ao seu peso próprio (Figura 4).

Figura 4. Formulário de determinação da deformação inicial.

É realizado também um teste de deformação para evitar ruptura prematura por descolamento do reforço por fissuras intermediárias (Figura 5).

Figura 5. Formulário de teste da deformação para evitar ruptura por descolamento.

Feito o teste do formulário anterior (Figura 5), o sistema calcula o nível de deformação efetiva no reforço, o nível de deformação no aço e os respectivos níveis de tensão. O processo iterativo (Figura 6) é um processo de cálculo que se repete até encontrar um resultado coerente para a posição da linha neutra. Tendo o dado da linha neutra Inicial, são calculados valores de linhas neutras modo que o processo cessa quando são encontrados dois valores de linha neutra com o erro especificado no programa, da ordem de 10^{-2} . Enquanto isso não ocorre, o sistema continua executando a rotina de cálculos.

Posteriormente é realizado o cálculo do momento resistente da seção reforçada utilizando o coeficiente de ductilidade, conforme especificações da norma (Figura 7).

Finalmente são realizadas as verificações das tensões de serviço, tanto no aço quanto no reforço, são feitas separadamente, e as duas dependem do momento de serviço usado (Figura 8).

Níveis de deformação e tensão

Calcular

Estimativa inicial da linha neutra

c: 5,44900035858154

Nível de deformação efetiva do reforço

efe: 0,0135167920961976

ed: 0,0128249991686152

Nível de deformação no aço

es: 0,0113858375698328

Nível de tensão no reforço e no aço

ffe: 2911,27490234375

fs: 2391,02587890625

teste fs: 578

Processo iterativo

Calcular

LN	5,44900035858154	5,84974193572998
efe	0,0128249991686152	0,0123852947726846
es	0,0113858375698328	0,0109724123030901
ffe	2911,27490234375	2811,4619140625
fs	578	2304,20654296875
LNf	6,58255338668823	5,84974193572998
LNf - LNf	-1,13355302810669	8,81533087109121E-14

Figura 6. Formulário de níveis de deformação e tensão.

Cálculo do momento resistente de seção reforçada

Teste de deformação do aço: 0,899999976156142

Calcular

Mn	5137,16650390625
Ms	7,08647155761719

Figura 7. Formulário de cálculo do momento resistente da seção reforçada.

Determinado o momento resistente da seção reforçada e verificadas as tensões e deformações em níveis de serviço (Figura 8), pode-se comparar o momento obtido com o demandado inicialmente, no formulário de dados dos materiais da viga e dos reforços

Ainda com os dois últimos formulários em fase de testes, a fase atual em que se encontra a implementação já permite a realização de testes com dados de estruturas reais de concreto armado reforçadas.

The image shows a software interface for calculating stresses in steel and reinforcement. It is divided into three main sections:

- Cálculo de kd:** Contains a 'Calcular' button and two input fields labeled 'K' and 'KD'.
- Tensão no aço:** Contains two input fields labeled 'FSS' and 'FY'.
- Tensão no reforço:** Contains two input fields labeled 'FFS' and 'FFU'.

Figura 8. Formulário das tensões no aço e no reforço.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do trabalho permitiu implementar uma rotina de cálculo para facilitar o dimensionamento de vigas bi-apoiadas de concreto armado reforçadas com PRF utilizando-se as recomendações da norma ACI 440.2R-08.

Os testes realizados até o momento indicam que os dados gerados são compatíveis com os já calculados, de forma manual, elementos estruturais reais.

Depois de concluída a implementação da rotina de cálculo, será possível aos usuários realizar o dimensionamento com simplicidade, agilidade e objetividade, diminuindo consideravelmente o tempo necessário com a realização dos cálculos e aumentando a confiabilidades dos dados gerados.

5 REFERÊNCIAS

ALVES, Willian Pereira. **Delphi 6: aplicações avançadas de banco de dados**. São Paulo: Érica, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: **ACI 440.2R-08**. Farmington Hills, 2008.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese de Doutorado em Engenharia Civil.

WILDEROM, Bastiaan Pieter Marinus; FRANCK, Marcelo. **Delphi 6 com FireBird/Interbase**. São Paulo: Érica.