

PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO E AO
CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Roberta David de Aquino Viana

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Ibrahim Abd El Malik Shehata, Ph.D.

Prof.^a Lídia da Conceição Domingues Shehata, Ph.D.

Prof.^a Regina Helena Ferreira de Souza, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2004

VIANA, ROBERTA DAVID DE AQUINO

Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado [Rio de Janeiro] 2004.

XV, 115 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1 – Programa para dimensionamento

2 – Reforço Estrutural

3 – Chapa de aço colada

4 – Barras coladas

5 – Compósitos de fibra de carbono

6 – Encamisamento

7 – Armaduras externas protendidas

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

A Deus.

À minha família, minha avó, Yara, meus pais, José Roberto e Miulza, e meus irmãos, Ricardo e Marcelo, por todo o apoio, carinho e incentivo.

Ao professor Ibrahim, pelos ensinamentos, disponibilidade, atenção e orientação segura.

Aos funcionários do laboratório de Informática da COPPE/UFRJ, pela paciência e atenção.

A todos os amigos que me acompanharam, ajudaram e torceram durante estes dois anos.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO E AO
CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Roberta David de Aquino Viana

Junho/2004

Orientador: Ibrahim Abd El Malik Shehata

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho desenvolveu-se um programa para dimensionamento de reforços à flexão e ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

O programa abrange as técnicas de chapa contínua colada, chapas em tiras coladas, tecido ou lâmina de fibra de carbono coladas, barras coladas, estribos externos pré-tracionados, encamisamento e armadura longitudinal pré-tracionada.

A demonstração da eficácia dos métodos de dimensionamento usados no programa desenvolvido foi realizada utilizando-se resultados de vigas ensaiadas em estudos anteriores. Os reforços obtidos pelo programa e os ensaiados puderam ser comparados, observando-se, ao final, a existência de divergências muito pequenas.

Para alguns casos foram propostas outras alternativas de reforços consideradas mais eficientes.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SOFTWARE TO DIMENSIONING BENDING AND SHEAR REINFORCEMENT IN
CONCRETE BEAMS

Roberta David de Aquino Viana

June/2004

Advisor: Ibrahim Abd El Malik Shehata

Department: Civil Engineering

In this work, a software for designing bending and shear strengthening of concrete beams was developed.

The software consider techniques: bonded steel plates, bonded steel plates in strips, fiber-reinforced polymers (FRP), bonded bars, external prestressed stirrups, external prestressed longitudinal bars and using concrete.

The efficacy of the designing methods used in the software was demonstrate using experimental beams results of previous works. The strengthening calculated by the software and the ones used in the experiments were compared, showing, at the end, the existence of little divergences.

For some cases, alternatives which showed to be more efficient were proposed.

Lista de símbolos

Letras latinas

a	Distância entre apoio e seção de aplicação de carga mais próxima
A_{ch}	Área da seção transversal da chapa contínua de reforço que recebe maior sollicitação
A_{ef}	Área efetiva da chapa
A_f	Área da seção transversal do reforço de fibra de carbono ($A_f = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot b_f$)
A_r	Área da seção transversal do reforço
A_s	Área da seção da armadura longitudinal de tração da viga original
A_s'	Área da seção da armadura longitudinal de compressão da viga original
A_{sw}	Área da seção da armadura transversal da viga original
A_{sp}	Área da seção da armadura de reforço protendida
$A_{\phi r}$	Área da seção de cada cabo de reforço
b	Largura da seção transversal da viga
b_{novo}	Nova largura da seção transversal da viga
b_{ch}	Largura da chapa de reforço
b_f	Largura da tira do reforço de fibra de carbono
d	Altura útil da seção da viga
d'	Altura efetiva com relação à armadura de compressão
d_f	Altura efetiva com relação ao reforço de fibra de carbono
d_r	Altura efetiva com relação ao reforço
e	Excentricidade dos cabos de protensão
$e_{máx}$	Excentricidade máxima dos cabos de protensão
E_c	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do reforço de fibra de carbono
E_r	Módulo de elasticidade longitudinal do reforço
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto característica
f_{cd}	Resistência à compressão do concreto de projeto
f_{cm}	Resistência à compressão do concreto média
f_t	Resistência à tração do concreto

f_{td}	Resistência à tração do concreto de projeto
$f_{t,f}$	Resistência à tração do reforço de fibra de carbono
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_{yd}	Tensão de escoamento do aço de projeto
$f_{y,ch}$	Tensão de escoamento da chapa de reforço
$f_{y,exp}$	Tensão de escoamento do aço experimental
$f_{y,r}$	Tensão de escoamento da armadura de reforço
$f_{y,sp}$	Tensão de escoamento da armadura de protensão
F_{cis}	Parcela da força de protensão resistente ao cisalhamento
F_{ch}	Força máxima na chapa de reforço
F_{eq}	Força aplicada na viga ensaiada durante a execução do reforço
F_o	Força de pré-tração por tirante/estribo
h	Altura da viga
h_{ch}	Altura da chapa de reforço de cisalhamento na face lateral da viga
h_r	Altura do reforço de cisalhamento na face lateral da viga
k	Fator de redução
k_m	Coefficiente usado para prevenir destacamento do concreto
k_1	Fator de cálculo
k_2	Fator de cálculo
K_v	Coefficiente de redução
K_1	Fator que considera a resistência do concreto (ACI Committee 440)
K_2	Fator que considera a configuração do reforço de cisalhamento (ACI Committee 440)
l_{anc}	Comprimento de ancoragem
L_{cis}	Comprimento onde ocorre maior tensão cisalhante na interface reforço/concreto
L_h	Projeção do trecho inclinado da armadura protendida no eixo horizontal
L_e	Comprimento efetivo de aderência do reforço de fibra de carbono
M	Momento fletor em uma seção da viga
$M_{p,máx}$	Momento de protensão máximo
M_{PP}	Momento fletor devido ao peso próprio
M_S	Momento fletor devido à carga de serviço
M_u	Momento resistente da seção da viga sem reforço
$M_{u,r}$	Momento resistente da seção reforçada
ΔM	Acréscimo de momento fletor

n	Número de camadas de reforço
n_{ϕ}	Número de cabos
P	Carga aplicada
P_u	Carga de ruptura teórica da viga
$P_{u,exp}$	Carga de ruptura experimental da viga
Δq	Acréscimo de carga distribuída
R_{ext}	Força equivalente dos estribos pré-tracionados em um ponto da treliça
s	Espaçamento entre os estribos internos
s_r	Espaçamento entre os estribos de reforço
t	Espessura do reforço
t_{ch}	Espessura da chapa de reforço
t_f	Espessura de cada camada de fibra de carbono do reforço
t_{min}	Espessura mínima do reforço
V	Força cortante resistente da viga
V_c	Parcela de contribuição “do concreto” na força cortante resistente da viga
V_f	Parcela de contribuição do reforço de fibra de carbono na força cortante resistente da viga
V_{rd2}	Força cortante resistente que corresponde ao esgotamento da capacidade resistente da biela de compressão
V_{sw}	Parcela de contribuição da armadura de aço na força cortante resistente da viga
ΔV	Acréscimo de força cortante
x	Altura da linha neutra
x_e	Altura da linha neutra elástica
x_{novo}	Nova altura da linha neutra
z	Distância entre a força na armadura longitudinal de tração e a força longitudinal resultante no concreto
z'	Distância entre a força na armadura longitudinal de compressão e a força longitudinal resultante no concreto
z_r	Distância entre a força na armadura longitudinal de reforço e a força longitudinal resultante no concreto

Letras Gregas

α	Ângulo entre a direção da armadura transversal dos estribos internos e o eixo longitudinal da peça
α_r	Ângulo entre a direção da armadura transversal do reforço e o eixo longitudinal da peça
β	Fator de redução
χ	Ângulo complementar de θ
δ	Ângulo entre o trecho inclinado dos cabos de protensão e o eixo longitudinal da viga
$\bar{\delta}_G$	Fator de redução
ϵ_c	Deformação específica do concreto
ϵ_{cu}	Deformação específica última do concreto
ϵ_{fe}	Deformação específica efetiva da fibra de carbono
$\epsilon_{fk,e}$	Deformação específica efetiva característica da fibra de carbono
ϵ_{fu}	Deformação específica última do compósito de fibra de carbono
$\epsilon_{C,S}$	Deformação específica do concreto referente à carga de serviço
$\epsilon_{C,P}$	Deformação específica do concreto referente à ação do peso próprio
$\epsilon_{lim,f}$	Deformação específica limite da fibra de carbono
ϵ_o	Deformação específica do aço da armadura longitudinal tracionada quando da execução do reforço
ϵ_r	Deformação específica do reforço
$\epsilon_{S,S}$	Deformação específica do aço referente à carga de serviço
$\epsilon_{S,P}$	Deformação específica do aço referente à ação do peso próprio
ϵ_y	Deformação específica correspondente à tensão de escoamento do aço
ϕ	Diâmetro nominal da barra de aço
Φ	Coefficiente de minoração da resistência da viga ao cisalhamento
θ	Ângulo da biela de compressão com o eixo longitudinal da viga
ρ_t	Taxa geométrica da armadura transversal
ρ_L	Taxa geométrica da armadura longitudinal de tração
ρ_f	Taxa geométrica de armadura longitudinal de reforço de fibra de carbono
σ_b	Tensão na biela de compressão
$\sigma_{C,P}$	Tensão no concreto referente à ação do peso próprio
$\sigma_{C,S}$	Tensão no concreto referente a carga de serviço

σ_{desc}	Tensão de descolamento do reforço de fibra de carbono
σ_f	Tensão no reforço de fibra de carbono
$\sigma_{lim,f}$	Tensão limite da fibra de carbono ($\sigma_{lim,f} = \epsilon_{lim,f} \cdot E_f$)
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
σ_r	Tensão no reforço
σ_s	Tensão no aço da armadura longitudinal de tração
σ_s'	Tensão no aço da armadura longitudinal de compressão
σ_{sp}	Tensão na armadura de protensão
$\sigma_{s,P}$	Tensão no aço referente à ação do peso próprio
$\sigma_{s,S}$	Tensão no aço referente à carga de serviço
τ	Resistência ao cisalhamento do concreto
ψ_f	Coefficiente de minoração da contribuição da fibra de carbono
ψ_1	Coefficiente usado no cálculo de V_c pela NBR 6118/80
Ψ	Coefficiente de minoração

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 Reforços executados através de chapas de aço
- Figura 2.2 Reforço com estribos externos pré-tracionados
- Figura 2.3 Reforços utilizando armadura longitudinal externa protendida
- Figura 2.4 Reforço por encamisamento
- Figura 2.5 Viga reforçada à flexão e ao cisalhamento através de barras coladas
- Figura 2.6 Modelo de cálculo do reforço com chapa contínua
- Figura 2.7 Modelo de verificação da sustentação do reforço com chapa contínua
- Figura 2.8 Reforço com chapas de aço em tiras
- Figura 2.9 Modelo para verificação da sustentação do reforço com chapas em tiras
- Figura 2.10 Reforço usando estribos internos colados
- Figura 2.11 Reforço com estribos pré-tracionados: detalhe da seção transversal (2.11.a) e esquema de dimensionamento – Modelo de Treliça (2.11.b)
- Figura 2.12 Diagrama retangular de tensões na seção da viga reforçada à flexão
- Figura 2.13 Diagrama de distribuição linear de tensões na seção antes do reforço (2.13.a), diagrama de deformação da seção antes do reforço (2.13.b) e diagrama de deformação da seção reforçada (2.13.c)
- Figura 2.14 Modelo de cálculo da sustentação da chapa de reforço à flexão
- Figura 2.15 Seção de viga reforçada por encamisamento
- Figura 2.16 Reforço à flexão através de encamisamento
- Figura 2.17 Reforço através de armadura longitudinal externa protendida
- Figura 2.18 Perfil dos cabos para duas situações de carregamento utilizando armadura longitudinal externa protendida
- Figura 2.19 Geometria e carregamento das vigas de Moraes (1997)
- Figura 2.20 Reforços de flexão e cisalhamento das vigas de Moraes (1997)
- Figura 2.21 Geometria e carregamento das vigas de Carneiro (1998)
- Figura 2.22 Reforços de flexão e cisalhamento de Carneiro (1998)
- Figura 2.23 Geometria e carregamento das vigas de Pinto e Cerqueira (2000)
- Figura 2.24 Reforços de flexão e cisalhamento das vigas de Pinto (2000) e Cerqueira (2000)
- Figura 2.25 Geometria e carregamento das vigas ensaiadas por Araújo (2000)
- Figura 2.26 Reforços de flexão e cisalhamento de Araújo (2000)
- Figura 3.1 Formulário Tipo de reforço

- Figura 3.2 Técnicas disponíveis para reforço ao cisalhamento
- Figura 3.3 Reforço com chapa contínua - Cisalhamento
- Figura 3.4 Reforço com chapas em tiras
- Figura 3.5 Reforço com tecidos de fibra de carbono - Cisalhamento
- Figura 3.6 Reforço com lâminas de fibra de carbono - Cisalhamento
- Figura 3.7 Formulário para reforço com barras coladas - Cisalhamento
- Figura 3.8 Formulário para reforço com estribos externos pré-tracionados
- Figura 3.9 Formulário para reforço por encamisamento - Cisalhamento
- Figura 3.10 Formulário para reforço com armadura longitudinal externa protendida – Cisalhamento
- Figura 3.11 Dados para reforço com armadura longitudinal externa protendida
- Figura 3.12 Técnicas de reforço à flexão
- Figura 3.13 Comprimento onde ocorre maior tensão cisalhante na interface reforço/concreto
- Figura 3.14 Formulário de reforço com chapa de aço - Flexão
- Figura 3.15 Formulário de reforço com barras coladas - Flexão
- Figura 3.16 Formulário de reforço com tecido de fibra de carbono - Flexão
- Figura 3.17 Formulário de reforço com lâmina de fibra de carbono - Flexão
- Figura 3.18 Formulário de reforço com armadura longitudinal externa protendida – Flexão
- Figura 3.19 Excentricidade máxima dos cabos de protensão
- Figura 3.20 Formulário de reforço por encamisamento - Flexão
- Figura 3.21 Técnicas de reforço à flexão e ao cisalhamento
- Figura 3.22 Formulário de reforço por encamisamento – Cisalhamento e Flexão
- Figura 3.23 Formulário de reforço com armadura longitudinal externa protendida – Cisalhamento e Flexão
- Figura 4.1 Diagrama retangular simplificado de tensões e diagrama de deformações da seção da viga

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Armadura interna das vigas de Morais (1997)
Tabela 2.2	Dados das vigas de Morais (1997)
Tabela 2.3	Características dos reforços das vigas de Morais (1997)
Tabela 2.4	Resultados obtidos nos ensaios de Morais (1997)
Tabela 2.5	Dados das vigas de Carneiro (1998)
Tabela 2.6	Características dos reforços de Carneiro (1998)
Tabela 2.7	Resultados obtidos nos ensaios de Carneiro (1998)
Tabela 2.8	Dados das vigas de Pinto e Cerqueira (2000)
Tabela 2.9	Características dos reforços de Pinto e Cerqueira (2000)
Tabela 2.10	Resultados obtidos nos ensaios de Pinto e Cerqueira (2000)
Tabela 2.11	Características dos materiais e força aplicada durante o reforço das vigas de Araújo (2000)
Tabela 2.12	Reforço usado nas vigas de Araújo (2000)
Tabela 2.13	Resultados obtidos nos ensaios de Araújo (2000)
Tabela 4.1	Técnicas de reforço das vigas analisadas
Tabela 4.2	Resistência teórica à flexão das vigas sem o reforço
Tabela 4.3	Dados das vigas analisadas
Tabela 4.4	Força cortante resistente das vigas antes do reforço
Tabela 4.5	Características dos reforços de flexão das vigas ensaiadas
Tabela 4.6	Resistência à flexão e modo de ruptura das vigas ensaiadas
Tabela 4.7	Máximos valores das tensões e deformações das vigas ensaiadas - Flexão
Tabela 4.8	Dimensões dos reforços obtidos pelo programa - Flexão
Tabela 4.9	Características dos reforços de cisalhamento das vigas ensaiadas
Tabela 4.10	Resistência ao cisalhamento e modo de ruptura das vigas ensaiadas
Tabela 4.11	Máximos valores das tensões e deformações das vigas ensaiadas - Cisalhamento
Tabela 4.12	Dimensões dos reforços obtidos pelo programa - Cisalhamento

ÍNDICE

1 – Introdução	1
2 – Revisão Bibliográfica	
2.1 – Introdução	3
2.2 – Técnicas de reforço	3
2.2.1 – Chapas de aço coladas	3
2.2.2 – Compósitos de fibra de carbono	5
2.2.3 – Armaduras externas protendidas	6
2.2.3.1 – Estribos externos pré-tracionados	7
2.2.3.2 – Armadura longitudinal externa protendida	8
2.2.4 – Encamisamento	9
2.2.5 – Vergalhões colados	9
2.3 – Modelos de cálculo	10
2.3.1 – Reforços ao cisalhamento	10
2.3.1.1 – Chapas contínuas coladas	10
2.3.1.2 – Chapas de aço em tiras	12
2.3.1.3 – Compósito de fibra de carbono em tiras (lâmina e tecido)	14
2.3.1.3.1 – Método utilizado no programa desenvolvido	14
2.3.1.3.2 – Método do ACI Committe 440 (2002)	15
2.3.1.3.2 – Método de CEB-FIP (2001)	16
2.3.1.3.2 – Método de Triantafillou (1998)	18
2.3.1.4 – Estribos de barras coladas	19
2.3.1.5 – Estribos externos pré-tracionados	19
2.3.2 – Reforços à flexão	21
2.3.2.1 – Método utilizado no programa desenvolvido	22
2.3.2.2 – Método proposto pela SIKA (1998)	25
2.3.2.3 – Método proposto por M.B.T (1996)	26
2.3.2.4 – Método do ACI Committe 440 (2002)	27
2.3.2.5 – Método do CEB-FIP (2001)	28
2.3.3 – Reforços ao cisalhamento e à flexão	29

2.3.3.1 – Encamisamento	29
2.3.3.2 – Armadura longitudinal externa protendida	31
2.4 – Estudos realizados na COPPE	33
2.4.1 – Morais (1997)	33
2.4.2 – Carneiro (1998)	37
2.4.3 – Pinto (2000) e Cerqueira (2000)	40
2.4.4 – Araújo (2000)	44
2.5 – Análise dos métodos	48
3 – Apresentação do programa	
3.1 – Introdução	49
3.1 – Modelos de cálculo	49
3.2 – Descrição do programa	52
3.2.1 – Reforços ao cisalhamento	52
3.2.2 – Reforços à flexão	59
3.3.3 – Reforços ao cisalhamento e à flexão	65
4 – Aplicação do programa	
4.1 – Introdução	68
4.2 – Resistência teórica das vigas antes do reforço	69
4.2.1 – Flexão	69
4.2.2 – Cisalhamento	70
4.3 – Dimensionamento dos reforços	74
4.3.1 – Flexão	74
4.3.1 – Cisalhamento	80
5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	86
Referências Bibliográficas	88
Anexo - Listagem do programa	92

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A partir da década de 50 do século passado, o concreto armado vem se estabelecendo como o material estrutural mais utilizado no mundo.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas a respeito de sua tecnologia, técnicas construtivas e ferramentas analíticas e computacionais capazes de proporcionar peças mais esbeltas e otimizadas. Entretanto essas estruturas, se não projetadas e executadas de maneira adequada, podem apresentar grandes deformações e fissuração, ficando mais sujeitas à deterioração. (CÁNOVAS, 1998).

As estruturas em geral, em contato com o ambiente agressivo de cidades industrializadas, podem apresentar patologias, fazendo com que seja necessário sua recuperação ou reforço.

A necessidade de se modificar a utilização inicialmente proposta para a estrutura levará também à realização de um projeto de recuperação e reforço. (Ibracon, 1989)

Além dos casos de reabilitação de estruturas e mudança de utilização, os reforços se tornam necessários também nos casos de erros de projeto ou construção e alteração das normas (Crea, 2001).

Para executar um projeto de reforço estrutural deve-se inicialmente diagnosticar o problema e tomar as medidas emergenciais necessárias; verificar a viabilidade técnica e econômica do projeto; investigar o estado da estrutura, através de ensaios não-destrutivos ou semi-destrutivos, considerando sua rigidez e redistribuição de cargas; selecionar a melhor técnica e os materiais utilizar; projetar e calcular o reforço; e finalmente executar o trabalho com um rigoroso controle de qualidade.

Devem ser utilizados materiais com boa durabilidade, baixa permeabilidade, boa resistência estrutural, boa aderência ao concreto e ao aço, baixa retração, boa trabalhabilidade, fácil aplicação e propriedades compatíveis com o concreto e o aço, visando garantir a eficiência do processo de reforço.

As vigas devem ser descarregadas, retirando toda carga acidental, e nos casos em que isso não é permitido, deverão ser feitas as devidas considerações no cálculo do reforço.

Vale ressaltar que, até o momento, não há normalização no Brasil destinada ao projeto e execução de reforço de estruturas.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um programa para auxiliar o engenheiro no projeto de reparo e reforço de vigas de concreto armado. O programa utiliza até 14 técnicas de reforço, permitindo uma análise rápida e eficaz da melhor técnica a ser empregada em cada caso.

No capítulo 2 é apresentado um resumo sobre cada técnica utilizada no programa, alguns modelos de cálculo e estudos realizados na COPPE sobre o comportamento de vigas reforçadas.

O capítulo 3 apresenta o programa desenvolvido neste trabalho.

A demonstração da eficácia dos métodos de dimensionamento usados no programa desenvolvido foi realizada no capítulo 4, utilizando-se resultados de vigas ensaiadas em estudos anteriores. Os reforços obtidos pelo programa e os ensaiados puderam ser comparados, observando-se, ao final, a existência de divergências muito pequenas.

As conclusões gerais do trabalho e algumas sugestões para futuros estudos são apresentadas no capítulo 5.

A listagem do programa pode ser vista no Anexo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentadas, de maneira resumida, as técnicas de reforço implementadas ao programa, os modelos de cálculo utilizados para cada técnica e alguns estudos realizados na COPPE sobre o comportamento de vigas reforçadas.

2.2 – Técnicas de reforço

2.2.1 – Chapas de aço coladas

A técnica de chapas coladas com adesivo epóxico para reforço de vigas à flexão e/ou ao cisalhamento é uma das mais usadas devido à facilidade de execução, limpeza na aplicação, além de possibilitar rápida reutilização da estrutura. É uma técnica que proporciona pequenas alterações geométricas na estrutura e gera um aumento da resistência e da rigidez da peça, diminuindo flechas, rotações e aberturas de fissuras.

A figura 2.1 mostra os diferentes tipos de reforços realizados com chapas de aço.

O CEB (1983) apresenta algumas recomendações que visam garantir a eficiência desta técnica, como: perfeita aderência entre concreto, resina e chapa; espessura máxima da camada de resina epóxica de 1,5 mm; espessura da chapa de aço menor ou igual a 3,0 mm, a não ser que sejam utilizados dispositivos especiais de ancoragem nas extremidades da chapa, como chumbadores de expansão; manutenção de uma pressão leve e uniforme na colagem das chapas no concreto, durante um tempo que depende do tipo de adesivo e da temperatura ambiente (mínimo 24 horas); proteção da região reforçada contra mudanças de temperatura e contra fogo.

Segundo Bauer (2000), a adesividade é a propriedade fundamental nesta técnica de reforço, e está relacionada à qualidade do adesivo, às condições das superfícies dos materiais ligados e às propriedades destes materiais.

A preparação da superfície de concreto onde será colado o reforço consiste na remoção da camada de cobrimento da viga e limpeza do substrato. A superfície da chapa de aço deve ser lixada, para retirar escaras e oxidação, e limpa, para que sejam removidos óleos e gordura. Em seguida, pode ser feita a aplicação homogênea do adesivo na chapa de aço e no concreto. Para garantir a perfeita ligação entre concreto, resina e chapa é necessário que durante a cura da resina seja aplicada uma leve e constante pressão na chapa contra o concreto.

É sugerido por Freitas (1997) o uso de chumbadores nas extremidades das tiras de reforço ao cisalhamento, como uma alternativa para evitar o descolamento da chapa. Além disso, os chumbadores são utilizados para fixação dos estribos externos de chapa durante o período de cura da cola. As chapas de reforço de flexão podem ser ancoradas através do reforço de cisalhamento com tiras em “U”, ajudando, assim, na sua sustentação pelo concreto.

Na colagem de chapas contínuas podem ser formadas bolhas de ar entre a viga e a chapa, onde se acumula água que penetra por fissuras da viga, provocando a corrosão da chapa de dentro para fora, não sendo possível a observação do início deste processo e nem impedi-lo de acontecer.

Desta forma, no caso de reforço ao cisalhamento, a melhor opção é o uso de chapas em tiras (figura 2.1.a) no lugar de chapa contínua (figura 2.1.b). Este método permite também a visualização e o acompanhamento do processo de fissuração da peça e evita o desperdício de material.

Para reforço à flexão, é recomendado utilizar chapa com largura inferior à largura da viga e preencher as extremidades com adesivo, evitando desta forma penetração de água (ver figura 2.1.c).

Esta técnica tem como desvantagens:

- Não permitir visualização das fissuras na região sob o reforço, se este for contínuo;
- Impossibilidade de detectar corrosão na face oculta da chapa;
- Tendência de descolamento dos bordos da chapa devido à concentração de tensões;

- Baixa resistência da chapa ao fogo, sendo, portanto necessária uma proteção por meio de um revestimento isolante.

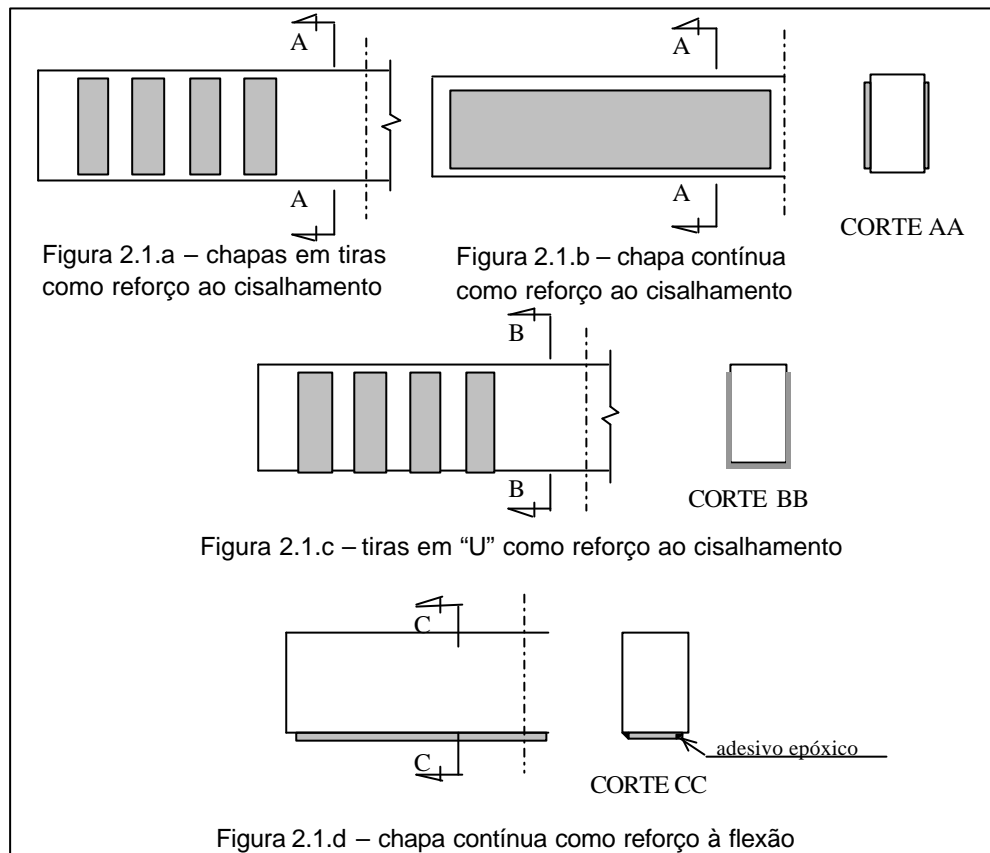


Figura 2.1 – Reforços executados através de chapas de aço.

2.2.2 – Compósitos de fibra de carbono (CFC)

A fibra de carbono é um material novo e altamente promissor, baseado nas grandes forças de ligação Carbono-Carbono e na leveza do átomo de carbono. (MEIER, 1992)

Os compósitos de fibra de carbono são uma combinação de filamentos de fibra de carbono com uma matriz de resina epóxica e podem ser encontrados no mercado na forma de lâminas ou tecidos. A resina epóxica presente no compósito tem como objetivo envolver e proteger as fibras de agressões ambientais além de aglutiná-las (MACHADO, 2002).

O módulo de elasticidade da fibra de carbono varia entre 100 GPa e 300 GPa, sendo que este valor para o compósito fica em torno de 70 GPa e 240 GPa , para tecido e

lâmina respectivamente (Shehata, 1996). A curva tensão-deformação do compósito é linear até sua ruptura, caracterizando a fragilidade do material.

Este método de reforço à flexão e/ou ao cisalhamento é de rápida execução devido à leveza do material e à simplicidade de sua aplicação, trazendo redução no tempo de interdição da estrutura. Ele pouco altera a geometria da peça, praticamente não aumenta a carga permanente da estrutura e permite a adaptação a várias formas devido à sua boa flexibilidade.

Os tecidos e lâminas de fibra de carbono podem ser fornecidos em qualquer comprimento. Para garantir bons resultados é preciso ficar atento à preparação do substrato e à aplicação dos compósitos. É sugerido por Araújo (2002) o uso máximo de cinco camadas de tecido de fibra de carbono, para não prejudicar o comportamento do reforço.

Ressalta-se a alta resistência química a ácidos e bases, além do bom comportamento à fadiga e a resistência à corrosão, o que garante grande durabilidade e nenhuma manutenção (TOUTANJI E GÓMEZ, 1997).

Dentre as desvantagens desta técnica estão: impossibilidade de visualizar fissuras na interface substrato/reforço, se o reforço for contínuo; alto custo do compósito; tendência de descolamento dos bordos devido à concentração de tensões; necessidade de proteção contra fogo e raios ultravioletas; coeficiente de dilatação térmica do compósito diferente daquele do concreto; proporcionar ruptura frágil da peça.

Caso seja previsto um sistema de ancoragem, consegue-se combater os efeitos da concentração de tensões, evitando ruptura frágil por destacamento do concreto. A limitação da deformação do reforço em 5‰ para lâminas e 6‰ para tecidos evita a ruptura frágil da peça por descolamento do reforço.

Os modos de ruína possíveis para a estrutura reforçada com CFC podem ser sintetizados em três grupos (JUVANDES, 1999):

- Ruínas clássicas de estruturas de concreto armado (escoamento das armaduras ou esmagamento do concreto);
- Ruína dos novos materiais aplicados (compósito ou adesivo);

- Ruína na ligação concreto/adetivo/fibra.

2.2.3 – Protensão externa

A grande vantagem de utilizar esta técnica de reforço é permitir atuar sobre elementos deformados e submetidos a cargas de serviços, sem haver a necessidade de descarregá-los.

Com a protensão é possível transferir esforços de estruturas comprometidas aos cabos de protensão, fazendo com que esforços sejam canalizados para regiões da estrutura mais adequadas e com maior resistência para absorvê-los. (BAUER, 2000)

Sendo assim, ao contrário da protensão interna aderente, a protensão exterior submete a estrutura a cargas externas quase inalteradas, que normalmente são introduzidas em regiões críticas, visando à diminuição de abertura de fissuras e à redução das flechas.

As principais vantagens desta técnica são:

- Possibilidade de execução do reforço sem a necessidade de descarregar a estrutura;
- Resultado do reforço é alcançado logo após a conclusão da protensão;
- Podem ser eliminadas grande parte das deformações existentes no elemento ao se aplicar a protensão;
- Provoca a redução na deformação das armaduras internas.

A alternativa de utilizar a técnica de protensão deverá ser estudada esteticamente, de maneira que todo o conjunto possa ser facilmente ocultado, através de recobrimento de argamassa ou elementos de gesso ou forro falso. (BAUER, 2000)

2.2.3.1 – Estribos externos pré-tracionados

A técnica de reforço de vigas ao cisalhamento utilizando estribos externos pré-tracionados (figura 2.2) é de fácil execução e manutenção, além de oferecer baixo custo. Este método reduz a abertura de fissuras de cisalhamento e a deformação dos estribos internos bem como permite a visualização da fissuração.

Por não serem aderentes ao concreto, espera-se que sua deformação seja pequena e aproximadamente constante. Porém, segundo Fontes (1997), existe uma pequena variação de deformação destes estribos de reforço decorrentes da deformação da viga, que gera um acréscimo de tensão nesta armadura ao atingir a ruptura, portanto, por medida de segurança, o autor recomenda que a pré-tração aplicada nestes estribos seja limitada em $0,75.f_y$.

Além disso, para que não haja perdas por relaxação na tensão aplicada às barras, é recomendado por Shehata (1996) reduzir ainda mais o valor desta tensão, adotando o limite de $0,5.f_y$.

Foi constatado por Michel (1996) que, em termos de eficiência do reforço, não há diferença entre o uso de concreto de alta resistência e concreto convencional.

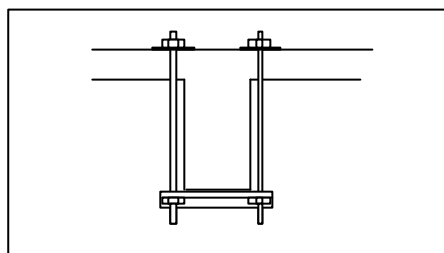


Figura 2.2 – Reforço com estribos externos pré-traçados

2.2.3.2 – Armadura longitudinal externa protendida

Devem ser dimensionados o número de cabos e sua tensão de trabalho, além de projetadas as ancoragens e os desviadores. Estes desviadores são posicionados de forma que o perfil dos cabos fique semelhante ao perfil do diagrama de momento fletor a ser combatido. A excentricidade criada pelos desviadores contribui como reforço ao cisalhamento (ver figura 2.3).

O reforço através de armadura longitudinal externa protendida proporciona redução das flechas e das aberturas de fissuras.

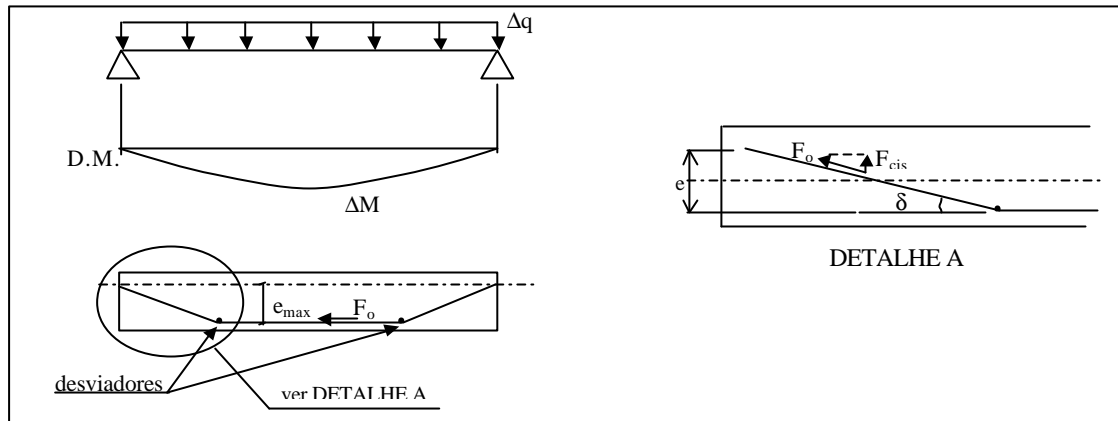


Figura 2.3 – Reforços utilizando armadura longitudinal externa protendida

2.2.4 – Encamisamento

É um sistema de reforço muito empregado em virtude das vantagens que apresenta frente aos outros tipos de reforços, como economia e não exigência de mão de obra qualificada. Porém existem algumas desvantagens como:

- Alteração considerável nas dimensões originais dos elementos, o que, em certos casos, pode ser desaconselhável ou antiestético;
- Considerável aumento do peso próprio da estrutura;
- Necessidade de aguardar até que o concreto obtenha resistência e rigidez convenientes.

É a única técnica viável para reforço em cisalhamento quando a tensão na biela é maior que o limite estabelecido por norma.

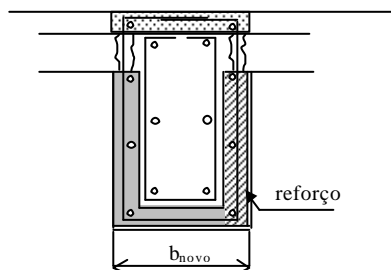


Figura 2.4 – Reforço por encamisamento

2.2.5 – Barras coladas

É uma técnica econômica utilizada para reforço ao cisalhamento e à flexão de vigas de concreto armado. Consiste em remover a camada de cobrimento da viga onde serão introduzidas as barras de armadura longitudinal ou estribos, preenchendo depois os espaços com resina epoxídica, após a limpeza do substrato (ver figura 2.5).

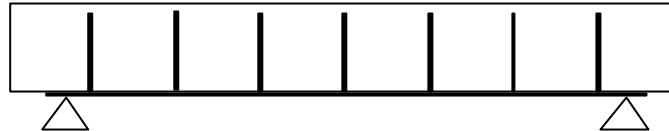


Figura 2.5 – Viga reforçada à flexão e ao cisalhamento através de barras coladas

2.3 – Modelos de cálculo

2.3.1 – Reforços ao cisalhamento

Todos os tipos de reforço ao cisalhamento citadas neste estudo são dimensionados de forças através do modelo de treliça.

Inicialmente deve ser verificada a tensão na biela de compressão do concreto, através das equações 2.1 ou 2.2. Atendido o limite de tensão estabelecido por norma, pode ser realizado o dimensionamento do reforço através de uma das técnicas citadas anteriormente, caso contrário a única técnica viável para reforço é a de encamisamento da seção da viga.

$$s_b = \frac{V + DV}{b.z.\text{sen}q.\text{cos}q} \quad (\text{estribos verticais}) \quad (2.1)$$

$$s_b = \frac{V + DV}{b.z.(\text{cot}q + \text{cota}).\text{sen}^2q} \quad (\text{estribos inclinados}) \quad (2.2)$$

Não é considerada a contribuição da armadura interna nem a contribuição do concreto para o dimensionamento do reforço. Portanto, somente o reforço deve ser capaz de resistir ao acréscimo de esforço cortante na estrutura.

2.3.1.1 – Chapas contínuas coladas (Modelo adotado no programa desenvolvido)

Para o dimensionamento deste reforço, é necessário analisar a região da chapa que sofre maior sollicitação. A espessura da chapa é calculada de forma que a seção transversal que recebe maior sollicitação (A_{ch}) seja capaz de resistir à força (F_{ch}) nela atuante (ver figura 2.6).

Pelo equilíbrio de forças chega-se à expressão 2.3, considerando duas chapas na seção da viga:

$$DV = 2.F_{ch} \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

A equação 2.3 pode ser escrita também da forma abaixo:

$$F_{ch} = \frac{DV}{2 \cdot \cos \theta} \quad (2.4)$$

Através da figura 2.6, tem-se que:

$$A_{ch} = \frac{(d-x) \cdot t_{ch}}{\sin \theta} \quad (2.5)$$

Sabendo que:

$$A_{ch} = F_{ch} / f_{y, ch} \quad (2.6)$$

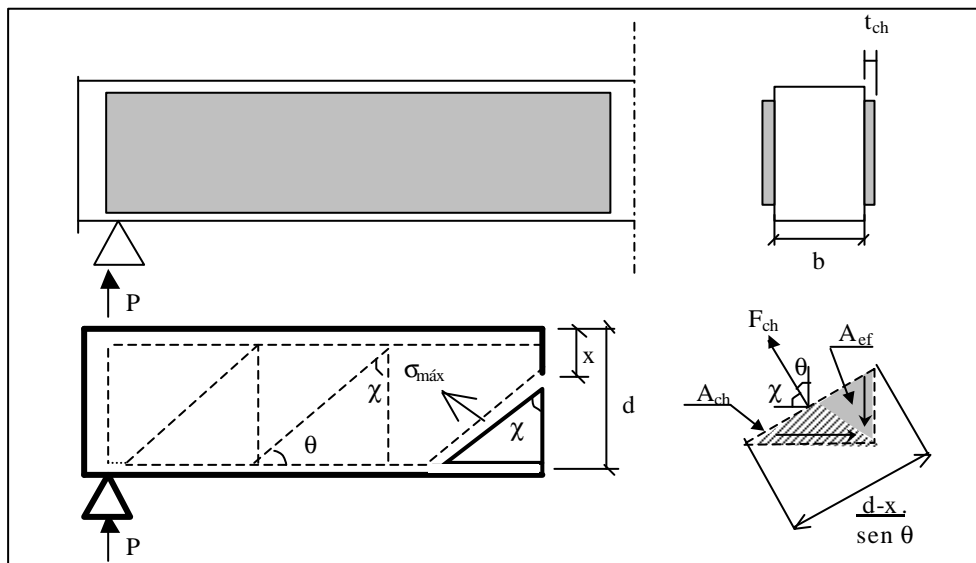


Figura 2.6 – Modelo de cálculo do reforço com chapa contínua

Usando as expressões (2.4) e (2.5) na expressão (2.6), obtém-se a equação final para dimensionamento da espessura da chapa de reforço:

$$t_{ch} = \frac{DV.tg\eta}{2.(d-x).f_{y,ch}} \quad \text{£ } 6 \text{ mm} \quad (2.7)$$

Para chapas com espessura maior que 3 mm é recomendado utilizar dispositivos de ancoragem como, por exemplo, chumbadores de expansão.

Além da espessura da chapa, outro fator que deve ser verificado neste dimensionamento é a sustentação do reforço por parte do concreto, para evitar destacamento e conseqüentemente ruptura brusca da peça. Para assegurar isto, limitam-se as tensões de cisalhamento entre a chapa e o concreto, na região mais solicitada da chapa (A_{ef}), à resistência do concreto ao cisalhamento. Tendo por base o modelo de Mohr Coulomb modificado, pode-se estabelecer este valor igual à resistência do concreto à tração.

A partir da figura 2.7, tem-se:

$$A_{ef} = 0,5.(d-x)^2 .cot\eta \quad (2.8)$$

$$F_{ch} = \frac{(d-x) . t_{ch} . f_{y,ch}}{sen\eta} \quad (2.9)$$

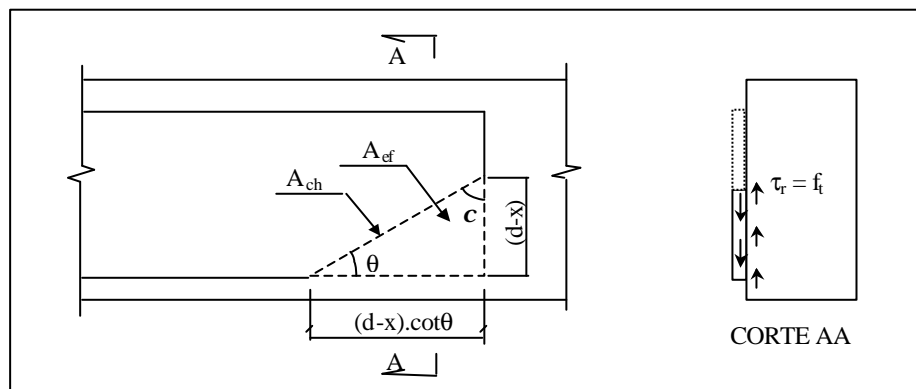


Figura 2.7 – Modelo de verificação da sustentação do reforço com chapa contínua

Sabendo que $\tau = F_{ch} / A_{ef}$, então chega-se à equação final de verificação da sustentação do reforço:

$$t = \frac{2 \cdot t_{ch} \cdot f_{y,ch}}{(d-x) \cdot \cos \varphi} \cdot g \cdot f_t \quad (2.10)$$

Sendo que o coeficiente de minoração (γ) adotado no programa desenvolvido foi de 0,5. (Shehata, 1996)

2.3.1.2 - Chapas de aço em tiras (Modelo usado no programa desenvolvido)

As chapas de reforço devem obedecer à mesma regra de espaçamento usada para estribos internos ($s \leq d/2$ ou 300 mm), assegurando desta forma o trabalho conjunto dos dois elementos (Shehata, 1996).

A partir da figura 2.8, tem-se:

$$DV = \frac{z \cdot \cot \varphi \cdot 2 \cdot b_{ch} \cdot t_{ch} \cdot f_{y,ch}}{s_r} \quad (2.11)$$

E assim, portanto, chega-se à equação final para obter a espessura necessária à chapa para uma determinada largura (b_{ch}) definida:

$$t_{ch} = \frac{DV \cdot s_r}{z \cdot \cot \varphi \cdot 2 \cdot b_{ch} \cdot f_{y,ch}} \leq 6 \text{ mm} \quad (2.12)$$

Nos reforços com chapas em tiras também recomenda-se utilizar dispositivos de ancoragem para chapas com espessura maior que 3 mm.

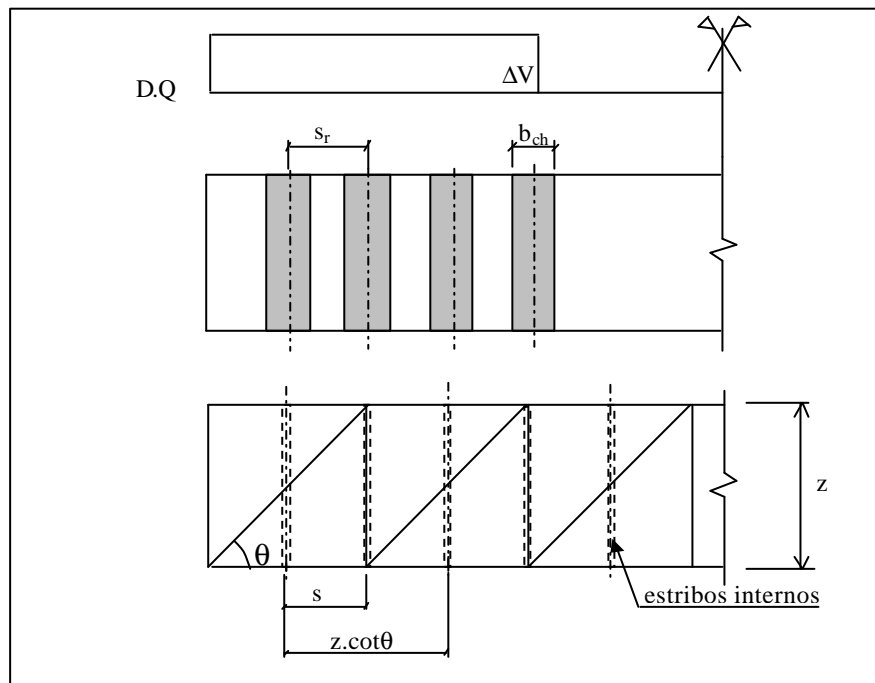


Figura 2.8 – Reforço com chapas de aço em tiras

Uma vez definida a seção de chapa, é preciso verificar sua sustentação pelo concreto. Seguindo o modelo de Mohr Coulomb modificado, as tensões cisalhantes na ligação reforço - concreto (τ) devem ser inferiores à resistência à tração do concreto (f_t), para não haver ruptura nesta ligação. De acordo com a expressão 2.15, essas tensões são proporcionais à tensão e à espessura da chapa e inversamente proporcionais à altura da perna dos estribos de chapa. Considerando a tensão máxima igual à tensão de escoamento e a altura da perna dos estribos valor igual a aproximadamente a altura útil (d), conclui-se que devem ser utilizadas chapas de menor espessura possível, para se obter valores baixos de tensões de cisalhamento e evitar ruptura brusca.

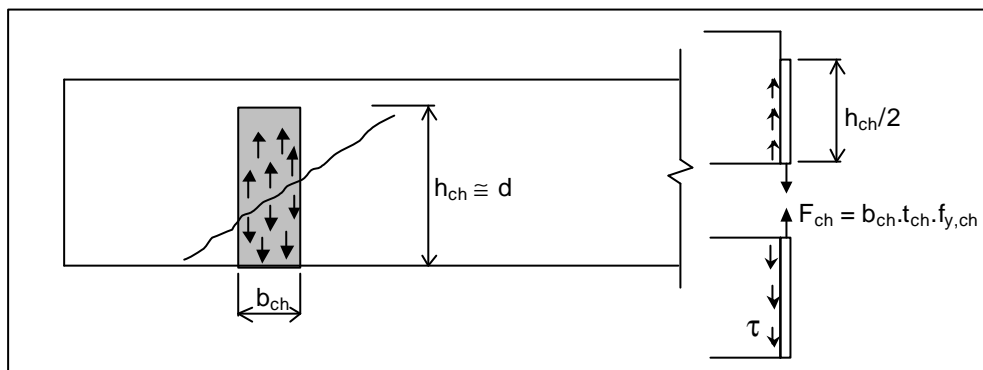


Figura 2.9 – Modelo para verificação da sustentação do reforço com chapa em tiras

Analisando a figura 2.9 chega-se às expressões:

$$F_{ch} = b_{ch} \cdot t_{ch} \cdot f_{y,ch} \quad (2.13)$$

$$t = \frac{F_{ch}}{b_{ch} \cdot d/2} \quad (2.14)$$

E assim, utilizando as fórmulas 2.14 e 2.15, obtém-se:

$$t = \frac{2 \cdot t_{ch} \cdot f_{y,ch}}{d} \quad (2.15)$$

2.3.1.3 – Compósito de fibra de carbono (lâmina e tecido)

2.3.1.3.1 - Modelo utilizado no programa desenvolvido

O método de cálculo para esta técnica de reforço ao cisalhamento é similar ao usado para chapas de aço em tiras, no entanto necessita de uma atenção maior quanto à possibilidade de descolamento do reforço devido à concentração de tensões.

Para evitar o descolamento deste reforço, limita-se sua deformação ao valor máximo de 5‰ para lâminas e 6‰ para tecidos de fibra de carbono, valores estes sugeridos em trabalhos experimentais da COPPE a serem resumidos no final deste capítulo.

Quanto ao reforço com lâminas de fibra de carbono, deve-se entrar com o valor da espessura da lâmina, e dimensionar a largura necessária ao reforço, sendo que a largura mínima é 50 mm.

$$b_f = \frac{DV \cdot s_r}{z \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \cdot 2 \cdot t_f \cdot s_{desc}} \quad (2.16)$$

No caso de reforço com tecido de fibra de carbono, é importante considerar que cada camada de tecido tem aproximadamente 0,3 mm e que é recomendado utilizar no máximo 5 camadas no reforço. Para uma determinada largura (b_f) das tiras, tem-se:

$$t_f = \frac{DV \cdot s_r}{z \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \cdot 2 \cdot b_f \cdot s_{desc}} \quad (2.17)$$

Nas expressões acima, s_{desc} é a tensão correspondente a sua deformação limite (5‰ ou 6‰).

A verificação da sustentação do reforço pelo concreto também é necessária neste caso, e é efetuada através da equação:

$$t = \frac{2 \cdot t_f \cdot s_{desc}}{d} \leq g \cdot f_t \quad (2.18)$$

Vê-se, portanto, que reforços com maiores t_f e s_{desc} são mais propensos ao destacamento.

2.3.1.3.2 – Método do ACI Committe 440 (2002)

A capacidade resistente ao cisalhamento das peças reforçadas com compósito de fibra de carbono é dada pela soma de três parcelas:

$$V_R = \Phi.(V_c + V_{sw} + y_f V_f) \quad (2.19)$$

sendo:

y_f = Coeficiente de minoração da contribuição da fibra de carbono. É sugerido o valor de 0,85 para os casos de reforço em “U” (duas laterais e o fundo) ou reforço nas duas laterais. Para os casos em que a seção transversal é totalmente envolvida pelo compósito, a norma recomenda o valor de 0,95.

Φ = Coeficiente dado pela ACI 318 (1999), igual a 0,85.

Conforme mencionado anteriormente, no cálculo é considerado que somente o reforço deve ser capaz de resistir ao acréscimo de carga na estrutura.

A capacidade resistente devido ao reforço com fibra de carbono (CFC) deve ser determinada através da equação:

$$V_f = \frac{A_f \cdot s_{lim,f} (\sen a_r + \cos a_r) \cdot d_f}{S_r} \quad (2.20)$$

O ACI Committee 440 (2002) recomenda como deformações máximas a admitir nos compósitos de fibra de carbono os valores abaixo:

$\varepsilon_{lim,f} = 0,4\% \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu}$; para peças totalmente envolvidas por fibras de carbono.

$\varepsilon_{lim,f} = K_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,4\%$; para peças com envolvimento em “U” ou apenas nas faces laterais.

O coeficiente de redução (K_v) é devido à aderência do reforço na seção da viga e é dado pela equação 2.21, sendo L_e , t_f e d em mm e f_{cd} e E_f em MPa.

$$K_v = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot L_e}{11900 \cdot e_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.21)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} \quad (2.22)$$

$$K_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27} \right)^{2/3} \quad (2.23)$$

$$K_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}, \text{ para envolvimento em "U"} \quad (2.24)$$

$$K_2 = \frac{d_f - 2L_e}{d_f}, \text{ para reforço nas laterais} \quad (2.25)$$

Os valores de K_1 e K_2 levam em consideração a resistência do concreto e a configuração do reforço de cisalhamento, respectivamente.

2.3.1.3.3 – Método do CEB-FIP (2001)

A capacidade resistente ao cisalhamento pode ser calculada como se segue abaixo.

$$V_R = \min(V_c + V_{sw} + V_f; V_{Rd2}) \quad (2.26)$$

Sendo que a contribuição da fibra é obtida pela fórmula a seguir.

$$V_f = 0,9 \cdot e_{lim,f} \cdot E_f \cdot r_f \cdot b \cdot d \cdot (\cot \alpha + \cot \alpha_r) \cdot \text{sen} \alpha_r \quad (2.27)$$

Sendo adotado para T o valor de 45° .

A taxa de reforço de fibra é dada pelas equações abaixo.

$$r_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \text{sen} \alpha}{b}, \text{ para reforço contínuo} \quad (2.28)$$

$$r_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot b_f}{b \cdot s_r}, \text{ para reforço em tiras} \quad (2.29)$$

O valor da deformação limite da fibra é dado por:

$$e_{lim,f} = \frac{e_{fk,e}}{g_f} \quad (2.30)$$

Sendo: $e_{fk,e} = k \cdot e_{fe}$

O coeficiente γ_t depende do controle de qualidade na aplicação do reforço nos casos em que o modo de ruína é devido à ruptura da fibra de carbono. Nos casos de ruptura da estrutura em virtude do descolamento ou destacamento do reforço este coeficiente tem o valor de 1,30. O valor de k é 0,8.

Para determinação da deformação efetiva (ϵ_{fe}), são dadas as fórmulas abaixo, sendo f_{cm} em MPa e E_f em GPa. A equação 2.31 é utilizada para peças envolvidas por fibra em seus 4 lados. As equações 2.32 e 2.33 são para peças com reforço nas laterais ou com envolvimento em “U”, devendo ser usado o menor valor dado por estas duas fórmulas.

$$e_{fe} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot r_f} \right)^{0,30} \cdot e_{fu} \quad (2.31)$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} e_{fe} = 0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot r_f} \right)^{0,56} \cdot 10^2 \\ e_{fe} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot r_f} \right)^{0,30} \cdot e_{fu} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

$$e_{fe} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot r_f} \right)^{0,30} \cdot e_{fu} \quad (2.33)$$

2.3.1.3.4 - Método de Triantafillou (1998)

A partir de dados obtidos em estudos experimentais existentes sobre reforço com compósitos de fibra, foi encontrada uma relação entre a rigidez axial e a deformação da viga e que deu origem às seguintes fórmulas empíricas para determinação de $e_{lim,f}$.

$$0 < \eta_f \cdot E_f < 1 \quad e_{lim,f} = 0,0119 - 0,0205 \cdot (r_f \cdot E_f) + 0,0104 \cdot (r_f \cdot E_f)^2 \quad (2.34)$$

$$\eta_f \cdot E_f > 1 \quad e_{lim,f} = -0,00065 \cdot (r_f \cdot E_f) + 0,00245 \quad (2.35)$$

Tendo-se $e_{lim,f}$, pode ser encontrada a parcela de resistência do compósito de fibra através do modelo de treliça, adotando bielas de compressão a 45°, com η_f igual a 1,15.

$$V_f = \frac{r_f}{g_f} \cdot E_f \cdot e_{fe} \cdot z \cdot b \cdot (\cot \alpha_r + 1) \sin \alpha_r \quad (2.36)$$

A taxa da armadura de reforço de fibra (ρ_f) pode ser calculada pelas equações 2.28 e 2.29.

2.3.1.4 - Estribos de barras coladas (Modelo usado no programa desenvolvido)

Seguindo o mesmo procedimento usado para dimensionar reforços com chapas em tiras, o diâmetro dos estribos pode ser calculado através da expressão:

$$f_r = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta V \cdot S_r}}{\sqrt{p \cdot z \cdot \cot q \cdot f_{y,r}}} \quad (2.37)$$

Deve-se limitar o diâmetro (ϕ_r) da barra em no máximo 8 mm, evitando desta forma um raio muito grande nas dobras e facilitando a execução do reforço.

Deve ser verificado o comprimento de ancoragem das barras (figura 2.10.a) a partir da NBR 6118 (2003). A verificação da ancoragem não se torna necessária ao se soldar uma barra no topo do estribo (ver figura 2.10.b).

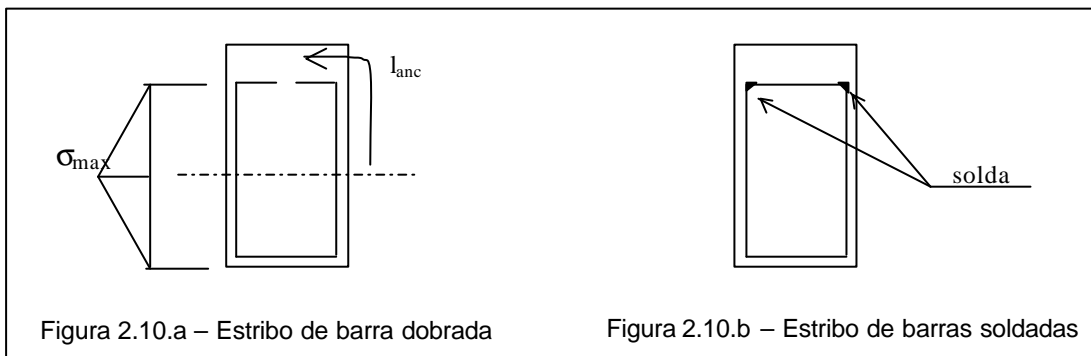


Figura 2.10 – Reforço usando estribos internos colados

2.3.1.5 - Estribos externos pré-tracionados (Modelo usado no programa desenvolvido)

A figura 2.11 mostra o detalhe de uma viga reforçada com esta técnica (2.11.a) e o esquema usado para o dimensionamento (2.11.b).

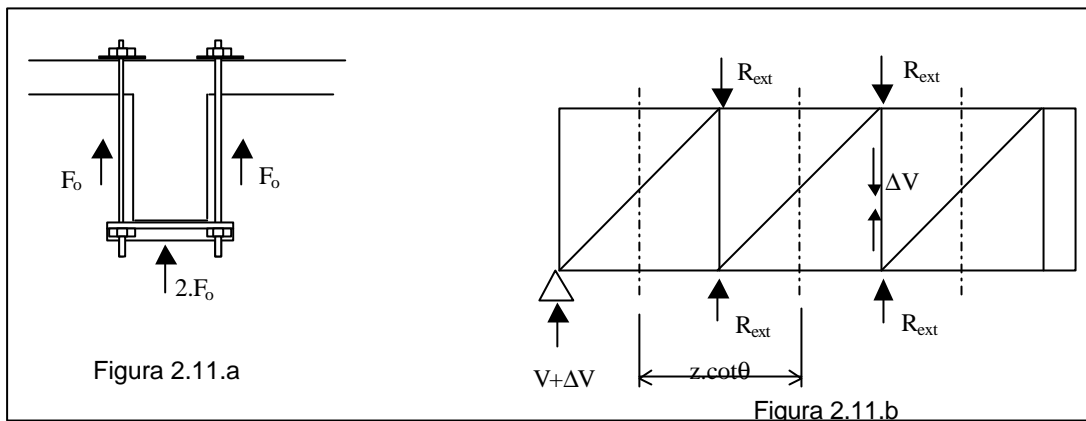


Figura 2.11 – Reforço com estribos pré-tensionados: detalhe da seção transversal (2.11.a) e esquema de dimensionamento – Modelo de Treliça (2.11.b).

A partir das figuras 2.11.a e 2.11.b, chega-se a:

$$R_{ext} = \frac{z \cdot \cot \theta}{S_r} \cdot 2 \cdot F_o \quad (2.38)$$

Considerando que a força de protensão deve anular a carga adicionada na estrutura, então:

$$DV = R_{ext} \quad (2.39)$$

ou seja:

$$DV = \frac{z \cdot \cot \theta}{S_r} \cdot 2 \cdot F_o \quad (2.40)$$

Como:

$$F_o = s_{s,p} \cdot A_{fr} \quad (2.41)$$

Utilizando (2.40) e (2.41), obtém-se:

$$DV = \frac{z \cdot \cot \theta}{S_r} \cdot \frac{s \cdot p \cdot f_r^2}{2} \quad (2.42)$$

Para não haver perdas por relaxação na tensão aplicada às barras, deve-se fixar esta tensão em no máximo $0.5 \cdot f_y$, valor sugerido por Shehata (1996) para reforço com estribos externos pré-tensionados. Assim tem-se:

$$f_r = \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta V \cdot S_r}{p \cdot z \cdot \cot \theta \cdot f_y}} \quad (2.43)$$

Como o diâmetro (f_r) encontrado não prevê rosca na barra, deve-se somar a este diâmetro a espessura relativa à rosca.

$$f_{final} = f_r + rosca \quad (2.44)$$

Além do dimensionamento da barra, deve ser previsto no cálculo também a verificação da tensão nas regiões de contato do dispositivo de ligação das barras com o fundo e o topo da viga.

2.3.2 – Reforços à flexão

Os reforços à flexão podem ser executados usando-se barras coladas, chapas de aço ou fibra de carbono, além da técnica que utiliza armadura longitudinal externa protendida e da técnica de encamisamento, que reforçam também a viga quanto ao cisalhamento.

Em geral consideram-se no cálculo de reforço à flexão: seções transversais planas até a ruptura; aderência perfeita entre aço e concreto e compósito e concreto; resistência à tração do concreto nula.

O dimensionamento é normalmente feito no estado limite último, sendo as diferenças entre os métodos apresentados apenas as deformações limites dos materiais e os diagramas de tensão - deformação no concreto adotados (parábola retângulo ou parabólico).

Antes de executar o reforço, deve-se retirar toda a carga acidental atuante na estrutura, tendo-se assim apenas tensões referentes ao seu peso próprio, o que garante um melhor desempenho do reforço, pois leva a menores níveis de deformações nas armaduras internas.

O procedimento de cálculo usado é iterativo e consiste nas seguintes etapas:

- Arbitra-se a posição da linha neutra (x);
- Calculam-se os níveis de deformação em cada material, admitindo a linearidade em sua variação;
- A partir das deformações, calculam-se as tensões em cada material;
- Verifica-se o equilíbrio das forças internas da seção reforçada.

Se as forças internas não se equilibrarem, é preciso alterar o valor da posição da linha neutra (x) até que isso ocorra.

2.3.2.1 – Modelo utilizado no programa desenvolvido (para reforço com barras, chapa de aço ou compósito de fibra de carbono colados)

É importante lembrar que toda a carga acidental deve ser retirada da estrutura. Desta forma, a deformação do reforço deve ser próxima a $\epsilon_{S,S} - \epsilon_{S,P}$, sendo $\epsilon_{S,S}$ a deformação do aço referente à carga de serviço e $\epsilon_{S,P}$ a deformação do aço referente à ação do peso próprio.

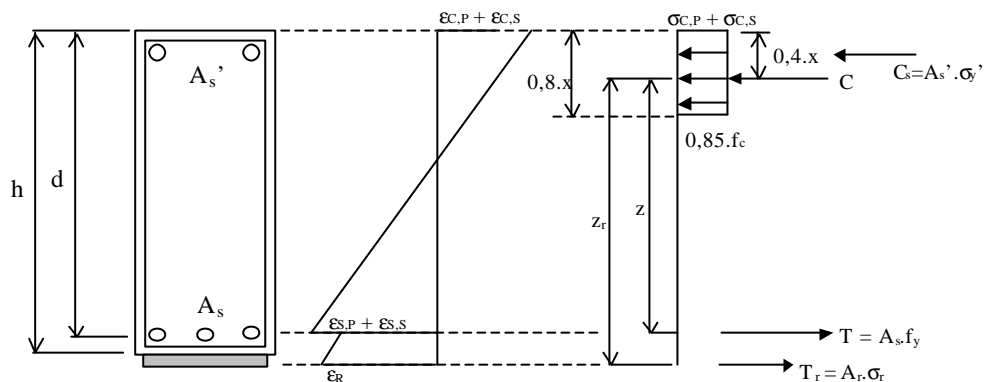


Figura 2.12 – Diagrama retangular de tensões na seção da viga reforçada à flexão

A capacidade resistente à flexão da seção após o reforço pode ser obtida através da expressão 2.45:

$$M_{U,r} = T \cdot z + C_s \cdot z' + T_r \cdot z_r \quad (2.45)$$

Onde: $z = d - 0,4 \cdot x$; $z' = 0,4 \cdot x - d'$; $z_r = d_r - 0,4 \cdot x$.

$$x = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot s_s' + A_r \cdot s_r}{0,85 \cdot f_c \cdot 0,8 \cdot b} \quad (2.46)$$

Inicialmente é adotado como valor da tensão no aço comprimido (s_s') e da tensão no reforço (s_r) o valor da sua tensão de escoamento. Após a determinação da linha neutra e da área de reforço, através de iteração usando as equações 2.45 e 2.46, estas tensões devem ser verificadas.

A deformação no aço comprimido pode ser verificada pela equação 2.47. Se esta deformação for menor que a deformação de escoamento do aço, deve ser recalculada a área do reforço e a altura da linha neutra, usando a tensão correspondente a este novo valor de deformação.

$$e'_s = \frac{(x_{novo} - d') \cdot 0,0035}{x_{novo}} \geq e_y \quad (2.47)$$

Para a determinação da deformação no reforço é preciso obter a posição da linha neutra (x_e) no estado de serviço (momento em que a seção é reforçada), onde as tensões são baixas e de distribuição quase linear (figura 2.13.a), sendo que a altura da linha neutra passa pelo centróide da seção de concreto armado transformada.

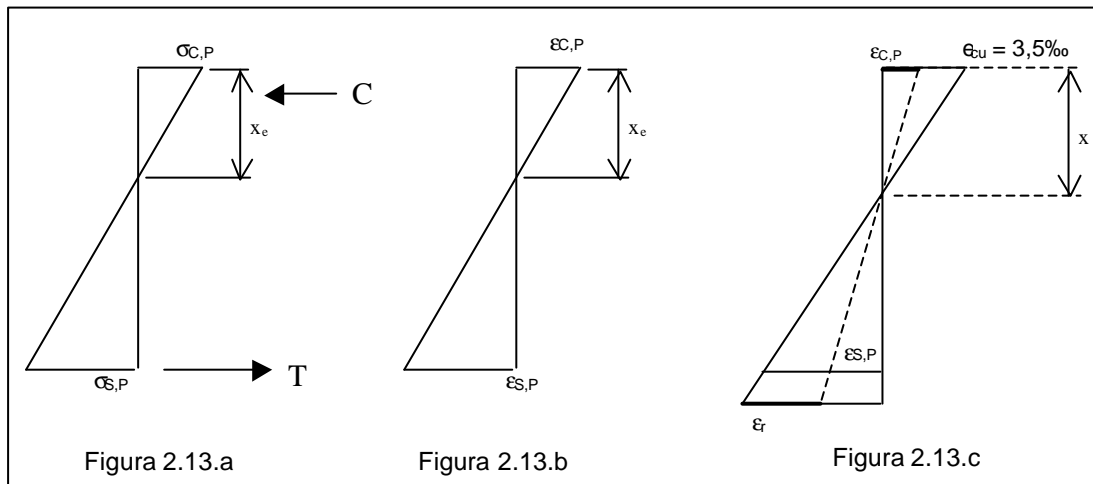


Figura 2.13 - Diagrama de distribuição linear de tensões na seção antes do reforço (2.13.a), Diagrama de deformação da seção antes do reforço (2.13.b) e diagrama de deformação da seção reforçada (2.13.c)

$$x_e = \left(\sqrt{\left(\frac{E_s \cdot r}{E_c} \right)^2 + 2 \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot r} - \frac{E_s}{E_c} \cdot r \right) d \quad (2.48)$$

Após a remoção da carga acidental, o momento na seção é igual ao momento devido ao peso próprio da estrutura (M_{pp}).

Sabendo que o momento devido à carga de serviço ($M_s \cong 0,5 \cdot M_u$), e que o momento devido à carga de peso próprio ($M_{pp} \cong 0,5 \cdot M_s$), determinamos a tensão no aço tracionado devido ao peso próprio, ou seja, a tensão no aço antes do reforço.

$$\mathbf{s}_{S,P} = \frac{M_{pp}}{A_y \cdot \left(d - \frac{x_e}{3}\right)} \quad (2.49)$$

Encontrado o valor da tensão no aço tracionado devido à ação do peso próprio, e consequentemente a sua deformação ($\epsilon_{SP} = \sigma_{SP}/E_s$), é possível, através do diagrama de deformação da seção (figura 2.13.b), determinar a deformação no concreto também devido à ação do peso próprio e, assim, obter a deformação do reforço (figura 2.13.c).

$$\mathbf{e}_{C,P} = \frac{x_e \cdot \mathbf{e}_{S,P}}{d - x_e} \quad (2.50)$$

$$\mathbf{e}_r = \frac{(0,0035 - \mathbf{e}_{C,P}) \cdot (d_r - x_{novo})}{x_{novo}} \geq \mathbf{e}_y(\text{aço}) \text{ ou } \mathbf{e}_{desc}(\text{fibra de carbono}) \quad (2.51)$$

Se esta deformação for menor que a deformação limite do material de reforço (ϵ_y para aço e ϵ_{desc} para fibra de carbono), deve ser recalculada a área do reforço e a altura da linha neutra, usando este novo valor de deformação.

Como a tensão no reforço é igual à tensão das barras existentes menos a tensão devido à ação do peso próprio, pode ser escolhido para o reforço um tipo de aço com limite elástico inferior ao das barras, sendo a situação ideal de projeto aquela em que tanto as barras quanto o reforço atingem o escoamento.

No dimensionamento de reforços de chapa colada ou fibra de carbono, é necessário verificar também a sustentação do reforço pelo concreto. As tensões de cisalhamento entre o reforço e o concreto são limitadas ao valor da capacidade resistente do concreto ao cisalhamento, usando o comprimento do reforço necessário para atender a este limite (ver figura 2.14).

Tendo por base o modelo de Mohr Coulomb modificado, pode-se afirmar que a resistência do concreto ao cisalhamento é igual à resistência do concreto à tração.

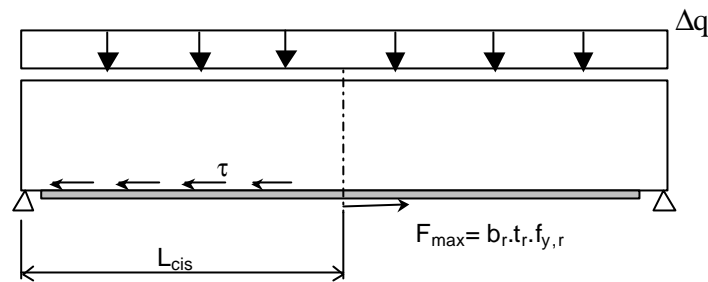


Figura 2.14 – Modelo de cálculo da sustentação da chapa de reforço à flexão

Como mostra a figura 2.14, tem-se:

$$t = \frac{t_{ch} \cdot f_{y,ch}}{L_{cis}} \leq g \cdot f_t \quad (\text{sendo adotado } \gamma=0,5) \quad (2.52)$$

2.3.2.2 - Método proposto pela SIKA (1998)

No método de dimensionamento de vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono, considera-se que a influência da armadura de compressão é muito pequena, e, portanto, pode ser desprezada nos cálculos do momento último.

Além disso, são considerados também os parâmetros k_1 e k_2 para determinação e localização da resultante de compressão no concreto. Estes valores de k_1 e k_2 são obtidos através das fórmulas abaixo:

Para $\epsilon_c = 2,0 \text{ ‰}$:

$$k_1 = -\frac{1000}{6} (500 \epsilon_c^2 + 3 \epsilon_c) \quad (2.53)$$

$$k_2 = 1 - \frac{750 \epsilon_c + 4}{2(500 \epsilon_c + 3)} \quad (2.54)$$

E para $2,0 \text{ ‰} = \epsilon_c = 3,0 \text{ ‰}$:

$$k_1 = 1 + \frac{1}{1500 \epsilon_c} \quad (2.55)$$

$$k_2 = 1 - \frac{0,5 - (3 \cdot 10^6 \epsilon_c^2)^{-1}}{1 + (1500 \epsilon_c)^{-1}} \quad (2.56)$$

Onde:

$$\epsilon_c = -\frac{\epsilon_f}{h - x} x + \epsilon_o \quad (2.57)$$

sendo $|e_c| = 3,0\%$

$$C_c = k_1 \cdot b \cdot f_c \quad (2.58)$$

Da mesma forma que o método anterior, são determinadas as dimensões do reforço e a posição da linha neutra através das equações 2.59 e 2.60.

$$M = A_s \cdot f_y \cdot (d - k_2 \cdot x) + A_f \cdot s_f \cdot (h - k_2 \cdot x) \quad (2.59)$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_y + A_f \cdot s_f}{k_1 \cdot b \cdot f_c} \quad (2.60)$$

2.3.2.3 – Método proposto por MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES (1996)

É também um método para vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono.

Neste dimensionamento também é desprezada a influência da armadura de compressão na obtenção do momento resistente.

O diagrama de tensão no concreto usado é o da ACI 318 (1992), que considera:

$$b = 0,85 - \frac{0,05 \cdot (f_c - 28)}{7} \geq 0,65 \quad , \text{ para } f_c > 28 \text{ MPa} \quad (2.61)$$

$$e_{cu} = 3,0 \text{ ‰}$$

A parcela de compressão no concreto pode ser calculada através da equação abaixo:

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot \beta \cdot x \quad (2.62)$$

Sendo a deformação da fibra de carbono calculada através da equação 2.63:

$$e_f = \frac{h - x}{x} \cdot e_{cu} - e_o \quad (2.63)$$

Desta forma tem-se que:

$$M = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{b}{2} x \right) + A_f \cdot e_f \cdot E_f \left(h - \frac{b}{2} x \right) \quad (2.64)$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_y + A_f \cdot s_f}{0,85 \cdot b \cdot f_c} \quad (2.65)$$

2.3.2.4 – Método do ACI Committee 440 (2002)

Este método é utilizado para vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono. O momento resistente da viga reforçada é dado por:

$$M_r = A_s \cdot s_s \left(d - \frac{b \cdot x}{2} \right) + y_f \cdot A_f \cdot s_{\text{lim},f} \left(h - \frac{b \cdot x}{2} \right) \quad (2.66)$$

O valor para o fator de redução (γ_f) aplicado à contribuição da fibra de carbono é de 0,85. São usados os valores de t_f e d em mm e f_c e E_f em MPa.

A deformação no reforço é dada por:

$$e_{\text{lim},f} = e_{cu} \left(\frac{h-x}{x} \right) - e_o \leq k_m \cdot e_{fu} \quad (2.67)$$

Onde o coeficiente k_m é obtido pelas equações abaixo

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot e_{fu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360.000} \right) \leq 0,90, \text{ para } n \cdot E_f \cdot t_f = 180.000 \quad (2.68)$$

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot e_{fu}} \left(\frac{90.000}{n \cdot E_f \cdot t_f} \right) \leq 0,90, \text{ para } n \cdot E_f \cdot t_f > 180.000 \quad (2.69)$$

Usando-se da condição de compatibilidade das deformações, a deformação do aço pode ser encontrada, conforme a equação 2.70.

$$e_s = (e_{\text{lim},f} + e_o) \cdot \left(\frac{d-x}{h-x} \right) \quad (2.70)$$

O nível de tensão no compósito é encontrado através da fórmula abaixo.

$$s_{\text{lim},f} = E_f \cdot e_{\text{lim},f} \quad (2.71)$$

Com as tensões e deformações dos materiais determinados através da posição da linha neutra assumida inicialmente, o equilíbrio interno das forças é verificado.

$$x = \frac{A_s \cdot s_s + A_f \cdot s_f}{g \cdot f_c \cdot b \cdot b} \quad (2.72)$$

A profundidade da linha neutra é encontrada ao satisfazer-se simultaneamente as equações 2.66 e 2.72, estabelecendo, desta forma, o equilíbrio interno das forças e a compatibilidade das deformações.

2.3.2.5 – Método do CEB-FIP (2001)

Sendo o modo de ruptura estabelecido em função do escoamento das armaduras seguido de esmagamento do concreto, o dimensionamento do reforço é feito conforme descrito a seguir.

A posição da linha neutra é calculada por:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd} + A_f E_f \cdot e_{\text{lim},f} - A_s' \cdot E_s \cdot e_s'}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot b} \quad (2.73)$$

Sendo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

A deformação na armadura interna comprimida é dada pela equação 2.74.

$$e_s' = e_{cu} \frac{x - d'}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (2.74)$$

A deformação limite da fibra de carbono ($e_{\text{lim},f}$) é calculada pela equação 2.75.

$$e_{\text{lim},f} = e_{cu} \left(\frac{h - x}{x} \right) - e_o \quad (2.75)$$

O momento resistente é dado por:

$$M_R = A_s \cdot f_{yd} (d - 0,4 \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot e_{\text{lim},f} \cdot (h - 0,4 \cdot x) + A_s' \cdot E_s \cdot e_s' \cdot (0,4 \cdot x - d') \quad (2.76)$$

Os valores a seguir devem ser verificados:

$$e_s = e_{cu} \cdot \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (2.77)$$

$$e_{\text{lim},f} \leq e_{fu} \quad (2.78)$$

2.3.3 – Reforços ao cisalhamento e à flexão

As técnicas apresentadas neste item são viáveis para reforçar vigas simultaneamente ao cisalhamento e à flexão.

2.3.3.1 – Encamisamento (Modelo usado no programa desenvolvido)

I – Reforço ao cisalhamento

Quando a tensão na biela de compressão do concreto não atende ao limite estabelecido pela norma, a única técnica viável para reforço de cisalhamento é a de encamisamento (ver figura 2.15).

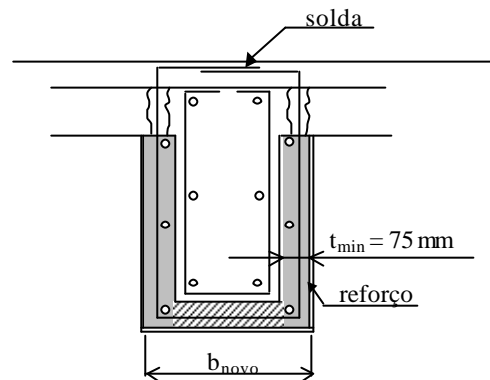


Figura 2.15 – Seção de viga reforçada por encamisamento

Para atender ao limite de tensão na biela, fixa-se este valor em $0,6.f_{cd}$ (Critério de Mohr-Coulomb), e assim é obtida a largura necessária para a viga (b_{novo}). A espessura mínima (t_{min}) do reforço é fixada em 75 mm, evitando assim o mau preenchimento da forma durante a concretagem do reforço.

$$b_{novo} = \frac{V + DV}{0,6.f_{cd}.z.senq.cosq} \quad (\text{estribos verticais}) \quad (2.79)$$

$$b_{novo} = \frac{V + DV}{0,6.f_{cd}.z.(cotq+cota).sen^2q} \quad (\text{estribos inclinados}) \quad (2.80)$$

Por fim, é dimensionada a armadura transversal segundo o modelo de treliça, sendo recomendado para o diâmetro da barra (ϕ_r) o valor máximo de 8 mm, evitando desta forma um raio muito grande nas dobras e facilitando a execução do reforço.

$$f_r = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta V \cdot s_r}{p \cdot z \cdot \cot q \cdot f_{y,r}}} \quad (2.81)$$

II – Reforço à flexão

Através do diagrama retangular simplificado de tensões na seção após o reforço (figura 2.16), são obtidas as expressões para este dimensionamento.

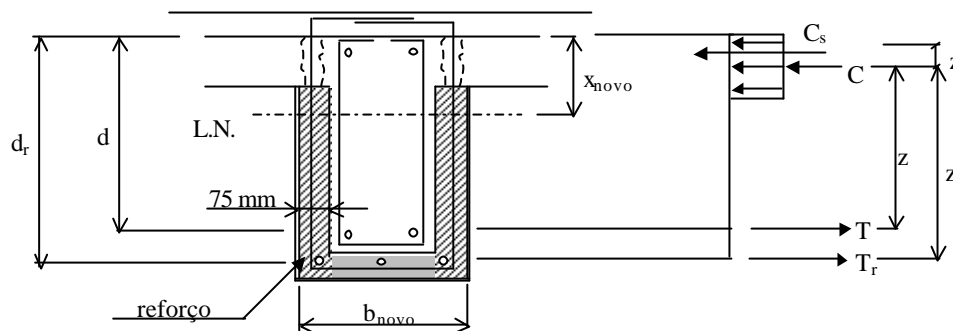


Figura 2.16 – Reforço à flexão através de encamisamento

A equação 2.45 é reescrita abaixo:

$$M_{U,r} = T \cdot z + C_s \cdot z' + T_r \cdot z_r$$

Onde: $T = A_s \cdot f_y$

$$C_s = A_s' \cdot f_y$$

$$T_r = A_r \cdot f_{y,r}$$

$$z = (d - 0,4 \cdot x_{novo})$$

$$z' = (0,4 \cdot x_{novo} - d')$$

$$z_r = (d_r - 0,4 \cdot x_{novo})$$

Portanto:

$$M_{U,r} = A_s \cdot f_y \cdot z + A_s' \cdot f_y \cdot z' + A_r \cdot f_{y,r} \cdot z_r \quad (2.82)$$

Através do diagrama de tensões obtém-se também a equação:

$$x_{novo} = \frac{A_s \cdot f_y + A_r \cdot f_{y,r} - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot 0,8 \cdot f_{cd} \cdot b_{novo}} \quad (2.83)$$

Através da expressão (2.82), inicialmente estimando z como sendo igual a $0,87.d_r$ e portanto conhecendo um valor inicial para x_{novo} , encontra-se a área de aço de reforço (A_r). Com isso, entra-se na fórmula (2.83) e obtém-se um valor para linha neutra nova (x_{novo}). Este processo é realizado até que os valores de x_{novo} sejam aproximadamente iguais, momento em que é definida a área de aço a ser utilizada.

2.3.3.2 – Armadura longitudinal externa protendida (Modelo usado no programa desenvolvido)

I – Cisalhamento

A figura 2.17 apresenta o esquema de dimensionamento deste reforço.

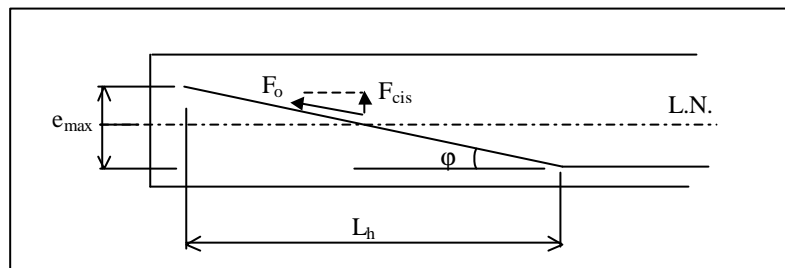


Figura 2.17 – Reforço através de armadura longitudinal externa protendida

$$\tan.j @ j @ \frac{e_{m\acute{a}x}}{L_h} \quad (2.84)$$

Adotando $F_{cis} = DV$, pode-se concluir que:

$$DV = F_o \cdot \text{sen}.j \quad (2.85)$$

Sabendo que $F_o = s_{sp} \cdot A_{sp}$ e adotando s_{sp} igual a $0,6.f_{y,sp}$, a equação final é dada abaixo:

$$A_{sp} = \frac{DV}{0,6.f_{y,sp} \cdot \text{sen}.j} \quad (2.86)$$

II – Flexão

Na figura 2.18, aparecem dois casos de vigas reforçadas com esta técnica.

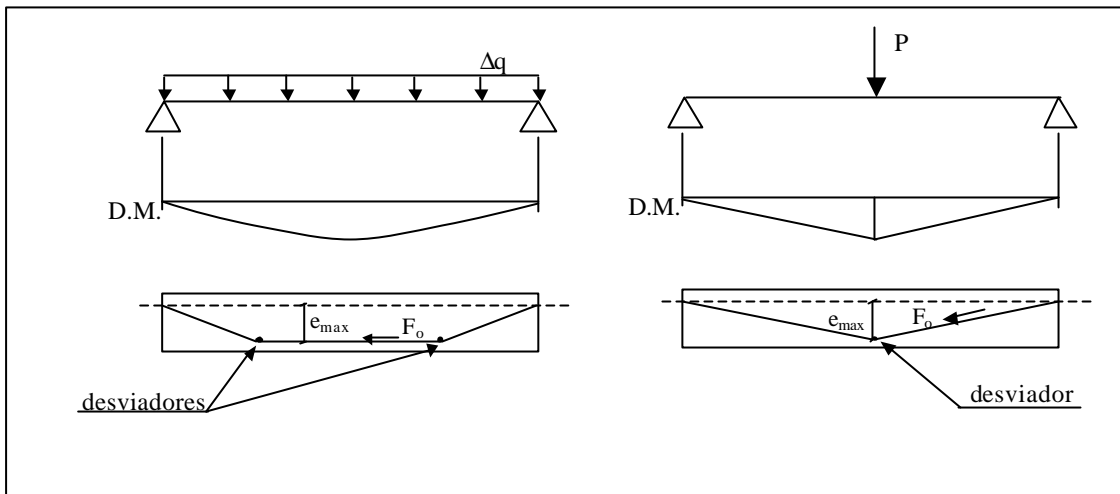


Figura 2.18 – Perfil dos cabos de protensão para duas situações de carregamento utilizando armadura longitudinal externa protendida

Sabendo que:

$$M_{p,máx} = DM \quad (2.87)$$

e portanto:

$$(F_o \cdot e)_{max} = DM \quad (2.88)$$

Tem-se assim a expressão para determinação da força de protensão nos cabos:

$$F_o = \frac{DM}{e_{max}} \quad (2.89)$$

Encontrada a força de protensão necessária ao reforço, é possível determinar a área dos cabos.

$$A_{sp} = \frac{F_o}{s_{s,p}} \quad (2.90)$$

Conhecendo a área de cada cabo ($A_{s\phi}$) é encontrado o número de cabos necessários ao reforço, sendo recomendado adotar-se um número par, evitando cabos no plano de simetria da viga.

$$n^{\circ} \text{ cabos} = \frac{A_{sp}}{A_{s\phi}} \quad (2.91)$$

Deve ser verificada a tensão de contato no concreto para o caso de ancoragem com dispositivos metálicos, e quando a ancoragem se faz com consolos de concreto, deve ser analisado o cisalhamento na face consdo-viga.

2.4 – Estudos realizados na COPPE

2.4.1 - Morais (1997)

Este estudo foi direcionado às técnicas de reforço à flexão utilizando chapas de aço coladas e tirantes externos pré-tracionados bem como às técnicas de reforço ao cisalhamento utilizando chapas de aço em tiras coladas e estribos externos pré-tracionados.

Foram ensaiadas quatro vigas de concreto armado que tinham seção transversal retangular de 150 mm x 450 mm, 4000 mm de vão, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas dispostas de acordo com a figura 2.19. A armadura interna é mostrada na tabela 2.1.

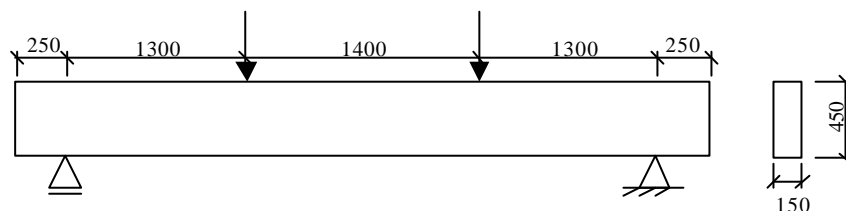


Figura 2.19 – Geometria e carregamento das vigas de Morais (1997).

Tabela 2.1 – Armadura interna das vigas de Morais (1997).

Viga	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal (nos vãos de cisalhamento)
VM-1R	2 ϕ 16 mm + 3 ϕ 20 mm	ϕ 8 mm c/ 100 mm
VM-1A	2 ϕ 16 mm + 1 ϕ 20 mm	ϕ 6.3 mm c/ 200 mm
VM-1B	2 ϕ 16 mm + 1 ϕ 20 mm	ϕ 6.3 mm c/ 200 mm
VM-2A	3 ϕ 16 mm	ϕ 5 mm c/ 250 mm

A viga VM-1R não recebeu nenhum reforço e serviu portanto como referência às vigas reforçadas.

O ensaio consistiu em dois ciclos de carga, sendo o primeiro para fissurar a viga e o segundo para alcançar a ruptura das vigas. No intervalo entre os dois ciclos, as vigas foram mantidas sob carregamento constante e reforçadas à flexão e ao cisalhamento, sendo que a carga durante o reforço era de 50 kN para a viga VM-2A e 40 kN para as demais.

A tabela 2.2 mostra as propriedades dos materiais e a carga última das vigas ensaiadas. Os tipos de reforços usados e suas características são mostradas na figura 2.21 e na tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Dados das vigas de Morais (1997).

Viga	f_{cm} (Mpa)	$f_{y,exp}$ (Mpa)	$P_{u,exp}$ (kN)
VM-1R	34,4	547	200
VM-1A	33,5		175
VM-1B	34,4		
VM-2A	34,4	511	190

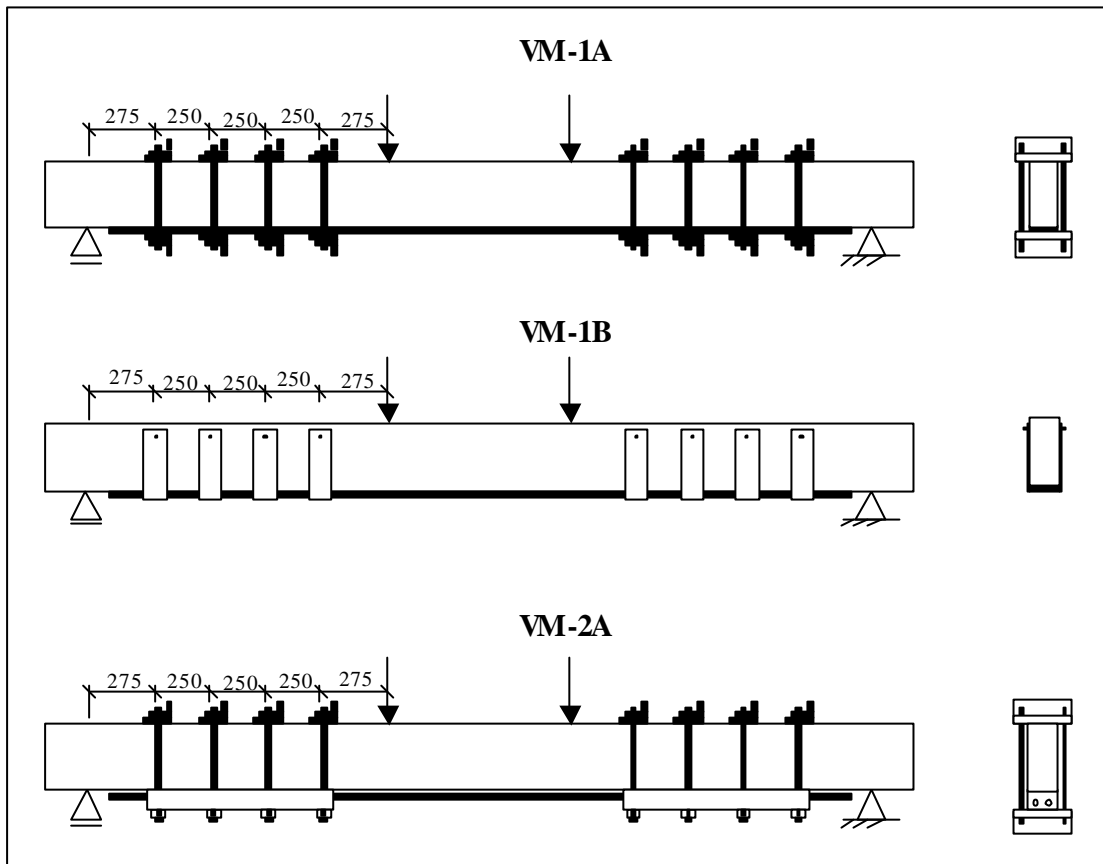


Figura 2.20 – Reforços de flexão e cisalhamento das vigas de Morais (1997).

A tabela 2.4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Foi verificado que os reforços de flexão foram responsáveis por um acréscimo de até 106% na capacidade portante das vigas em relação ao valor teórico obtido através do diagrama retangular de tensões no concreto, além de reduzirem a deformação da armadura interna de flexão diminuindo portanto a abertura de fissuras.

A resistência ao cisalhamento aumentou cerca de 30% para as vigas VM-1A e VM-1B e 110% para a viga VM-2A, em comparação com o valor teórico obtido através do modelo da treliça.

Os reforços de cisalhamento permitiram a visualização da fissuração e funcionaram como dispositivo de ancoragem ao reforço de flexão.

Tabela 2.3 – Características dos reforços das vigas de Morais (1997).

Reforços de flexão							
Viga	tipo	t_r (mm)	b_r (mm)	f (mm)	L_r (mm)	F_o (mm)	f_y (Mpa)
VM-1A	chapa colada	4.76	150	-	3800	-	333
VM-1B							
VM-2A	tirantes externos pré-tracionados ligados a blocos de concreto colados na viga	-	-	20		88	547
Reforços de cisalhamento							
Viga	tipo	t_r (mm)	b_r (mm)	f (mm)	S_r (mm)	F_o (mm)	f_y (Mpa)
VM-1A	estribos externos pré-tracionados	-	-	12.5	250	49	668
VM-1B	estribos em "U" colados	1	90	-		-	333
VM-2A	estribos externos pré-tracionados	-	-	12.5		49	688

Os resultados obtidos mostraram que o modelo de treliça de Mörsch pode ser usado para avaliar a capacidade resistente ao esforço cortante das vigas reforçadas tanto por estribos externos pré-tracionados quanto por estribos formados por chapas em tiras coladas.

Tabela 2.4 – Resultados obtidos nos ensaios de Morais (1997).

Vigas	VM-1R	VM-1A	VM-1B	VM-2A
Modo de Ruptura	Escoamento da armadura interna seguido de esmagamento do concreto na região de momento fletor máximo	Escoamento da armadura interna e da chapa colada seguido de esmagamento do concreto na região de momento fletor máximo		Esmagamento de canto do bloco de ancoragem seguido de esmagamento do concreto na região de momento fletor máximo

2.4.2 - Carneiro (1998)

Este trabalho teve como objetivo investigar o comportamento de estruturas de concreto armado reforçadas tanto à flexão, através de barras longitudinais coladas, quanto ao cisalhamento, utilizando estribos externos pré-tracionados, barras coladas e chapas de aço em tiras coladas.

Foram confeccionadas três vigas de concreto armado com seção transversal de 150 mm x 450 mm e comprimento de 4500 mm, com vão de 4000 mm. A armadura interna é mostrada na tabela 2.5, junto com outros dados. As vigas foram bi-apoiadas e carregadas conforme mostrado na figura 2.21.

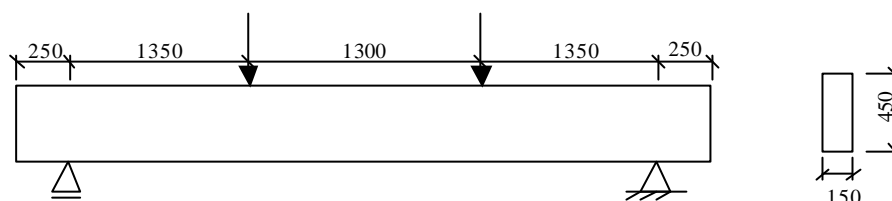


Figura 2.21 – Geometria e carregamento das vigas de Carneiro (1998)

As vigas foram submetidas a dois ciclos de carregamento, sendo inicialmente carregadas até 80% da resistência à flexão teórica e no outro ciclo carregadas até a ruptura. No intervalo entre os dois ciclos as vigas foram reforçadas à flexão e ao cisalhamento, sob um carregamento de 50 kN.

Detalhes dos reforços são mostrados na figura 2.22 e na tabela 2.6.

As três vigas reforçadas possuíam dimensões e concreto semelhantes aos da viga VM-1R ensaiada por Moraes (1997), que foi tomada como referência neste estudo.

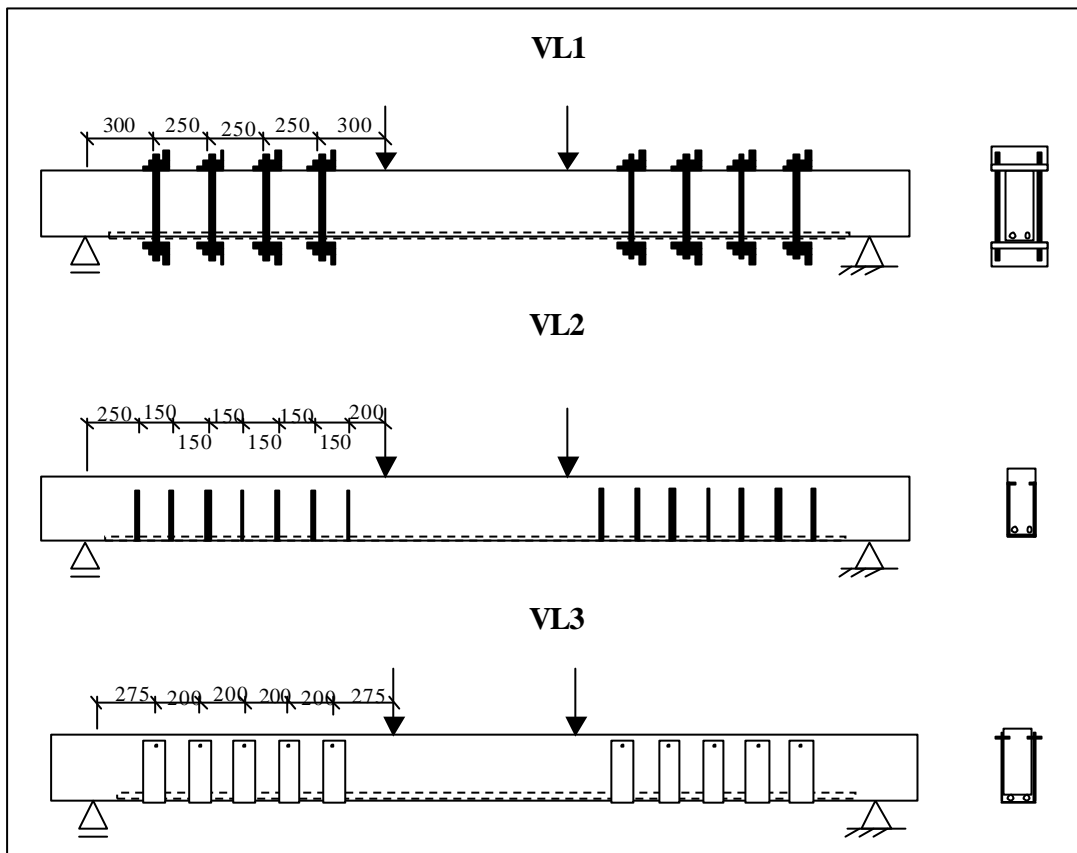


Figura 2.22 – Reforços de flexão e cisalhamento de Carneiro (1998).

Na tabela 2.7 são mostrados os resultados encontrados experimentalmente.

Ao final do estudo, foi verificado que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento de rigidez e capacidade resistente além de redução da deformação da armadura interna, o que mostra que a armadura interna e o reforço trabalharam juntos.

Tabela 2.5 – Dados das vigas de Carneiro (1998).

Viga	f_{cm} (MPa)	$f_{y,exp}$ (MPa)	ρ_T (%)	ρ_L (%)	$P_{u,exp}$ (kN)
VM-1R	34.4	547	0.67	2.19	200
VL-1	34.1	510	0.14	0.95	170
VL-2	39.8				130
VL-3	40.2				175

ρ_T - taxa geométrica de armadura transversal

ρ_L - taxa geométrica de armadura longitudinal

Tabela 2.6 – Características dos reforços de Carneiro (1998).

Reforços de flexão							
Viga	tipo	f_r (mm)		L_r (mm)	$f_{y,exp}$ (Mpa)		
VL-1	Barras longitudinais externas coladas	20		3800	545		
VL-2							
VL-3							
Reforços de cisalhamento							
Viga	tipo	t_r (mm)	b_r (mm)	f_r (mm)	S_r (mm)	F_o (mm)	$f_{y,exp}$ (Mpa)
VL-1	estribos externos pré-tracionados	-	-	12.5	250	36	670
VL-2	estribos externos de barras coladas	-	-	20	150	-	
VL-3	estribos externos de chapa de aço em tiras colados	1	90	-	250	-	

Foi notado também que houve um acréscimo na carga de ruptura à flexão de 45% a 95% nas vigas reforçadas com barras longitudinais coladas em relação à resistência teórica da viga sem reforço.

O reforço de cisalhamento proporcionou um aumento da carga de ruptura em cerca de 30% no caso da viga VL2 e 80% nos casos das vigas VL1 e VL3, em relação à resistência teórica da viga sem reforço.

A utilização de barras coladas foi eficiente como reforço ao cisalhamento, porém não contribuiu como dispositivo de ancoragem ao reforço de flexão.

Os ensaios indicaram que o modelo de treliça de Mörsch pode ser usado para avaliação da resistência ao cisalhamento de vigas reforçadas com estribos externos pré-tracionados, barras e chapas de aço em tiras coladas.

Tabela 2.7 – Resultados obtidos nos ensaios de Carneiro (1998).

Vigas	VL-1	VL-2	VL-3
Modo de Ruptura	Esmagamento do concreto e escoamento das armaduras longitudinal interna e de reforço	Escoamento das armaduras longitudinal interna e de reforço	Fendilhamento do concreto ao longo da armadura longitudinal interna e escoamento das armaduras longitudinal interna e de reforço

2.4.3 - Pinto (2000) e Cerqueira (2000)

O objetivo destes trabalhos foi analisar a eficiência do uso de lâminas de fibras de carbono coladas com resina epóxica como reforço à flexão, ao cisalhamento e ao cisalhamento e à flexão.

Ensaíram-se cinco vigas de concreto armado, sendo que as vigas V1 e V3 foram ensaiadas por Pinto (2000), as vigas V2 e V4 foram ensaiadas por Cerqueira (2000) e a viga V5 foi ensaiada em conjunto pelos dois autores.

Elas tinham seção transversal retangular de 150 mm x 450 mm, 4000 mm de vão, foram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas a 1350 mm de cada apoio, conforme mostrado na figura 2.23.

A tabela 2.8 mostra a resistência do concreto, a armadura interna e a carga de ruptura de cada viga ensaiada.

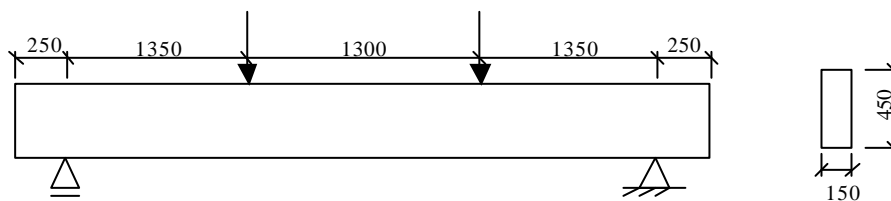


Figura 2.23 – Geometria e carregamento das vigas de Pinto e Cerqueira (2000).

O ensaio consistiu em dois ciclos de carga antes das vigas serem reforçadas e, após sete dias de cura do adesivo usado no reforço, foi aplicado um terceiro ciclo de carga até a ruptura das vigas. Durante o reforço foi mantido um carregamento de 40kN.

Foram utilizadas no reforço as lâminas de fibra de carbono Sika Carbodur S512 coladas com adesivo epóxico SIKADUR – 30.

Na figura 2.24 são mostrados os reforços utilizados. As características dos reforços são detalhadas na tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Dados das vigas de Pinto e Cerqueira (2000).

Viga	f_{cm} (Mpa)	r_t (%)	r_L (%)	$P_{u,exp}$ (kN)
V1	34.8	0.67	0.96	140
V2	36.6	0.13	2.22	182
V3	38.3	0.67	0.96	150
V4	39.2	0.13	2.22	180
V5	34.7	0.13	0.96	165

A viga VM-1R ensaiada por Moraes (1997) possuía a mesma geometria, além de dimensões e capacidade resistente à flexão teórica semelhantes às cinco vigas e foi tomada como referência neste estudo.

Os resultados encontrados são mostrados na tabela 2.10.

A técnica de reforço utilizando lâminas de fibra de carbono mostrou ser de rápida execução, devido à leveza do material e à facilidade no preparo e aplicação da resina. Quanto ao uso de lâminas inclinadas para reforço ao cisalhamento, foi constatada uma maior dificuldade na execução desse reforço e não foi apresentada vantagem significativa em relação ao uso de lâminas verticais.

Tabela 2.9 – Características dos reforços de Pinto e Cerqueira (2000).

Viga	t_f (mm)	b_f (mm)	E_f (Mpa)	Reforço de flexão	L_r (mm)	Reforço de cisalhamento	L_r (mm)
V1	1,2	50	165	2 lâminas na face tracionada da viga	3800	-	-
V2				-	-	5 lâminas coladas verticalmente e 5 lâminas coladas inclinadas de 45° em cada face lateral da viga	400
V3				3 lâminas na face tracionada da viga	3800	-	-
V4				-	-	5 lâminas coladas verticalmente e 5 lâminas coladas inclinadas de 45° em cada face lateral da viga e bandas de amarração nas extremidades das lâminas	400
V5				3 lâminas na face tracionada e 1 lâmina na parte inferior de cada face lateral da viga	3800		400

Os resultados dos ensaios mostraram que o reforço com lâminas de fibra de carbono aumentou consideravelmente a capacidade resistente das vigas e reduziu a deformação da armadura interna, sendo que o reforço à flexão proporcionou um aumento na rigidez da viga.

Verificou-se ser necessário um sistema de ancoragem nas extremidades das lâminas para evitar o destacamento do concreto. Para evitar descolamento do reforço foi sugerido limitar a deformação da lâmina de fibra de carbono em 5%.

Segundo os autores, o modelo de treliça de Mörsch pode ser usado para avaliar a resistência ao cisalhamento de vigas reforçadas com fibras de carbono.

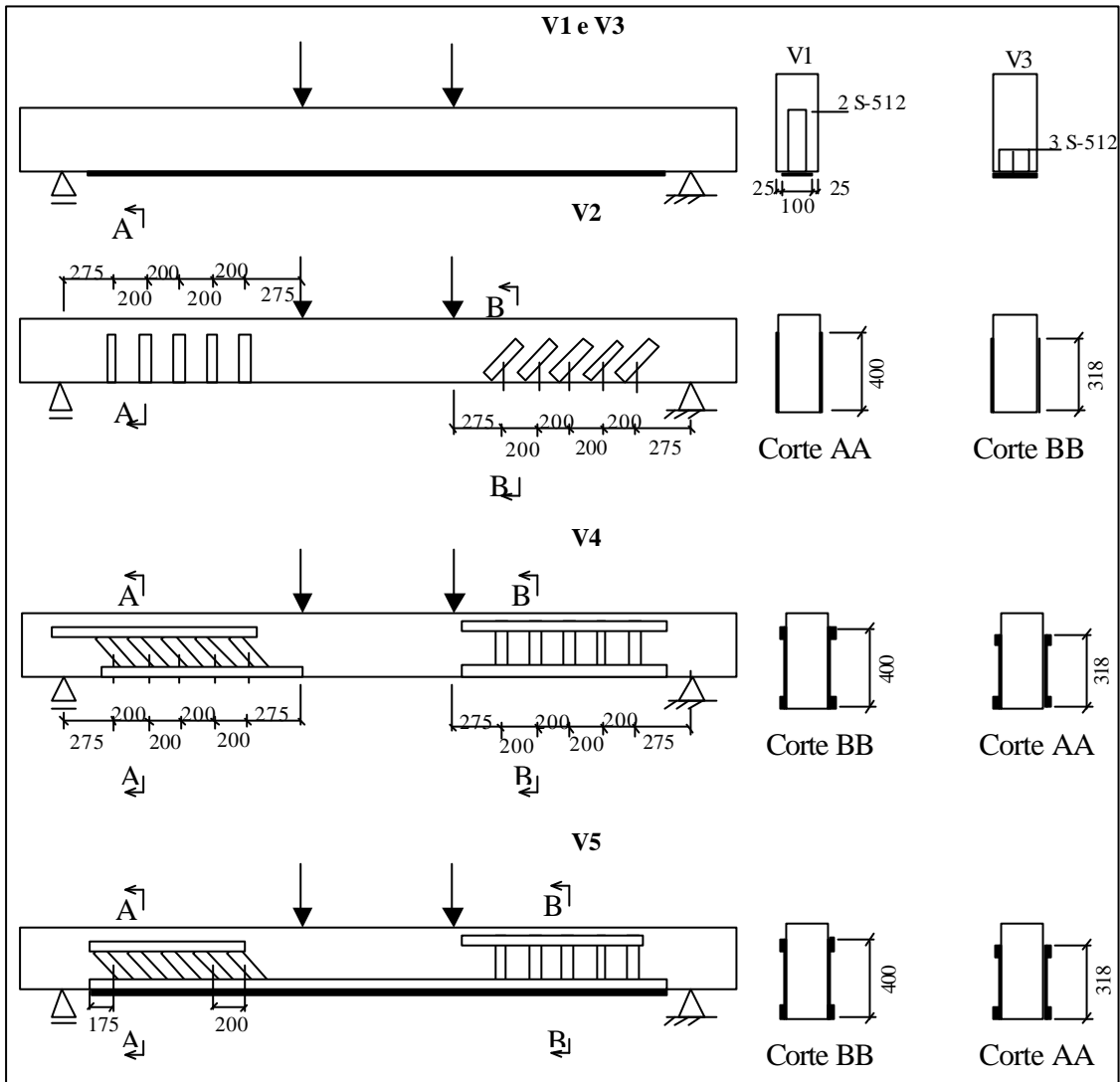


Figura 2.24 – Reforços de flexão e cisalhamento das vigas de Pinto (2000) e Cerqueira (2000).

Tabela 2.10 – Resultados obtidos nos ensaios de Pinto e Cerqueira (2000).

Vigas	Modo de Ruptura
V1	Escoamento da armadura longitudinal interna e destacamento da lâmina
V2	Esmagamento do concreto e escoamento da armadura longitudinal
V3	Escoamento da armadura longitudinal interna e destacamento da lâmina
V4	Esmagamento do concreto e escoamento da armadura longitudinal
V5	Esmagamento do concreto e escoamento da armadura longitudinal

2.4.4 - Araújo (2000)

Neste trabalho foram ensaiadas 4 vigas com a finalidade de analisar a eficiência do uso de tecido de fibra de carbono como reforço à flexão, ao cisalhamento, e simultaneamente à flexão e ao cisalhamento.

As vigas tinham seção transversal retangular de 150 mm x 450 mm, 4000 mm de vão, eram simplesmente apoiadas, foram carregadas com duas cargas concentradas (ver figura 2.25) e armadas segundo mostrado na tabela 2.11.

A figura 2.26 e a tabela 2.12 fornecem as características dos reforços utilizados.

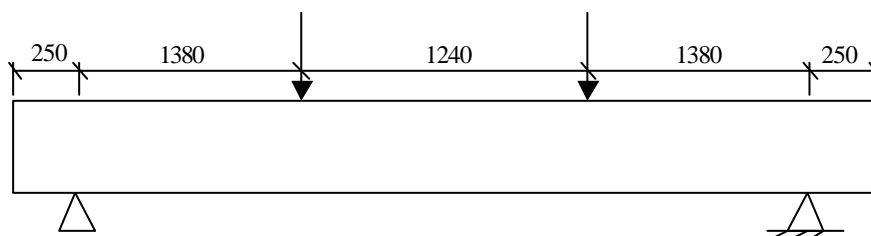


Figura 2.25 – Geometria e carregamento das vigas ensaiadas por Araújo (2000).

Tabela 2.11 – Características dos materiais e força aplicada durante o reforço das vigas de Araújo (2000)

Viga	A_s (mm ²)	f_{cm} (MPa)	Compósito				F_{eq} (kN)
			E_f (GPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	ε_{fu} (%)	t_f (mm)	
VC-1R	603,19	30,4	73,1	960	1,33	0,33	-
VC-1	1344,60	28,5					45
VC-2	603,19	33,8					46
VC-3	603,19	31,3					41
VM-1R	1344,60	34,4					-

Os resultados obtidos foram comparados àqueles encontrados para a viga VC-1R, que não foi reforçada e serviu portanto como referência, assim como a viga VM-1R de Moraes (1997).

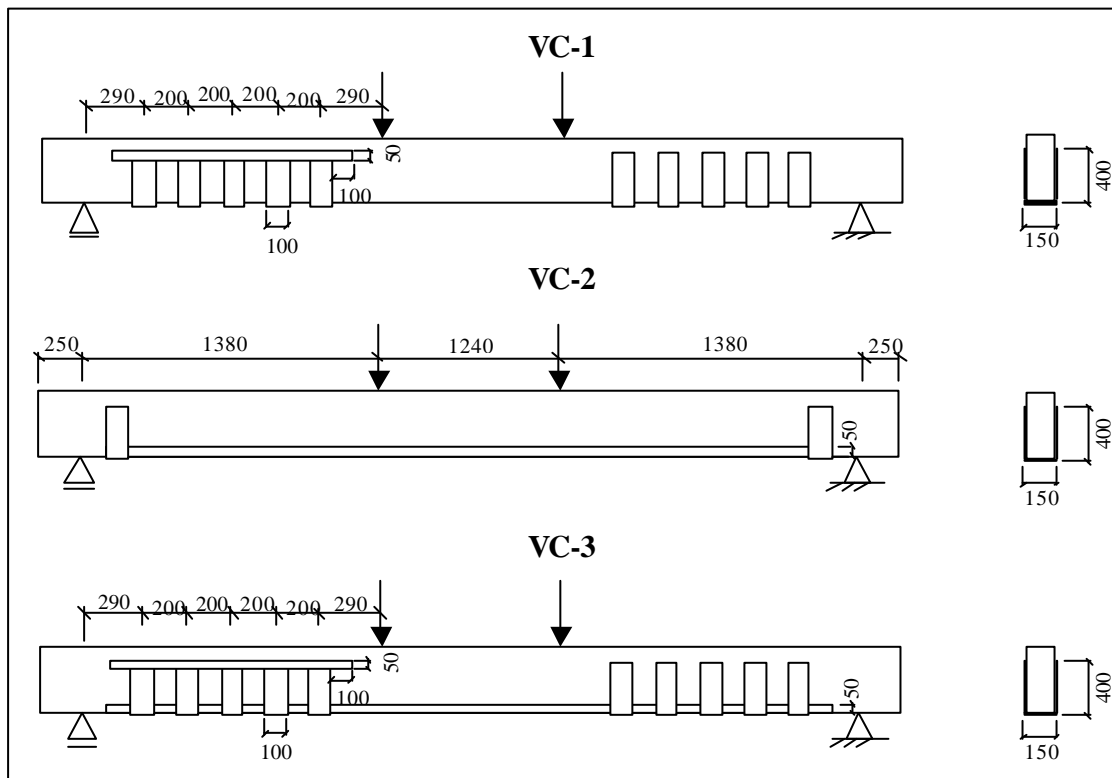


Figura 2.26 – Reforços de flexão e cisalhamento de Araújo (2000).

As vigas foram submetidas a três ciclos de carregamento. Os dois primeiros ciclos tiveram o objetivo de fissurar as vigas, e o terceiro, aplicado após sete dias da data do reforço (tempo de cura do adesivo), visou levá-las ao colapso.

Simulando uma situação real, as vigas foram mantidas sob carregamento constante durante a execução do reforço.

Tabela 2.12 – Reforço usado nas vigas de Araújo (2000)

Viga	Reforço					Ancoragem			
	cisalhamento	b _r (mm)	L _r (mm)	Flexão	b _r (mm)	L _r (mm)	tipo	b _r (mm)	L _r (mm)
VC-1	5 estribos em U, com 3 camadas de tecido cada, em cada vão de cisalhamento	100	950	-	-	-	1 tira com 2 camadas de tecido na extremidade superior do reforço de cisalhamento, em cada vão de cisalhamento	50	1100
VC-2	-	-	-	Reforço de 150 mm no fundo da viga + reforço de 50 mm em cada lateral inferior da viga, todos com 5 camadas de tecido	250	3800	2 estribos em U, com 3 camadas de tecido cada, nas extremidades do reforço de flexão	100	950
VC-3	5 estribos em U, com 5 camadas de tecido cada, em ambos os vãos de cisalhamento	100	950	Reforço em U, com 5 camadas de tecido, no fundo e laterais inferiores da viga	250	3800	1 tira com 2 camadas de tecido na extremidade superior do reforço de cisalhamento, em cada vão de cisalhamento	50	1100

Chegou-se às seguintes conclusões:

- A técnica de reforço usando tecidos de fibra de carbono não apresentou maiores dificuldades em sua execução.

- Para proporcionar uma melhor integração entre as camadas de tecido deve-se respeitar o intervalo máximo de uma hora entre a colagem de cada camada, evitando assim o descolamento entre elas.
- O uso de cinco camadas de tecido mostrou ser eficiente, contrariando a recomendação do fabricante que indica um número máximo de três camadas de tecido para o reforço.
- Foi verificado neste estudo que os reforços foram responsáveis por um aumento de até 64% na capacidade resistente das vigas além de reduzirem a deformação da armadura interna, sendo que o reforço à flexão proporcionou às vigas um aumento de rigidez.
- Segundo o autor, parece ser indicado limitar em 6‰ a deformação do reforço para evitar seu descolamento.
- A teoria da flexão simples e o modelo de treliça podem ser usados para verificar a resistência de vigas reforçadas com tecidos de fibra de carbono.

Tabela 2.13 – Resultados obtidos nos ensaios das vigas de Araújo (2000).

Vigas	VC-1R	VC-1	VC-2	VC-3
Modo de Ruptura	Escoamento das armaduras longitudinal e transversal, seguido de esmagamento do concreto	Escoamento da armadura longitudinal de tração seguido de esmagamento do concreto	Escoamento da armadura longitudinal de tração seguido de esmagamento do concreto	Descolamento dos reforços de flexão e cisalhamento e escoamento da armadura longitudinal interna

2.4 – Análise dos métodos

Foi calculada a força cortante resistente teórica das vigas VC1 e VC3 de Araújo e V2, V4 e V5 de Pinto e Cerqueira, através dos diferentes métodos apresentados neste estudo.

Os resultados são mostrados na tabela 2.14. Estes valores não puderam ser comparados com valores experimentais pois nos ensaios estas vigas tiveram ruptura por flexão.

Tabela 2.14 –Força cortante resistente teórica

Vigas	Força cortante resistente da seção reforçada (kN)			
	ACI	CEB/FIP	Triantaffillou	Programa “Reforçar”
VC1	148,3	162,9	175,3	170
VC3	177,8	193,6	188,3	205,8
V2	147,2	180,6	188,2	148,5
V4	151,9	185,2	192,0	154,9
V5	152,9	186,3	209,4	162

Os momentos resistentes teóricos das vigas VC2 e VC3 de Araújo e V1, V3 e V5, de Pinto e Cerqueira, foram calculados utilizando os métodos de cálculo vistos anteriormente e são apresentados na tabela 2.15.

Os cálculos foram efetuados desconsiderando os coeficientes de segurança recomendados aos materiais, a fim de se obter resultados mais próximos daqueles obtidos nos ensaios.

Não foi utilizado o método proposto pela SIKA (1998) para dimensionamento de reforço à flexão pois este método considera a deformação específica do concreto variando entre 2 ‰ e 3 ‰, valores inferiores ao recomendado pela NBR 6118 (2003) de 3,5 ‰.

Tabela 2.15 - Momento resistente teórico

Vigas	Momento resistente da seção reforçada (kN.m)				M _{u,exp} (kN.m)
	ACI	CEB/FIP	MBT	Programa "Reforçar"	
VC2	1,54 E8	2,20 E8	1,81 E8	1.9 E8	2,42 E8
VC3	1,48 E8	2,09 E8	1,75 E8	1,86 E8	2,48 E8
V1	1,38 E8	2,21 E8	1,59 E8	1,89 E8	1,89 E8
V3	1,54 E8	2,19 E8	1,81 E8	1,9 E8	2,03 E8
V5	1,71 E8	2,34 E8	2,05 E8	2,12 E8	2,23 E8

A tabela 2.15 mostra que o método de cálculo proposto pelo ACI Committee 440, para reforço à flexão, apresentou, para todas as vigas, resultados muito inferiores aos encontrados nos ensaios.

O método de cálculo de reforço à flexão dado pelo CEB/FIP apresentou, na maioria dos casos, valores superiores aos obtidos experimentalmente, sendo, portanto, contra a segurança.

Conforme a tabela 2.15, os resultados teóricos que mais se aproximaram dos valores experimentais, para reforço à flexão, foram aqueles obtidos pelo programa Reforçar.

CAPÍTULO III

APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

3.1 – Introdução

Neste trabalho elaborou-se um programa chamado “Reforçar”, destinado a dimensionar reforços à flexão, ao cisalhamento e simultaneamente à flexão e ao cisalhamento em vigas de concreto armado. O programa foi desenvolvido em Linguagem Visual Basic 6.0.

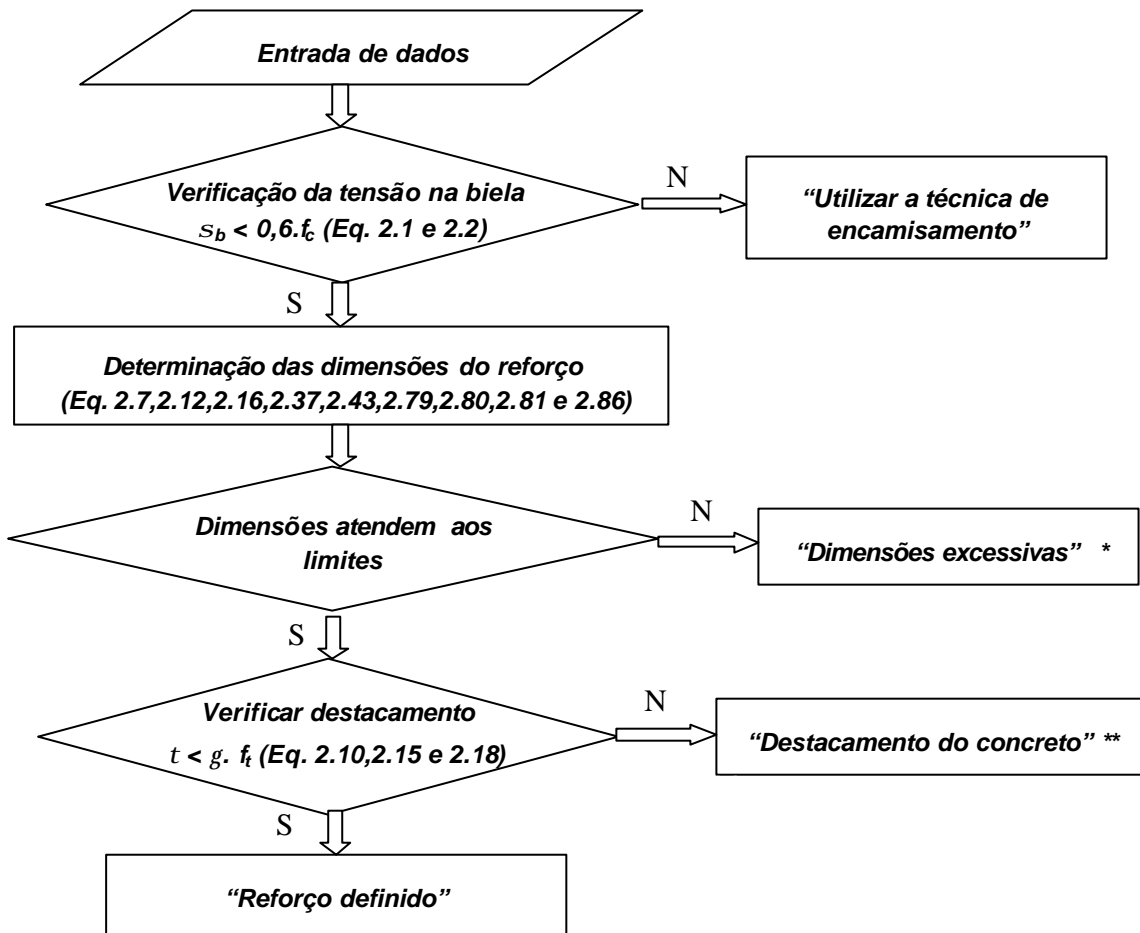
Constam no programa oito técnicas de reforço ao cisalhamento (chapas de aço contínuas, chapas de aço em tiras, tecido de fibra de carbono, lâmina de fibra de carbono, barras coladas, estribos externos pré-tracionados, encamisamento e armadura longitudinal externa protendida), seis técnicas de reforço à flexão (chapa de aço, barras coladas, tecido de fibra de carbono, lâmina de fibra de carbono, armadura longitudinal externa protendida e encamisamento) e duas técnicas de reforço à flexão e ao cisalhamento simultaneamente (encamisamento e armadura longitudinal externa protendida).

3.2 – Modelos de cálculo

Os modelos de cálculo utilizados no programa são aqueles especificados no capítulo anterior, item 2.3.

A seguir são apresentados o fluxograma padrão para reforço ao cisalhamento e à flexão.

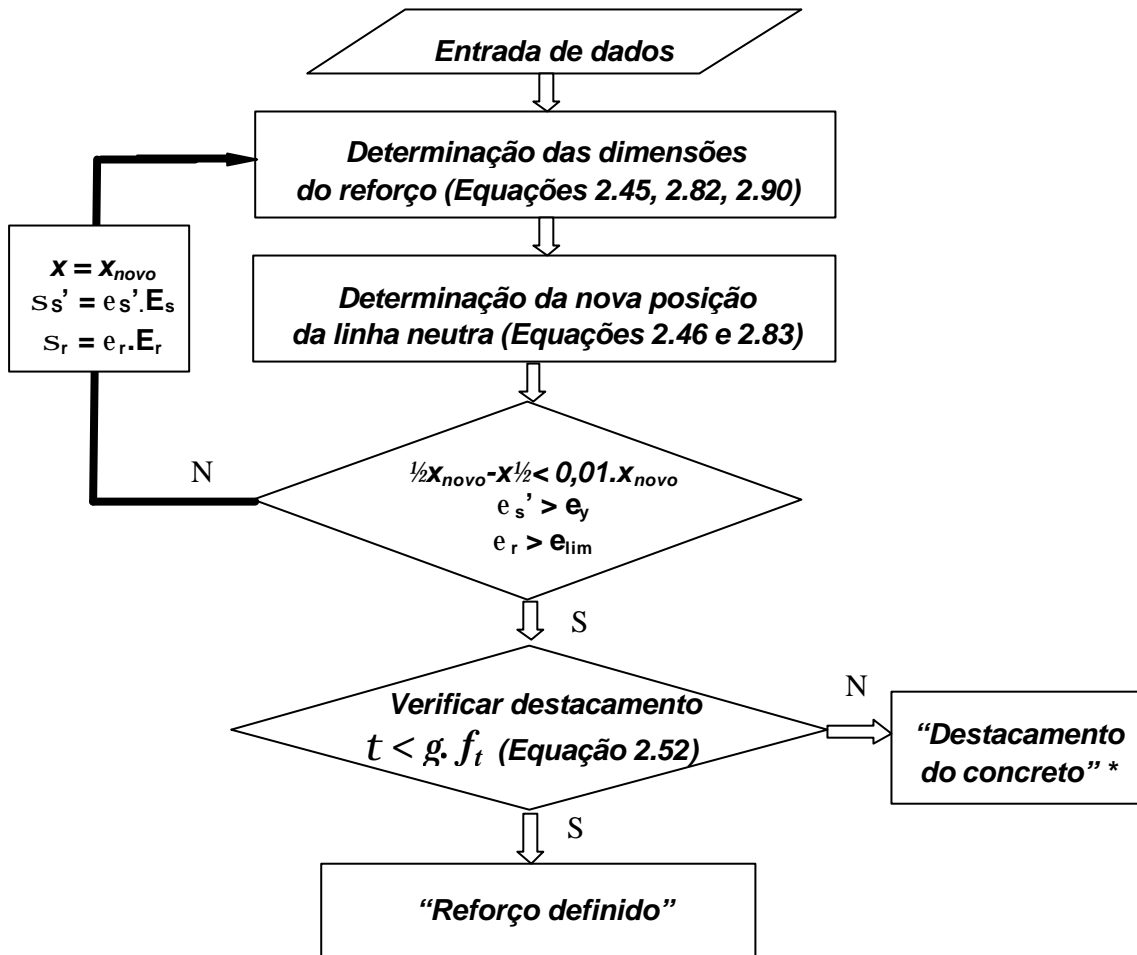
FLUXOGRAMA PADRÃO PARA REFORÇO AO CISLHAMENTO



* Variar a dimensão do reforço adotada ou usar outra técnica

** Variar a dimensão do reforço adotada, usar outra técnica ou utilizar dispositivos de ancoragem

FLUXOGRAMA PADRÃO PARA REFORÇO À FLEXÃO



* Variar a dimensão do reforço adotada, usar outra técnica ou utilizar dispositivos de ancoragem

3.3 – Descrição do programa

Ao iniciar o programa aparecerá na tela o formulário *Tipo de reforço* (figura 3.1), com as três opções de reforço: *Cisalhamento*; *Flexão*; *Cisalhamento e Flexão*.



Figura 3.1 – Formulário *Tipo de reforço*

3.3.1 – Reforços ao cisalhamento

Clicando na opção *Cisalhamento* surgirá uma lista de técnicas de reforço disponíveis para o caso. Deve-se escolher a técnica desejada e clicar no botão *OK*, para voltar à tela anterior basta clicar no botão *RETORNAR* (figura 3.2).

Sendo escolhida a técnica de reforço com chapas contínuas (figura 3.3), o programa pedirá alguns dados principais da viga antes do reforço (resistência ao cortante da seção original - V , altura efetiva - d , largura da viga - b , posição da linha neutra - x , resistência característica do concreto - f_{ck} , ângulo da biela de compressão do concreto com o eixo longitudinal - θ , ângulo dos estribos com o eixo longitudinal - α), além da tensão de escoamento da chapa de reforço - $f_{y,ch}$ e o acréscimo de resistência à cortante - ΔV .

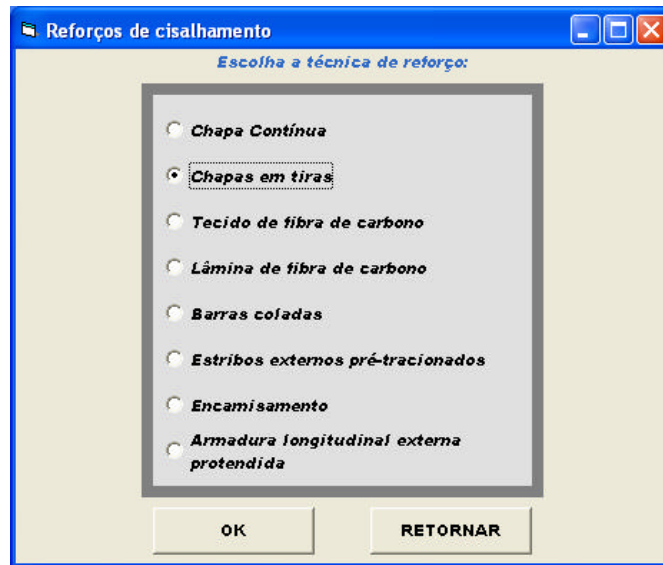


Figura 3.2 – Técnicas disponíveis para reforço ao cisalhamento

Ao clicar no botão *CALCULAR*, o programa apresentará como resultado a espessura da chapa necessária para o reforço. Há ainda o campo *Observações* onde o usuário é avisado caso a técnica seja inviável para o reforço, ou seja, quando ocorrer destacamento do concreto, quando a espessura da chapa superar a máxima permitida pela CEB (1983) ou quando a tensão na biela de compressão do concreto superar sua tensão limite.

Para a técnica de reforço com chapas em tiras, é necessário ainda fornecer a largura da chapa - b_{ch} , e o espaçamento entre elas - S_r , além dos dados anteriores, conforme mostrado na figura 3.4. O campo *Observações* é utilizado pelo programa para alertar quando há destacamento do concreto na ligação com o reforço ou quando a espessura calculada supera a máxima permitida pela norma CEB (1983). Nestes casos é sugerido ao usuário aumentar a largura do reforço e calculá-lo novamente. O campo *Observações* avisa também quando a tensão na biela comprimida do concreto for superior a sua tensão limite, sendo sugerido utilizar a técnica de encamisamento.

As figuras 3.5 (tecido) e 3.6 (lâmina) apresentam os formulários referentes à técnica de reforço com fibra de carbono. Utilizando tecido de fibra de carbono é necessário fornecer ao programa a largura - b_f , para que seja determinada a espessura

do reforço (t_f). No caso de reforço com lâmina de fibra de carbono, como normalmente a espessura da lâmina é padrão – t_f , o programa determina a largura necessária ao reforço (b_f). É necessário informar o acréscimo de resistência à cortante desejado para a viga - ΔV , e também o módulo de elasticidade do compósito - E_f , além dos dados principais da viga antes de ser reforçada, citados anteriormente. No campo *Observações* o usuário é avisado caso a tensão na biela não atenda ao limite máximo permitido pela NBR 6118 (2003), sendo indicado neste caso utilizar a técnica de encamisamento. Havendo destacamento do concreto ou, nos casos de reforço com tecido de fibra de carbono, quando o número de camadas for superior a cinco (valor máximo indicado por Araújo, 2002), o programa recomenda aumentar a espessura (lâmina) ou a largura (tecido) adotada inicialmente pelo usuário e calcular o reforço novamente.

Chapa Contínua - Cisalhamento

Dados de entrada:

Resistência à Cortante da seção original
 V (N) = 1351.00

Dados da seção original:
 d (mm) = 425
 b (mm) = 150
 x (mm) = 102
 f_{ck} (MPa) = 34.4
 θ = 45
 α = 90

Dados da chapa de reforço:
 $f_{y,cf}$ (MPa) = 333

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 3900

CALCULAR

RETORNAR

Resultado:
 Espessura do reforço (mm) = 0.02E-01
 Observações: REFORÇO DEFINIDO

Figura 3.3 – Reforço com chapa contínua - Cisalhamento

Chapas em tiras - Cisalhamento

Dados de entrada:

Resistência à Cortante da seção original:
 V (N) = 135100

Dados da seção original:
 d (mm) = 425
 b (mm) = 150
 x (mm) = 102
 f_{ck} (MPa) = 34.4
 θ = 45
 α = 90

Dados da chapa de reforço:
 b_{ch} (mm) = 90
 $f_{y,ch}$ (MPa) = 333
 S_r (mm) = 250
 α_r = 90

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 39900

CALCULAR
RETORNAR

Resultados:
Espessura do reforço (mm) = 4,98E-01
Observações: REFORÇO DEFINIDO

Figura 3.4 – Reforço com chapas em tiras

Tecido de fibra de carbono - Cisalhamento

Dados de entrada:

Resistência à Cortante da seção original:
 V (N) = 114800

Dados da seção original:
 d (mm) = 421
 b (mm) = 150
 x (mm) = 79
 f_{ck} (MPa) = 31.3
 θ = 45
 α = 90

Dados do reforço:
 b_f (mm) = 100
 E_f (MPa) = 73100
 S_r (mm) = 200
 α_r = 90

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 65200

CALCULAR
RETORNAR

Resultados:
Espessura do reforço (mm) = 3,82E-01
Número de camadas = 2
Observações: REFORÇO DEFINIDO

Figura 3.5 – Reforço com tecidos de fibra de carbono - Cisalhamento

Lâmina de fibra de carbono - Cisalhamento

Dados de entrada:

Resistência à Cortante da seção original:
V (N)= 111200

Dados da seção original:
d (mm)= 422
b (mm)= 150
x (mm)= 72
f_{ck} (MPa)= 34.7
e = 45
α = 90

Dados do reforço:
t_f (mm)= 1.2
E_f (MPa)= 165000
S_r (mm)= 200
α_r = 90
 Acréscimo de cortante:
Δ V (N)= 53800

CALCULAR
RETORNAR

Resultados:
Largura do reforço (mm) 1.38E01
Observações: Destacamento do concreto

Figura 3.6 – Reforço com lâminas de fibra de carbono - Cisalhamento

Os formulários de cálculo para reforços com barras coladas ou estribos externos pré-tracionados são semelhantes e fornecem como resultado o diâmetro necessário às barras de reforço, conforme mostrado nas figuras 3.7 e 3.8. É necessário fornecer os valores da tensão de escoamento da barra de reforço – $f_{y,r}$, $f_{y,sp}$, o espaçamento entre estas barras - S_r , e o acréscimo de resistência à cortante desejado para a viga - ΔV , além dos dados principais da seção antes do reforço. No campo *Observações* o usuário é alertado quando a tensão na biela for maior que sua tensão limite, sendo, neste caso, sugerida a técnica de encamisamento.

Barras coladas - Cisalhamento

Entrada de dados:

Resistência à Cortante da seção original:
 V (N) = 115200

Dados da seção original:
 d (mm) = 425
 b (mm) = 150
 x (mm) = 76
 f_{ck} (MPa) = 39.8
 ϕ = 45
 α = 90

Dados do reforço:
 $f_{y,r}$ (MPa) = 680
 S_r (mm) = 150

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 14800

CALCULAR

RETORNAR

Resultados:
 ϕ (mm) = 2.48E00

Observações:

Figura 3.7 – Formulário para reforço com barras coladas - Cisalhamento

Estribos externos pré-tracionados - Cisalhamento

Entrada de dados:

Resistência à Cortante da seção original:
 V (N) = 111200

Dados da seção original:
 d (mm) = 425
 b (mm) = 150
 x (mm) = 88
 f_{ck} (MPa) = 34.1
 ϕ = 45
 α = 90

Dados do reforço:
 $f_{y,sp}$ (MPa) = 670
 S_r (mm) = 250

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 58800

CALCULAR

RETORNAR

Resultados:
 ϕ (mm) = 9.08E00

Observações:

Figura 3.8 – Formulário para reforço com estribos externos pré-tracionados

O reforço através da técnica de encamisamento (figura 3.9) é feito normalmente quando a tensão na biela de compressão do concreto não atende ao limite estabelecido por norma. A seção de concreto após o reforço é considerada com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual à da seção original da peça, mesmo sendo usual adotar-se na prática um valor de f_{ck} maior que o do concreto usado no reforço.

Com os dados principais da seção original, a tensão de escoamento dos estribos de reforço - $f_{y,r}$, o espaçamento entre os novos estribos - s_r , além do acréscimo de resistência à cortante - ΔV , são dimensionados o diâmetro dos estribos - ϕ_r , e a largura mínima da viga - b_{novo} .

Figura 3.9 – Formulário para reforço por encamisamento - Cisalhamento

O último método de reforço de vigas ao cisalhamento é o que utiliza armaduras longitudinais externas protendidas (figura 3.10). Para esta técnica é preciso estabelecer a excentricidade máxima existente nos cabos de protensão - e_{max} , e a projeção do trecho inclinado da armadura protendida no eixo horizontal - L_h . Clicando no botão “ ? ” é aberta uma janela explicativa (figura 3.11).

São necessários também os dados principais da viga antes do reforço, citados anteriormente. São dimensionados o número de cabos necessários (n_ϕ) e a área total do

reforço (A_r). No campo *Observações* o usuário é avisado caso a tensão na biela seja maior que o limite estabelecido pela NBR 6118 (2003), sendo indicada a técnica de encamisamento.

Armadura longitudinal externa protendida - Cisalhamento

Dados de entrada:

Resistência à Cortante da seção original:
 V (N) = 200000

Dados da seção original:
 d (mm) = 600
 b (mm) = 200
 x (mm) = 300
 f_{ck} (MPa) = 33
 θ = 45
 α = 90

Entre com os valores da excentricidade máxima e da projeção no eixo horizontal da armadura de reforço:
 e_{max} (mm) = 400
 L_h (mm) = 2000

Dados dos cabos de reforço:
 $f_{y.sp}$ (MPa) = 1600
 ϕ_r (mm) = 12.5

Acréscimo de cortante:
 ΔV (N) = 80000

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:
Área total do reforço = 4,79E02 **Número de cabos** = 4

Observações:

Figura 3.10 – Formulário para reforço com armadura longitudinal externa protendida – Cisalhamento

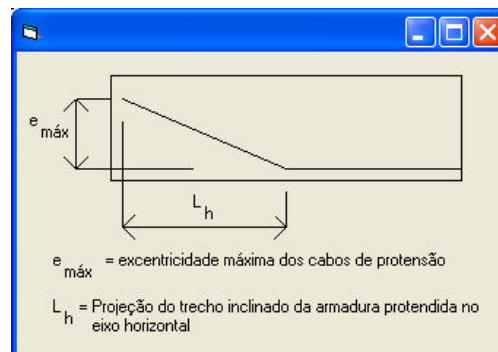


Figura 3.11 – Dados para reforço com armadura longitudinal externa protendida

3.3.2 – Reforços à flexão

As técnicas de reforço à flexão ficam disponíveis ao clicar na opção *Flexão* do formulário *Tipo de reforço* (figura 3.1). O usuário deve escolher a técnica desejada e clicar em *OK* ou clicar em *RETORNAR*, caso queira voltar à tela anterior.

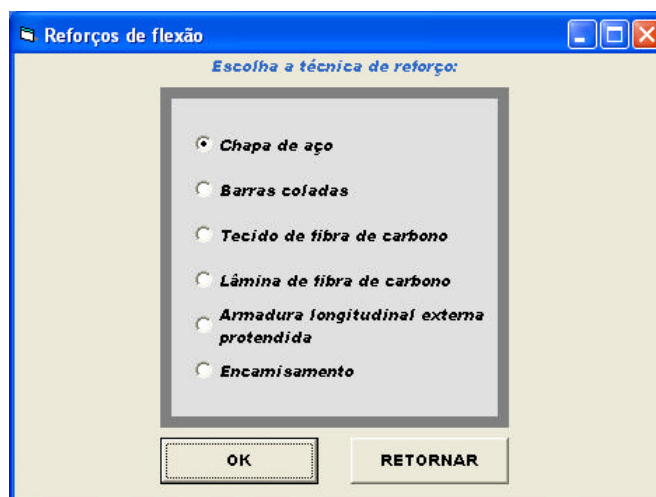


Figura 3.12 – Técnicas de reforço à flexão

As quatro primeiras técnicas da relação mostrada na figura 3.12 (chapa de aço, barras coladas, tecido de fibra de carbono e lâmina de fibra de carbono) possuem formulário de entrada de dados semelhantes, sendo diferente apenas a entrada de dados do material de reforço.

É necessário, para estas quatro técnicas, fornecer os seguintes dados referentes à viga: posição da armadura longitudinal de tração e de compressão - d e d' , área da armadura longitudinal de tração e de compressão - A_s e A_s' , tensão de escoamento da armadura longitudinal interna - f_y , módulo de elasticidade da armadura longitudinal interna e do concreto - E_s , E_c , largura da viga - b , altura da linha neutra - x , resistência característica do concreto - f_{ck} , momento resistente da seção reforçada - M e o comprimento que recebe maior tensão cisalhante na interface reforço/concreto - L_{cis} . Clicando no botão “ ? ” é aberta uma janela explicativa (figura 3.13).

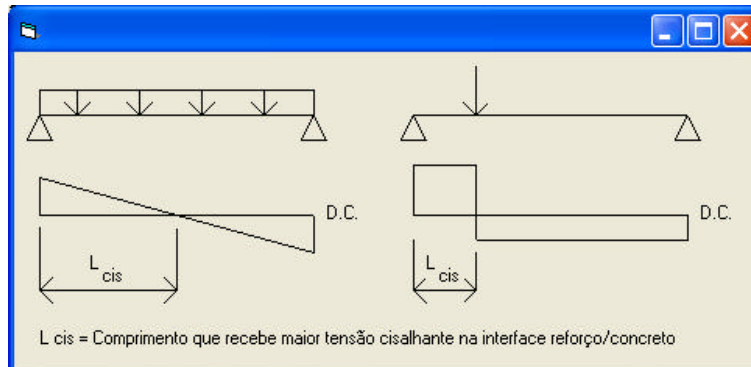


Figura 3.13- Comprimento onde ocorre maior tensão cisalhante na interface reforço/concreto

Flexão - chapa de aço

Entrada de dados:

Armadura longitudinal:

A_s (mm²) = 716 d (mm) = 425

A_s' (mm²) = 101 d' (mm) = 25

f_y (MPa) = 547

E_s (MPa) = 200000

Momento resistente da seção original:

M_u (N.m) = 1.37e8

Acréscimo de Momento resistente da seção

ΔM (N.m) = 0.905e8

Reforço:

b_r (mm) d_r (mm) $f_{y,r}$ (MPa) E_r (MPa)

150 450 333 200000

x (mm) = 102

b (mm) = 150

f_{ck} (MPa) = 34.4

E_c (MPa) = 20000

L_{cis} (mm) = 1300 ?

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:

espessura do reforço (mm) = 7.31E00 x_{novo} (mm) = 2.43E02

Observação: Espessura excessiva

Figura 3.14 – Formulário de reforço com chapa de aço - Flexão

Os dados do material de reforço exigidos para estas quatro técnicas são os descritos abaixo:

Para a técnica de chapa de aço devem ser fornecidos os valores da largura do reforço - b_r , da sua altura efetiva - d_r , do módulo de elasticidade da chapa - E_r , além da sua tensão de escoamento - $f_{y,r}$. A figura 3.14 mostra o formulário para esta técnica de

reforço. Como resultado o programa apresenta a espessura da chapa (t_r) e a nova posição da linha neutra após o reforço (x_{novo}).

A técnica de reforço com barras coladas (figura 3.15) exige que se forneça a altura efetiva da barra de reforço – d_r , e a sua tensão de escoamento - $f_{y,r}$, sendo obtidos como resultado o diâmetro da barra (ϕ_r) a área total de reforço (A_r) e a nova posição da linha neutra após o reforço (x_{novo}).

Os dados exigidos para a técnica de reforço com compósitos de fibra de carbono são: altura efetiva do reforço – d_r , módulo de elasticidade do compósito – E_r , além da largura do tecido – b_r , ou da espessura da lâmina – t_r , conforme o caso. Além da nova posição da linha neutra (x_{novo}) o programa fornece como resultado a espessura do reforço (t_r), para compósitos em tecido (figura 3.16), ou a largura do reforço (b_r), no caso de compósitos em lâmina de fibra de carbono (figura 3.17).

Flexão - Barras coladas

Entrada de dados:
 Armadura longitudinal:

As (mm ²) =	603	d (mm) =	425
As' (mm ²) =	101	d' (mm) =	25
fy (MPa) =	510		
Es (MPa) =	200000		

Momento resistente da seção original:
 Mu (N.m) = 1.198e8

Acréscimo de Momento resistente da seção
 ΔM (N.m) = 1.095e8

Reforço:

número de barras =	2		
dr (mm)	450	fyr (MPa)	545
Er (MPa)	200000		
x (mm) =	88		
b (mm) =	150		
fck (MPa) =	34.1		
Ec (MPa) =	20000		

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:

Asr (mm ²) =	4,16E02	φr (mm) =	23,024374	xnovo (mm) =	2,48E02
--------------------------	---------	-----------	-----------	--------------	---------

Observações:

Figura 3.15 – Formulário de reforço com barras coladas - Flexão

Flexão - Tecido de fibra de carbono

Entrada de dados:

Armadura longitudinal:

A_s (mm²) = 603 d (mm) = 421
 A_s' (mm²) = 101 d' (mm) = 25
 f_y (MPa) = 567
 E_s (MPa) = 200000

Momento resistente da seção original:
 M_u (N.m) = 1.33e8
 Acréscimo de Momento resistente da seção
 ΔM (N.m) = 1.154e8

Reforço:

b_r (mm) d_r (mm) E_r (MPa)
 250 450 73100

x (mm) = 92
 b (mm) = 150
 f_{ck} (MPa) = 31.3
 E_c (MPa) = 20000
 L_{cis} (mm) = 1380 ?

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:
 espessura de reforço (mm) = 4.41E00 x_{novo} (mm) = 3.20E02
 Observações: Deslocamento do concreto

Figura 3.16 – Formulário de reforço com tecido de fibra de carbono - Flexão

Flexão - Lâmina de fibra de carbono

Entrada de dados:

Armadura longitudinal:

A_s (mm²) = 603 d (mm) = 422
 A_s' (mm²) = 101 d' (mm) = 24
 f_y (MPa) = 579
 E_s (MPa) = 200000

Momento resistente da seção original:
 M_u (N.m) = 1.369e8
 Acréscimo de Momento resistente da seção
 ΔM (N.m) = 0.8585e8

Reforço:

t_r (mm) d_r (mm) E_r (MPa)
 1.2 450 165000

x (mm) = 84.5
 b (mm) = 150
 f_{ck} (MPa) = 34.7
 E_c (MPa) = 20000
 L_{cis} (mm) = 1350 ?

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:
 largura do reforço (mm) = 3.36E02 x_{novo} (mm) = 2.32E02
 Observações:

Figura 3.17 – Formulário de reforço com lâmina de fibra de carbono - Flexão

Para o dimensionamento do reforço com armadura longitudinal externa protendida (figura 3.18) é necessário entrar com os seguintes dados: altura efetiva da viga - d , altura

da linha neutra - x , tensão de escoamento da armadura de reforço - $f_{y,sp}$, acréscimo de momento resistente desejado - ΔM e a excentricidade máxima existente nos cabos de protensão - e_{max} . Clicando no botão “ ? ” é aberta uma janela explicativa (figura 3.19). É obtida, como resultado, a área de aço necessária ao reforço (A_s).

Figura 3.18 – Formulário de reforço com armadura longitudinal externa protendida - Flexão

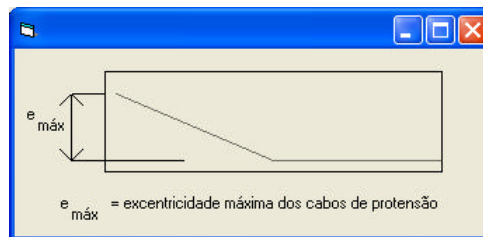


Figura 3.19 – Excentricidade máxima dos cabos de protensão

Para reforço através da técnica de encamisamento, o usuário deverá fornecer os dados da seção original da peça (área - A_s , altura efetiva - d , tensão de escoamento - f_y e módulo de elasticidade - E_s , das armaduras longitudinais da viga bem como a resistência característica à compressão do concreto - f_{ck}), os dados do reforço (largura final da viga- b_{novo} , altura efetiva do reforço - d_r e tensão de escoamento das armaduras longitudinais de reforço - $f_{y,r}$), além do momento resistente da seção reforçada - M .

O programa apresentará a nova altura da linha neutra (x_{novo}) e a área de aço ($A_{s,r}$) necessária para o reforço, conforme mostra a figura 3.20.

Encamisamento - Flexão

Dados de entrada:

Armadura longitudinal:

A_s (mm²) = 603 f_y (MPa) = 510
 $A_{s'}$ (mm²) = 101 E_s (MPa) = 200000
 d (mm) = 425
 d' (mm) = 25

Momento resistente da seção original:
 M_u (N.m) = 1.198e8
 Acréscimo de Momento resistente da seção
 ΔM (N.m) = 1.095e8

Reforço:

b_{novo} (mm) d_f (mm) $f_{y,f}$ (MPa) $E_{s,f}$ (MPa) b (mm) = 150
 185 485 545 200000 f_{ck} (MPa) = 34.1
 E_c (MPa) = 20000

CALCULAR **RETORNAR**

Resultados:

$A_{s_{novo}}$ (mm²) = 6,75E02 x_{novo} (mm) = 1,77E02

Observações:

Figura 3.20 – Formulário de reforço por encamisamento - Flexão

3.3.2 – Reforços à flexão e ao Cisalhamento

Estão disponíveis no programa duas técnicas de reforço eficazes tanto ao cisalhamento quanto à flexão. Na tela inicial, formulário *Tipo de reforço* (figura 3.1), deve-se clicar na opção *Cisalhamento e flexão*, aparecendo o formulário mostrado na figura 3.21.

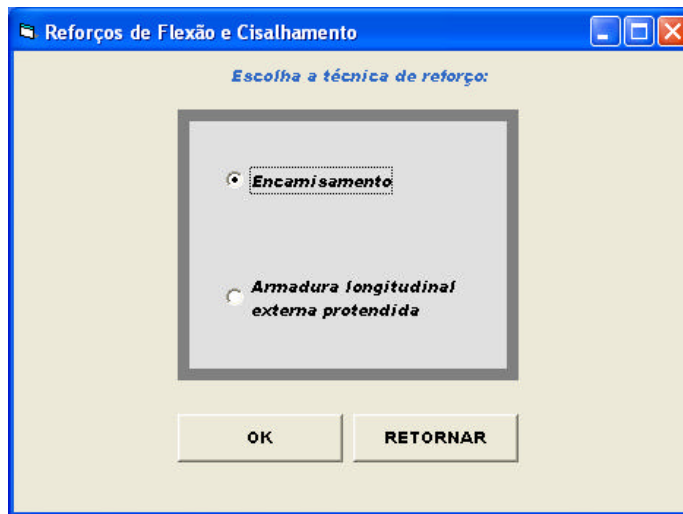


Figura 3.21 – Técnicas de reforço à flexão e ao cisalhamento

Escolhida a técnica de reforço por encamisamento o programa solicitará dados referentes ao cisalhamento (resistência à cortante da seção original - V , acréscimo da resistência à cortante - ΔV , ângulo da biela de compressão do concreto com o eixo longitudinal - θ , ângulo dos estribos internos com o eixo longitudinal - α , espaçamento dos estribos de reforço - S_r , e tensão de escoamento dos estribos de reforço - $f_{y,r}$), à flexão (momento resistente da seção reforçada - M , área da armadura longitudinal de tração e de compressão - A_s e A_s' , tensão de escoamento da armadura longitudinal original da viga e da armadura de reforço - f_y e $f_{y,r}$), dados da seção original da viga (altura efetiva - d , largura da viga - b), bem como a resistência característica do concreto - f_{ck} e a nova altura efetiva da viga após o reforço - d_{novo} .

O programa determina a nova posição da linha neutra (x_{novo}), a área de aço longitudinal necessária ($A_{s,r}$), a nova largura da viga (b_{novo}) e o diâmetro dos estribos de reforço (ϕ_r). A figura 3.22 mostra o formulário para esta técnica de reforço.

Encamisamento - Cisalham. e Flexão

Dados de entrada:

Cisalhamento:	Flexão:	Seção original:
Resistência à Cortante da seção original: V (N) = 111200	Momento resistente da seção original: M_u (N.m.m) = 1.198e8	A_s (m m 2) = 603
Acréscimo de cortante: Δ V (N) = 58800	Acréscimo de Momento resistente da seção: Δ M (N.m.m) = 1.095e8	d (m m) = 425
Dados do reforço: S_r (m m) = 250 f_{y,r} (MPa) = 500	Dados do reforço: E_{s,r} (MPa) = 200000 d_r (m m) = 450 f_{y,r} (MPa) = 500	A_s' (m m 2) = 101 d' (m m) = 25 b (m m) = 150
	CALCULAR	f_{ck} (MPa) = 34.1 f_y (MPa) = 500 E_s (MPa) = 200000 E_c (MPa) = 20000
	RETORNAR	θ = 45 α = 90
Resultados - Flexão: x_{novo} (m m) = 1.26E02 A_{s novo} (m m 2) = 7.49E02	Resultados - Cisalhamento: b_{novo} (m m) = 2.60E02 φ_r (m m) = 7.58E00	
Observações:		

Figura 3.22 – Formulário de reforço por encamisamento – Cisalhamento e Flexão

A opção de reforço com armadura longitudinal externa protendida exige que o usuário forneça os seguintes valores: altura efetiva da viga - d , largura da viga - b , posição da linha neutra - x , ângulo da biela de compressão do concreto com o eixo longitudinal - θ , ângulo dos estribos internos com o eixo longitudinal - α , diâmetro e tensão de escoamento da armadura de protensão - ϕ_{sp} e f_{ysp} , excentricidade máxima existente nos cabos de protensão - e_{max} , além da projeção do trecho inclinado da armadura protendida no eixo horizontal - L_h e da resistência característica do concreto - f_{ck} . Clicando no botão “ ? ” é aberta uma janela explicativa (figura 3.11). O formulário desta técnica de reforço é mostrado na figura 3.23.

Armadura longitudinal externa protendida - Cisalhamento e Flexão

Dados de entrada:

Dados do reforço:		Resistência à Cortante da seção original: V (N) = 200000	Dados da seção original:	
f_{y.sp} (MPa) = 1500	φ (mm) = 12.5		d (mm) = 2000	x (mm) = 723
Entre com os valores da excentricidade máxima e da projeção no eixo horizontal da armadura de reforço:		Acréscimo de cortante: Δ V (N) = 50000	b (mm) = 200	α = 90
e_{max} (mm) = 800	L_h (mm) = 2000	Acréscimo de momento: Δ M (N.m) = 1.7e9	θ = 45	f_{ck} (MPa) = 15

CALCULAR

RETORNAR

Resultados:

Área total do reforço (mm²) = 2.72E03

Número de cabos = 22

Observações

Figura 3.23 – Formulário de reforço com armadura longitudinal externa protendida – Cisalhamento e Flexão

CAPÍTULO IV

Aplicação do programa

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão dimensionados os reforços de vigas já ensaiadas, citadas na Revisão Bibliográfica (Capítulo 2), com o propósito de se fazer uma comparação entre as dimensões dos reforços obtidas pelo programa e as dimensões usadas nos ensaios. As vigas utilizadas no dimensionamento são: VM-1A, VM-1B e VM-2A de Moraes (1997); VL1, VL2 e VL3 de Carneiro (1998); V1, V2, V3, V4 e V5 de Pinto e Cerqueira (2000); e VC1, VC2 e VC3 de Araújo (2002).

Tabela 4.1 - Técnicas de reforço das vigas analisadas

Viga	Reforço	
	Cisalhamento	Flexão
VM-1A	Estribos externos pré-tracionados	Chapa colada
VM-1B	Chapas em tiras	Chapa colada
VM-2A	Estribos externos pré-tracionados	Tirantes externos pré-tracionados
VL1	Estribos externos pré-tracionados	Barras long. Externas coladas
VL2	Barras coladas	Barras long. Externas coladas
VL3	Chapas em tiras	Barras long. Externas coladas
V1	-	Lâmina de fibra de carbono
V2	Lâmina de fibra de carbono (90° e 45°)	-
V3	-	Lâmina de fibra de carbono
V4	Lâmina de fibra de carbono (90° e 45°)	-
V5	Lâmina de fibra de carbono (90° e 45°)	Lâmina de fibra de carbono
VC1	Tecido de fibra de carbono	-
VC2	-	Tecido de fibra de carbono
VC3	Tecido de fibra de carbono	Tecido de fibra de carbono

O dimensionamento será feito considerando que as vigas recebem esforços equivalentes às cargas de ruptura detectadas nos ensaios.

Primeiramente os cálculos serão executados considerando as tensões limites das armaduras internas e dos reforços e ainda os coeficientes de segurança dos materiais, conforme previsto nas normas e na descrição do programa.

Será feito também o redimensionamento destas vigas, considerando as tensões e deformações constatadas nos ensaios e desprezando os coeficientes de segurança dos materiais, a fim de que sejam obtidos resultados mais próximos aos experimentais.

4.2 – Resistência teórica das vigas antes do reforço

4.2.1 – Flexão

Baseando-se na NBR 6118 (2003), através do diagrama retangular simplificado de tensões de compressão no concreto e do diagrama de deformações da seção da viga (figura 4.1), foram calculados os momentos resistentes e as posições da linha neutra das vigas analisadas antes do reforço.

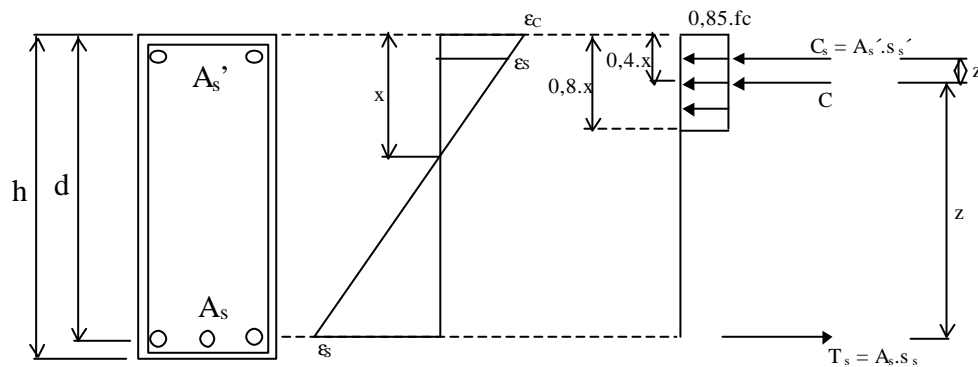


Figura 4.1 – Diagrama retangular simplificado de tensões e diagrama de deformações da seção da viga

$$M_U = A_s \cdot (f_y / g_s) \cdot z + A_s' \cdot s_s' \cdot z' \quad 4.1$$

$$x = \frac{A_s \cdot s_s - A_s' \cdot s_s'}{0,85 \cdot (f_{ck} / g_c) \cdot 0,8 \cdot b} \quad 4.2$$

Os valores da resistência à flexão das peças antes do reforço foram encontrados também através do programa CONSEC95 de análise não-linear de vigas de concreto armado desenvolvido na COPPE por Shehata (1996).

Os resultados das resistências à flexão das vigas antes do reforço são mostrados na tabela 4.2, sendo $\gamma_c = \gamma_s = 1$.

Tabela 4.2 – Resistência teórica à flexão das vigas sem o reforço

Viga	f_{ck} (MPa)	As (mm ²)	As' (mm ²)	d (mm)	d' (mm)	x (mm)	$f_{y,exp}$ (MPa)	M _u (kN.m)		P _u (kN)	
								(1)	(2)	(1)	(2)
VM-1B	34,4	716	101	425	25	102	547	137	137	106	106
VL1	34,1	603	101	425	25	88	510	119,8	141,3	88,8	104,7
VL2	39,8	603	101	425	25	76	510	121,4	145,1	89,9	107,5
VL3	40,2	603	101	425	25	75	510	121,5	144,4	90	107
V1	33,3	603	101	420	27	97	630	146,6	145,9	108,6	108,1
V3	34,3	603	101	420	27	94,3	630	146,9	146,6	108,8	108,6
V5	34,7	603	101	422	24	84,5	579	136,9	135,9	101,4	100,7
VC2	33,8	603	101	424	25	85	567	135	133	98	96
VC3	31,3	603	101	421	25	92	567	133	131	97	95

(1) Baseado na NBR 6118/2001

(2) Baseado no programa CONSEC95

Em geral, quanto aos valores das características físicas das armaduras, é recomendado adotar os valores dados pelos fabricantes na época da construção da viga (valores nominais). O estado de conservação da viga, em alguns casos, exige que seja feita uma avaliação da armadura existente, verificando suas condições de trabalho.

Neste estudo, os valores dos momentos resistentes antes do reforço foram calculados considerando para as armaduras internas a tensão de escoamento experimental, tentando representar melhor a situação real do ensaio.

4.2.2 –Cisalhamento

Foram determinados os valores da resistência teórica das vigas ao cisalhamento utilizando-se o modelo I de cálculo da NBR 6118 (2003) e a NBR 6118 (80).

As normas baseiam-se na hipótese da treliça, sendo o banzo superior comprimido representado pelo concreto, o banzo inferior tracionado representado pela armadura

longitudinal e os banzos inclinados, comprimidos e tracionados, representados respectivamente pela biela de concreto e pelas armaduras transversais.

As equações abaixo descrevem os métodos:

$$V = V_c + V_{sw} \quad 4.3$$

Onde:

V = força cortante resistente da viga

V_c = parcela de contribuição do concreto na força cortante resistente

V_{sw} = parcela de contribuição dos estribos na força cortante resistente

- NBR 6118 (80):

O esforço cortante resistido pelo concreto para viga submetida a flexão simples é dado por:

$$V_c = y_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b \cdot d \quad 4.4$$

Onde:

$$y_1 = 0,07 \quad \text{para } ? = 0,001$$

$$y_1 = 0,14 \quad \text{para } ? = 0,015$$

Interpolando-se linearmente, para valores intermediários de ?.

? = menor taxa de armadura longitudinal de tração no trecho de comprimento $2h$ a partir da face do apoio.

Segundo Fusco (1982), na parcela V_c está embutido o fator γ_c , portanto pode-se escrever que:

$$V_c = \frac{1,4}{g_c} y_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b \cdot d \quad 4.5$$

A parcela de resistência dos estribos é calculada conforme a fórmula abaixo, considerando bielas inclinadas a 45° e estribos perpendiculares ao eixo longitudinal da viga.

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot \frac{f_y}{g_s} \cdot z \quad 4.6$$

- NBR 6118 (2003) – Modelo I

Na flexão simples, a parcela de resistência absorvida pelo concreto é calculada conforme descrito abaixo.

$$V_c = 0,6 \cdot f_{td} \cdot b \cdot d \quad 4.7$$

Sendo:

$$f_{td} = \frac{0,7}{g_c} \cdot 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad 4.8$$

O modelo I da NBR 6118/2003 admite bielas de compressão inclinadas a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga. O esforço cortante resistido pela armadura transversal é dado por:

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_y \cdot 0,9 \cdot d \cdot (\text{sen } \mathbf{a} + \text{cos } \mathbf{a})}{g_s \cdot s} \quad 4.9$$

Para estribos perpendiculares ao eixo da viga ($\mathbf{a} = 90^\circ$) e considerando $z = 0,9 \cdot d$, a equação 4.9 pode ser escrita da mesma forma que a equação 4.6.

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot \frac{f_y}{g_s} \cdot z$$

A tabela 4.3 apresenta algumas características das vigas analisadas.

Os valores da parcela de esforço cortante resistida pela seção original das vigas foram calculados e estão resumidos na tabela 4.4, para $\gamma_c = \gamma_s = 1$.

Foram utilizados no cálculo dos reforços pelo programa, os valores da força cortante resistente (V) dimensionados pela NBR 6118/80 (norma em vigor no momento dos ensaios), adotando tensão de escoamento experimental.

Tabela 4.3 – Dados das vigas analisadas.

Viga	f_{ck} (MPa)	A_{sw} (mm ²)	s (mm)	$f_{y,nom} / f_{y,exp}$ (MPa)
VM-1A	33,5	62,3	200	500 / 606
VM-1B	34,4	62,3	200	500 / 606
VM-2A	34,4	39,3	250	500 / 689
VL-1	34,1	39,3	200	500 / 690
VL-2	39,8	39,3	200	500 / 690
VL-3	40,2	39,3	200	500 / 690
V2	36,6	39,3	200	500 / 688
V4	39,2	39,3	200	500 / 688
V5	34,7	39,3	200	500 / 688
VC1	28,5	39,3	200	600 / 785
VC3	31,3	39,3	200	600 / 785

Tabela 4.4 – Força cortante resistente das vigas antes do reforço

Viga	NBR 6118/80					NBR 6118/2003				
	V_c (kN)	(1)		(2)		V_c (kN)	(1)		(2)	
		V_{sw} (kN)	V (kN)	V_{sw} (kN)	V (kN)		V_{sw} (kN)	V (kN)	V_{sw} (kN)	V (kN)
VM-1A	63,4	59,8	123,2	72,5	135,9	76,7	59,8	136,6	72,5	149,2
VM-1B	62,4	59,8	122,4	72,5	135,1	76,7	59,8	136,6	72,5	149,2
VM-2A	63,4	30,6	94,0	42,1	105,5	76,6	30,6	107,2	42,1	118,7
VL-1	58,5	38,2	96,7	52,7	111,2	77,5	38,2	115,7	52,7	130,2
VL-2	61,9	38,7	100,6	53,3	115,2	87,0	38,7	125,7	53,3	140,3
VL-3	62,2	38,7	100,9	53,3	115,5	87,6	38,7	126,3	53,3	140,9
V2	60,4	39,7	100,1	43,6	104,0	84,0	39,7	123,7	43,6	127,6
V4	62,5	40,1	102,6	44,2	106,7	88,0	40,1	128,1	44,2	132,2
V5	58,8	46,3	105,1	52,4	111,2	84,9	46,3	131,2	52,4	137,3
VC1	53,5	39,0	92,5	48,3	101,8	72,5	39,0	111,5	48,3	120,8
VC3	55,7	46,0	101,7	59,1	114,8	79,0	46,0	125,0	59,1	138,1

(1): Adotando valor da tensão de escoamento nominal

(2): Adotando valor da tensão de escoamento experimental

4.3 – Dimensionamento dos reforços

Através do programa, os reforços de flexão das vigas VM-1B, V1, V3, V5, VL1, VL2, VL3, VC2, VC3 e os reforços de cisalhamento das vigas VM-1A, VM-1B, VM-2A, V2, V4, V5, VL1, VL2, VL3, VC1, VC3 foram dimensionados, considerando as cargas de ruptura detectadas nos ensaios.

Inicialmente os cálculos foram executados considerando as tensões limites das armaduras internas e dos reforços e ainda os coeficientes de segurança dos materiais, seguindo o previsto nas normas de cálculo.

Desta forma, no geral, os reforços calculados apresentam dimensões maiores que os utilizados nas vigas ensaiadas, pois as resistências calculadas são inferiores às obtidas experimentalmente.

Em virtude disso, tentando representar a situação real dos ensaios, as vigas foram redimensionadas utilizando as tensões máximas detectadas nos ensaios e também desconsiderando os fatores de segurança dos materiais.

Neste caso, para as armaduras internas e para os reforços, a tensão limite foi considerada como sendo a tensão correspondente à deformação máxima medida no ensaio (de acordo com o diagrama tensão / deformação do material).

4.3.1 – Flexão

A tabela 4.5 contém as características dos reforços. Os valores do momento de ruptura da seção após o reforço foram encontrados através da carga de ruptura obtida experimentalmente para cada viga (equação 4.10) e estão apresentados na tabela 4.6.

$$M_{u,r} = P_{u,exp} \cdot a \quad 4.10$$

$P_{u,exp}$ = carga de ruptura da viga reforçada, obtida experimentalmente

a = distância do apoio ao ponto de aplicação da carga

$M_{u,r}$ = Momento de ruptura da seção reforçada

Tabela 4.5 – Características dos reforços de flexão das vigas ensaiadas

Viga	Características dos reforços						
	Técnica de reforço	b_r (mm)	t_r (mm)	f (mm)	d (mm)	f_y (MPa)	E (GPa)
VM-1B	Chapa colada	150	4,76	-	450	333	-
V1	Lâmina de fibra de carbono	100	1,2	-	450	-	165
V3	Lâmina de fibra de carbono	150	1,2	-	450	-	165
V5	Lâmina de fibra de carbono	250	1,2	-	450	-	165
VL-1	Barras coladas	-	-	2 ϕ 20	450	545	-
VL-2	Barras coladas	-	-	2 ϕ 20	450	545	-
VL-3	Barras coladas	-	-	2 ϕ 20	450	545	-
VC-2	Tecido de fibra de carbono	250	1,65	-	450	-	73,1
VC-3	Tecido de fibra de carbono	250	1,65	-	450	-	73,1

Tabela 4.6 – Resistência à flexão e modo de ruptura das vigas ensaiadas

Vigas	M_u * (kN)	$M_{u,exp}$ (kN.m)	?M (kN.m)	Modo de ruptura no ensaio
VM-1B	137	227,5	90,5	Escoamento da armadura long. interna e da chapa colada e esmagamento do concreto
V1	146,6	189	42	Escoamento da armadura longitudinal, destacamento e descolamento do reforço
V3	146,9	202,5	55,5	
V5	136,9	222,7	85,85	Escoamento da armadura longitudinal interna e esmagamento do concreto
VL-1	119,8	229,5	109,5	Escoamento das armaduras long. interna e de reforço e esmagamento do concreto
VL-2	121,4	175,5	54,1	Escoamento das armaduras long. interna e escorregamento das armaduras long. de reforço
VL-3	121,5	236,5	115	Fendilhamento do concreto ao longo da armadura long. interna e escoamento das armaduras long. interna e de reforço
VC-2	135	241,5	106,5	Escoamento da armadura long. interna, esmagamento do concreto e descolamento do reforço
VC-3	133	248,4	115,4	Descolamento dos reforços de cisalhamento e flexão, ruptura do reforço de flexão e escoamento da armadura longitudinal interna

* M_u obtido da tabela 4.2

?M – Parcela de momento absorvida pelo reforço (?M = $M_{u,r} - M_u$)

A tabela 4.7 apresenta as deformações e as respectivas tensões constatadas nos ensaios.

A deformação do reforço para a viga VC-2 não pode ser avaliada no momento da ruptura, provavelmente, segundo Araújo (2002), em virtude do descolamento dos extensômetros a partir da carga de 170 kN. Considerando que a viga teve o mesmo comportamento até a ruptura, foi prolongada a curva $P \times \epsilon$ (carga aplicada x deformação específica), dada por Araújo (2002), e encontrada para a carga de 175 kN ($P_{u,exp}$) a deformação de 7,5%. Portanto este foi o valor da deformação considerada no dimensionamento para que o resultado fique próximo à realidade do ensaio.

Os resultados do dimensionamento dos reforços são mostrados na tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Máximos valores das tensões e deformações das vigas ensaiadas - Flexão

Viga	Aço interno		Material do reforço	
	$\epsilon_{lim,e}$ (‰)	$S_{lim,e}$ (MPa)	$\epsilon_{r lim,e}$ (‰)	$S_{r lim,e}$ (MPa)
VM-1B	4,1	547	4,8	350
V1	24,3	660	5,2	858
V3	22,6	650	5,4	891
V5	18,4	579	6,3	1040
VL1	7,6	560	2,76	545
VL2	4,3	540	1,10	545
VL3	8,8	570	2,53	545
VC2	10,15	580	7,5 *	475
VC3	13,16	580	7,6	556

* Deformação estimada

São feitas algumas comparações das dimensões dos reforços calculadas pelo programa com as dimensões usadas nos ensaios, tomando como referência os valores calculados através das tensões máximas detectadas nos ensaios e que desconsideram os fatores de segurança dos materiais, pois estes valores se aproximam mais da realidade do ensaio.

A dimensão do reforço calculada para a viga VM-1B (150x5mm), reforçada com chapa de aço colada, foi semelhante à usada no ensaio (150x4,76), porém o programa detectou destacamento do concreto, o que não foi constatado no ensaio desta viga. No cálculo não foi considerado o sistema de ancoragem formado pelos reforços de cisalhamento, que além de reduzir tensões na chapa tracionada, promoveu uma maior sustentação da camada de concreto onde esta chapa era ancorada, impedindo assim o destacamento.

Tabela 4.8 – Dimensões dos reforços obtidos pelo programa - Flexão

a) Viga reforçada com chapa colada			
Viga	bxt*	bxt**	bxt***
VM1B	150x4,76(RC/RR)	150x7,3 (DC)	150x5(DC)
b) Vigas reforçadas com barras externas coladas			
Viga	ϕ^*	ϕ^{**}	ϕ^{***}
VL1	20(RC/RR)	23	19,5
VL2	20(RC/RR/DR)	16	13
VL3	20(RC/RR)	23	19
c) Vigas reforçadas com lâmina de fibra de carbono			
Viga	bxt*	bxt**	bxt***
V1	100x1,2 (DR / DC)	198x1,2	126x1,2
V3	150x1,2(DR / DC)	241x1,2	166x1,2
V5	250x1,2 (RC)	336X1,2	230X1,2
d) Vigas reforçadas com tecido de fibra de carbono			
Viga	bxt*	bxt**	bxt***
VC2	250x1,65(RC/DR)	250x3,8 (DC)	250x2
VC3	250x1,65(RC/DR)	250x4,4 (DC)	250x2,3

* reforços usados nos ensaios

** reforços calculados

*** reforços redimensionados, desprezando fator de segurança e considerando as deformações dos ensaios

Observações: Para os reforços com chapa colada e tecido de fibra de carbono, a largura das tiras de reforço foi mantida a mesma usada no ensaio. Os reforços com lâmina de fibra de carbono foram calculados de forma que a espessura do reforço permanecesse a mesma usada no ensaio.

(DR) – Ruptura por descolamento do reforço

(DC) – Ruptura por destacamento do concreto

(RC) – Ruptura clássica (escoamento das armaduras ou esmagamento do concreto)

(RR) – Ruptura do material de reforço

As dimensões dos reforços calculadas pelo programa para as vigas VL1 (19,5 mm) e VL3 (19 mm), reforçadas com barras coladas, se aproximaram muito dos valores usados nos ensaios destas vigas (20 mm).

O diâmetro do reforço calculado para a viga VL2 (13 mm), também reforçada com barras de aço coladas, foi pouco maior que a metade do valor usado no ensaio (20 mm). Isso se deu pois, no ensaio houve o deslizamento das barras longitudinais de reforço antes que a viga alcançasse sua resistência à flexão, porém o programa não prevê o deslizamento destas barras, pois é pressuposta a aderência aço/concreto. Portanto no ensaio as barras de reforço não chegaram a atingir sua tensão limite, justificando assim essa diferença.

Para a viga V1, reforçada com lâmina de fibra de carbono, o programa encontrou um reforço com dimensões de 126x1,2 mm, e no ensaio foi utilizado reforço de dimensões 100x1,2 mm. A viga V3, também reforçada com lâmina de fibra de carbono, teve como resultado um reforço com dimensões (166x1,2 mm) próximas às dimensões usadas no ensaio (150x1,2 mm).

Foi detectado, no entanto, que a ruptura destas duas vigas, no ensaio, foi causada pelo destacamento do concreto e descolamento do reforço. O descolamento do reforço é verificado pelo programa limitando a deformação da fibra em 5‰. Como no redimensionamento foi usada a deformação obtida nos ensaios, no caso das vigas V1 e V3 estes valores foram respectivamente de 5,2‰ e 5,4‰, superior ao limite citado acima, já foi assumido previamente o descolamento destes reforços. O destacamento do concreto foi consequência do descolamento do reforço, que fez reduzir a área de contato e aumentar, portanto, a tensão na face reforço/concreto.

Para a viga V5 foi encontrado reforço com dimensões de 230x1,2 mm, sendo que o reforço usado no ensaio tinha dimensões de 250x1,2 mm. Essa diferença nas dimensões pode ser explicada pois a ruptura desta viga, no ensaio, foi causada por escoamento da armadura longitudinal interna seguido de esmagamento do concreto, não havendo portanto ruptura do material de reforço.

A viga VC-2, reforçada com tecido de fibra de carbono, teve como resultado um reforço de dimensões 250x2 mm, próximas às usadas no ensaio (250x1,65 mm). O

dimensionamento para a viga VC-3, reforçada também com tecido de fibra de carbono, determinou um reforço com dimensões de 250x2,3 mm, sendo que no ensaio foi usado reforço com dimensões de 250x1,65 mm. Porém no ensaio desta última viga houve a influência dos reforços de cisalhamento, o que não é considerado no programa.

A influência dos reforços de cisalhamento vem a ser confirmada quando se compara os ensaios das vigas VC-2 e VC-3. Nos ensaios, estas duas vigas foram reforçadas quanto à flexão com tecido de dimensões 250x1,65 mm, porém somente a viga VC-3 foi reforçada quanto ao cisalhamento. Além disso a viga VC-2 tinha maior resistência teórica à flexão antes do reforço que a viga VC-3. Mesmo assim a carga de ruptura experimental para a viga VC-3 foi maior, pois os reforços de cisalhamento proporcionaram maior aproveitamento do reforço de flexão.

4.3.2 – Cisalhamento

A tabela 4.9 apresenta as características dos reforços usados nas vigas ensaiadas. A seguir é apresentada a tabela 4.10 onde são fornecidos os valores da carga de ruptura das vigas ensaiadas ($P_{u,exp}$), da parcela de esforço cortante resistida pela seção original (V) e da parcela de esforço cortante resistida pelo reforço (ΔV), além do modo de ruptura das vigas ensaiadas.

Tabela 4.9 – Características dos reforços de cisalhamento das vigas ensaiadas

Viga	d (mm)	x (mm)	f_{ck} (MPa)	f_r (mm)	b_r (mm)	t_r (mm)	f_{yr} (MPa)	E_r (GPa)	s_r (mm)
VM-1A	425	102	33,5	12,5	-	-	668	-	250
VM-1B	425	102	34,4	-	90	1	333	-	250
VM-2A	425	88	33,5	12,5	-	-	668	-	250
VL1	425	88	34,1	12,5	-	-	670	-	250
VL2	425	76	39,8	8	-	-	680	-	150
VL3	425	75	40,2	-	90	1	333	-	200
V2 *	404	167	36,6	-	50	1,2	-	165	200
V4 *	404	156	39,2	-	50	1,2	-	165	200
V5 *	422	72	34,7	-	50	1,2	-	165	200
VC1	411	210	28,5	-	100	1	-	73,1	200
VC3	421	79	31,3	-	100	1,65	-	73,1	200

* Lâminas a 90° e a 45°

Tabela 4.10 – Resistência ao cisalhamento e modo de ruptura das vigas ensaiadas

Viga	P_u (kN)	V^* (kN)	DV (kN)	Modo de ruptura no ensaio
VM-1A	175	135,9	39,1	Flexão
VM-1B	175	135,1	39,9	Flexão
VM-2A	190	105,5	84,5	Flexão
V2	161	104,0	57,0	Descolamento do reforço de cisalhamento (1)
				Flexão (2)
V4	180	106,7	73,3	Flexão
V5	165	111,2	53,8	Flexão
VL1	170	111,2	58,8	Flexão
VL2	130	115,2	14,8	Flexão
VL3	175	115,5	59,5	Flexão
VC1	180	101,8	78,2	Flexão
VC3	180	114,8	65,2	Descolamento do reforço de cisalhamento e flexão e escoamento da armadura long. Interna

* Calculado pela NBR 6118/80, adotando valor da tensão de escoamento experimental

(1) tiras verticais

(2) tiras inclinadas a 45°

Conforme dito anteriormente, as vigas foram também dimensionadas utilizando as tensões máximas detectadas nos ensaios e foram desconsiderados os fatores de segurança dos materiais.

Segundo a tabela 4.11, que apresenta os máximos valores das tensões e deformações das vigas ensaiadas, é constatado que somente a viga VL3 teve o valor da deformação do reforço transversal acima daquele adotado no cálculo do programa ($9,2\% > \epsilon_y$).

Para o dimensionamento dos reforços de cisalhamento, não é necessário entrar com o valor da tensão de escoamento das armaduras internas, sendo somente solicitada a tensão de escoamento (para reforço com chapas ou barras de aço) e o módulo de elasticidade (nos casos de reforço com fibra de carbono) do material de reforço. Desta forma, as vigas reforçadas com fibra de carbono não foram redimensionadas, pois os reforços não tiveram valores de deformações específicas maiores que os considerados no primeiro cálculo, em virtude da ruptura ter sido devido à flexão.

As demais vigas foram redimensionadas desconsiderando os fatores de segurança utilizado nos cálculos destes reforços. Na tabela 4.12 encontram-se os resultados obtidos pelo programa Reforçar.

Deve ser acrescentado o diâmetro da rosca às dimensões obtidas pelo programa para vigas reforçadas com estribos externos pré-tracionados.

Tabela 4.11 – Máximos valores das tensões e deformações das vigas ensaiadas - Cisalhamento

Viga	e_r (%)		s_r (MPa)
VM-1A	1,1		667
VM-1B	1,1		333
VM-2A	1,25		667
VL1	0,8		670
VL2	1,2		680
VL3	9,2		365
V2	(1) 2	(2) 2,17	-
V4	(1) 1,6	(2) 1,5	-
V5	(1) 1,5	(2) 1,3	-
VC1	2		-
VC3	1,28		-

(1) tiras verticais

(2) tiras inclinadas a 45°

Tabela 4.12 – Dimensões dos reforços obtidos pelo programa - Cisalhamento

a) Vigas reforçadas com chapa colada						
Viga	bxt*		bxt**		bxt***	
VM-1B	90x1		90x0,5		90x0,45	
VL3	90x1		90x0,6		90x0,5	
b) Viga reforçada com estribos externos pré-tracionados						
Viga	ϕ^*		ϕ^{**}		ϕ^{***}	
VM-1A	12,5		8,1+rosca		7,5+rosca	
VM-2A	12,5		11+rosca		10,5+rosca	
VL1	12,5		9+rosca		8,5+rosca	
c) Viga reforçada com barras coladas						
Viga	ϕ^*		ϕ^{**}		ϕ^{***}	
VL2	8		2,5		2,3	
d) Vigas reforçadas com lâmina de fibra de carbono (90° e 45°)						
Viga	bxt*		bxt**		bxt***	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
V2	50x1,2	50x1,2	17x1,2 (DC)	8,5x1,2 (DC)	-	-
V4	50x1,2	50x1,2	22x1,2 (DC)	11x1,2 (DC)	-	-
V5	50x1,2	50x1,2	14x1,2 (DC)	7x1,2 (DC)	-	-
e) Vigas reforçadas com tecido de fibra de carbono						
Viga	bxt*		bxt**		bxt***	
VC1	100x1		100x0,6		-	
VC3	100x1,65		100x0,4		-	

* reforços usados nos ensaios

** reforços calculados

*** reforços redimensionados, desprezando fator de segurança e considerando as deformações dos ensaios

(1) reforços a 90°

(2) reforços a 45°

Observações: Para os reforços com chapa colada e tecido de fibra de carbono, a largura das tiras de reforço foi mantida a mesma usada no ensaio. Os reforços com lâmina de fibra de carbono foram calculados de forma que a espessura do reforço permanecesse a mesma usada no ensaio.

(DR) – Ruptura por descolamento do reforço

(DC) – Ruptura por destacamento do concreto

A espessura calculada pelo programa Reforçar para as vigas VM-1B (90x0,45 mm) e VL-3 (90x0,5 mm) foi menor que o valor mínimo permitido pela norma CEB / 1983 ($t_{\min} = 1$ mm), portanto o recomendado é adotar-se para estas duas vigas reforço com espessura de 1 mm, igual à espessura usada nos ensaios. Para estas duas vigas a ruptura, nos ensaios, deu-se por flexão, mostrando que o reforço de cisalhamento suportaria ainda receber maiores tensões. Nestas vigas poderiam ter sido usadas chapas com dimensões de 50x1 mm, trazendo maior economia.

As vigas VM-1A (7,5 mm + rosca), VM-2A (10,5 mm + rosca) e VL-1 (8,5 mm + rosca), reforçadas com estribos externos pré-tracionados, tiveram como resultados reforços com dimensões menores que a usada no ensaio (12,5 mm). Nos ensaios, estas vigas romperam por flexão, mostrando que os reforços de cisalhamento ainda suportariam tensões maiores. Isso vem provar que poderia ter sido usado um reforço de cisalhamento com menor seção.

A dimensão do reforço calculada pelo programa para a viga VL2 (2,3 mm), reforçada com barras coladas, foi inferior ao usado no ensaio (8 mm). Neste caso a ruptura da viga, no ensaio, se deu também por flexão, e portanto poderia ter sido usado um reforço de cisalhamento com menor seção, trazendo maior economia.

As vigas VC-1 (100x0,6) e VC-3 (100x0,4) tiveram resultados com dimensões menores que aquelas usadas nos reforços (100x1 e 100x1,65, respectivamente). Sabendo que cada camada de tecido de fibra de carbono tem espessura de 0,33 mm, o reforço adotado para estas duas vigas seria de 100x0,67 mm, ou seja, duas camadas de tecido.

No ensaio da viga VC-1 foi constatado ruptura por flexão, mostrando que poderiam ter sido usados nesta viga reforços de cisalhamento com menor seção, trazendo maior economia.

Para a viga VC-3 a ruptura, no ensaio, deu-se também por descolamento do reforço de cisalhamento, além de ruptura por flexão, porém no cálculo não houve constatação de descolamento deste reforço, pois a deformação da fibra é limitada em 5‰ (valor capaz de evitar seu descolamento). A deformação do reforço medida no ensaio, segundo a tabela 4.10, foi de 1,28‰, sendo portanto menor que o valor limite, citado

acima. Conclui-se, pois, que o descolamento do reforço na viga ensaiada foi causado por influência do descolamento do reforço de flexão, que sofreu deformação de 7,6 ‰ e estava sendo ancorado pelas tiras de reforço de cisalhamento.

As vigas V2, V4 e V5, reforçadas com lâminas de fibra de carbono, tiveram como resultado reforços com dimensões inferiores às usadas nos ensaios (50x1,2 mm), porém é recomendável que se use largura mínima de 50 mm para as lâminas de reforço, portanto a dimensão do reforço a ser adotada seria de 50x1,2 mm, tanto para reforços verticais quanto para reforços inclinados à 45°. A ruptura, nos ensaios, foi devido à flexão, mostrando que os reforços de cisalhamento ainda poderiam atingir maiores tensões. O cálculo apontou ruptura por destacamento do concreto, porém isto foi considerando a tensão nos reforços como sendo igual a tensão limite do material, fato que não ocorreu nos ensaios, pois as tensões nos reforços de cisalhamento não chegaram a atingir este limite.

Não foi possível fazer uma análise maior dos resultados encontrados pelo programa com as vigas ensaiadas, pois as vigas reforçadas ao cisalhamento tiveram ruptura por flexão e portanto as armaduras de cisalhamento não chegaram ao escoamento.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como principal objetivo a elaboração de um programa de dimensionamento de reforços ao cisalhamento e/ou à flexão em vigas de concreto armado.

A aplicação do programa foi realizada utilizando algumas vigas ensaiadas em estudos anteriores, executados na COPPE, mostrados no Capítulo 2. Estas vigas tinham seção transversal de 450x150 mm, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas.

As dimensões dos reforços usadas nos ensaios foram comparadas com aquelas obtidas pelo programa “Reforçar”, constatando-se uma boa concordância entre estes valores. As diferenças existentes podem ser caracterizadas como conseqüências de simplificações adotadas nos cálculos.

Constatou-se, portanto, que o modelo de treliça pode ser adotado para avaliar a capacidade resistente ao esforço cortante de vigas reforçadas ao cisalhamento.

O diagrama retangular de tensões dado pela NBR 6118 (2003) também mostrou ser eficiente no dimensionamento da capacidade resistente à flexão de vigas reforçadas.

Para as técnicas que utilizam chapas de aço ou fibras de carbono, foi visto no capítulo 2 que além do dimensionamento da seção do reforço, deve ser verificada também a tensão na face concreto/reforço, que deve ser limitada à tensão máxima admissível no concreto, para não haver destacamento. No caso de reforço com fibra de carbono, é fundamental estabelecer o valor da deformação deste compósito (sugere-se o valor de 5‰ para lâminas e 6‰ para tecidos), evitando seu descolamento.

Nos reforços de flexão, o sistema de ancoragem formado pelas tiras de reforço de cisalhamento faz reduzir as tensões no reforço tracionado e promove uma maior sustentação da camada de concreto onde este reforço é ancorado, impedindo

destacamento do concreto. Sendo assim, os reforços de cisalhamento proporcionam maior aproveitamento do reforço de flexão.

Desta forma, conclui-se que o programa é uma eficiente ferramenta para cálculo de reforços à flexão e ao cisalhamento em vigas de concreto armado, pois proporciona um rápido dimensionamento, permitindo uma melhor análise para definição da técnica de reforço a ser empregada. A escolha pela técnica de reforço está condicionada a diversos fatores, como: estética, custo, tempo de execução e características estruturais.

O programa desenvolvido possui grande valor prático uma vez que, atualmente, não há referências sobre projeto e execução de reforços de estruturas nas normas brasileiras, dificultando esta verificação.

É essencial continuar pesquisas nesta área para que se consiga obter mais dados para o entendimento do comportamento de estruturas submetidas a reforços. São sugeridos os seguintes tópicos:

- Implementação do programa com outras técnicas de reforço;
- Implementação do programa para cálculo da capacidade resistente das peças antes do reforço;
- Método de cálculo que considere a ancoragem dos reforços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (Committee 318 - ACI), 1992, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete" (ACI 318-89) (Revised 1992).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (Committee 318 - ACI), 1999, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary" (ACI 318-99).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (Committee 440 - ACI), 2002, "Guide for Design and Construction of Externally Bounded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".

ARAÚJO, CAROLINE MAIA, 2002, "Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto com Tecidos de Fibra de Carbono" – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, 1980, "Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado" – Procedimento. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, 2003, "Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado" – Procedimento. Brasil.

BAUER, L.A. FALCÃO – "Materiais de Construção", v. 2, 2000

CÀNOVAS, M. F., 1985, "Patologia y Terapeutica del Hormigón Armado", Editorial Lossat S.A., Madrid.

CARNEIRO, L. A. V., 1998, "Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado" – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CERQUEIRA, ELIETE DA CONCEIÇÃO, 2000, “Reforço ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB), 1983, “Assessment on Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading”, Bulletin d’Information nº 162.

FIB / CEB-FIP , 2001, “Design and use of externally bounded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures”, Bulletin 14.

FONTES, PATRÍCIA COELHO TEIXEIRA, 1997, “Reforço de Vigas ao Esforço Cortante por Vergalhões Colados” – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FREITAS, LUCIANA BARBOSA DE, 1997, “Reforço de Vigas de Concreto Armado ao Esforço Cortante com Chapas de Aço Coladas” – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FUSCO, PÉRICLES. BRASILIENSE., 1982, “Estruturas de Concreto – Solicitações Tangenciais”, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica.

JUVANDES, L.F.P., 1999, “Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais Compósitos de CFRP” – Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

MASTERS BUILDERS TECHNOLOGIES (M.B.T.), 1996, Tow Sheet Design Procedures.

MACHADO, ARI DE PAULA, 2002, “Reforço de Estruturas de Concreto com Fibras de Carbono – Características, dimensionamento e aplicação”, Editora PINI.

MEIER, U., 1992, “Carbon Fiber – Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering”, Structural Engineering International, v. 1.

MICHEL, DANIELLA PIRES, 1996, “Reforço ao Esforço Cortante de Vigas com Estribos Pré-tracionados” – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MORAIS, M. C. D., 1997, “Reforço de Vigas de Concreto” – Tese M.Sc. , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

PINTO, C., 2000, “Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” – Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

REVISTA CREA-SP, Jan/Fev 2001, “A Revolução da Fibra de Carbono” – Ano 1 – N^o 1

SHEHATA, I. A. M., 1996, “Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto Armado e Protendido”, Notas de Aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SIKA, 1998, “Reforzamiento com Sistemas de Fibras de Carbono para Estructuras de Concreto y Madera “– Guías de Diseño e Instalación.

TOUTANJI, H.A.; GÓMEZ, W., 1997, “Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bounded with FRP Composites Sheets”, *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n^o 4, pp. 315-358.

TRANTAFILLOU, THANASIS C., 1998, “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Epoxy-bounded FRP Composites”, *ACI Structural Journal*, v. 95, n. 2, pp. 107-122.

31^a REUNIÃO DO IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, pp. 169-170.

ANEXO

LISTAGEM DO PROGRAMA

Chapa contínua – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()  
txtobs.Text = ""  
Call biela  
  
fy = Val(txtfy.Text)  
fyd = fy / 1.15  
  
If sigbiela > (0.6 * fcd) Then  
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"  
Else  
alfa2 = 90 - teta  
dv = 2 * dv * Sin(alfa2 * 3.141592654 / 180)  
e = (dv * Tan(teta * 3.141592654 / 180)) / (2 * (d - x) * fyd)  
  
If e < 3 Then  
tal = (2 * e * fyd) / ((d - x) * Cos(teta * 3.141592654 / 180))  
If tal <= (0.5 * 0.1 * fcd) Then  
txtobs.Text = "REFORÇO DEFINIDO"  
Else  
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"  
End If  
Else  
txtobs.Text = "Espessura excessiva"  
End If  
  
txte.Text = Format(e, "0.00E-00")  
End If  
End Sub  
  
Sub biela()  
d = Val(t added).Text)  
x = Val(txtx.Text)  
teta = Val(txtteta.Text)  
b = Val(txtb.Text)  
alfa = Val(txtalfa.Text)  
v = Val(txtv.Text)  
dv = Val(t added).Text)  
fck = Val(txtfck.Text)  
z = d - (0.4 * x)
```

```
fcd = fck / 1.4  
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *  
3.141592654 / 180))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()  
form2.Show  
form3.Hide  
End Sub
```

Chapas em tiras – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()  
txtobs.Text = ""  
Call biela
```

```
d = Val(txttd.Text)  
x = Val(tctx.Text)  
teta = Val(txtteta.Text)  
dv = Val(txtdv.Text)  
fy = Val(txtfy.Text)  
z = d - (0.4 * x)  
bch = Val(txtbch.Text)  
Sext = Val(txtsext.Text)  
fck = Val(txtfck.Text)  
fyd = fy / 1.15  
fcd = fck / 1.4
```

```
If sigbiela > (0.6 * fcd) Then  
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"  
Else  
e = (dv * Sext) / (z * (1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) * 2 * bch * fyd)  
txte.Text = Format(e, "0.00E-00")
```

```
If e < 3 Then  
tal = (2 * e * fyd) / d  
If tal <= (0.5 * 0.1 * fcd) Then  
txtobs.Text = "REFORÇO DEFINIDO"  
Else  
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"  
End If  
Else  
txtobs.Text = "Espessura excessiva"  
End If  
End If  
End Sub
```

```
Sub biela()  
d = Val(txttd.Text)  
x = Val(tctx.Text)
```

```
teta = Val(txtteta.Text)
b = Val(txtb.Text)
alfa = Val(txtalfa.Text)
v = Val(txtv.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
z = d - (0.4 * x)

fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *
3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)

End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
form4.Hide
End Sub
```

Tecido de fibra de carbono – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()
txtobs.Text = ""
Call biela
d = Val(txtd.Text)
x = Val(txtx.Text)
teta = Val(txtteta.Text)
alfa = Val(txtalfa.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
z = d - (0.4 * x)
bf = Val(txtbf.Text)
Sext = Val(txtsext.Text)
Ef = Val(txtEf.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
fcd = fck / 1.4

If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
fdesc = Ef * 6 / 1000

e = (dv * Sext) / (z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 /
180)))) * 2 * bf * fdesc)
n = Int(e / 0.3) + 1
If n <= 5 Then
tal = (2 * e * fdesc) / d
If tal <= (0.5 * 0.1 * fcd) Then
txtobs.Text = "REFORÇO DEFINIDO"
Else
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"
```

```
End If
Else
txtobs.Text = "Espessura excessiva"
End If
txte.Text = Format(e, "0.00E-00")
txtn.Text = Format(n, "0")
End If
End Sub
```

```
Sub biela()
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
b = Val(txtB.Text)
alfa = Val(txtAlfa.Text)
v = Val(txtV.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
fck = Val(txtFck.Text)
z = d - (0.4 * x)

fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *
3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)

End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
form5.Hide
End Sub
```

Lâmina de fibra de carbono – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()
txtobs.Text = ""
Call biela
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
alfa = Val(txtAlfa.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
z = d - (0.4 * x)
e = Val(txte.Text)
Sext = Val(txtSext.Text)
Ef = Val(txtEf.Text)
fck = Val(txtFck.Text)

If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
```

```
fcd = fck / 1.4
fdesc = Ef * 5 / 1000

bf = (dv * Sext) / (z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 / 180)))) * 2 * e * fdesc

tal = (2 * e * fdesc) / d

If tal <= (0.5 * 0.1 * fcd) Then
txtobs.Text = "REFORÇO DEFINIDO"
Else
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"
End If
txtbf.Text = Format(bf, "0.00E-00")
End If
End Sub
Sub biela()
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
b = Val(txtB.Text)
alfa = Val(txtAlfa.Text)
v = Val(txtV.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
fck = Val(txtFck.Text)
z = d - (0.4 * x)

fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2

End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
form6.Hide
End Sub
```

Barras coladas – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()
txtobs.Text = ""
Call biela
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
z = d - (0.4 * x)
Sext = Val(txtSext.Text)
fy = Val(txtFy.Text)
fyd = fy / 1.15
```

```

If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
fi = ((2 * dv * Sext) / (z * (1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) * 3.141592654 * fyd)) ^ 0.5
txtfi.Text = Format(fi, "0.00E-00")
End If
End Sub
Sub biela()
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
b = Val(txtB.Text)
alfa = Val(txtAlfa.Text)
v = Val(txtV.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
fck = Val(txtFck.Text)
z = d - (0.4 * x)

fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *
3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)

End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
form7.Hide
End Sub

```

Estribos externos pré-tracionados – Cisalhamento

```

Private Sub btncalcular_Click()
Call biela
d = Val(txtD.Text)
x = Val(txtX.Text)
teta = Val(txtTeta.Text)
dv = Val(txtDV.Text)
z = d - (0.4 * x)
Sext = Val(txtSext.Text)
fy = Val(txtFy.Text)
fyd = fy / 1.15

If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
fi = ((4 * dv * Sext) / (z * (1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) * 3.141592654 * fyd)) ^ 0.5
txtfi.Text = Format(fi, "0.00E-00")
End If
End Sub

```

```
Sub biela()  
d = Val(txtD.Text)  
x = Val(txtX.Text)  
teta = Val(txtTeta.Text)  
b = Val(txtB.Text)  
alfa = Val(txtAlfa.Text)  
v = Val(txtV.Text)  
dv = Val(txtDV.Text)  
fck = Val(txtFck.Text)  
z = d - (0.4 * x)  
  
fcd = fck / 1.4  
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *  
3.141592654 / 180))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)  
  
End Sub
```

```
Private Sub btnRetornar_Click()  
form2.Show  
form8.Hide  
End Sub
```

Encamisamento – Cisalhamento

```
Private Sub btnCalcular_Click()  
  
d = Val(txtD.Text)  
x = Val(txtX.Text)  
b = Val(txtB.Text)  
teta = Val(txtTeta.Text)  
v = Val(txtV.Text)  
dv = Val(txtDV.Text)  
z = d - (0.4 * x)  
Sint = Val(txtSint.Text)  
fy = Val(txtfy.Text)  
fck = Val(txtFck.Text)  
alfa = Val(txtAlfa.Text)  
c = 20  
  
fcd = fck / 1.4  
fyd = fy / 1.15  
  
txtbnovo.Text = ""  
txtfi.Text = ""  
  
bnovo = (v + dv) / (0.6 * fcd * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *  
3.141592654 / 180))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)  
fi = ((2 * dv * Sint) / (z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 /  
180))) * 3.141592654 * fyd)) ^ 0.5  
  
If bnovo <= b Then
```

```
bnovo = b
Else
If bnovo <= (b - 2 * c + 150) Then
bnovo = (b - 2 * c + 150)
End If
End If
```

```
txtbново.Text = Format(bново, "0.00E-00")
txtfi.Text = Format(fi, "0.00E-00")
```

```
btn1:
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
Form9.Hide
End Sub
```

Armadura Long. Pré-tracionada – Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()
txtobs.Text = ""
Call biela
If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
Call longitudinal_cisalhamento
nu = asp1 / asp2
txtasp.Text = Format(asp1, "0.00E-00")
txtnu.Text = Format(nu, "0.00E-00")
End If
End Sub
```

```
Sub longitudinal_cisalhamento()
```

```
emax = Val(txtemax.Text)
fysp = Val(txtfysp.Text)
Lcis = Val(txtlcis.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
fi2 = Val(txtfi2.Text)
```

```
fyspd = fysp / 1.15
alfa2 = (emax) / Lcis
```

```
asp1 = dv / (0.6 * fyspd * alfa2)
asp2 = (fi2) ^ 2 * 3.141592654 / 4
```

```
End Sub
```

```
Sub biela()
```

```
d = Val(txtd.Text)
x = Val(txtx.Text)
teta = Val(txtteta.Text)
b = Val(txtb.Text)
alfa = Val(txtalfa.Text)
v = Val(txtv.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
z = d - (0.4 * x)
```

```
fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *
3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnhelp_Click()
form21.Show
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()
form2.Show
form10.Hide
End Sub
```

Chapa de aço – Flexão

```
Private Sub btncalcular_Click()
d = Val(txd(0).Text)
d2 = Val(txd(1).Text)
dr = Val(txtdr.Text)
x = Val(ttx.Text)
b = Val(txtb.Text)
a = Val(txta(0).Text)
a2 = Val(txta(1).Text)
fy = Val(txtfy(0).Text)
fyr = Val(txtfyr.Text)
br = Val(txtbr.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
Er = Val(txter.Text)
Es = Val(txtes.Text)
Ec = Val(txtec.Text)
Lcis = Val(txtlcis.Text)
m = Val(txtmorig.Text)
```

```
fydr = fyr / 1.15
fyd = fy / 1.15
fcd = fck / 1.4
epsy = fyd / Es
epsyr = fydr / Er
sigma_2 = fyd
sigma_r = fydr
n = 0
k = 0
k2 = 0
```

```
txte.Text = ""
txtxnovo.Text = ""
```

```
btn1:
While (Abs(xnovo - x) > 0.01 * xnovo)
n = n + 1
If n > 1 Then
x = xnovo
End If
e = (m - (a * fyd * (d - (0.4 * x))) - (a2 * sigma_2 * ((0.4 * x) - d2))) / (br * sigma_r * (dr - (0.4 * x)))
ar = e * br
xnovo = (a * fyd - a2 * sigma_2 + ar * sigma_r) / (0.85 * 0.8 * fcd * b)
If n = 30 Then
txtobs.Text = "Rever dados. Loop interminável"
```

```

GoTo btn2:
End If
Wend

eps1 = ((xnovo - d2) * 3.5 / 1000) / xnovo

ro = a / (b * d)
xe = ((((((Es / Ec) * ro) ^ 2) + (2 * (Es / Ec) * ro)) ^ 0.5) - ((Es / Ec) * ro)) * d

mpp = morig / 4
sig = mpp / (a * (d - xe / 3))
epsserv = sig / Es
epspp = (xe * epsserv) / (d - xe)
epsr = (3.5 - epspp) * (dr - xnovo) / xnovo

k = k + 1
If k = 1 Then
If eps1 < epsy Then
sigma_2 = eps1 * Es
GoTo btn1:
End If
End If

k2 = k2 + 1
If k2 = 1 Then
If Abs(epsr) < epsyr Then
sigma_r = epsr * Er
GoTo btn1:
End If
End If
txtobs.Text = ""

tal = e * fyr / Lcis

If e < 0 Then
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço"
Else
If tal > (0.5 * fcd / 10) Then
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"
End If
txte.Text = Format(e, "0.00E-00")
txtxnovo.Text = Format(xnovo, "0.00E-00")
End If

btn2:
End Sub

Private Sub btnhelp_Click()
Form22.Show
End Sub

```

```
Private Sub btnretornar_Click()  
Form11.Show  
Form12.Hide  
End Sub
```

Barras coladas – Flexão

```
Private Sub btncalcular_Click()  
d = Val(txt(0).Text)  
d2 = Val(txt(1).Text)  
dr = Val(txtdr.Text)  
x = Val(txtx.Text)  
b = Val(txtb.Text)  
a = Val(txta(0).Text)  
a2 = Val(txta(1).Text)  
fy = Val(txtfy(0).Text)  
fyr = Val(txtfyr.Text)  
fck = Val(txtfck.Text)  
Er = Val(txter.Text)  
Es = Val(txtes.Text)  
Ec = Val(txtec.Text)  
m = Val(txtmorig.Text)  
nb = Val(txtnb.Text)
```

```
fydr = fyr / 1.15  
fyd = fy / 1.15  
fcd = fck / 1.4  
epsy = fyd / Es  
epsyr = fydr / Er
```

```
sigma_2 = fyd  
sigma_r = fydr  
n = 0
```

```
txtfi.Text = ""  
txtxnovo.Text = ""
```

```
btn1:  
While (Abs(xnovo - x) > 0.01 * xnovo)  
    n = n + 1  
    If n > 1 Then  
        x = xnovo  
    End If  
    ar = (m - a * fyd * (d - (0.4 * x)) - a2 * sigma_2 * ((0.4 * x) - d2)) / (sigma_r * (dr - (0.4 * x)))
```

```
xnovo = (a * fyd - a2 * sigma_2 + ar * sigma_r) / (0.85 * 0.8 * fcd * b)  
If n = 30 Then  
    txtobs.Text = "Rever dados. Loop interminável"  
    GoTo btn2:
```

```

End If
Wend

eps1 = ((xnovo - d2) * 3.5 / 1000) / xnovo

ro = a / (b * d)
xe = ((((((Es / Ec) * ro) ^ 2) + (2 * (Es / Ec) * ro)) ^ 0.5) - ((Es / Ec) * ro)) * d

mpp = morig / 4
sig = mpp / (a * (d - xe / 3))
epsserv = sig / Es
epspp = (xe * epsserv) / (d - xe)
epsr = (3.5 - epspp) * (dr - xnovo) / xnovo

txtobs.Text = ""

k = k + 1
If k = 1 Then
If eps1 < epsy Then
sigma_2 = eps1 * Es
GoTo btn1:
End If
End If

k2 = k2 + 1
If k2 = 1 Then
If Abs(epsr) < epsyr Then
sigma_r = epsr * Er
GoTo btn1:
End If
End If

If ar < 0 Then
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço"
Else
ar = ar / nb
fi = (ar * 4 / 3.141592654) ^ 0.5
txffi.Text = fi
txtxnovo.Text = Format(xnovo, "0.00E-00")
End If
btn2:
End Sub

Private Sub btnhelp_Click()
Form22.Show
End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
Form11.Show
Form13.Hide
End Sub

```

Tecido de fibra de carbono – Flexão

```

Private Sub btncalcular_Click()
d = Val(txtD(0).Text)
d2 = Val(txtD(1).Text)
dr = Val(txtDr.Text)
x = Val(txtX.Text)
b = Val(txtB.Text)
a = Val(txtA(0).Text)
a2 = Val(txtA(1).Text)
fy = Val(txtfy(0).Text)
Ef = Val(txtEf.Text)
br = Val(txtbr.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
Es = Val(txtEs.Text)
Ec = Val(txtEc.Text)
Lcis = Val(txtLcis.Text)
m = Val(txtmorig.Text)

fydr = Ef * (6 / 1000)
fyd = fy / 1.15
fcd = fck / 1.4
epsy = fyd / Es
epsyr = fydr / Ef

sigma_2 = fyd
sigma_r = fydr
n = 0

txte.Text = ""
txtxnovo.Text = ""

btn1:
While (Abs(xnovo - x) > 0.01 * xnovo)
    n = n + 1
    If n > 1 Then
        x = xnovo
    End If
    e = (m - a * fyd * (d - (0.4 * x)) - a2 * sigma_2 * ((0.4 * x) - d2)) / (br * sigma_r * (dr - (0.4 * x)))
    ar = e * br
    xnovo = (a * fyd - a2 * sigma_2 + ar * sigma_r) / (0.85 * 0.8 * fcd * b)
    If n = 30 Then
        txtobs.Text = "Rever dados. Loop interminável"
        GoTo btn2:
    End If
Wend

eps1 = ((xnovo - d2) * 3.5 / 1000) / xnovo

ro = a / (b * d)

```

$$xe = ((((((Es / Ec) * ro) ^ 2) + (2 * (Es / Ec) * ro)) ^ 0.5) - ((Es / Ec) * ro)) * d$$

```
mpp = morig / 4
sig = mpp / (a * (d - xe / 3))
epsserv = sig / Es
epspp = (xe * epsserv) / (d - xe)
epsr = (3.5 - epspp) * (dr - xnovo) / xnovo
```

```
txtobs.Text = ""
```

```
k = k + 1
If k = 1 Then
If eps1 < epsy Then
sigma_2 = eps1 * Es
GoTo btn1:
End If
End If
```

```
k2 = k2 + 1
If k2 = 1 Then
If Abs(epsr) < epsyr Then
sigma_r = epsr * Er
GoTo btn1:
End If
End If
```

```
tal = e * fydr / Lcis
```

```
If e < 0 Then
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço"
Else
If tal > (0.5 * fcd / 10) Then
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"
End If
txte.Text = Format(e, "0.00E-00")
txtxnovo.Text = Format(xnovo, "0.00E-00")
End If
```

```
btn2:
End Sub
```

```
Private Sub btnhelp_Click()
Form22.Show
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()
Form11.Show
Form14.Hide
End Sub
```

Lâmina de fibra de carbono – Flexão

```

Private Sub btncalcular_Click()
d = Val(txtD(0).Text)
d2 = Val(txtD(1).Text)
dr = Val(txtDr.Text)
x = Val(txtX.Text)
b = Val(txtB.Text)
a = Val(txtA(0).Text)
a2 = Val(txtA(1).Text)
fy = Val(txtfy(0).Text)
Ef = Val(txtEf.Text)
e = Val(txtE.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
Es = Val(txtEs.Text)
Ec = Val(txtEc.Text)
Lcis = Val(txtLcis.Text)
m = Val(txtmorig.Text)

fydr = Ef * (5 / 1000)
fyd = fy / 1.15
fcd = fck / 1.4
epsy = fyd / Es
epsyr = fydr / Ef
sigma_2 = fyd
sigma_r = fydr
n = 0

txtbr.Text = ""
txtxnovo.Text = ""

btn1:
While (Abs(xnovo - x) > 0.01 * xnovo)
    n = n + 1
    If n > 1 Then
        x = xnovo
    End If
    br = (m - a * fyd * (d - (0.4 * x)) - a2 * sigma_2 * ((0.4 * x) - d2)) / (e * sigma_r * (dr - (0.4 * x)))
    ar = e * br
    xnovo = (a * fyd - a2 * sigma_2 + ar * sigma_r) / (0.85 * 0.8 * fcd * b)
    If n = 30 Then
        txtobs.Text = "Rever dados. Loop interminável"
        GoTo btn2:
    End If
Wend

eps1 = ((xnovo - d2) * 3.5 / 1000) / xnovo

ro = a / (b * d)

```

$$xe = ((((((Es / Ec) * ro) ^ 2) + (2 * (Es / Ec) * ro)) ^ 0.5) - ((Es / Ec) * ro)) * d$$

```
mpp = morig / 4
sig = mpp / (a * (d - xe / 3))
epsserv = sig / Es
epspp = (xe * epsserv) / (d - xe)
epsr = (3.5 - epspp) * (dr - xnovo) / xnovo
```

```
txtobs.Text = ""
k = k + 1
If k = 1 Then
If eps1 < epsy Then
sigma_2 = eps1 * Es
GoTo btn1:
End If
End If
```

```
k2 = k2 + 1
If k2 = 1 Then
If Abs(epsr) < epsyr Then
sigma_r = epsr * Er
GoTo btn1:
End If
End If
```

```
tal = e * fydr / Lcis
```

```
If br < 0 Then
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço"
Else
If tal > (0.5 * fcd / 10) Then
txtobs.Text = "Destacamento do concreto"
End If
txtbr.Text = Format(br, "0.00E-00")
txtxnovo.Text = Format(xnovo, "0.00E-00")
End If
```

```
btn2:
End Sub
```

```
Private Sub btnhelp_Click()
Form22.Show
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()
Form11.Show
Form15.Hide
End Sub
```

Protensão externa – Flexão

```
Private Sub btncalcular_Click()  
Call longitudinal_flexao  
txtasp.Text = Format(asp, "0.00E-00")  
End Sub
```

```
Sub longitudinal_flexao()
```

```
d = Val(txtD.Text)  
x = Val(txtX.Text)  
dm = Val(txtDM.Text)  
fysp = Val(txtFysp.Text)  
emax = Val(txtEmax.Text)
```

```
fyd = fysp / 1.15
```

```
sigma = 0.6 * fyd  
f = dm / emax  
asp = f / sigma
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnhelp_Click()  
Form23.Show  
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()  
Form11.Show  
Form16.Hide  
End Sub
```

Encamisamento – Flexão

```
Private Sub btncalcular_Click()
```

```
b = Val(txtb.Text)  
d = Val(txtD(0).Text)  
d2 = Val(txtD(1).Text)  
fy = Val(txtfy2.Text)  
fck = Val(txtfck.Text)  
a = Val(txta(0).Text)  
dnovo = Val(txtDnovo.Text)  
bnovo = Val(txtbnovo.Text)  
fynovo = Val(txtfyNovo.Text)  
a2 = Val(txta(1).Text)  
Er = Val(txtEr.Text)  
Es = Val(txtEs.Text)  
Ec = Val(txtEc.Text)
```

```

Lcis = Val(txtlcis.Text)
m = Val(txtmorig.Text)

fyd = fy / 1.15
fydnovo = fynovo / 1.15
fcd = fck / 1.4
epsy = fyd / Es
epsyr = fydnovo / Er
sigma_2 = fyd
sigma_r = fydnovo
z1 = 0.87 * dnovo
X1 = 0
X1 = (dnovo - z1) / 0.4
xnovo = 0
n = 0

txtasnovo.Text = ""
txtxnovo.Text = ""

btn1:
While (Abs(xnovo - X1) > 0.01 * xnovo)
  n = n + 1
  If n > 1 Then
    X1 = xnovo
  End If
  asnovo = (m - a * fyd * (d - 0.4 * X1) - a2 * sigma_2 * (0.4 * X1 - d2)) / (sigma_r * (dnovo - 0.4 * X1))
  xnovo = (a * fyd + asnovo * sigma_r - a2 * sigma_2) / (0.85 * 0.8 * fcd * bnovo)
  If n = 30 Then
    txtobs.Text = "Rever dados. Loop interminável"
    GoTo btn2:
  End If
Wend
eps1 = ((xnovo - d2) * 3.5 / 1000) / xnovo

ro = a / (b * d)
xe = ((((((Es / Ec) * ro) ^ 2) + (2 * (Es / Ec) * ro)) ^ 0.5) - ((Es / Ec) * ro)) * d

mpp = morig / 4
sig = mpp / (a * (d - xe / 3))
epsserv = sig / Es
epspp = (xe * epsserv) / (d - xe)
epsr = (3.5 - epspp) * (dr - xnovo) / xnovo

txtobs.Text = ""

k = k + 1
If k = 1 Then
  If eps1 < epsy Then
    sigma_2 = eps1 * Es

```

```
GoTo btn1:  
End If  
End If
```

```
k2 = k2 + 1  
If k2 = 1 Then  
If Abs(epsr) < epsyr Then  
sigma_r = epsr * Er  
GoTo btn1:  
End If  
End If
```

```
If asново < 0 Then  
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço"  
Else  
txtasново.Text = Format(asново, "0.00E-00")  
txtxново.Text = Format(xново, "0.00E-00")  
End If
```

```
btn2:  
End Sub
```

```
Private Sub btnhelp_Click()  
Form22.Show  
End Sub
```

```
Private Sub btnretornar_Click()  
Form11.Show  
Form17.Hide  
End Sub
```

Encamisamento – Flexão e Cisalhamento

```
Private Sub btncalcular_Click()  
txtasново.Text = ""  
txtxново.Text = ""  
txtobs.Text = ""  
txtbново.Text = ""  
txtfi.Text = ""
```

```
Call encamisamento  
End Sub
```

```
Sub encamisamento()
```

```
d = Val(txtb.Text)  
b = Val(txtb.Text)  
fy2 = Val(txtfy2.Text)  
m = Val(txtm.Text)  
fck = Val(txtfck.Text)  
a = Val(txtas.Text)
```

```
dnovo = Val(txtdnovo.Text)
fynovo = Val(txtfynovo.Text)
a2 = Val(txta2.Text)
teta = Val(txtteta.Text)
v = Val(txtv.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
Sint = Val(txtsint.Text)
fy = Val(txtfy.Text)
alfa = Val(txtalfa.Text)

c = 20
bnovo = (b - 2 * c + 150)
fyd2 = fy2 / 1.15
fydnovo = fynovo / 1.15
fyd = fy / 1.15
fcd = fck / 1.4

Call encamisamento_flexao
If asnovo < 0 Then
txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço de flexão"
GoTo btn1:
End If
Call encamisamento_cisalhamento

While Abs(bnovo2 - bnovo) > 0.01 * bnovo2
  bnovo = bnovo2
  Call encamisamento_flexao
  If asnovo < 0 Then
    txtobs.Text = "Viga não precisa de reforço de flexão"
    GoTo btn1:
  End If
  Call encamisamento_cisalhamento
  If bnovo2 <= b Then
    bnovo2 = b
  End If
Wend

txtasnovo.Text = Format(asnovo, "0.00E-00")
txtxnovo.Text = Format(xnovo, "0.00E-00")
If bnovo2 > bnovo Then
txtbnovo.Text = Format(bnovo2, "0.00E-00")
Else
txtbnovo.Text = Format(bnovo, "0.00E-00")
End If
txtfi.Text = Format(fi, "0.00E-00")

btn1:
End Sub

Sub encamisamento_flexao()
```

```

z1 = 0.87 * dnovo
X1 = 0
X1 = (dnovo - z1) / 0.4
xnovo = 0
n = 0
While (Abs(xnovo - X1) > 0.01 * xnovo)
    n = n + 1
    If n > 1 Then
        X1 = xnovo
    End If
    asnovo = (m - a * fyd2 * (d - 0.4 * X1) - a2 * fyd2 * (0.4 * X1 - 50)) / (fynovo * (dnovo - 0.4 * X1))
    xnovo = (a * fyd2 + asnovo * fyd novo - a2 * fyd2) / (0.85 * 0.8 * fcd * bnovo)
Wend

End Sub
Sub encamisamento_cisalhamento()
x = xnovo
z = d - (0.4 * x)

bnovo2 = (v + dv) / (0.6 * fcd * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 / 180)))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2
fi = ((2 * dv * Sint) / (z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa * 3.141592654 / 180)))) * 3.141592654 * fyd) ^ 0.5

If bnovo2 <= b Then
    bnovo2 = b
Else
    If bnovo2 < (b - 2 * c + 150) Then
        bnovo2 = (b - 2 * c + 150)
    End If
End If

End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
Form18.Show
Form19.Hide
End Sub

```

Armadura Long. Pré-tracionada – Flexão e Cisalhamento

```

Private Sub btncalcular_Click()
txtobs.Text = ""
Call biela
If sigbiela > (0.6 * fcd) Then
txtobs.Text = "Utilizar a técnica de encamisamento"
Else
Call longitudinal
End If
End Sub

```

```
Sub longitudinal()
```

```
Call longitudinal_cisalhamento
```

```
Call longitudinal_flexao
```

```
If asp > asp1 Then
```

```
txtasp.Text = Format(asp, "0.00E-00")
```

```
nu = asp / asp2
```

```
Else
```

```
txtasp.Text = Format(asp1, "0.00E-00")
```

```
nu = asp1 / asp2
```

```
End If
```

```
txtnu.Text = Format(nu, "0.00E-00")
```

```
End Sub
```

```
Sub longitudinal_cisalhamento()
```

```
emax = Val(txtemax.Text)
```

```
fysp = Val(txtfysp.Text)
```

```
Lcis = Val(txtlcis.Text)
```

```
dp = Val(txtdv.Text)
```

```
fi2 = Val(txtfi2.Text)
```

```
fyspd = fysp / 1.15
```

```
alfa = (emax) / Lcis
```

```
asp1 = dp / (0.6 * fyspd * alfa)
```

```
asp2 = (fi2) ^ 2 * 3.141592654 / 4
```

```
End Sub
```

```
Sub longitudinal_flexao()
```

```
d = Val(txtd.Text)
```

```
x = Val(txtx.Text)
```

```
dm = Val(txtdm.Text)
```

```
sigma = 0.6 * fyspd
```

```
f = dm / emax
```

```
asp = f / sigma
```

```
End Sub
```

```
Sub biela()
```

```
d = Val(txtd.Text)
```

```
x = Val(txtx.Text)
```

```
teta = Val(txtteta.Text)
```

```
b = Val(txtb.Text)
```

```
alfa = Val(txtalfa.Text)
```

```
v = Val(txtv.Text)
dv = Val(txtdv.Text)
fck = Val(txtfck.Text)
z = d - (0.4 * x)

fcd = fck / 1.4
sigbiela = (v + dv) / (b * z * ((1 / Tan(teta * 3.141592654 / 180)) + (1 / Tan(alfa *
3.141592654 / 180))) * (Sin(teta * 3.141592654 / 180)) ^ 2)

End Sub

Private Sub btnhelp_Click()
form21.Show
End Sub

Private Sub btnretornar_Click()
Form18.Show
Form20.Hide
End Sub
```