

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Ederson Luiz Hofstetter

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO À FLEXÃO POR MEIO DE
ENCAMISAMENTO**

Santa Cruz do Sul

2019

Ederson Luiz Hofstetter

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO À FLEXÃO POR MEIO DE
ENCAMISAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. M.Sc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

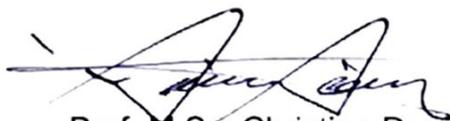
2019

Ederson Luiz Hofstetter

**REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO À FLEXÃO POR MEIO DE
ENCAMISAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
de Santa Cruz do Sul – UNISC para obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. M.Sc. Christian Donin



Prof. M.Sc. Christian Donin
Professor Orientador – UNISC



Prof. Dr. Eduardo Rizzatti
Professor Examinador – UFSM



Prof. M.Sc. Henrique Luiz Rupp
Professor Examinador - UNISC

Santa Cruz do Sul

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido a vida, com saúde e os bons caminhos.

A toda minha família que sempre foi base de tudo, dos bons princípios, da coragem, do valor da educação.

A todos os professores pelo aprendizado que passaram, e tive e a oportunidade de conhecer.

Aos colegas acadêmicos e dos laboratórios, amigos que conquistei e sempre estiveram ao meu lado para que tudo desse certo.

Em especial ao meu professor e orientador Christian Donin, pelo esforço, dedicação, paciência, comprometimento e experiência ampla de conhecimento transmitido durante os anos acadêmicos até a concretização deste trabalho. Por acreditar que um mundo só se transforma com estudo e aprendizado, usando o potencial dos alunos comprometidos com a profissão que escolheram.

Que essa ligação crie raízes e continue ao longo de nossas vidas.

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma análise teórico experimental de reforço de vigas de concreto armado à flexão por meio de encamisamento. A técnica tem suma importância para na área de patologias e reforço de estruturas íntegras dentro da construção civil, através desses modelos pode-se aperfeiçoar gradativamente os estudos na área.

O presente trabalho visa analisar a eficiência de protótipos físicos perante o modelo de cálculo apresentado pela NBR 6118:2014 e auxílio de modelos teóricos propostos por autores nacionais e internacionais. Durante o trabalho, buscou-se levantar informações sobre o comportamento dos protótipos desde o processo executivo, uso de materiais, até o final do ensaio. Ao final do trabalho, aborda-se uma discussão e avaliação do momento fletor de ruptura comparados com o momento fletor estimado de ruptura via cálculo. O estudo demonstrou resultados satisfatórios, o ensaio experimental das vigas reforçadas apresentou uma média de 4,82% de carga acima dos resultados teóricos, e a amplitude média de capacidade portante das vigas com reforço chegou a 307,98% superior à viga testemunho sem reforço.

Palavras chave: Reforço, encamisamento à flexão, vigas de concreto armado, eficiência, resultados.

ABSTRACT

This work presents an experimental theoretical analysis of reinforcement of concrete reinforcement beams by bracing. The technique is important for the area of pathologies and for the reinforcement of integral structures within the civil construction, with the help of the models can be improved gradually in the area studies.

The article aims to obtain a risk analysis related to the risk model presented by NBR 6118: 2014 and help of theoretical models proposed by national and international authors. During the work, look for information on the behavior of the prototypes from the beginning, use of materials, until the end of the test. At the end of the work, we address an evaluation and evaluation of the bending moment of rupture compared to the moment bending term of rupture via calculation. The study demonstrated satisfactory results, the experimental test of the reinforced beams had a mean of 4.82% of load in the theoretical results, and a mean amplitude of capacity of the beams with reinforcement reached 307.98% superior to the doctor beam without reinforcement.

Key words: Reinforcement, flexural reinforcement, reinforced concrete beams, efficiency, results.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características mecânicas típicas de sistemas de resinas epóxi e argamassas epoxídicas (1:6 em peso), carregadas com areia de quartzo (C.B.E. Manual nº 162, 1993).	22
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços com teor de carbono.....	27
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas dos Aços de Baixa Liga.....	28
Tabela 4 – Traço do concreto.	59
Tabela 5 – Traço do graute.....	67
Tabela 6 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço.....	70
Tabela 7 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço.....	71
Tabela 8 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço.....	71
Tabela 9 – Média resistência à compressão do Concreto.....	73
Tabela 10 – Média resistência à compressão do Graute.....	73
Tabela 11 – Força máxima resistida pelas vigas.....	76
Tabela 12 – Resultado estimado de ruptura das vigas.....	80
Tabela 13 – Comparação Teórico x Experimental.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fios trefilados.....	29
Figura 2 – Cordoalha de sete fios.....	30
Figura 3 – Cabo de aço.....	30
Figura 4 – Reforço com chapa colada.....	32
Figura 5 – Ancoragem nos extremos do reforço.....	33
Figura 6 – Camadas constituintes para aplicação da fibra de carbono.....	34
Figura 7 – Reforço sem aumento de viga.....	36
Figura 8 – Reforço de viga com armadura atada à laje.....	37
Figura 9 – Reforço de viga com nova armadura atada à mesma.....	37
Figura 10 – Estado tensional de uma viga reforçada.....	39
Figura 11 – Tipos de encamisamento.....	42
Figura 12 – Tipos de disposição de armaduras usuais.....	43
Figura 13 – Detalhe da seção de uma viga reforçada com enchimento de concreto.....	44
Figura 14 – Ancoragem dos varões longitudinais nos nós.....	44
Figura 15 – Cálculo do momento fletor resistente.....	47
Figura 16 – Cálculo do momento fletor resistente.....	48
Figura 17 – Altura útil do reforço para o cálculo do esforço cortante resistente.....	50
Figura 18 – Configuração do ensaio de Stuttgart.....	52
Figura 19 – Modelo de viga executado para ensaio e reforço.....	53
Figura 20 – Detalhamento da seção da viga para ensaio e reforço.....	53
Figura 21 – Modelo de viga executado com reforço á flexão por encamisamento.....	54
Figura 22 – Detalhamento da seção da viga reforçada por encamisamento.....	54
Figura 23 – Ferragem 6,3 mm e 10 mm longitudinal das vigas.....	55
Figura 24 – Estribos 5 mm das vigas.....	56
Figura 25 – Armadura principal das vigas pronta.....	56
Figura 26 – Forma das vigas.....	57
Figura 27 – Materiais componentes do concreto.....	58
Figura 28 – CP´s do concreto desmoldados.....	60
Figura 29 – Concretagem das vigas.....	60

Figura 30 – Vigas deformadas.....	61
Figura 31 – Ferragem longitudinal de reforço das vigas 6,3 mm e 10 mm.	62
Figura 32 – Estribos 5 mm de reforço das vigas.	62
Figura 33 – Graute Supergraute Quartzolit Weber.	63
Figura 34 – Marcação e escareamento.	64
Figura 35 – Furação e colocação dos estribos.....	65
Figura 36 – Armadura de reforço das vigas pronta.....	65
Figura 37 – Forma do reforço.....	66
Figura 38 – Materiais do reforço.	67
Figura 39 – Corpos de prova graute.	68
Figura 40 – Grauteamento do reforço.	69
Figura 41 – Desmolde dos protótipos reforçados.....	70
Figura 42 – Aço ensaiado para obtenção do f_y real.....	71
Figura 43 – CP's para ensaio.	72
Figura 44 – Ensaio a compressão dos CP's.....	72
Figura 45 – Ilustração do ensaio de Stuttgart com a viga biapoiada.....	73
Figura 46 – Viga testemunho sem reforço posicionada para ensaio.	74
Figura 47 – Viga testemunho reforçada posicionada para ensaio.....	75
Figura 48 – Diagrama Momento Fletor x Deslocamento.....	76
Figura 49 – Diagrama Força x Deslocamento.....	77
Figura 50 – Viga 4 testemunho rompida.....	81
Figura 51 – Detalhe viga 4 testemunho rompida.....	82
Figura 52 – Rompimento viga 1 reforçada.....	82
Figura 53 – Detalhes do rompimento viga 1 reforçada.....	83
Figura 54 – Rompimento viga 2 reforçada.....	85
Figura 55 – Detalhe do rompimento viga 2 reforçada.....	85
Figura 56 – Rompimento viga 3 reforçada.....	86
Figura 57 – Detalhe do rompimento viga 3 reforçada.....	86
Figura 58 – Análise Teórica x Análise Experimental.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI - American Concrete Institute

Ac – Área de concreto

As - Área de aço

bw - Largura

c – Cobrimento

CEB - Comité Euro-International du Béton

cm – Centímetro

FCK - (do inglês, Feature Compression Know) foi traduzida para o português como Resistência Característica do Concreto à Compressão.

Fcm - Resistência do Concreto à Compressão média.

GPa - GigaPascal

kgf – Quilograma força

h - Altura

m - Metro

mm - Milímetro

MPa- Mega Pascal

kN – Quilo Newton

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	16
2.1 PROBLEMA DA PESQUISA	16
2.2 QUESTÃO DE PESQUISA	17
3 OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 INTRODUÇÃO	19
4.2 MATERIAIS PARA REFORÇO	19
4.2.1 MATERIAIS ELABORADOS	19
4.2.1.1 Materiais Cimentícios	19
4.2.1.2 Concreto de cimento e polímeros	21
4.2.1.3 Concreto com Sílica Ativa	23
4.2.1.4 Concretos com fibras	23
4.2.2 MATERIAIS PRÉ-FABRICADOS	24
4.2.2.1 Argamassas prontas	24
4.2.2.2 Adesivos	25
4.2.2.3 Graute	26
4.2.3 MATERIAIS METÁLICOS	26
4.2.3.1 Aço carbono	27
4.2.3.2 Aços de baixa liga	28
4.2.3.3 Aço CA50 (Vergalhão)	29
4.2.3.4 Aço para Protensão	29
4.2.4 FIBRA DE CARBONO	30
4.3 MÉTODOS DE REFORÇO PARA FLEXÃO	31
4.3.1 REFORÇO COM CHAPAS DE AÇO COLADAS COM EPÓXI	31
4.3.2 REFORÇO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO	33
4.3.4 REFORÇO COM CONCRETO PROJETADO	34
4.4 REFORÇO DE VIGAS À FLEXÃO POR MEIO DE ENCAMISAMENTO	35
4.4.1 PROCESSO EXECUTIVO	37
4.4.1.1 Escoramento dos elementos	37

4.4.1.2 Polimento	37
4.4.1.3 Perfuração da seção transversal para passagem de estribos	38
4.4.1.4 Colocação das fôrmas e concretagem	38
4.4.5 PROCESSO DE CÁLCULO.....	38
4.4.5.1 Cálculo do reforço à flexão de vigas – Método Cánovas.....	38
4.4.5.2 Cálculo do reforço à flexão de vigas – Augusto Gomes; Júlio Appleton, (RPEE) N.º42.	41
5 METODOLOGIA	51
5.1 ANÁLISE TEÓRICA.....	51
5.1.2 CARGA ESTIMADA DE RUPTURA	51
5.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	51
5.1.1 DEFINIÇÃO DOS PROTÓTIPOS	52
5.1.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DAS VIGAS PROTÓTIPOS.....	54
5.1.2.1 Aço.....	55
5.1.2.2 Formas	56
5.1.2.3 Concreto.....	57
5.1.3 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	58
5.1.4 CONCRETAGEM DAS VIGAS	60
5.1.5 DESFORMA DOS CP´s E DAS VIGAS	61
5.1.6 MATERIAIS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS PROTÓTIPO.	61
5.1.6.1 Aço Reforço	61
5.1.6.2 Graute Supergraute Quartzolit Weber	62
5.1.7 EXECUÇÃO DO REFORÇO NAS VIGAS PROTÓTIPO.	64
5.1.7.1 Escarear o concreto	64
5.1.7.2 Furação e instalação dos estribos do reforço	64
5.1.7.3 Montagem da armadura	65
5.1.7.4 Formas para reforço.....	66
5.1.7.5 Grauteamento	66
5.1.7.6 Execução dos corpos de prova	67
5.1.7.7 Desforma dos protótipos reforçados	69
5.1.8 ENSAIOS	70
5.1.9 ENSAIO DAS VIGAS PELO MÉTODO DE STUTTGART	73
6 RESULTADOS.....	76

6.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
6.2 RESULTADOS E CÁLCULOS TEÓRICOS	77
7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	81
8 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios antigos, o homem vem evoluindo em adaptações para o seu melhor conforto, desenvolvendo construções de estruturas, tanto para seu abrigo como para a produção de alimentos e o transporte, ou o transporte de si próprio para qualquer parte do mundo. Tais estruturas podem ser casas, edifícios, indústrias, barragens, pontes, aquedutos, etc. Visto que o histórico apresenta inúmeras obras feitas centenárias ou milenares, estas obras provenientes de pesquisas empíricas e conhecimento dos materiais, executadas com tentativas e técnicas que vem sendo usadas e aprimoradas até os tempos de hoje.

As necessidades sócio-econômicas fizeram com que as obras fossem conduzidas em velocidades elevadas com poucos rigores de controle de materiais e dos serviços (THOMAZ, 1989). A aceleração do crescimento construtivo civil, demanda a necessidade de inovações e busca de conhecimento científico acessível para cada época que passou, a sociedade passou a assumir riscos dentro dos limites da construção. Riscos esses que com o passar dos anos tornaram as estruturas de concreto frágeis perante erros de concepção de projeto, execução, e deterioração precoce, tratados como patologia (SOUZA e RIPPER, 1998).

Patologia é a ciência que estuda as origens, as causas, os mecanismos de ocorrência, as manifestações e as consequências das situações em que as estruturas de concreto ou suas partes deixam de apresentar o desempenho mínimo pré-estabelecido (DONIN, 2015).

O processo acelerado de execuções e ainda limitado, sofre com as falhas involuntárias e falta de imperícias dos profissionais do ramo, resultando em uma eficiência insatisfatória das construções confrontado com as finalidades que se propunham (SOUZA e RIPPER, 1998). A necessidade de aprimorar as técnicas, fez com que trabalhadores mais qualificados fossem incorporados a setores industriais mais nobres, tendo esses, melhor remuneração da mão de obra (THOMAZ, 1989).

É de extrema importância entender as situações que levam as estruturas apresentarem desempenhos insatisfatórios, o estudo dos casos e da procedência das manifestações patológicas nos faz repensar novas técnicas, e inevitáveis aprimoramentos das técnicas atuais já alcançadas, desde a concepção até o decorrer de sua vida útil. Tais considerações tornam-se necessárias à sistematização dos conhecimentos desta área, para entender o comportamento das

anomalias existentes, e prevenir que os fatos se repitam nas novas estruturas concebidas (SOUZA e RIPPER, 1998).

O estudo vigente se faz necessário, apresentará um contexto de verificações e apontamentos sobre situações patológicas conhecidas, e uma solução específica para reabilitação, ou correção patológica de concepção, e ou de execução.

2 JUSTIFICATIVA

Na história mundial das construções, muitos erros e acertos aconteceram. Dados mais marcantes na história do concreto armado foram publicados em 1918 pela “American Railway Engineering Association”, relatando 25 acidentes em construções de concreto. Em seguida, após a II grande Guerra, a reconstrução da Europa, teve o ponto de partida para evolução técnica em concreto armado e protendido, aparecendo as primeiras tentativas de classificação sistemática dos efeitos estruturais designando-se a nova ciência como Patologias das Estruturas. Na década de 50 aparecem os primeiros livros tratando do assunto (DONIN, 2015).

No estudo patológico de estruturas, por necessidade individualizada de aplicação do conhecimento e compreensão, foram estabelecidos conceitos e terminologias, em geral a cada etapa do concreto é comparada com o organismo humano na medicina, mediante umas necessárias adaptações foram designadas as fases da estrutura (CÁNOVAS, 1988).

A ineficiência é um grande problema que afeta várias estruturas, sendo elas já oriundas em fase de projeto(gestação), em período de fase de construção(crescimento), ou ainda estruturas já executadas e concluídas(fase adulta), tomando início desta última o ciclo de vida útil (DONIN, 2015).

Usando como partida esses primórdios, vem a necessidade de aplicação das teorias na prática atual, em função de desenvolver mais o tema e apresentar em comprovações técnicas experimentais os novos e atuais produtos existentes no mercado, e também apresentar como solução coerente de aplicação nos dias atuais a fim de evitar novos acidentes prejudiciais com a perda de vidas e também materiais.

2.1 PROBLEMA DA PESQUISA

O estudo da técnica do reforço de vigas contribui muito nos tempos atuais. As estruturas solicitadas requerem novos aproveitamentos de espaços, maiores vão livres, prismas com capacidade maiores de suportes para conduzir os carregamentos necessários com segurança aos pontos de apoio, sem que sofram deformações fora dos estabelecidos para as situações reais. Atualizações de projetos para usos mais extremos, dispensando a construção de uma obra inteiramente nova, prolongando sua utilização com aperfeiçoamento e aplicação dessa técnica, tornando a obra econômica e também durável.

2.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Baseado no problema da pesquisa, qual a viabilidade técnica e econômica de reforçar uma viga à flexão por meio de encamisamento e aumento de seção, atribuindo-lhe propriedades satisfatórias que atendam a resistência de 50%(cinquenta por cento), ou maior, comparado á seção inicial para seu estado limite último?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho remete ao estudo do comportamento teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão por meio de encamisamento e aumento de seção. O estudo aqui proposto visa mostrar a eficiência de funcionamento das vigas submetidas a certo carregamento, e a sua eficiência capacitiva de suporte. Para o reforço será usado graute fornecido por um fabricante especializado, e adição de aço.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Fazer uma ampla revisão bibliográfica sobre as técnicas para reforçar vigas ao momento fletor, ou seja, à flexão, dando ênfase na técnica por encamisamento por aumento de seção.

b) Apontar as falhas das manifestações patológicas que provocam o desempenho insatisfatório.

c) Usar a metodologia existente e proceder com os cálculos de dimensionamento do reforço à flexão baseado em uma situação real de carregamento.

d) Realizar a execução dos corpos de prova, protótipos físicos, ou seja, viga concebida em projeto original e viga reforçada para a carga solicitante ou superior. Após a cura submeter os protótipos ao carregamento.

e) Extrair os resultados obtidos durante o ensaio laboratorial prático dos corpos de prova, fazer a análise comparativa dos testes verificando seus desempenhos reais com os teóricos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 INTRODUÇÃO

Visto nos tópicos anteriores deste estudo as causas e males que ocasionam as patologias, a seguir relata-se os materiais usados nos serviços de reforço e recuperação das estruturas, com uma análise minuciosa dos produtos presentes no mercado, adquirindo conhecimento de cada material pode-se utilizá-los de forma adequada e consciente para melhor eficiência possível para cada caso minimizando os riscos.

Entre os materiais usados, destaca-se os concretos e argamassas, se os mesmos fossem bem projetados e executados, a grande maioria das estruturas seria sã, portanto a mistura incorreta dos materiais faz falta na estrutura, sendo o reforço ou a recuperação a reposição do material faltante no processo executivo original, para eficiência e durabilidade correta da estrutura prolongando ou atendendo sua vida útil de projeto (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para Cánovas (1988), a patologia do concreto armado está relacionada à patologia dos seus componentes que deverão reunir uma série de características que impeçam a ocorrência, a curto prazo, de defeitos mais ou menos graves do concreto.

Assim, os materiais não são causadores dos defeitos nas estruturas e sim o mau uso dos mesmos ocasiona as respectivas falhas. Os materiais componentes do concreto e argamassas passam por controles de qualidade, e são selecionados já na extração em ambiente natural com suas propriedades, a exemplo os agregados, e no processo de fabricação a exemplo do cimento.

A seguir apresenta-se os materiais que são usados atualmente no mercado, componentes para reforço e recuperação de estruturas.

4.2 MATERIAIS PARA REFORÇO

4.2.1 MATERIAIS ELABORADOS

4.2.1.1 Materiais Cimentícios

Materiais elaborados são aqueles que necessitam ser preparados no local da obra, antes de sua aplicação, por mistura de dois ou mais componentes simples, como os que usam de base o cimento, ou elaborados, como o que tem base o

concreto, ou ainda cimento e polímeros, concretos e microssílica, concreto e fibras (SOUZA e RIPPER, 1998).

Pasta ou argamassa de cimento injetável

A pasta de cimento injetável é aquela elaborada com a mistura de cimento e água, eventualmente areia fina, em geral usa-se um fator água/cimento na ordem de 0,40, podendo ainda adicionar aditivos expansores deixando-a mais fluida.

Consistência homogênea semelhante à tinta espessa resistência alta e baixa retração.

Este componente geralmente usado para injeção em falhas na estrutura recuperação e reforço ou ancoragem de barras (SOUZA e RIPPER, 1998).

Concreto convencional

O concreto convencional ainda é o mais utilizado em serviços de recuperação e reforço de estruturas de concreto. Composto por cimento, água, areia e agregado graúdo. Para reforços, geralmente usa-se brita zero para agregado graúdo, facilitando a acomodação do concreto envolvendo todas as armaduras sem falhas de concretagem (SOUZA e RIPPER, 1998).

Usado geralmente um Fck com 5 MPa a mais que o original da peça que será reforçada, ou seja, se o concreto da peça for de 25 MPa, o concreto do reforço deve ser de 30MPa. Seu Slump Test deve ser >100 mm, ser fluido, necessitando no caso de reforço uso de aditivos superplastificantes para um melhor adensamento nas formas preenchendo corretamente os espaços (DONIN, 2015). Sendo assim, aplicado na execução de quase todos os tipos de estruturas, com os devidos cuidados quanto ao seu adensamento.

Neste caso deve-se levar em conta a retração do material existente da peça a ser restaurada, se for uma peça mais nova que não sofreu muita retração deve-se usar um traço de concreto mais próximo possível do concreto antigo. A utilização para recuperação e reforço, no caso da peça antiga, ter sofrido todas retrações possíveis, o traço do concreto a ser usado deve provocar o mínimo de retração possível, onde o mais eficaz nesses casos é a redução do fator água/cimento empregando-se aditivos plastificantes, ou superplastificantes, deixando em repouso de 30 a 60 minutos a mistura também diminui a retração após o lançamento, evitar traços ricos de cimento, provocam grandes retrações (SOUZA e RIPPER, 1998, p.96).

Concreto projetável

Com a mesma dosagem do concreto convencional, o concreto projetável apenas limita o agregado grosso usado entre 10 mm e 12 mm, de forma a evitar desgastes do equipamento de lançamento, usa um fator água/cimento de 0,35 a 0,40 apenas suficiente para sua hidratação (SOUZA e RIPPER, 1998).

Densidade, alta aderência e resistência, dispensa o uso de formas.

Essa técnica tem como objetivo alcançar locais onde é difícil a concretagem sem o uso de formas. O concreto é misturado a seco e projetado com o auxílio de mangote em pressão constante e contínua, alcançando longas distância e locais de difícil acesso, e bem útil para auxílio em reforços e recuperação (SOUZA e RIPPER, 1998).

4.2.1.2 Concreto de cimento e polímeros

Os concretos e argamassas formulados de cimento Portland, agregados bem graduados (< 9 mm) no caso de microconcretos (DONIN, 2015). Modificados com polímeros são pré-misturados durante a fase de mistura dos materiais, o conjunto é curado posteriormente ou polimerizado. A mistura pode ser modificada com epóxi ou látex (RIPPER, 1998, p.98). Quando industrializados, são fornecidos pré-dosados, em pó, requerendo apenas a dosagem em obra do polímero e água estabelecidos pelo fabricante (DONIN, 2015)

Argamassas ou concretos modificados com epóxi

Para obter esse material com epóxi adiciona-se as composições sólidas na betoneira em seguida a resina, o catalisador e a água com fator 0,30, fator epóxi/cimento em torno de 0,20. A mistura pode ser junta ou simultaneamente.

A simples mistura de uma resina epóxi na massa do concreto, obtem-se um material de alta resistência mecânica e química, e aderência altamente melhorada comparada aos concretos comuns. O quadro abaixo mostra algumas características mecânicas desses materiais com resina epóxi e argamassas epóxicas. Tabela 1 (SOUZA e RIPPER, 1998).

Tabela 1 – Características mecânicas típicas de sistemas de resinas epóxi e argamassas epoxídicas (1:6 em peso), carregadas com areia de quartzo (C.B.E. Manual nº 162, 1993).

Propriedades	Sistemas Resinosos	Argamassas epoxídicas
Resistência à compressão	$f_{rs,c} \approx 50$ a 150 MPa	$f_{rm,c} \approx 0,75 f_{rs,c}$
Resistência à tração	$f_{rs,t} \approx f_{rs,c}$	$f_{rm,t} \approx 0,50 f_{rs,t}$
Resistência à tração em flexão	$f_{rs,m} \approx 0,50 f_{rs,c}$	$f_{rm,m} \approx 0,50 f_{rs,m}$
Módulo de elasticidade	Variável, em função do tipo de resina, endurecedor, proporções entre estes, catalizador, etc... Resinas injetáveis: $E \approx 1000$ a 2000 MPa Resinas de aplicação geral: $E \approx 2000$ a 4000 MPa	

Fonte: (SOUZA e RIPPER, 1998, p.99).

Portanto mistura do epóxi apresenta resistências mecânicas, à abrasão, e à adesão podendo ser superiores se aplicadas em camadas delgadas pouco espessas do que à aderência em massa.

Argamassas ou concretos modificados com látex

Essa técnica origina a composição dos argamassados e concretos com látex. Geralmente o látex é composto de dois ou mais monômeros, sendo acetato de vinil, cloreto de vinil, estireno e butadieno. A adição desses componentes nas argamassas e concretos alteram significativamente suas propriedades frescas e endurecidas. No estado fresco aumenta a fluidez, reduz o fator água/cimento retarda o início de pega e ainda serem incorporadores de ar (tendo que ser adicionado um aditivo para controlar o excessivo ar que possa incorporar durante a mistura). No estado endurecido a mistura do látex aumenta a resistência, a aderência e a impermeabilidade. Muito usado para reforço, porém tratados um pouco diferente do

concreto convencional, durante a execução necessitando menos vibração (SOUZA e RIPPER, 1998)

4.2.1.3 Concreto com Sílica Ativa

A sílica ativa é um pó de tonalidade cinza com características pozolânicas, composta de teores de SiO₂ (sílica amorfa), efeito microfiller, por ter partículas esféricas da ordem 2µm, preenchem melhor os vazios e ajudam a melhorar a reatividade da argamassa ou do concreto (SOUZA e RIPPER, 1998)

Devido a sua extrema finura, a adição de sílica ativa nos concretos apresentam maiores resistências à compressão e à tração, menor permeabilidade, porosidade, absorvidade, maiores resistências à abrasão e erosão, maior resistência à ataques químicos, como de sulfato e cloretos, maior aderência na união concreto novo e concreto velho, menor índice de reflexão na projeção de concreto (SOUZA e RIPPER, 1998).

O uso de sílica no concreto varia de 4% a 15% do peso do cimento, dependendo da aplicação e desempenho que o concreto deve atender. A sílica pode vir adicionada ao cimento ou ser empregada na mistura do concreto sendo ela em forma de lama ou em pó(in natura), para obtenção de melhor desempenho necessita uso de aditivos fluidificantes ou plastificantes. Os concretos com sílica apresentam pH abaixo do concreto comum, tornando assim mais sensíveis à carbonatação. Torna-se muito usual para o uso em concretagens por projeção e nos concretos de alta resistência, sendo assim uma boa opção para reforços em se tratando de custo benefício (SOUZA e RIPPER, 1998)

4.2.1.4 Concretos com fibras

Denominadas fibras descontínuas, podem ser poliéster, sintética estrutural, polipropileno, vidro, aço, nylon, ou ainda orgânicas juta e sisal. Ficam limitados em tamanhos na ordem de 50 mm e 0,5 mm ou filamentos mais finos como a fibra de vidro e nylon, usuais na mistura das argamassas e concretos (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para Ripper (1998), na mistura, as fibras com o concreto trabalham como armaduras difusas, ou seja, espalhadas no interior da massa de concreto, diferente do concreto convencional, onde para conter os pequenos alongamentos de ruptura muito pequenos sendo controlados por armaduras. As fibras não tem o papel de substituir a armadura de barra, e sim complementar e melhorar algumas

propriedades do concreto, sendo elas a resistência e o alongamento de ruptura à tração.

Usualmente as fibras mais usadas são as de aço, polipropileno, e as de vidro resistentes a álcalis, porém no Brasil ainda não tem sido usado fibras com frequência para reparos no Brasil (DONIN, 2015). As fibras sintéticas e naturais são aplicáveis ao concreto para minimizar o aparecimento de fissuras originadas pela retração plástica do concreto (RIPPER, 1998). Ainda, as fibras permitem maior resistência a impacto e a cargas cíclicas, além do aumento da tração direta ou por flexão (DONIN, 2015).

A retração pode ter diversas causas, entre elas destaca-se a térmica, o vento e o calor de hidratação do cimento. Sua aplicação depende das necessidades de cada obra, mas são utilizadas normalmente em reforços estruturais, pavimentos rígidos, pisos industriais, projetados, áreas de piscina, pré-moldados, argamassas, tanques e reservatórios, entre outros (PORTAL DO CONCRETO, 2018).

4.2.2 MATERIAIS PRÉ-FABRICADOS

4.2.2.1 Argamassas prontas

Designa-se pré-fabricados para materiais oriundos de um processo controlado de fabricação por empresas especializadas em aditivos para concreto, chegando na obra para ser aplicado, necessitando apenas seguir as recomendações pelo fabricante. Na construção civil esses materiais pré-misturados são empregados usualmente em trabalhos de recuperação e de reforço de estruturas de concreto, assim pode-se citar argamassas prontas, adesivos, materiais para injeção e grautes (SOUZA e RIPPER, 1998).

Argamassas de base mineral (cimentícias)

São produtos que não apresentam retração, muito usual em reforços de estrutura de concreto. Com pH alcalino, anticorrosivos com alta resistência química e não inflamáveis. Já vem de fábrica na forma plástica em dois componentes separados, devem ser misturados na hora da aplicação conforme especificação do fabricante, sem a mistura de água. Argamassas pré-misturadas de cimento e areia com adição de resina acrílica, são apresentadas em duas modalidades segundo (SOUZA e RIPPER, 1998, p.101):

Argamassas autonivelantes com grande fluidez, recomendadas para aplicações em superfícies horizontais.

Argamassas tixotrópicas acrescidas de fibras poliamidas, que não escorrem, pasta maleáveis e aplicáveis em qualquer superfície ou inclinação em relação ao horizontal.

Argamassas de base resina epóxi

Chamadas de argamassas de polímeros a adição de agregados miúdos com ligante de polímero, adicionando agregado graúdo é obtido os concretos de polímeros. São excelentes materiais para pequenos reparos e falhas limitadas de elementos estruturais por razões econômicas. As argamassas pré-dosadas podem ser encontrados em três componentes: resina, catalizador, e areia de quartzo (SOUZA e RIPPER, 1998).

Segundo Souza e Ripper (1998), na obra a preparação inicia com a adição do catalizador à resina, usa-se pás mecânicas com baixa velocidade para mistura não incorporar bolhas de ar. Em seguida adiciona a mistura em um tambor com a areia de quartzo, misturando manualmente ou equipamento apropriado. Após a segunda mistura, pode ser aplicado na região do reparo, é fundamental a observação do tempo de cura especificado (SOUZA e RIPPER, 1998).

Devido à alta aderência da resina epóxi com o concreto e aço, além de reparos superficiais, pode ser usada para ancoragem de barras, chumbadores e outros. Por ter propriedade tixotrópica, pode ser aplicada sem limitações de inclinação (DONIN, 2015).

4.2.2.2 Adesivos

Os adesivos podem ser à base de epóxi, PVA e acrílico. Adesivos epóxi, possuem “pot-life” tempo de cura rápido, elevada resistência mecânica quando solidificado. A mistura do bicomponente pode ser mecânica ou manual, deve ser homogênea. Adesivos de base acetato de polivinílico (PVA), apresenta boa aderência ao intemperismo, apresenta boa aderência no substrato se misturado com água de amassamento no preparo da argamassa e chapisco. Seu uso é ampliado para tintas, revestimentos e membranas impermeabilizantes (SOUZA e RIPPER, 1998).

Os poliméricos acrílicos resultantes da polimerização de ésteres do ácido acrílico ou do ácido acrílico, de aparência transparente cristalina, e alta resistência química, muito usado na construção civil em forma de placas transparentes

semelhantes ao vidro. Outra forma possui aplicações semelhantes a dos adesivos PVA (SOUZA e RIPPER, 1998).

Assim os adesivos são usados para colagem de elementos estruturais, com grande resistência a intempéries e mecânicas.

4.2.2.3 Graute

O graute geralmente possui uma composição granulométrica distribuída para garantir um maior nível de compactação possível, composto de cimento, areia, aditivos, até uma pequena fração de agregado graúdo chamado pedriscos, podendo variar de acordo com a finalidade de aplicação.

O graute tem exigências vinculadas a um comportamento estrutural ao contrário das argamassas. Devido principalmente às suas características como alta resistência mecânica (maior que 14 MPa nas primeiras 24 horas), química e abrasiva. Alta fluidez (com slump entre 200 e 280 mm), baixa ou nenhuma retração, não deve apresentar segregação e exsudação, autoadensabilidade, expansão controlada, e para minimizar ou ressaltar algumas dessas características, são usados os aditivos, que podem ser dispersantes (plastificantes) ou não plastificantes (TECNÉ, 2017).

Existe uma ampla variedade de aplicações do graute assim há maneiras de classificar os diversos tipos no mercado. Portanto para cada segmento existe um tipo de graute, alvenaria estrutural é um tipo, linha industrial tem o graute para pisos, graute de alto desempenho para junção de pré-moldados, e o graute de reparo estrutural tema deste estudo (TECNÉ, 2017).

4.2.3 MATERIAIS METÁLICOS

O aço é uma junção de ferro e carbono, com outros elementos de dois tipos; esses elementos residuais do processo de fabricação, como silício, manganês, fósforo e enxofre. Denominados elementos de liga, tem o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material. O aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11% Chiaverini, (1996) *apud* Pfeil, (2009, p. 01).

Segundo Pfeil (2009), os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis. As resistências à ruptura por tração ou

compressão dos aços utilizados em estruturas são iguais, variando entre amplos limites, desde 300 MPa até valores acima de 1200 MPa.

De acordo com a composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga. Os dois tipos podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas.

4.2.3.1 Aço carbono

Os aços-carbono são os tipos mais usados, nos quais o aumento de resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono e, em menor escala, pelo manganês.

Para Pfeil (2009), o aumento de teor de carbono eleva a resistência do aço, porém diminui a sua ductilidade (capacidade de se deformar), o que conduz a problemas na soldagem, o mesmo já não ocorre com os aços de baixo carbono, por aceitarem soldas sem precauções especiais, são mais usuais em estruturas.

Pfeil (2009), apresenta os tipos de aço-carbono mais usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (American Society for Testing and Materials) e das normas Européias EN, conforme a tabela a seguir:

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços com teor de carbono.

Especificação	Teor de carbono %	Limite de escoamento	Resistência à ruptura
		f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A 7		240	370-500
ASTM A 36	0,25-0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A 307 _(parafuso)	baixo	-	415
ASTM A 325 _(parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EM S235	baixo	235	360

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009). Adaptado pelo autor.

4.2.3.2 Aços de baixa liga

Os aços de baixa liga são aços-carbono acrescidos de elementos de liga (cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, zircônio), os quais melhoram algumas propriedades mecânicas.

Alguns elementos de liga produzem aumento de resistência do aço através da modificação da microestrutura para grãos finos. Graças a esse fato, pode-se obter resistência elevada com o teor de carbono de ordem de 0,20%, o que permite a soldagem dos aços sem preocupações especiais.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas dos Aços de Baixa Liga.

Especificação	Limite de escoamento	Resistência à ruptura
	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ASTM 572 Gr. 50	345	450
ASTM A588	345	485
ASTM A992	345	450

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009). Adaptado pelo autor.

O autor Pfeil (2009) evidencia que os aços de baixa liga, alta e média resistência mecânicas, soldáveis com elevada resistência atmosférica, são muito usados no Brasil. Tanto o aço carbono quanto o de baixa liga podem ter suas resistências alteradas conforme o tratamento térmico.

Segundo Pfeil (2009, pág 10), a especificação NBR 7007 - Aços para perfis laminados para uso estrutural da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), podem ser enquadrados nas categorias designadas a partir do limite de escoamento de aço f_y , como descrito a seguir:

MR250, aço de média resistência ($f_y = 250$ MPa; $f_u = 400$ MPa)

AR350, aço de alta resistência ($f_y = 350$ MPa; $f_u = 450$ MPa)

AR-COR415, aço de alta resistência ($f_y = 415$ MPa; $f_u = 520$ MPa), resistente à corrosão.

O aço MR250 corresponde ao aço ASTM A36.

4.2.3.3 Aço CA50 (Vergalhão)

O aço mais usado na construção civil desde os primórdios antigos, com resistência, esse produto é produzido na indústria metalúrgica com as especificações da norma ABNT NBR 7480:2007, fornecido na categoria CA-50, ou seja, resistência de escoamento (f_y) 500 MPa, com superfície nervurada, garantindo maior aderência da barra ao concreto. O aço CA-50, é o componente fundamental na formação das estruturas de concreto armado. Usado em média 100kg/m³ de concreto. Comercializado em barras retas nas bitolas de $\varnothing 6,3$ mm a $\varnothing 25,0$ mm, dobradas até 20 mm e em rolos de $\varnothing 6,3$ mm a $\varnothing 16$ mm. Os feixes de barras possuem comprimento de 12 m e peso de 1.000 kg e 2.000 kg (GERDAU, 2018).

4.2.3.4 Aço para Protensão

Os fios e arames de aço para proteção é obtido pela trefilação. Nesse processo fabricam-se fios de aço doce e também de aço duro (aço de alto carbono), (Figura 1).

Figura 1 – Fios trefilados.



Fonte: (PFEIL e PFEIL, 2009) – Produtos metálicos obtidos por trefilação.

Fios Trefilados

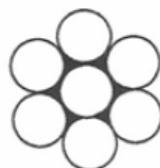
Os fios de aço duro são empregados em molas, cabos de protensão de estruturas etc.

Cordoalhas

Pfeil (2009), explica que as cordoalhas são formadas por três ou sete fios arrumados em forma de hélice (Figura 2). E que o módulo de elasticidade da cordoalha é quase tão elevado quanto o de uma barra maciça de aço, $E = 195.000$ MPa.

As cordoalhas tem um emprego amplo em reforço por protensão, pode-se citar, lajes, vigas para alcance de vãos maiores.

Figura 2 – Cordoalha de sete fios.

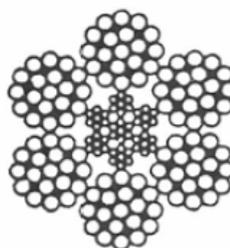


Fonte: (PFEIL e PFEIL, 2009) – Produtos metálicos obtidos por trefilação.

Cabo de aço

Os cabos de aço são arranjos formados por fios trefilados finos, agrupados em helicoidais variáveis tornando-os muitos flexíveis (Figura 3), permitindo seu emprego amplo em moitões para multiplicação de forças. Porém o módulo de elasticidade do cabo de aço é baixo, cerca de 50% do módulo de uma barra maciça (PFEIL, 2009).

Figura 3 – Cabo de aço.



Fonte: (PFEIL e PFEIL, 2009) – Produtos metálicos obtidos por trefilação.

4.2.4 FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono são resultantes da carbonização de fibras precursoras orgânicas tais como o poliacrilonitril (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em ambiente inerte e através de fibras de rayon.

Essas fibras são oxidadas em elevadas temperaturas, variando de 1.000°C – 1.500°C as fibras de carbono, e até 3.000°C para fibras de grafite. Portanto quanto maior a temperatura do processo industrial, maior é seu módulo de elasticidade, variando de 100GPa a 300GPa as fibras de carbono, e até 650GPa as fibras de grafite. Assim quanto maior sua resistência, mais caro é o material (VIAPOL, 2018).

A fibra de carbono possui uso semelhante ao da chapa colada. A técnica desenvolvida no Japão inicialmente para uso na construção civil, esse material é usado amplamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística,

por ser um produto muito resistente, de simples aplicação não trazendo às estruturas de concreto armado problemas de durabilidade associados à corrosão das armaduras. Por ser maleável se acomoda melhor nas peças de concreto, a exemplo cantos vivos e cilíndricos (VIAPOL, 2018).

4.3 MÉTODOS DE REFORÇO PARA FLEXÃO

Segundo Souza e Ripper (1998), ao adotar procedimentos de execução do reforço de vigas, deve-se avaliar a necessidade que o projeto deve suprir, sendo por aumento de armadura de flexão (positiva ou negativa), aumento de armadura transversal, colagem de chapas de aço, protensão exterior, ou aumento das armaduras longitudinais ou transversais com aumento da seção transversal de concreto. Fazer uma avaliação criteriosa das armaduras efetivas existentes, seguido dos testes para verificação da qualidade do concreto concebido na execução do projeto inicial da estrutura.

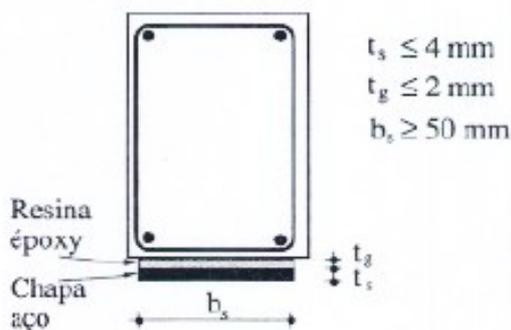
4.3.1 REFORÇO COM CHAPAS DE AÇO COLADAS COM EPÓXI

A técnica de reforço de elementos estruturais com chapas metálicas ou perfis metálicos é uma grande solução rápida e eficiente no uso do reforço estrutural, principalmente em situações emergenciais. Sua ligação é feita por resinas epóxi aplicada na área de contato com o elemento estrutural, ou ainda por chumbamento de perfis, com a ajuda de resinas injetadas. Dentro do campo de reforço, o uso de perfis é uma das mais antigas técnicas, e para obter máxima eficiência neste tipo de serviço deve-se tomar uma série de precauções, que na maioria dos casos são desprezados. Se essa premissa não for rigorosamente aplicada, trabalhar nas condições para as quais foi projetada, pode aparecer consequências, e efeitos secundários em outros pontos da estrutura, podendo danificá-la, e provocar rupturas importantes, ou ainda prejudicar elementos intactos causando ações para as quais não estavam submetidos (CÁNOVAS, 1988).

O uso de chapas coladas é uma técnica moderna e eficiente no reforço estrutural quando o trabalho é bem executado. Em vigas, pode tanto suprir os esforços solicitantes à flexão quanto ao cortante. Com o uso de resina epóxi, adere-se a chapa de aço a superfície de concreto formando uma peça, concreto, cola, e aço. Permite assim pouca alteração na geometria das peças e o aumento da capacidade resistente gerados por momentos fletores e forças cortantes, e aumento

da rigidez do elemento, tornando-se menos deformável. O estudo do método teve início com L'hermite e J. Bresson (1971) *apud* Souza e Ripper, (1998, p. 181).

Figura 4 – Reforço com chapa colada.



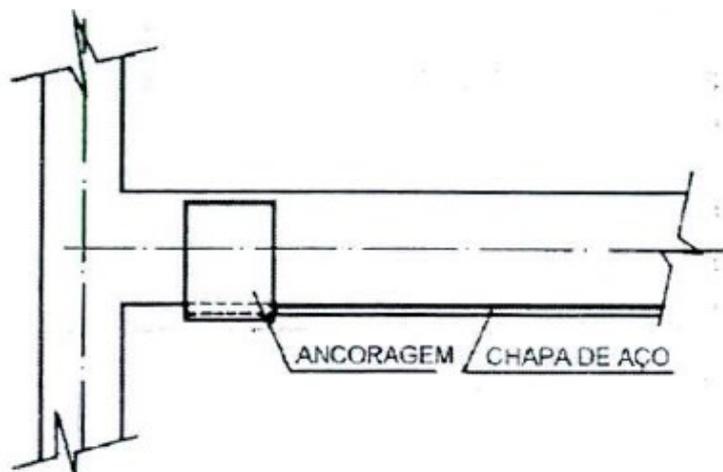
Fonte: (DONIN, 2015, p.89) – Patologias das Estruturas de Concreto.

Existem estudos históricos sobre o método colagem de chapas, sendo assim usando qualquer um deles, existem regulamentos a serem cumpridos. A C.E.B. rege regulamentos e restrições quando se fala do método colagem de chapa. Estes apresentados abaixo (SOUZA e RIPPER, 1998, p.181):

- a) a espessura da camada de cola não exceda a 1,5mm (quanto mais espessa a camada, menor a resistência à tração). Cánovas (1984) sugere que o limite seja de 1,0 mm;
- b) a espessura da chapa não ultrapasse 3 mm (a não ser que sejam utilizados dispositivos especiais de ancoragem, buchas metálicas, em particular);
- c) o incremento a obter nos esforços resistentes, comparada a situação depois do reforço com a original, não seja superior a 50%, tanto para flexão como para o cisalhamento (limitações que, em alguns casos, será conservadora).

Deve-se finalizar a colagem com a ancoragem dos extremos do reforço, como demonstra a (figura 5) abaixo. (DONIN, 2015).

Figura 5 – Ancoragem nos extremos do reforço.



Fonte: (CÁNOVAS, 1988, p.335) – Fig. 13.19.

Toda união por colagem de dois materiais, a adesão é a propriedade mais fundamental. A intensidade da adesão depende da qualidade do adesivo a ser empregado, o estado das superfícies dos materiais a unir, e as propriedades destas superfícies. Dentre os três materiais que vão compor o reforço, a massa epóxi tem as propriedades mecânicas muito superiores às do concreto e inferiores às do aço. Portanto uma viga submetida ao carregamento fletor, tende a produzir esforços tangenciais no plano da união do concreto com o aço, e se a adesividade tangencial não for adequada, a falha se produz neste plano em que o cortante superficial combina com a tração do concreto (DONIN, 2015).

4.3.2 REFORÇO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

O sistema é formado por várias camadas além do elemento principal (manta de fibra de carbono), como mostra a figura 06. O conjunto de características das fibras e da matriz permite aos materiais uma elevada rigidez e resistência à tração e à fadiga, baixo peso específico e resistência a fatores ambientais.

Figura 6 – Camadas constituintes para aplicação da fibra de carbono.



Fonte: (DONIN, 2015, p.99) – Reforço de estruturas com fibra de carbono.

O reforço com o uso de fibras de carbono, apresenta grande desempenho, é comparado com o de chapa colada, tanto no procedimento de cálculo e aplicação, quanto à função. Segundo Souza e Ripper (1998), no início o composto fibras de carbono era para o aumento da capacidade resistente das construções existentes, à flexão (em lajes e vigas), e aumento do esforço transversal (em pilares). Passando após como orientação o uso no sentido do aumento da ductibilidade.

Os ensaios com vigas de concreto armado disponíveis, reforçados com fibra de carbono, demonstram um comportamento linear das fibras, mesmo após o concreto armado sair da fase elástica à fase plástica. Para o dimensionamento, os valores das tensões e extensões admissíveis devem ser consideradas conforme cada fabricante. Outro aspecto no detalhamento se volta à amarração da manta de fibra ao concreto, neste caso, o sistema não dependerá apenas do composto resina, mas da camada de cobrimento de concreto entre a armadura e a superfície, em resposta à uma imobilização das forças e segura transferência para contribuição do reforço (SOUZA E RIPPER, 1998).

4.3.4 REFORÇO COM CONCRETO PROJETADO

A técnica de reforço com concreto projetado tem um diferencial aos demais métodos, a não necessidade de uso de formas, basta dispor de uma superfície de

anteparo para a sua aplicação. A projeção de concreto é um processo contínuo a pressão, assim define-se, em conduzir a argamassa ou concreto através do mangote por ar comprimido desde o misturador até o bico de pressão, onde é misturado a água adequada antes do lançamento. Ao chegar no bico, a pasta de cimento é projetada a grande velocidade contra a superfície (CÁNOVAS, 1988).

A superfície onde será projetado o concreto, pode estar situada em qualquer posição, sendo vertical, inclinada ou horizontal. Pode-se utilizar o método por concretagem convencional, ampliando a variedade de trabalhos aplicáveis por projeção de concreto, especialmente os serviços de recuperação e reforço de estruturas de grande extensão (SOUZA E RIPPER, 1998).

Cánovas (1988), explica que o sistema é muito adequado para a restauração e o reforço de elementos estruturais, onde o concreto está com cobertura inadequada, ou foi deteriorado pela ação de algum agente agressivo ou ação de um incêndio.

4.4 REFORÇO DE VIGAS À FLEXÃO POR MEIO DE ENCAMISAMENTO

O método reforço de vigas com elementos estruturais é um sistema muito empregado, tem como principal vantagem a economia, e seus materiais podem ser encontrados com fácil acesso. Quando bem executado, essa técnica apresenta resultados mais satisfatórios em relação aos outros tipos de reforços, inclusive superando o processo com perfis laminados. Porém pode apresentar elementos estruturais com dimensões superiores às do projeto inicial podendo criar problemas em alguns casos, seguido do tempo determinado de espera necessário para cura do concreto, retardando o carregamento de uso da parte estrutural afetada (CÁNOVAS, 1988).

O reforço de vigas de concreto se faz a partir do momento em que a estrutura apresenta falhas ou anomalias, sendo elas oriundas de projeto, execução, ou mesmo à necessidade de aumentar a capacidade resistente, para suportar novas sobrecargas de uso superior a de projeto por mudança de uso da estrutura. Cabe ao engenheiro fazer a avaliação da estrutura, e através de parâmetros obtidos, delegar o procedimento que pode-se fazer à referida anomalia ou necessidade estrutural. Para isto, é indispensável ter conhecimento teórico recomendado por normas nacionais, em destaque a ABNT NBR 6118:2014, usada pelos projetistas como referência para execução de projetos novos, e também realizar consultas para

calcular o reforço estrutural, devido à inexistência de uma norma técnica específica para reforços e soluções patológicas das estruturas.

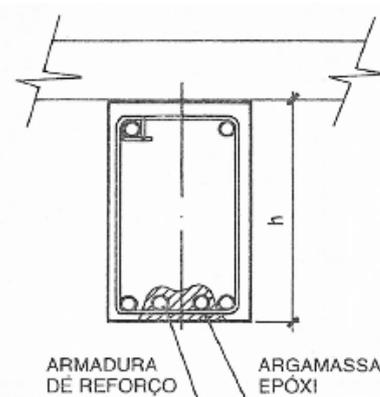
O processo por aumento de seção aborda dois tipos de reforço, à cortante, e à flexão. Sendo este último à flexão, específico do estudo vigente, ocorre a falta de armadura na zona tracionada, a correção com reforço se faz com adição de armadura complementar dentro de um acréscimo de seção na altura de viga (DONIN, 2015).

Cánovas (1988) evidencia que no caso de flexão, a falha pode-se produzir por várias causas, á seguir destacadas:

- Falta de armadura de tração, que provocará fissuras na parte da viga e que inclusive pode provocar a ruptura da mesma se a falta de armadura for grave.
- Falta de capacidade de resistência à compressão da viga, seja por deficiência de seção de aço na zona de compressão, seja pela baixa qualidade do concreto armado.
- Acréscimo de armadura na seção, para cargas maiores de serviço solicitantes à mesma viga de concreto armado.

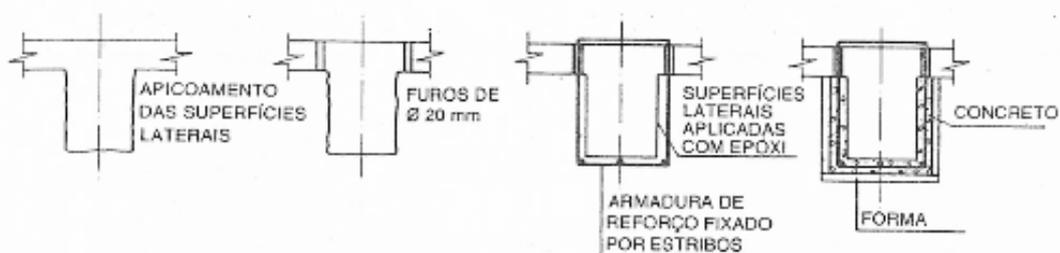
Nos casos citados, a falha pode ser na concepção do projeto, execução, ou os dois juntos (projeto e execução). Cánovas (1988) menciona que, identificada a causa, toma-se as providências corretas para o processo de reparo ou complementação de seção, e propõe os seguintes procedimentos usuais de reforço:

Figura 7 – Reforço sem aumento de viga.



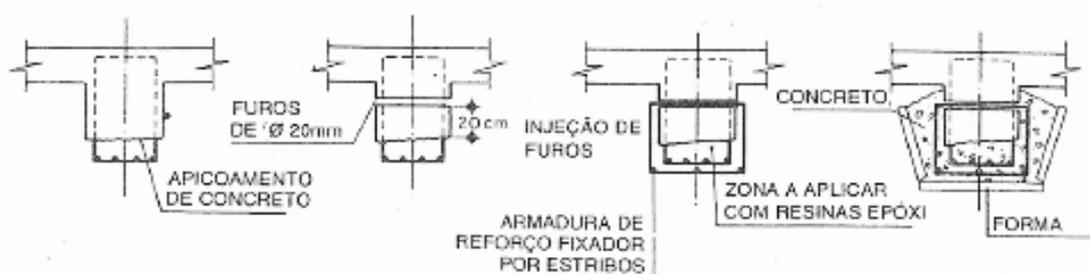
Fonte: (CÁNOVAS, 1988, p.310).

Figura 8 – Reforço de viga com armadura atada à laje.



Fonte: (CÁNOVAS, 1988, p.311).

Figura 9 – Reforço de viga com nova armadura atada à mesma.



Fonte: (CÁNOVAS, 1988, p.311).

4.4.1 PROCESSO EXECUTIVO

Mediante análise, inicia-se o processo de reparo da viga de concreto armado. Tomando primeiramente os processos primários de prevenção e preparação, passando após a parte executiva do reforço. A seguir, apresenta-se o relato do processo usual da técnica de reforço por encamisamento de seção.

4.4.1.1 Escoramento dos elementos.

A etapa inicial consiste no escoramento das lajes e vigas adjacentes, caso a capacidade resistente da viga a ser reforçada for insuficiente para resistir às solicitações (SOUZA E RIPPER, 1998).

4.4.1.2 Polimento

O polimento consiste em deixar as superfícies da peça de concreto com sua textura original, lisa e sem partículas soltas, tirando das faces as deficiências oriundas da execução ou ação de agentes externos. A aplicação de ranhuras ou apicolamento na superfície que terá contato com o concreto novo, ajuda na

ancoragem e união mecânica dos dois materiais após solidificação. Essa textura em estado original terá o contato com o novo concreto. O mesmo processo pode-se usar escova de aço manual, jato de ar de alta pressão, jatos de água de alta pressão, entre outros. Em todos os processos, na etapa final usa-se jato ar comprimido ou lavagem com água, para eliminação dos resíduos e partículas resultantes da execução de limpeza da peça (DONIN 2015).

4.4.1.3 Perfuração da seção transversal para passagem de estribos

Executar furos com brocas de 20 mm de diâmetro para passagem dos estribos. Os estribos fazem a suspensão das barras longitudinais adicionais, dispostas logo abaixo das existentes e o mais próximo possível para não mudar a distância baricêntrica. Após a colocação dos estribos, deve-se fechar os vazios dos furos entre estribos novos e o concreto da seção com pasta de cimento de fator água/cimento inferior a 0,4, injetada mecanicamente ou manualmente (DONIN, 2015).

4.4.1.4 Colocação das fôrmas e concretagem

As fôrmas devem ser confeccionadas e posicionadas, de acordo com a seção estabelecida no projeto do reforço, atender o cobrimento mínimo da armadura externa, ser estanque, e ser resistente à carga solicitada do concreto ou graute fluido. Montar a forma executando-se o cachimbo, devendo o nível superior ficar pelo menos 10 cm acima do ponto mais alto do reparo. Aplica-se a resina epóxi nas regiões em contato com as novas armaduras e o concreto existente, verificando sempre se a resina epóxi respeita o tempo de concretagem ou grauteamento, para então solidificar o concreto velho com o do reforço. Após isso concretar-se com concreto aditivado com fluidificante com slump acima de 220 mm, após 24 horas, desmoldar, e manter cura úmida por 7 dias. Pode-se usar ainda graute em pequenos volumes ou concreto projetado para grandes áreas (SOUZA E RIPPER, 1998).

4.4.5 PROCESSO DE CÁLCULO

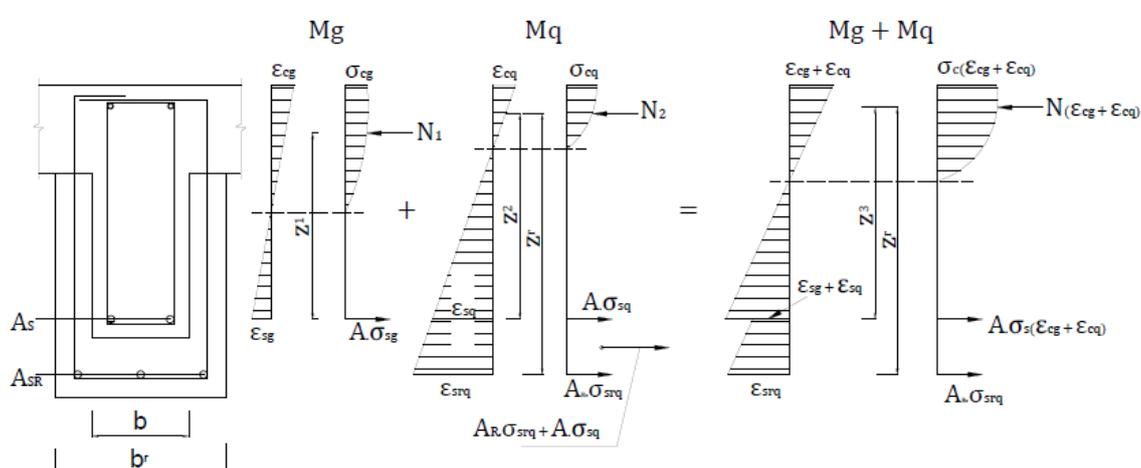
4.4.5.1 Cálculo do reforço à flexão de vigas – Método Cánovas

Ao efetuar o reforço de uma viga à flexão pelo método de encamisamento, é comum que sobre a mesma esteja atuando momentos fletores e esforços cortantes superiores à sua capacidade portante, ou ainda solicitações de cargas que os métodos apresentados anteriormente não atenderiam. Esse trabalho aborda apenas

a reabilitação de estruturas devido ao momento fletor positivo. Assim as ações perpendiculares atuantes de momentos fletores na seção longitudinal da viga, são produzidas pela carga permanente (M_g) (peso próprio somado com carga parcial da laje, piso, ou ainda o carregamento de outra viga sobre a mesma), e sobrecargas de utilização (M_q) (CÁNOVAS, 1988).

Segundo Cánovas (1988), determina-se o estado das tensões na peça com a superposição das deformações da viga, admite-se o estado último após a atuação do momento M_q , conforme demonstra a figura 10.

Figura 10 – Estado tensional de uma viga reforçada.



Fonte: (CÁNOVAS, 1988, p.322). Adaptado pelo autor pelo autor.

Onde:

A – Área de aço do substrato;

A_R – Área de aço do reforço;

ϵ_{cg} e σ_{cg} – Deformação e tensão do concreto para cargas permanentes;

ϵ_{sg} e σ_{sg} – Deformação e tensão do aço do substrato para cargas permanentes;

ϵ_{srg} e σ_{srg} – Deformação e tensão do aço do reforço para cargas permanentes;

ϵ_{cq} e σ_{cq} – Deformação e tensão do concreto para cargas de uso;

ϵ_{sq} e σ_{sq} – Deformação e tensão do aço do substrato para cargas de uso;

ϵ_{srg} e σ_{srg} – Deformação e tensão do aço do reforço para cargas de uso;

$\sigma_c(\epsilon_{cg}$ e $\epsilon_{cq})$ – Função da tensão no concreto dependente dos parâmetros ϵ_{cg} e ϵ_{cq} ;

$\sigma_s(\epsilon_{cg}$ e $\epsilon_{cq})$ – Função da tensão no aço do substrato dependente dos parâmetros ϵ_{cg} e ϵ_{cq} ;

$N(\epsilon_{cg}$ e ϵ_{cq}) – Função da força de compressão no concreto dependente dos parâmetros ϵ_{cg} e ϵ_{cq} ;

z_r – Braço de alavancada da armadura do reforço;

z_1 – Braço de alavanca da armadura do substrato devido M_g ;

z_2 – Braço de alavanca da armadura do substrato devido M_q ;

z_3 – Braço de alavanca da armadura do substrato devido M_q e M_g ;

O momento total que a viga reforçada será submetida é expressa pela (eq. 01):

$$M_t = M_p + M_s \quad (\text{eq. 01})$$

Cánovas (1988) explica que para esta condição deve-se verificar que:

$$\sigma(\epsilon_{cq} + \epsilon_{cs}) \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{eq. 02})$$

$$\sigma(\epsilon_{cq} + \epsilon_{cs}) \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_s} \quad (\text{eq. 03})$$

$$\sigma_{srs} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s} \quad (\text{eq. 04})$$

Sendo a tensão da armadura existente, após a execução do reforço, é:

$$\sigma_{sp} = \frac{M_g}{z_1 \times A} \quad (\text{eq. 05})$$

Como o momento total ($M_g + M_q$) leva a um estado-limite último, e admitindo-se que a viga continuará após o reforço, a tensão na armadura não poderá ultrapassar:

$$\sigma_{srs} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s A} - \sigma_{sp} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s} \quad (\text{eq. 06})$$

O equilíbrio de momentos, para o diagrama devido ao momento M_q leva à equação de equilíbrio.

$$M_q = (A \times \sigma_{ss} + A_R \times \sigma_{srs}) \times z_r = (A + A_R) \times \sigma_{srs} \times z_r \quad (\text{eq. 07})$$

E, com isto, a área de reforço pode ser calculada por:

$$A_R = \frac{M_q}{z_r \times \sigma_{srs}} - A \quad (\text{eq. 08})$$

Os braços de alavanca das armaduras Z_i e Z_r podem ser calculados a partir da teoria clássica do concreto armado para o estágio III.

No caso de reabilitação das vigas, além de se determinar a área de aço do reforço analisando os possíveis estados de tensão e deformação existentes na peça, é preciso verificar também se a tensão tangencial na interface do reforço com o substrato, $\tau\alpha$, é maior que a tensão tangencial máxima, $\tau\alpha_{,m\acute{a}x}$, calculada de acordo com indicações do CEB (1983), conforme sugere CÁNOVAS (1988). Este código sugere o cálculo do valor limite da tensão tangencial máxima em função do tipo de técnica de reforço utilizada. De acordo com estudos realizados, a tensão tangencial

na interface reforço/substrato existente em um trecho da viga submetida a um esforço cortante V é calculada pela equação (DONIN, 2015):

$$\tau\alpha = \frac{V}{b.zr.\left[1 + \frac{A.z3.(d1-x)}{Ar.zr.(d2-x)}\right]} \quad (\text{eq. 09})$$

onde:

b – Largura da viga;

V – Esforço cortante a ser absorvido pelo elemento depois de reforçado;

$d1$ – Altura útil devido à armadura inicial;

$d2$ – Altura útil devido à armadura de reforço;

x – Altura da linha neutra.

O CEB (1983) recomenda não reforçar para mais de 50% da capacidade resistente da peça existente antes do reforço. A verificação pode ser feita com as equações abaixo:

Momentos fletores:

$$\Delta Mu, \text{ adicionado} \leq 0,5Mu, \text{ existente} \quad (\text{eq. 10})$$

Esforços Cortantes:

$$\Delta Vu, \text{ adicionado} \leq 0,5Vu, \text{ existente} \quad (\text{eq. 11})$$

4.4.5.2 Cálculo do reforço à flexão de vigas – Augusto Gomes; Júlio Appleton, (RPEE) N.º42.

O reforço por encamisamento consiste no aumento de seção transversal pela adição de armadura complementar e uma camada de graute, argamassa ou concreto que envolve a seção inicial. O reforço pode ser associado a uma correção de anomalias decorrentes de deficiência de projeto, construção ou à necessidade de alteração da finalidade da construção. Sendo assim o encamisamento uma alternativa para reforço estrutural eficiente. A elaboração do projeto é precedido sempre de uma inspeção, levantamento de informações disponíveis, e análise das condições de segurança. Sempre deverá ser concebido de modo a minimizar o custo da intervenção e a alteração na utilização da construção durante a execução dos trabalhos de reforço (GOMES e APPLETON, 1997)

A seguir o autor apresenta a forma de verificação relacionada aos estados limites últimos em projetos de reforço à flexão, em que se refere a valores diferentes dos adotados por obras novas, considerando o efeito do número de incertezas, cita-

se como exemplo a dificuldade de simular os danos existentes. Por outro lado é possível obter informações rigorosas da obra e das propriedades de seus materiais.

$$Sd = \gamma'F - S(F') \leq Rd = \gamma_{n,R} SR\left(\frac{f_k}{\gamma'm}\right) \quad (\text{eq. 12})$$

Onde $\gamma'F$ refere-se à majoração das ações, e $\gamma'm$ refere-se à minoração dos valores característicos da resistência dos materiais.

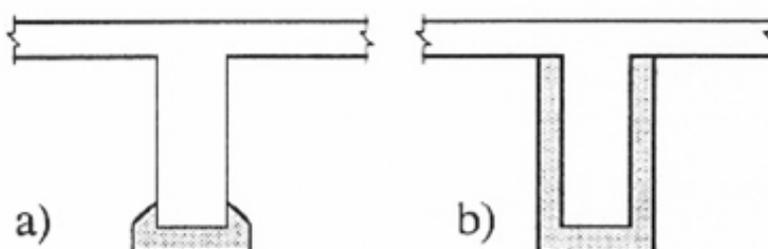
O método dos coeficientes globais citado por Eurocode (EC8), permite assumir duas alternativas para o cálculo dos esforços resistentes dos elementos reforçados:

I) Primeiramente admite-se que o elemento reforçado e o reforço possuem ligação perfeita formando uma peça única, e usa-se o cálculo com base na relação construtivas dos materiais novos, para então reduzir esse valor através de um coeficiente global de segurança chamado de coeficiente de monolitismo, $\gamma_{n,R} \leq 1$, depende da técnica de reforço utilizada. Para a técnica de encamisamento recomenda-se, $\gamma_{n,R} = 0,9$ para resistência (Momento fletor) e $\gamma_{n,K} = 0,85$ para deformabilidade (Esforço cortante).

II) Modelar ao nível de tensões iniciais dos materiais existentes e simular o elemento reforçado incluindo o comportamento do mesmo com os materiais de adição.

O reforço por encamisamento em vigas pode ser efetuado à flexão (figura 11a)), ou à flexão e ao esforço transversal (figura 11b)).

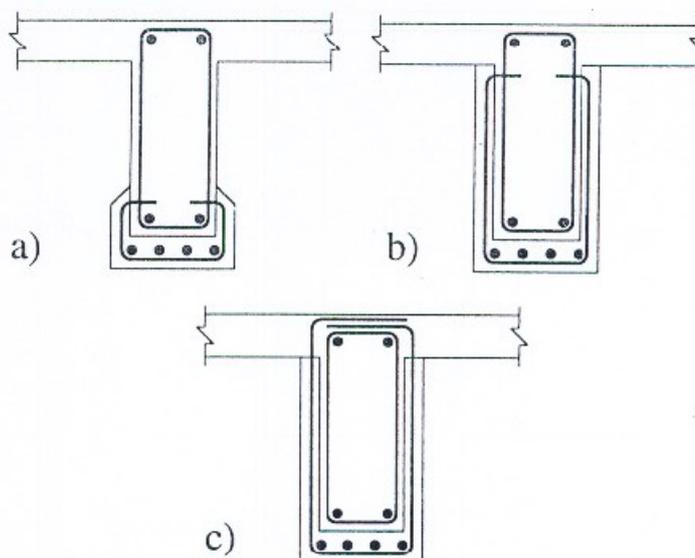
Figura 11 – Tipos de encamisamento.



Fonte: (Appleton, p.8). Adaptado pelo autor pelo autor.

Das seções mencionadas acima, na figura 12, apresenta as seguintes disposições de armadura.

Figura 12 – Tipos de disposição de armaduras usuais.

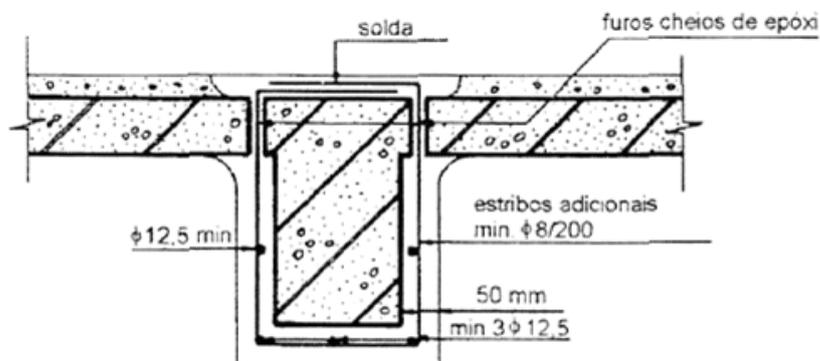


Fonte: (Appleton, p.8). Adaptado pelo autor pelo autor.

A figura 12a) se refere ao reforço apenas à flexão, e as figuras 12b) e 12c) refere-se ao reforço à flexão e ao esforço cortante. Na ilustração c), os estribos são os mesmos da ilustração b), seguem a mesma disposição, porém a) e b) os estribos são amarados dentro de furos previamente executados na alma da viga, sendo para a) os furos executados ainda na parte tracionada, e para b) executados acima na zona comprimida. Os estribos dispostos na figura 12c), é necessário furar o banzo da viga e abrir uma cavidade superior onde os dois ramos são amarrados, este processo obtém-se um resultado mais eficaz para o esforço transversal, porém a execução interfere o pavimento superior, e agrega mais trabalho executivo (GOMES e APPLETON, 1997).

A figura 13, representa detalhe da seção de uma viga reforçada com enchimento de concreto, e forma construtiva usual da figura 12 c), com espaçamentos que devem ser respeitados e bitolas de aço mínimo (DONIN, 2015).

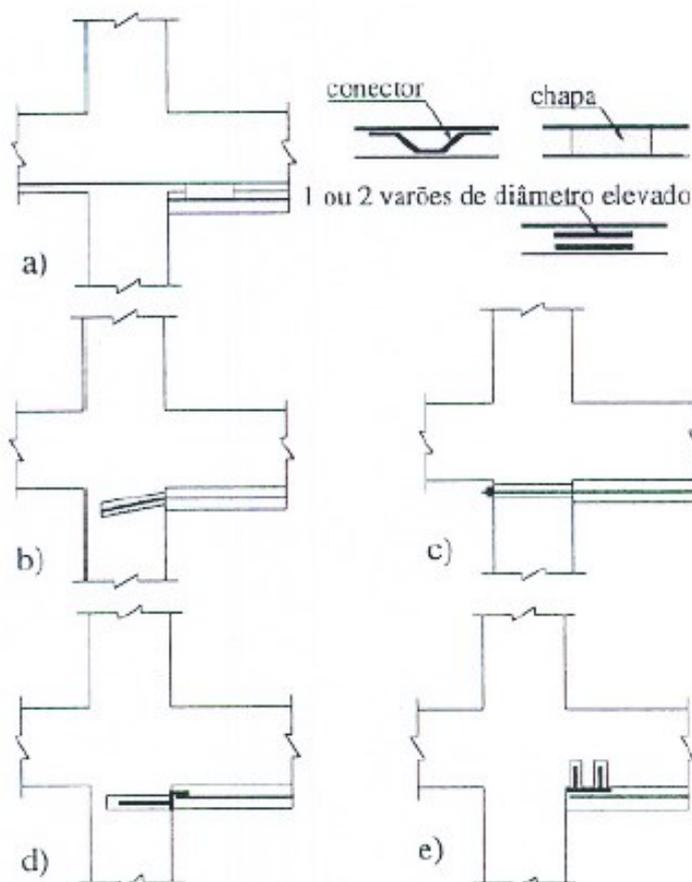
Figura 13 – Detalhe da seção de uma viga reforçada com enchimento de concreto.



Fonte: (DONIN, 2015) – Patologias das Estruturas de Concreto.

Todo processo de reforço de vigas necessita de uma ancoragem nos extremos das vigas. Gomes e Appleton, (1997), cita formas de ancoragem do reforço, ilustradas abaixo:

Figura 14 – Ancoragem dos varões longitudinais nos nós.



Fonte: (Gomes e Appleton, 1997, p.10). Adaptado pelo autor pelo autor.

A figura 14a) indica uma união das barras positivas nas barras já existentes por solda, sendo de mesma espessura ou vencer o vão com chapas metálicas. Nesse caso a solda deve ser executada com a menor temperatura possível, a fim de não alterar as propriedades da armadura e certificar-se que os aços são soldáveis, deve-se usar solda compatível com a propriedade dos aços.

A figura 14b) apresenta a ancoragem das barras positivas num furo preenchido com material epóxi, argamassa, ou graute. Conforme o material a ser utilizado, o furo deve exceder 5 a 10 mm o diâmetro da barra, depois de executado deve-se remover todas as poeiras. Ao executar o preenchimento do furo aconselha-se uso de resina fluida com purga (ou executando o furo com inclinação até a outra extremidade do pilar) evitando que fique bolhas de ar impregnado, usando uma ancoragem de 20 diâmetros. Quanto ao uso de argamassa Gomes e Appleton, (1997), recomenda o comprimento da amarração mínimo igual ao especificado em projeto de estruturas novas.

A figura 14c) representa uma ancoragem que atravessa o pilar, sendo parafusado na face oposta, pode ser ainda fixado por um aperto mecânico. Após fixado, o furo deve ser selado para proteção da barra. Já nas figuras 14d) e 14e) a barra é soldada a uma peça metálica fixada previamente (GOMES e APPLETON, 1997).

Ligação entre o concreto inicial e o concreto de adição

O reforço por encamisamento depende da aderência dos materiais, e assim garantir que o conjunto funcione como um único elemento (monoliticamente), e não separadamente por serem materiais de diferentes processamentos. A ligação entre o material de adição e o material existente, sem utilização de armaduras deve atender a adesão química e ao atrito mecânico. Portanto na fase inicial de carregamento do elemento, a resistência é atendida pela adesão, para fase final de corte-escorregamento o atrito atenderia. Assim o valor máximo da resistência por adesão de escorregamento deve ser inferior a 0,02 mm (GOMES e APPLETON, 1997).

O autor cita que a adesão depende dos parâmetros rugosidade e tipo de tratamento da superfície inicial; utilização de resinas de colagem; tipo do material de adição e forma de aplicação.

Para os parâmetros de atrito que deve-se atender são a forma e tamanho dos inertes(o atrito aumenta com a dimensão do inerte e diminui com arredondamento de sua forma); rugosidade da superfície inicial; resistência à compressão dos materiais; existência de tensões perpendiculares à ligação; ciclos de carga degrada o atrito (GOMES e APPLETON, 1997).

Ensaio de laboratório conduzem a para 1,0 MPa e 2,0 MPa os valores de tensão de aderência. Portanto a tensão de corte não deve exceder o seguinte limite:

$$\tau_{max} \leq \frac{1}{\gamma_c} \frac{2}{3} f_{ctm} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde:

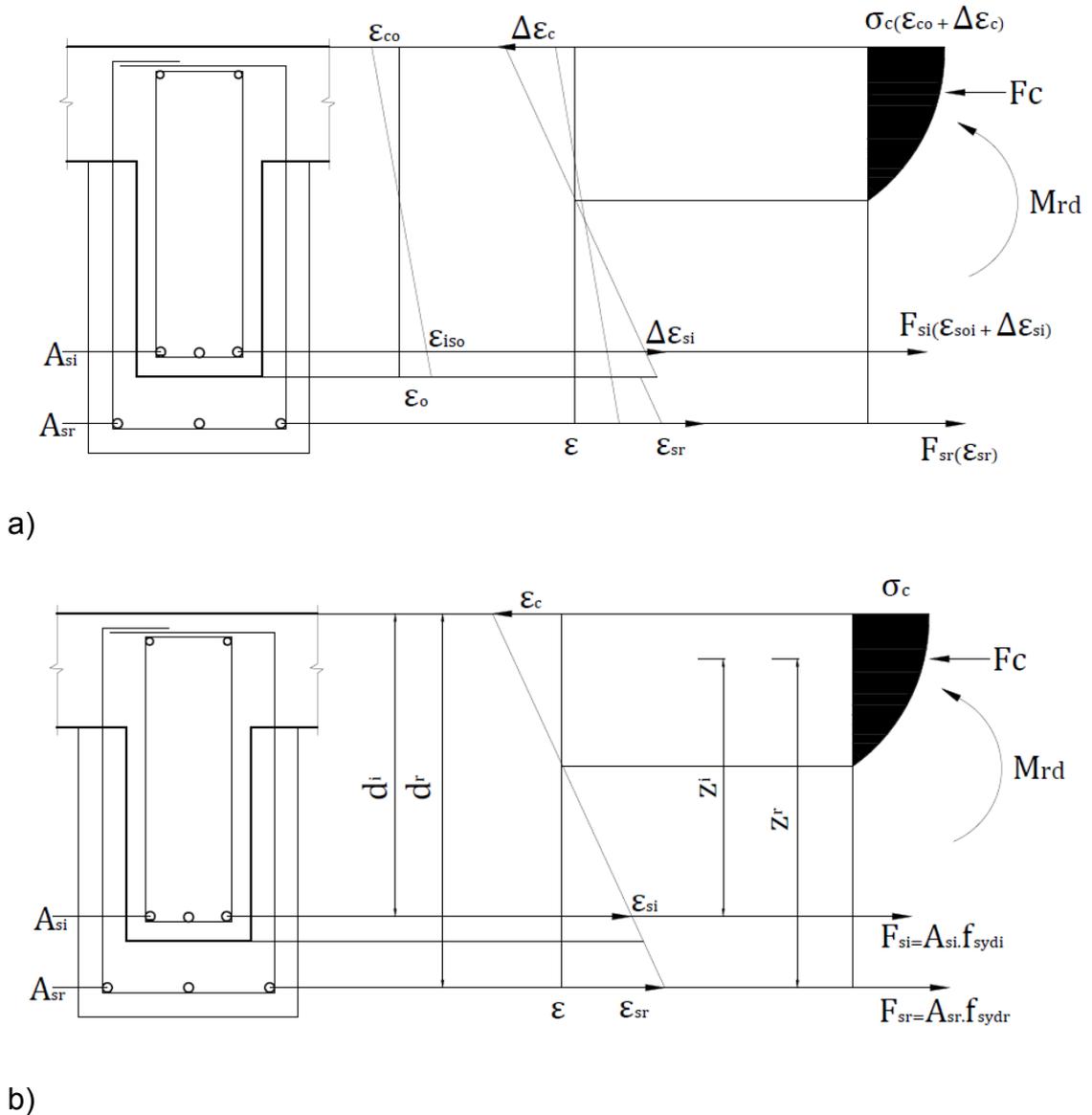
γ_c é o coeficiente de segurança parcial do concreto

f_{ctm} é o menor dos valores característicos das tensões de ruptura à tração do concreto inicial e do concreto de reforço.

Verificações de segurança

Para vigas à flexão, pode-se ver na figura 15a), o estado limite último de uma seção reforçada, onde o reforço pode realizar-se pelo método dos coeficientes globais, este admite-se um coeficiente de monolitismo para flexão de $\gamma_n, M = 0,9$, assim admite-se que a seção possui um comportamento monolítico com aderência perfeita do concreto existente e do concreto de reforço. Com base nessa premissa, procede-se com o cálculo semelhante o de uma seção de concreto armado, considerando duas camadas de armadura, podendo ter resistências diferente como indica a figura 15b) (GOMES e APPLETON, 1997).

Figura 15 – Cálculo do momento fletor resistente.



Fonte: (Gomes e Appleton, 1997, p.12). Adaptado pelo autor pelo autor.

Estando as duas armaduras próximas pode-se proceder o cálculo considerando uma armadura equivalente com área A_s^{eq} com uma resistência de cálculo $f^{i\,syd}$ posicionada no centro mecânico dessas armaduras, como demonstra as equações abaixo:

$$M_{rd} = \gamma_n, M \{ A_s^{eq} Z^{eq} f^{i\,syd} = A_s^i Z^i f^{i\,syd} + A_s^r Z^r f^{r\,syd} \} \quad (\text{eq. 14})$$

$$A_s^{eq} = A_s^i + A_s^r \frac{f^{r\,syd}}{f^{i\,syd}} \quad (\text{eq. 15})$$

$$Z^{eq} = \frac{A_s^i Z^i f^{i\,syd} + A_s^r Z^r f^{r\,syd}}{A_s^i f^{i\,syd} + A_s^r f^{r\,syd}} \quad (\text{eq. 16})$$

Admitindo $z = 0,9 d$:

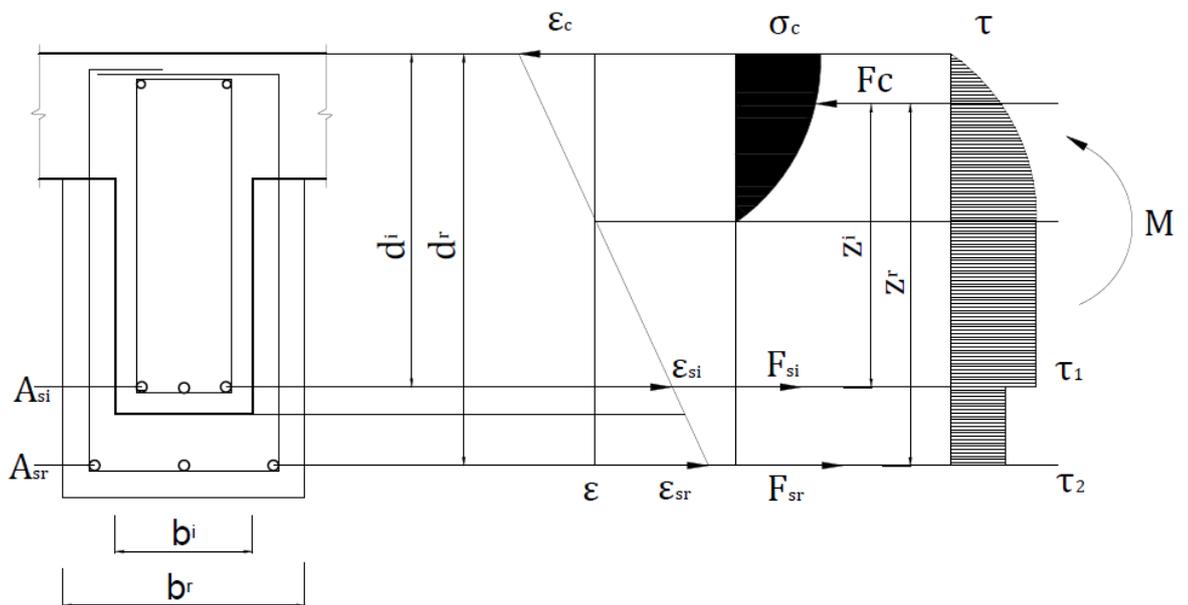
$$Mrd = \gamma_n, M \left\{ A_s^{eq} 0,9 d^{eq} f^i_{syd} = f^i_{syd} (A_s^i 0,9 d^i + A_s^r 0,9 d^r \frac{f^r_{syd}}{f^i_{syd}}) \right\} \quad (\text{eq. 17})$$

Pode-se nesse procedimento utilizar tabelas de dimensionamento de armadura, e determina-se a área de aço do reforço pela seguinte equação:

$$A_s^r = \frac{f^r_{syd}}{f^i_{syd}} \left(A_s^{eq} \frac{d^{eq}}{d^r} - A_s^i \frac{d^i}{d^r} \right) \quad (\text{eq. 18})$$

Para o cálculo acima deve-se ainda ser garantido a ligação do concreto inicial com o concreto do reforço. A figura 16 mostra a distribuição de tensões tangenciais ligadas ao estado de limite último de flexão.

Figura 16 – Cálculo do momento fletor resistente.



Fonte: (Gomes e Appleton, 1997, p.12). Adaptado pelo autor pelo autor.

Assim os valores das tensões tangenciais são expressas por:

$$\tau_1 = \frac{Vsd}{b^r z_{eq}} \quad (\text{eq. 19})$$

$$\tau_2 = \frac{Vsd}{b^r z_{eq}} \times \frac{A_s^r f^r_{syd}}{A_s^r f^i_{syd} + A_s^i f^r_{syd}} \quad (\text{eq. 20})$$

Onde z_{eq} é obtido na equação(x), ou admitir a simplificação:

$$z^r \approx 0,9d^r; z^i \approx 0,9d^i \text{ e } z^{eq} \approx 0,9d^{eq} \quad (\text{eq. 21})$$

Para tanto, a verificação da segurança da ligação deve garantir que a tensão tangencial do concreto inicial τ_2 e concreto do reforço seja inferior ao limite especificado pela equação (13):

$$\tau_{max} \leq \frac{1}{\gamma_c} \frac{2}{3} f_{ctm}$$

Os resultados de ensaio experimentais dos elementos reforçados tem deformabilidade superior aos monolíticos, essa deformação ocorre na interface do concreto existente com o concreto de reforço. Sendo esse fato levado em consideração na verificação do estado limite de deformação, recorrendo a um coeficiente global de monolitismo relativo à rigidez, $\gamma_{n,k} \leq 1,0$ (GOMES e APPLETON, 1997).

No entanto o Eurocode para uso do reforço por encamisamento à flexão deve-se usar os seguintes coeficientes de monolitismo (RPEE, N.º42):

Em vigas $\gamma_{n,M} = 0,90$ e $\gamma_{n,k} = 0,85$

Em lajes $\gamma_{n,M} = 1,00$ e $\gamma_{n,k} = 1,00$

O autor aborda que a técnica de encamisamento beneficia o esforço cortante da viga reforçada. Ao aumentar a seção e largura da alma, adiciona-se armadura transversal de estribos, é obtido um aumento da resistência à compressão nas bielas inclinadas considerando o modelo de treliça. Aborda-se o cálculo atribuindo os coeficientes globais, com as equações a seguir:

$$V_{sd} \leq V_{rd, \text{máx}} = \tau^i 2 b^i w d^i + 0,5 \tau^r 2 (b^r w - d^i) d^r \quad (\text{eq. 22})$$

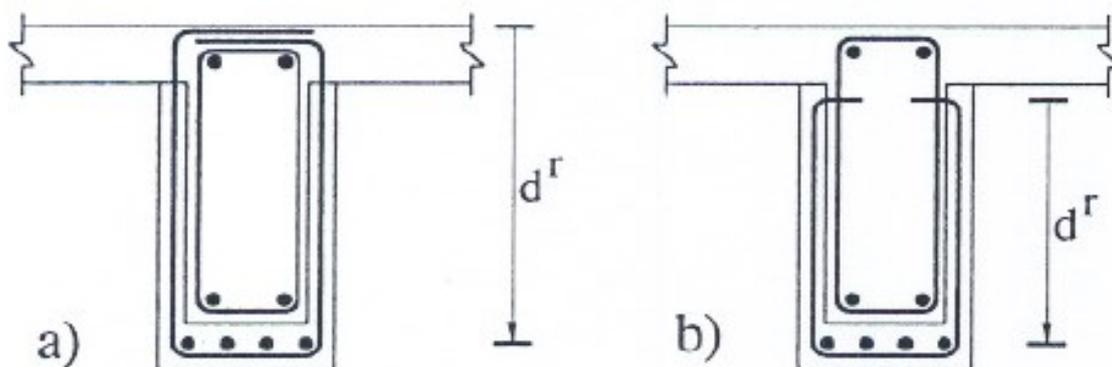
$$V_{sd} \leq V_{rd} = V_{cd} + V_{wd} \quad (\text{eq. 23})$$

$$V_{cd} = \tau^i 1 b^i w d^i + \tau^r 1 b^r w d^r \quad (\text{eq. 24})$$

$$V_{wd} = \gamma_n V (0,9 d^i \frac{A_{sw}^i}{s} f_{syd}^i + 0,9 d^r \frac{A_{sw}^r}{s} f_{syd}^r) \quad (\text{eq. 25})$$

Sendo o valor de d^r deverá ser adequado de acordo com a opção de armadura ilustrada abaixo:

Figura 17 – Altura útil do reforço para o cálculo do esforço cortante resistente.



Fonte: (Gomes e Appleton, 1997, p.13). Adaptado pelo autor pelo autor.

Segundo o autor, quando feito o reforço ao esforço cortante, deve-se levar em consideração o complemento de forças nas armaduras longitudinais associado ao modelo de treliça utilizado no estado limite último do esforço cortante. Também refere-se ao uso de expressões definidas com inclinação variável para bielas daquele modelo.

O EC8 cita os seguintes coeficientes de monolitismo para esforço cortante:

$$\gamma_{n,V} = 0,80$$

$$\gamma_{n,k} = 0,80$$

O autor cita que o reforço ao cortante não deve ser muito elevado, recomenda-se que: $V^r R_d < V^i R_d$.

5 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de um estudo teórico e experimental, onde inicialmente entre os métodos de reforço de vigas de concreto apresentados com a fundamentação teórica, foram definidos quatro protótipo de vigas em estrutura de concreto armado.

A técnica escolhida para o ensaio das vigas de concreto foi o reforço por encamisamento à flexão, que se torna competitivo em relação às outras pela capacidade portante de carga.

5.1 ANÁLISE TEÓRICA

Primeiramente foi definido o modelo de protótipo, em seguida usando análise de cálculo foi verificado se a carga suportada pelas vigas não ultrapassaria a carga limite de serviço do macaco hidráulico. A máquina pneumática utilizada para os ensaios foi a EMIC GR048, com capacidade máxima de 300 kN (30.000 kgf), permite ensaios à compressão, e ensaios à tração do aço.

5.1.2 CARGA ESTIMADA DE RUPTURA

Seguindo as especificações da norma NBR 6118:2014, fez-se o dimensionamento de cálculo estimado de ruptura à flexão das vigas protótipos, com devida cautela para que as vigas não rompessem ao cortante.

Para isso utilizou-se duas barras longitudinais de \varnothing 6,3 mm para armadura construtiva na parte superior das vigas, duas barras longitudinais de \varnothing 10,0 mm na parte inferior positiva, e estribos de \varnothing 5,0 mm cada 5 cm do ponto de aplicação das cargas até o apoio (figura 18 espaço A-B e C-D), e estribos cada 10 cm no vão entre as cargas (figura 18 espaço B-C), a fim de evitar o rompimento das vigas ao esforço cortante.

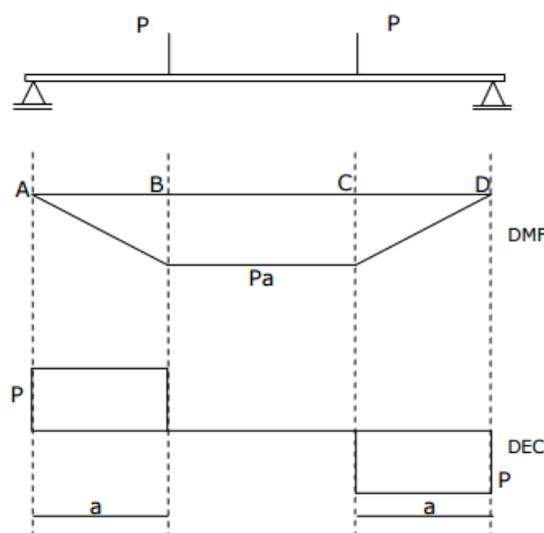
Para os protótipos com reforço, utilizou-se duas barras longitudinais de \varnothing 6,3 mm para armadura construtiva na parte superior do reforço, 3 barras longitudinais de \varnothing 10,0 mm na parte inferior positiva e a mesma proporção de estribos \varnothing 5,0 mm para transferência de carga do reforço para viga original, assim levando as cargas até o apoio.

5.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Definidos os corpos de prova, foi desenvolvido um protótipo de viga sem reforço denominado testemunho, e três protótipos executados com reforço. As vigas

de concreto foram moldadas, reforçadas e ensaiadas dentro da especificação da NBR 6118:2014 e auxílio de bibliografia internacional. Para obtenção do resultado experimental foi usado o método de ensaio de Stuttgart, que consiste no carregamento gradativo de uma viga retangular biapoiada, com duas cargas concentradas de mesmo valor dispostas equidistantes dos apoios, ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Configuração do ensaio de Stuttgart.



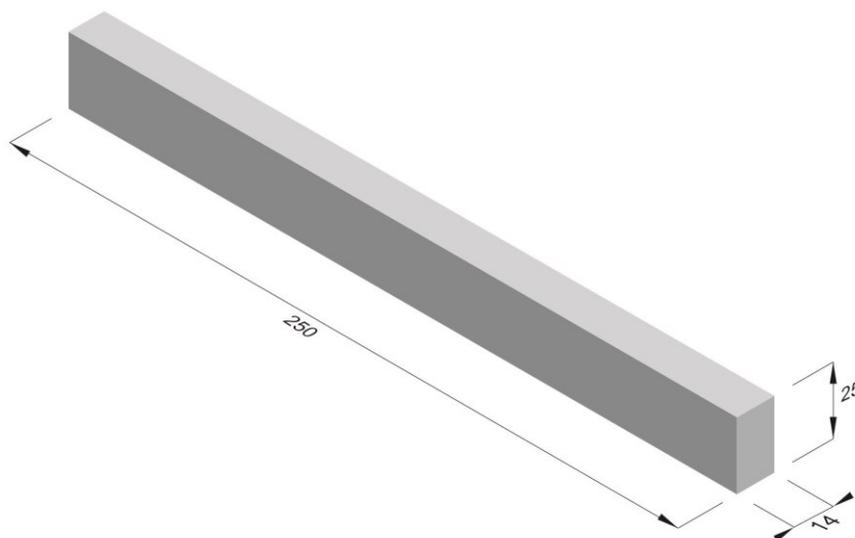
Fonte: Adaptado pelo autor, 2019.

As vigas colocadas um por vez na posição de ensaio, inicia-se a aplicação da carga em uma velocidade constante pré-determinada até o rompimento ao fim de sua capacidade resistente. A viga testemunho sem reforço serve como base de cálculo para as outras três que são reforçadas. Com os resultados coletados obtém-se a capacidade de carga da viga sem o reforço e das três vigas com o reforço. O ensaio de Stuttgart nos permite verificar na peça os trechos solicitados pelo carregamento.

5.1.1 DEFINIÇÃO DOS PROTÓTIPOS

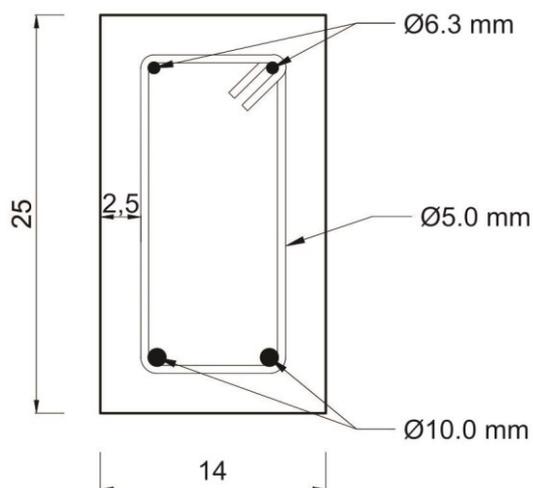
O protótipo testemunho sem reforço foi confeccionado nas dimensões 14 cm de base, 25 cm de altura e 250 cm de comprimento, e com a mesma proporção foram executados as vigas que foram reforçadas, como ilustra a figura 19.

Figura 19 – Modelo de viga executado para ensaio e reforço.



Fonte: Autor (2019).

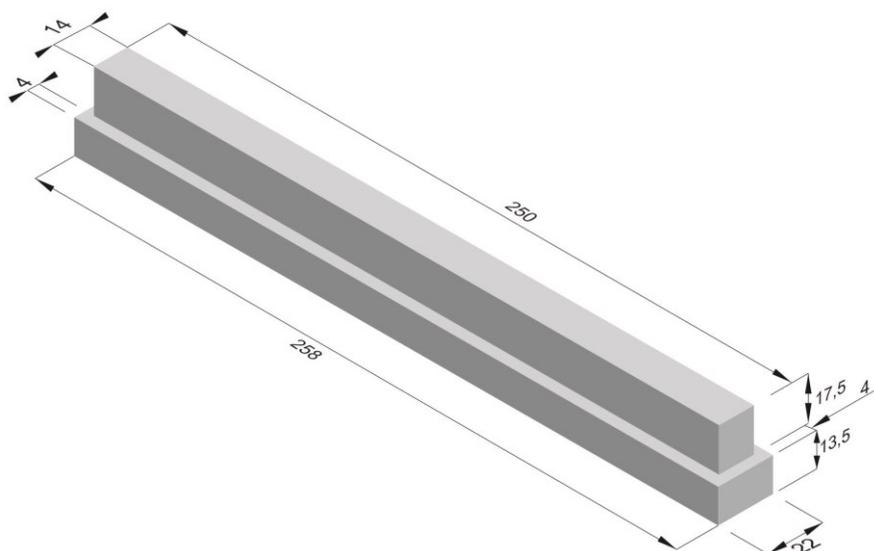
Figura 20 – Detalhamento da seção da viga para ensaio e reforço.



Fonte: Autor (2019).

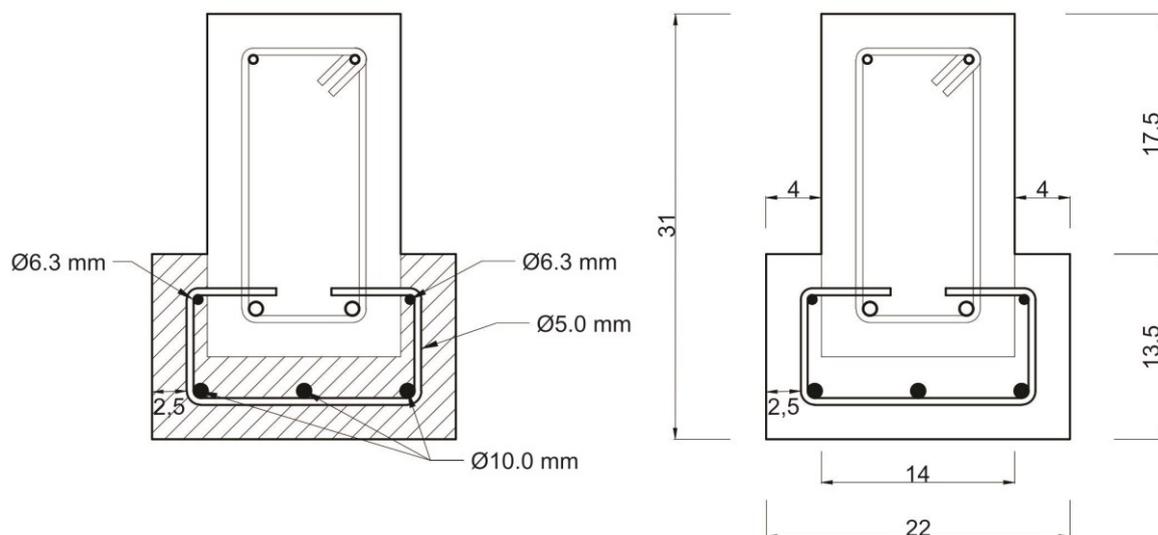
As vigas que foram reforçadas a flexão, tiveram um acréscimo de seção inferior mudando sua geometria de base passando a ter as medidas ilustradas na figura 21.

Figura 21 – Modelo de viga executado com reforço á flexão por encamisamento.



Fonte: Autor (2019).

Figura 22 – Detalhamento da seção da viga reforçada por encamisamento.



Fonte: Autor (2019).

5.1.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DAS VIGAS PROTÓTIPOS

A seguir apresenta-se os materiais utilizados para a confecção das vigas em concreto armado, e o reforço à flexão com aumento de seção.

5.1.2.1 Aço

Para estes ensaios foi usado aço CA50, atualmente comercializado. Após feito o quantitativo para aquisição, prosseguiu-se com a etapa de corte das barras para suas devidas funções. Com o auxílio de uma trena, marcador e máquina de corte manual, cortou-se as barras longitudinais de diâmetro \varnothing 10,0 mm e de \varnothing 6,3 mm com 276 cm cada, as barras de \varnothing 5,0 mm com 68 cm para uso como estribos.

Após essa etapa, prosseguiu a dobra das barras usando um braço de alavanca. As barras de \varnothing 10,0 mm e de \varnothing 6,0 mm foram dobradas as extremidades, para obter ancoragem no concreto. Os estribos foram dobrados nas medidas pré-determinadas para cintamento da armadura longitudinal. Para a montagem da armadura, foi posicionado as barras longitudinais na horizontal apoiadas em uma bancada, em seguida foi marcado a posição dos estribos para seu posicionamento, e então amarados com arame recozido e auxílio de um alicate.

Figura 23 – Ferragem 6,3 mm e 10 mm longitudinal das vigas.



Fonte: Autor (2019).

Figura 24 – Estribos 5 mm das vigas.



Fonte: Autor (2019).

Figura 25 – Armadura principal das vigas pronta.



Fonte: Autor (2019).

5.1.2.2 Formas

As formas para moldagem das vigas e etapa de reforço, foram confeccionadas com uso de chapa compensada resinada de 14 mm de espessura. Determinado o modelo de forma com os quantitativos, foi iniciado o processo de marcação com esquadro e corte com uso de serra de bancada. A montagem das formas foi feita

manualmente com auxílio de parafusos e uma parafusadeira manual, mantendo as medidas internas de 14 cm x 25 cm x 250 cm determinadas no projeto.

Figura 26 – Forma das vigas.



Fonte: Autor (2019).

5.1.2.3 Concreto

Materiais componentes do concreto

Os materiais componentes do concreto foram cimento CPV ARI, Brita 1, areia média e água potável.

Características dos materiais

Cimento CPV ARI – Conforme a NBR 5733:1991, denominado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, adquire resistências elevadas resistências em poucos dias em contato com a água. Na sua composição é feita uma adição diferenciada de calcário e argila durante a produção do clínquer, depois passa por uma rigorosa moagem adquirindo uma granulometria menor, preenche um maior número de vazios na mistura do concreto, diferente dos outros cimentos.

Areia Média – Este material é extraído naturalmente e passa apenas pelo processo de secagem e peneiramento, denominado agregado miúdo esse material deve passar na peneira de 4,75 mm e ficar retido na peneira com malha 0,15 mm ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 248, e peneiras conforme ABNT NMI SSO 3310-1.

Brita 1 – Agregado graúdo conforme a NBR 7211/2009, extraído naturalmente e passa pelo processo de britagem até adquirir uma granulometria para o uso

comercial. Quando executado o ensaio de peneiramento, o material deve passar na peneira 19,0 mm e ficar retido na peneira 9,5 mm (NBR 7211/2009).

O peneiramento tem por objetivo a separação do material granular superior, inferior às peneiras do ensaio, bem como as impurezas vindas do processo de produção, estocagem e transporte.

A areia média foi posta para secagem ao sol, e a brita 1 lavada e seca ao sol, esse processo se faz necessário para não alterar a umidade no fator água/cimento .

Figura 27 – Materiais componentes do concreto.



Fonte: Autor (2019).

5.1.3 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para obter parâmetros do concreto foram executados quatro corpos de prova para quatro protótipos de vigas, e para execução da concretagem adotou-se o seguinte traço para o concreto:

Tabela 4 – Traço do concreto.

TRAÇO DO CONCRETO	
Cim 1: Ar 2,5: Br 3,3: Ag 0,61	
Slump: 110mm á 160mm	
Cimento CPV ARI	36 kg
Areia Média	90 kg
Brita 1	120 kg
Água potável	22 Kg

Fonte: Autor (2019).

Inicialmente o material passou por pesagem e separação para mistura, em seguida adicionou-se toda a brita com $\frac{1}{4}$ de água, seguido pela areia e outro $\frac{1}{4}$ de água, e por último o cimento com o restante da água. Em cada mistura na betoneira foi adicionado dois traços, com objetivo de concretar uma viga por mistura. Sendo então 4 betonadas para concretagem completa.

Durante cada betonada foi feito o Slump Test, abatimento tronco cone, que serve para verificar a trabalhabilidade do concreto, estes testes ficaram com média 147 mm de abatimento, respeitando o intervalo de 110 a 160 mm.

Os corpos de prova foram moldados em cilindro com as medidas 10 x 20 cm. Para isto, foi untado as formas com óleo vegetal e em seguida inserido o concreto até meia forma, aplicado 12 golpes com bastão adensável, após completado com concreto e aplicado novamente 12 golpes, arasando o topo e pondo para secagem.

Figura 28 – CP's do concreto desmoldados.



Fonte: Autor (2019)

5.1.4 CONCRETAGEM DAS VIGAS

Para concretagem das vigas o concreto era colocado em um carrinho de mão e levado até as formas com armadura, despejado com auxílio de um balde e colher de pedreiro, sequencialmente adensado com o mangote vibrador. Posteriormente iniciou-se o controle da cura úmida até a desforma.

Figura 29 – Concretagem das vigas.



Fonte: Autor (2019).

5.1.5 DESFORMA DOS CP's E DAS VIGAS

Aguardado o decorrer de 24 horas, foi feita a desforma dos CP's sendo imergidos em água até o dia do rompimento.

As vigas desformadas ao terceiro dia após a concretagem.

Figura 30 – Vigas desformadas.



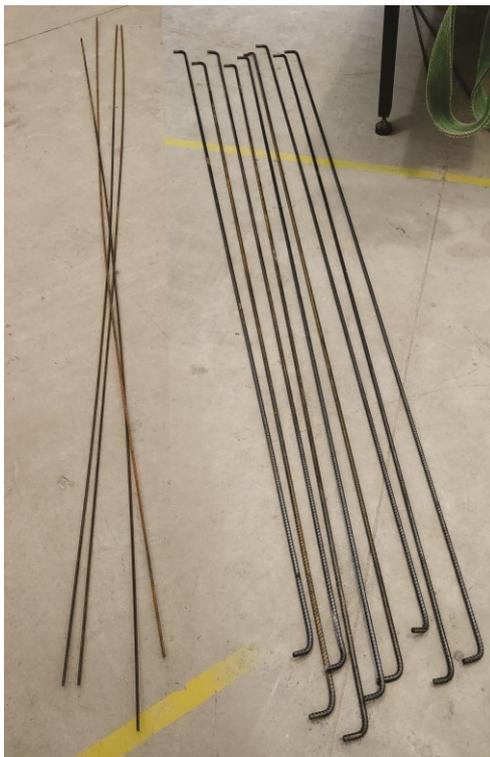
Fonte: Autor (2019).

5.1.6 MATERIAIS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DO REFORÇO DAS VIGAS PROTÓTIPO.

5.1.6.1 Aço Reforço

Para a armadura de reforço, usou-se três barras longitudinais de \varnothing 10 mm com 265 cm cada, duas barras longitudinais de \varnothing 6,3 mm com 250 cm cada, e os estribos com diâmetro de \varnothing 5 mm com 44 cm cada, usado mesmo espaçamento da viga inicial.

Figura 31 – Ferragem longitudinal de reforço das vigas 6,3 mm e 10 mm.



Fonte: Autor (2019).

Figura 32 – Estribos 5 mm de reforço das vigas.



Fonte: Autor (2019).

5.1.6.2 Graute Supergraute Quartzolit Weber

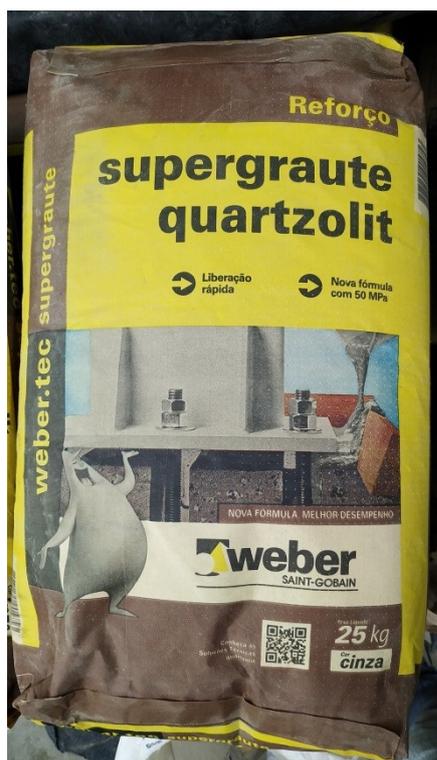
Na execução do reforço por aumento de seção usou-se graute auto adensável pré-fabricado. O Supergraute fornecido pelo fabricante foi elaborado para comercialização, indicado para utilização em fins específicos de estruturas

especiais, e uma dessas utilizações condiz ao auxílio na aplicação de reforço em estruturas de concreto.

O graute apresenta as seguintes características:

- Alta resistência inicial(25 MPa em 24 horas, 35 MPa e 3 dias) e final (50 MPa em 28 dias).
- Excelente fluidez com autonivelamento.
- Alta aderência.
- Retração controlada.
- Isenção de compostos que agredem a armadura.
- Baixa permeabilidade à água.
- Possibilitando desforma em 24horas.

Figura 33 – Graute Supergraute Quartzolit Weber.



Fonte: Autor (2019).

Brita Zero

O agregado graúdo usado nessa composição do reforço foi a brita zero, composta por pedras passantes em peneiras menos que 4,8 mm. O material ajuda na fluidez e aderência do concreto.

5.1.7 EXECUÇÃO DO REFORÇO NAS VIGAS PROTÓTIPO.

5.1.7.1 Escarear o concreto

Inicialmente foi feito a marcação do alinhamento determinado pelo aumento de seção a ser executado. Em seguida, usado um escareador manual para deixar as faces da viga mais rugosas promovendo uma ampla aderência em contato com o graute.

Figura 34 – Marcação e escareamento.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.2 Furação e instalação dos estribos do reforço

Na etapa seguinte deu início a marcação da posição dos estribos de reforço, passando na sequência com uso de uma furadeira martetele, a execução da furação da base das vigas acima da armadura positiva com broca 10 mm, e colocação dos estribos.

Figura 35 – Furação e colocação dos estribos.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.3 Montagem da armadura

A armadura de reforço à flexão foi executada seguindo o previsto na definição dos protótipos. Os estribos foram dispostos com os mesmos espaçamentos usados na viga, instalando com aproximação.

Na sequência, colocou-se as três barras longitudinais de \varnothing 10 mm na base da armadura, e duas barras longitudinais construtivas de \varnothing 6,3 mm na parte superior da armadura de reforço.

Figura 36 – Armadura de reforço das vigas pronta.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.4 Formas para reforço

As formas para moldagem do reforço, confeccionadas com o mesmo material e ferramentas das vigas. A montagem das formas foi feita manualmente com auxílio de parafusos e uma parafusadeira manual, mantendo as medidas internas determinadas com 22 cm x 13,5 cm x 258 cm.

Após a montagem foi aplicado uma resina de silicone nas frestas de ligação e união da forma com a viga, deixando a área de concretagem sem vazamentos para evitar perda de material.

Figura 37 – Forma do reforço.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.5 Grauteamento

Inicialmente pesou-se o material para uso de acordo com a especificação de uso do graute.

Segundo a especificação técnica do fabricante, para cada saco de 25 kg de graute pode-se adicionar 30% de brita zero (3 mm a 7 mm). Diluir 2,9 litros de água por saco de graute, com tempo de aplicação de 30 a 40 minutos após o início da mistura, dependendo da temperatura ambiente.

Figura 38 – Materiais do reforço.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.6 Execução dos corpos de prova

Foram executados quatro corpos de prova para cada betonada, no objetivo de obter parâmetros do traço. Para execução da concretagem adotou-se o seguinte traço para o graute, sendo este para viga 2 e 3:

Tabela 5 – Traço do graute.

TRAÇO DO GRAUTE	
Gr 25: Br 7,5: Ag 2,9	
Slump: 110mm á 160mm	
Graute Supergraute	200 kg
Quartzolit Weber	
Brita Zero	60 kg
Água potável	23,2 kg

Fonte: Autor (2019).

Na concretagem da viga 1, optou para mistura de meio traço evitando desperdício de material.

Para a mistura usou-se o auxílio da betoneira. Seguindo a prescrição do fabricante, inicia com a adição dos 30% de brita zero, 2/3 de água, e em seguida adicionado o graute gradativamente com o restante da água mantendo uma massa

pastosa. Após a adição de todo material foi cronometrado o tempo de 3 a 5 minutos para mistura ficar uniforme.

Retirou-se as porções para moldagem dos CP's, preenchendo os moldes untados conforme feito na dosagem de concreto, porém não foi preciso uso dos golpes de adensamento e Slump Test, devido a propriedade adensável do produto.

Figura 39 – Corpos de prova graute.



Fonte: Autor (2019).

A concretagem foi executada com auxílio de um carrinho de mão para levar até as vigas. O graute lançado com um balde uniformemente até o preenchimento desejado das formas. Não sendo necessário uso do mangote vibrador, devido às propriedades do material. Após as etapas concluídas, iniciou-se o controle da cura úmida do graute até a desforma.

Figura 40 – Grauteamento do reforço.



Fonte: Autor (2019).

5.1.7.7 Desforma dos protótipos reforçados

No decorrer de 4 dias após a concretagem do reforço, houve o desmolde dos protótipos, em seguida feito um acabamento retirando os cantos vivos das vigas com uso de luvas e lixas, facilitando os manuseios posteriores de movimentação dos protótipos.

Figura 41 – Desmolde dos protótipos reforçados.



Fonte: Autor (2019).

5.1.8 ENSAIOS

Ensaio do aço

As barras de aço possuem propriedades oriundas de sua fabricação, e para conhecer o f_y real para o cálculo, ensaiou-se 3 barras de 30 cm à tração de cada bitola, \varnothing 5 mm, \varnothing 6,3 mm e \varnothing 10 mm, o mesmo ensaio serviu para o aço de reforço. Nos quadros a seguir apresenta-se os dados da tensão de escoamento.

Tabela 6 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço bitola \varnothing 5 mm.

Aço CA 50 - \varnothing 5,0 mm				
AMOSTRA	FORÇA MÁXIMA (kgf)	MÉDIA FORÇA MÁXIMA (kgf)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	MÉDIA TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
1	1487,64	1480,61	720,27	718,74
2	1488,70		723,87	
3	1465,50		712,09	

Fonte: Autor (2019).

**Tabela 7 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço
bitola \varnothing 6,3 mm.**

Aço CA 50 - \varnothing 6,3 mm				
AMOSTRA	FORÇA MÁXIMA (kgf)	MÉDIA FORÇA MÁXIMA (kgf)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	MÉDIA TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
1	2482,92	2469,56	723,35	715,91
2	2452,34		702,64	
3	2473,43		721,73	

Fonte: Autor (2019).

**Tabela 8 – Média dos ensaios da tensão de escoamento do aço
bitola \varnothing 10 mm.**

Aço CA 50 - \varnothing 10,0 mm				
AMOSTRA	FORÇA MÁXIMA (kgf)	MÉDIA FORÇA MÁXIMA (kgf)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	MÉDIA TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
1	5157,72	5159,12	555,35	538,40
2	5151,39		527,29	
3	5168,26		532,56	

Fonte: Autor (2019).

Figura 42 – Aço ensaiado para obtenção do f_y real.



Fonte: Autor (2019).

Ensaio do Concreto

Os CP's de concreto foram ensaiados com 31 dias, sendo dois corpos de prova de cada viga para ensaio à compressão. Retirados da imersão de cura, os corpos de prova passaram por retificação, em seguida colocados um a um na máquina para aplicação de carga axial até o rompimento (Tabela 9).

Figura 43 – CP's para ensaio.



Fonte: Autor (2019).

Figura 44 – Ensaio a compressão dos CP's.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 – Média resistência à compressão do Concreto.

Resistência à compressão Concreto (σ =MPa)					
	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Média Total
CP1	30,61	26,60	35,26	32,17	
CP2	33,03	28,60	35,82	35,70	
Média	31,82	27,60	35,54	33,94	32,22

Fonte: Autor (2019).

Ensaio do Graute

Os CP's de graute foram moldados em duas betonadas, sendo 2 CP's para cada betonada, estes ensaiados com 10 dias, sendo dois corpos de prova de cada betonada ensaiados à compressão. Retirados da imersão de cura, os corpos de prova passaram por retificação, em seguida colocados um a um na máquina para aplicação de carga axial até o rompimento. A tabela 10 apresenta os resultados.

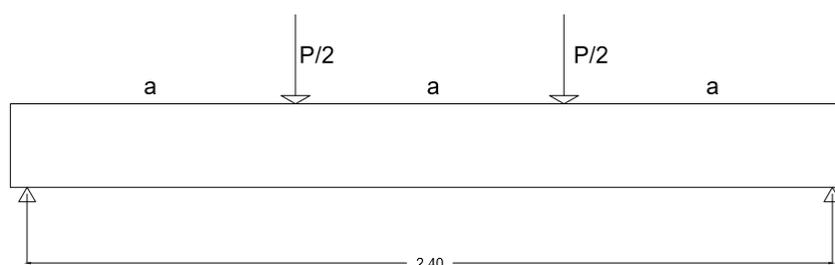
Tabela 10 – Média resistência à compressão do Graute.

Resistência a compressão Graute (σ =MPa)				
	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Média Total
CP1G	64,72	78,37		
CP2G	72,19	74,24		
Média	68,46	76,31		72,38

Fonte: Autor (2019).

5.1.9 ENSAIO DAS VIGAS PELO MÉTODO DE STUTTGART

Inicialmente como citado anteriormente neste trabalho, baseou-se no ensaio de Stuttgart para obtenção do resultado experimental com a viga biapoiada, como ilustra a figura a seguir.

Figura 45 – Ilustração do ensaio de Stuttgart com a viga biapoiada.

Fonte: Autor (2019).

O ensaio com as vigas protótipo envolveu adequações do equipamento para ensaio, colocou-se primeiramente um perfil de seção I no equipamento, alinhado e ajustado, sequencialmente sobre este perfil, foi colocado apoios metálicos equidistantes 240 cm, vão determinado de ensaio das vigas. Em seguida, foi içado as vigas unitariamente e posicionadas sobre esses apoios com o auxílio do guincho hidráulico. Durante o andamento do ensaio, a viga vai recebendo um carregamento uniforme de dois apoios metálicos superiores ligados ao macaco hidráulico. A máquina pneumática utilizada para os ensaios foi a EMIC GR048 (Figura 46), com capacidade máxima de 300 kN (30.000 kgf), permite ensaios à compressão e à tração do aço.

Figura 46 – Viga testemunho sem reforço posicionada para ensaio.



Fonte: Autor (2019).

Figura 47 – Viga testemunho reforçada posicionada para ensaio.



Fonte: Autor (2019).

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apresenta-se a seguir os resultados dos ensaios experimentais dos protótipos de viga de concreto armado.

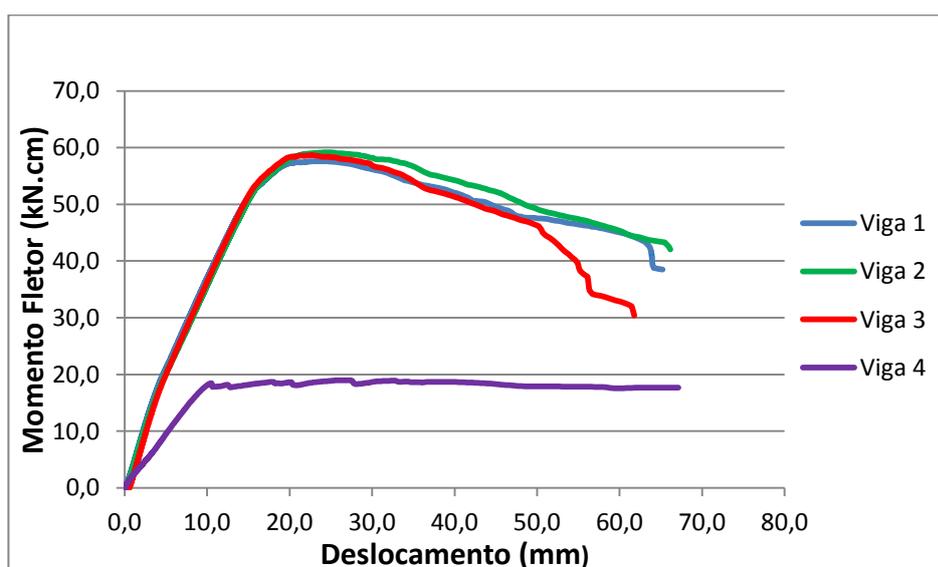
A viga testemunho sem reforço atingiu sua capacidade máxima com 47,47 kN de carga, a viga 1 reforçada obteve 144,0 kN de capacidade, a viga 2 reforçada atingiu 148,0 kN e a viga 3 reforçada atingiu 146,6 kN de capacidade resistente. Os resultados podem ser avaliados na Tabela 11.

Tabela 11 – Força máxima resistida pelas vigas.

Amostras	Força de Ruptura Experimental (kgf)	Força de Ruptura Experimental Média (kgf)	Momento Fletor (kN.cm)
Viga 1 - Reforçada	14400	14620	5762
Viga 2 - Reforçada	14800		5919
Viga 3 - Reforçada	14660		5864
Viga 4 - Sem Reforço	4747	4747	1899

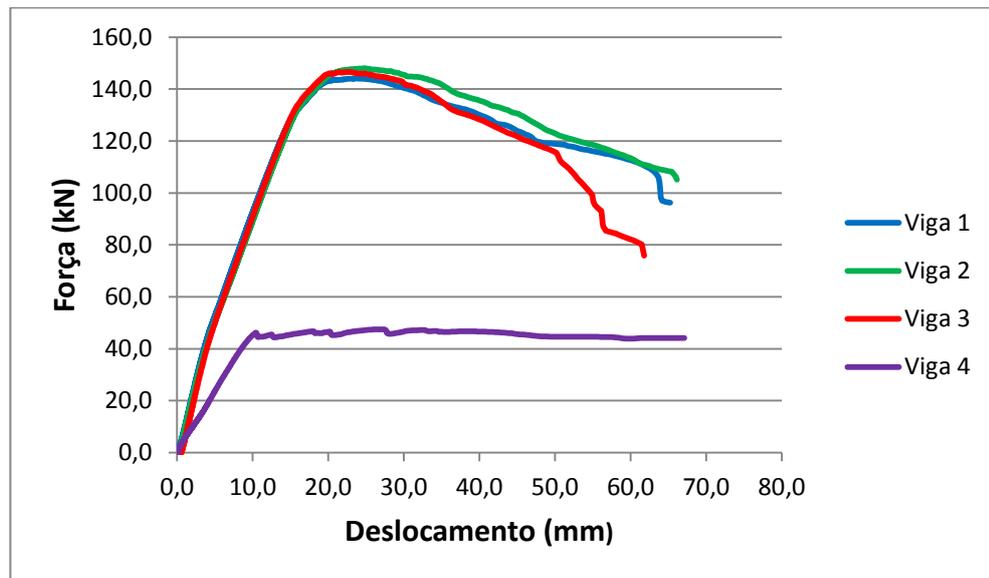
Fonte: Autor (2019).

Figura 48 – Diagrama Momento Fletor x Deslocamento



Fonte: Autor (2019).

Figura 49 – Diagrama Força x Deslocamento



Fonte: Autor (2019).

6.2 RESULTADOS E CÁLCULOS TEÓRICOS

Como definido anteriormente, dimensionamento da viga teve como justificativa uma readequação de estrutura para distribuição de cargas maiores em função de sua utilidade. Para essa comparação calculou-se a carga e momento estimado de ruptura usando método de Appleton.

Cálculo teórico da Viga 4 testemunho sem reforço.

- Momento estimado de ruptura

$$R_{cc} = R_{st}$$

$$0,8 \times X \times b_w \times f_{cm} = A_s \times f_{ym}$$

$$0,8 \times X \times 14 \text{ cm} \times 3,22 \text{ kN/cm}^2 = (2 \times 0,785 \text{ cm}^2) \times 53,84 \text{ kN/cm}^2$$

$$36,064X = 84,53$$

$$X = 2,344 \text{ cm}$$

$$d = h - (\text{cobrimento} + \text{estribo} + 0,5 \times \text{Armad. Long.})$$

$$d = 25 \text{ cm} - (2,5 \text{ cm} + 0,5 \text{ cm} + 0,5 \times 1,0 \text{ cm})$$

$$d = 21,5 \text{ cm}$$

$$M_{est, \text{rup.}} = 0,8 \times X \times b_w \times f_{cm} \times (d - 0,4 \times X)$$

$$M_{est, \text{rup.}} = 0,8 \times 2,344 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 3,22 \text{ kN/cm}^2 \times (21,5 \text{ cm} - 0,4 \times 2,344 \text{ cm})$$

$$M_{est, rup.} = 1738,22 \text{ kN.cm}$$

- Carga estimada de ruptura

$$\frac{P}{2} = \frac{M_{est, rup}}{l/3}$$

$$\frac{P}{2} = \frac{1738,22 \text{ kN.cm}}{80 \text{ cm}}$$

$$\frac{P}{2} = 21,73$$

$$P = 43,46 \text{ kN}$$

$$P = 4346,0 \text{ kgf}$$

Momento Fletor que a viga sem reforço suporta apenas com adição de aço na flexão:

$$X/d \leq 0,45$$

$$X = 0,45 \times 21,5 \text{ cm}$$

$$X = 9,675 \text{ cm}$$

Ou seja (de 21,5 cm, 9,675 cm é a área comprimida acima da LN)

$$M_{est, rup. \text{ Esmag.}} = 0,8 \times X \times b_w \times f_{cm} \times (d - 0,4 \times X)$$

$$M_{est, rup. \text{ Esmag.}} = 0,8 \times 9,675 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 3,22 \text{ kN/cm}^2 \times (21,5 \text{ cm} - 0,4 \times 9,675 \text{ cm})$$

$$M_{est, rup. \text{ Esmag.}} = 6151,45 \text{ kN.cm}$$

Cálculo teórico da Viga com reforço.

- Momento estimado de ruptura

$$R_{cc} = R_{st}$$

$$R_{cc} = A_{si} + A_{sr}$$

$$0,8 \times X \times b_w \times f_{cm} = (A_{si10.0} \times f_{ym}) + (A_{sr6.3} \times f_{ym}) + (A_{sr10.0} \times f_{ym})$$

$$0,8 \times X \times 14 \text{ cm} \times 3,22 \text{ kN/cm}^2 = (2 \times 0,785 \text{ cm}^2 \times 53,84 \text{ kN/cm}^2) + (2 \times 0,312 \text{ cm}^2 \times 71,6 \text{ kN/cm}^2) + (3 \times 0,785 \text{ cm}^2 \times 53,84 \text{ kN/cm}^2)$$

$$36,064X = 256$$

$$X = 7,1 \text{ cm}$$

$$Z_{eq} = \frac{\sum A_s \times d}{\sum A_s}$$

$$Z_{eq} = \frac{(2 \times 0,312) \times 9,315 + (2 \times 0,785) \times 9,5 + (3 \times 0,785) \times 3,5}{(2 \times 0,312) + (2 \times 0,785) + (3 \times 0,785)}$$

$$Z_{eq} = \frac{5,812 + 14,915 + 8,2425}{0,624 + 1,57 + 2,355} = 6,37 \text{ cm}$$

$$dm = h - Z_{eq}$$

$$dm = 31 \text{ cm} - 6,37 \text{ cm}$$

$$dm = 24,63 \text{ cm}$$

$$M_{est, \text{rup.}} = 0,8 \times X \times b_w \times f_{cm} \times (dm - 0,4 \times X)$$

$$M_{est, \text{rup.}} = 0,8 \times 7,1 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 3,22 \text{ kN/cm}^2 \times (24,63 \text{ cm} - 0,4 \times 7,1 \text{ cm})$$

$$M_{est, \text{rup.}} = 5579,43 \text{ kN.cm}$$

Obs: No caso de reforço por encamisamento de vigas, o Eurocode (EC8) recomenda usar um coeficiente de Monolitismo ($\gamma_{n,m} = 0,9$ para resistência, e $\gamma_{n,k} = 0,85$ para deformabilidade), a favor da segurança para obter o resultado de cálculo de projeto. Aqui nesta situação não foi usado, pois o objetivo é obter o Momento estimado de Ruptura.

$$X/d \leq 0,45$$

$$X = 0,45 \times 21,5 \text{ cm}$$

$$X = 9,675 \text{ cm}$$

$$61,12 \text{ kN.cm}^2 \times 1,57 \text{ cm}^2 + 26,50 \text{ kN.cm}^2 \times 2 \text{ cm}^2$$

$$Z_i = (d - 0,4 \times X)$$

$$Z_i = (21,5 \text{ cm} - 0,4 \times 9,675 \text{ cm})$$

$$Z_i = 17,63 \text{ cm}$$

$$X/d \leq 0,45$$

$$X = 0,45 \times 27,5 \text{ cm}$$

$$X = 12,38 \text{ cm}$$

$$Z_r = (d - 0,4 \times X)$$

$$Z_r = (27,5 \text{ cm} - 0,4 \times 12,38 \text{ cm})$$

$$Z_r = 22,548 \text{ cm}$$

$$M_{est, \text{rup.}} = (A_{s10.0} \times f_{ym} \times Z_i) + (A_{s6.3} \times f_{ym} \times Z_i) + (A_{s10.0} \times f_{ym} \times Z_r)$$

$$Mest, rup. = (2 \times 0,785 \text{ cm}^2 \times 53,84 \text{ kN/cm}^2 \times 17,63 \text{ cm}) + (2 \times 0,312 \text{ cm}^2 \times 71,6 \text{ kN/cm}^2 \times 17,63 \text{ cm}) + (3 \times 0,785 \text{ cm}^2 \times 53,84 \text{ kN/cm}^2 \times 22,548 \text{ cm})$$

$$Mest, rup. = 5136,43 \text{ kN.cm}$$

- Carga estimada de ruptura

$$\frac{P}{2} = \frac{Mest, rup}{l/3}$$

$$\frac{P}{2} = \frac{5579,43 \text{ kN.cm}}{80 \text{ cm}}$$

$$\frac{P}{2} = 68,993 \text{ kN}$$

$$P = 137,99 \text{ kN} \times 100$$

$$P = 13799,0 \text{ kgf}$$

A tabela 12 resume os resultados estimados de ruptura.

Tabela 12 – Resultado estimado de ruptura das vigas.

Amostras	Ruptura calculada (kgf)	Momento (kN.cm)
Viga 1 - Reforçada	13799,0	5579,43
Viga 2 - Reforçada		
Viga 3 - Reforçada		
Viga 4 - Sem Reforço	4346,0	1738,22

Fonte: Autor (2019).

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Verificando as imagens da Viga 4 (testemunho) feitas durante os ensaios, pode-se observar que várias fissuras se formaram na região de flexão da viga de concreto, ocorrendo o escoamento da armadura de flexão e um pequeno esmagamento do concreto na parte superior comprimida. A armadura de flexão não rompeu até o final do ensaio, e o cortante como estimado no cálculo, permaneceu sem apresentar danos.

A carga suportada por essa viga foi de 47,47 kN, e sua flecha foi de 27,25 mm.

Figura 50 – Viga 4 testemunho rompida.



Fonte: Autor (2019).

Figura 51 – Detalhe viga 4 testemunho rompida.



Fonte: Autor (2019).

A viga 1 reforçada teve o comportamento e deformação obtendo uma perfeita aderência na ligação na interface do concreto da viga com o graute do reforço. Ocorrendo a transferência de cargas perpendiculares verticais da flexão do reforço para a parte superior da viga, esmagando o concreto na parte comprimida acima da linha neutra, e ocorrendo a flambagem da armadura longitudinal superior de 6,3 mm. A Viga 1 teve sua capacidade portante de 144,0 kN e flecha de 23,73 mm.

Figura 52 – Rompimento viga 1 reforçada.



Fonte: Autor (2019).

A ilustração abaixo pode-se observar o trabalho em conjunto da estrutura no decorrer do ensaio, atingindo a força máxima resistida no início do esmagamento, e as fissuras passando do reforço para viga atingindo a linha neutra, não sofrendo descolamento do graute com o concreto da viga.

Figura 53 – Detalhes do rompimento viga 1 reforçada.





Fonte: Autor (2019).

A viga 2 reforçada teve o mesmo comportamento e deformação mencionada na Viga 1. Esta também apresentou flambagem da armadura longitudinal superior

durante o esmagamento do concreto; A Viga 2 teve sua capacidade portante de 148,0 kN e flecha de 24,7 mm.

Figura 54 – Rompimento viga 2 reforçada.



Fonte: Autor (2019).

Figura 55 – Detalhe do rompimento viga 2 reforçada.



Fonte: Autor (2019).

A viga 3 reforçada teve o comportamento e deformação mencionada na Viga 1 e 2, sendo sua capacidade portante de 146,6 kN e flecha de 22,66 mm.

Figura 56 – Rompimento viga 3 reforçada.



Fonte: Autor (2019).

Figura 57 – Detalhe do rompimento viga 3 reforçada.



Fonte: Autor (2019).

Na tabela a seguir, pode-se analisar que o resultado teórico do Momento Estimado e Ruptura da Viga 4 sem reforço, ficou abaixo do resultado real do ensaio. O mesmo ocorreu com o resultado teórico de Momento Estimado e Ruptura das

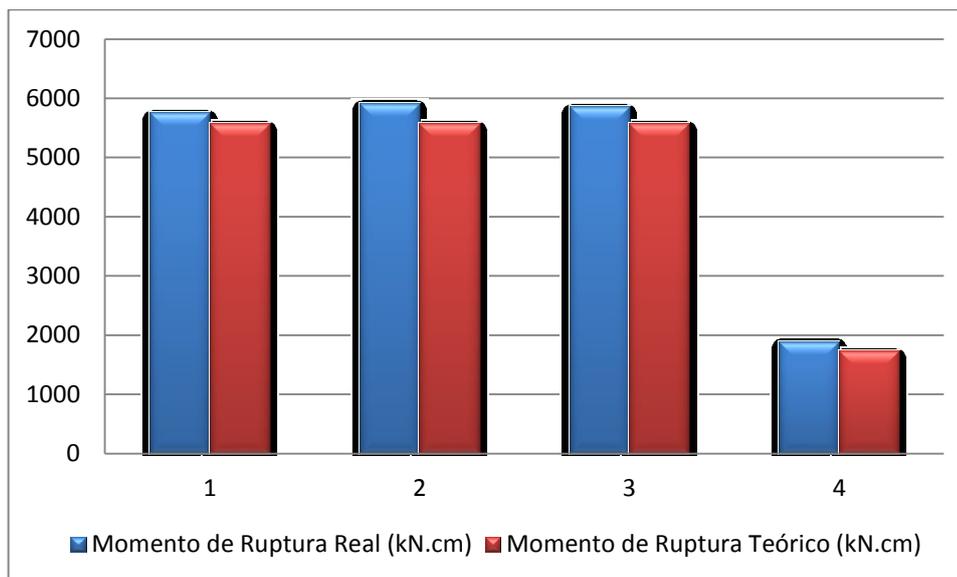
Vigas 1, 2 e 3 com reforço, teve um resultado inferior ao do ensaio Experimental, mas bem próximo.

Tabela 13 – Comparação Teórico x Experimental.

Amostras	Resultado Experimental			Resultados Teóricos	
	Força de Ruptura Experimental (kgf)	Força de Ruptura Experimental Média (kgf)	Momento Fletor Experimental (kN.cm)	Força de Ruptura Calculada (kgf)	Momento Fletor Calculado (kN.cm)
Viga 1 - Reforçada	14400	14620	5762	13799	5579,43
Viga 2 - Reforçada	14800		5919		
Viga 3 - Reforçada	14660		5864		
Viga 4 -Sem Reforço	4747	4747	1899	4346	1738,22

Fonte: Autor (2019).

Durante o dimensionamento, fez-se uma estimativa de ruptura da viga usando apenas adição de armadura e aumento de seção na região de flexão, ou seja, sem aumento da seção de concreto acima da linha neutra. O cálculo de Momento Fletor Estimado teve resultado satisfatório de 5579,43 kN.cm, próximos ao das vigas reforçadas. Os protótipo romperam por esmagamento do concreto, e a média do Momento Fletor Experimentos das vigas reforçadas ficou 5848,33 kN.cm, sendo assim, o Momento de Ruptura Experimental teve uma diferença de 268,9 kN.cm a mais que o Momento Fletor Teórico.

Figura 58 – Análise Teórica x Análise Experimental.

Fonte: Autor (2019).

Assim pode-se analisar a diferença em percentual das vigas reforçadas. Todas relativas ao ensaio experimental tiveram um resultado superior ao resultado de cálculo. No entanto a viga 1 teve 3,27% mais eficiência que o resultado teórico, a viga 2 ficando com 6,09% mais eficiência e a viga 3 com 5,10% de eficiência maior que o resultado teórico. Sendo um acréscimo médio de 4,82% superior do ensaio experimental perante resultado teórico.

Portanto, as vigas reforçadas tiveram um acréscimo médio de 307,98% de suporte de carga comparado à viga sem reforço.

8 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Presente trabalho teve grande importância para avaliação e comprovação teórica. Embasado em análise teórica e experimental, a técnica por encamisamento de vigas de concreto armado torna-se um pouco mais trabalhosa que os demais métodos, em função da mão de obra de execução e cura do concreto, mas apresenta uma eficiência considerável para diversos usos.

O método teve como base um suposto reforço de estrutura, isso ocorre quando a obra foi executada e houve um replanejamento de adequação de cargas. Neste experimento, foram confeccionados quatro protótipos de viga de concreto armado, sendo um sem reforço e três com reforço. Em análise prévia, fez-se o levantamento dos materiais que seriam empregados na confecção, e também uma breve análise teórica de dimensionamento baseando-se na NBR 6118:2014, prevendo uma carga aproximada de capacidade resistente, de modo a ter certeza que a carga ficasse abaixo de 300 kN capacidade de ensaio da máquina hidráulica.

Na sequência foram confeccionados os protótipos usando como base NBR: 6118:2014 e bibliografia, que desenvolveram técnicas de reforço nessa área de estudo. Em seguida colocou-se os protótipos um a um na prensa hidráulica, e através do ensaio de Stuttgart obteve-se os resultados dos protótipos ao final do rompimento. Todas as amostras físicas reforçadas romperam por esmagamento do concreto na flexão. No mesmo instante usou-se os parâmetros de ensaio dos materiais, aço, concreto e graute, fez-se o dimensionamento dos protótipos teoricamente de modo a comparar o modelo de cálculo com o ensaio experimental.

Conclui-se que, a técnica de reforço de vigas de concreto armado à flexão por meio de encamisamento aumenta a capacidade de carga significativamente, mostrando ser uma técnica viável e de ganho significativo de resistência ao elemento reforçado. Seguindo o procedimento executivo adotado, respeitando a sequência e precisão nos detalhes, teve-se contribuição para os resultados.

As vigas reforçadas apresentaram uma média de 4,82% de carga acima dos resultados teóricos, e a amplitude média de capacidade portante das vigas com reforço chegou a 307,98% superior a viga testemunho sem reforço.

O método de cálculo foi perfeitamente viável de ser aplicado, pois reproduziu valores com segurança, abaixo do resultado dos ensaios, mostrou ser confiável e a favor da segurança não necessitando o uso do coeficiente de Monolitismo γ_n, R

= 0,9 para resistência (Momento fletor). Contribuindo com o estudo acadêmico e fins de dimensionamento de projeto, servindo para reabilitações bem como para soluções patológicas das vigas de concreto armado.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the design and construction of externally bonded systems for strengthening concrete structures - ACI 440.2R, 2002.

CÁNOVAS, M. F. Patologia e Terapia do Concreto Armado. São Paulo, Pini, 1988.

CEB - Comité Euro-International du Béton. Durability of Concrete Structures. CEB-RILEM International Workshop - Final Report, N° 152, 1983.

DONIN, C. Patologias das Estruturas de Concreto. Notas de aula do curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, 2015.

GERDAU, Aço para construção civil, 2018, disponível em:

<file:///C:/Users/Usuario/Documents/ENGENHARIA%20CIVIL%20UNISC/13%C2%BA%20SEMESTRE/TCC%20-%20TRABALHO%20DE%20CURSO%2001/Artigos%20refor%C3%A7o%20Internet/GERDAU/Catalogo%20Construcao%20Civil.pdf>. Acesso em: 05 Out. 2018).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 7007: Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral. Rio de Janeiro ABNT, 2002.

_____. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro ABNT, 2007.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

GOMES Augusto; APPLETON Júlio. Reforço de estruturas de Betão Armado por Encamisamento das secções. Revista Portuguesa de engenharia de Estruturas (RPEE) N.º42, 1997. Disponível em:
<<http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/RN11.pdf>>. Acesso em: 15Set. 2018.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de aço: Dimensionamento prático. 8ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2009.

PORTAL DO CONCRETO, disponível em:
<<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/fibra.html>>. Acesso em: 06Out. 2018.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. 1ª ed. São Paulo, Pini, 1998.

TECHNÉ, Graute: microconcreto ou argamassa?, 2017, disponível em:
<<https://techne.pini.com.br/2017/03/graute-microconcreto-ou-argamassa/>>. Acesso em: 22Out. 2018.

THOMAZ, E. *Trincas em Edifícios. Causas, Prevenção e Recuperação*. 1ª ed. São Paulo, Pini, 1989.

VIAPOL, Manual fibra de carbono, 2018, disponível em:
<<http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 05Out. 2018.