

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO COM O USO DE CHAPAS DE AÇO COLADAS
COM RESINA EPÓXI: UMA ANÁLISE QUALITATIVA**

Guaratinguetá
Dezembro de 2011

JOÃO VICTOR NEVES LUIZON

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO COM O USO DE CHAPAS DE AÇO COLADAS
COM RESINA EPÓXI: UMA ANÁLISE QUALITATIVA**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

Campus da Unesp de Guaratinguetá
Dezembro de 2011

L953e	<p>Luizon, João Victor Neves Estudo da eficiência de reforços estruturais em vigas de concreto armado com o uso de chapas de aço coladas com resina epóxi: uma análise qualitativa / João Victor Neves Luizon – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 69 f. : il. Bibliografia : f. 68 - 69</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni</p> <p>1.Concreto 2. Aço 3. Estrutura I. Título</p>
-------	---

CDU 691.32



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REFORÇOS ESTRUTURAIS EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO COM O USO DE CHAPAS DE AÇO
COLADAS COM RESINA EPÓXI: UMA ANÁLISE QUALITATIVA**

JOÃO VICTOR NEVES LUIZON


ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

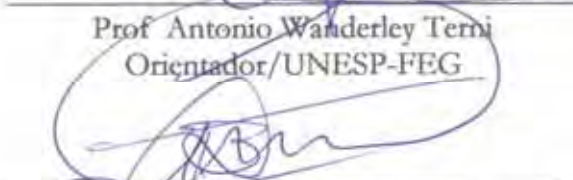
PROGRAMA: ENGENHARIA CIVIL
ÁREA: ESTRUTURAS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões
Chefe do Departamento

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Antonio Wanderley Terri
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. José Bento Ferreira
UNESP/FEG


Prof. Dr. Cleiton Manfredini
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou, me deu educação e princípios tornando-me a pessoa que sou hoje e permitindo que eu chegasse onde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por me dar força e saúde para vencer mais esse importante desafio.

aos meus pais Eleuse Helena Freiria Neves e Alcione Valeriano Luizon, por todo carinho, compreensão e esforço, sempre ao meu lado acompanhando e compartilhando os momentos difíceis e felizes com muito amor, me aconselhando e me apoiando.

aos meus irmãos Giovanna Neves Luizon e Gustavo Valeriano Neves Luizon que sempre estiveram ao meu lado, mesmo que distantes, me dando força para seguir até o fim.

aos meus amigos, Gustavo Ré Franguelli, Charles Agostinho da Costa, Frederico Gorla, Fábio M. Bittencourt Lima, Felipe Ribeiro Carlos e a todos os moradores da República Amoribunda que estiveram comigo nesses 5 anos me ajudando sempre que precisei e tornando esse período de graduação a melhor fase da minha vida.

aos meus amigos da turma de formandos 2011 de engenharia civil por terem compartilhado comigo toda a trajetória nesses 5 anos de graduação.

ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni, pelos conhecimentos a mim passados e por ter me orientado permitindo concluir esse trabalho.

SUMÁRIO

1. Introdução	15
2. Objetivo	16
3. Revisão Bibliográfica	16
3.1. Concreto	17
3.1.1. Tipos de aglomerantes	17
3.2. Areia	21
3.3. Brita	21
3.4. Aço	22
3.5. Resina epóxi	23
4. Flexão em Vigas	25
4.1. Flexão	26
4.2. Mecanismos de ruptura na flexão simples (Ensaio de Stuttgart)	31
4.2.1. Estádio I	32
4.2.2. Estádio II	33
4.2.3. Tipos de Ruptura	34
5. Tensão x Deformação	37
5.1. Diagramas Tensão x Deformação	37
6. Ensaio Desenvolvido	38
6.1. Método de C&novas (1988)	39
6.2. Rotina de cálculo para o método de C&novas	41
7. Procedimentos do ensaio	41
7.1. Materiais utilizados	42
7.2. Procedimentos para a construção das vigas e reforços	46
7.2.1. Construção das vigas	47
7.2.2. Procedimentos para a execução do reforço	48
7.3. Ensaio de carga	52
7.3.1. Corpos de prova	52
7.3.2. Vigas	52
8. Resultados e discussões	55
8.1 Corpos de prova	56
8.2 Vigas	56

8.2.1 Vigas sem reforço.....	56
8.2.1.1 Comentários.....	57
8.2.2 Vigas Reforçadas	60
8.2.2.1 Comentários.....	60
9. Conclusão	64
10. Referências Bibliográficas.....	66

Figuras

- Figura 1: Flecha de uma viga carregada
- Figura 2: Viga Armada
- Figura 3: Fissuração de uma viga armada
- Figura 4: Esforços internos em uma viga
- Figura 5: Tensões e deformações de uma viga armada
- Figura 6: Tensões e Deformações de uma viga reforçada
- Figura 7: Diagramas de cortante e momento fletor
- Figura 8: Carregamento para o ensaio de Stuttgart
- Figura 9: Tensões principais do estádio I
- Figura 10: Fissuras no estádio II
- Figura 11: Linhas de tensões atuantes na viga
- Figura 12: Tipos de Fissuração
- Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação do concreto
- Figura 14: Diagrama Tensão x Deformação do aço
- Figura 15: Forma para viga 5x10x200
- Figura 16: CP II - F 32
- Figura 17: Areia
- Figura 18: Brita
- Figura 19: Barras de aço CA-50
- Figura 20: Chapas de Aço
- Figura 21: Ensaio de tração da chapa
- Figura 22: Resina epóxi Compound Vedacit
- Figura 23: Preparação do concreto
- Figura 24: Vigas concretadas
- Figura 25: Corpos de prova concretados
- Figura 26: Diagrama Resistência x Espessura de adesivo
- Figura 27: Aplicação da resina epóxi
- Figura 28: Local de colagem das chapas.
- Figura 29: Corpos de Prova após 28 dias
- Figura 30: Prensa
- Figura 31: Dispositivo de cargas concentradas

Figura 32: Diagramas de cortante e momento fletor

Figura 33: Viga pronta para ensaio

Figura 34: Viga nº1 Rompida

Figura 35: Viga nº1 Rompida

Figura 36: Esquema de ruptura da viga nº1.

Figura 37: Viga nº2 Rompida

Figura 38: Esquema de ruptura da viga nº2

Figura 39: Viga reforçada nº1 rompida

Figura 40: Esquema de ruptura da viga nº1

Figura 41: Viga reforçada nº 2 rompida

Figura 42: Esquema de ruptura da viga nº2

Figura 43: Viga reforçada nº 3 rompida

Figura 44: Esquema de ruptura da viga nº3

LISTA DE SIMBOLOS

- **Letras Romanas Maiúsculas**

P: Carga Concentrada.

Ar: Área da chapa de aço.

Zs: Braço do cobaricentro das armaduras existentes e a chapa.

A: Área inicial de aço.

Z1: braço de alavanca da armadura inicial devido Mg;

Mt: Momento total;

Mi: Momento inicial;

Ma: Momento acrescido;

Rcd: Valor de cálculo dos esforços resistentes do concreto;

Rsd: Valor de cálculo dos esforços resistentes do aço;

- **Letras Romanas Minúsculas**

bw: Largura da viga;

fck: Resistência característica do concreto;

fcd - resistência de cálculo do concreto à compressão;

fyk: Resistência característica do aço;

fyrk: Resistência característica do reforço;

x - Altura da zona comprimida; Altura da linha neutra;

- **Letras Gregas Minúsculas**

σ_s : Tensão de tração do aço.

σ_{sr} : Tensão de tração do reforço;

σ_{ci} : Tensão inicial do concreto.

σ_{si} : Tensão inicial do aço.

σ_{ca} : Tensão acrescida no concreto

σ_{sr} : Tensão de tração do reforço.

γ_c : Coeficiente de cálculo do concreto;

γ_s : Coeficiente de cálculo do aço;

ϵ_{cd} : Deformação

ϵ_{si} : Deformação inicial do aço.

ϵ_{ci} : Deformação inicial do concreto.

LUIZON, J. V. N. **Estudo da eficiência de reforços estruturais em vigas de concreto armado com o uso de chapas de aço coladas com resina epóxi: uma análise qualitativa.** 2011. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Na engenharia civil uma estrutura é a sustentação de toda obra e, portanto, é importante que se mantenha intacta por toda a vida útil. Uma obra de engenharia civil deve durar décadas sem perder sua funcionalidade. Entretanto a finalidade pode ser alterada e muitas vezes a estrutura inicial passa a não atender a necessidade da nova utilização. Ainda, em novas construções a funcionalidade é alterada devido a possíveis falhas na execução e a estrutura invariavelmente não atinge as necessidades de solicitação desejada. Em casos como esses as soluções geralmente adotadas são, basicamente, a demolição seguida da reconstrução dos moldes desejados ou então o reforço estrutural. Esta segunda opção por muitos anos não foi aplicada devido a certos fatores como o alto custo de implantação, utilização de técnicas inadequadas de execução do reforço e a cultura do próprio meio quanto a sua utilização e, neste caso, a opção recaía na reconstrução.

Ao longo dos anos algumas técnicas foram desenvolvidas para se executar reforços estruturais com baixo custo e de forma eficiente.

Uma técnica interessante, rápida, eficaz e econômica é o reforço estrutural através de chapas metálicas coladas com resina epóxi que pode ser aplicada em vigas, lajes e pilares.

No presente trabalho é estudado o diferente comportamento de vigas reforçadas utilizando esta técnica.

O aço é um material bastante recomendado para os reforços devido às suas características quanto à resistência a tração, compressão e a eficiência da técnica em relação a seu custo.

Para a colagem recomenda-se o uso de resina epóxi, pois permite a união dos materiais, no caso o aço e o concreto. A eficiência desta união é consideravelmente elevada que raramente se produz alguma falha de aderência e normalmente quando ocorre é devido a problemas na execução e não na união dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto, aço, resina epóxi, estrutura

LUIZON, J. C. N. **Efficiency study of structural reinforced concrete beams with metal plates bonded with epoxy resin: Qualitative analysis.** 2011. 69 f. Thesis (Graduation in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

In civil engineering, a structure is the whole sustainment of a construction and, thus, it is important that it remains intact throughout its lifetime. An engineering construction must last for decades without losing its functionality. However its purpose may be altered and several times the original structure does not meet the new needs of use. Still, in new buildings, the functionality is altered due to possible flaws in execution and the structure, invariably does not reach the desired solicitation needs. In cases like this, the commonly adopted solutions are, basically, the demolishment followed by the reconstruction of the desired mold or the structural reinforcement. This second option, for long years, has not been put to practice due to certain factors such as the high costs for its implantation, use of inadequate reinforcement execution techniques, and the culture of people involved in the area regarding its use and, in this case, the option would always be the reconstruction.

Thoughtout the years, some techniques were developed to allow the execution of structural reinforcements with low costs and in efficient ways.

An interesting, fast, efficient and economical technique is the structural reinforcement through metal sheets put together with epoxy resin that can be applied in beams, slabs and pillars.

In the present work the different behavior of beams reinforced with this technique. Steel is a very recommended material for these reinforcements due to its characteristics related to traction, compression and the effectiveness of the technique related to its cost. For the attachment the epoxy resin is recommended, since it allows the joining of two materials, in this case, steel and concrete. The efficiency of this union is so

considerably high that it rarely produces any flaws in adherence and, normally, when it happens it is due to problems in the execution process, not in the union of materials.

KEYWORDS: Concrete, steel, epoxy resin, structure

1. Introdução

A engenharia civil é uma das mais antigas profissões e tem se desenvolvido conforme o passar das décadas tanto na melhoria de técnicas e procedimentos como no desenvolvimento de materiais de melhor qualidade.

Do ponto de vista das estruturas, há a preocupação precípua com a sustentação das obras considerando todo e qualquer tipo de parâmetro como sua forma de utilização, incidência do vento, composição do solo entre outras, que possa suscitar alguma tensão para análise da estrutura, visando, por fim, a maior durabilidade e uma solução economicamente viável.

Desde o início, muitos foram os materiais estruturais utilizados na construção civil até a proposta de utilização do concreto armado.

As estruturas de concreto armado são muito utilizadas por proporcionar alta resistência além de fácil trabalhabilidade a um custo baixo.

O concreto armado pode ser obtido em diversos valores de resistência de acordo com o tipo de aglomerante e traço utilizado.

Porém, não é possível se projetar uma estrutura sem antes estabelecer-se sua finalidade de uso. Assim é possível definir os parâmetros para se fazer a avaliação da solicitação que a estrutura deve suportar. Contudo, devido a possibilidade de ocorrência de más avaliações quando do cálculo, nos procedimentos de execução, degradação ou até alteração de finalidade, muitas vezes a demolição e reconstrução é inviável e, desta forma, o reforço estrutural passa a ser uma interessante opção. Com o gradativo aumento de sua aplicação nas estruturas, tem ganhado importância no cenário estrutural sob os aspectos do desenvolvimento tecnológico, de materiais empregados e viabilidade de custos.

As técnicas de reforços estruturais se desenvolveram bastante nas últimas décadas tornando-se uma alternativa de baixo custo e fácil execução solucionando os problemas mais críticos relacionados a estruturas.

O reforço através de chapas coladas com resina epóxi em vigas permite a recomposição das áreas de armaduras danificadas por corrosão devido a exposição ao meio ambiente, complementar um possível erro de projeto e execução de uma estrutura deficiente, recuperar a estrutura danificada por algum choque mecânico, ou então proporcionar a possibilidade de aumento da capacidade de carga da estrutura para alguma mudança de sua finalidade.

A chapa funciona como uma armadura adicional externa aumentando a capacidade de resistência à tração da estrutura sem grandes mudanças na geometria da peça.

O presente estudo tem como objetivo apresentar, num primeiro instante, de maneira qualitativa, qual o possível ganho de resistência utilizando o reforço com chapas de aço coladas com resina epóxi através de ensaios realizados em laboratórios comparando ganhos de resistência de vigas de mesma seção transversal sem armação, com armação e com armação reforçada com chapas coladas.

2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar a metodologia e constatar a eficiência de reforços em vigas de concreto através da colagem de chapas metálicas com resina epóxi e propor seu dimensionamento do reforço através da formulação de Cânovas. Analisando os ganhos de capacidade de carga bem como as fissurações observadas nos ensaios.

3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a execução do reforço estrutural bem como as características estruturais principais de cada um deles. Basicamente são três os materiais utilizados no procedimento, quais sejam, o concreto, o aço e a resina epóxi.

3.1 Concreto

O *concreto* é um composto formado por aglomerante, geralmente o cimento Portland, areia, brita e água podendo ser adicionado alguns aditivos também para aumentar a velocidade do ganho de resistência.

A resistência do concreto esta diretamente ligada à proporção de cada um desses materiais

Essa relação de quantidades é conhecida como *traço* e varia de acordo com o tipo de cimento utilizado e com a resistência final que se deseja obter.

O aglomerante em contato com a água inicia uma reação química que causa a cristalização do material e juntamente com a areia e a brita resulta em um concreto com alta resistência a compressão. Esse processo de cristalização inicia-se por volta de 2 horas e 30 minutos após a mistura da água e admite-se que o composto adquire sua resistência final aos 28 dias após o início da cristalização.

O *concreto* possui características como ótima trabalhabilidade podendo ser moldado em várias formas de acordo com a necessidade de cada obra e isso ocasionou na sua utilização em massa tornando-se o segundo material mais utilizado pelo ser humano perdendo apenas para a água.

3.1.1 Tipos de aglomerantes

Cimento Portland foi o nome dado por Joseph Aspdin ao pó de cimento originados da queima de pedras calcárias e argila que ao entrar em contato com a água se torna uma pasta homogênea capaz de endurecer e obter alta resistência não se dissolvendo ao entrar em contato novamente com a água.

A nomenclatura desenvolvida para os tipos de cimento seguem um padrão onde após a sigla CP (Cimento Portland) se determina a classe do cimento (I, II, III, IV, V) e sua resistência (25, 32, 40) garantida pelo fabricante em mega pascal (MPa).

Atualmente, muitos tipos de cimento são desenvolvidos a fim de atender as necessidades de cada obra e de acordo com o ambiente onde estão situadas. São eles:

a. CP I – Cimento portland comum:

O CP-I é o tipo mais comum de cimento Portland e deve ser utilizado em obras que não possuam ambientes agressivos ao concreto não estando em contato com água do mar, águas subterrâneas, esgotos ou qualquer outra substância com presença de sulfato. O CP-I possui apenas a adição de gesso (cerca de 3%) em sua composição o que também existe em todos os outros tipos de cimento, a ação do gesso faz retardar o início da pega evitando o início imediato da reação de hidratação. O cimento portland I acabou sendo utilizado como referência para o desenvolvimento dos demais tipos de cimento existentes e utilizado como comparativo de características para os cimentos desenvolvidos posteriormente.

b. CP II – Cimento Portland II

Pode ser encontrado em três diferentes formas:

b.1. CP II – E:

Além de sua composição básica possui o acréscimo de escória granulada de alto-forno fazendo com que esse cimento tenha

baixo calor de hidratação. É recomendado para estruturas que necessitem de desprendimento de temperatura mais lenta.

b.2. CP II – Z:

Ideal para obras subterrâneas e marítimas, pois possui a adição de material pozolânico causando a baixa permeabilidade.

b.3. CP II – F:

Possui adição de material carbonático sendo recomendado para desde estruturas de concreto armado a assentamento de revestimentos, porém não deve ser utilizado em ambientes agressivos.

c. CP III – Cimento Portland de alto-forno

O CP III contém adição de escória (35% a 70%) proporcionando ao cimento um baixo desprendimento de calor, baixa permeabilidade e alta durabilidade sendo ideal para obras de grande porte e em ambientes agressivos além de estruturas de concreto armado ou protendido e para assentamento de revestimentos.

d. CP IV – Cimento Portland Pozolânico

O CP IV possui adição de pozolana (15% a 50%) o que proporciona uma baixa permeabilidade e com isso alta durabilidade, apresenta resistência mecânica superior ao cimento comum e é recomendado para o uso em ambientes agressivos ou exposto à ação de água corrente.

e. CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

O CP V – ARI é um cimento que obtém uma alta resistência rapidamente podendo chegar a 26 MPa de resistência em apenas 1 dia, possui em sua composição material carbonático (cerca de 5%) e é produzido com um clínquer de dosagem de calcário e argila diferente dos outros tipos de cimento. É recomendado para obras que possuam urgência na desforma das peças de concreto.

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clinquer + Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Cálcareo (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP II – E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-Forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	95-100	-	-	0-5

Tabela 1: Composição dos tipos de aglomerante
 Fonte: http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland_composicao.htm

3.2 Areia

A areia é uma substância originada da desagregação de rochas e são formadas principalmente por quartzo.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) são encontradas com uma granulometria que varia entre 0,05 mm e 5,00 mm. É muito utilizada tanto na construção civil em argamassas, concreto, pavimentação asfáltica, como em diversas outras atividades como siderurgia, produção de vidros entre outras.

Sua destinação de uso é definida de acordo com as características de cada tipo de areia como granulometria e grau de pureza. Na construção civil é utilizada uma forma mais grosseira de areia e com maior grau de impureza em relação às outras atividades.

É um material encontrado com abundância na natureza e possui um baixo custo.

Uma areia de qualidade deve possuir boa resistência mecânica, durabilidade e reagir bem com o cimento. Uma boa distribuição granulométrica e formas arredondadas resultam em baixa porosidade, menor consumo de cimento, melhores características mecânicas e durabilidade do concreto.

3.3 Brita

São originadas do desmembramento de rochas (normalmente granitos e gnaisses) pouco alteradas. Sua textura deve ser não muito grossa e com baixa porosidade. Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) as britas são classificadas quanto ao seu tamanho da seguinte forma:

- a. Nº 1: 4,8 mm a 12,5 mm;
- b. Nº 2: 12,5 mm a 25 mm;
- c. Nº 3: 25 mm a 50 mm;
- d. Nº 4: 50 mm a 76 mm;
- e. Nº 5: 76 mm a 100 mm.

Uma brita de qualidade deve possuir formas arredondadas e superfícies lisas, pois diminuem a porosidade entre os grãos e tornam o concreto mais fluido.

3.4 Aço

O aço é uma liga metálica basicamente formada por ferro e carbono, podendo este último variar de 0,008% a 2,11%. São submetidos a tratamentos térmicos de laminação a quente (Classe A) ou laminação a frio (Classe B) com o objetivo de alterar suas características estruturais como:

- ✓ Aumentar ou diminuir a dureza;
- ✓ Aumentar sua resistência mecânica;
- ✓ Melhorar sua resistência a desgastes e
- ✓ Melhorar a ductibilidade, trabalhabilidade e propriedades de corte.

Muito utilizado na construção civil, o aço é um material de fabricação relativamente simples e econômica que possui alta resistência tanto à tração quanto à compressão tornando sendo o um material ideal para trabalhar junto ao concreto, pois é capaz de suprir a baixa resistência à tração que o concreto possui além de ser um material flexível e que pode ser utilizado em estruturas de diversas formas. Comercialmente pode-se encontrar o aço com resistências de 25 MPa (CA-25), 50 MPa (CA-50) ou 60 MPa (CA –

60) em forma de barras, chapas, perfis, tubos, vigas e trilhos com diâmetros, comprimentos e espessuras e dimensões variadas.

A forma mais utilizada para a construção civil são as barras que, por sua vez, dividem-se em barras redondas, barras sextavadas, barras quadradas ou barras chatas podem ser encontradas com grande variedade de bitolas definidas em milímetros ou polegadas e comprimento de 12 metros estabelecido por norma.

São muito utilizadas em pilares, vigas e lajes de concreto armado.

A seguir na Tabela 2, tem-se as bitolas mais utilizadas comercialmente:

Diâmetros (mm)	Diâmetros (pol.)
5,0	3/16
6,3	1/4
8,0	5/16
10,0	3/8
12,5	1/2
16,0	5/8
25,0	1

Tabela 2: Diâmetros comerciais de barras de aço.

Fonte: Autor.

3.5 Resina Epóxi

A resina epóxi com as características mais próximas das encontradas atualmente surgiu na Alemanha no ano de 1933.

São basicamente polímeros que misturados com aditivos endurecedores formam poderosas ligas capazes de atingir grande resistência mecânica, física e química além de características como flexibilidade, boa aderência, impermeabilidade, durabilidade, a vários tipos de materiais, além de possuir boa trabalhabilidade.

Esse tipo de produto pode ser utilizado em diversas áreas da construção civil desde adesivos para cubas, pastilhas cerâmicas, vergalhões até para reparos de trincas, recuperação estrutural e execução de reforços estruturais. As resinas epóxi são capazes de atingir uma resistência de compressão e tração superiores à do concreto, porém não são muito utilizadas devido ao seu alto custo e baixa resistência a altas temperaturas.

Entre as principais propriedades, destacam-se:

a. Resistência Mecânica:

Varia muito de acordo com a composição que forma a resina epóxi. A resistência à tração pode variar de 30 MPa a 95 MPa enquanto que à compressão pode variar de 120 MPa a 210 MPa.

b. Aderência:

Possui uma ótima aderência com materiais o que faz da resina epóxi um excelente adesivo, porém para garantir uma aderência de qualidade são necessários alguns cuidados como a preparação da superfície a ser aderida e a ausência de carregamento durante a colagem.

c. Retração:

A retração das resinas epóxi depende muito do aditivo utilizado na sua formulação, porém são sempre baixas e podem ser utilizadas de forma continua não havendo necessidade de se deixar juntas.

d. Resistência ao choque:

Possuem uma excelente resistência ao choque, característica que torna as resinas epóxi ideais para reconstruções estruturais e para serem utilizadas em ambientes de agressividade alta.

e. Resistência à abrasão e ao desgaste:

Possui uma durabilidade muito alta, o que impede o desgaste excessivo a curto e longo prazo.

f. Estabilidade térmica:

Uma das características que impede o uso da resina epóxi em qualquer situação é sua baixa estabilidade térmica. As resinas não podem ser submetidas a temperaturas superiores a 60 °C para formulações normais havendo uma grande diminuição em sua resistência, porém existem formulações que suportam 100 °C ou até mesmo 120 °C sem perda de resistência. As resinas Epóxi se submetidas a temperaturas a partir de 300 °C começam a sofrer alterações em sua composição química perdendo suas características resistivas.

4. Flexão em Vigas

Neste capítulo são tratadas algumas considerações sobre o comportamento de vigas de concreto armado submetidas a um carregamento constante bem como os mecanismos de ruptura na flexão simples e flexão pura de acordo com os Ensaios de Stuttgart.

4.1 Flexão

A flexão em vigas é causada devido à ação de momentos criados a partir da aplicação de cargas fazendo a viga fletir e gerando compressão e tração na peça em certas regiões.

A figura 1 ilustra a deformação de uma viga carregada.

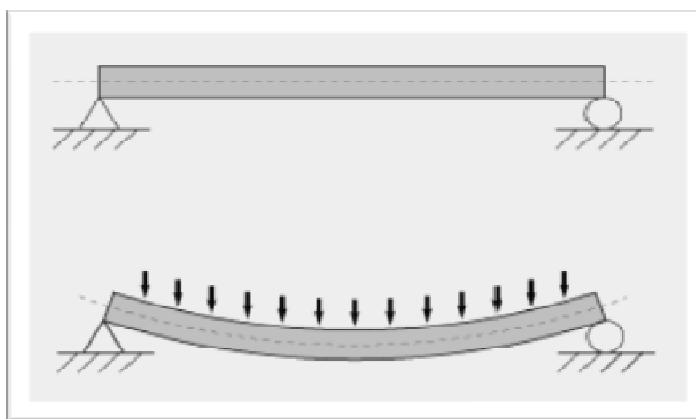


Figura 1: Flecha de uma viga carregada.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Equa%C3%A7%C3%A3o_da_viga_de_Euler-Bernoulli

Como se sabe o concreto possui uma resistência à compressão consideravelmente elevada, porém à tração é desconsiderada por norma e por esse motivo deve-se locar a maior parte das barras de aço onde as tensões de tração são maiores.

Na figura 2 observa-se uma viga e a distribuição das barras de aço.

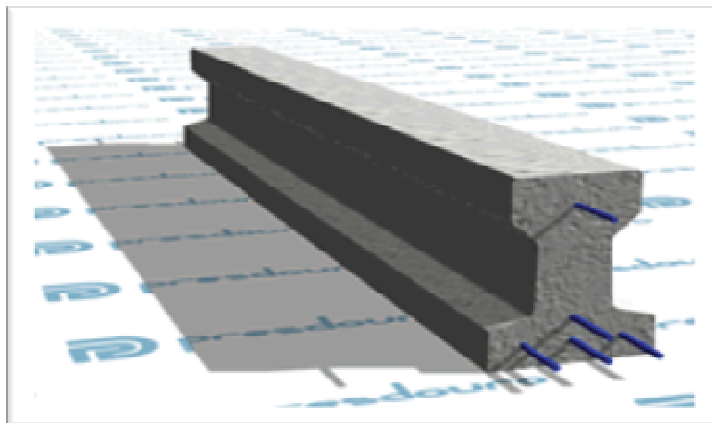


Figura 2: Viga Armada.

Fonte: http://www.presdouro.pt/preesforco/familias/Fvigas_i.htm

Assim o aço trabalha junto ao concreto resistindo aos esforços de tração nos pontos mais críticos onde podem ocorrer de fissuração devido as tensões de tração conforme mostrado na figura 3.

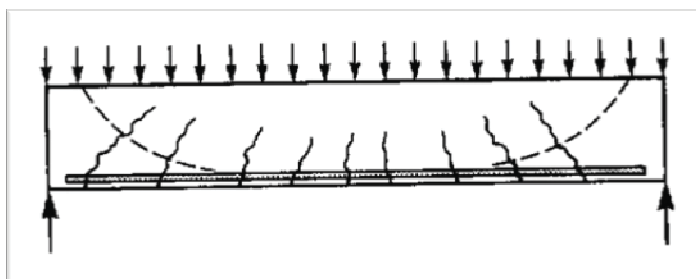


Figura 3: Fissuração de uma viga armada.

Fonte: <http://www.urbanocultural.com/2010/08/sistemas-estruturais-ii-estrutura-de.html>

Após aplicado um momento fletor M_d em uma viga de largura b_w e altura h , uma resultante de compressão R_{cd} é gerada no concreto (na parte superior da viga se o momento fletor é positivo) e de tração R_{sd} no aço na parte inferior conforme esquema da figura 4 abaixo:

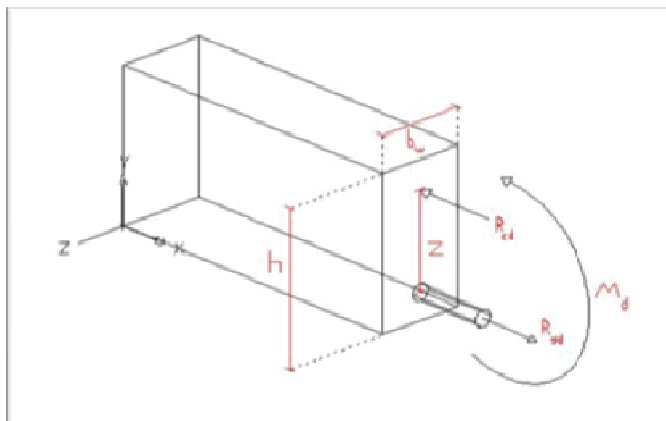


Figura 4: Esforços internos em uma viga.
 Fonte: Autor

Tem-se que para a viga submetida à flexão acima, as fibras superiores encontram-se em contração e sofrem uma deformação de encurtamento (ϵ_{cd}) que diminui conforme se aproxima da linha neutra (LN) e na parte inferior as fibras se encontram-se tracionadas e que as deformações correspondentes também diminuem conforme se aproximam da linha neutra.

A linha neutra é a fibra da viga onde supostamente não sofre deformações devido à tensão aplicada à peça.

Na figura 5 pode-se verificar a distribuição de deformações em uma viga e também a tensão de compressão e sua simplificação segundo a NBR 6118.

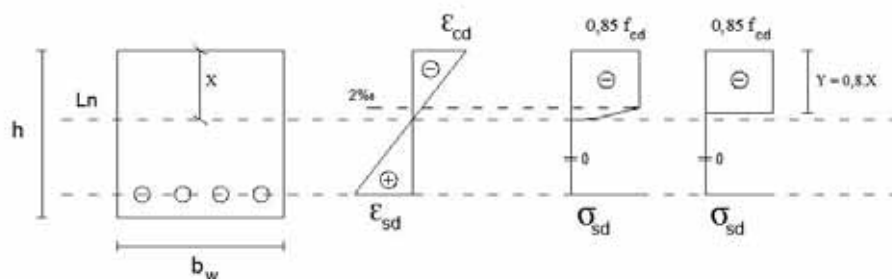


Figura 5: Tensões e deformações de uma viga armada.
 Fonte: Autor

Com a aplicação das chapas coladas reforçando a viga está-se aumentando muito pouco sua seção transversal, porém gerando um considerável acréscimo em sua capacidade de suportar carga.

Na figura 6, pode-se observar e comparar a distribuição de tensões em uma viga reforçada com o diagrama mostrado anteriormente.

Nota-se a chapa de reforço (A_r) na parte inferior da viga (Figura 6) auxiliando na resistência a tração.

Uma das vantagens do reforço estrutural por chapas coladas é a localização onde a chapa será instalada, pois é o local de máxima solicitação de tração da peça uma vez que não é necessário cobrimento de concreto para a chapa.

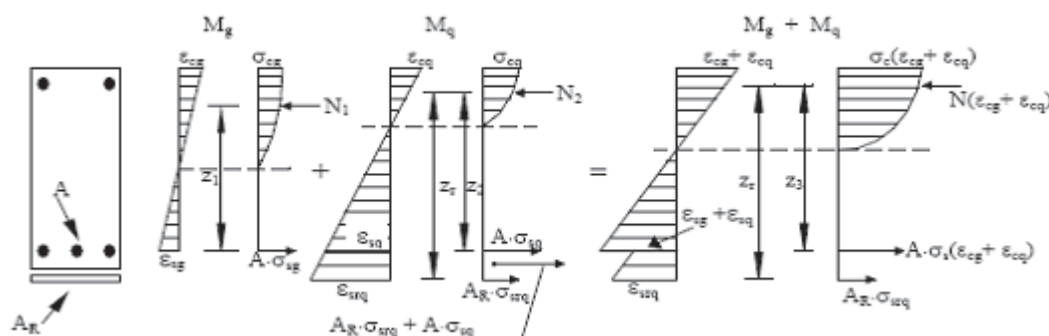


Figura 6: Tensões e Deformações de uma viga reforçada
 Fonte: Souza e Ripper (1998, p. 184)

Devido a forma que os momentos fletores estão aplicados na seção transversal e a combinação com outras solicitações, tem-se:

a. Flexão Pura:

A flexão pura ocorre quando somente existe o momento fletor agindo como solicitação interna, ou seja, os esforços cortantes e esforços normais são nulos para o trecho analisado.

b. Flexão Simples:

A flexão simples ocorre quando existem somente dois tipos de solicitações internas agindo simultaneamente que são o momento fletor e o esforço cortante, sendo o esforço normal nulo.

c. Flexão Composta:

A flexão composta ocorre quando todos os três esforços cortantes momento fletor, esforço cortante e esforço normal estão atuando simultaneamente. São mais comuns em pórticos.

Na figura 7 pode-se ver os casos de flexão pura e flexão simples.

Na parte central da viga entre as duas forças concentradas (P) tem-se a flexão pura, pois os esforços normais e cortantes são nulos enquanto que o momento fletor atua de forma constante.

Nas seções transversais das extremidades da viga já há a presença das solicitações referentes ao esforço cortante e ao momento fletor agindo simultaneamente, o que caracteriza uma *flexão simples*.

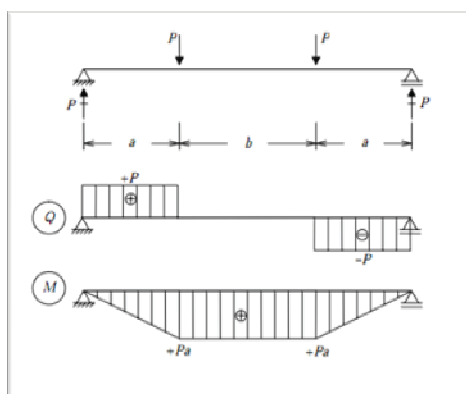


Figura 7: Diagramas de cortante e momento fletor.

Fonte: http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/civ1112-aula06.pdf

4.2 Mecanismos de ruptura na flexão simples (Ensaio de Stuttgart)

O ensaio de Stuttgart consiste no estudo dos mecanismos de ruptura através do carregamento gradativo de duas cargas concentradas centralizadas na viga conforme vê-se na figura 8.

O aumento gradativo das cargas se dá até que haja o colapso da viga e com este esquema há ainda a vantagem de permitir a observação da flexão pura (Trecho BC) e da flexão simples.

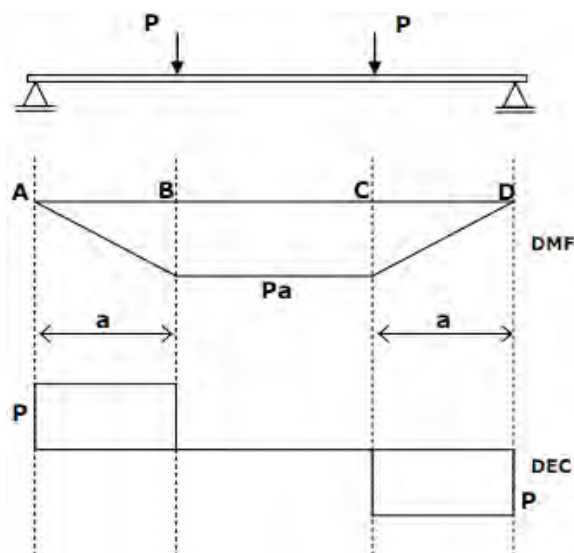


Figura 8: Carregamento para o ensaio de Stuttgart.

Fonte:

[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004\(6\).pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004(6).pdf)

A análise é feita em duas etapas:

i. **Estádio I:**

Admite-se que a viga não apresenta fissuras.

ii. Estádio II:

Neste caso a viga está fissurada com esforços de tração absorvidos pela armação.

4.2.1 Estádio I

Para o estágio I, a tensão de tração nas fibras inferiores da viga ainda não alcançou a resistência à tração do concreto. Por menor que seja a resistência à tração do concreto e que por norma esse valor deve ser desconsiderado, essa resistência consegue absorver inicialmente as cargas aplicadas no desenvolvimento do ensaio de Stuttgart.

A figura 9 abaixo mostra as tensões principais agindo na viga de acordo com as solicitações das cargas aplicadas no ensaio. Nota-se que não existem fissuração na peça devido às tensões de tração não ultrapassarem a resistência a tração do concreto.

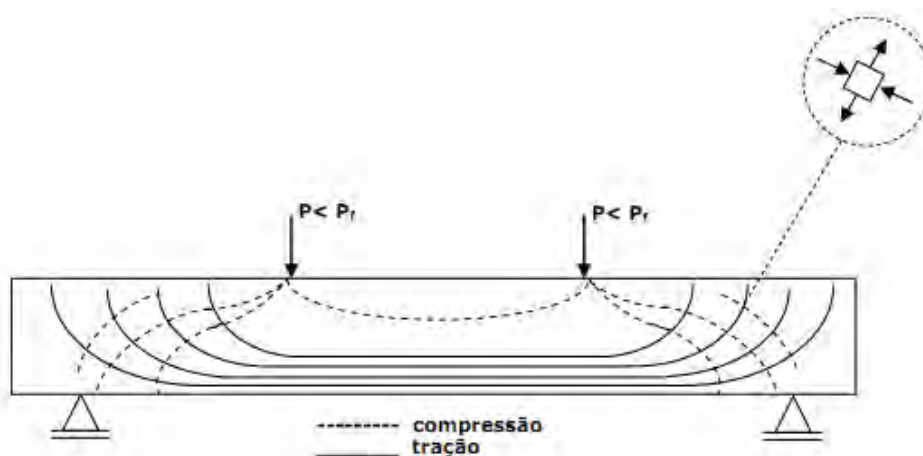


Figura 9: Tensões principais do estágio I

Fonte:

[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004\(6\).pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004(6).pdf)

4.2.2 Estádio II

Com o aumento progressivo das cargas concentradas, as tensões de tração também aumentam e, portanto, há um momento em que essa tensão passa a ser maior que a resistência à tração do concreto, surgindo, assim, as primeiras trincas verticais na região BC da figura. Estas trincas se estendem até um pouco abaixo da linha neutra.

Segundo SUSSEKIND, (1985), o intervalo e a abertura máxima das fissuras numa viga de concreto armado dependem da quantidade e diâmetro das barras empregadas, podendo-se diminuir essas trincas com a adoção de um maior número de barras com menores diâmetros.

Posteriormente ao surgimento das primeiras fissuras e com a carga aplicada aumentando, logo a viga é forçada a trabalhar fissurada, exceto nas regiões muito próximas aos apoios.

Então, os trechos submetidos à flexão simples (AB e CD) começam a trincar, porém essas trincas não mais são verticais. As fissuras iniciais no trecho BC e as fissuras posteriores nos trechos AB e CD podem ser observadas na figura 10 a seguir.

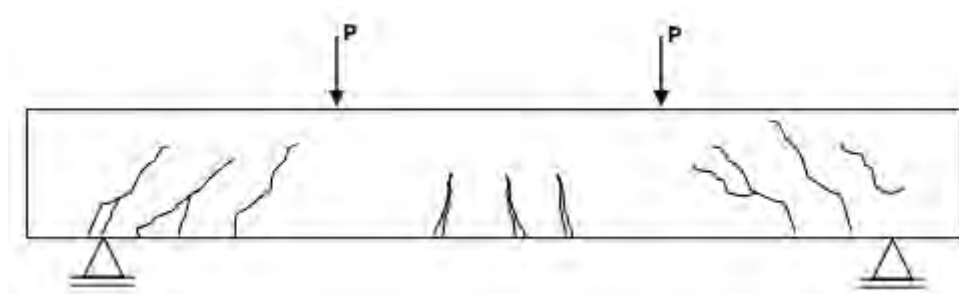


Figura 10: Fissuras no estágio II.

Fonte:

[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004\(6\).pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004(6).pdf)

As tensões criadas pela aplicação das cargas na viga geram linhas de isotensões de tração e de compressão que obedecem a rede de tensões mostrada na figura 11 abaixo:

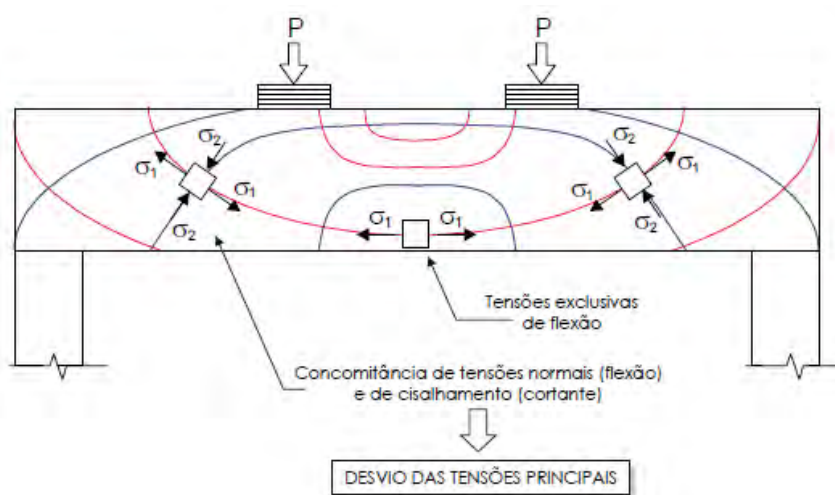


Figura 11: Linhas de tensões atuantes na viga.

Fonte: Pappalardo Jr., Alfonso. Notas de aula.

Analisando essa rede de tensões de compressão e tração pode-se observar que na região central da viga onde existe a flexão pura as fibras inferiores estão sujeitas apenas a tração e na horizontal o que gera as fissuras verticais, enquanto que, entre as cargas concentradas e os apoios, existem tensões de compressão e de tração inclinadas, que devido à tração atuante as fissuras, se abrem de forma inclinada conforme mostra a figura 10.

4.2.3 Tipos de Ruptura

Vários tipos de ruptura podem ocorrer em uma viga de concreto conforme submetida à flexão simples (Figura 8).

Na figura 12 a seguir, pode-se observar cada tipo de fissura:

- i. Ruptura por flexão (A);
- ii. Ruptura de cisalhamento, por tração (B);
- iii. Ruptura por compressão da mesa (C);
- iv. Ruptura por ancoragem deficiente da armação principal (D) e
- v. Ruptura de cisalhamento por esmagamento de biela comprimida (E).

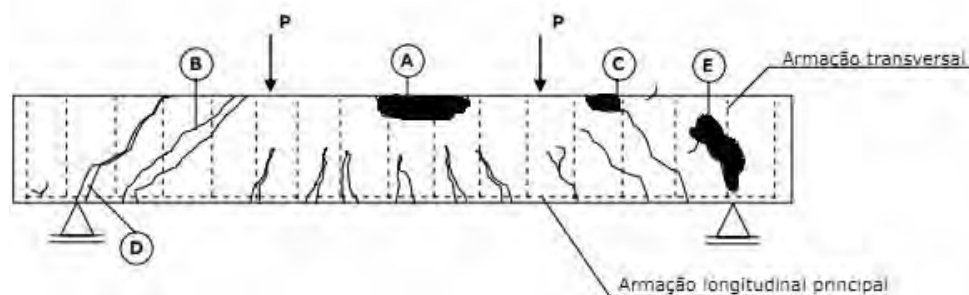


Figura 12: Tipos de Fissuração.

Fonte:

[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaios%20de%20Stuttg art_artigo_ibracon_2004\(6\).pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaios%20de%20Stuttg%20art_artigo_ibracon_2004(6).pdf)

Considerando-se a figura 12, então, descreve-se abaixo cada forma de ruptura.

i. *Ruptura por Flexão:*

A ruptura por flexão é o caso mais comum onde as vigas são subarmadas, ou seja, o concreto está superdimensionado em relação ao aço. Nesse caso a ruptura se inicia a partir do escoamento do aço que provocam grandes deformações nas fibras tracionadas provocando elevações sucessivas da linha neutra e com isso diminuindo a área tracionada da peça. Com a diminuição da área tracionada a ruptura ocorre pelo esmagamento do concreto nas fibras superiores, como pode-se observar na área (A) da figura 11.

ii. Ruptura de cisalhamento, por tração:

Esse tipo de ruptura é o mais comum em peças submetidas ao cisalhamento. Ela ocorre pela falta de armadura transversal (geralmente confeccionada por estribos) destinada a absorver os esforços de tração originados dos esforços cortantes. A viga tende a se dividir em duas partes pelo deslizamento das faces conforme a área (B) da figura 11.

iii. Ruptura por compressão da mesa:

Igualmente ao item anterior, a deficiência da armadura transversal causa, além da ruptura típica de tração, uma ruptura por compressão na mesa superior.

Essa ruptura por compressão pode ser explicada pelo rápido escoamento do aço devido à falta de armação de cisalhamento causando uma intensa fissuração no concreto que pode invadir a área de compressão da viga e esta danificada não suporta a solicitação de compressão havendo o esmagamento do concreto. Este tipo de ruptura pode ser observado na área (C) da figura 11.

iv. Ruptura por ancoragem deficiente da armação principal

Neste caso, a armação principal de tração está solicitada sobre os apoios, de modo precisa ser ancorada.

Caso não haja uma ancoragem adequada existe a possibilidade de surgirem fissuras conforme a área (D) da figura 11.

Esse tipo de ruptura ocorre devido ao deslizamento da armadura longitudinal causando uma ruptura brusca.

v. *Ruptura de cisalhamento por esmagamento da biela comprimida:*

Para vigas com largura muito reduzida, as tensões principais de compressão podem atingir valores elevados e, assim, o concreto não resiste a compressão e sofre o esmagamento conforme mostrado na área (E) da figura 11.

5. Tensão x Deformação

As tensões solicitadas ao concreto armado são resistidas parcialmente pelo concreto e parcialmente pelo aço. Essas tensões geram deformações no concreto armado que obedecem a diagramas tensão x deformação estabelecidos em norma (NBR 6118).

5.1 Diagramas Tensão x Deformação (NBR 6118)

O diagrama tensão deformação conforme a figura 13 a seguir é estipulado por norma e relaciona a tensão aplicada ao concreto.

O valor teórico da deformação até 2,0‰ estabelece um comportamento elástico e obedece a equação indicada na figura 13. Entre as deformações de 2,0‰ e 3,5‰ tem-se um comportamento plástico onde a tensão permanece constante. A tensão característica (f_{ck}) é multiplicada por um coeficiente 0,85 devido ao *efeito Rush*. Comprova-se que sob o efeito de cargas por um longo período de tempo o concreto sofre um decréscimo em sua resistência inicial.

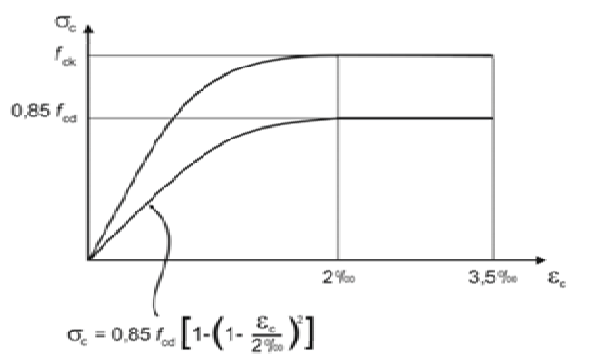


Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação do concreto.
 Fonte: NBR 6118

Para o aço tem-se o diagrama correspondente a Figura 14, onde se percebe duas fases. A primeira fase é linear correspondente ao regime elástico e é válida a lei de Hooke. A segunda fase é plástica onde a tensão é admitida constante conforme varia-se a deformação.

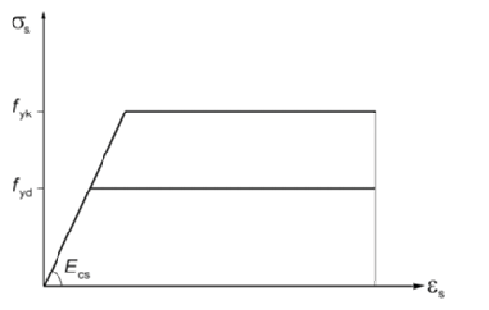


Figura 14: Diagrama Tensão x Deformação do aço.
 Fonte: NBR 6118, 2003.

6. ENSAIO DESENVOLVIDO

Poucas são as referências bibliográficas onde se podem encontrar informações a respeito de vigas reforçadas através da colagem de chapas de aço. Mais raras ainda são aquelas referentes aos ensaios que comprovem a eficiência desse sistema de reforço estrutural.

Neste capítulo são tratados os procedimentos de execução para esse tipo de reforço bem como o *Método de Canôvas* para o dimensionamento do reforço das chapas de aço.

6.1 Método de Canôvas (1988)

Para se dimensionar uma estrutura, primeiramente é necessário estabelecer qual a finalidade de uso a qual será submetida estabelecendo-se um valor de uma sobrecarga.

Porém, por algum motivo, esta finalidade pode ser alterada após algum tempo exigindo da estrutura uma maior capacidade de suporte de carga.

Segundo Canôvas, entre outras soluções, para esses casos, a estrutura pode ser reforçada e uma das alternativas interessantes é a colagem de chapas de aço nas faces das vigas com resina epóxi.

Para se realizar esse reforço é necessário, inicialmente, livrá-la de qualquer carregamento a que esteja submetida e, então, realizar o reforço estrutural de acordo com o acréscimo da solicitação a que será submetida.

Inicialmente, a viga está sujeita a um momento M_i que é anulado para que seja realizado o reforço e posteriormente submeter à viga ao momento total, ou seja,

$$M_t = M_i + M_a$$

onde:

M_t é o momento total;

M_i é momento existente inicialmente e

M_a é momento acrescido.

Com a existência apenas da tensão oriundas de M_i , o concreto está submetido a uma tensão inicial σ_{ci} e uma deformação ϵ_{ci} enquanto que o aço está submetido a uma tensão σ_{si} e uma deformação ϵ_{si} .

Após executado o reforço e as chapas devidamente coladas, o concreto passa a suportar uma tensão σ_{ca} , o aço uma tensão σ_{sa} e o reforço a uma tensão σ_{sr} .

Para o dimensionamento da chapa de aço e para que a estrutura suporte o novo momento M_t , deve-se atender as seguintes inequações:

$$\sigma_{ci} + \sigma_{ca} \leq f_{ck} / \gamma_c$$

$$\sigma_{si} + \sigma_{sa} \leq f_{yk} / \gamma_s$$

$$\sigma_{sr} \leq f_{yk} / \gamma_s$$

Após essas condições atendidas, segundo C novas, pode-se determinar a área de reforço da chapa utilizando a seguinte equação:

$$A_r = \left[\frac{M_a}{Z_s \cdot \sigma_{sr}} \right] - A$$

onde:

A_r   a área da chapa de aço;

M_a   o momento a ser acrescido;

Z_s   o braço do cobaricentro das armaduras existentes e a chapa;

σ_{sr}   a tensão de tração na chapa de aço e

A   a área inicial de aço.

6.2 Rotina de cálculo para o Método de Canôvas

Segundo IFEKAIBEYA, W. N. 2008, pode-se estabelecer um “*passo-a-passo*” para o cálculo da área de reforço, mediante a seqüência abaixo:

- a. Elencar todos os dados disponíveis da viga a ser reforçada como a armadura existente, a resistência característica do concreto f_{ck} , as dimensões da seção transversal, as vinculações, o comprimento da peça, carregamento atual, etc;
- b. Com estes, determina-se o momento máximo característico que a peça está submetida;
- c. Define-se qual sobrecarga que se deseja atingir e, com isso, o momento M_t ;
- d. Verifica-se e determina-se qual o máximo descarregamento que se pode atingir, a fim de que o reforço se torne-se viável e, portanto, obtém-se o valor do momento M_a ;
- e. Calcula-se o momento M_b fazendo-se $M_b = M_t - M_a$;
- f. Calcula-se o braço de alavanca Z_1 e a tensão σ_{sp} ;
- g. Calcula-se a tensão σ_{srs} , observando que não se ultrapasse o limite de resistência da chapa;
- h. Calcular o braço de alavanca Z_s e, por fim a área de reforço A_r .

7. Procedimentos do Ensaio

Neste capítulo são abordados os procedimentos e materiais realizados na construção de vigas para teste de carga, os passos para se executar corretamente o reforço com chapas coladas e finalmente o procedimento executado para o ensaio de carga.

O objetivo é comprovar a eficiência destes reforços a partir de uma comparação de vigas de seção transversal semelhantes, porém com alterações em sua armação e reforço.

7.1 Materiais Utilizados

a. Madeira:

Foram utilizados sarrafos de madeira para a construção de formas para vigas de seção transversal de 5,0 cm x 10,0 cm e comprimento de 2,0 metros. A fôrma pronta pode ser observada na figura 15.



Figura 15: Forma para viga 5x10x200.

Fonte: Autor

b. Cimento:

Foi utilizado o cimento CP II – F 32 que possui um aditivo carbonático e é recomendado seu uso para desde estruturas de concreto armado até

assentamento de revestimentos, não sendo recomendado em ambientes agressivos ao concreto. A figura 16 mostra o cimento utilizado.



Figura 16: CP II - F 32.

Fonte Autor: <http://www.brennandcimentos.com.br/produtos/cimento-nacional/cp-ii-f-32/>

c. Areia:

Foram utilizados sacos de 20 kg de areia de granulometria média (entre 0,50 mm e 0,25 mm) para a preparação do concreto conforme mostra a figura 17.



Figura 17: Areia utilizada.

Fonte: Autor.

d. Brita:

Foram utilizados sacos de 20 kg de brita 1 (Nº 1 – 4,8 a 12,5 mm) na preparação do concreto conforme vê-se na figura 18.



Figura 18: Brita utilizada.
Fonte: Autor

e. Aço:

Foram utilizadas barras de aço CA-50 com 2,0 m de comprimento e diâmetro de 8,0 mm conforme a figura 19.



Figura 19: Barras de aço CA-50.
Fonte: Autor.

f. Chapas de aço:

Foram utilizadas para os reforços chapas de aço (Figura 21) de 3cm x 2m x 0,9mm para os reforços laterais e 5cm x 2m x 0,9mm para as partes inferiores das vigas. Foi determinada, através de ensaio a tração, a resistência da chapa e obtido o valor de 823,3 MPa.

As especificações das chapas de aço seguem as da norma NBR 7008 zc. As tiras metálicas, bem como o ensaio de tração podem ser vistos nas figuras 20 e 21 respectivamente.



Figura 20: Chapas de Aço.
Fonte: Autor.



Figura 21: Ensaio de tração da chapa.
Fonte: Autor.

g. Resina Epóxi:

Foi utilizada para a colagem das chapas na viga a resina epóxi Compound Adesivo da Vedacit (figura 22).

Propriedades da resina epóxi utilizada:

- i. Possui boa fluidez;*
- ii. Densidade igual a $1,52 \text{ g/cm}^3$;*
- iii. Componente A: resina epóxi;*
- iv. Componente B: poliamino-amida*

- v. *Resistência: apresenta resistência inicial em 24 horas (a resistência máxima é obtida somente 7 dias após a aplicação).*



Figura 22: Resina epóxi Compound Vedacit.

Fonte: <http://www.projetocasaconstrucao.com.br/impermeabilizantes.htm>.

7.2. Procedimentos de construção das vigas e reforços

Os procedimentos para a construção das vigas são importantes uma vez que interfere diretamente na resistência do concreto.

O traço utilizado, as formas, o tempo de cura e a vibração são fundamentais para se obter uma peça de qualidade.

7.2.1 Construção das vigas

Inicialmente para a construção das vigas é necessário se estabelecer qual a resistência desejada para o concreto e então estabelecer o traço correto. Neste ensaio utilizaremos um F_{ck} de 25 MPa e com o traço abaixo:

- ✓ Brita: 3,047 kg;
- ✓ Areia: 2,294 kg;
- ✓ Cimento: 1,000 kg;
- ✓ Relação água-cimento: $A/C = 0,65$.

Fonte: SILVA, Gildasio Rodrigues da. Manual de Traços de Concreto, 3ed. 1975.

Com o auxílio de uma balança de precisão foram adicionados, conforme traço estabelecido, os materiais para o concreto. Brita, areia, cimento e água. Como observado na figura 23.



Figura 23: Preparação do concreto.
Fonte: Autor.

Então foram concretadas cinco vigas, sendo elas:

- a. Dois corpos de prova apenas em concreto, sem barras de aço, onde uma delas será reforçada.
- b. Um corpo de prova em concreto com adição de 1 barra de aço com diâmetro de 8 mm.
- c. Dois corpos de prova em concreto com adição de 1 barra de aço com diâmetro de 8 mm que serão reforçadas com chapas metálicas;

Para cada concretagem foram feitos dois corpos de prova para a verificação da resistência atingida pelo concreto.

As vigas concretadas e os corpos de prova podem ser vistos nas figuras 24 e 25 respectivamente.



Figura 24: Vigas concretadas.
Fonte: Autor.



Figura 25: Corpos de prova concretados.
Fonte: Autor.

Após a concretagem as vigas e corpos de prova passaram por um período de cura de 28 dias para enfim serem ensaiadas.

7.2.2 Procedimentos para a execução do reforço

Para a execução do reforço é de grande importância que as faces da viga estejam regularizadas, pois ressaltos ou saliências que existam poderão comprometer a qualidade da fixação das chapas e a estrutura.

A fixação das chapas nas faces das vigas através da resina epóxi é tão importante quanto o próprio reforço de aço, pois a resina deve resistir à tensão de cisalhamento evitando que a chapa se solte da viga.

Qualquer irregularidade deve ser eliminada antes de se iniciar a execução do reforço.

Deve-se atentar também para a limpeza das peças.

Tanto a peça de concreto quanto a chapa de aço devem estar totalmente limpas, não podendo conter camadas de pó, graxas, óleos provenientes da fabricação das chapas e também devem estar protegidas do ar e umidade evitando ferrugem.

Após totalmente limpas as peças, deve-se iniciar a colagem.

Livra-se a viga de qualquer carregamento e, então, lixa-se as faces da viga para proporcionar maior aderência entre os materiais.

Então deve-se aplicar a resina epóxi e colocar a chapa aplicando uma pressão contínua que deve durar até que a resina tenha endurecido a fim de garantir uma espessura adequada para a resina e uma boa aderência final.

O período de endurecimento da resina epóxi é de aproximadamente 7 dias.

Deve-se garantir a espessura da resina pois é muito importante influencia diretamente na resistência a tração da união concreto-aço.

Segundo ensaios realizados na Universidade do Arizona a relação de resistência à tração pela espessura do adesivo possui um comportamento conforme o gráfico abaixo (Figura 26):

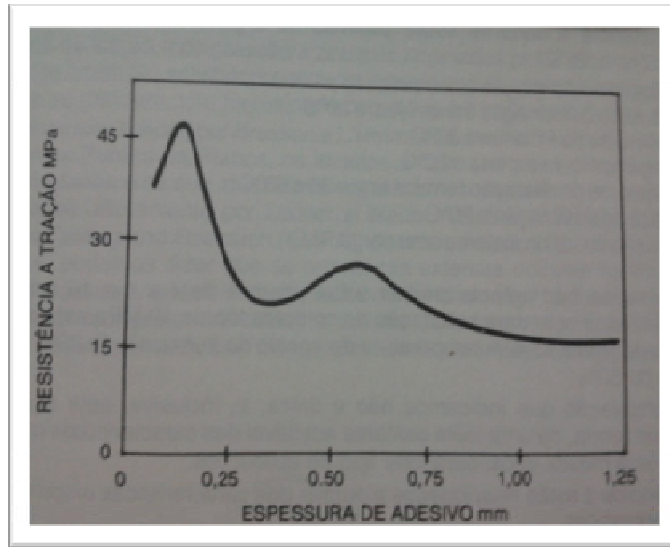


Figura 26: Diagrama Resistência x Espessura de adesivo.
Fonte: Souza e Ripper (1998, p. 184).

Fica claro que as maiores resistências à tração foram obtidas nas menores espessuras de adesivo e a amplitude de variação é bastante grande, portanto a espessura é um fator que deve ser cuidadosamente trabalhado, sendo que a espessura máxima de resina seja de 1,5 mm, mas preferencialmente seja menor que 0,25 mm.

Na figura 27 pode-se observar a aplicação da resina na viga.

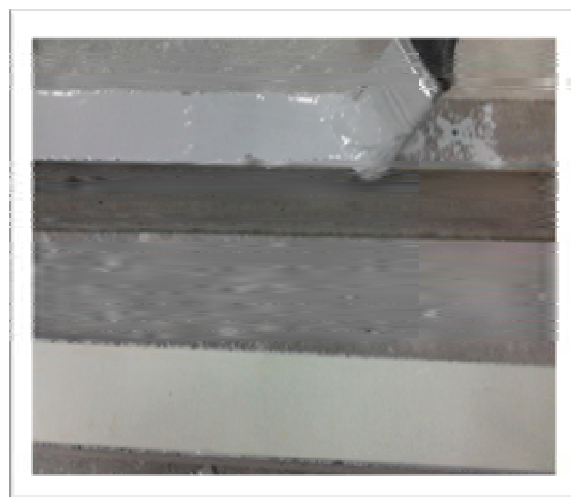


Figura 27: Aplicação da resina epóxi.
Fonte: Autor.

O local de colagem das chapas deve ser feito conforme a figura 28. Esta disposição de chapas atua nas fibras que possuem a máxima tensão de tração assim o reforço atua diretamente no ponto crítico de fissuração da estrutura e, ainda, as chapas laterais colaboram como armadura transversal resistindo as tensões de cisalhamento.



Figura 28: Local de colagem das chapas.
Fonte: Autor.

Algumas precauções devem ser tomadas na execução do reforço. Devido à sensibilidade da resina epóxi ao calor, deve-se atentar para que não seja exposta á temperaturas na ordem de 70°C a 80°C, pois pode causar uma redução considerável na sua resistência.

A aplicação deve ser feita de forma rápida e sem exageros.

A reação química da resina epóxidica é exotérmica e isso ajuda a acelerar a reação o que pode causar o endurecimento da resina no interior do recipiente.

Contatos diretos com a pele, olhos e membros do corpo devem ser evitados, pois muitas resinas podem causar alergias, portanto é importante que se use equipamentos de proteção como luvas e óculos.

7.3 Ensaio de carga

Os ensaios de carga são fundamentais para se analisar de forma qualitativa a eficiência do reforço nas vigas.

São explicados nesse tópico os procedimentos adotados para os ensaios nos corpos de prova e das vigas determinando a resistência à compressão do concreto e a resistência à flexão nas vigas confeccionadas.

7.3.1 Corpos de prova

Foram moldados dois corpos de prova com diâmetro de 5,0 cm e altura 10 cm para cada receita de concreto feito (Figura 29).

Estes corpos de prova foram ensaiados em uma prensa para a determinação da resistência atingida pelo concreto durante sua cura.



Figura 29: Corpos de Prova após 28 dias.
Fonte: Autor.

7.3.2 Vigas

Com o objetivo de se obter o maior momento resistido pela viga reforçada e compará-la com o momento resistido pelas vigas sem reforço utiliza-se para o ensaio o caso de flexão pura, onde existe apenas a solicitação do momento fletor.

Para isso é utilizado para o ensaio os seguintes componentes:

a. Prensa:

Equipamento utilizado para a solicitação de carga na estrutura. A prensa pode ser vista na figura 30.



Figura 30: Prensa.
Fonte: Autor.

b. Apoios:

As vigas são apoiadas em suas extremidades simulando uma viga bi-apoiada.

c. Dispositivo para cargas pontuais:

Um dispositivo foi confeccionado para que duas cargas pontuais sejam aplicadas à estrutura e gerem a mesma intensidade na viga a fim de criar um trecho de flexão pura no centro da viga e assim determinar o máximo momento fletor resistido para esse trecho. O dispositivo para cargas pontuais e o esquema de aplicação de cargas com diagramas de momento e cortante podem ser vistas nas figuras 31 e 32 respectivamente.



Figura 31: Dispositivo de cargas concentradas.
Fonte: Autor.

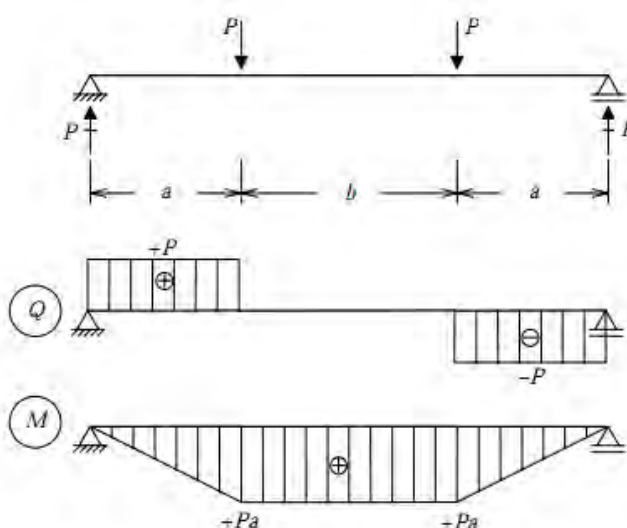


Figura 32: Diagramas de cortante e momento fletor.
Fonte: http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/civ1112-aula06.pdf

d. Esquema geral de ensaio:

As cargas pontuais serão locadas a uma distância de 75 cm das extremidades da viga e a uma distância de 50 cm entre elas. Para os apoios foram utilizados dois pedaços de

madeira iguais e acima deles foi adicionado um pedaço de vergalhão para concentrar a reação do apoio em um ponto conforme a figura 33.

Para o caso da flexão pura será possível observar para o trecho entre as cargas o comportamento de rompimento da estrutura submetida a um momento de mesma intensidade para todo o trecho.



Figura 33: Viga pronta para ensaio.
Fonte: Autor.

8. Resultados e Discussões

Neste capítulo são expostos e comentados os resultados dos ensaios de rompimento dos corpos de prova e das vigas.

É possível determinar de maneira qualitativa a eficiência de resistência obtida para o reforço com chapas de aço coladas em comparação com as estruturas não reforçadas.

Embora poucas sejam as amostras ensaiadas, é possível constatar o aumento de capacidade de carga em vigas armadas e reforçadas.

8.1 Corpos de Prova

Para os corpos de prova tem-se na tabela abaixo o número de identificação, as resistências obtidas, data da concretagem e o período de cura.

Nº do CDP	f_{ck} (MPa)	Data da Concretagem	Tempo de Cura (dias)
1	6,73	04/out	50
2	8,25	04/out	50
3	7,65	11/out	43
4	6,38	11/out	43
5	8,72	17/out	36
6	11,53	17/out	36

Tabela 3: Características dos corpos de prova.
 Fonte: Autor.

8.2 Vigas

Tem-se na tabela abaixo, o número de identificação da viga, suas resistências, datas da concretagem e período de cura dividindo os resultados em vigas sem reforço e vigas reforçadas.

8.2.1 Vigas sem reforço:

Nº	Carga de Ruptura (kN)	Data da Concretagem	Tempo de Cura	Observações
1	1,9	17/out	36 dias	Viga sem armação e sem reforço
2	8,0	11/out	43 dias	Viga armada e sem reforço

Tabela 4: Resultados do ensaio das vigas sem reforço.
 Fonte: Autor.

8.2.1.1. Comentários:

Observa-se claramente a importância das barras de aço localizadas na região tracionada do concreto.

No primeiro caso tem-se uma viga sem armação e sem reforço que suportou uma carga de ruptura de 1,9 kN enquanto que uma viga semelhante armada com uma barra de 8 mm de diâmetro suportou 8,0 kN até a ruptura.

Nota-se pelas figuras 34, 35, 36, 37 e 38 que as fissurações nas vigas não reforçadas são provocadas por esforços cortantes que rompem a viga antes da tração. Isso ocorre devido à ausência de armadura transversal causando baixa resistência ao cisalhamento da viga.

a. Viga Nº 1 (sem armação e sem reforço):

Nas figuras 34, 35 e 36 podem ser observadas a ruptura obtida no ensaio da viga Nº 1 sem armação e sem reforço.



Figura 34: Viga Nº 1 Rompida.
Fonte: Autor.



Figura 35: Viga Nº 1 Rompida.
Fonte: Autor.

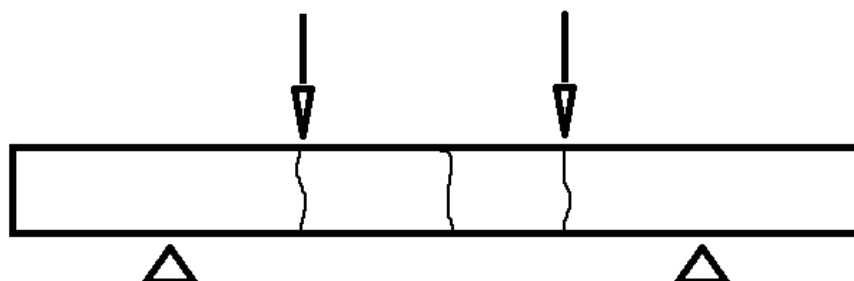


Figura 36: Esquema de ruptura da viga Nº 1
Fonte: Autor.

A viga Nº 1 rompeu-se bruscamente assim que a carga atingiu um valor de 1,9 kN e como observado nas figuras acima, a viga cedeu em três pontos diferentes.

No centro devido à ação do momento tracionando as fibras inferiores e nos dois pontos de carga concentrada onde a cortante é máxima.

b. Viga N^o 2 (armada e sem reforço):

Nas figuras 37 e 38 podem ser observadas as rupturas obtidas na viga N^o 2 armada e sem reforço.



Figura 37: Viga N^o 2 Rompida.

Fonte: Autor.

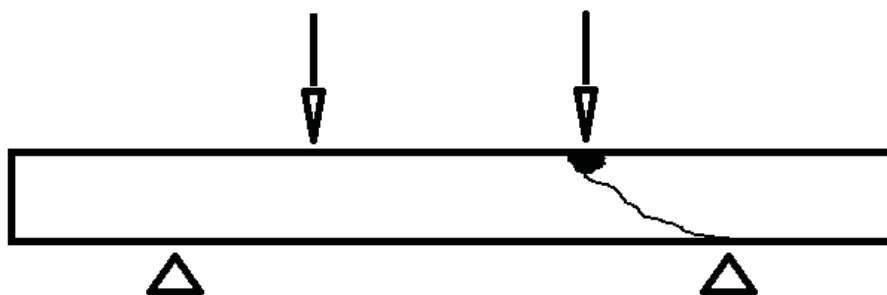


Figura 38: Esquema de ruptura da viga N^o 2.

Fonte: Autor.

A viga N^o 2 rompeu-se fora do trecho de flexão pura criando uma fissuração partindo do ponto de aplicação da carga concentrada, onde se observa um ponto de esmagamento do concreto e seguindo diagonalmente até a parte inferior da viga próximo ao apoio.

Devido às características da fissuração pode-se concluir que a viga cedeu devido à cortante aplicada, pois a fissuração em diagonal denota um

deslizamento das faces da viga normalmente causada por esforços cortantes. Conforme já exposto no início do trabalho, essa fissura é caracterizada pela deficiência de armadura transversal, com isso as tensões de tração que surgem devido ao esforço cortante não são absorvidos e a peça tende a se dividir em duas.

8.2.2 Vigas reforçadas:

Nº	Carga de Ruptura (kN)	Data da Concretagem	Tempo de Cura	Observações
1	11,9	17/out	36 dias	Viga armada e reforçada
2	10,7	11/out	43 dias	Viga armada e reforçada
3	7,9	04/out	50 dias	Viga sem armação e reforçada

Tabela 5: Resultados do ensaio das vigas reforçadas.
Fonte: Autor.

8.2.2.1. Comentários:

Apesar dos poucos exemplares ensaiados para cada situação é possível se fazer uma análise qualitativa dos resultados.

Pode-se observar que para a combinação armação e reforço foram atingidas maiores resistências à ruptura.

Contudo para o caso da viga sem armação e com reforço a carga de ruptura se deu bem maior do que para a viga sem armação e sem reforço.

Com o reforço executado é possível observar que não houve a ruptura pelo esforço cortante, isso se deve pela ação das chapas laterais atuando em parte como armadura transversal e resistindo ao cisalhamento.

a. Viga N^o 1 (armada e reforçada):

Nas figuras 39 e 40 podem ser vistas as rupturas obtidas na viga N^o 1 armada e reforçada.



Figura 39: Viga reforçada N^o 1 rompida.
Fonte: Autor.

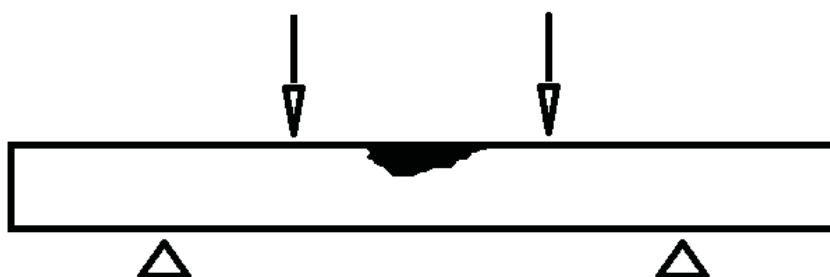


Figura 40: Esquema de ruptura da viga N^o 1.
Fonte: Autor.

A viga N^o 1, armada e reforçada, suportou a maior carga chegando 11,9 kN antes de se romper. Nota-se que após certa carga solicitada a chapa de aço se solta da estrutura, porém o rompimento se dá pelo esmagamento devido à compressão das fibras superiores da viga, o que significa que com o reforço a resistência à tração da peça superou a de compressão da parte

superior. Esse tipo de ruptura é causado pela elevação da linha neutra diminuindo a área de concreto tracionada devido ao escoamento do aço e com isso o concreto é rompido por esmagamento nas fibras superiores.

b. Viga N^o 2 (armada e reforçada):

Nas figuras 42 e 41 podem ser vistas as rupturas obtidas na viga N^o 2 armada e reforçada.



Figura 41: Viga reforçada nº 2 rompida.
Fonte: Autor.

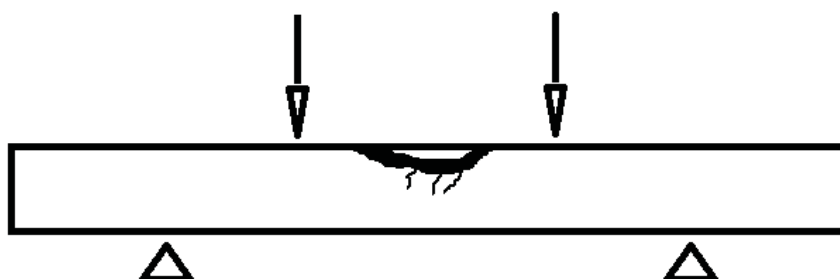


Figura 42: Esquema de ruptura da viga N^o 2.
Fonte: Autor.

A viga N^o 2, armada e reforçada da mesma forma que a N^o 1, se comportou de maneira semelhante rompendo-se na parte superior, após um carregamento de 10,7 kN, devido ao esforço de compressão. A viga N^o 2 possui um comportamento semelhante à N^o 1 e sofre esmagamento nas fibras superiores do concreto devido ao escoamento do aço e diminuição da área de concreto comprimida.

c. Viga N^o 3 (não armada e reforçada):

Nas figuras 43 e 44 podem ser vistas as rupturas obtidas na viga N^o 3 não armada e reforçada.



Figura 43: Viga reforçada N^o 3 rompida.
Fonte: Autor.

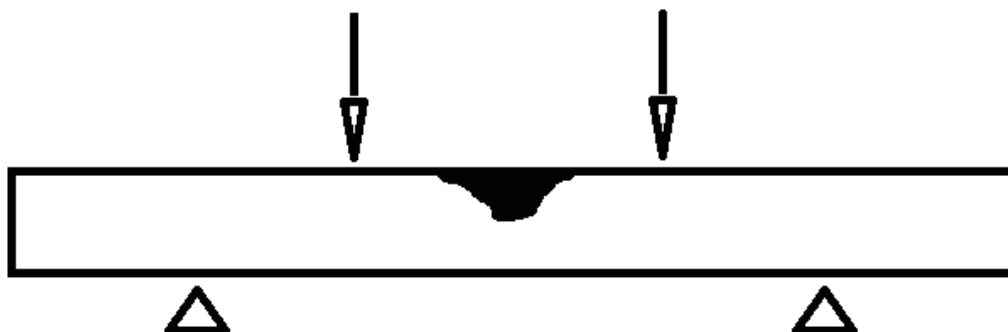


Figura 44: Esquema de ruptura da viga N^o 3.
Fonte: Autor.

A viga N^o 3 rompeu da mesma forma que as armadas e reforçadas.

Portanto o reforço executado com as chapas coladas foi suficiente para suportar a sollicitação de tração, rompendo a peça por compressão nas fibras superiores.

A ruptura por flexão ocorre nessa viga da mesma forma que nas outras, onde além do reforço também há armação.

9. Conclusões e recomendações para desenvolvimento de novas pesquisas

O reforço estrutural, na engenharia civil, tem ganhado cada vez mais importância entre as opções disponíveis.

Nos últimos anos, várias pesquisas têm sido realizadas a fim de criar alternativas práticas, de baixo custo e eficientes, pois outrora esses reforços possuíam um custo tão elevado que a opção mais vantajosa recaía na reconstrução da estrutura do que a execução de um reforço.

Com isso técnicas e materiais são desenvolvidos tornando o reforço uma ótima alternativa para a solução de problemas estruturais tentando torná-lo de fácil execução, baixo custo e de alta eficiência.

Comprova-se claramente que os reforços estruturais através da colagem de chapas metálicas com resina epóxi atuam de forma significativa na capacidade de carga das estruturas.

Comparando os ensaios das vigas somente armadas com aqueles das armadas e reforçadas, houve um aumento da ordem de 33,75% na capacidade de suporte de carga fazendo com que a resistência à tração das fibras inferiores das vigas superasse a resistência à compressão das fibras superiores rompendo-se por esmagamento devido à compressão no trecho sujeito a flexão pura.

Percebe-se que o tipo de ruptura para a viga com armação e sem reforço difere das com armação e reforço o que infere que o reforço através das chapas coladas nas laterais das peças atua tanto melhorando a capacidade de carga para flexão como para cortante.

É importante enfatizar que os resultados obtidos neste trabalho são de caráter qualitativo, não podendo ser utilizados como parâmetro para qualquer tipo de dimensionamento devido ao pequeno número de amostras ensaiadas.

Para se obter resultados com maior grau de confiabilidade para dimensionamentos deve-se realizar mais ensaios e, ainda, aprimorá-los coletando informações como medidas de deflexão, abertura de fissuras e diagramas de carregamento x deformações além da determinação de um traço de concreto através de procedimentos tecnológicos determinando-se características específicas de cada material utilizado.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros podem ser analisados os diversos fatores que influenciam diretamente as características estruturais, como variações de seção transversal, variações das dimensões das chapas metálicas, variações de armaduras longitudinais e transversais, estudando-se o comportamento das vigas em relação à variação de cada um desses fatores possibilitando o desenvolvimento de reforços estruturais mais eficientes. Para trabalhos experimentais é importante que se tenha um planejamento inicial levando-se em consideração o tempo de ensaio, tempo de cura, disponibilidade de laboratórios equipados e laboratoristas, além de custos com materiais.

10. Referências Bibliográficas

ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2003. 221 p.

ANDRADE, J. L. M. Alterações da Norma Brasileira NBR 7478. Minas Gerais, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>

CANOVAS, M. F. Patologia e Terapia de Concreto Armado, Editora PINI, São Paulo, Brasil, 1988.

CBCA, Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

DE SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto, Editora Pini Ltda. São Paulo, Brasil, 1998. 255 p.

MARTHA, Luiz Fernando. Introdução à Análise de Estruturas. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 7 p.

MATEUS, Cátia Patrícia Rodrigues. Aplicação de Resinas Epóxi no Tratamento de Fissuras em Rebocos Exteriores. Vila Real, Portugal, 2009. 94 p.

PORMIN, Ministério de Minas e Energia. Agregados Minerais para Construção Civil: Areia, Brita e Cascalho. Brasil. 6 p.

ROCHA, Andrea Corrêa; OLIVEIRA, Maria das Graças Duarte; RESENDE, Paulo Sérgio Oliveira; CHAER, Alberto Vilela. Ensaios de Stuttgart – Reprodução em Laboratório. 14 p.

SÜSSEKIND, José Carlos, Curso de Concreto. Vol. I, Editora Globo, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.