

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HUMBERTO KUSZKOWSKI

**TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE REFORÇO DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: UMA APLICAÇÃO DO  
MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

HUMBERTO KUSZKOWSKI

**TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE REFORÇO DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: UMA APLICAÇÃO DO  
MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)***

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. M. Eng. Carlos Alberto da Costa

CURITIBA

2017



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
*Campus Curitiba – Sede Ecoville*  
**Departamento Acadêmico de Construção Civil**  
**Curso de Engenharia Civil**

---

**TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE REFORÇO DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: UMA APLICAÇÃO DO  
MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)***

Por

**HUMBERTO KUSZKOWSKI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

---

Orientador – Prof. Carlos Alberto da Costa, M. Eng.  
UTFPR

---

Prof. Amacin Rodrigues Moreira, M. Eng.  
UTFPR

---

Prof. Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Mestres e futuros colegas de profissão que fizeram e fazem de seu ofício ferramenta de transformação na vida de cada futuro Engenheiro. Agradeço imensamente ao aprendizado e as experiências transmitidas pelos professores do DACOC e da UTFPR que moldaram minha visão e conhecimento.

Ao professor, engenheiro e amigo Carlos Alberto da Costa, por mostrar o caminho da ética profissional, e acreditar em mim proporcionando minha primeira vivência em canteiro de obras. Ao engenheiro Felipe Ferrante, Michel El Achkar e todos os colaboradores com quem trabalhei na Construtora Sustentare.

À minha família que sempre me incentivou a seguir meus objetivos acadêmicos, profissionais e pessoais. Ao meu pai, meu melhor amigo e em quem me espelho para atingir meus objetivos. Ao meu irmão, eterno parceiro na caminhada da vida. À minha mãe, sempre compreensiva e que é meu porto seguro. Aos meus avós que foram os alicerces da minha existência, só posso ser cheio de gratidão.

À minha namorada e futura esposa por me apoiar em cada momento de dificuldade ou alegria. Pelo seu amor imensurável, pois a minha maior alegria é estar ao seu lado.

A Deus por proporcionar a jornada da vida e abençoar à todos ao meu redor com Tua graça.

## RESUMO

KUSZKOWSKI, Humberto. Tomada de decisão entre sistemas de reforço de estruturas em concreto armado: uma aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). 2017. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta uma abordagem dos principais métodos para reforço estrutural em vigas de concreto armado, para edificações que sofrerão aumento das solicitações devido a mudanças no seu uso ou ampliações e reformas. Os métodos analisados são o de aumento da seção do elemento, colagem de chapas de aço e uso de compósitos de fibra de carbono. São abordados critérios técnico-construtivos, o cálculo estrutural para cada tipo de reforço e o custo dos materiais e mão-de-obra para execução. Através da coleta e avaliação de dados utilizando-se de um estudo de caso de reforço estrutural de uma edificação comercial na cidade de Curitiba - PR, a investigação apresentada traz como resultado uma proposta de análise hierárquica para tomada de decisão na escolha do tipo de reforço estrutural em vigas de concreto armado.

**Palavras-chave:** Estruturas em concreto armado. Reforço estrutural de vigas. Colagem de Chapas de Aço. Compósito de fibra de carbono. Encamisamento. Método de análise hierárquica. Tomada de decisão.

## ABSTRACT

KUSZKOWSKI, Humberto. Decision-making in RC structures strengthening systems: application of *Analytic Hierarchy Process* in a case study. 2017. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This study approaches the main strengthening methods for reinforced concrete beams for buildings that are going to have loading increases due to changes in utilization purposes or expansion and renovation. The evaluated strengthening methods are increase of the cross-section of RC beams, steel plate surface bonding and use of carbon fiber reinforced polymer. Construction techniques, structural design for each type of strengthening method and labor and construction materials costs are evaluated. Using data collection and analysis of a structural strengthening case study in an office building in Curitiba – PR, the thesis brings as result a proposal of analytic hierarchy process to improve the decision-making process in correlated situations where RC beam strengthening is necessary.

**Keywords:** Reinforced concrete structures. RC beam strengthening. Steel plate bonding. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Concrete jacketing. Analytic hierarchy process. Decision making.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MOTIVOS PARA A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.....	16
FIGURA 2 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE VIGA REFORÇADA POR ENCAMISAMENTO TOTAL.....	18
FIGURA 3 - USO DE CHAPAS DE AÇO COLADAS PARA AUMENTO DE RESISTÊNCIA DE VIGAS A FLEXÃO E AO CISALHAMENTO, RESPECTIVAMENTE. ....	19
FIGURA 4 – (A) DIAGRAMA TENSÃO VS. DEFORMAÇÃO DAS FIBRAS. (B) COMPARAÇÃO COM O AÇO CA-50. ....	22
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE CARBONO UNIDIRECIONAL. ....	23
FIGURA 6 - PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO POR APICOAMENTO. ....	28
FIGURA 7 - ESQUEMA DE DOBRAGEM DO ESTRIBO.....	29
FIGURA 8 - PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE FÔRMAS E ESCORAMENTO. ....	30
FIGURA 9 - RESULTADO FINAL DE VIGA REFORÇADA POR ENCAMISAMENTO. ....	31
FIGURA 10 - SUPERFÍCIES DECAPADA (ACIMA) E SUPERFÍCIE COM PINTURA ANTICORROSIVA (ABAIXO).....	32
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DE RESINA EPÓXI SOBRE A SUPERFÍCIE DA CHAPA. ....	32
FIGURA 12 - FIXAÇÃO DE CHAPA DE AÇO COM AUXÍLIO DE CHUMBADOR. ...	33
FIGURA 13 - SUAVIZAÇÃO DOS CANTOS VIVOS DAS VIGAS.....	34
FIGURA 14 - APLICAÇÃO DO IMPRIMADOR (PRIMER) COM ROLO.....	34
FIGURA 15 - ETAPAS CONSTRUTIVAS DOS SISTEMAS COMPOSTOS ESTRUTURADOS COM FIBRAS DE CARBONO. ....	35
FIGURA 16 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE TENSÕES NA SEÇÃO.....	36
FIGURA 17 - ESTADO TENSIONAL DE UMA VIGA REFORÇADA.....	38
FIGURA 18 - FORÇAS ATUANTES NA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	43
FIGURA 19 - FLUXO DE DECISÃO PARA OS MÉTODOS AHP, ELECTRE E PROMETHEE.....	47
FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DE APLICAÇÃO DO AHP. ....	50
FIGURA 21 - EXEMPLO DE HIERARQUIA DE CRITÉRIOS/OBJETIVOS.....	51

FIGURA 22 - DETALHAMENTO DA VIGA V11D.....	58
FIGURA 23 - DETALHE DA SEÇÃO 'A' DA VIGA V11 ORIGINAL.....	59
FIGURA 24 - CARREGAMENTO ESQUEMÁTICO DA VIGA V11 PRÉ-AMPLIAÇÃO (ACIMA) E PÓS-AMPLIAÇÃO (ABAIXO).....	66
FIGURA 25 - DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR DA VIGA V11.....	67
FIGURA 26 - DIAGRAMA DE ESFORÇO CORTANTE DA VIGA V11.....	67
FIGURA 27 - SEÇÃO PRELIMINAR DE REFORÇO POR ENCAMISAMENTO TOTAL.....	70
FIGURA 28 - DETALHAMENTO DO REFORÇO À FLEXÃO POR ENCAMISAMENTO TOTAL.....	72
FIGURA 29 - COMPRIMENTO E POSIÇÃO DO REFORÇO EM CHAPA DE AÇO.....	75
FIGURA 30 - DETALHAMENTO DO REFORÇO A FLEXÃO COM COLAGEM DE CHAPA DE AÇO.....	76
FIGURA 31 - DETALHAMENTO DO REFORÇO À FLEXÃO COM CFRP.....	79
FIGURA 32 - MODELO HIERÁRQUICO DE ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	88
FIGURA 33 - RESULTADOS DE PRIORIDADE PARA O GRUPO DE CRITÉRIOS.....	89
FIGURA 34 - RESULTADOS DE PRIORIDADE PARA O GRUPO DE ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO CUSTO DE EXECUÇÃO.....	91
FIGURA 35 - RESULTADOS DE PRIORIDADE PARA O GRUPO DE ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO TEMPO DE PARALISAÇÃO.....	91
FIGURA 36 - RESULTADOS DE PRIORIDADE PARA O GRUPO DE ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO SEGURANÇA ESTRUTURAL.....	92
FIGURA 37 - RESULTADOS DE PRIORIDADE PARA O GRUPO DE ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO VIABILIDADE TÉCNICA.....	92
FIGURA 38 - RESULTADO FINAL DA APLICAÇÃO DA AHP PARA ESCOLHA DA MELHOR ALTERNATIVA.....	93
FIGURA 39 - CARREGAMENTO NA VIGA V11.....	107
FIGURA 40 - PLANTA DE CARGAS DO SEGUNDO PAVIMENTO (PARTE 1/2).....	111
FIGURA 41 - PLANTA DE CARGAS DO SEGUNDO PAVIMENTO (PARTE 2/2).....	112
FIGURA 42 - TABELA DE REAÇÕES DE APOIO DAS LAJES.....	113

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MATRIZ COMPARATIVA (SUPONDO QUE CRITÉRIO 1 DOMINA O CRITÉRIO 2).....	52
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO PARA REFORÇO POR ENCAMISAMENTO DE SEÇÃO. ....	82
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO PARA REFORÇO COM CHAPA DE AÇO.....	84
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO PARA REFORÇO COM CFRP. ....	85
TABELA 5 - MATRIZ COMPARATIVA DO GRUPO DE CRITÉRIOS. ....	88
TABELA 6 - MATRIZ COMPARATIVA NORMALIZADA DO GRUPO DE CRITÉRIOS. ....	89
TABELA 7 - VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA MATRIZ COMPARATIVA DOS CRITÉRIOS.....	89
TABELA 8 - MATRIZ COMPARATIVA DAS ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO CUSTO DE EXECUÇÃO.....	90
TABELA 9 - MATRIZ COMPARATIVA DAS ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO TEMPO DE EXECUÇÃO.....	90
TABELA 10 - MATRIZ COMPARATIVA DAS ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO SEGURANÇA ESTRUTURAL.....	90
TABELA 11 - MATRIZ COMPARATIVA DAS ALTERNATIVAS À LUZ DO CRITÉRIO VIABILIDADE TÉCNICA.....	90

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS DAS FIBRAS DE CARBONO. .....	23
QUADRO 2 - COEFICIENTES DE DILATAÇÃO TÉRMICA DAS FIBRAS DE CARBONO. ....	24
QUADRO 3 - ANCORAGEM DAS ARMADURAS NA ESTRUTURA EXISTENTE. ...	28
QUADRO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS. ....	48
QUADRO 5 - ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY. ....	52
QUADRO 6 - ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA (RI). ....	55
QUADRO 7 - PARÂMETROS DA VIGA V11. ....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.2	TIPOS DE REFORÇO ESTRUTURAL	17
2.2.1	Aumento da Seção de Concreto Armado	17
2.2.2	Reforço com Chapas de Aço Coladas	19
2.2.3	Reforço com Compósito de Fibra de Carbono	20
2.3	PROCESSO DE EXECUÇÃO	27
2.3.1	Execução de Reforço de Viga Pelo Aumento da Seção	27
2.3.2	Execução de Reforço por Colagem de Chapas de Aço	31
2.3.3	Execução de Reforço por Colagem de <i>CFRP</i>	33
2.4	DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS EM VIGAS	35
2.4.1	Aumento de Seção da Viga (Encamisamento)	36
2.4.2	Colagem de Chapas de Aço	37
2.4.3	Reforço com Sistema de Fibra de Carbono ( <i>FRP</i> )	41
2.5	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)	45
2.5.1	Escolha do método AMD	46
2.5.2	Método de Análise Hierárquica ( <i>AHP</i> )	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>57</b>
3.1	VIGAS COM NECESSIDADE DE REFORÇO	57
3.1.1	Viga V11d	58
3.2	DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS	59
3.2.1	Planta de Cargas	59
3.2.2	Cargas e Reações nas Lajes	60
3.2.3	Carregamento na Viga	60
3.2.4	Combinação das Ações	60
3.2.5	Análise Estrutural da Viga	61
3.2.6	Dimensionamento do Reforço com Aumento de Seção de Concreto Armado	61
3.2.7	Dimensionamento do Reforço com Colagem de Chapas de Aço	61

3.2.8 Dimensionamento do Reforço com Utilização de <i>CFRC</i> .....	61
3.3 ORÇAMENTO ANALÍTICO .....	62
3.3.1 Cotação De Materiais.....	62
3.3.2 Cotação De Mão-De-Obra .....	62
3.4 MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA ( <i>AHP</i> ) .....	63
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS DA VIGA .....	65
4.1.1 Cargas e Reações nas Lajes .....	65
4.1.2 Carregamento na Viga V11 .....	65
4.1.3 Análise Estrutural da Viga V11.....	66
4.1.4 Verificação da Capacidade de Carga da Viga V11 .....	68
4.1.5 Reforço com Aumento de Seção de Concreto Armado (Encamisamento).....	69
4.1.6 Dimensionamento do Reforço com Colagem de Chapas de Aço .....	72
4.1.7 Dimensionamento do Reforço com Utilização de <i>CFRC</i> .....	76
4.2 ORÇAMENTO ANALÍTICO .....	80
4.2.1 Aumento de Seção da Viga.....	80
4.2.2 Colagem de Chapas de Aço .....	83
4.2.3 Compósito de Fibra de Carbono .....	84
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA ( <i>AHP</i> ) .....	86
4.3.1 Definição da Meta .....	86
4.3.2 Definição dos Critérios .....	86
4.3.3 Aplicação do Método <i>AHP</i> .....	87
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A alteração das características de estruturas existentes com o intuito de aumentar a capacidade de carga é observada em edificações e obras de arte de engenharia, que por razões estruturais necessitam ser reavaliadas e recalculadas. A necessidade de reforços em estruturas pode surgir não necessariamente pela deterioração e aparecimento de manifestações patológicas em elementos estruturais, mas pela mudança na utilização da estrutura, a qual acarretará num aumento de sobrecarga (CARNEIRO, 1998). Projetos de Ampliações que não forem previstos em edificações também alteram as solicitações no sistema estrutural já executado, que deve ser analisado fazendo-se novas considerações quanto as ações e esforços atuantes. Em certos casos, ocorrem erros de projeto, bem como, de execução da estrutura de concreto armado, sendo viável executar o reforço estrutural nos elementos afetados ao invés da demolição e reconstrução da estrutura já construída (BEBER, 2003).

Tornou-se, tanto ambientalmente, quanto economicamente, preferível adaptar as estruturas do que reconstruí-las, principalmente se métodos de reforço estrutural ágeis, efetivos e simples estão disponíveis (GARDEN e HOLLAWAY, 1998). Também é possível ocorrer situações em que a resistência característica do concreto não é atingida, podendo não satisfazer o desempenho necessário para atender as solicitações de projeto. Em todos esses casos, o reforço da estrutura torna-se a solução mais exequível de um ponto de vista prático e econômico.

A inclusão de novos elementos estruturais para o reforço estrutural, como pilares, muitas vezes não é uma opção viável do ponto de vista arquitetônico e de engenharia. Outro agravante é o de que, em muitos casos, a utilização das estruturas não pode ser interrompida durante longos períodos por questões econômicas envolvendo o cliente, onde a paralisação das atividades implica na redução do faturamento. Portanto, é essencial que a intervenção seja a mais breve possível, sem que haja prejuízos ao uso do espaço.

Dentre os métodos que se destacam pela sua utilização para a execução de reforço ou reabilitação estrutural, estão: (1) o encamisamento ou recobrimento da seção do elemento estrutural com concreto armado; (2) a colagem de chapas de aço

utilizando resina epóxi; (3) a aplicação de compósitos de fibra de carbono; (4) a reestruturação utilizando perfis metálicos; (5) o uso do aço como protensão externa.

Nesse contexto, utilizou-se um estudo de caso de uma obra de ampliação de um edifício comercial na cidade de Curitiba – PR, onde foi feito o uso de reforço estrutural em vigas de concreto armado utilizando-se o *método de encamisamento* e o *método de colagem de chapas de aço com resina epóxi*. Esse caso serviu de base para o estudo das duas soluções de reforço estrutural citadas, e ainda, optou-se em incluir na pesquisa uma terceira possibilidade utilizando compósitos de fibra de carbono. Os dados coletados foram utilizados para a aplicação do Método de Análise Hierárquica (*AHP*), possibilitando a comparação entre os métodos de reforço estrutural, de forma a auxiliar engenheiros coordenadores de projetos na tomada de decisão em situações análogas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é apresentar o comparativo de alternativas de reforços estruturais utilizando o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, avaliando os métodos de encamisamento de seção, colagem de chapas de aço e uso de fibra de carbono em vigas de concreto armado, abordando o seu dimensionamento, aspectos e detalhes executivos e de custos, com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver o orçamento analítico para aplicação de cada uma das três soluções de reforço propostas;
- Comparar aspectos executivos e de custo dos métodos de reforço abordados, aplicando o método de análise hierárquica (*AHP*) como forma de auxílio na escolha do método;
- Determinar o melhor método de reforço estrutural para o caso em questão, de acordo com os resultados obtidos aplicando o *AHP*.

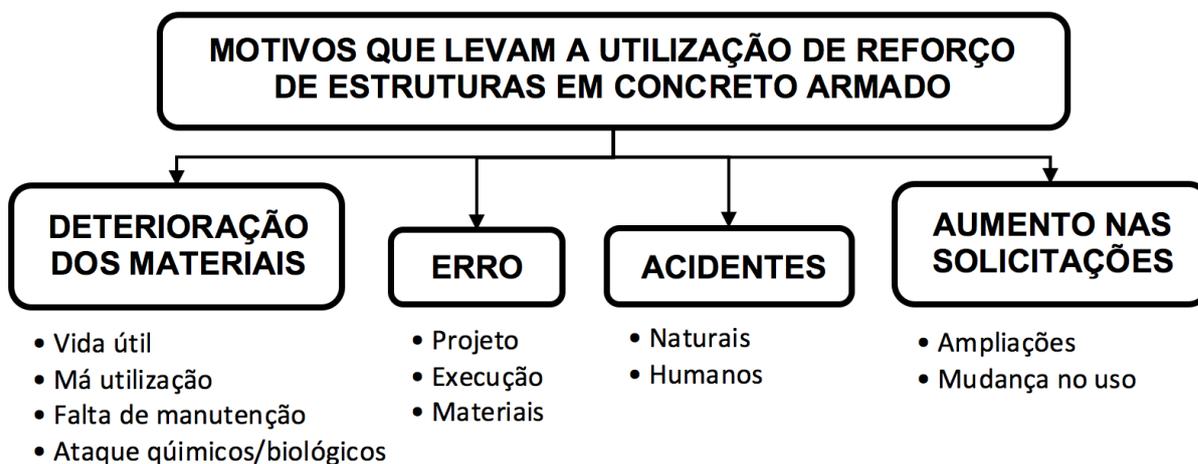
### 1.3 JUSTIFICATIVA

A definição de um sistema de reforço estrutural para elementos em concreto armado é crucial para obras que necessitam de reabilitação estrutural e deve ser feita baseando-se nas condições nas quais os reforços serão executados, os custos de execução e aspectos técnicos envolvidos. Através da análise de três sistemas de reforço de vigas em concreto armado, utilizando matrizes de decisão, este trabalho possibilita aos engenheiros calculistas e engenheiros gestores de projetos definirem de maneira racional e eficiente o sistema de reforço mais adequado para cada caso. A ideia impulsora deste trabalho foi um estudo de caso, onde optou-se em substituir, em parte do projeto, o sistema de reforço estrutural convencional por encamisamento, pelo sistema de reforço utilizando chapas de aço coladas em vigas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Reabilitação ou reforço de estruturas de concreto armado podem ser necessárias, tanto em estruturas antigas, quanto em estruturas novas. Estruturas de concreto armado antigas são reabilitadas e reforçadas para prolongar sua vida útil. Muitas pontes antigas, por exemplo, precisam ser reforçadas, adaptando-as as cargas móveis dos dias atuais. Em construções novas, existem casos de fissuração do concreto devido a erros de projeto, de execução, ou ambos. Por exemplo, o concreto não atingiu a resistência característica de projeto ou a distribuição de armaduras não foi feita adequadamente (SENIWONGSE, 2008). Existem diversas causas da necessidade de reforço em estruturas de concreto armado, como a alteração da utilização da edificação (FERRARI, PADARATZ e LORIGGIO, 2002) e outras, que são ilustradas na Figura 1.



**Figura 1 - Motivos para a utilização de reforço de estruturas em concreto armado.**  
 Fonte: Adaptado de Carneiro (1998).

Tornou-se ambientalmente e economicamente preferível reabilitar ou reforçar estruturas de concreto armado que não apresentam o desempenho desejado do que as substituir. A escolha entre a reconstrução e reabilitação é baseada em fatores específicos para cada caso individual. O reforço dessas estruturas é desejável se técnicas de *retrofitting* ágeis, econômicas, efetivas e simples estiverem disponíveis. Dentre os diferentes métodos de reforço estrutural de vigas em concreto armado estão a colagem de chapas metálicas, as mantas/tiras de compósitos como GFRP (*glass-fibre-reinforced plastic*) e CFRP (*carbon-fibre-reinforced polymer*). Outros métodos

apresentam o uso de protensão externa utilizando cabos de aço e aumento da seção de concreto armado (encamisamento) (ALSHAIKHLI, ALAM e MUSTAPHA, 2016).

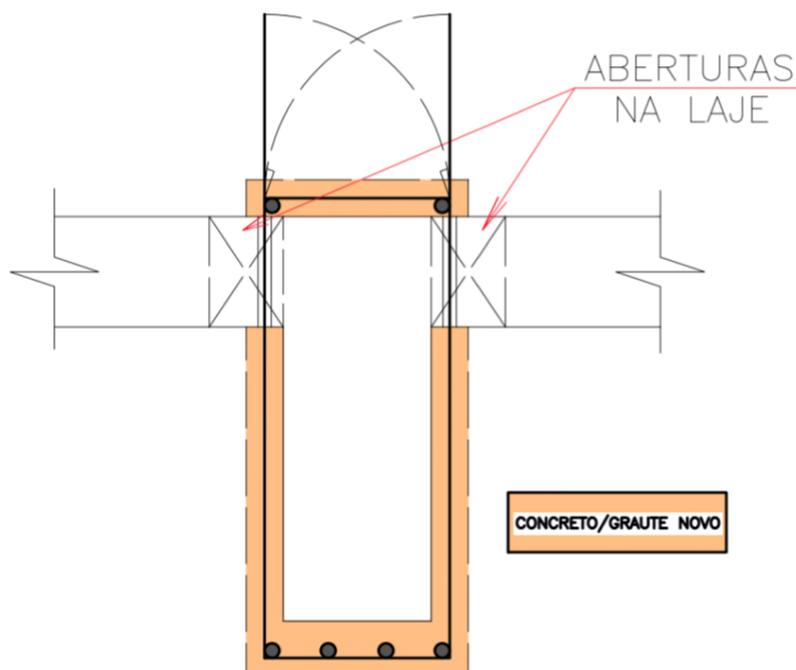
O dimensionamento de reforço de uma estrutura é algo que difere do dimensionamento de uma estrutura nova, pois há a necessidade de análise do comportamento da estrutura antiga ao longo do tempo, estudo de sua deformação e chance de colapso. Em geral, a execução de um reforço estrutural é mais complicado, pois exige a compatibilização entre o material novo e o existente. Outro agravante é o fato de que a edificação em tratamento, possivelmente continuará em funcionamento durante a execução do reforço, assim como os projetos e documentação existentes não retratarem a realidade no local (NAKAMURA, 2009).

## 2.2 TIPOS DE REFORÇO ESTRUTURAL

### 2.2.1 Aumento da Seção de Concreto Armado

A técnica de adição de concreto com ou sem aço à seção transversal do elemento, também conhecida por encamisamento da seção, é relativamente simples, pois utiliza os materiais mais comuns da construção civil, que são o aço e o concreto. Isso faz com que o custo da reabilitação seja bastante competitivo quando comparado a outras técnicas de reabilitação estrutural, sendo uma das mais utilizadas no Brasil (CÁNOVAS, 1988).

No caso do reforço de vigas por encamisamento, geralmente adiciona-se uma nova camada de concreto, com ou sem barras de aço na face tracionada ou na face comprimida, logo o reforço envolverá apenas parcialmente a seção original da estrutura existente. Porém, nada impede que o encamisamento seja feito em todo o contorno do elemento estrutural, sendo chamado de encamisamento total, conforme a Figura 2. (SILVA, LISERRE e SILVA, 2012).



**Figura 2 - Seção transversal de viga reforçada por encamissamento total.**  
**Fonte: Adaptado de Procalc (2016).**

As maiores desvantagens dessa técnica são o aumento razoável da carga permanente da estrutura reforçada e o efeito da retração que acarreta problemas de aderência e fissuração entre a camada nova e o elemento antigo (CARNEIRO, 1998). Além disso, o aumento da seção trará interferência arquitetônica negativa, o que pode não ser adequado para determinados casos. Outro agravante é o tempo necessário para que a estrutura possa ser colocada em serviço (REIS, 2001).

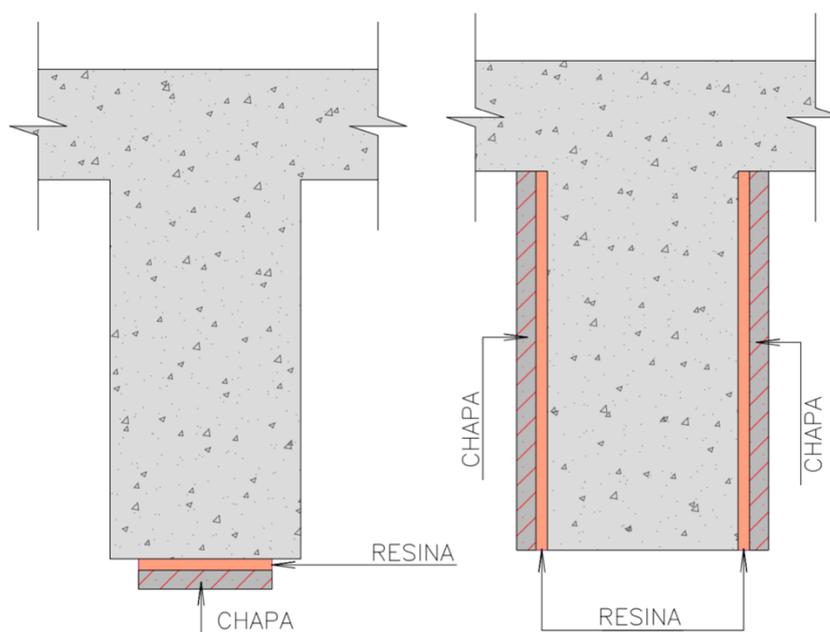
Trata-se da única alternativa viável de reforço de viga ao cisalhamento quando a tensão na biela é maior que o limite estabelecido por norma (VIANA, 2004).

O comportamento e desempenho imediatos de vigas reforçadas através do aumento das seções de concreto e aço da zona tracionada, podem ser previstos pelos critérios da ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto, estando a viga original, no momento do reforço, solicitada ou não. As fissuras já existentes na viga a ser reforçada podem ser desconsideradas nos cálculos, assumindo-se funcionamento conjunto dos dois concretos envolvidos, desde que a aderência entre eles seja constatada. Entretanto, as deformações e deslocamentos já existentes no momento do reforço devem ser considerados (PIANCASTELLI, 1997).

### 2.2.2 Reforço com Chapas de Aço Coladas

A técnica de colagem externa de chapas de aço em elementos estruturais tem sido usada mundialmente por mais de cinco décadas. Dentre as vantagens, em comparação com outros métodos, está a minimização da área de trabalho, diminuição do custo total, facilidade de manutenção e a possibilidade de reforçar parte da estrutura ainda em uso (ALSHAIKHLY, ALAM e MUSTAPHA, 2016).

O uso de placas de aço externas coladas é uma técnica comum para o reforço e reabilitação de vigas em concreto armado (Figura 3). A técnica proporciona o aumento e restauração da capacidade de carga de vigas de forma eficiente, pois as propriedades de tensão-deformação e a sua alta capacidade de deformação do aço de baixo teor de carbono contribuem para a ductilidade da viga como um todo (AYKAC *et al.*, 2013).



**Figura 3 - Uso de chapas de aço coladas para aumento de resistência de vigas a flexão e ao cisalhamento, respectivamente.**  
Fonte: Adaptado de Procalc (2016).

Segundo Bauer (2009), a adesividade é a propriedade fundamental nesta técnica de reforço, e está relacionada a qualidade do adesivo, as condições das superfícies dos materiais ligados e as propriedades destes materiais.

Contudo, a técnica apresenta como principal desvantagem a descolagem prematura na interface entre adesivo e aço, o que acaba afetando adversamente a resistência da ligação e impede que a viga de concreto armado de atingir sua total capacidade resistente. A solução mais efetiva para prevenir esse problema é o uso de ancoragens mecânicas, como chumbadores (ALSHAIKHLI, ALAM e MUSTAPHA, 2016).

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

Outras desvantagens apresentadas pelo método de colagem de chapas (VIANA, 2004) são:

- Não permitir a visualização das fissuras na região sob o esforço, para inspeção da estrutura;
- Impossibilidade de detectar corrosão na face oculta da chapa;
- Baixa resistência do sistema à ação do fogo, sendo, portanto necessária uma proteção por meio de revestimento isolante (pintura intumescente ou similar).

### 2.2.3 Reforço com Compósito de Fibra de Carbono

Materiais compósitos fabricados com fibras e cobertos com resinas poliméricas, também conhecidos como *fiber-reinforced polymers (FRPs)*, tem sido usado como alternativas para o uso de materiais tradicionais de reparo e reforço de estruturas. Um sistema de compósito reforçado com fibras pode ser definido como as fibras e resinas utilizadas para fabricação do compósito laminado, as resinas utilizadas para aderir e colar a manta ao substrato (concreto) e todos os revestimentos usados para proteger os materiais constituintes (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

A aplicação de compósitos de fibra de carbono no reforço de estruturas em concreto armado é o que há de mais moderno e vem sendo utilizada em substituição ao uso das tradicionais chapas de aço (BEBER, 2003). O crescimento no interesse

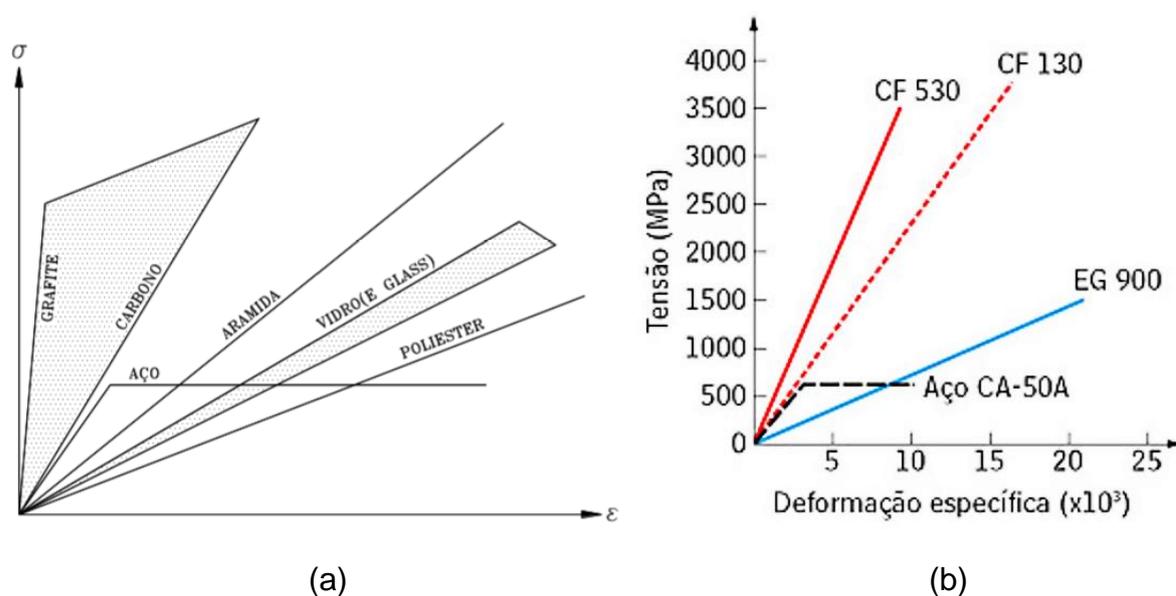
pelo uso de sistemas de reforço estrutural com compósitos reforçados com fibras pode ser atribuído a alguns fatores, como a sua rápida aplicação. Apesar do custo das fibras e resinas usados nos compósitos serem relativamente alto comparado com os materiais tradicionais, como o aço e o concreto, o custo da mão-de-obra e dos equipamentos para execução desse tipo de sistema são normalmente menores (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Diferentemente do aço, os compósitos de fibra de carbono não são afetados pela corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de ácidos, álcalis, sais e outros agentes agressivos (GARDEN e HOLLAWAY, 1998). Entretanto, é recomendado precaução na aplicação de *FRP* em locais submetidos a condições ambientais extremas e altas solicitações de tração simultaneamente (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

#### 2.2.3.1 Propriedades físicas e mecânicas da fibra de carbono

As fibras de carbono são fabricadas através do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas, tais como poliacrilonitril (PAN), ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte. O processo consiste na oxidação dessas fibras precursoras e no tratamento a elevadas temperaturas, que chega a atingir entre 1000°C e 1500°C, para fibras de carbono, e até 3000°C, para as fibras de grafite (MACHADO, 2014).

Segundo Machado (2014), nesse processo térmico as fibras resultantes apresentam átomos perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que confere extraordinária resistência mecânica ao produto final. O comportamento de tensão e deformação dessas fibras resultantes é observado na Figura 4.

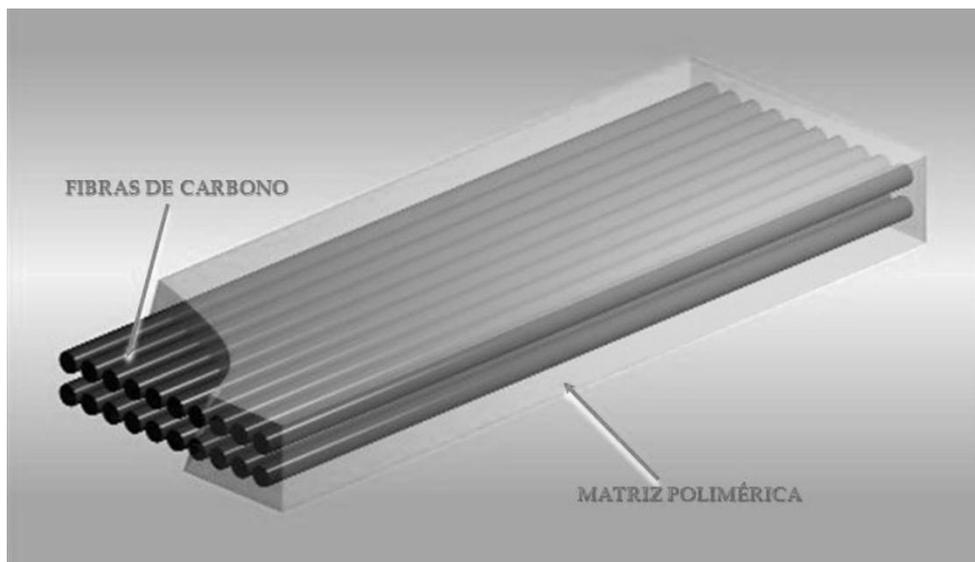


**Figura 4 – (a) Diagrama Tensão vs. Deformação das fibras. (b) Comparação com o aço CA-50. Fonte: Machado (2014).**

Observa-se no gráfico da Figura 4 as variadas especificações que as fibras de carbono (CF) e fibra de vidro (EG) apresentam, podendo apresentar grande variação na resistência à tração e no módulo de elasticidade.

Ainda, segundo Machado (2014), quanto maior a temperatura em que o processo industrial é realizado, maior será o módulo de elasticidade do material resultante, que varia entre 100GPa e 300GPa, para fibras de carbono, e até 650GPa, para fibras de grafite. Proporcionalmente ao módulo de elasticidade está o custo do material, que no caso da fibra de grafite acaba custando ente 15 a 20 vezes mais do que a fibra de carbono com menor módulo de elasticidade.

Quando solicitados diretamente a tração, mantas *FRP* unidirecionais (Figura 5) não apresentam nenhum comportamento plástico antes da ruptura. O comportamento mecânico de materiais *FRP* fabricado com somente um tipo de fibra é caracterizado por uma relação de tensão-deformação linear elástica até sua ruptura, que é repentina e frágil (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).



**Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de carbono unidirecional.**  
**Fonte: Adaptado de Machado (2014).**

Quanto ao comportamento do material a compressão este tipo de sistema não deve ser usado como reforço estrutural, devido a falta de testes que validem esse tipo de aplicação (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Segundo o *American Concrete Institute* (2008) os intervalos de valores das propriedades mecânicas dos sistemas de reforço *CFRP* podem ser tabulados (Quadro 1) em categorias de acordo com o método de teste 16-90 da *Suppliers of Advanced Composite Materials Association*.

Tipo de Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (MPa)	Deformação mínima na ruptura (%)
Uso geral	220 - 235	< 3790	> 1,2
Alta resistência	220 - 235	3790 - 4825	> 1,4
Ultra alta resistência	220 - 235	4825 - 6200	> 1,5
Alto módulo	345 - 515	> 3100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 - 690	> 2410	> 0,2

**Quadro 1 - Propriedades mecânicas típicas das fibras de carbono.**  
**Fonte: Adaptado de Machado (2014).**

O coeficiente de expansão térmica de materiais *FRP* com fibras unidirecionais difere nas direções longitudinais e transversais, dependendo do tipo de fibra, resina e a fração do volume contendo fibras. O Quadro 2 lista os coeficientes de expansão térmica típicas para materiais *FRP* unidirecionais (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Direção	Coefficiente de dilatação térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Longitudinal( $\alpha_L$ )	$-10^{-6}$ a 0
Transversal ( $\alpha_T$ )	$22 \times 10^{-6}$ a $23 \times 10^{-6}$

Quadro 2 - Coeficientes de dilatação térmica das fibras de carbono.  
Fonte: Adaptado de ACI (2008).

Segundo Machado (2014), as principais características de sistemas compostos que utilizam fibras de carbono como elemento resistente são:

- Extraordinária resistência mecânica;
- Extraordinária rigidez;
- Bom comportamento à fadiga e cargas cíclicas;
- Elevada resistência a ataques químicos diversos;
- Não são afetados pela corrosão por se tratar de um produto inerte;
- Estabilidade térmica e reológica;
- Baixo peso específico, variando entre  $1,6\text{g/cm}^3$  a  $1,9\text{g/cm}^3$ , desprezando seu peso próprio no cálculo dos reforços.

#### 2.2.3.2 Materiais utilizados para reforço com FRP

Os materiais que constituem o sistema FRP disponíveis comercialmente incluem resinas, *primers*, resinas de saturação, adesivos, fibras e revestimentos de proteção foram desenvolvidos para o reforço estrutural de membros de concreto, baseado em ensaios dos materiais e suas resistências estruturais (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008). Os materiais utilizados e suas principais características são listados a seguir.

##### 2.2.3.2.1 Resinas

Uma vasta gama de resinas poliméricas, incluindo *primers*, resinas para saturação e adesivos são usados nos sistemas FRP (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008). Os tipos de resinas mais utilizados incluem epóxi, ésteres de vinil e poliésteres, sendo formuladas para uso em diversas condições de agressividade ambiental. Entre as principais características esperadas estão:

- Compatibilidade de adesão entre o compósito de FRP e o concreto;
- Resistência a efeitos ambientais incluindo umidade, salinidade, temperaturas extremas e substâncias químicas associadas com a exposição ao concreto;

- Capacidade de preenchimento de vazios em superfícies rugosas;
- Trabalhabilidade.

Os tipos de resina utilizados têm propriedades e utilização específicas:

- *Primer:*

O *primer* é um composto utilizado para penetrar os vazios da superfície do concreto, garantindo uma melhoria de ligação adesiva para a resina de saturação ou o adesivo epóxi.

- Resina de saturação:

A resina de saturação é utilizada para impregnar as fibras de reforço, fixá-las no local de aplicação e promover uma ponte de resistência à tensão de cisalhamento transmitida entre uma fibra e outra. Além de promover a resistência ao cisalhamento entre as fibras, a resina de saturação serve de adesivo para reforços de múltiplas camadas, garantindo a resistência ao cisalhamento entre camadas.

- Adesivos:

Adesivos são utilizados para fazer a ligação entre a camada de *FRP* e o substrato (concreto) e para fazer a ligação entre múltiplas camadas.

#### 2.2.3.2.2 Fibras

Os principais tipos de fibra utilizado nesse tipo de sistema de reforço são a fibra de vidro, fibra de aramida (*kevlar*) e a fibra de carbono. As fibras garantem a resistência e a rigidez dos sistemas *FRP*. As fibras podem ser fabricadas em forma de mantas, com o posicionamento unidirecional ou multidirecional das fibras.

#### 2.2.3.2.3 Camadas de proteção

As camadas de proteção servem para proteger o reforço de *FRP* colado externamente de potenciais danos causados por efeitos ambientais e mecânicos. Tipicamente, essas camadas são aplicadas sobre a superfície do sistema *FRP* após a cura do adesivo ou da resina. Dentre as razões para as quais se utiliza sistemas de proteção estão a proteção da resina epóxi contra a luz UV; a proteção a incêndio; o

vandalismo; o impacto ou abrasão; a estética; a resistência química e a submersão em água potável.

Os sistemas de proteção são disponíveis em uma variedade de formas, incluindo:

- Camadas de polímero epóxi ou poliuretano;
- Camadas de acrílico;
- Sistemas cimentícios (argamassas);
- Pinturas intumescentes a base de polímeros, que são utilizadas para controle de chamas e controle da geração de fumaça à queima.

#### 2.2.3.3 Comportamento ante a ação do fogo

A capacidade de reforço que pode ser atingida pelo uso de *FRP* colado externamente é geralmente limitado ao tempo de resistência ao fogo que uma estrutura pode resistir. De acordo com a ABNT NBR 14432:2001 – *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento*, as exigências de tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) são definidos de acordo com a ocupação da edificação.

As resinas poliméricas e as resinas adesivas atualmente utilizadas nos sistemas de reforço *FRP* sofrem deterioração mecânica e das propriedades de ligação em temperaturas próximas ou que excedam a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), que é sempre menor a temperatura de fusão do material ( $T_f$ ). Enquanto a variação da  $T_g$  pode ser significativa, dependendo da composição química do polímero, o intervalo típico para resinas e adesivos de aplicação prática é entre 60°C e 82°C (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Apesar da baixa resistência do sistema *FRP* ante a ação do fogo, a combinação do sistema com sistema *FRP* com uma estrutura de concreto existente pode apresentar níveis adequados de resistência ao fogo. Isso ocorre devido a camada de proteção que pode melhorar o tempo de resistência ao fogo do elemento de concreto armado reforçado, fornecendo proteção aos componentes, ao concreto e ao aço. A camada de proteção pode retardar a degradação da resistência do concreto e do aço devido a ação do fogo, aumentando suas resistências residuais. Portanto,

com uma camada de proteção adequada, o nível de resistência ao fogo de um elemento pode ser aumentado mesmo ignorando a contribuição do reforço de *FRP* (BISBY, GREEN e KODUR, 2005).

## 2.3 PROCESSO DE EXECUÇÃO

### 2.3.1 Execução de Reforço de Viga Pelo Aumento da Seção

Para reforçar as vigas de concreto armado utilizando o aumento da seção de concreto armado é necessário que exista espaço suficiente para a colocação de um sistema de fôrmas e de escoramento, permitindo que o concreto seja moldado em torno da seção da viga. Em casos específicos onde existem paredes sob a viga, o que não é incomum, faz-se necessário a remoção total ou parcial da parede para o posicionamento das fôrmas e escoramento (SOUZA e RIPPER, 1998).

A espessura mínima recomendada da camada de concreto está relacionada com o tipo de concreto a ser empregado (uso de superplastificantes), e pelo tamanho máximo do agregado utilizado (CÁNOVAS, 1988). Por essa razão, é desejável não utilizar espessuras menores do que 10 cm para concreto convencional, podendo-se chegar até 6 cm com uso de concreto auto adensável e brita tipo '0', dependendo das bitolas das armaduras.

#### 2.3.1.1 Preparação da superfície

Segundo Silva, Lissere e Silva (2012), faz-se necessário realizar a escarificação da superfície do concreto existente, garantindo uma aderência adequada entre o reforço (concreto novo) e o concreto original da peça (substrato), evitando o deslizamento entre as partes e permitindo o funcionamento monolítico do elemento. Pode-se fazer o processo manualmente com o auxílio de ponteira e martelo. Após, faz-se necessário escovar a superfície rugosa para remover todo pó e material solto.

Outra técnica de preparação da superfície consiste em apicoar a superfície da viga (Figura 6) removendo a nata de cimento superficial, eliminando material solto ou comprometido, deixando a face rugosa para aumentar a aderência (PROCALC, 2016). O processo pode ser feito com o auxílio de martetele leve e ponteira metálica. Após

apicoar a superfície, deve-se lavá-la com jato de água para retirar partículas soltas, pó, graxa, impregnação de óleo ou restos de pintura.



**Figura 6 - Preparação do substrato por apicoamento.**  
Fonte: O autor (2016).

O apicoamento é um processo necessário para garantir que a camada de concreto novo seja solicitada na mesma proporção que o concreto da seção original, trabalhando como um único elemento (REIS, 2001)

### 2.3.1.2 Colocação das armaduras

Primeiramente são feitas as perfurações nas vigas, pilares e lajes de acordo com a disposição das armaduras constantes no projeto do reforço. Os furos devem seguir diâmetros específicos (Quadro 3) de acordo com a bitola da armadura que será ancorada na estrutura existente (PROCALC, 2016).

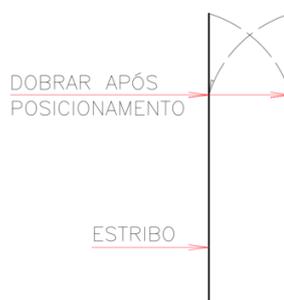
Diâmetro da Armadura (A)	Diâmetro da Broca (B)	Profundidade da Ancoragem (C)	Exemplificação
6,3 mm	5/16"	8 cm	
8,0 mm	3/8"	10 cm	
10 mm	1/2"	12 cm	
12,5 mm	5/8"	15 cm	
16mm	3/4"	20 cm	
20 mm	1"	25 cm	
25 mm	1.1/4"	30 cm	

**Quadro 3 - Ancoragem das armaduras na estrutura existente.**  
Fonte: Adaptado de PROCALC (2016).

Deve-se tomar cuidados especiais para que na execução dos furos, a broca não danifique as armaduras existentes. Também são executados furos para

colocação dos estribos que atravessam a laje e aberturas na laje para que o graute ou concreto possam ser lançados (PROCALC, 2016).

Após a preparação das esperas, são fixadas as barras de aço longitudinais e, logo após, são colocados os estribos que são dobrados após seu posicionamento (Figura 7).



**Figura 7 - Esquema de dobragem do estribo.**  
**Fonte: Adaptado de PROCALC (2016).**

Todas as amarrações são executadas com arame de aço recozido e as ancoragens das esperas feitas com adesivo estrutural epóxi de média fluidez. Além disso, são colocados os espaçadores para garantir o cobrimento das armaduras de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6118:2014.

#### 2.3.1.3 Preparação do sistema de fôrmas e escoramento

Imediatamente após a colocação das armaduras longitudinais e transversais, o fundo da fôrma e escoramento são posicionados (Figura 8), permitindo a fixação das laterais da fôrma (SILVA, LISERRE e SILVA, 2012).



**Figura 8 - Preparação do sistema de fôrmas e escoramento.**  
**Fonte: O autor (2016).**

É importante garantir a estanqueidade nas juntas das fôrmas, pois o concreto utilizado é de alta fluidez (auto adensável) ou graute (PROCALC, 2016).

#### 2.3.1.4 Concretagem e cura

Após a verificação das armaduras, verificação da estanqueidade do sistema de fôrmas e do correto escoramento, a concretagem é liberada. O concreto utilizado é do tipo auto adensável com alto abatimento do tronco de cone, utilizando brita de graduação 0 (pedrisco) como agregado graúdo, permitindo que o concreto flua através das aberturas criadas na laje sobre a viga a ser reforçada e, dessa forma, evitando a formação de vazios (PIANCASTELLI, 1997).

Deve-se fazer o controle tecnológico, coletando no mínimo quatro corpos de prova (10x20) cm para cada carga de concreto. Os resultados dos ensaios são obtidos com a ruptura dos corpos de prova aos 7 dias e 28 dias de cura (TOMAZ, SOARES e BARBOSA, 2014). Por critério do engenheiro calculista ou engenheiro coordenador de projetos pode-se moldar mais corpos de prova para rompimento em diferentes idades.

O resultado final é uma viga de concreto armado convencional (Figura 9), porém com seção transversal aumentada. A retirada das fôrmas da lateral da viga pode ser feita após 24 horas da concretagem, mantendo o escoramento sob o fundo da viga.



**Figura 9 - Resultado final de viga reforçada por encamisamento.  
Fonte: O autor (2016).**

Após a verificação da obtenção da resistência característica de projeto por meio do controle tecnológico, retira-se o fundo da fôrma e parte do escoramento, permanecendo a viga reescorada até atingir idade de 28 dias (PIANCASTELLI, 1997).

### 2.3.2 Execução de Reforço por Colagem de Chapas de Aço

#### 2.3.2.1 Preparação da superfície

A colagem externa de chapas de aço ao concreto requer a utilização de resinas com altas capacidades de aderência e resistência mecânica, como as resinas epóxi estruturais. Para tanto, é necessário que a superfície da chapa metálica que ficará em contato com a resina apresente determinada rugosidade (SOUZA e RIPPER, 1998).

A superfície do concreto deverá ser limpa, removendo-se partículas soltas de pó, graxa, impregnação de óleos ou restos de pintura. Além disso, é importante que o substrato esteja regularizado, permitindo o contato total da superfície da chapa de aço (PROCALC, 2016).

É necessário que o aço seja submetido à decapagem por jato abrasivo para que a oleosidade das chapas seja removida e que a superfície tenha o máximo de capacidade aderente (CÁNOVAS, 1988). Na face oposta ao lado da colagem, deve-se fazer o tratamento com pintura anticorrosiva (Figura 10).



**Figura 10 - Superfícies decapada (acima) e superfície com pintura anticorrosiva (abaixo).  
Fonte: O autor (2016).**

Segundo Ripper e Souza (1998), após a decapagem as superfícies a colar devem ser protegidas com filme autocolante apropriado, de forma a prevenir contra sujeira ou agressão ambiental durante o transporte, manuseio e armazenagem.

### 2.3.2.2 Fixação das chapas

Após a aplicação da resina de epóxi sobre a face a ser colada (Figura 11), seguindo a recomendação de projeto de espessura da camada de resina, as chapas são posicionadas no local. Para que a colagem seja efetiva, deve-se submeter as chapas a uma ligeira pressão, uniforme, expulsando o excesso de resina que é prejudicial a resistência de aderência (CÁNOVAS, 1988).



**Figura 11 - Aplicação de resina epóxi sobre a superfície da chapa.  
Fonte: O autor (2016).**

Pode-se usar pinos chumbadores nas extremidades das chapas para auxiliar a fixação em posições verticais (Figura 12). Este elemento trabalhará como contribuição mecânica à transferência de esforços entre a viga de concreto armado e a chapa (CÁNOVAS, 1988). Outra possibilidade para manter as chapas no local é fazer o uso de escoramento ou de cunhas de madeira cravadas entre um anteparo e a chapa. Essa pressão deve ser mantida até que tenha havido o endurecimento total

da resina, fator que depende da temperatura ambiente e varia conforme o fabricante, não devendo ser inferior ao tempo de 24 horas.



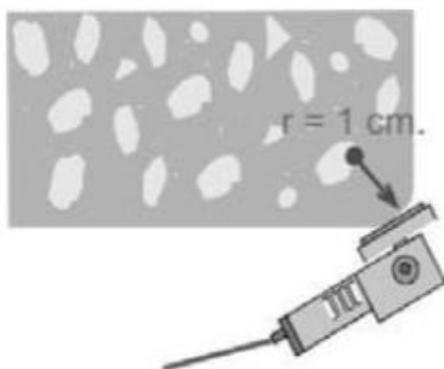
**Figura 12 - Fixação de chapa de aço com auxílio de chumbador.**  
**Fonte: O autor (2016).**

### 2.3.3 Execução de Reforço por Colagem de *CFRP*

No caso da aplicação do sistema composto em vigas, o objetivo é a adequada transferência de esforços entre os meios aderidos, sendo necessário um sistema de colagem bastante eficiente, caracterizando a condição crítica de colagem (MACHADO, 2014).

É necessário a limpeza da superfície com o uso de politrizes com lixas abrasivas acopladas, permitindo a remoção de poeira, pó, substâncias oleosas e graxas (BEBER, 2003).

Quando é necessário o recobrimento de mais de uma superfície lateral da viga, é necessário que se faça o arredondamento das quinas envolvidas nessa aplicação (Figura 13), visando evitar a concentração de tensões na fibra de carbono e eliminar eventuais vazios entre o concreto e o sistema por deficiência na colagem. Deve-se aplicar massa suavizadora apropriada nos cantos rugosos e lixar com a politriz (BEBER, 2003).



**Figura 13 - Suavização dos cantos vivos das vigas.**  
Fonte: Machado (2014).

Após a limpeza superficial, é feita a aplicação do imprimador (*primer*) com o objetivo de reduzir a porosidade do concreto, promovendo uma aderência adequada do substrato e preparando-a para receber as próximas etapas (TOMAZ, SOARES e BARBOSA, 2014). Depois de misturar o primer, deve-se aplicar no substrato limpo e seco utilizando trincha ou rolo, de maneira uniforme.



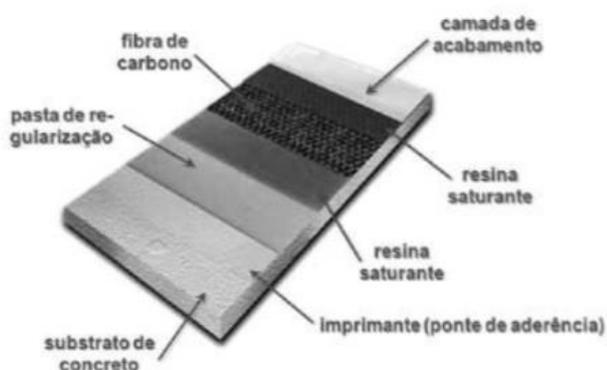
**Figura 14 - Aplicação do imprimador (Primer) com rolo.**  
Fonte: Tomaz, Soares e Barbosa (2014).

Caso existam falhas ou buracos maiores, que necessitem preenchimento mais profundo, é aplicado um regularizador de superfície (estucador).

Espera-se a secagem parcial do *primer* e do estucador, e então aplica-se a primeira camada de resina saturante (MACHADO, 2014). A aplicação é feita utilizando rolo de lã, de forma a criar uma camada uniforme sobre o substrato. Após alguns minutos, procede-se com a aplicação da manta de fibra de carbono sobre a resina saturante ainda em estado plástico. A fibra deverá ser pressionada firmemente contra

o substrato por meio de rolo com ranhuras metálicas, no sentido longitudinal das fibras, até a perfeita aderência (BEBER, 2003).

Após aproximadamente 40 minutos, aplica-se uma nova camada de resina saturante sobre a fibra de carbono (Figura 15).



**Figura 15 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono.**  
Fonte: Machado (2014).

Dessa maneira, caso o projeto exija mais camadas de fibra de carbono, repete-se a aplicação de mais uma camada de fibra de carbono e de resina saturante, sucessivamente (MACHADO, 2014).

A cura total do saturante é obtida após sete dias da aplicação do sistema de reforço. Deve-se inspecionar o serviço realizado num período de 24 horas após a instalação do sistema, realizando testes de aderência (MACHADO, 2014).

## 2.4 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS EM VIGAS

O dimensionamento é normalmente feito no estado limite último, sendo as diferenças entre os métodos apresentados apenas as deformações limites dos materiais e os diagramas de tensão - deformação no concreto adotados (VIANA, 2004).

Para o cálculo do reforço de uma viga de concreto armado devem ser efetuadas as seguintes verificações (MACHADO, 2014):

- Determinação do momento fletor majorado máximo que atuará na viga;

- Determinar o momento resistente à flexão da viga existente a partir das características geométricas da seção e das características mecânicas dos materiais constituintes da mesma;
- Se  $M_{resist.} > M_{maj.,max}$  a viga não necessitará de reforço à flexão. Se, entretanto,  $M_{resist.} < M_{maj.,max}$  a viga necessitará de reforço.

#### 2.4.1 Aumento de Seção da Viga (Encamisamento)

O dimensionamento estrutural à flexão e ao cisalhamento de vigas reforçadas pelo método do aumento de seção de concreto armado é feito da maneira convencional, utilizando os critérios da ABNT NBR 6118:2014. A técnica de encamisamento total da seção apresenta como vantagem o reforço simultâneo ao cisalhamento e a flexão, por conta do processo executivo (VIANA, 2004).

##### 2.4.1.1 Dimensionamento à flexão

O cálculo do dimensionamento do reforço para flexão baseia-se no diagrama de tensões da seção. Através do diagrama retangular simplificado de tensões na seção após o reforço são obtidas as expressões para este dimensionamento (VIANA, 2004).

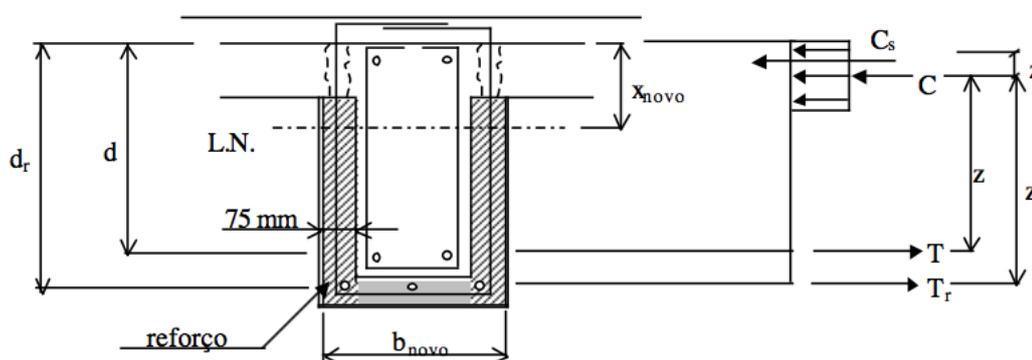


Figura 16 - Diagrama simplificado de tensões na seção.  
Fonte: Viana (2004).

Dessa maneira, obtém-se as relações abaixo:

$$M_{U,r} = T \cdot z + C \cdot z' + T_r \cdot z_r \quad (1)$$

Onde:  $T = A_s \cdot f_y$

$$C_s = A'_s \cdot f_y$$

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

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

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

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

Portanto:

$$M_{U,r} = A_s \cdot f_y \cdot z + A'_s \cdot f_y \cdot z' + A_r \cdot f_{y,r} \cdot z_r \quad (2)$$

Através do diagrama de tensões obtém-se também a equação para determinar a posição da linha neutra:

$$x_{novo} = \frac{A_s \cdot f_y \cdot z + A'_s \cdot f_y \cdot z' + A_r \cdot f_{y,r} \cdot z_r}{0,85 \cdot 0,8 \cdot f_{cd} \cdot b_w} \quad (3)$$

Através da expressão (2), inicialmente estimando  $z$  como sendo igual a  $0,87 \cdot d_r$  e portanto conhecendo um valor inicial para  $x_{novo}$ , determina-se a área de reforço  $A_r$ . Com o valor calculado para  $A_r$ , obtém-se um valor novo para a altura da linha neutra. Esse processo é realizado de maneira iterativa até que os valores para  $x_{novo}$  sejam aproximadamente iguais, definindo-se a área de aço do reforço.

#### 2.4.2 Colagem de Chapas de Aço

O cálculo do reforço de vigas à flexão utilizando o método de colagem de chapas metálicas consiste na determinação da área da seção transversal da chapa de aço necessária para permitir que a viga resista a novas solicitações (SOUZA e RIPPER, 1998). Para tanto, é necessário que todas as características geométricas da seção transversal existente sejam conhecidas, seja através dos projetos executivos ou por determinação *in loco*. Além disso, é indispensável que as forças solicitantes do elemento original estejam definidas e que as propriedades dos materiais sejam determinadas (SOUZA e RIPPER, 1998).

Ao se efetuar o reforço de uma viga por meio da colagem de chapas, o comum é que sobre a mesma atue a ação de seu próprio peso mais o da parte correspondente de laje e piso e suas sobrecarga (CÁNOVAS, 1988). A chapa deve ser colada na zona

de momentos positivos – pode-se dizer o mesmo para a zona de momentos negativos – e deverá ter uma seção que trabalhe conjuntamente com a armadura existente na viga, resistindo à ação do momento produzido pelas cargas permanentes e sobrecargas (CÁNOVAS, 1988).

#### 2.4.2.1 Dimensionamento à flexão

Para calcular o reforço a flexão, Cánovas (1988) considera dois momentos atuantes, aos quais denominou de  $M_p$  e  $M_s$ , fazendo a superposição dos diagramas correspondentes (Figura 17) (SOUZA e RIPPER, 1998). O momento  $M_p$  é referente aos esforços resistidos pela seção original da viga, e o momento  $M_s$  corresponde a parcela de momento produzido pela ação das sobrecargas de uso (CÁNOVAS, 1988).

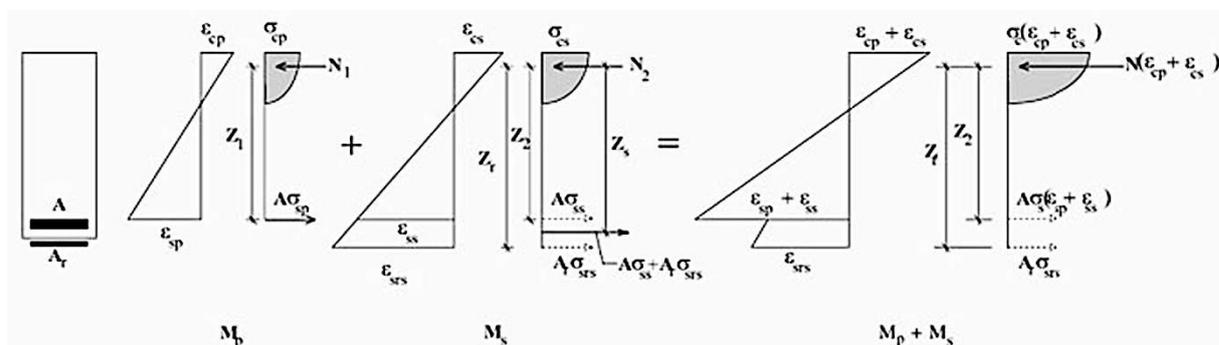


Figura 17 - Estado tensional de uma viga reforçada.

Fonte: Souza e Ripper (1998).

No dimensionamento do reforço à tração, Cánovas (1988) considera que a viga trabalhe no estado-limite último (ELU) após a atuação do momento  $M_s$ . Portanto, o dimensionamento é feito no domínio 3.

Após a execução do reforço, a viga deverá resistir a um momento adicional  $M_s$  produzido pela ação das sobrecargas de uso (ampliação da edificação), que provocará nos aços existentes uma tensão  $\sigma_{ss}$ ; no concreto uma compressão  $\sigma_{cs}$  e na chapa de reforço uma tração  $\sigma_{srs}$  (CÁNOVAS, 1988).

Dessa forma, a viga reforçada estará submetida a um momento total que será:

$$M_t = M_p + M_s \quad (4)$$

Para esta condição, Cánovas (1988) propôs as seguintes verificações:

$$\sigma_{cp} + \sigma_{cs} \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5)$$

$$\sigma_{sp} + \sigma_{ss} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (6)$$

$$\sigma_{srs} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s} \quad (7)$$

Onde:  $\sigma_{cp}$  = Tensão no concreto provocada pelas ações permanentes;

$\sigma_{cs}$  = Tensão no concreto provocada pelas ações de sobrecarga;

$\sigma_{sp}$  = Tensão no aço provocada pelas ações permanentes;

$\sigma_{ss}$  = Tensão no aço provocada pelas ações de sobrecarga;

$\sigma_{srs}$  = Tensão no aço do reforço provocada pelas ações de sobrecarga;

$f_{ck}$  = Coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

$f_{yk}$  = Coeficiente de ponderação da resistência do aço;

$f_{ck}$  = Coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

A tensão na armadura existente, após a execução do reforço, é:

$$\sigma_{sp} \leq \frac{M_p}{Z_l \cdot A} \quad (8)$$

Onde:  $M_p$  = Momento atuante provocado pela carga inicial;

$Z_l$  = Braço de alavanca entre a resultante do concreto comprimido e o aço tracionado;

$A$  = Área de aço tracionado existente;

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

$$\sigma_{srs} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} - \sigma_{sp} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s} \quad (9)$$

O equilíbrio de momentos, para o diagrama devido ao momento  $M_s$ , é dado pela seguinte equação:

$$M_s = (A \cdot \sigma_{ss} + A_R \cdot \sigma_{srs}) \cdot Z_s \cong (A + A_R) \cdot \sigma_{srs} \cdot Z_s \quad (10)$$

Com isso, a área da chapa de aço de reforço pode ser calculada por:

$$A_R = \frac{M_s}{Z_s \cdot \sigma_{srs}} - A \quad (11)$$

Os braços de alavanca  $Z_I$  e  $Z_s$ , podem ser calculados a partir da teoria clássica do concreto armado para o Domínio 3. Outra alternativa simplificadora é a adoção de  $Z_s=1,1.d$  e  $Z_I=0,9.d$  (SOUZA e RIPPER, 1998).

#### 2.4.2.2 Comprimento do reforço

O cálculo do comprimento de ancoragem da chapa, e, conseqüentemente, o seu comprimento total, é feito inicialmente traçando os diagramas de momento fletor final (após o reforço) e o de momento fletor inicial (anterior ao reforço). Considera-se que a chapa inicia a ancoragem a partir do ponto em que o momento fletor atuante na viga após o reforço atinge o valor do momento fletor máximo inicial (SOUZA e RIPPER, 1998).

Um dos métodos para determinação do comprimento de ancoragem, adaptado ao método de reforço com chapas metálicas, proposto por Róstasy (1997 *apud* MACHADO, 2014) resulta em:

$$l_{t,max} = 0,7 \sqrt{\frac{E_{ch} \cdot t_{ch}}{f_{ct,m}}} \quad (12)$$

Onde:  $l_{t,max}$  - Comprimento de ancoragem necessário (mm);

$E_{ch}$  - Módulo de elasticidade da chapa (Mpa);

$t_{ch}$  - Espessura da chapa (mm);

### 2.4.3 Reforço com Sistema de Fibra de Carbono (FRP)

No cálculo da resistência a flexão de estruturas de concreto armado são estabelecidos conceitos básicos (MACHADO, 2014), considerando-se os seguintes conceitos:

- Os estudos e cálculos são efetuados com base nas dimensões existentes das seções, assim como a quantidade de armaduras e as propriedades mecânicas dos materiais empregados no elemento;
- Prevaecem os critérios de Bernoulli, onde as seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos, sendo as deformações linearmente proporcionais à sua distância até a linha neutra;
- A resistência à tração do concreto é desprezada;
- A deformação máxima do concreto comprimido é de 3,5 ‰;
- A aderência entre o sistema composto CFC e o substrato de concreto deve ser perfeita;
- A deformação é considerada linear até a ruptura do reforço.

Usualmente, o substrato ao qual será executado o reforço já está submetido a tensões decorrentes da atuação de seu peso próprio, forças de protensão e outros eventuais tipos de solicitação. Dessa maneira, o nível de deformação no reforço será diferente daquele que ocorre na fibra externa do substrato (BEBER, 2003).

A deformação pré-existente no substrato deverá ser subtraída da deformação final calculada para a fibra de carbono para que se possa estabelecer o nível de tensão efetivo da fibra de carbono (MACHADO, 2014). Dessa forma, a deformação máxima permissível na fibra de carbono será fornecida pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (13)$$

Onde:  $\varepsilon_b$  - Deformação na fibra considerada para o carregamento máximo;

$\varepsilon_{bi}$  - Deformação pré-existente na base inferior da viga;

### 2.4.3.1 Dimensionamento à flexão

Segundo Beber (2003), a determinação da capacidade resistente à flexão de uma viga de concreto armado reforçada com compósitos passa, obrigatoriamente, pela verificação da seção transversal. Essa consideração deve ser feita tanto para os modos de ruptura clássicos quanto para a possibilidade de falha prematura na ligação concreto/reforço. O fluxograma proposto por Beber (2003), com os procedimentos de cálculo para a determinação da capacidade resistente a flexão, está presente no Anexo A.

O procedimento de cálculo do dimensionamento do reforço com fibras de carbono sugerido pela *ACI Comitee 440* é o seguinte:

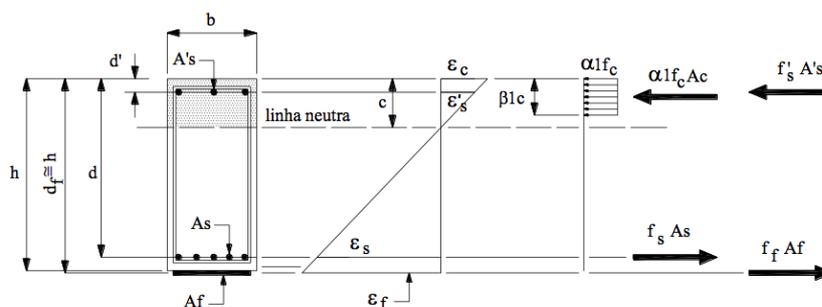
1. Arbitra-se a profundidade da linha neutra ( $x$ ) em conformidade com o modo de ruptura;
2. Calculam-se as deformações dos diversos materiais admitindo-se a linearidade da variação das mesmas;
3. Calculam-se as tensões atuantes nos materiais;
4. A partir do conhecimento das forças se faz as verificações do equilíbrio das mesmas. Se o momento resistente encontrado no sistema for maior que o momento solicitante máximo o processo está completo.

O procedimento descrito é feito de maneira iterativa, sendo que o valor de ' $x$ ' é arbitrado, podendo ou não atender as condições de resistência necessária e economia (MACHADO, 2014).

O dimensionamento da viga deve atender o domínio 3 para que o dimensionamento atenda aos critérios econômicos (BEBER, 2003). Após a escolha do ' $x$ ' inicial deve-se determinar a deformação na armadura tracionada, assumindo  $\varepsilon_{cu}=3,5$  ‰, pela seguinte equação:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \quad (5)$$

Então calculam-se as forças internas atuantes na seção (Figura 18) pelas equações abaixo:



**Figura 18 - Forças atuantes na seção transversal.**  
**Fonte: Machado (2014).**

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot b_w \quad (14)$$

$$F_s' = f_s' \cdot A_s' \quad (15)$$

$$F_s = f_s \cdot A_s \quad (16)$$

Onde:  $F_c$  – Força resultante na seção de concreto comprimido;

$F_s'$  – Força resultante na armadura comprimida;

$F_s$  – Força resultante na armadura tracionada.

Finalmente, calcula-se a força atuante no compósito de fibra de carbono a partir do equilíbrio de momentos, para dois pontos, garantindo que o elemento esteja em equilíbrio (MACHADO, 2014). Dessa forma, efetua-se o cálculo em relação ao eixo da armadura tracionada e em relação a resultante da força de compressão do concreto. Do equilíbrio de momentos em relação a resultante da armadura tracionada tem-se:

$$M_{d,ref} = M_c + M_s' + M_s + M_{fc} \quad (17)$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (18)$$

$$M_s' = F_s' \cdot (d - d') \quad (19)$$

$$M_s = F_s \cdot 0 = 0 \quad (20)$$

$$M_{fc} = F_{fc} \cdot (h - d) \quad (21)$$

Onde:  $M_{d,ref}$  – Momento solicitante após o reforço;

$M_c$  – Momento devido à força resultante do concreto;

$M_s'$  – Momento devido à armadura de compressão;

$M_s$  – Momento devido à armadura de tração;

$M_{fc}$  – Momento devido ao compósito de fibra de carbono.

Da mesma forma, calcula-se o equilíbrio de momentos em relação a resultante do concreto comprimido, porém com outros valores para o braço de alavanca:

$$M_c = F_c \cdot 0 = 0 \quad (22)$$

$$M_s' = F_s' \cdot (0,4 \cdot x - d') \quad (23)$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (24)$$

$$M_{fc} = F_{fc} \cdot (h - 0,4 \cdot x) \quad (25)$$

Assim, calcula-se a força atuante na fibra de carbono. Caso as duas forças calculadas (uma para cada referencial de momento) sejam diferentes, altera-se a posição da linha neutra até que os dois valores de força atuante na fibra de carbono sejam próximos (MACHADO, 2014).

Por fim, calcula-se a área da seção transversal necessária para o reforço em fibra de carbono, a largura e o número de camadas. São utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_{fc} = \varepsilon_{fc} \cdot E_{fc} \quad (26)$$

$$A_{fc} = \frac{F_{fc}}{\sigma_{fc}} \quad (27)$$

$$b_{fc} = \frac{A_{fc}}{e_{fc}} \quad (28)$$

Onde:  $\sigma_{fc}$  – Tensão na fibra de carbono;

$E_{fc}$  – Módulo de elasticidade da fibra de carbono;

$A_{fc}$  – Área da seção transversal do reforço;

$b_{fc}$  – Largura do reforço;

$e_{fc}$  – Espessura do tecido de fibra de carbono.

## 2.5 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)

Uma situação ou problema de decisão caracteriza-se por uma necessidade de avaliação de um conjunto de alternativas, para que se realize uma escolha ou decisão (COSTA, 2002). Segundo Marins, Souza e Barros (2009), a tomada de decisão deve buscar uma opção que apresente o melhor desempenho, a melhor avaliação, ou o melhor acordo entre as expectativas do decisor, considerando a relação entre os elementos. Podemos então, definir a decisão como um processo de análise e escolha entre várias alternativas disponíveis do curso de ação que a pessoa deverá seguir (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009).

Segundo Leite e Freitas (2012), dentro do estudo das teorias de decisões, as mesmas podem ser classificadas em função da quantidade de critérios usados na análise das alternativas, sendo divididas em problemas monocritério ou multicritério, para um ou mais parâmetros de decisão, respectivamente.

O apoio multicritério à decisão consiste em um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar ou apoiar a tomada de decisões, quando da presença de uma multiplicidade de critérios (GOMES, ARAYA e CARIGNANO, 2003). Este processo pode ser decomposto em etapas:

1. Identificar os decisores e seus objetivos;
2. Definir as alternativas;
3. Definir os critérios relevantes para o problema de decisão;
4. Avaliar alternativas em relação aos critérios;
5. Determinar importância relativa dos critérios;
6. Realizar a avaliação global de cada alternativa;
7. Conduzir a análise de sensibilidade;
8. Propor recomendações;
9. Implementar as ações.

Para Santos e Cruz (2013), a aplicação de métodos para tomada de decisão existentes na área da “ciência das decisões” ainda tem um campo fértil a explorar no ambiente da construção civil. A utilização de relações custo/benefício, vantagens/desvantagens podem não reduzir as incertezas no processo decisório na dinâmica de mercado da engenharia civil (SANTOS e CRUZ, 2013).

Portanto, para que a tomada de decisão não se baseie plenamente na intuição prática do profissional, deixando de considerar critérios relevantes, o uso de ferramentas de apoio permite justificar a escolha de métodos construtivos de forma consistente e coerente (SANTOS e CRUZ, 2013).

#### 2.5.1 Escolha do método AMD

A definição do modelo a ser aplicado depende inicialmente das características do problema, da preferência do grupo ou indivíduo decisor e do tipo de resultado esperado (LEITE e FREITAS, 2012). Neste sentido, o analista deverá saber qual tipo de resultado pretende-se obter, seja de seleção, ordenação ou de classificação (MOREIRA, 2007).

Segundo Campos (2011), o procedimento de escolha do método de decisão é necessária apenas após a definição dos seguintes itens:

- Intervenientes no processo de decisão;
- Tipo de decisão em grupo;
- Alternativas;
- Critérios.

Moreira (2007) afirma que a escolha do método multicritério a ser utilizado depende da visão crítica do analista, de forma a adequar a sua opção às características do problema em questão. Dessa maneira, a escolha do método depende da avaliação dos parâmetros escolhidos, do tipo e da precisão dos dados, da forma de pensar do analista, do conhecimento sobre o problema, dos resultados esperados e da necessidade de decisão em grupo (MOREIRA, 2007).

Buscando aumentar a confiança nos resultados obtidos, evitando-se assim o retrabalho e o desperdício de tempo, Leite e Freitas (2012) sugerem um fluxograma para auxiliar a seleção de um método (Figura 19).

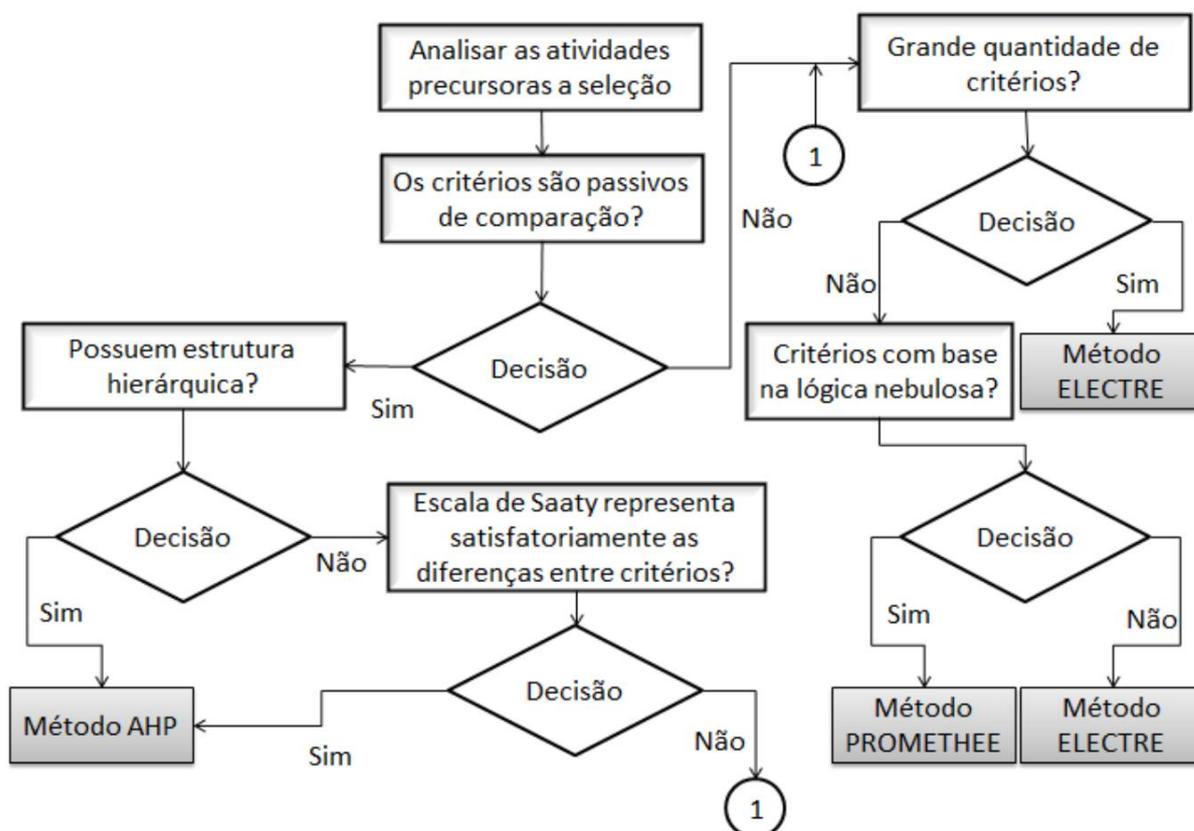


Figura 19 - Fluxo de decisão para os métodos AHP, ELECTRE e PROMETHEE.  
Fonte: Leite e Freitas (2012).

Dentre os principais métodos de Apoio Multicritério à Decisão existem diversas vertentes, porém as mais utilizadas e pesquisadas são a Escola Americana e a Escola Francesa (LEITE e FREITAS, 2012), representadas fundamentalmente pelos métodos *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE)* e *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)*.

Com base no estudo e aplicação desses métodos, Alves, Nykiel e Belderrain (2007) caracterizaram os métodos de apoio à decisão multicritério, avaliando seus principais atributos (Quadro 4).

	<i>AHP</i>	<i>ELECTRE</i>	<i>PROMETHEE</i>
<b>Entrada de dados (<i>Inputs</i>)</b>			
Quantidade de julgamentos em problemas com muitos critérios e alternativas	Alta	Baixa	Alta
Necessidade de processar dados	Não	Sim	Sim
Utilização de dados quantitativos e qualitativos	Sim	Sim	Sim
Utilização de decisões em vários níveis hierárquicos	Sim	Não	Não
<b>Saída de dados (<i>Outputs</i>)</b>			
Problemas com avaliação de desempenho	Sim	Não	Não
Proporciona a eliminação de alternativas	Não	Sim	Não
Permite avaliação da coerência dos julgamentos	Sim	Não	Não
<b>Interface do decisor <i>versus</i> método</b>			
Disponibilidade de <i>software</i> gratuito	Sim	Não	Sim
Utilização de decisão em grupo	Sim	Não	Não
Número de publicações científicas sobre o tema	Alto	Média	Baixa

**Quadro 4 - Comparação entre os métodos de decisão multicritérios.**  
**Fonte: Adaptado de Alves, Nykiel e Belderrain (2007).**

### 2.5.2 Método de Análise Hierárquica (*AHP*)

O Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process, AHP*) pode ser classificado como um dos mais conhecidos e utilizados métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD), proposto por Saaty no início dos anos 70 (COSTA, 2002). Fundamentado numa metodologia científica, o método permite analisar, determinar e decidir os diversos critérios que influem na tomada de decisão e, conseqüentemente, gerar informações que auxiliem o decisor a eleger a melhor das alternativas propostas (SANTOS e CRUZ, 2013).

O *AHP* é uma teoria para escalonar alternativas através de comparações aos pares, contando com o julgamento de especialistas para derivar escalas de prioridade. As comparações são feitas utilizando uma escala de julgamento absoluto, que representa o quanto uma alternativa é dominante sobre outra para um dado atributo (SAATY, 2008).

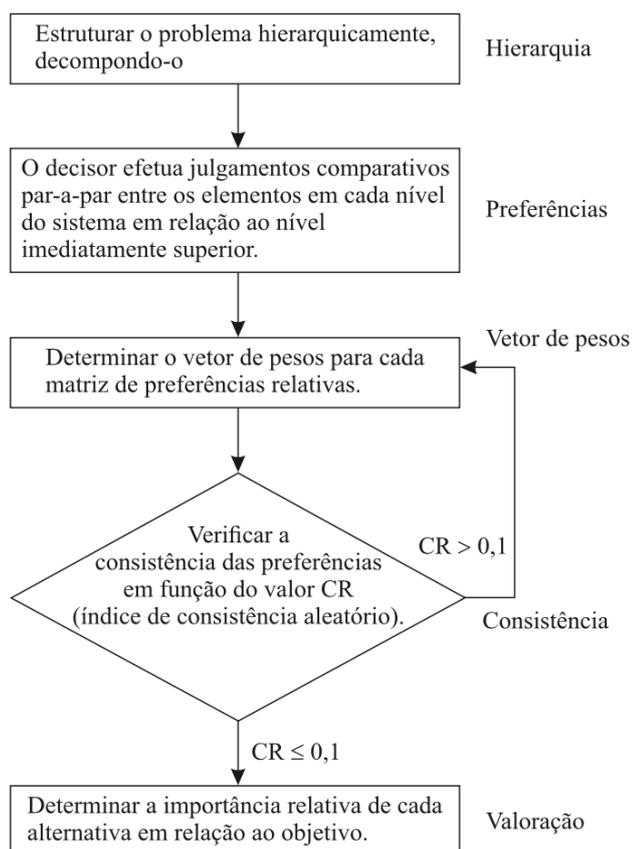
De forma mais simplista, Gomes, González e Carignano (2004) conceituam que o *AHP* é baseado na comparação paritária dos critérios, buscando responder

duas perguntas principais: Quais são os critérios de maior importância? Qual a proporção dessa importância?

Segundo Saaty (2008), para tomar uma decisão de uma maneira organizada e gerando prioridades é necessário decompor o processo decisório nas seguintes etapas:

- a. Definição do problema e determinação do tipo de área do conhecimento envolvida;
- b. Estruturar a hierarquia de decisão partindo do topo com a meta da análise decisória e, em seguida, estruturar os objetivos a partir de uma perspectiva geral, partindo de níveis intermediários (critério no qual o elemento subsequente depende) para níveis mais baixos da hierarquia (que geralmente são um conjunto de alternativas);
- c. Construir um conjunto de matrizes de comparação aos pares. Cada elemento em um nível superior é utilizado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo dele;
- d. Usar a lista de prioridades obtidas através das comparações para dar peso as prioridades para os parâmetros no nível imediatamente abaixo, fazendo o processo para todos os elementos. Depois, para cada elemento deve-se somar os valores ponderados e obter sua prioridade geral ou global.

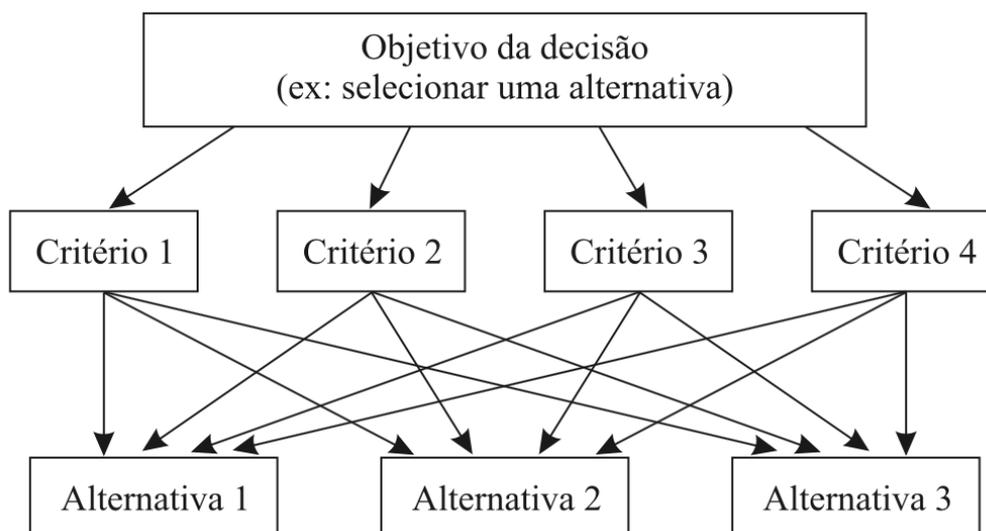
Santos e Cruz (2013) desenvolveram um fluxograma de aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* buscando explicar de forma mais didática e paramétrica as etapas do processo.



**Figura 20 - Fluxograma de aplicação do AHP.**  
**Fonte: Santos e Cruz (2013).**

A aplicação do *AHP* se inicia pela decomposição do problema em uma hierarquia de critérios (Figura 21) mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente (VARGAS, 2010). A partir do momento em que essa hierarquia lógica está construída, os tomadores de decisão avaliam sistematicamente as alternativas por meio da comparação, de duas a duas, dentro de cada um dos critérios. Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos como forma de informação subjacente (SAATY, 2008).

As comparações efetuadas, muitas vezes empíricas, são transformadas em valores numéricos que são processados e comparados no *AHP*. O peso atribuído para cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. A partir do momento em que todas as comparações foram efetuadas e os pesos relativos entre os critérios a serem avaliados foi estabelecida, a probabilidade numérica de cada uma das alternativas é calculada. Este valor determina a probabilidade que a alternativa tem de atender o objetivo estabelecido (VARGAS, 2010).



**Figura 21 - Exemplo de hierarquia de critérios/objetivos.**  
**Fonte: Adaptado de Vargas (2010).**

Segundo Vargas (2010), essa capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é o principal diferencial do *AHP* com relação a outras técnicas comparativas. Apesar disso, Vargas (2010) ainda afirma que os cálculos matemáticos envolvendo o *AHP* podem parecer simples em um primeiro momento, no entanto, em casos mais complexos, as análises e cálculos tornam-se grandes e exaustivos, sendo viável o uso de *softwares* específicos de cálculo.

#### 2.5.2.1 Escala de comparação (Escala Saaty)

A comparação entre dois elementos através da aplicação do *AHP* pode ser realizada de diferentes formas, utilizando escalas e pesos diferentes (BHUSHAN e RAI, 2004). Porém, a escala de relativa importância entre duas alternativas ou critérios proposta por Saaty é a mais amplamente utilizada (VARGAS, 2010). A escala determina a importância relativa de uma alternativa com relação a outra, atribuindo valores que variam entre 1 a 9.

Escala	Avaliação numérica	Recíproco	Comentário
Igualmente preferido	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos
Moderadamente preferido	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre o outro
Fortemente preferido	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente sobre o outro
Muito fortemente preferido	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado

Escola	Avaliação numérica	Recíproco	Comentário
Extremamente preferido	9	1/9	Um critério é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza
Valores intermediários	2;4;6 e 8	1/2; 1/4; 1/6 e 1/8	Quando o consenso não for obtido e houver necessidade de uma negociação

**Quadro 5 - Escala fundamental de Saaty.**

**Fonte: Adaptado de Saaty (2008).**

De forma geral, procura-se utilizar os números ímpares da tabela para assegurar razoável distinção entre os pontos da medição (VARGAS, 2010). O uso dos números pares deve ser adotado quando existir a necessidade de negociação entre os avaliadores e quando o consenso natural não for obtido, gerando necessidade de determinação de um ponto médio de concessão mútua (SAATY, 2008).

### 2.5.2.2 Matriz de comparação

A partir da Escala de Saaty é construída a matriz de comparação, onde os critérios precisam ser avaliados aos pares, visando determinar a importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta global (VARGAS, 2010). O número de julgamentos necessários para uma determinada matriz de ordem  $n$  (número de elementos sendo comparados) é dado por  $n(n-1)/2$  (SAATY, 2008).

A matriz é preenchida comparando-se os critérios que aparecem na coluna da esquerda em relação aos critérios que aparecem na linha superior (VARGAS, 2010), conforme exemplificado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Matriz comparativa (supondo que critério 1 domina o critério 2).**

	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	1	Avaliação	
Critério 2	1/Avaliação	1	
Critério 3			1

**Fonte: Adaptado de Vargas (2010).**

Para simplificar, chamaremos os critérios de C1, C2 e C3; se esses critérios, ao serem comparados aos pares, apresentarem C1 e C2 como sendo igualmente preferidos, atribui-se o valor 1; se C1 for ligeiramente mais importante do que C2, ou seja, moderadamente preferido, atribui-se o valor 3; e assim por diante (SANTOS e CRUZ, 2013).

O reverso da comparação dos critérios, ou seja, o valor recíproco, é correspondente ao inverso da escala apresentada. Neste sentido, um critério que seja extremamente preferido em relação a outro (classificado com valor 9), ao se fazer a comparação inversa na matriz, o critério preterido será avaliado com o valor  $1/9$  (SANTOS e CRUZ, 2013). Para um valor  $a_{ij}$  na matriz de comparação, o valor recíproco  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ .

Um elemento é igualmente importante quando comparado com ele próprio, isto é, onde o valor de  $i$  é igual ao valor de  $j$  na matriz de decisão será atribuído o valor 1. Logo, a diagonal principal de toda matriz de decisão será composta apenas pelo número 1 (SANTOS e CRUZ, 2013).

Da mesma maneira que os critérios são comparados aos pares, o mesmo procedimento é aplicado as alternativas, determinando a prioridade de cada uma em relação as demais para cada critério estabelecido (SANTOS e CRUZ, 2013).

Após a montagem das matrizes de decisão, é necessário normalizá-las para interpretar e obter o peso relativo de cada critério. A normalização é feita pela divisão de cada valor atribuído na tabela pelo somatório total de cada coluna (VARGAS, 2010).

#### 2.5.2.3 Vetor de prioridade (Autovetor)

A determinação da contribuição de cada critério na meta é calculada a partir do vetor de prioridade ou autovetor. O vetor de prioridade apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido de modo aproximado através da média aritmética dos valores de cada um dos critérios, ou seja, calcula-se o calor médio em cada linha da matriz normalizada para obter o peso relativo, onde o somatório dos valores do vetor sempre totaliza 1 (VARGAS, 2010). Os valores obtidos para o autovetor tem significado físico direto no *AHP*. Ele determina a participação ou peso daquele critério no resultado total da meta.

O cálculo exato do autovetor é determinado apenas em casos específicos. A maioria dos casos práticos utiliza a aproximação descrita acima visando simplificar o processo de cálculo, uma vez que a diferença entre o valor real e o aproximado é inferior a 10% (KOSTLAN, 1991).

Em comparação proposta por Vargas (2010), observou-se que os valores aproximados e reais do vetor de prioridade em um dado caso, tiveram uma variação menor do que 1,5% para uma análise utilizando quatro critérios. Observou-se que os valores aproximados e reais são muito próximos e, muitas vezes, o cálculo do vetor real requer um trabalho matemático que pode ser dispensado (KOSTLAN, 1991).

#### 2.5.2.4 Cálculo do índice de consistência

Segundo Marins, Souza e Barros (2009), a inconsistência surge quando algumas opiniões da matriz de comparação se contradizem com outras. Ou seja, a verificação da inconsistência dos dados visa captar se os tomadores de decisão foram consistentes nas suas opiniões para a tomada de decisão (VARGAS, 2010).

Se, por exemplo, os tomadores de decisão afirmarem que o critério C1 é mais importante do que o critério C2, e que o critério C2 é mais importante do que o critério C3, seria uma inconsistência afirmar que o critério C3 é mais importante do que o critério C1 (se  $C1 > C2$  e  $C2 > C3$  seria inconsistente afirmar que  $C1 < C3$ ) (SANTOS e CRUZ, 2013). Por isso, é importante verificar a consistência das opiniões calculando o Índice de Consistência ( $CI$ ) e a Relação de Consistência ( $CR$ ).

Assim o cálculo do Índice de Consistência ( $CI$ ) proposto por Saaty (2008) é dado pela seguinte equação:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (29)$$

Onde:  $CI$  - Índice de consistência;

$n$  - Número de critérios avaliados;

$\lambda_{max}$  - Vetor principal.

O autovetor principal é obtido calculando-se o produto de cada linha da matriz de comparação pelo vetor de prioridade, dividindo-se o resultado dessa expressão pelo elemento do autovetor correspondente a linha calculada. Então faz-se o somatório desse produto e calcula-se a média aritmética (VARGAS, 2010).

Para a verificar se o valor do índice de consistência ( $CI$ ) é adequado, Saaty (2008) propôs uma relação de consistência ( $CR$ ), onde o valor obtido para  $CI$  é comparado com o Índice de Consistência Aleatória ( $RI$ ) (SANTOS e CRUZ, 2013). A relação de consistência ( $CR$ ) é determinada pela razão entre o valor do índice de consistência ( $CI$ ) e o índice de consistência aleatória ( $RI$ ) (Equação 30). A matriz será considerada consistente se a razão for menor que 10%.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \quad (30)$$

O valor de  $RI$  é fixo e tem como base o número de critérios avaliados ( $N$ ), conforme o quadro abaixo:

<b>N</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RI</b>	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

**Quadro 6 - Índices de consistência aleatória (RI).**

**Fonte: Saaty (2008).**

Os valores dos índices de consistência aleatória desenvolvidos por Saaty (2008) foram derivados da análise de uma amostra de 500 matrizes de comparação geradas randomicamente. Calculando-se o índice de consistência para essas matrizes, Saaty (2008) calculou o valor médio dos índices, criando os índices de consistência aleatória para cada ordem de matriz.

A tolerância a inconsistência de até 10% para as matrizes de comparação é justificada por Saaty (2008), de forma que sem ela novas informações e conhecimentos sobre o problema em análise não poderiam justificar a alteração na ordem de preferência dos critérios ou alternativas. Assumindo que todo conhecimento acerca do problema seja consistente, contradiz a realidade onde ajustes contínuos no entendimento dos fenômenos são necessários (SAATY, 2008).

#### 2.5.2.5 Resultado da AHP

Para sintetizar a escala de prioridade geral do sistema, ou seja, obter o resultado de preferência entre as alternativas, cria-se uma matriz a partir dos auto vetores obtidos para a comparação de cada alternativa à luz de cada critério e multiplica-se pelo vetor de prioridade de comparação entre os critérios (SAATY, 2008).

Dessa maneira, tem-se o valor de prioridade global para cada alternativa, de forma que este valor indique qual alternativa melhor se adapta ao problema em questão, auxiliando a tomada de decisão (VARGAS, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 VIGAS COM NECESSIDADE DE REFORÇO

Para tornar viável a análise, optou-se em analisar o dimensionamento do reforço estrutural de uma viga que estava sob o último pavimento antes da cobertura, como forma de simplificar a determinação das solicitações e restringir o escopo deste trabalho. A partir da análise estrutural da edificação pelo escritório de cálculo estrutural contratado, foi constatado que seria necessário o reforço de três vigas que suportam o segundo pavimento da edificação e passariam a suportar a ampliação do segundo pavimento. Para este trabalho, limitou-se a análise de apenas uma das vigas, apenas para servir como fonte de dados para a aplicação do método *AHP*.

A primeira proposta de projeto do escritório de cálculo estrutural para o reforço das vigas foi de utilização do método de aumento da seção de concreto armado. Por motivo de impossibilidade de parar as operações da clínica por mais de três dias consecutivos, foi elaborada uma segunda solução de reforço estrutural utilizando o método de colagem de chapas de aço.

O local da ampliação da edificação era sobre as lajes L11, L24, L25 e L26, onde originalmente havia um telhado em estrutura metálica e telhas de fibrocimento de 8mm de espessura. O projeto da ampliação da edificação consiste na retirada do telhado que havia sobre as lajes citadas, e a construção de mais salas sobre estas lajes.

A análise estrutural levou em conta as especificações de materiais do projeto arquitetônico de ampliação da clínica e do projeto de proteção radiológica, que conta com a utilização de lençóis de chumbo fixados nas paredes. Tentou-se reduzir a necessidade de reforço das vigas utilizando blocos de concreto celular autoclavado com espessura de 10cm, que possuem peso específico de até  $0,550\text{tf/m}^3$ , para o sistema de vedação vertical. Algumas das paredes internas foram executadas com sistema de *light steel frame* e utilização de chapas de gesso acartonado.

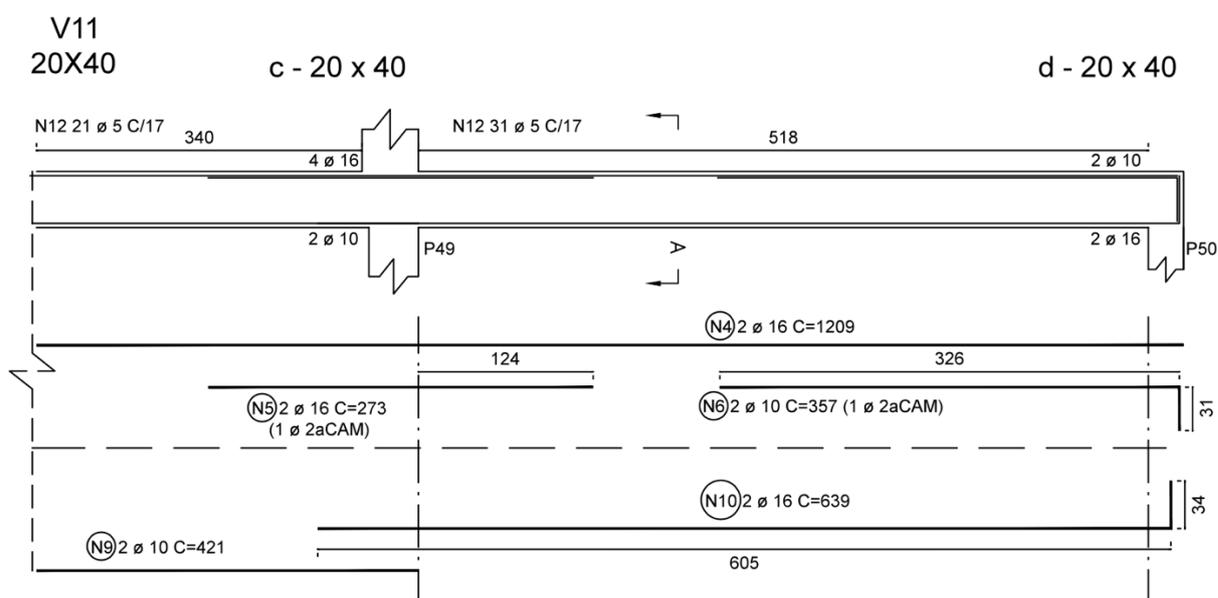
Para determinação da rigidez das ligações das vigas foi considerado o modelo clássico de viga contínua, simplesmente apoiada nos pilares, observando-se os

critérios de aproximação da influência da solidariedade dos pilares com vigas descritos no item 14.6.6 da ABNT NBR 6118:2014.

Todas as vigas foram originalmente projetadas com a utilização de concreto de classe C30, com fator água/cimento  $\leq 0,55$ . O aço utilizado para as armaduras foi o CA-50A (armaduras longitudinais) e o CA-60 (armaduras transversais).

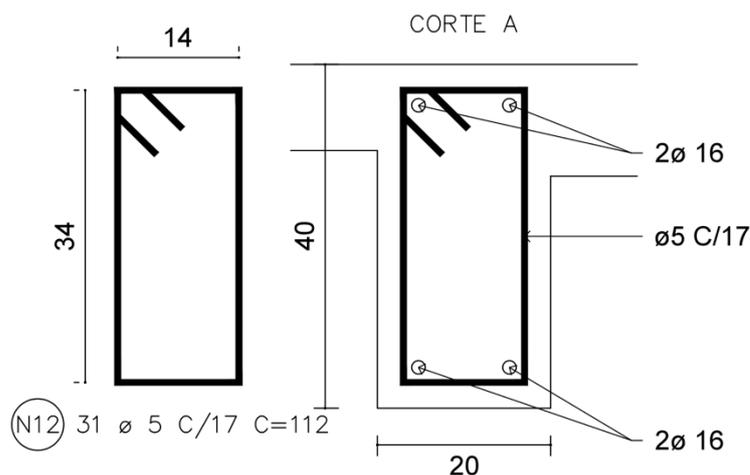
### 3.1.1 Viga V11d

A viga V11 trecho 'd' foi projetada conforme as especificações da Figura 22, a seguir, onde são detalhadas as armaduras e seus posicionamentos na seção e a geometria da viga.



**Figura 22 - Detalhamento da viga V11d.**  
**Fonte: Adaptado de PROCALC (2017).**

A seção transversal 'A' é a que tem menor área de aço tracionado e comprimido, portanto será utilizada como sendo a seção crítica, assumindo a pior hipótese para o dimensionamento dos reforços.



**Figura 23 - Detalhe da seção 'A' da Viga V11 original.  
Fonte: Adaptado de PROCALC (2017).**

Conforme o projeto original da viga, será verificado o momento resistente da viga, verificando a necessidade de reforço à flexão do trecho 'D', conforme constatado pelo escritório de projetos.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS

O dimensionamento dos reforços das vigas pelo método do aumento da seção de concreto armado seguiu as diretrizes de ABNT NBR 6118:2014, considerando os princípios do método dos estados limites.

O dimensionamento do reforço utilizando sistema de compósito de polímero reforçado com fibra de carbono baseou-se no manual de dimensionamento americano ACI 440.2R-08 do *American Concrete Institute*. Como forma de auxílio, utilizou-se o manual de dimensionamento de reforços com fibra de carbono da Viapol, que é baseado na norma americana.

Para o dimensionamento do reforço utilizando colagem de chapas metálicas, utilizou-se o método proposto por Cánovas (1988).

#### 3.2.1 Planta de Cargas

A planta de cargas do pavimento que sofreu aumento de carregamento devido a sua ampliação e alteração na sua utilização está disponível no Anexo B. A planta de cargas leva em consideração as ações permanentes e variáveis sobre as lajes e vigas no pavimento acima das vigas.

A planta de cargas do segundo pavimento do projeto original da edificação não foi disponibilizada pelo escritório de projetos. Dessa maneira, considerou-se uma carga permanente de telhado de  $0,75 \text{ kN/m}^2$  para as lajes L11, L24, L25 e L26 na situação anterior a ampliação. Sobre estas lajes havia um telhado em estrutura metálica e telhas em fibrocimento de 8mm de espessura, apoiado diretamente sobre as lajes.

### 3.2.2 Cargas e Reações nas Lajes

O resultado e as considerações utilizadas no cálculo dos carregamentos nas lajes pré-ampliação e pós-ampliação foram calculados e estão disponíveis no próximo capítulo do trabalho. Foram calculadas as cargas em todas as lajes adjacentes as vigas analisadas, seguindo o princípio de que as vigas são contínuas.

As reações nas lajes para o cenário anterior a ampliação da edificação e para o cenário pós-ampliação foram determinadas, com objetivo de determinar o acréscimo das solicitações nas vigas em questão. Os resultados são apresentados no Apêndice C.

### 3.2.3 Carregamento na Viga

O carregamento na viga foi determinado através do somatório das cargas transferidas pelas lajes adjacentes, peso próprio das vigas e cargas de paredes sobre as vigas.

Esse processo foi efetuado para o cenário anterior a ampliação da edificação e posterior a ampliação, com objetivo de determinar o acréscimo das solicitações nas vigas analisadas.

O resultado dos carregamentos das vigas pré-ampliação e pós-ampliação foram calculados e estão disponíveis no próximo capítulo do trabalho.

### 3.2.4 Combinação das Ações

A combinação das ações foi feita utilizando as informações existentes na Planta de Cargas fornecida pelo escritório de projetos estruturais. Baseou-se nos critérios de combinações para o Estado Limite Último, observando os coeficientes de

ponderação estabelecidos na ABNT NBR 6118:2014. Os cálculos das solicitações máximas para cada viga foram feitos para os momentos fletores e os esforços cortantes, utilizando o coeficiente de ponderação das ações de 1,4.

### 3.2.5 Análise Estrutural da Viga

Os esforços internos e reações para cada viga foram calculados com o auxílio do *software* livre para análise estrutural Ftool, que mostra o comportamento de pórticos planos.

Dessa maneira, obteve-se os diagramas de momento fletor e esforço cortante para a viga analisada, em ambas as situações (pré-ampliação e pós-ampliação). Os resultados estão disponíveis no próximo capítulo do trabalho.

### 3.2.6 Dimensionamento do Reforço com Aumento de Seção de Concreto Armado

O dimensionamento do reforço a flexão e ao cisalhamento com o aumento de seção de concreto armado foi calculado utilizando os princípios de dimensionamento do concreto armado, onde a ABNT NBR 6118:2014 foi utilizada.

### 3.2.7 Dimensionamento do Reforço com Colagem de Chapas de Aço

O dimensionamento do reforço a flexão com a colagem de chapas de aço foi calculado utilizando os princípios de dimensionamento do método apresentado por Cánovas (1988).

Para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento foram utilizadas as prerrogativas da ABNT NBR 6118:2014.

### 3.2.8 Dimensionamento do Reforço com Utilização de *CFRC*

O dimensionamento do reforço a flexão e ao cisalhamento com a utilização de compósitos de fibra de carbono foi calculado utilizando os princípios de dimensionamento do método apresentado pelo *American Concrete Institute*, em sua norma ACI 440.2R-08.

### 3.3 ORÇAMENTO ANALÍTICO

Antes da execução dos reforços estruturais nas vigas de concreto armado, foi feito o levantamento de custos dos materiais para execução de reforço com colagem de chapas de aço. Para o fornecimento de mão-de-obra, foi considerado o valor da hora de cada profissional e auxiliar, de acordo com bases de dados governamentais e pesquisa de mercado.

Foram considerados todos os custos diretos envolvidos para execução de cada tipo de reforço. Os custos indiretos da obra não foram rateados para a execução dos reforços por questão de simplificação e objetividade.

#### 3.3.1 Cotação De Materiais

Utilizando os dados coletados durante a execução da obra, onde foram utilizados reforços estruturais em vigas pelo método do aumento da seção de concreto armado e pelo método da colagem de chapas de aço, foi feito o comparativo de preço das cotações. Foram feitas cotações com pelo menos três diferentes fornecedores para cada tipo de material. Todos os fornecedores eram empresas formais com reconhecimento, situadas na Região Metropolitana de Curitiba, no Paraná.

Através do comparativo de cotações de material de fornecedores, obteve-se o custo para execução dos três tipos de reforço. A quantidade de material necessária para execução de cada tipo de reforço estrutural foi levantado de acordo com o levantamento de quantitativo de materiais feito a partir do dimensionamento de cada tipo de reforço.

#### 3.3.2 Cotação De Mão-De-Obra

Para execução da obra, foi escolhido uma empresa empreiteira para execução dos serviços relacionados a parte estrutural da obra de ampliação. A escolha foi feita a partir do comparativo de propostas de fornecimento de mão-de-obra de três empresas diferentes. O principal critério para contratação, além do menor preço, foi a experiência, capacidade técnica e quadro de funcionários disponíveis para a obra.

No caso da execução do reforço de vigas por encamisamento da seção transversal, a remuneração do serviço foi feita através de valor unitário por massa de aço e volume de concreto. Foram considerados a descarga e transporte do material na obra, a corte e dobra do aço, o posicionamento e preparação das armaduras, a área de fôrmas, o escoramento, o lançamento e a cura do concreto.

No caso de execução do reforço das vigas com colagem de chapas de aço, a remuneração não havia sido pré-estabelecida em contrato. Dessa forma, o valor para execução desse tipo de reforço foi feito por hora de serviço de profissional e de ajudante.

Como o reforço utilizando *CFRP* não foi executado nesta obra, foi feito o levantamento do quantitativo de mão-de-obra a partir de dados parametrizados de obras já executadas.

### 3.4 MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (*AHP*)

O intuito da escolha do método *AHP* para escolha da melhor alternativa de método de reforço estrutural se deu por ser uma ferramenta de análise simples, objetiva e racional, que busca a solução de problemas complexos e que trata os problemas decisórios de uma forma estruturada. Isso possibilita o reconhecimento e tratamento da subjetividade inerente aos problemas de decisão.

Dessa maneira, foi definida a meta da análise hierárquica e os critérios a serem analisados para o estudo de caso em questão. Após discorrer sobre os critérios e mensurar de forma quantitativa e qualitativa os pesos relativos entre eles, iniciou-se a aplicação do método de análise hierárquica para definir o peso de cada critério para a meta global do problema. Após a comparação das alternativas aos pares para cada critério definido, foi estabelecida a prioridade geral para cada alternativa com relação a meta do problema.

Com os resultados da análise hierárquica, utilizou-se os valores de prioridade geral calculados para auxiliar a tomada de decisão quanto ao melhor método de reforço estrutural de vigas em concreto armado para o estudo de caso em questão. O resultado da tomada de decisão através do uso do método de análise hierárquica foi então comparado com o método efetivamente empregado na obra de ampliação, de

forma a tentar estabelecer uma relação de coerência entre o método empregado e o método definido pela tomada de decisão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS DA VIGA

O intuito do dimensionamento dos reforços para a Viga V11 é para verificar o dimensionamento dos reforços com aumento de seção de concreto armado e colagem de chapas de aço calculado durante a fase do projeto estrutural da edificação. Além disso, o dimensionamento dos reforços fornecerá os quantitativos de material necessários para execução de cada tipo de reforço. Dessa forma, será possível a elaboração do orçamento analítico que será utilizado para comparação do custo de execução na aplicação do método de análise hierárquica (*AHP*).

Para simplificar a análise do custo de execução, serão efetuados os dimensionamentos dos reforços apenas para a flexão, porém garantindo uma estimativa realista do custo real para execução de cada método de reforço.

#### 4.1.1 Cargas e Reações nas Lajes

Os resultados dos carregamentos nas lajes foram utilizados para o cálculo de suas respectivas reações de apoio, na situação anterior a ampliação da edificação e posterior a ampliação. Para determinar as reações de apoio nas lajes utilizou-se o método de quinhões de carga, com o auxílio das fórmulas encontradas no Anexo C.

As considerações e cálculos efetuados para a determinação das cargas nas lajes e suas reações estão detalhados no Apêndice A (situação pré-ampliação) e no Apêndice B (pós-ampliação).

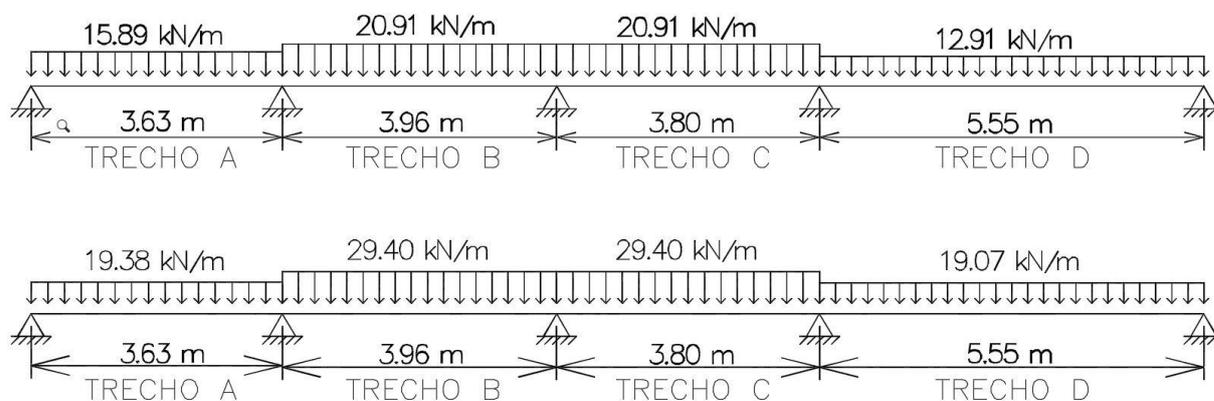
#### 4.1.2 Carregamento na Viga V11

A partir dos resultados obtidos no cálculo das reações das lajes, peso próprio da viga e carga de paredes, obteve-se o carregamento na Viga V11, possibilitando a análise estrutural da mesma. O detalhamento do cálculo do carregamento total para a situação pré-ampliação e pós-ampliação, e está disponível no Apêndice C.

Os valores de 'Rx' são referentes as reações das lajes, 'P.P. V.' ao peso próprio de cada trecho da viga e 'Alven' ao peso da alvenaria, considerando um peso específico de  $12 \text{ kN/m}^3$  para bloco cerâmico com espessura de 0,12 metros e 2,8

metros de altura (altura entre a laje e a viga superior). Para cálculo do peso próprio da viga de concreto armado foi utilizado um peso específico de  $25 \text{ kN/m}^3$ .

Com isso, é possível comparar o carregamento provocado pela ampliação da edificação para posteriormente, fazer a análise estrutural e dimensionar os reforços. O resultado do carregamento da viga é apresentado na Figura 24.



**Figura 24 - Carregamento esquemático da Viga V11 pré-ampliação (acima) e pós-ampliação (abaixo).**

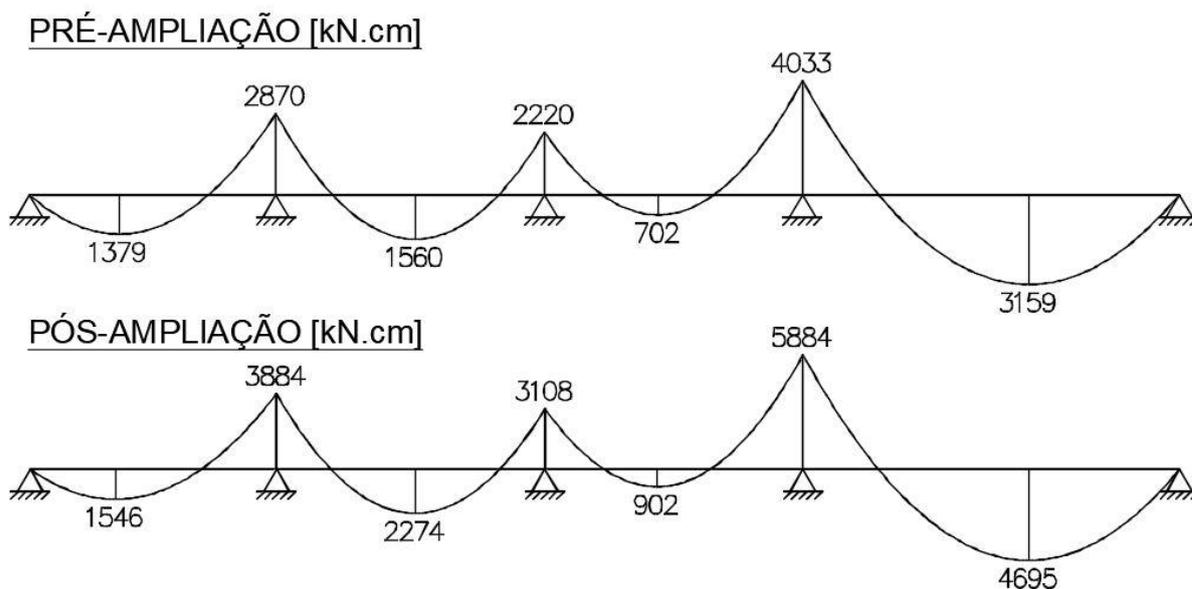
**Fonte: O autor (2017).**

Observa-se que o aumento no carregamento sobre a Viga V11, provocado pela ampliação da edificação, foi de aproximadamente 22% para o trecho 'A', 41% para os trechos 'B' e 'C', e de 47% para o trecho 'D'.

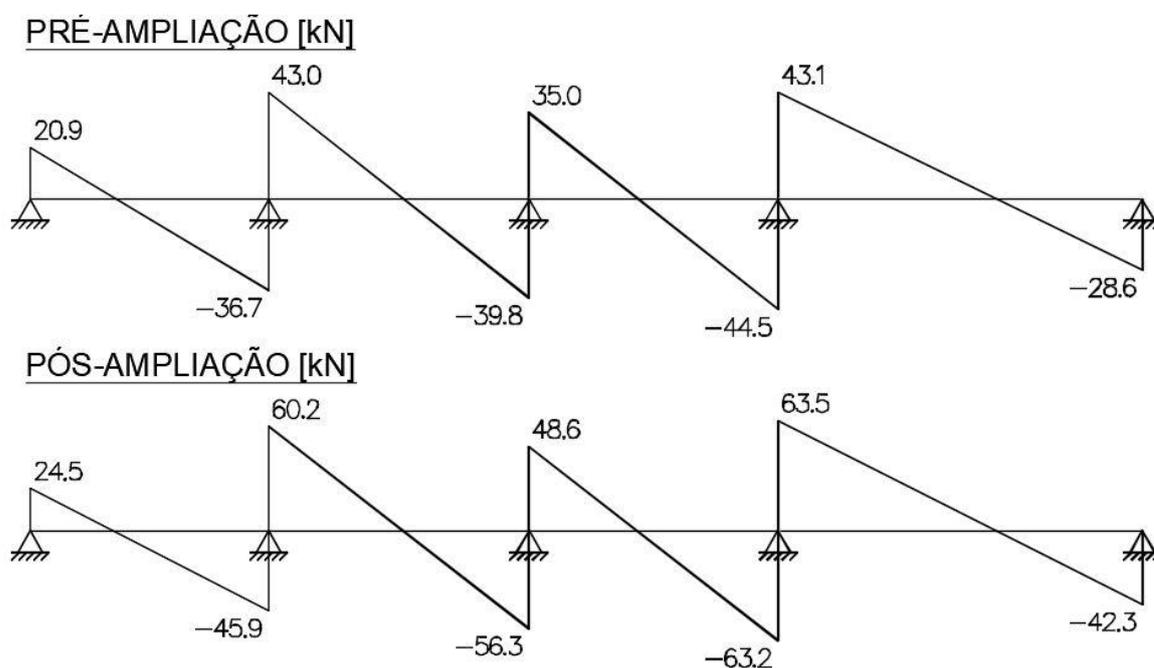
Portanto, apesar do trecho 'D' não ter sofrido o maior aumento absoluto no carregamento, foi o trecho de maior aumento relativo no carregamento. Além disso, o trecho 'D' tem o maior vão entre todos, o que ocasiona um aumento proporcionalmente maior nos esforços internos da seção.

#### 4.1.3 Análise Estrutural da Viga V11

A partir dos carregamentos calculou-se as reações de apoio e os esforços internos da viga V11, utilizando o *software* Ftool. A análise foi realizada para a situação anterior a ampliação e pós ampliação. Os resultados são apresentados para o diagrama de momento fletor e diagrama de esforço cortante, na Figura 25 e Figura 26, respectivamente.



**Figura 25 - Diagrama de momento fletor da Viga V11.**  
 Fonte: O autor (2017).



**Figura 26 - Diagrama de esforço cortante da Viga V11.**  
 Fonte: O autor (2017).

Durante a fase de projeto estrutural da ampliação da edificação do estudo de caso, foi constatado necessidade de reforço à flexão e ao cisalhamento apenas no trecho 'D' da viga V11. Portanto, para simplificar a análise do problema decidiu-se verificar a capacidade de carga e a necessidade de reforço estrutural apenas para o mesmo trecho da viga V11.

Nota-se que houve um aumento de aproximadamente 49% no momento fletor positivo máximo e de 46% no momento fletor negativo para o trecho 'D'. O mesmo ocorre para o esforço cisalhante, com um aumento de 47% para ambos os lados do trecho 'D'. Como não foi constatado pelo escritório de projeto estrutural necessidade de reforço para o momento negativo no apoio esquerdo do trecho 'D', desconsiderou-se a hipótese dessa necessidade para simplificar o problema. A posição do momento fletor positivo máximo está localizada a uma distância de 2,22 m do apoio direito.

Para o dimensionamento dos reforços à flexão da viga V11 trecho 'D' serão considerados  $M_{inicial,k}=3160$  kN.cm e  $M_{final,k}=4700$  kN.cm. Para majorar as solicitações e definir o momento fletor solicitante de projeto utilizou-se  $\gamma_f=1,4$  como coeficiente de ponderação das ações no estado-limite último (ELU), considerando a situação mais desfavorável possível. Dessa forma obteve-se um valor de  $M_{inicial,d}=4424$  kN.cm e  $M_{final,d}=6580$  kN.cm.

#### 4.1.4 Verificação da Capacidade de Carga da Viga V11

A partir dos dados do projeto original (Quadro 7) e as equações adimensionais da teoria do concreto armado efetua-se a verificação da seção para armadura dupla.

Dados V11		
Parâmetros		Unidade
$f_{yd}$	43,5	kN/m <sup>2</sup>
$f_{cd}$	2,14	kN/m <sup>2</sup>
$A_s$	4	cm <sup>2</sup>
$A_s'$	4	cm <sup>2</sup>
$b_w$	20	cm
$d$	35,7	cm
$d'$	4,3	cm

Quadro 7 - Parâmetros da Viga V11.  
Fonte: O autor (2017).

##### 1) Equação básica

$$\beta_s = \left( \frac{0,68 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{cd}}{A_s \cdot f_{yd}} \right) \cdot \beta_x + \left( \frac{A_s'}{A_s} \right) \cdot \beta_s'$$

$$A = \left( \frac{0,68 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{cd}}{A_s \cdot f_{yd}} \right) = \left( \frac{0,68 \cdot 20 \cdot 35,7 \cdot 2,14}{4 \cdot 43,5} \right) = 5,97$$

$$B = \left( \frac{A_s'}{A_s} \right) = \left( \frac{4}{4} \right) = 1$$

$$\beta_s = 5,97 \cdot \beta_x + 1 \cdot \beta_s'$$

2) Arbitra-se valor de  $\beta_x$

$$\beta_x = 0,15 \quad \therefore \quad \beta_s = 1,0$$

$$\frac{d'}{d} = \frac{4,3}{35,7} \cong 0,125 \quad \therefore \quad \beta_s' \cong 0,1425$$

Verificação:

$$\beta_s = 5,97 \cdot \beta_x + 1 \cdot \beta_s' \rightarrow 1 \cong 5,97 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,1425$$

3) Md1

$$M_{d1} = \beta_c \cdot (b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}) = 0,096 \cdot (20 \cdot 35,7^2 \cdot 2,14) = 5236,62 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

4) Md2

$$M_{d2} = A_s' \cdot (\beta_s' \cdot f_{yd}) \cdot (d - d') = 4 \cdot (0,1425 \cdot 43,5) \cdot (35,7 - 4,3) = 778,56 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

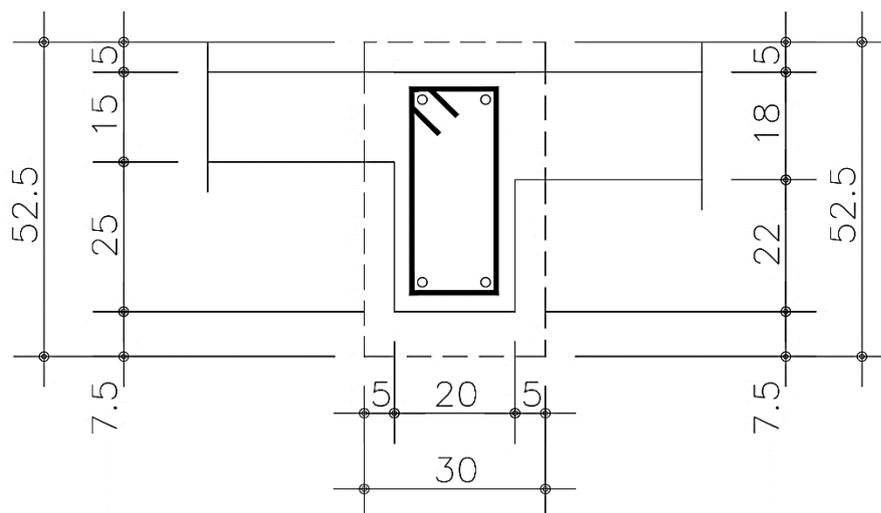
5) Md

$$M_d = M_{d1} + M_{d2} = 6015,18 \text{ kN} \cdot \text{cm} < M_{final,d} (6580 \text{ kN} \cdot \text{cm})$$

Portanto, conclui-se que a seção existente não suporta o carregamento após a ampliação da edificação. Dessa maneira, prossegue-se ao dimensionamento dos reforços à flexão.

#### 4.1.5 Reforço com Aumento de Seção de Concreto Armado (Encamisamento)

Considerando um aumento na face inferior de 7,5 cm e de 5 cm em cada lateral da V11 para acomodar as armaduras do reforço, obtém-se configuração preliminar da seção, conforme a Figura 27.



**Figura 27 - Seção preliminar de reforço por encamisamento total.**  
**Fonte: O autor (2017).**

Dessa maneira, inicia-se o dimensionamento do reforço à flexão utilizando o método dos estados limites para concreto armado. Considera-se o  $d=44$  cm,  $h=50$  cm e  $b_w=20$  cm, para permanecer a favor da segurança. O concreto original da seção é classe C30, portanto mantem-se o valor de  $f_{ck}=30$  MPa.

1)  $\mu$  (Momento fletor relativo)

$$f_c = 0,85 \cdot f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{3}{1,4} = 1,82$$

$$\mu = \frac{M_d}{f_c \cdot b_w \cdot d^2} = \frac{6580}{1,82 \cdot 20 \cdot 44^2} = 0,0934 < \mu_{lim,AS}(0,295) \therefore \text{Armadura simples}$$

2)  $\omega$  (Taxa mecânica de armadura) e  $y$  (altura da região de concreto comprimida)

$$\omega^2 - 2 \cdot \omega + 2 \cdot \mu = 0$$

Resolvendo a equação de segundo grau, tem-se que:

$$\omega' = 1,9018 \rightarrow \text{Descartado (sem sentido físico)}$$

$$\omega'' = 0,098 \rightarrow \text{Taxa mecânica de armadura}$$

Então a altura da área de concreto comprimido é:

$$y = \omega \cdot d = 0,098 \cdot 44 = 4,31 \text{ cm}$$

### 3) $f_s$ (Tensão na armadura) e $\varepsilon_s$ (Deformação na armadura)

Aplica-se a deformação máxima permitida no concreto de 3,5‰ e calcula-se a deformação no aço:

$$\varepsilon_s = \left( \frac{d - 1,25 \cdot y}{1,25 \cdot y} \right) \cdot \varepsilon_c = \left( \frac{44 - 1,25 \cdot 4,31}{1,25 \cdot 4,31} \right) \cdot 3,5\text{‰} = 25,08\text{‰} > \varepsilon_{s,lim}(10\text{‰})$$

Como a deformação limite do aço excedida, arbitra-se  $\varepsilon_s=10\text{‰}$  e calcula-se um novo  $\varepsilon_c$  para verificação.

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_s}{\left( \frac{d - 1,25 \cdot y}{1,25 \cdot y} \right)} = \frac{10\text{‰}}{\left( \frac{44 - 1,25 \cdot 4,31}{1,25 \cdot 4,31} \right)} = 1,39\text{‰} < \varepsilon_{c,lim}(3,5\text{‰})$$

### 4) $A_s$ (Área da seção transversal de aço tracionado)

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \cdot \left( d - \frac{y}{2} \right)} = \frac{6580}{43,48 \cdot \left( 44 - \frac{4,31}{2} \right)} = 3,62 \text{ cm}^2$$

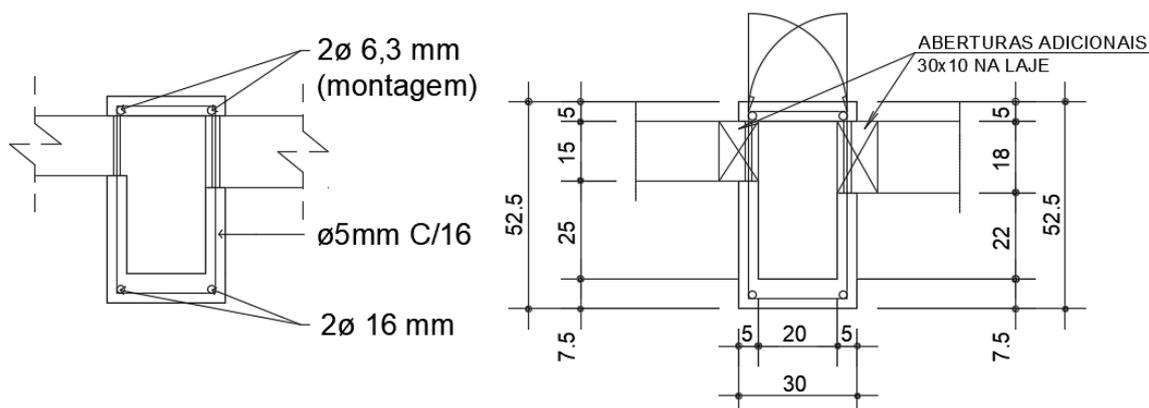
Assim, obtém-se a área da seção transversal de aço para resistir ao momento fletor de projeto após a ampliação.

#### 4.1.5.1 Detalhamento da seção transversal reforçada

O valor do  $A_s$  existente é de 4 cm<sup>2</sup>, porém por motivo de simplificação do cálculo não será considerado o  $A_s$  existente, permanecendo a favor da segurança.

No detalhamento da seção reforçada, Figura 28, considera-se armadura superior apenas para montagem das armaduras, assim como os estribos.

## SEÇÃO A



**Figura 28 - Detalhamento do reforço à flexão por encamisamento total.**  
**Fonte: O autor (2017).**

O concreto ou graute a ser utilizado no encamisamento da seção deve ser de classe C40, uma classe acima do concreto da seção original. A superfície da viga deverá ser apicoada, garantindo a boa aderência entre o concreto antigo e o novo. As esperas das armaduras não foram dimensionadas por simplificação, mas devem ser ancoradas utilizando resina epóxi bicomponente de acordo com as recomendações do fabricante do produto. O aumento de seção deverá ser executado ao longo de todo trecho 'D' da Viga V11, por questão executiva, permitindo o reforço ao esforço cortante.

Os reforços aos esforços cortantes não foram calculados por questão de simplificação, mas em situação real onde o projeto seria executado, seria indispensável o dimensionamento e demais verificações exigidas pela ABNT NBR 6118:2014. O dimensionamento proposto não visa a solução mais econômica, servindo apenas de base para realizar a estimativa de custo do método.

### 4.1.6 Dimensionamento do Reforço com Colagem de Chapas de Aço

Para o dimensionamento do reforço à flexão utilizando o método de colagens de chapa de aço carbono, foi escolhida o aço MR 250 (NBR 7007), equivalente ao *ASTM A36*, por questão de disponibilidade no mercado e relação custo-benefício. O aço carbono MR 250 tem um  $f_y=250$  MPa e  $f_u=400\sim 550$  MPa. Um dos inconvenientes do aço MR 250 é o seu fornecimento em espessuras de no mínimo 6,3 mm, o que torna obrigatório o uso de ancoragem com chumbadores. Outra alternativa é a

utilização do aço CF-30 (NBR 6650), que é fabricado em espessuras de 1,2 mm até 4,75 mm.

Definido o tipo de chapa de aço a ser utilizado como reforço, sabendo-se as características e propriedades da seção original e o momento fletor inicial e final, inicia-se o dimensionamento pelo método desenvolvido por Cánovas (1988). Por simplificação proposta por Souza e Ripper (1998), arbitra-se que  $Z_l=0,9.d$  e  $Z_s=1,0.d$  e considera-se armadura existente como simples.

### 1) Linha neutra

$$Z_l = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 35,7 = 32,13 \text{ cm}$$

$$Z_s = 35,7 \text{ cm}$$

$$x = \frac{(z - Z_l)}{0,8} \cdot 2 = \frac{(35,7 - 32,13)}{0,8} \cdot 2 = 8,925 \text{ cm}$$

### 2) Momento fletor do reforço

$$M_t = M_p + M_s$$

$$6580 = 4424 + M_s$$

$$\therefore M_s = 2156 \text{ kN.cm}$$

### 3) Verificações

$$\sigma_{cp} + \sigma_{cs} \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$F_c = \frac{M_t}{Z_l} = \frac{6580}{32,13} = 204,79 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp} + \sigma_{cs} = \sigma_{ct} = \frac{F_c}{A_c} = \frac{204,79}{0,8 \cdot 8,925 \cdot 20} = 1,434 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{3,0}{1,4} = 2,14 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \therefore OK$$

$$\sigma_{sp} + \sigma_{ss} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

$$\sigma_{ss} = \frac{F_{ss}}{A_s} = \frac{2156}{32,13} \cdot \frac{1}{4} = 16,77 \frac{kN}{cm^2} = 167,7 MPa$$

$$\sigma_{sp} = \frac{F_{sp}}{A_s} = \frac{4424}{32,13} \cdot \frac{1}{4} = 34,42 \frac{kN}{cm^2} = 342,7 MPa$$

$$\sigma_{sp} + \sigma_{ss} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \rightarrow 167,7 + 342,47 > 434,78$$

$$\therefore \sigma_{ss} = 434,78 - 342,47 = 92,31 MPa$$

#### 4) Tensão no reforço

$$\sigma_{srs} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} - \sigma_{sp} \leq \frac{f_{yrk}}{\gamma_s}$$

$$\sigma_{srs} = \frac{500}{1,15} - 342,7 \leq \frac{250}{1,15}$$

$$\sigma_{srs} = 92,08 MPa \leq 215,39 MPa \quad \therefore OK$$

#### 5) Área da seção transversal da chapa de reforço

Considera-se que o aço tracionado existente esteja trabalhando no seu patamar de escoamento, não subtraindo área de sua seção para cálculo da área do reforço. Portanto temos:

$$A_R = \frac{M_s}{Z_s \cdot \sigma_{srs}} = \frac{2156}{35,79,208} = 6,56 cm^2$$

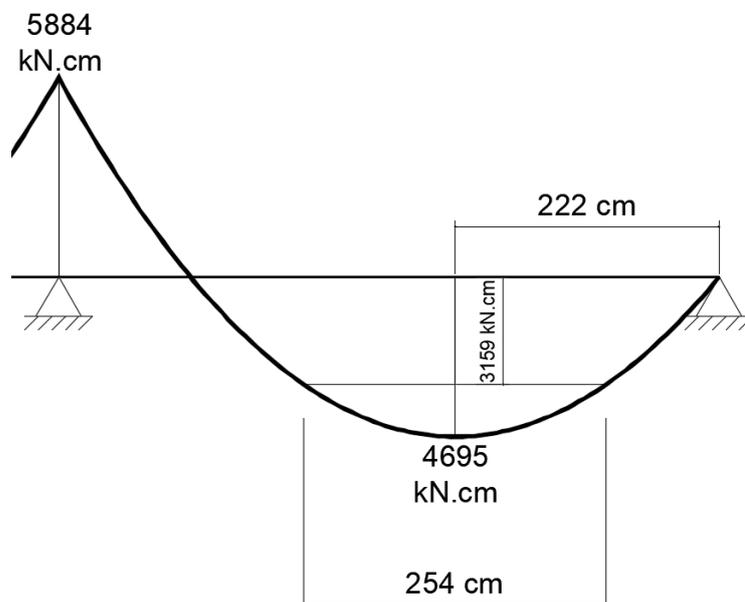
Com isso, calcula-se a largura e espessura da chapa de reforço:

$$e_{ch} = \frac{A_R}{b} = \frac{6,56}{15} = 0,44 cm$$

Assim, especifica-se a chapa de 5 mm de espessura. Porém não há chapa de 5 mm de espessura disponível comercialmente em aço MR 250, portanto é escolhido a próxima espessura acima, que é de 6,35 mm.

#### 4.1.6.1 Comprimento do reforço

O comprimento do reforço à flexão foi calculado comparando os diagramas de momento fletor pré-ampliação e pós-ampliação da edificação (Figura 29), e pelo cálculo do comprimento de ancoragem.



**Figura 29 - Comprimento e posição do reforço em chapa de aço.**  
**Fonte: O autor (2017).**

Para calcular o comprimento de ancoragem, utilizou-se o método proposto por Róstasy. Assim, tem-se:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{30^2} = 2,896 \text{ MPa}$$

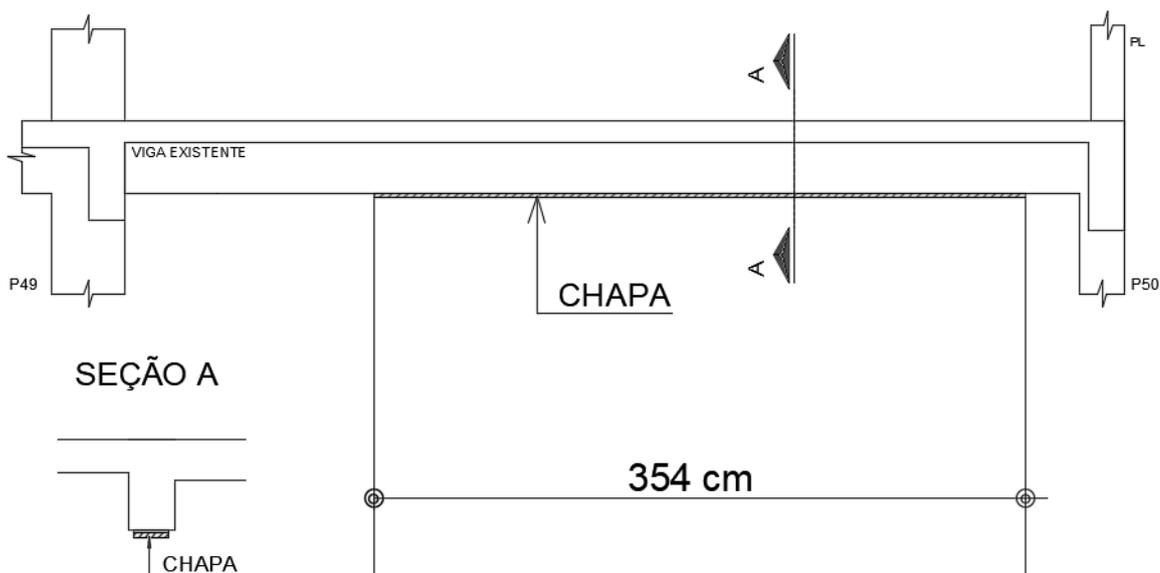
$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{ch} \cdot t_{ch}}{f_{ct,m}}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{210000 \cdot 6,35}{2,896}} = 475 \text{ mm}$$

Dessa forma, o comprimento de ancoragem de cada lado será de aproximadamente 50 cm, o que exige um comprimento total da chapa de 3,54 m.

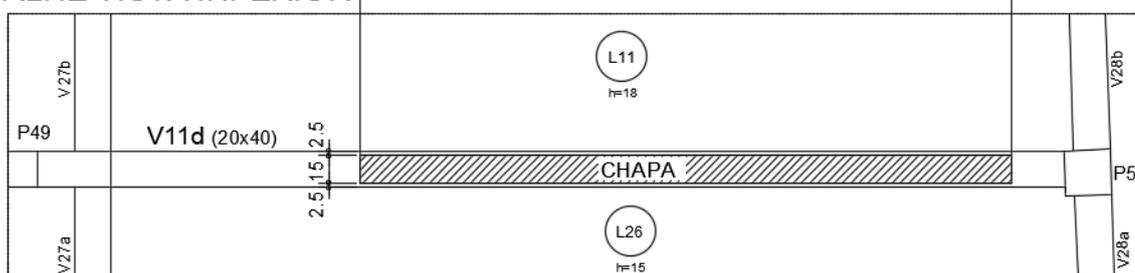
#### 4.1.6.2 Detalhamento do reforço com chapa colada

Assim, com a posição, o comprimento e a espessura do reforço determinadas, tem-se o detalhamento do reforço à flexão com colagem de chapa de aço (Figura 30).

## DETALHE EM ELEVAÇÃO



## DETALHE VISTA INFERIOR



**Figura 30 - Detalhamento do reforço a flexão com colagem de chapa de aço.**  
**Fonte: O autor (2017).**

Deverá ser utilizada resina epóxi bicomponente de média fluidez para a colagem das chapas, com uma distribuição homogênea sobre a superfície a ser colada, de espessura máxima de 2 mm. É recomendado o uso de chumbadores para garantir a aderência entre a resina e o substrato, pela espessura de 6,35 mm da chapa.

#### 4.1.7 Dimensionamento do Reforço com Utilização de CFRC

Para o dimensionamento do reforço com uso de sistema de fibra carbono, optou-se em utilizar uma manta de fibra de carbono unidirecional com 0,165 mm de espessura,  $E_{fc}=228000$  MPa, resistência a tração de até 3200 MPa e deformação máxima de 1,7% na ruptura.

Dadas as especificações do material a ser empregado no reforço e as características da seção original, inicia-se o dimensionamento do reforço à tração. Por meio de tentativas, atribui-se valores para a altura da linha neutra ( $x$ ) até determinar o

equilíbrio dos momentos. Como forma de simplificar o dimensionamento, desprezou-se a resistência da armadura comprimida.

1) Deformação inicial na base da viga para momento fletor resistente

$$\beta_c = \frac{M_{d,resistenteAS}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{5786,91}{20 \cdot 35,7^2 \cdot 2,14} = 0,106$$

$$\beta_c = 0,68 \cdot \beta_x \cdot (1 - 0,4 \cdot \beta_x) = 0,106$$

$$\beta_x = 0,168$$

$$\beta_z = 1 - 0,4 \cdot \beta_x = 1 - 0,4 \cdot 0,168 = 0,933$$

$$z = \beta_z \cdot d = 0,933 \cdot 35,7 = 33,3 \text{ cm}$$

$$F_s = \frac{5786,91}{33,3} = 173,78$$

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{173,78}{4} = 43,44 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_s \cong \varepsilon_{bi} = \frac{f_s}{E_s} = \frac{43,44}{21000} = 2,07\text{‰}$$

2) Equilíbrio de momentos

- X=6 cm

Para  $\varepsilon_c=3,5\text{‰}$ ,  $\varepsilon_s=17,325\text{‰}$ , então adota-se  $\varepsilon_s=10\text{‰}$  e  $\sigma_s=43,48 \text{ kN/cm}^2$ .

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot f_c = 0,8 \cdot 6 \cdot 20 \cdot 1,82 = 174,72 \text{ kN}$$

$$F_s = A_s \cdot \sigma_s = 4 \cdot 43,48 = 173,92 \text{ kN}$$

$$M_s = F_c \cdot z + F_{fc} \cdot z_f \geq M_d$$

$$M_s = 174,72 \cdot 33,3 + F_{fc} \cdot 4 = 6580$$

$$F_{fc} = 190,45 \text{ kN}$$

$$M_c = 173,92 \cdot 33,3 + F_{fc} \cdot 36,6 = 6580$$

$$F_{fc} = 20,3 \text{ kN}$$

- X=6,75 cm

Para  $\varepsilon_c=3,5\%$ ,  $\varepsilon_s=15,011\%$ , então adota-se  $\varepsilon_s=10\%$  e  $\sigma_s=43,48 \text{ kN/cm}^2$ .

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot f_c = 0,8 \cdot 6,75 \cdot 20 \cdot 1,82 = 196,56 \text{ kN}$$

$$F_s = A_s \cdot \sigma_s = 4,43,48 = 173,92 \text{ kN}$$

$$M_s = F_c \cdot z + F_{fc} \cdot z_f \geq M_d$$

$$M_s = 196,56 \cdot 33 + F_{fc} \cdot 4 = 6580$$

$$F_{fc} = 23,38 \text{ kN}$$

$$M_c = 173,92 \cdot 33 + F_{fc} \cdot 37 = 6580$$

$$F_{fc} = 22,72 \text{ kN}$$

*∴ está em equilíbrio*

### 3) Determinação da área de fibra de carbono

Por semelhança de triângulos, calcula-se a deformação  $\varepsilon$  na base da viga, considerando  $\varepsilon_s=10\%$ .

$$\varepsilon_{fc} = \varepsilon - \varepsilon_{bi} = 11,38 - 2,07 = 9,31\%$$

$$f_{fc} = \varepsilon_{fc} \cdot E_{fc} = 9,31\% \cdot 228000 = 2123,06 \text{ MPa}$$

$$A_{fc} = \frac{F_{fc}}{f_{fc}} = \frac{23,38}{212,306} = 0,11 \text{ cm}^2$$

$$b_{fc} = \frac{A_{fc}}{e_{fc}} = \frac{0,11}{0,0165} = 6,67 \text{ cm de largura}$$

Para aplicação da fibra de carbono, especifica-se a largura de 10 cm, evitando perdas no corte da manta. Neste caso o reforço terá uma camada de manta de fibra de carbono com 10 cm de largura.

Para o comprimento do reforço, calcula-se o comprimento de ancoragem:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{30^2} = 2,896 \text{ MPa}$$

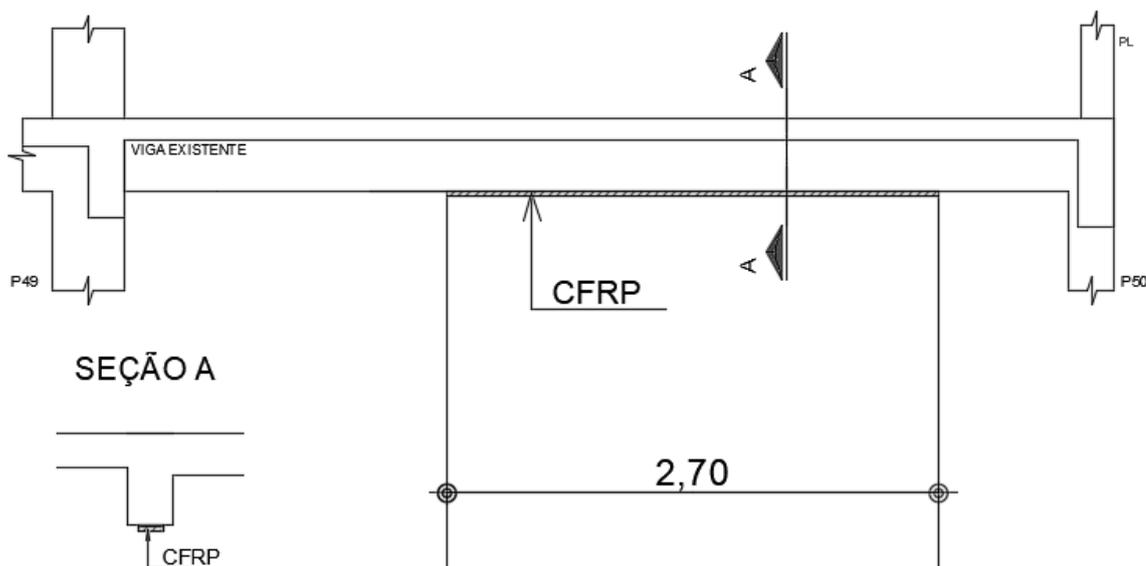
$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fc} \cdot t_{fc}}{f_{ct,m}}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{228000 \cdot 0,165}{2,896}} = 80 \text{ mm}$$

Portanto, o comprimento total será de 2,54 m, mais 8 cm de cada lado, totalizando 2,70 m de reforço.

#### 4.1.7.1 Detalhamento do reforço com CFRP

Assim, com o comprimento, o número de camadas e a largura do reforço determinadas, tem-se o detalhamento do reforço à flexão com o uso de CFRP (Figura 31).

#### DETALHE EM ELEVÇÃO



#### DETALHE VISTA INFERIOR

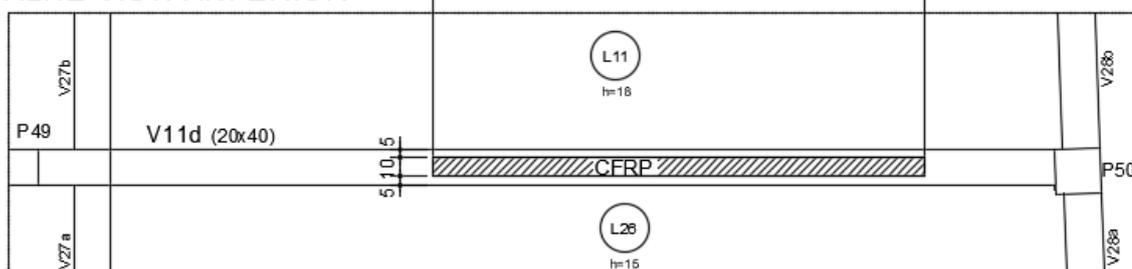


Figura 31 - Detalhamento do reforço à flexão com CFRP.  
Fonte: O autor (2017).

Deve-se fazer a preparação da superfície da viga que receberá o reforço, regularizando-a com imprimador e aguardando o tempo recomendado para aplicação da resina saturante, prosseguindo, assim, com a aplicação da manta de fibra de carbono e a camada final de resina saturante.

## 4.2 ORÇAMENTO ANALÍTICO

De acordo com os resultados obtidos para o dimensionamento do reforço da viga V11 trecho 'd' foram estimados os custos para execução, considerando material, equipamentos e mão-de-obra.

Os valores obtidos nas composições de preço unitário para execução de reforço em viga utilizando três métodos distintos não devem ser usados de forma generalizada, pois os custos irão variar conforme a região da obra e peculiaridades de cada projeto.

### 4.2.1 Aumento de Seção da Viga

Para o cálculo do consumo de materiais para execução do reforço foram utilizados os dados do dimensionamento, calculando-se o consumo de cada material de acordo com o detalhamento do projeto. Os preços unitários foram obtidos de bases do governo e pesquisa de mercado.

Para o cálculo da produtividade foram somados os tempos para execução das tarefas utilizando a TCPO 14 (PINI, 2012), de acordo com a listagem abaixo:

- Armador e ajudante de armador: foram multiplicadas as produtividades de corte, dobra e montagem de armadura pelo consumo de aço por metro linear de reforço;
- Oficial de concretagem e ajudante: foram somadas as produtividades para apicoamento de concreto, lançamento e cura do concreto;
- Carpinteiro e ajudante: foram somadas as produtividades para fabricação, montagem e desmontagem de fôrmas para vigas, multiplicando o resultado pelo consumo de fôrma por metro linear de reforço.

Os valores de mão-de-obra e materiais foram obtidos com base na tabela de maio de 2017 do SINAPI e com base em pesquisa de mercado no mesmo período na região de Curitiba – PR.

Dessa forma, fez-se a estimativa do custo unitário por metro linear para reforço de viga em concreto armado, para a situação específica desta obra. Os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição de custo unitário para reforço por encamisamento de seção.

ESPECIFICAÇÃO: Reforço Estrutural de Viga em Concreto Armado utilizando o método de aumento de seção. Considerando reforço à flexão com 2Ø de 16mm para armadura positiva e estribo de 6,3mm a cada 0,16 m.							UNIDADE
							m
INSUMOS				PREÇO UNITÁRIO	CUSTOS PARCIAIS(R\$)		SUBTOTAL
COMPONENTES	QUANT.	Un.		MATERIAL	MÃO DE OBRA		
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	Adesivo estrutural a base de resina epóxi, bicomponente, baixa viscosidade	0,2	kg	93,19	18,64		85,86
	Concreto C40, brita 0, consistência S100, incluindo proporcional de bombeamento	0,055	m <sup>3</sup>	422,96	23,26		
	Vergalhão de aço CA-50, bitolas variadas	5,7728	kg	3,25	18,76		
	Arame recozido BWG 18	0,178	kg	12,95	2,31		
	Sistema de escoramento e fôrmas (reaproveitamento 3x) para a execução de vigas de concreto, com escoras metálicas telescópicas (2 ud/m <sup>2</sup> ), e compensado de 17mm	0,95	m <sup>2</sup>	24,10	22,90		
	Martelo rompedor SDS Max 6 Joules com ponteira e talhadeira de 11"	0,2	h	7,00	1,40		
	Lixadeira angular com lixa de fibra 180mm para concreto	0,1	h	5,00	0,50		
						85,86	
MÃO DE OBRA	Armador	0,75046	h	7,96		5,97	41,32
	Ajudante de armador	1,3162	h	6,11		8,04	
	Oficial concretagem	0,055	h	7,96		0,44	
	Ajudante concretagem	0,055	h	6,11		0,34	
	Carpinteiro	0,8474	h	7,96		6,75	
	Ajudante de carpinteiro	0,1881	h	6,11		1,15	
	Leis Sociais	126	%			18,63	
						41,32	
<b>Custo ( MAT. + M.O. + L.S.)</b>							<b>127,18</b>
Incidência de mão de obra s/						<b>32,49%</b>	
Incidência de material s/ custo					<b>67,51%</b>		
<b>Bonificação e Despesas</b>		<b>10</b>	<b>%</b>				<b>12,72</b>
Atualizado em 13/06/2017						<b>TOTAL(R\$)</b>	<b>139,90</b>

Fonte: O autor (2017).

Com o valor do custo unitário para execução de um metro de reforço pelo método de encamisamento total da seção, calcula-se o valor estimado total para executar o reforço da Viga V11 trecho 'D'. O comprimento total da viga é de 5,23 m, resultando num custo estimado de R\$731,68.

#### 4.2.2 Colagem de Chapas de Aço

Para o cálculo do consumo de materiais para execução do reforço foram utilizados os dados do dimensionamento, calculando-se o consumo de cada material de acordo com o detalhamento do projeto. Os preços unitários para mão-de-obra e materiais foram obtidos de bases do governo e pesquisa de mercado na região de Curitiba - PR.

Quanto ao cálculo da produtividade de cada colaborador, utilizou-se a base de dados paramétricas da CYPE (2017), que é baseada em obras similares executadas no Brasil.

Dessa forma, foi elaborada a estimativa do custo unitário por metro linear para reforço de viga em concreto armado, para a situação específica desta obra. Os dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição de custo unitário para reforço com chapa de aço.

ESPECIFICAÇÃO: Reforço Estrutural de Viga em Concreto Armado utilizando o método de colagem de chapas de aço até 6,35 mm de espessura com 15 cm de largura. Considerando reforço à flexão e ao cisalhamento.							UNIDADE
							m
INSUMOS				PREÇO UNITÁRIO	CUSTOS PARCIAIS(R\$)		SUBTOTAL
COMPONENTES		QUANT.	Un.		MATERIAL	MÃO DE OBRA	
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	Adesivo estrutural a base de resina epóxi, bicomponente, baixa viscosidade, com 2mm de espessura	0,42	kg	93,19	39,14		86,22
	Placa de aço laminado ASTM A36 (MR 250) cortada e com um lado tratado para obter rugosidade com jateamento de areia ou granalha de aço	9,9695	kg	3,85	38,38		
	Escora metálica telescópica, até 3m de altura	2	un.	2,6	5,20		
	Chumbador tipo PBA com arruela e porca 2.3/4" x 3/8"	2	un.	1,5	3,00		
	Lixadeira angular com lixa de fibra 180mm para concreto	0,1	h	5	0,50		
MÃO DE OBRA	Montador de estruturas metálicas	0,4465	h	7,96		3,55	12,96
	Ajudante de montador de estruturas metálicas	0,3572	h	6,11		2,18	
	Leis Sociais	126	%			7,23	
							12,96
<b>Custo ( MAT. + M.O. + L.S.)</b>							<b>99,19</b>
Incidência de mão de obra s/ custo							13,07%
Incidência de material s/ custo							86,93%
<b>Bonificação e Despesas</b>							<b>9,92</b>
Atualizado em 13/06/2017							<b>TOTAL(R\$) 109,11</b>

Fonte: O autor (2017).

Com o valor do custo unitário para execução de um metro de reforço pelo método de colagem de chapas de aço, calcula-se o valor estimado total para executar o reforço da Viga V11 trecho 'D'. De forma aproximada para considerar o reforço ao cisalhamento, utiliza-se o comprimento total da viga, apesar do reforço ao momento fletor ter apenas 3,54 m. Sendo o comprimento total da viga de 5,23 m, isso resultará num custo de execução de R\$570,64.

#### 4.2.3 Compósito de Fibra de Carbono

Para o cálculo do consumo de materiais para execução do reforço foram utilizados os dados do dimensionamento, calculando-se o consumo de cada material

de acordo com o detalhamento do projeto. Os preços unitários para mão-de-obra e materiais foram obtidos de bases do governo e pesquisa de mercado na região de Curitiba - PR.

Quanto ao cálculo da produtividade de cada colaborador, utilizou-se a base de dados paramétricas da CYPE (2017), que é baseada em obras similares executadas no Brasil.

Dessa forma, foi elaborada a estimativa do custo unitário por metro linear para reforço de viga em concreto armado, para a situação específica desta obra. Os dados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Composição de custo unitário para reforço com CFRP.**

ESPECIFICAÇÃO: Reforço Estrutural de Viga em Concreto Armado utilizando manta de fibra de carbono com 0,165mm de espessura e 10 cm de largura. Considerando reforço à flexão e ao cisalhamento.							UNIDADE	
INSUMOS							m	
COMPONENTES	QUANT.	Un.	PREÇO UNITÁRIO	CUSTOS PARCIAIS(R\$)		SUBTOTAL		
				MATERIAL	MÃO DE OBRA			
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	Primer de dois componentes à base de resina epóxi	0,088	kg	93,19	8,20			
	Manta de fibra de carbono de 100 mm de largura e 0,165 mm de espessura, módulo de elasticidade 228000 N/mm <sup>2</sup> , resistência à tração 3200 MPa e deformação limite 1,7%	0,11	m <sup>2</sup>	254,00	27,94			
	Saturante de dois componentes à base de resina epóxi	0,165	kg	104,59	17,26			
	Lixadeira angular com lixa de fibra 180mm para concreto	0,5	h	5,00	2,50			
							55,90	
MÃO DE OBRA	Professional	0,55	h	8,28		4,55		
	Ajudante	0,55	h	6,68		3,67		
	Leis Sociais	126	%			10,37		
						18,60		
<b>Custo ( MAT. + M.O. + L.S.)</b>							<b>74,49</b>	
Incidência de mão de obra s/ custo							24,96%	
Incidência de material s/ custo							75,04%	
<b>Bonificação e Despesas Indiretas</b>							<b>7,45</b>	
Atualizado em 13/06/2017							<b>TOTAL(R\$)</b>	<b>81,94</b>

Fonte: O autor (2017).

Com o valor do custo unitário para execução de um metro de reforço com uso de compósito de fibra de carbono, calcula-se o valor estimado total para executar o reforço da Viga V11 trecho 'D'. De forma aproximada, para considerar o reforço ao cisalhamento, utiliza-se o comprimento total da viga, apesar do reforço ao momento fletor ter apenas 2,70 m. Sendo o comprimento total da viga de 5,23 m, isso resultará num custo de execução de R\$428,55.

Apesar do método de reforço à flexão com uso de compósito de fibra de carbono ter se apresentado como o mais econômico, este valor poderá ser maior caso a empresa que irá executar seja terceirizada, o que normalmente é a realidade. Outro motivo que poderá elevar o custo de execução por este método, é a quantidade de reforço que será executada, pois os materiais são vendidos em quantidades mínimas que podem inviabilizar o custo, caso seja um trabalho pouco extenso.

### 4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP)

#### 4.3.1 Definição da Meta

A meta definida para o estudo de caso é determinar a melhor solução para o reforço estrutural de três vigas em concreto armado de uma clínica de diagnóstico por imagem. As vigas necessitam de reforço devido ao acréscimo de cargas causado pela ampliação da clínica.

#### 4.3.2 Definição dos Critérios

Os critérios foram definidos levando em conta as principais características desejadas e necessárias para o estudo em questão, porém podem servir de base para estudos futuros com as devidas adaptações necessárias.

Como se tratava de uma clínica de medicina nuclear que continuaria em operação durante a obra de ampliação, seria necessário atender à critérios executivos diferenciados, principalmente quanto ao tempo necessário para se executar o reforço e ocorrer a liberação da área. Além disso, as vigas que necessitavam de reforço estavam justamente em salas que tinham equipamentos para realização de exames médicos e salas de comando. Não havia a possibilidade de interromper parcialmente

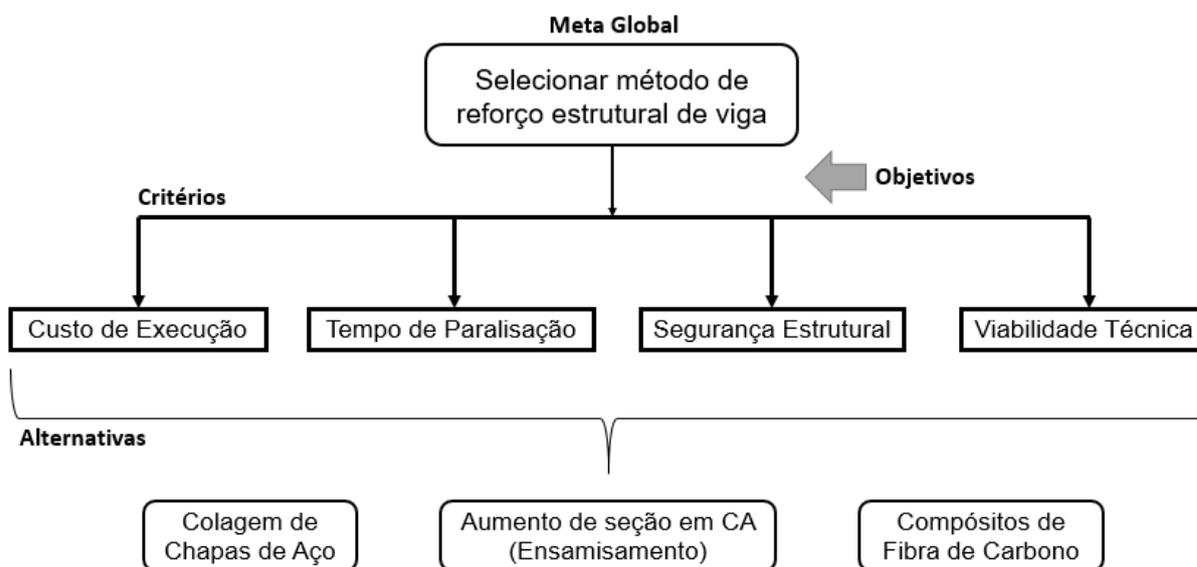
as operações da clínica durante muitos dias, pois geraria prejuízos no faturamento da mesma.

Pensando dessa maneira, estabeleceram-se critérios que tinham grande importância para realização dos reforços nas vigas, com a maior vantagem possível para o cliente. Os critérios escolhidos foram:

- Tempo de paralisação: o tempo de paralisação era crítico para a obra de ampliação em questão, pois o prejuízo financeiro por conta da interrupção das operações da clínica seria cada vez maior, de acordo com o aumento da duração da execução dos reforços;
- Custo de execução: o custo acaba sendo um dos principais fatores envolvidos na análise decisória por envolver o lado da viabilidade da obra.
- Segurança estrutural: a segurança é um critério fundamental para escolha do método de reforço, pois o risco envolvendo o colapso de uma estrutura deve ser o menor possível;
- Viabilidade técnica: se refere a características do local da ampliação (restrição de espaço de trabalho ou espaço confinado) e disponibilidade de mão-de-obra especializada para execução do reforço.

#### 4.3.3 Aplicação do Método *AHP*

Definida a meta global, os objetivos, os critérios e as alternativas a serem analisadas, estrutura-se o problema de forma a orientar a aplicação do método *AHP*, conforme Figura 32.



**Figura 32 - Modelo hierárquico de estruturação do problema.**  
**Fonte: O autor (2017).**

A estruturação do problema permite expor como irá ocorrer a análise hierárquica, possibilitando a discussão do problema com um grupo maior de interessados, como o conselho de uma empresa por exemplo.

#### 4.3.3.1 Análise dos critérios

A partir da construção da hierarquia, os critérios são avaliados aos pares, visando determinar a importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta global. São considerados os aspectos específicos apresentado pelo problema. A análise dos critérios é apresenta na Tabela 5.

**Tabela 5 - Matriz comparativa do grupo de critérios.**

	Custo de Execução	Tempo de Paralisação	Segurança	Viabilidade Técnica
Custo de Execução	1,00	1/7	1/3	1/7
Tempo de Paralisação	7,00	1,00	3,00	3,00
Segurança	3,00	1/3	1,00	1/3
Viabilidade Técnica	7,00	1/3	3,00	1,00
TOTAL	18,00	1,81	7,33	4,48

**Fonte: O autor (2017).**

Prossegue-se, então, para a normalização da matriz, dividindo-se cada valor da tabela pelo total de cada coluna, conforme apresentado na Tabela 6. Para o cálculo do vetor de prioridade (autovetor) é feita a média aritmética em cada linha da matriz normalizada. Dessa forma, pode-se estabelecer a contribuição de cada critério na meta global.

**Tabela 6 - Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios.**

	Custo de Execução	Tempo de Paralisação	Segurança	Viabilidade Técnica	Média (Autovetor)
Custo de Execução	0,06	0,08	0,05	0,03	0,05
Tempo de Paralisação	0,39	0,55	0,41	0,67	0,51
Segurança	0,17	0,18	0,14	0,07	0,14
Viabilidade Técnica	0,39	0,18	0,41	0,22	0,30
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: O autor (2017).

É feita a verificação da consistência dos valores atribuídos para garantir que a avaliação esteja sendo feita de maneira consistente. Calcula-se o Índice de Consistência (*CI*) aplicando-se a Equação 28 e a Relação de Consistência (*CR*) aplicando-se a Equação 29. O resultado da verificação da consistência é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Verificação da consistência da matriz comparativa dos critérios.**

Consistência		Verificação	
Custo de Execução	4,06	Número de critérios	4
Tempo de Paralisação	4,36	Consistência média	4,16
Segurança	4,05	CI	0,054
Viabilidade Técnica	4,19	RI	0,9
TOTAL	16,65	Consistência (CR)	0,060
		Está consistente?	sim

Fonte: O autor (2017).

Como o valor da Relação de Consistência (*CR*) é menor do que 0,1 (10%), considera-se a matriz como consistente em relação aos valores atribuídos. Para uma melhor visualização dos resultados, os valores dos vetores de prioridade são plotados na Figura 33.

**Figura 33 - Resultados de prioridade para o grupo de critérios.**

Fonte: O autor (2017).

Portanto, na priorização do grupo de critérios, o critério Tempo de Paralisação foi considerado o mais relevante (51%) dentro do grupo, ou seja, ele é o critério que mais contribui para a meta global. O critério que menos contribui (5%) é o critério Custo de Execução. Dessa forma, constata-se que uma avaliação positiva do critério

Tempo de Paralisação contribui aproximadamente 10 vezes mais do que uma avaliação positiva no critério Custo de Execução.

#### 4.3.3.2 Análise das alternativas

Com a hierarquia estruturada e as prioridades dos critérios estabelecidas, é possível determinar como cada alternativa proposta comporta-se em relação aos critérios estabelecidos.

Da mesma maneira que foi realizada a priorização do grupo de critérios, as alternativas propostas são comparadas duas a duas em relação a cada critério estabelecido, conforme apresentado nas quatro tabelas subsequentes. O processo de normalização das matrizes, cálculo dos vetores de prioridade para cada alternativa à luz de cada critério e a verificação da consistência também devem ser realizados para todas as matrizes comparativas (Apêndice D).

**Tabela 8 - Matriz comparativa das alternativas à luz do critério Custo de Execução.**

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC
Chapa de Aço	1,00	3,00	0,33
Encamisamento	0,33	1,00	0,20
CFRC	3,00	5,00	1,00

Fonte: O autor (2017).

**Tabela 9 - Matriz comparativa das alternativas à luz do critério Tempo de Execução.**

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC
Chapa de Aço	1,00	7,00	2,00
Encamisamento	0,14	1,00	0,20
CFRC	0,50	5,00	1,00

Fonte: O autor (2017).

**Tabela 10 - Matriz comparativa das alternativas à luz do critério Segurança Estrutural.**

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC
Chapa de Aço	1,00	0,20	1,00
Encamisamento	5,00	1,00	5,00
CFRC	1,00	0,20	1,00

Fonte: O autor (2017).

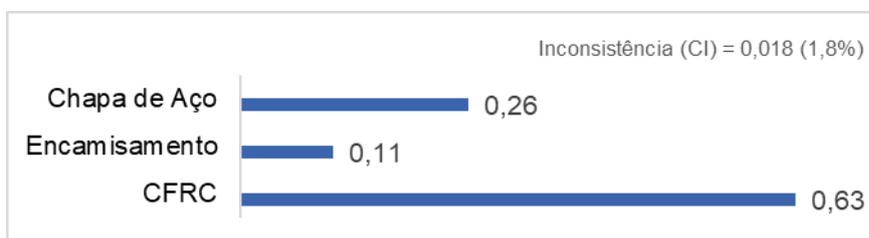
**Tabela 11 - Matriz comparativa das alternativas à luz do critério Viabilidade Técnica.**

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC
Chapa de Aço	1,00	7,00	3,00
Encamisamento	0,14	1,00	0,20
CFRC	0,33	5,00	1,00

Fonte: O autor (2017).

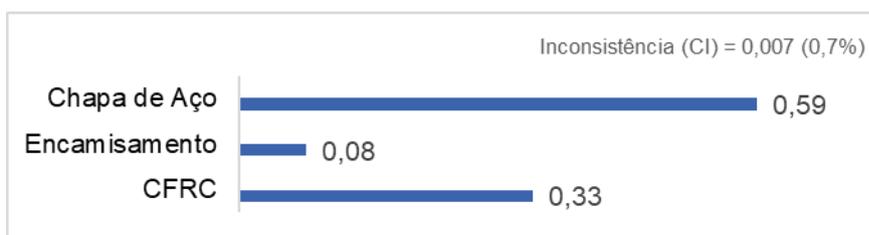
#### 4.3.3.3 Resultados da análise hierárquica

Calculadas as prioridades e as relações de consistência para todas as matrizes comparativas, tem-se o peso relativo de cada uma das alternativas em cada um dos critérios, conforme apresentado nas quatro figuras subsequentes.



**Figura 34 - Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Custo de Execução.**  
**Fonte: O autor (2017).**

À luz do critério Custo de Execução a alternativa que é mais preferível é o método de reforço com *CFRP* (63%), seguido do método de reforço por colagem de Chapas de Aço (26%). Por último, o método de Encamisamento foi o menor preferível (11%).



**Figura 35 - Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Tempo de Paralisação.**  
**Fonte: O autor (2017).**

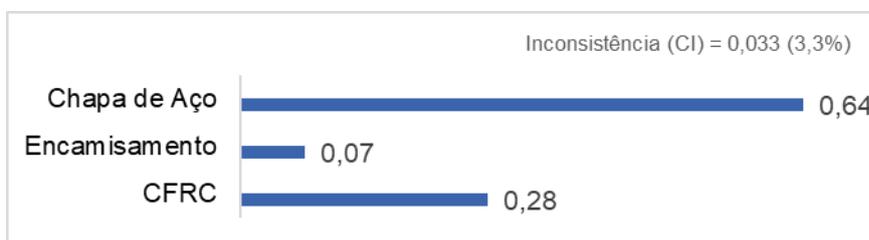
À luz do critério Tempo de Paralisação as duas alternativas que tiveram maior preferência foram a de reforço com Chapas de Aço (59%) e de utilização de *CFRP* (33%). Portanto, o método que apresentou a menor preferência foi o do método de Encamisamento (8%), por demandar maior tempo de paralisação das operações da clínica.



**Figura 36 - Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Segurança Estrutural.**

**Fonte: O autor (2017).**

Por conta de apresentar melhor resistência a ação do fogo em relação aos outros dois métodos, o método de Encamisamento (71%) foi o mais preferível à luz do critério Segurança Estrutural. Empatados na segunda posição, os métodos de Chapas de Aço (14%) e de *CFRP* (14%) obtiveram menor preferência pois são suscetíveis ao descolamento e não resistem à ação do fogo.



**Figura 37 - Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Viabilidade Técnica.**

**Fonte: O autor (2017).**

Em relação ao critério Viabilidade Técnica, a alternativa de método de reforço com Chapas de Aço obteve a maior preferência (64%), por não exigir a remoção total da parede sob a viga V11 e ter disponibilidade imediata de mão-de-obra para execução. No caso da alternativa *CFRC* (28%), exigiria a contratação de outra empresa especializada para executar o reforço, já que a equipe disponível na obra não tem o *know-how* para tal. Quanto ao método do Encamisamento, com a menor preferência entre as alternativas (7%) para o critério Viabilidade Técnica exigiria a remoção completa da parede sob a viga dentro da sala de exames da clínica.

Com o cruzamento entre os resultados de todas as avaliações das alternativas para todos os critérios, calcula-se a prioridade final pelo somatório dos produtos entre o peso de prioridade da alternativa e o peso do critério, conforme demonstrado na multiplicação de matrizes abaixo.

$$\begin{bmatrix} 0,260 & 0,591 & 0,143 & 0,643 \\ 0,106 & 0,075 & 0,714 & 0,074 \\ 0,634 & 0,334 & 0,143 & 0,283 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,05 \\ 0,51 \\ 0,14 \\ 0,30 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,526 \\ 0,166 \\ 0,308 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 52,6\% \\ 16,6\% \\ 30,8\% \end{pmatrix}$$

Com isso, tem-se o resultado final da aplicação do Método de Análise Hierárquica (*AHP*) para a escolha da melhor alternativa de reforço estrutural no caso apresentado.

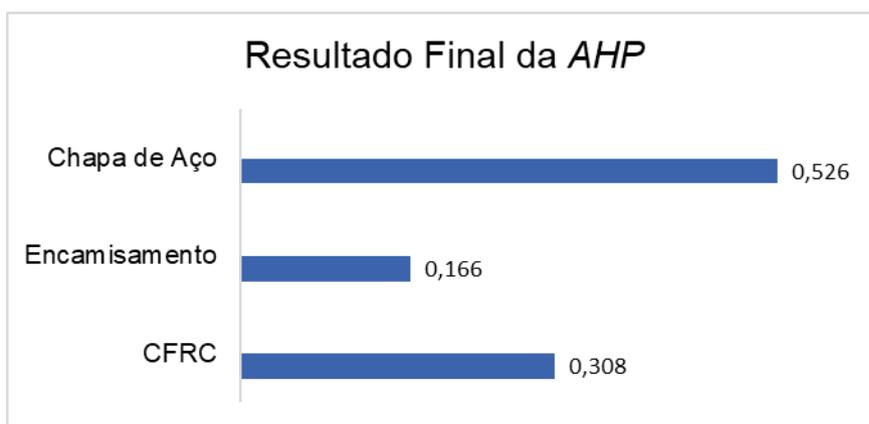


Figura 38 - Resultado final da aplicação da AHP para escolha da melhor alternativa.  
Fonte: O autor (2017).

Dessa forma, observa-se que a alternativa que melhor corresponde a solução do problema apresentado, de acordo com a meta definida, foi a utilização do método de reforço com a colagem de chapas de aço, com uma preferência global de 52,6%. Na segunda posição, o método de reforço com uso de *CFRP* obteve uma preferência global de 30,8%, principalmente pelo alto peso atribuído para os critérios de Viabilidade Técnica e Tempo de Paralisação. Como a alternativa menos viável para aplicação no cenário apresentado, temos o método de reforço estrutural com utilização da técnica de Aumento de Seção de concreto armado (Encamisamento), com uma preferência de apenas 16,6%.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se aplicar o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)* como ferramenta de apoio à tomada de decisão multicritério, aplicando-o em um estudo de caso de reforço estrutural de vigas em concreto armado. Tentou-se evidenciar a aplicação da metodologia da análise hierárquica em situações em que o engenheiro deve tomar decisões importantes no campo da construção civil, buscando sempre a solução mais viável para o problema.

Além disso, a aplicação do dimensionamento dos reforços e seus detalhamentos foram cruciais para que a estimativa de custo de cada método de reforço fosse consistente com a realidade, agregando maior conhecimento ao trabalho. Apesar disso, se tem ciência de que em um projeto real de reforço estrutural seria necessária maior cautela quanto as demais verificações estruturais, primordiais para não cometer erros de dimensionamento.

Em relação aos orçamentos desenvolvidos para cada método de reforço estrutural, deve-se ter ciência de que tem como objetivo exclusivo possibilitar a comparação das alternativas de reforço em relação ao critério Custo de Execução. Dessa maneira, para poder aplicá-lo em situações análogas, deve-se ter o cuidado de atender aos custos de acordo com a extensão do projeto de reforço a ser executado. Por exemplo, em relação ao custo obtido para reforço com fibra de carbono, refere-se a uma situação ideia, onde não há necessidade de terceirização do serviço e para um projeto de maiores proporções.

O método de análise hierárquica permite que os decisores tenham a sua disposição uma ferramenta matemática de apoio à decisão, que permite a análise de critérios quantitativos e qualitativos, permitindo justificar as escolhas tomadas.

Apesar de ser um método de simples aplicação, deve-se ter a cautela durante a estruturação das matrizes comparativas para não atribuir valores desproporcionais e inconsistentes. Dessa maneira, a Relação de Consistência (*CR*) torna-se essencial para a homogeneização do conhecimento quanto à decisão a ser tomada. No entanto, há falta de embasamento teórico para o limite de tolerância do *CR* ser de 10%. Assim, é importante afirmar que esse critério deve ser reavaliado, proporcionando aos usuários do método uma maior segurança na sua aplicação.

Observa-se que a tomada de decisão para escolha de sistemas de produção na engenharia civil, vai muito além de apenas avaliar o custo de execução de cada método. A melhor solução para um problema sempre virá acoplada a critérios e requisitos que devem ser avaliados de forma objetiva, buscando sempre a satisfação do cliente e o melhor desempenho do produto final.

Assim, pode-se considerar o Método de Análise Hierárquica como uma alternativa versátil para problemas de tomada de decisão, não somente na indústria seriada, como também na construção e outras áreas da engenharia civil, pois permite a sua aplicação em diversas áreas do conhecimento.

Como sugestão para trabalhos futuros, nesta área de pesquisa, propõem-se:

- Englobar outros métodos de reforço de estruturas na análise *AHP*, como a protensão externa e uso de perfis metálicos;
- Aplicação do método *AHP* ou outros métodos de auxílio na tomada de decisão em problemas de seleção de processo construtivo, como sistemas de fundações, sistemas de contenções, tipos de laje para edifícios, sistemas de pavimentação e sistemas de fechada para edificações;
- Aplicar outros métodos de auxílio a tomada de decisão e comparar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 1-15. 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, p. 1-247. 2008. ( ISBN 978-85-07-00933-7).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 1-256. 2014. (ISBN 978-85-07-04941-8).

ALSHAIKHLY, A. S.; ALAM, M. A.; MUSTAPHA, K. N. An Advanced Method for Repairing Severely Damaged Beams in Shear with Externally Bonded Steel Plates Using Adhesive and Steel Connectors. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Dhahran, 41, n. 10, Outubro 2016. 4077–4097.

ALVES, L. G. K.; NYKIEL, T. P.; BELDERRAIN, M. C. N. **Comparação analítica entre métodos de apoio multicritério à decisão (AMD)**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills, p. 5-71. 2008. (ISBN 978-0-87031-285-4).

AYKAC, S; KALKAN, I.; AYKAC, B.; KARAHAN, S.; KAYAR, S. Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Beams Using External Steel Plates. **Journal of Structural Engineering**, Ann Arbor, 139, n. 6, 1 Junho 2013. 929-939.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5ª edição. ed. [S.I.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., v. Volume 2, 2009. ISBN ISBN 978-85-216-1003-8.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 13-20. 2003.

BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the analytic hierarchy process**. Londres: Springer, 2004. ISBN ISBN 978-1-85233-864-0.

BISBY, L. A.; GREEN, M. F.; KODUR, V. K. R. Response to fire of concrete structures that incorporate FRP. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 7, n. 3, p. 136–149, 29 Abril 2005. ISSN DOI: 10.1002/pse.198.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 70-76. 2011.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1ª edição. ed. São Paulo: Editora PINI Ltda., v. 1, 1988.

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 5. 1998.

COSTA, H. G. Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. **XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Niterói, n. 1ª Edição, 23 novembro 2002. 1-122.

CYPE INGENIEROS S.A. Gerador de Preços - Brasil. **CYPE Ingenieros**, 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.geradordeprecos.info/>>. Acesso em: 13 Junho 2017.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum**, Maringá, 24, Outubro 2002. 1783-1891.

FREITAS, L. B. **Reforço de vigas de concreto armado ao esforço cortante com chapas de aço coladas**. UFRJ. Rio de Janeiro. 1997.

GARDEN, H. N.; HOLLAWAY, L. C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates.

**Composites Part B: Engineering**, Guildford, v. 29, n. 4, p. 411-424, ago. 1998. ISSN S1359-8368(97)00043-7.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Pioneira Thompson Learning, v. 1, 2003. ISBN ISBN-13: 9788522103546.

GOMES, L. F. A. M.; GONZÁLEZ, M. C. A.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. 1ª Edição. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2004. 1-168 p. ISBN ISBN 8522103542.

KARVAT, R. **Apostila de fundamentos de projetos de estruturas em concreto armado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2017.

KOSTLAN, E. Statistical complexity of dominant eigenvector calculation. **Journal of Complexity**, Honolulu, v. 7, n. 4ª, p. 371-379, Dezembro 1991.

LEITE, I. M. S.; FREITAS, F. F. T. **Análise comparativa dos métodos de apoio multicritério a decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE**. XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Bento Gonçalves - RS: ABEPRO - Associação Brasileira de Engenharia de Produção. 2012. p. 1-11.

MACHADO, A. D. P. Viapol, 2014. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 6 Novembro 2016.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. D. O.; BARROS, M. D. S. **O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - Um estudo de caso**. XLI SBPO 2009. Porto Seguro - BA: SOBRAPO. 2009. p. 1778-1788.

MOREIRA, R. A. **Análise Multicritério dos Projetos do Sebrae/RJ através do Electre IV**. Faculdade de Economia e Finanças IBMEC. Rio de Janeiro, p. 30-32. 2007.

NAKAMURA, J. Téchne. **techne.pini.com.br**, Maio 2009. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/146/concreto-reparo-reforco-e-recuperacao-de-concreto-285462-1.aspx>>. Acesso em: 1 Outubro 2016.

PIANCASTELLI, É. M. **Comportamento e desempenho do reforço à flexão de vigas de concreto armado, solicitado a baixa idade e executado inclusive sob carga**. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 180-185. 1997.

PINI. **TCPO, Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos**. 14ª edição. ed. São Paulo: Pini, 2012. ISBN ISBN 978-85-7266-251-2.

PROCALC ENGENHEIROS ASSOCIADOS S/S. **Reforma e ampliação de uma clínica de diagnóstico por imagens**. Curitiba. 2016.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**, Pittsburgh, v. 1, n. 1ª Edição, p. 83-98, 2008.

SANTOS, L. F.; CRUZ, R. B. C. O Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, Rio de Janeiro, 13, n. 1, Jan/Jun 2013. 39-52.

SANTOS, P. M. **Comparação de chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, p. 1-50. 2008.

SENIWONGSE, M.-S. **Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Carbon Fiber Reinforced Polymer**. Architectural Engineering National Conference. Denver: American Society of Civil Engineers. 2008. p. 1-10.

SILVA, P. M. D.; LISERRE, A. P. A. R.; SILVA, A. F. D. VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS POR MEIO DE ENCAMISAMENTO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, 5, n. 2, 6 Novembro 2012. 20-30.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia , Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª Edição. ed. São Paulo: PINI, v. 1, 1998. 152-180 p. ISBN ISBN 85-7266-096-8.

TOMAZ, R. A.; SOARES, F. L.; BARBOSA, P. H. M. **Reforço Estrutural de Lajes de Concreto Armado com Fibra de Carbono**. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro: ABPE - Associação Brasileira de Pontes e Estruturas. 2014.

VARGAS, R. **Utilizando a programação multicritério (AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. PMI Global Congress - North America. Washington: Project Management Institute. 2010.

VIANA, R. D. D. A. **Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 1-130. 2004.



## Cargas L24 - Pré Ampliação

Cargas L24		DIMENSÕES			
Lx	3,7 (m)	Lx	3,7 (m)		
		Ly	4,6 (m)		
ESPESSURA 0,12 (m) CARGA 3,8 (kN/m <sup>2</sup> )	Ly 4,6	Área	17,02 (m <sup>2</sup> )		
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )		
Lx 3,7	Ly 4,6	Espeçura da Laje	0,12 (m)		
		Revestimento	não -		
		Pé-direito pav.	2,8 (m)		
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	5,5 (m)		
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	6,75 (m)		
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	0 (m)		
		CARGAS PERMANENTES			
		Peso Propri.	3 (kN/m <sup>2</sup> )		
Telhado	0,75 (kN/m <sup>2</sup> )				
TOTAL	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )				
CARGAS VARIÁVEIS					
L24	0 (kN/m <sup>2</sup> )				
TOTAL DAS CARGAS					
	3,8 (kN/m <sup>2</sup> )				
Legenda: Engaste					

## Cargas L25 - Pré Ampliação

Cargas L25		DIMENSÕES			
Lx	7,6 (m)	Lx	7,6 (m)		
		Ly	3,8 (m)		
ESPESSURA 0,15 (m) CARGA 4,5 (kN/m <sup>2</sup> )	Ly 3,8	Área	28,88 (m <sup>2</sup> )		
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )		
Lx 7,6	Ly 3,8	Espeçura da Laje	0,15 (m)		
		Revestimento	não -		
		Pé-direito pav.	2,8 (m)		
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	4,15 (m)		
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	11,3 (m)		
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )		
		Comprimento	0 (m)		
		CARGAS PERMANENTES			
		Peso Próprio	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )		
Telhado	0,75 (kN/m <sup>2</sup> )				
TOTAL	4,50 (kN/m <sup>2</sup> )				
CARGAS VARIÁVEIS					
L25	0 (kN/m <sup>2</sup> )				
TOTAL DAS CARGAS					
	4,5 (kN/m <sup>2</sup> )				
Legenda: Engaste					

## Cargas L26 - Pré Ampliação

Cargas L26		DIMENSÕES							
<p><b>ESPESSURA</b> 0,15 (m)</p> <p><b>CARGA</b> 4,5 (kN/m<sup>2</sup>)</p>	<p>5,64</p> <p>Ly</p>	Lx	5,34 (m)						
		Ly	5,64 (m)						
		Área	30,12 (m <sup>2</sup> )						
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )						
		Espessura da Laje	0,15 (m)						
		Revestimento	não -						
		Pé-direito pav.	2,8 (m)						
		Bloco Celular 10cm	0 (Kn/m <sup>3</sup> )						
		Comprimento	0 (m)						
		Bloco Celular 15cm	0 (Kn/m <sup>3</sup> )						
		Comprimento	0 (m)						
		Divisória Leve	0,28 (Kn/m <sup>3</sup> )						
Comprimento	0 (m)								
Lx	5,34								
<p>Legenda: Engaste</p>		<p><b>CARGAS PERMANENTES</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Peso Próprio</td> <td>3,75 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Telhado</td> <td>0,75 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>4,50 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> </table>		Peso Próprio	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )	Telhado	0,75 (kN/m <sup>2</sup> )	Total	4,50 (kN/m <sup>2</sup> )
Peso Próprio	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )								
Telhado	0,75 (kN/m <sup>2</sup> )								
Total	4,50 (kN/m <sup>2</sup> )								
		<p><b>CARGAS VARIÁVEIS</b></p> <table border="1"> <tr> <td>L26</td> <td>0 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> </table>		L26	0 (kN/m <sup>2</sup> )				
L26	0 (kN/m <sup>2</sup> )								
		<p><b>TOTAL DAS CARGAS</b></p> <table border="1"> <tr> <td><b>4,5</b></td> <td><b>(kN/m<sup>2</sup>)</b></td> </tr> </table>		<b>4,5</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>				
<b>4,5</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>								

## APÊNDICE B – CARGAS NAS LAJES PÓS-AMPLIAÇÃO

Cargas L11		DIMENSÕES	
<p><b>ESPESSURA</b> 0,18 (m) <b>CARGA</b> 8,1 (kN/m<sup>2</sup>)</p>	12,15  Ly	Lx	4,96 (m)
		Ly	12,15 (m)
		Área	60,26 (m <sup>2</sup> )
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )
		Espessura da Laje	0,18 (m)
		Revestimento	sim -
		Pé-direito pav.	2,8 (m)
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	5,5 (m)
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	4,8 (m)
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	4,8 (m)
		Lx	4,96
Legenda: Engaste		<b>CARGAS PERMANENTES</b>	
		Peso Propri.	4,5 (kN/m <sup>2</sup> )
		Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )
		Bloco Celular	0,91 (kN/m <sup>2</sup> )
		Divisória Leve	0,06 (kN/m <sup>2</sup> )
		CARDIO	0,16 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>TOTAL</b>	<b>6,58 (kN/m<sup>2</sup>)</b>
		<b>CARGAS VARIÁVEIS</b>	
		L11	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>TOTAL DAS CARGAS</b>	
		<b>8,1</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>

Cargas L20		DIMENSÕES	
<p><b>ESPESSURA</b> 0,12 (m) <b>CARGA</b> 7,0 (kN/m<sup>2</sup>)</p>	11,4  Ly	Lx	2 (m)
		Ly	11,4 (m)
		Área	22,80 (m <sup>2</sup> )
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )
		Espessura da Laje	0,12 (m)
		Revestimento	sim -
		Pé-direito pav.	2,8 (m)
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	0 (m)
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	0 (m)
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	0 (m)
		Lx	2
Legenda: Engaste		<b>CARGAS PERMANENTES</b>	
		Peso Propri.	3 (kN/m <sup>2</sup> )
		Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )
		Bloco Celular	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )
		Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>TOTAL</b>	<b>3,95 (kN/m<sup>2</sup>)</b>
		<b>CARGAS VARIÁVEIS</b>	
		L20	3 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>TOTAL DAS CARGAS</b>	
		<b>7,0</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>

## Cargas L24 - Pós Ampliação

Cargas L24		DIMENSÕES											
		Lx	3,7 (m)										
		Ly	4,6 (m)										
<p><b>ESPESSURA</b> 0,12 (m)</p> <p><b>CARGA</b> 9,4 (kNm<sup>2</sup>)</p>	<p>4,6</p> <p>Ly</p>	Área	17,02 (m <sup>2</sup> )										
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )										
		Espessura da Laje	0,12 (m)										
		Revestimento	sim -										
		Pé-direito pav.	2,8 (m)										
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )										
		Comprimento	5,5 (m)										
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )										
		Comprimento	6,75 (m)										
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )										
Comprimento	0 (m)												
Lx	3,7												
<p>Legenda: Engaste</p>		<p><b>CARGAS PERMANENTES</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Peso Propri.</td> <td>3 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Revestimento</td> <td>0,95 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Bloco Celular</td> <td>3,96 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Divisória Leve</td> <td>0,00 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td><b>TOTAL</b></td> <td><b>7,91 (kN/m<sup>2</sup>)</b></td> </tr> </table>		Peso Propri.	3 (kN/m <sup>2</sup> )	Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )	Bloco Celular	3,96 (kN/m <sup>2</sup> )	Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )	<b>TOTAL</b>	<b>7,91 (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Peso Propri.	3 (kN/m <sup>2</sup> )												
Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )												
Bloco Celular	3,96 (kN/m <sup>2</sup> )												
Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )												
<b>TOTAL</b>	<b>7,91 (kN/m<sup>2</sup>)</b>												
		<p><b>CARGAS VARIÁVEIS</b></p> <table border="1"> <tr> <td>L24</td> <td>1,5 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> </table>		L24	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )								
L24	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )												
		<p><b>TOTAL DAS CARGAS</b></p> <table border="1"> <tr> <td><b>9,4</b></td> <td><b>(kN/m<sup>2</sup>)</b></td> </tr> </table>		<b>9,4</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>								
<b>9,4</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>												

## Cargas L25 - Pós Ampliação

Cargas L25		DIMENSÕES													
		Lx	7,6 (m)												
		Ly	3,8 (m)												
<p><b>ESPESSURA</b> 0,15 (m)</p> <p><b>CARGA</b> 9,7 (kN/m<sup>2</sup>)</p>	<p>3,8</p> <p>Ly</p>	Área	28,88 (m <sup>2</sup> )												
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )												
		Espessura da Laje	0,15 (m)												
		Revestimento	sim -												
		Pé-direito pav.	2,8 (m)												
		Bloco Celular 10cm	1,54 (kN/m <sup>2</sup> )												
		Comprimento	4,15 (m)												
		Bloco Celular 15cm	2,31 (kN/m <sup>2</sup> )												
		Comprimento	11,3 (m)												
		Divisória Leve	0,28 (kN/m <sup>2</sup> )												
Comprimento	0 (m)														
Lx	7,6														
<p>Legenda: Engaste</p>		<p><b>CARGAS PERMANENTES</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Peso Propri.</td> <td>3,75 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Revestimento</td> <td>0,95 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Bloco Celular</td> <td>3,15 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Divisória Leve</td> <td>0,00 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>D-SPECT</td> <td>0,31 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td><b>TOTAL</b></td> <td><b>8,16 (kN/m<sup>2</sup>)</b></td> </tr> </table>		Peso Propri.	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )	Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )	Bloco Celular	3,15 (kN/m <sup>2</sup> )	Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )	D-SPECT	0,31 (kN/m <sup>2</sup> )	<b>TOTAL</b>	<b>8,16 (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Peso Propri.	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )														
Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )														
Bloco Celular	3,15 (kN/m <sup>2</sup> )														
Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )														
D-SPECT	0,31 (kN/m <sup>2</sup> )														
<b>TOTAL</b>	<b>8,16 (kN/m<sup>2</sup>)</b>														
		<p><b>CARGAS VARIÁVEIS</b></p> <table border="1"> <tr> <td>L25</td> <td>1,5 (kN/m<sup>2</sup>)</td> </tr> </table>		L25	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )										
L25	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )														
		<p><b>TOTAL DAS CARGAS</b></p> <table border="1"> <tr> <td><b>9,7</b></td> <td><b>(kN/m<sup>2</sup>)</b></td> </tr> </table>		<b>9,7</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>										
<b>9,7</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>														

## Cargas L26 - Pós Ampliação

Cargas L26		DIMENSÕES	
Lx	5,34 (m)		
Ly	5,64 (m)		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <b>ESPESSURA</b> 0,15 (m)  <b>CARGA</b> 7,2 (Kn/m<sup>2</sup>)         </div>		Área	30,12 (m <sup>2</sup> )
		P. Concreto (γ)	25 (kN/m <sup>3</sup> )
		Espessura da Laje	0,15 (m)
		Revestimento	sim -
		Pé-direito pavimento	2,8 (m)
		Bloco Celular 10cm	1,54 (Kn/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	1,95 (m)
		Bloco Celular 15cm	2,31 (Kn/m <sup>2</sup> )
		Comprimento	3,43 (m)
		Divisória Leve	0,28 (Kn/m <sup>2</sup> )
Comprimento	0 (m)		
Lx	5,34		
<b>Legenda:</b> Engaste		<b>CARGAS PERMANENTES</b>	
		Peso Propri.	3,75 (kN/m <sup>2</sup> )
		Revestimento	0,95 (kN/m <sup>2</sup> )
		Bloco Celular	1,02 (kN/m <sup>2</sup> )
		Divisória Leve	0,00 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>Total</b>	<b>5,72 (kN/m<sup>2</sup>)</b>
		<b>CARGAS VARIÁVEIS</b>	
		L26	1,5 (kN/m <sup>2</sup> )
		<b>TOTAL DAS CARGAS</b>	
		<b>7,2</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>

APÊNDICE C – CARGAS NAS LAJES PRÉ-AMPLIAÇÃO

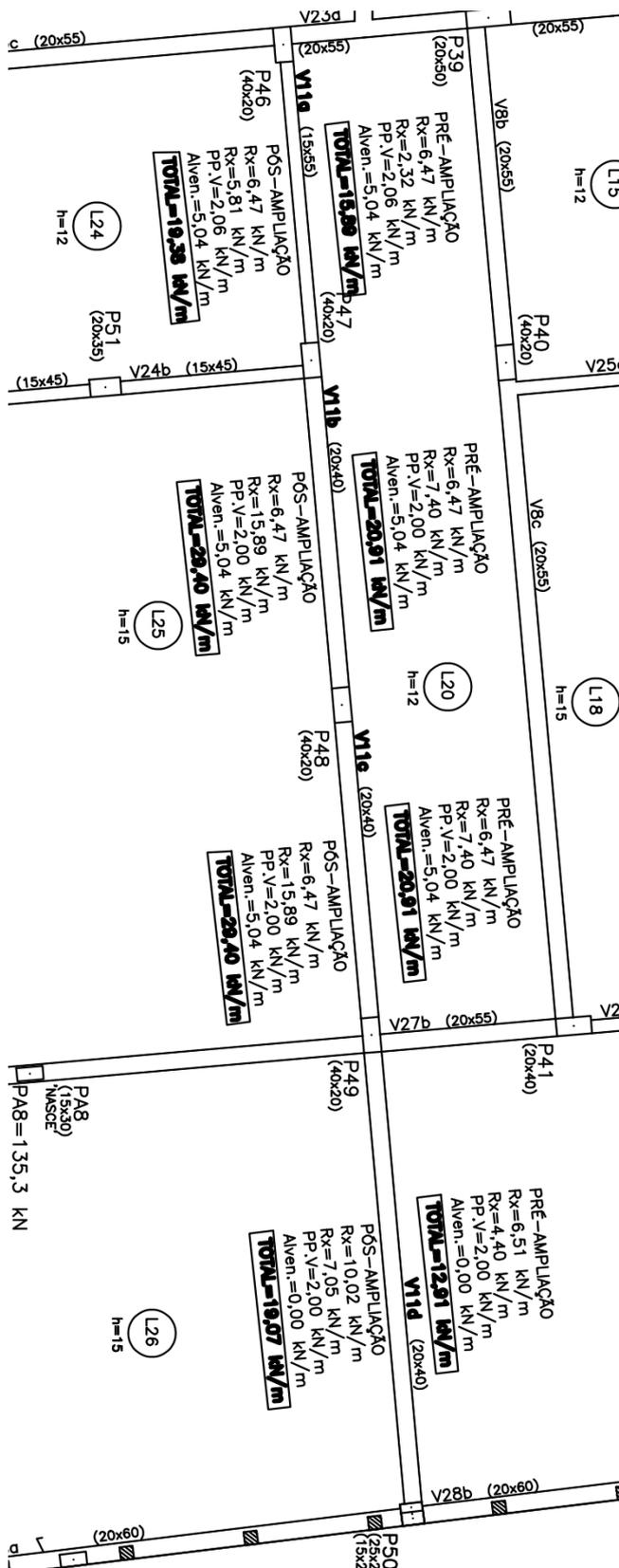


Figura 39 - Carregamento na viga V11.  
Fonte: O autor (2017).

## APÊNDICE D – MATRIZES NORMALIZADAS E VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA

### Matriz Normalizada - Critério Custo de Execução

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC	Média (Autovetor)
Chapa de Aço	0,23	0,33	0,22	0,26
Encamisamento	0,08	0,11	0,13	0,11
CFRC	0,69	0,56	0,65	0,63
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Consistência	
Chapa de aço	3,03
Encamisamento	3,01
CFRC	3,07
<b>TOTAL</b>	<b>9,11</b>

Verificação	
Número de comparações	3
Consistência média	3,04
CI	0,018
RI	0,58
Consistência (CR)	0,031
Está consistente?	sim

### Matriz Normalizada - Critério Tempo de Paralisação

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC	Média (Autovetor)
Chapa de Aço	0,61	0,54	0,63	0,59
Encamisamento	0,09	0,08	0,06	0,08
CFRC	0,30	0,38	0,31	0,33
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Consistência	
Chapa de aço	3,02
Encamisamento	3,00
CFRC	3,02
<b>TOTAL</b>	<b>9,04</b>

Verificação	
Número de comparações	3
Consistência média	3,01
CI	0,007
RI	0,58
Consistência (CR)	0,012
Está consistente?	sim

### Matriz Normalizada - Critério Segurança Estrutural

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC	Média (Autovetor)
Chapa de Aço	0,14	0,14	0,14	0,14
Encamisamento	0,71	0,71	0,71	0,71
CFRC	0,14	0,14	0,14	0,14
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Consistência	
Chapa de aço	3,00
Encamisamento	3,00
CFRC	3,00
<b>TOTAL</b>	<b>9,00</b>

Verificação	
Número de comparações	3
Consistência média	3,00
CI	0,000
RI	0,58
Consistência (CR)	0,000
Está consistente?	sim

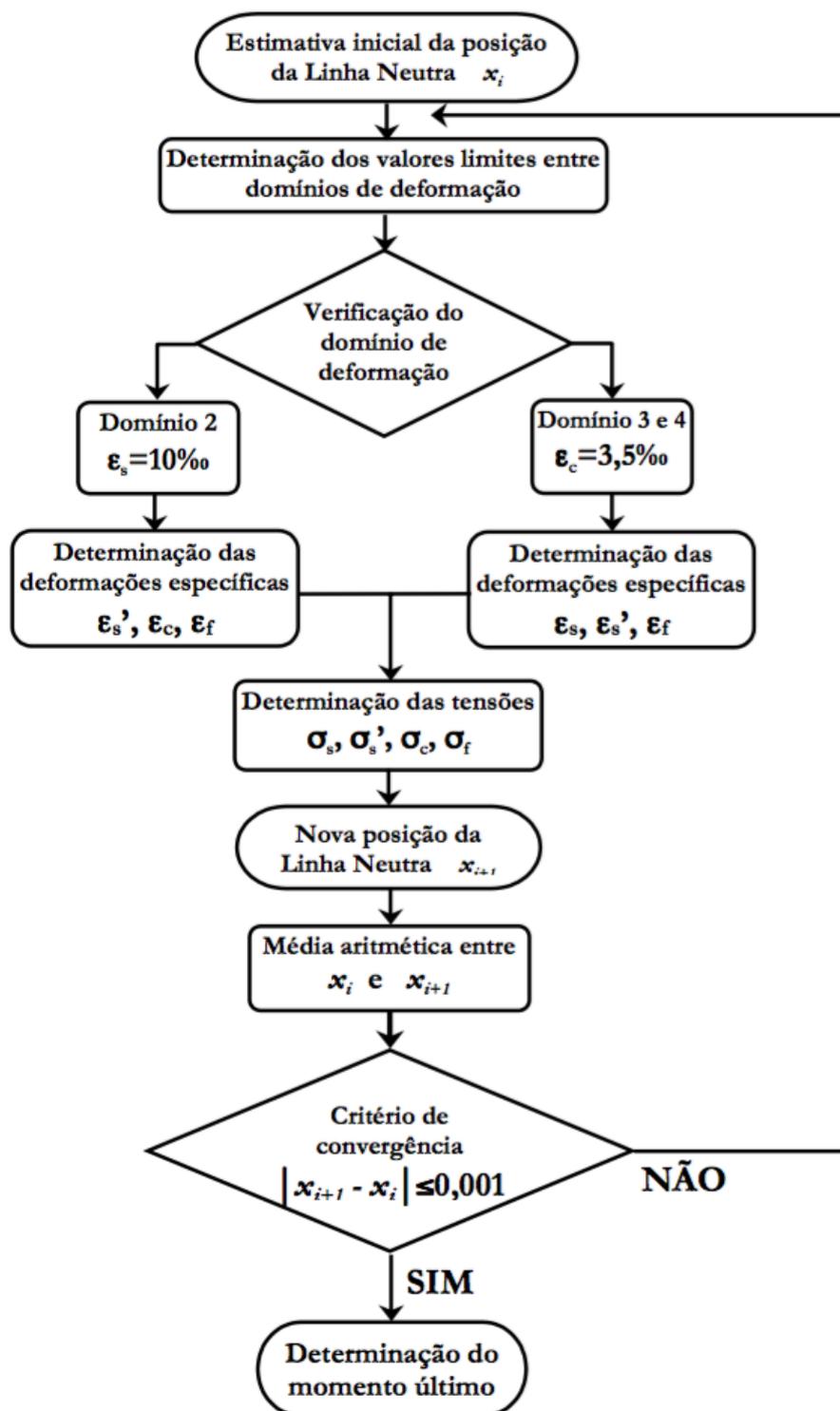
**Matriz Normalizada - Critério Viabilidade Técnica**

	Chapa de Aço	Encamisamento	CFRC	Média (Autovetor)
Chapa de Aço	0,68	0,54	0,71	0,64
Encamisamento	0,10	0,08	0,05	0,07
CFRC	0,23	0,38	0,24	0,28
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

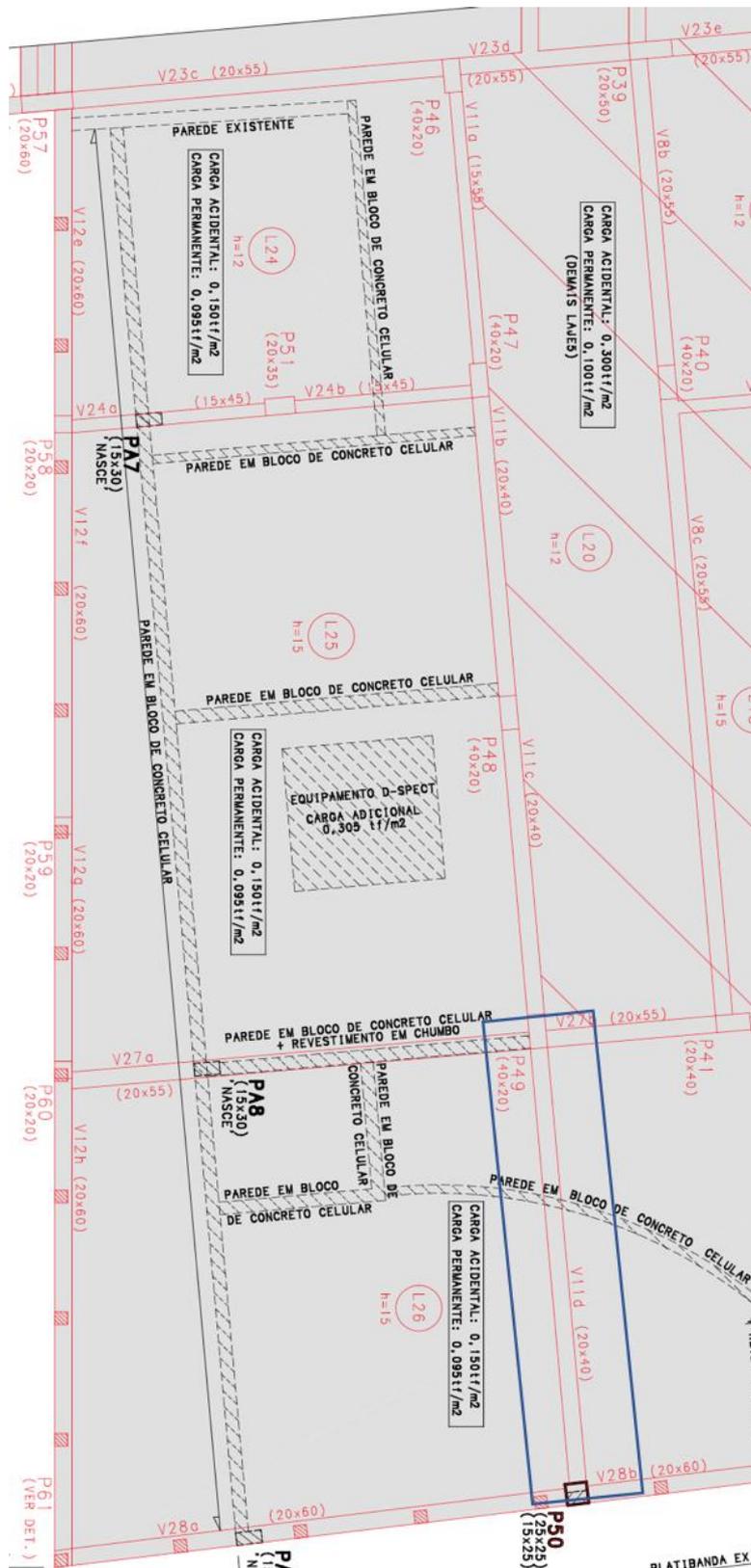
	Consistência
Chapa de aço	3,12
Encamisamento	3,01
CFRC	3,06
<b>TOTAL</b>	<b>9,20</b>

Verificação	
Número de comparações	3
Consistência média	3,07
CI	0,033
RI	0,58
Consistência (CR)	0,056
Está consistente?	sim

## ANEXO A – FLUXOGRAMA DE DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO



### ANEXO B – PLANTA DE CARGAS



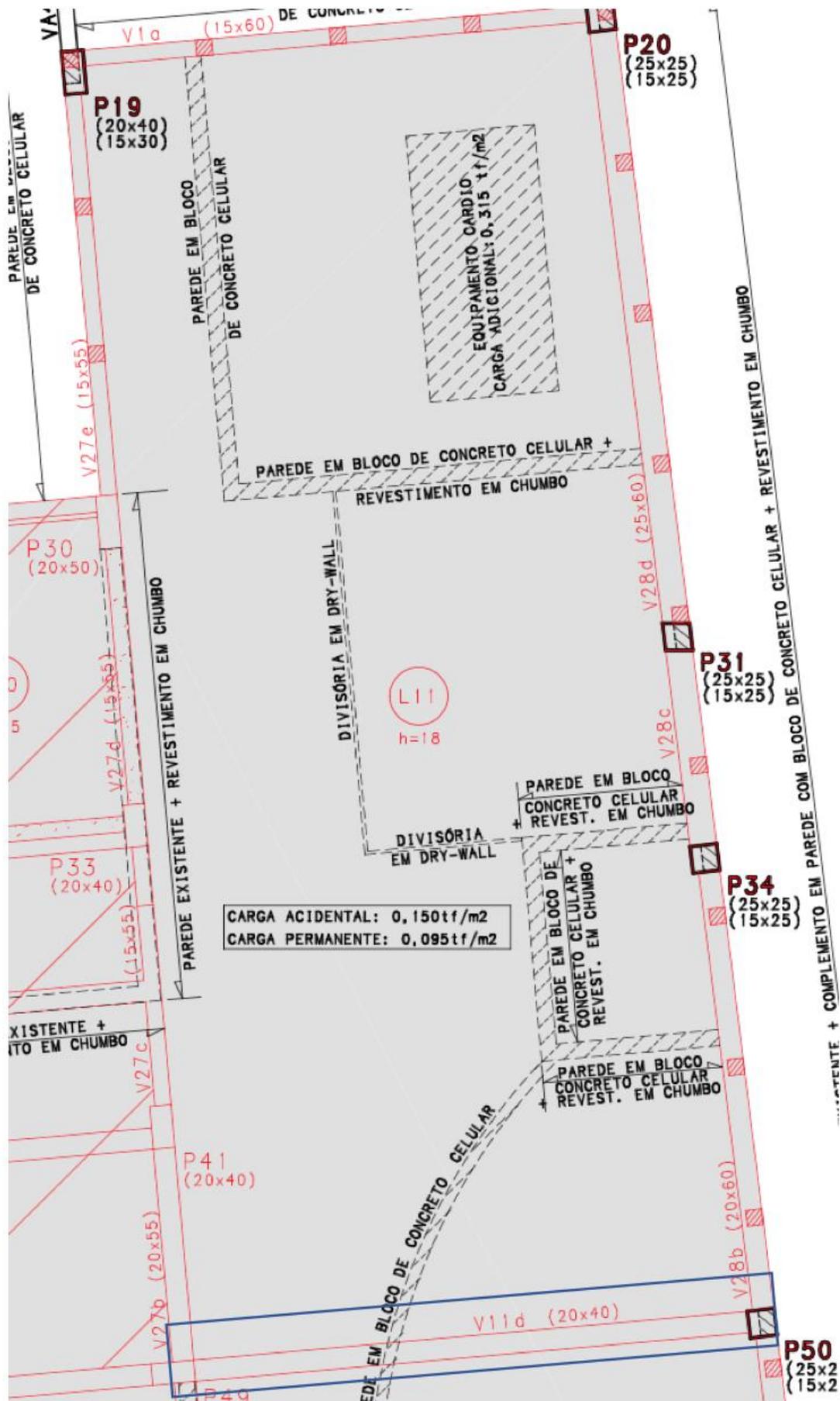
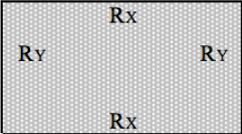
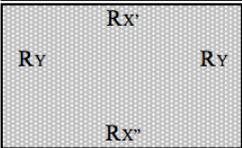
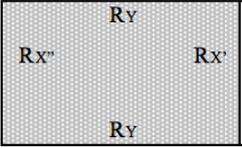
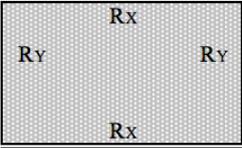
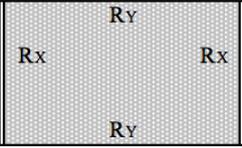
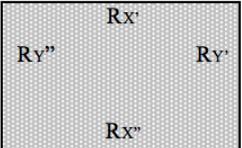
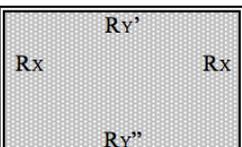
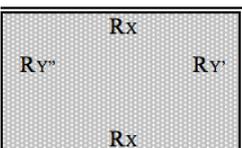
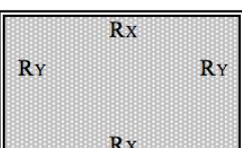


Figura 41 - Planta de cargas do segundo pavimento (Parte 2/2).  
 Fonte: Adaptado de Procalc (2016). (PINI, 2012)

## ANEXO C – REAÇÕES DE APOIO DAS LAJES

	$l_x \leq l_y$	$R_x = R_y \cdot (2 - l_x / l_y)$ $R_y = q \cdot l_x / 4$
	$l_x < 1,37 \cdot l_y$	$R_{x'} = (0,634 \cdot l_y - 0,232 \cdot l_x) \cdot q \cdot l_x / l_y$ $R_{x''} = (0,366 \cdot l_y - 0,134 \cdot l_x) \cdot q \cdot l_x / l_y$ $R_y = 0,183 \cdot q \cdot l_x$
	$l_x \geq 1,37 \cdot l_y$	$R_{x'} = 0,433 \cdot q \cdot l_y$ $R_{x''} = 0,250 \cdot q \cdot l_y$ $R_y = 0,5 \cdot q \cdot (l_x - 0,683 \cdot l_y) \cdot l_y / l_x$
	$l_x < 1,732 \cdot l_y$	$R_x = (0,5 \cdot l_y - 0,144 \cdot l_x) \cdot q \cdot l_x / l_y$ $R_y = 0,144 \cdot q \cdot l_x$
	$l_x \geq 1,732 \cdot l_y$	$R_x = 0,433 \cdot q \cdot l_y$ $R_y = (0,5 \cdot l_x - 0,433 \cdot l_y) \cdot q \cdot l_y / l_x$
	$l_x \leq l_y$	$R_{x'} = R_{y'} \cdot (2 - l_x / l_y)$ $R_{x''} = R_{y''} \cdot (2 - l_x / l_y)$ $R_{y'} = 0,317 \cdot q \cdot l_x$ $R_{y''} = 0,183 \cdot q \cdot l_x$
	$l_x > 1,267 \cdot l_y$	$R_x = 0,317 \cdot q \cdot l_y$ $R_{y'} = (0,634 \cdot l_x - 0,402 \cdot l_y) \cdot q \cdot l_y / l_x$ $R_{y''} = (0,366 \cdot l_x - 0,232 \cdot l_y) \cdot q \cdot l_y / l_x$
	$l_x \leq 1,267 \cdot l_y$	$R_x = (0,5 \cdot l_y - 0,198 \cdot l_x) \cdot q \cdot l_x / l_y$ $R_{y'} = 0,250 \cdot q \cdot l_x$ $R_{y''} = 0,145 \cdot q \cdot l_x$
	$l_x \leq l_y$	$R_x = R_y \cdot (2 - l_x / l_y)$ $R_y = q \cdot l_x / 4$

**Figura 42 - Tabela de reações de apoio das lajes.**  
**Fonte: Karvat (2017).**