



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**MARIANA DE ARAÚJO LEITE**

**ESTUDO DA TENSÃO ÚLTIMA EM CORDOALHAS ENGRAXADAS DE UMA  
VIGA PROTENDIDA: AVALIAÇÃO TEÓRICA E ORIENTAÇÕES PARA  
INSTRUMENTAÇÃO COMO SUBSÍDIO PARA A REALIZAÇÃO DE PROGRAMA  
EXPERIMENTAL**

**FORTALEZA**

**2014**

**MARIANA DE ARAÚJO LEITE**

**ESTUDO DA TENSÃO ÚLTIMA EM CORDOALHAS ENGRAXADAS DE UMA  
VIGA PROTENDIDA: AVALIAÇÃO TEÓRICA E ORIENTAÇÕES PARA  
INSTRUMENTAÇÃO COMO SUBSÍDIO PARA A REALIZAÇÃO DE PROGRAMA  
EXPERIMENTAL**

Monografia submetida à Coordenação do  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Joaquim Eduardo Mota

Coorientador: Prof. Leonardo Melo Bezerra

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- L554e Leite, Mariana de Araújo.  
Estudo da tensão última em cordoalhas engraxadas de uma viga protendida: avaliação teórica e orientações para instrumentação como subsídio para a realização de programa experimental / Mariana de Araújo Leite. – 2014.  
95 f.: il. color.
- Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.  
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota.  
Coorientação: Prof. Dr. Leonardo Melo Bezerra.
1. Protensão não aderente. 2. Construção de concreto protendido. 3. Cordoalhas engraxadas. 4. Construção civil. I. Título.

MARIANA DE ARAÚJO LEITE

ESTUDO DA TENSÃO ÚLTIMA EM CORDOALHAS ENGRAXADAS DE UMA VIGA  
PROTENDIDA: AVALIAÇÃO TEÓRICA E ORIENTAÇÕES PARA  
INSTRUMENTAÇÃO COMO SUBSÍDIO PARA A REALIZAÇÃO DE PROGRAMA  
EXPERIMENTAL

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Civil.

Aprovada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. D. Sc. Joaquim Eduardo Mota (Orientador)

Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. D. Sc. Leonardo Melo Bezerra (Coorientador)

Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. D. Sc. Augusto Teixeira Albuquerque

Universidade Federal do Ceará – UFC

À minha mãe, pelos incentivos, pela enorme paciência e por me mostrar, desde o início de tudo, o significado da palavra determinação.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu a oportunidade desta vida, pela qual sou extremamente grata.

Aos meus pais, Wesley e Edvânia, que levando uma vida sempre fundamentada no amor são como luzes iluminando meu caminho, sempre presentes, pacientes e amorosos.

Ao meu irmão, João Marcos, pelo seu braço forte e pela qualidade da sua presença, sempre dedicado quando eu precisei de ajuda.

Ao professor Joaquim Mota pela orientação, paciência e persistência, sempre me incentivando e abrindo caminhos para a consolidação deste trabalho.

Ao Professor Leonardo pela orientação prática que me auxiliou a concluir com êxito os propósitos deste trabalho.

À empresa Impacto Protensão pelo auxílio financeiro e pelos materiais fornecidos, sem os quais não teria sido possível a realização desta monografia.

Ao George e demais funcionários da empresa Impacto Protensão pela solicitude no auxílio prestado a este trabalho.

Ao Maurício por compartilhar, de forma gentil e atenciosa, seus conhecimentos.

À professora Verônica Castelo Branco que, com sua maneira carinhosa e paciente de ensinar, me auxiliou nos meus primeiros passos para a vida acadêmica.

A todos os professores do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará que contribuíram para minha formação como engenheira civil.

À minha amiga de alma, Marina Frota, que me encontrou no momento em que eu mais precisava e caminhou do meu lado durante toda a trajetória.

À Manuella Romcy, amiga de todas as horas, com quem eu sempre posso contar e que não mede esforços para me ajudar, por me emprestar a calma quando eu mais precisei.

A todos os meus amigos da graduação, por estarem presentes nos momentos de angústia e descontração durante esses longos anos.

Ao meu companheiro de travessuras e cúmplice na vocação, Hugo Barreto, pela incrível capacidade de acalmar meu coração.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram na elaboração desta monografia.

## RESUMO

É de conhecimento geral a importância da técnica da protensão não aderente frente às necessidades atuais do mercado da construção civil. Com o aumento da utilização da técnica, cresceu também a necessidade de estudos que auxiliassem no aperfeiçoamento do processo e do material. Assim, o presente trabalho vem como subsídio para estudos numéricos sobre a tensão última em cordoalhas engraxadas de protensão, o qual é um assunto pouco abordado por se tratar de um problema de formulação geométrica complexa. Normalmente, para se calcular numericamente o acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas no Estado Limite Ultimo (ELU), recorre-se aos valores de norma ou às equações elaboradas por outros autores, frente à dificuldade da análise numérica e da impossibilidade da realização de ensaios experimentais frequentes. Mesmo diante dessas dificuldades, visando a realização de um programa experimental para medir o acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas, o presente trabalho chega como subsídio para sua realização, apresentando orientações de ordem teórica e experimental para a concretização futura de tal programa. Para isso, foi elaborado um modelo computacional de uma viga protendida, o qual serviu de base para o estudo numérico do acréscimo de tensão, com a obtenção de dados de força axial nas cordoalhas quando eram aplicados incrementos de carga na viga até a carga de ruína. Também traz orientações para a instrumentação dessas cordoalhas com extensômetros elétricos de resistência para a obtenção de dados de tensão em programas experimentais. Diante dos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo computacional elaborado representa bem o modelo de viga escolhido e é capaz de avaliar o acréscimo de tensão, sustentado pela comparação de seus resultados com os resultados provenientes de equações empíricas fornecidas por normas e por alguns outros autores. E ainda, os bons resultados obtidos pelo procedimento experimental realizado com as cordoalhas instrumentadas indicou o sucesso da metodologia de instrumentação fornecida neste trabalho. Acredita-se assim que o presente trabalho pode contribuir como subsídio para programas experimentais completos que visam estudar a tensão última em cordoalhas engraxadas de peças protendidas.

**Palavras-chave:** Protensão. Cordoalhas engraxadas. Tensão última. Acréscimo de tensão.

## ABSTRACT

It is well known the importance of unbonded prestressing technique face the current needs of it in the construction market. With the increased use of the technique, what also grew was the need for studies that help in the improvement of the process and the material. Thus, the present work comes as a subsidy for numerical studies about the ultimate stress in unbonded tendon, which is a subject little discussed because it is a problem of complex geometric formulation. Normally, to calculate, numerically, the increased tension at ultimate load, it is common use the standard values or equations developed by other authors, facing the difficulty of numerical analysis and the impossibility of conducting frequent experimental trials. Despite these difficulties, aiming at the realization of an experimental program to measure the increased tension in unbonded tendons, this work comes as a subsidy for the realization of it, presenting theoretical and experimental guidance for future implementation of such program. For this, it was developed a computational model of a prestressed beam, which served as the basis for the numerical study of increased tension, getting data from axial force in the unbonded tendons when applied with the loads increments until the load of ruin. This article also provides guidance for the instrumentation of these unbonded tendons with strain gages, for obtaining tension data in experimental programs. Based on the results obtained, it is possible to affirm that the computational model developed well represents the beam model chosen and it is able to evaluate the increase in tension, sustained by comparing its results with results from empirical equations provided by standards as well as by some other authors. And still, the good results obtained by the experimental procedure performed with the instrumented unbonded tendons indicated the success of the instrumentation methodology provided in this work. Thus, it is believed that the present work can contribute as a subsidy for complete experimental programs that aim at studying the ultimate stress in unbonded tendons of prestressed pieces.

**Keywords:** Prestressing. Unbonded tendon. Ultimate stress. Increased tension.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplificação das tensões em uma viga de concreto com protensão.....	1
Figura 2 – Representação da seção transversal de um cabo de protensão.....	6
Figura 3 – Representação de um cabo de protensão.....	7
Figura 4 – Representação dos elementos que compõem as ancoragens.....	8
Figura 5 – Exemplo de nicho plástico para protensão.....	8
Figura 6 – Exemplo de apoio plástico para cabos de protensão.....	9
Figura 7 – Utilização de macaco hidráulico para aplicação da força de protensão.....	9
Figura 8 – Ação da protensão representada por uma carga equivalente .....	11
Figura 9 - Cordoalhas engraxadas sujeitas apenas às tensões de protensão.....	14
Figura 10 – Acréscimo de tensões nas cordoalhas com a viga solicitada .....	14
Figura 11 – Desenho da fôrma da viga protendida do ensaio .....	21
Figura 12 – Vistas frontal e inferior do aparelho de apoio da viga do ensaio.....	21
Figura 13 – Locação dos defletômetros.....	22
Figura 14 – Pórtico de reação disponível na UFC.....	23
Figura 15 – Macaco hidráulico disponível na UFC.....	23
Figura 16 – Sistema pronto do programa experimental .....	24
Figura 17 – Vistas frontal e inferior do aparelho de apoio da viga do ensaio.....	26
Figura 18 – Seção transversal genérica da viga.....	30
Figura 19 – Representação da viga solicitada e seus diagramas de esforços .....	33
Figura 20 – Modelo de viga do estudo com representação do cabo de protensão .....	34
Figura 21 – Cabos de protensão utilizados no ensaio.....	38
Figura 22 – Materiais e equipamentos necessários para a instrumentação de cordoalhas .....	40
Figura 23 – Procedimento de preparo da superfície.....	42
Figura 24 – Fita isolante para impedir contato do strain gage com o aço das cordoalhas .....	43
Figura 25 – Colagem das bases para solda.....	43
Figura 26 – Procedimento de colagem dos extensômetro .....	44
Figura 27 – União do strain gage com a base para solda .....	45
Figura 28 – Conector DB15M.....	45
Figura 29 – Manual de ligação dos cabos ao conector DB15M para o equipamento <i>Spider 8</i> .....	46
Figura 30 – Preparação da fiação .....	47
Figura 31 – Procedimento de proteção dos extensômetros nas cordoalhas.....	47
Figura 32 – Folga no cabo para evitar descolamento da solda.....	48
Figura 33 – Pista de protensão para ensaio com cordoalhas de protensão.....	48

Figura 34 – Cabos dispostos na pista de protensão .....	49
Figura 35 – Detalhe do cabo de protensão para cálculo da carga equivalente .....	55
Figura 36 – Diagrama de esforços da carga equivalente de protensão.....	56
Figura 37 – Etapas de elaboração do modelo de viga protendida .....	57
Figura 38 – Dados de entrada do FTOOL: parâmetros dos materiais .....	58
Figura 39 – Dados de entrada do FTOOL: propriedades das seções.....	58
Figura 40 – Diagrama de esforços do modelo de viga protendida com aplicação da variação de temperatura e admitindo viga rígida.....	59
Figura 41 – Exemplo de caso analisado no modelo de viga protendida.....	60
Figura 42 – Gráfico momento fletor no centro da viga × flecha no centro da viga.....	65
Figura 43 – Gráfico carga aplicada na viga × acréscimo de tensão considerando o momento de fissuração .....	66
Figura 44 – Cabos com cordoalhas instrumentadas dispostos na pista de protensão.....	70
Figura 45 – Cordoalha inutilizada do ensaio .....	72
Figura 46 – Gráfico tensão × deformação para as duas protensões do segundo cabo .....	73

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Materiais necessários para a fabricação da viga .....	20
Tabela 2 – Equipamentos necessários na realização do programa experimental .....	24
Tabela 3 – Características da viga do estudo.....	31
Tabela 4 – Características do material da viga.....	51
Tabela 5 – Características do material das cordoalhas .....	51
Tabela 6 – Características do material das barras rígidas.....	51
Tabela 7 – Parâmetros da seção transversal da viga.....	52
Tabela 8 – Parâmetros da seção transversal das cordoalhas de protensão .....	53
Tabela 9 – Parâmetros da seção transversal das barras rígidas .....	53
Tabela 10 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 100% do momento de inércia total .....	61
Tabela 11 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 50% do momento de inércia total .....	62
Tabela 12 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 25% do momento de inércia total .....	62
Tabela 13 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com a média entre 50% e 25% do momento de inércia total .....	63
Tabela 14 – Resultados do momento fletor e da flecha na viga.....	64
Tabela 15 – Resultados de acréscimo de tensão em cordoalhas de protensão .....	68
Tabela 16 – Características dos extensômetros elétricos de resistência utilizados no estudo..	69
Tabela 17 – Resultados obtidos no ensaio experimental com a primeira cordoalha.....	71
Tabela 18 – Resultados obtidos na primeira protensão do ensaio experimental com a segunda cordoalha .....	72
Tabela 19 – Resultados obtidos na segunda protensão do ensaio experimental com a segunda cordoalha .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da seção transversal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ac	Área efetiva para cisalhamento
ACI	American Concrete Institute
Ap	Armadura ativa (armadura de protensão)
A <sub>ps</sub>	Área de armadura ativa
As	Armadura passiva de tração (armadura longitudinal)
As'	Armadura passiva de compressão (armadura longitudinal)
Asw	Armadura transversal
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica
bc	Largura da mesa de compressão
bw	Largura da seção transversal da viga
c	Cobrimento da armadura em relação à face do elemento
CEB-FIP	Comité Euro-Internacional Du Beton
CP	Concreto protendido
$\gamma$	Peso específico
d	Altura útil
d'	Distância entre o eixo da armadura de compressão e a face mais próxima
dp	Altura útil da armadura ativa
$\Delta\sigma$	Acréscimo de tensão
$\Delta T$	Variação de temperatura
Ecs	Módulo de Elasticidade secante
Ep	Módulo de Elasticidade do aço de protensão
ELU	Estado Limite Último
$\varepsilon$	Deformação
f	Flecha no cabo de protensão
fck	Resistência característica à compressão do concreto
f <sub>ct</sub>	Resistência à tração do concreto
f <sub>ps</sub>	Tensão última de protensão
f <sub>pe</sub>	Tensão efetiva de protensão
h	Altura da seção transversal da viga
I	Momento de inércia

$L$	Comprimento da viga
$M_d$	Momento máximo da viga
$M_p$	Momento da força de protensão
$M_r$	Momento de fissuração da viga
NBR	Norma Brasileira
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$P$	Força aplicada
$r$	Raio da seção transversal da cordoalha
RB	Relaxação baixa
$\rho_p$	Taxa geométrica de armadura ativa
$\sigma$	Tensão
$u$	Carga equivalente
UFC	Universidade Federal do Ceará
$w$	Módulo de resistência
$\bar{y}$	Posição do centro de gravidade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Considerações iniciais</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Problema e questões de pesquisa</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Justificativa</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4. Objetivos</b> .....	<b>4</b>
<i>1.4.1. Objetivo Geral</i> .....	<i>4</i>
<i>1.4.2. Objetivos Específicos</i> .....	<i>5</i>
<b>1.5. Organização do trabalho</b> .....	<b>5</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1. Considerações iniciais</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2. Generalidades sobre a protensão não aderente</b> .....	<b>6</b>
<i>2.2.1. Cordoalha</i> .....	<i>6</i>
<i>2.2.2. Cabo</i> .....	<i>7</i>
<i>2.2.3. Ancoragens</i> .....	<i>7</i>
<i>2.2.4. Outros elementos</i> .....	<i>8</i>
<b>2.3. Representação do efeito da protensão</b> .....	<b>10</b>
<i>2.3.1. Consideração da protensão por meio de uma ação equivalente</i> .....	<i>11</i>
<i>2.3.1.1. Uso do FTOOL para modelagem de peça protendida</i> .....	<i>13</i>
<b>2.4. Variação da tensão em cordoalhas de protensão</b> .....	<b>13</b>
<b>2.5. Variação de tensão em cordoalhas de protensão segundo a NBR 6118 (2014)</b> .....	<b>15</b>
<b>2.6. Outros métodos para previsão do incremento de tensão</b> .....	<b>16</b>
<i>2.6.1. Tao e Du (1985)</i> .....	<i>17</i>
<i>2.6.2. ACI 318 (1999/2008)</i> .....	<i>17</i>
<i>2.6.3. Naaman et al. (2002)</i> .....	<i>18</i>
<i>2.6.4. CEB-FIP (2010)</i> .....	<i>19</i>
<b>2.7. Trabalhos experimentais envolvendo estudo de tensões</b> .....	<b>19</b>
<i>2.7.1. Orientações de Silva Filho (2010)</i> .....	<i>20</i>
<i>2.7.2.1. Fabricação da viga e dos aparelhos de apoio</i> .....	<i>20</i>
<i>2.7.2.2. Acoplamento de todos os instrumentos de medição</i> .....	<i>21</i>
<i>2.7.2.3. Conferência do posicionamento dos elementos</i> .....	<i>24</i>
<i>2.7.2.4. Recomendações para a execução</i> .....	<i>24</i>
<i>2.7.2.5. Atingindo o Estado Limite Último (ELU)</i> .....	<i>25</i>
<i>2.7.2. Orientações de Vieira (2014)</i> .....	<i>25</i>

2.7.3. <i>Recomendações na aplicação de extensômetros</i> .....	26
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
3.1. <b>Considerações iniciais</b> .....	<b>29</b>
3.2. <b>Estudo teórico: avaliação numérica do modelo de viga em estudo</b> .....	<b>29</b>
3.2.1. <i>Caracterização geométrica e dos materiais do modelo de viga do estudo</i> .....	30
3.2.2. <i>Cálculo da representação da ação da protensão</i> .....	31
3.2.3. <i>Cálculo da carga de ruptura</i> .....	32
3.2.4. <i>Desenho do projeto da viga</i> .....	34
3.2.5. <i>Cálculo da ação da protensão utilizando o método da carga equivalente</i> .....	34
3.2.6. <i>Elaboração do modelo computacional da viga protendida</i> .....	34
3.2.7. <i>Obtenção dos resultados: estudo do acréscimo de tensão</i> .....	36
3.3. <b>Procedimento experimental: orientação para instrumentação de cordoalhas engraxadas</b> .....	<b>37</b>
3.3.1. <i>Escolha das cordoalhas a serem ensaiadas</i> .....	37
3.3.2. <i>Escolha do tipo de extensômetro</i> .....	38
3.3.3. <i>Caracterização dos materiais e equipamentos necessários</i> .....	39
3.3.4. <i>Preparo da superfície</i> .....	41
3.3.5. <i>Procedimento de colagem dos extensômetros</i> .....	43
3.3.6. <i>Preparação da fiação para conexão com aparelho de leitura</i> .....	44
3.3.7. <i>Proteção dos extensômetros nas cordoalhas</i> .....	47
3.3.8. <i>Realização da protensão para obtenção dos resultados</i> .....	48
3.4. <b>Contribuição das etapas metodológicas para programa experimental</b> .....	<b>49</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
4.1. <b>Considerações iniciais</b> .....	<b>50</b>
4.2. <b>Resultados do estudo teórico</b> .....	<b>50</b>
4.2.1. <i>Resultado da caracterização geométrica e dos materiais do modelo em estudo</i> ....	<b>50</b>
4.2.1.1. <i>Parâmetros do material da viga</i> .....	50
4.2.1.2. <i>Parâmetros do material das cordoalhas</i> .....	51
4.2.1.3. <i>Parâmetros do material das barras rígidas</i> .....	51
4.2.1.4. <i>Propriedades da seção da viga</i> .....	52
4.2.1.5. <i>Propriedades da seção das cordoalhas</i> .....	52
4.2.1.6. <i>Propriedades da seção das barras rígidas</i> .....	53
4.2.2. <i>Resultado do cálculo da representação da ação da protensão</i> .....	54
4.2.3. <i>Resultado do cálculo da carga que levará a viga à ruína</i> .....	54

<i>4.2.4. Resultado do cálculo da ação da protensão pelo método da carga equivalente.....</i>	<i>55</i>
<i>4.2.5. Resultado da elaboração do modelo computacional da viga protendida .....</i>	<i>57</i>
<i>4.2.6. Resultado da aplicação dos incrementos de carga .....</i>	<i>60</i>
<i>4.2.7. Resultado do cálculo do momento de fissuração .....</i>	<i>63</i>
<i>4.2.8. Resultados do acréscimo de tensão .....</i>	<i>65</i>
<i>4.2.8.1. Acréscimo de tensão de acordo com o modelo computacional elaborado .....</i>	<i>65</i>
<i>4.2.8.2. Acréscimo de tensão de acordo com Tao e Du (1985).....</i>	<i>66</i>
<i>4.2.8.3. Acréscimo de tensão de acordo com ACI 318 (1999/2008).....</i>	<i>67</i>
<i>4.2.8.4. Acréscimo de tensão de acordo com Naaman et al. (2002).....</i>	<i>67</i>
<i>4.2.8.5. Acréscimo de tensão de acordo com NBR 6118 (2014).....</i>	<i>67</i>
<i>4.2.8.6. Discussão dos resultados do acréscimo de tensão.....</i>	<i>68</i>
<b>4.3. Resultados do procedimento experimental .....</b>	<b>68</b>
<i>4.3.1. Resultado da escolha dos parâmetros do tipo de extensômetro .....</i>	<i>68</i>
<i>4.3.2. Resultados da protensão para verificação de instrumentação.....</i>	<i>69</i>
<i>4.3.2.1. Resultados para a primeira cordoalha ensaiada .....</i>	<i>71</i>
<i>4.3.2.2. Resultados para a segunda cordoalha ensaiada.....</i>	<i>72</i>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Considerações iniciais .....</b>	<b>75</b>
<b>5.2. Conclusões sobre o estudo teórico .....</b>	<b>75</b>
<b>5.3. Conclusões sobre o procedimento experimental.....</b>	<b>76</b>
<b>5.4. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A – PROJETOS PARA A EXECUÇÃO DA VIGA PROTENDIDA DO ESTUDO.....</b>	<b>80</b>

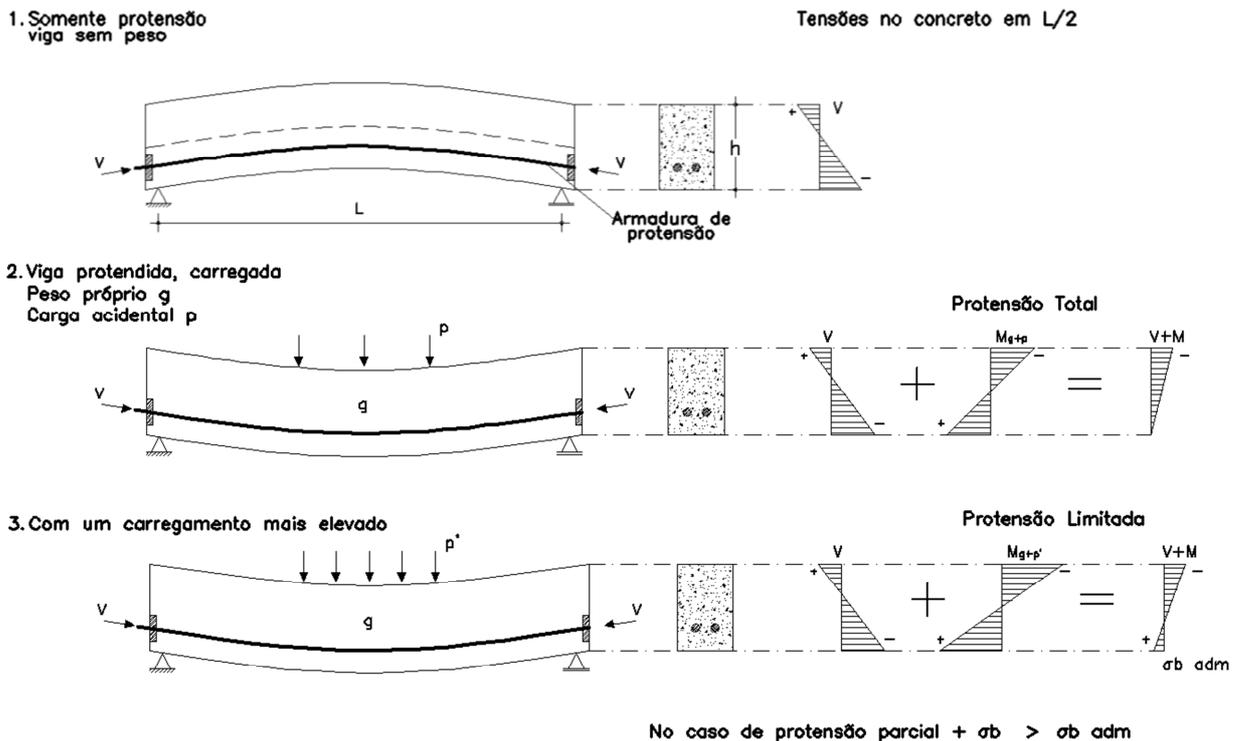
# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

É de conhecimento geral que no concreto armado a união de dois materiais distintos, o concreto e o aço, foi vantajosa em inúmeros aspectos, principalmente pelo fato do aço vir a suprir a grande deficiência do concreto que é sua baixa resistência à tração. Porém, o concreto armado possui alguns inconvenientes, como a fissuração em serviço e a impossibilidade da utilização de aços de alta resistência. Durante muito tempo, concretos armado e protendido foram tratados como dois sistemas distintos, porém sabe-se hoje que para compreender a protensão em estruturas de concreto deve-se primeiramente compreender as limitações do concreto armado convencional.

Assim, visando aperfeiçoar esse sistema e melhorar o desempenho em serviço de estruturas de concreto armado, buscou-se uma forma de suprimir a tração no concreto comprimindo as zonas tracionadas. Surgiu assim a técnica da protensão, onde o concreto é submetido a uma pré-compressão, de forma que quando a peça for solicitada esta precise, primeiramente, vencer os esforços da protensão para, então, começar a apresentar esforços de tração, como é exemplificado na Figura 1 mostrada abaixo.

Figura 1 – Exemplificação das tensões em uma viga de concreto com protensão



Fonte: A autora (2014), baseado em LEONHARDT (1983, p. 03).

A primeira obra protendida no Brasil foi a ponte do aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, executada em 1949. Porém, apesar de ser uma técnica antiga e baseada em uma ideia simples, a protensão só ganhou força no mercado brasileiro no final dos anos 90. Hoje, existem no mercado três tipos usuais de protensão: a protensão com aderência inicial, a protensão com aderência posterior e a protensão sem aderência.

Chama-se de protensão sem aderência aquela que utiliza cordoalhas engraxadas e que é fixada à peça estrutural por meio de placas de ancoragem, isto é, não há aderência entre os cabos de protensão e o concreto. Este é um dos sistemas comerciais de protensão mais utilizados no Brasil e este fato se deu principalmente pelas suas facilidades frente aos outros métodos, como na disposição dos cabos, por serem bem mais leves se comparado aos cabos da protensão com aderência posterior, nas operações de protensão, por usar um equipamento de menor porte, e nas operações de ancoragem, por serem menos complexas frente a outros tipos de ancoragem. Essas facilidades permitiram a utilização da protensão em edifícios residenciais, facilitando o uso de grandes vãos, lajes mais esbeltas e ainda com deformações menores se comparado ao caso com utilização do concreto armado convencional.

Sendo a questão da aderência a grande particularidade do uso das cordoalhas engraxadas, é válido questionar como é que se dá o acréscimo e a variação de tensões nos cabos protendidos com a viga solicitada. Estudos baseados nesse questionamento são ainda limitados, visto que há uma grande dificuldade na compatibilidade de deformações nas seções transversais das peças protendidas, que se dá pelos dois materiais, cordoalhas e concreto, se deformarem de forma distinta por não haver aderência entre eles.

Silva Filho (2010) elaborou um projeto onde concebe toda a metodologia para a montagem de um ensaio experimental de uma viga protendida com cordoalha engraxada, visando quantificar esse acréscimo de tensão. Trata-se de um procedimento já existente, porém elaborado por autores de vários lugares diferentes. Silva Filho (2010) adaptou o procedimento à realidade das obras de Fortaleza, sugerindo o uso de materiais e de equipamentos disponíveis na Universidade Federal do Ceará (UFC). O presente trabalho fará uso dessa metodologia para desenvolver uma parte do ensaio experimental proposto e, assim, poder atingir os objetivos em questão, descritos mais adiante.

O estudo do comportamento das estruturas de obras de construção civil se dá normalmente por meio de métodos computacionais, pois ensaios experimentais possuem algumas limitações que dificultam sua execução, como elevados custo e tempo despendido, e grande probabilidade de erros. Porém, os ensaios experimentais são ferramentas capazes de validar os modelos utilizados por projetistas no cálculo estrutural, além de serem capazes de

responder às limitações do conhecimento no campo da mecânica das estruturas, o que justifica o uso dessa ferramenta.

## 1.2. Problema e questões de pesquisa

Em vigas protendidas com cordoalhas engraxadas, não existe aderência entre as cordoalhas e o concreto. Conseqüentemente, as deformações sofridas por ambos não possuem os mesmos valores. Com isso, para se calcular numericamente o alongamento, ou o acréscimo de tensão, nas cordoalhas no Estado Limite Ultimo (ELU), ou à medida que a viga vai se deformando, normalmente recorre-se a valores de norma, pois se trata de um problema de formulação geométrica complexa, que depende de várias variáveis. Além disso, são poucos os ensaios laboratoriais existentes que ilustram esses ganhos de tensão. Assim, tem-se como problema de pesquisa a dificuldade de se avaliar de uma forma geral, ou genérica, e numérica, o acréscimo de tensão em problemas de vigas protendidas com cordoalhas engraxadas. A pesquisa em questão procura contribuir para uma melhor compreensão do tema, se propondo a analisar um caso específico de viga protendida, a fim de obter informações para comparar com o que está proposto no item 17.2.2 da norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a Norma Brasileira (NBR) 6118(2014) e com o que foi recomendado por outros autores sobre o assunto.

Com isso, diante do problema apresentado, as seguintes questões de pesquisa são pertinentes:

- a) Como fazer o ensaio experimental, de uma viga protendida com cordoalha engraxada, para medir o acréscimo de tensão nessas cordoalhas tendo a viga atingido o ELU?
- b) Como fazer o processo de instrumentação de uma cordoalha engraxada para medir as tensões quando ela for protendida?
- c) Qual o procedimento utilizado para se realizar uma análise numérica do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de uma viga protendida após o ELU?
- d) Os resultados de uma análise numérica de uma viga protendida para medir o acréscimo de tensão nas cordoalhas após a viga ter atingido o ELU correspondem aos resultados apresentados na NBR 6118 (2014)?

### **1.3. Justificativa**

Em vigas protendidas com cordoalhas engraxadas as tensões, devido às cargas permanentes e acidentais, que levam o concreto à ruína são equilibradas com a tensão no concreto devido à força de protensão que é aplicada à peça, como foi mostrado na Figura 1. Se a tensão no concreto devido à força de protensão for menor do que a tensão última devido às cargas permanentes e acidentais então se faz necessária a existência de uma armadura passiva suplementar para gerar forças que, somadas às forças de protensão, equilibrem o sistema.

Porém, se for considerado que a tensão nas cordoalhas aumenta com o alongamento da viga, uma força será somada à força de protensão, diminuindo ou até suprimindo a necessidade de armadura passiva para equilibrar o sistema. Assim, com essa consideração, o uso da cordoalha engraxada se dará de uma forma mais eficiente e econômica. Contudo, para que seja possível considerar a contribuição do acréscimo de tensão nas cordoalhas, é preciso estar seguro do valor correto desse acréscimo.

A NBR 6118 (2014), no item 17.2.2, propõe valores de acréscimo de tensão nas cordoalhas que devem ser utilizados quando não se dispuser de valores experimentais ou quando não houver análises não lineares adequadas. Todavia, esses valores apresentados por norma são generalizados, utilizados para todos os tipos de viga.

Assim, o estudo realizado no presente trabalho se justifica pela importância da contribuição ELU das tensões nas cordoalhas engraxadas de vigas protendidas. Justifica-se, ainda, pela necessidade de verificação dos valores estabelecidos no item 17.2.2 da NBR 6118 (2014) para o caso em estudo.

### **1.4. Objetivos**

#### ***1.4.1. Objetivo Geral***

Estudar a tensão última em cordoalhas engraxadas de protensão como forma de subsídio para a realização de estudos numéricos, teóricos e experimentais, do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de peças em concreto protendido.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- a) Apresentar orientações para a realização do ensaio experimental de uma viga protendida com cordoalha engraxada, para medir o acréscimo de tensão nas cordoalhas tendo a viga atingido o ELU;
- b) Apresentar orientações para a instrumentação de cordoalhas engraxadas para medir, em ensaios experimentais, as tensões nas mesmas;
- c) Expor o procedimento para se realizar uma análise numérica do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de uma viga protendida após o ELU;
- d) Comparar os resultados obtidos com a realização da análise numérica do acréscimo de tensão em cordoalhas de uma viga protendida após a viga ter atingido o ELU com os valores apresentados na NBR 6118 (2014) e com valores obtidos por outros autores;

## **1.5. Organização do trabalho**

O Capítulo 1 trata da Introdução, ou contextualização do tema, onde são apresentados o problema e questões de pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo, além da divisão da monografia.

O Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, isto é, o embasamento teórico necessário para o entendimento do estudo.

No Capítulo 3 têm-se as etapas de desenvolvimento do estudo, com a descrição da metodologia adotada, assim como os materiais utilizados e os procedimentos realizados em cada uma das etapas da pesquisa.

No Capítulo 4 são relatados os resultados obtidos no trabalho, de forma a verificar a compatibilidade com o que era esperado.

O Capítulo 5 traz descrito o que se pôde concluir a partir do desenvolvimento da pesquisa e dos resultados encontrados ao final da mesma. São feitas, por fim, sugestões para a continuidade da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão contemplados tópicos que servirão de embasamento teórico para melhor compreensão dos capítulos seguintes. Para isso, buscou-se estudar conceitos teóricos básicos sobre a protensão utilizando cordoalha engraxada e plastificada, abordando os materiais e instrumentos utilizados na técnica, e os métodos que permitem representar os efeitos da protensão. Além disso, foi abordado o tema do incremento de tensão em cordoalhas engraxadas, com enfoque nos métodos empíricos de cálculo aproximado e em trabalhos experimentais existentes, visando futura comparação de resultados.

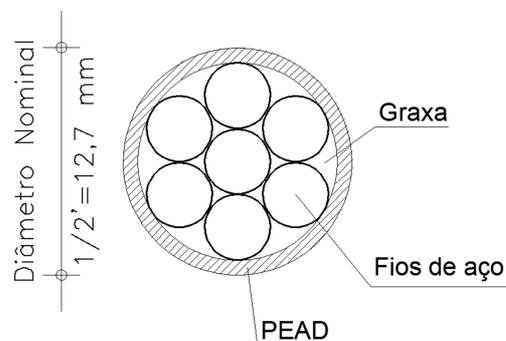
### 2.2. Generalidades sobre a protensão não aderente

Chama-se de protensão não aderente aquela que utiliza cordoalhas engraxadas e é fixada à peça estrutural por meio de placas de ancoragem, isto é, não existe aderência entre o concreto e os cabos de protensão, há qual se dá somente nas placas de ancoragem. É possível citar os materiais e equipamentos para protensão não aderente com cordoalhas engraxadas.

#### 2.2.1. Cordoalha

Em cabos não aderentes, são chamados de cordoalhas os fios de aço, de alta resistência, que se entrelaçam formando um conjunto, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Representação da seção transversal de um cabo de protensão

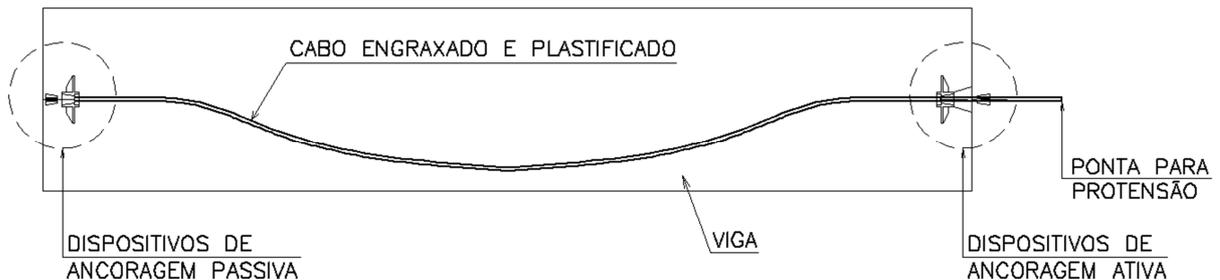


Fonte: A autora (2014).

### 2.2.2. Cabo

Trata-se do conjunto completo de elementos da protensão não aderente, como é visto na Figura 3.

Figura 3 – Representação de um cabo de protensão



Fonte: A autora (2014).

Assim, pode-se afirmar que um cabo de protensão não aderente é composto pelos seguintes elementos:

- Dispositivos de ancoragem, ativa, passiva ou intermediária;
- Aços ou cordoalhas de protensão;
- Graxa de revestimento, que é de extrema importância não só pelo fato de garantir que as cordoalhas deslizem pela bainha, mas também por servir de proteção contra elementos corrosivos;
- Bainha plástica, que reveste as cordoalhas e a graxa, feita de polietileno de alta densidade (PEAD), possível de identificar na Figura 2.

### 2.2.3. Ancoragens

São peças mecânicas responsáveis por transmitir, à peça estrutural de concreto protendido sem aderência, toda a força da protensão, e incluem todo o conjunto de peças requeridas na ancoragem do aço.

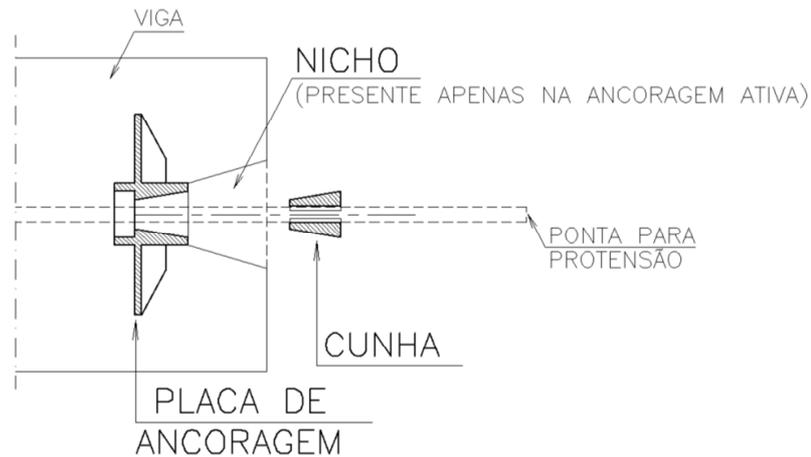
Têm-se os seguintes tipos de ancoragem:

- Ancoragem ativa – ancoragem posicionada na ponta ativa do cabo, usada para tensionar e fixar os cabos de protensão;
- Ancoragem passiva – ancoragem posicionada na ponta não ativa do cabo, fixada ao mesmo antes dele chegar à obra pelo processo de pré-blocagem;

- Ancoragem intermediária – ancoragem posicionada em qualquer ponto do cabo;

E os elementos que compõem as ancoragens são as placas de ancoragem e as cunhas, como é possível observar na Figura 4.

Figura 4 – Representação dos elementos que compõem as ancoragens



Fonte: A autora (2014).

#### 2.2.4. Outros elementos

São outros materiais de auxílio na montagem da protensão não aderente com cordoalhas engraxadas os listados abaixo:

- Nichos plásticos – chamados também de *pocket former*, os nichos plásticos são elementos temporário, utilizado juntamente à ancoragem ativa, para auxiliar na hora da concretagem a criar um nicho que possibilite ao macaco hidráulico acessar o cabo e, então, realizar a operação da protensão. Um nicho plástico é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de nicho plástico para protensão



Fonte: <http://www.aecweb.com.br/>

- Apoios plásticos (ou cadeirinhas) – elemento responsável por apoiar o cabo dando a ele o posicionamento correto, ou melhor, a altura correta, dentro da peça estrutural. Ajuda também a prevenir os deslocamentos durante a concretagem. Um exemplo de apoio plástico é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de apoio plástico para cabos de protensão



Fonte: <http://www.aecweb.com.br/>

- Macaco hidráulico – equipamento mecânico responsável por dar a força de protensão nos cabos. Para operá-lo são necessários dois profissionais, como é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Utilização de macaco hidráulico para aplicação da força de protensão



Fonte: <http://techne.pini.com.br>

- Maçarico – equipamento utilizado no corte do excesso de cabo após o tracionamento dos mesmos;
- Lixadeira – utilizada para corte de cordoalhas antes da protensão.

### 2.3. Representação do efeito da protensão

O efeito da protensão pode ser representado de diferentes maneiras e convém ao projetista a escolha da melhor forma de realizar o cálculo da protensão de acordo com o caso a ser resolvido.

De acordo com Carvalho (2012, p. 27),

Os procedimentos de cálculo empregados para a análise de peças em concreto protendido estão ligados à própria história do mesmo. No início de sua aplicação, quando se desejava apenas evitar as tensões normais de tração na seção transversal, e a teoria de estado limite último (especialmente a ruptura) ainda não estava sendo usada, bastava o uso da teoria da resistência dos materiais para se conhecer os esforços solicitantes e deslocamentos.

Além disso, segundo Mota (2006),

Historicamente, no Brasil, apenas o método dos esforços iniciais ou o da deformação inicial foram utilizados para se verificar e dimensionar peças protendidas. Isto se deu porque a grande maioria das peças protendidas eram isostáticas ou com baixo grau de hiperasticidade situação em que estes métodos são de utilização vantajosa.

De maneira geral, pode-se afirmar que atualmente são utilizadas três alternativas para representar a protensão no cálculo de peças protendidas. São elas:

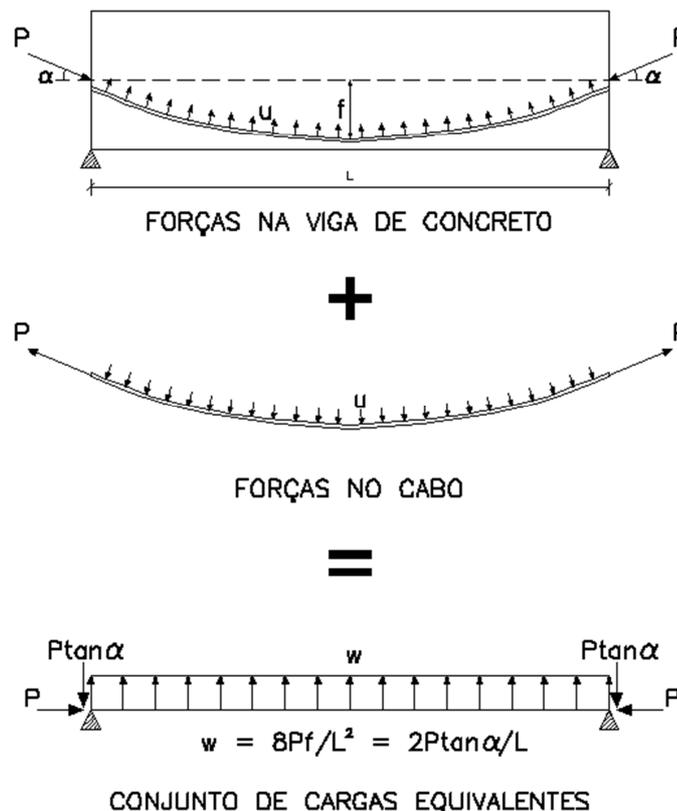
- Por meio da carga equivalente de protensão;
- Pelo meio de um conjunto de esforços solicitantes iniciais;
- Pelo meio de um campo de deformações iniciais.

Para o presente trabalho, se torna importante a discussão a respeito do método da carga equivalente de protensão, a qual vem a ser base do estudo teórico numérico retratado nos capítulos seguintes.

### 2.3.1. Consideração da protensão por meio de uma ação equivalente

Em linhas gerais, o método de cálculo de peças protendidas por meio da consideração de uma carga equivalente consiste na representação a ação da protensão por meio de um conjunto de cargas externas, denominadas cargas equivalentes de protensão, de forma que, quando atuem na estrutura, sejam tais que provoquem esforços e deslocamentos idênticos aos gerados pela ação da protensão. A protensão é tratada, então, como um carregamento externo aplicado à estrutura de concreto. Nos casos mais comuns de cabos parabólicos ancorados no centro de gravidade das seções extremas, as cargas equivalentes da protensão constituem-se de duas parcelas, as cargas verticais uniformemente distribuídas, devido à mudança de direção dos cabos e as forças concentradas aplicadas através das ancoragens, como é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Ação da protensão representada por uma carga equivalente



Fonte: A autora (2014), adaptado de LOUREIRO (2006).

Pelo fato do método da carga equivalente trabalhar com a estrutura como um todo, a sua utilização cresceu juntamente com o aumento da aplicação do método da protensão. Atualmente, considera-se que a protensão tem dupla função, na fissuração e na segurança a ruptura e, com isso, apesar das hipóteses utilizadas desde o princípio do cálculo poderem ser empregadas para o controle da abertura de fissura, a teoria técnica do concreto armado deve ser utilizada na análise do ELU, quando a armadura ativa garantirá a segurança da seção na ruptura. Assim, é possível considerar a introdução da protensão por meio de uma ação equivalente, que é o princípio do método da carga equivalente, o qual passa a ser um procedimento de cálculo simples e eficaz para peças protendidas.

Mota (2006) aponta alguns aspectos importantes ligados à representação da protensão por meio de cargas equivalentes:

1. Tratando-se a protensão como um carregamento, é possível incorporá-la aos processos modernos de análise estrutural via “softwares” para estruturas reticuladas ou de elementos finitos, pois a protensão passará a ser apenas um caso a mais de carregamento;  
As cargas equivalentes dependem somente do traçado do cabo, o que permite ao projetista dispor o cabo de forma que produza cargas equivalentes que se oponham, na sua forma, ao carregamento real propriamente dito, gerando um carregamento de protensão que equilibre uma parcela da carga total. Aparece, assim, o conceito de carga de balanceamento, ou balancing load, proposto por T. Y. Lin (1955).
2. Carregando-se a estrutura com a carga equivalente obtemos diretamente todos os efeitos da protensão, deslocamentos e esforços seccionais, para estruturas isostáticas e hiperestáticas;
3. As cargas equivalentes devem se constituir, obrigatoriamente, em um carregamento autoequilibrado, representando o equilíbrio do conjunto cabo-concreto. Com isso, o carregamento da protensão não gerará reações de apoio nas estruturas isostáticas e provocará reações autoequilibradas nas estruturas hiperestáticas. Os esforços produzidos na estrutura apenas por essas reações constituem os esforços secundários ou hiperestáticos de protensão;
4. Para estruturas com elevado grau de hiperasticidade, como grandes pórticos e lajes cogumelo, a representação da protensão é possível quase que exclusivamente pelo método da carga equivalente, sendo esta a mais recomendada.

### *2.3.1.1. Uso do FTOOL para modelagem de peça protendida*

Como foi dito anteriormente, tratar a protensão como um caso de carregamento nos permite a sua inclusão aos processos de análise estrutural via “softwares” para estruturas reticuladas ou de elementos finitos. Uma das formas mais simples de realizar essa representação é através do programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas, FTOOL.

De acordo com Martha (2012) o FTOOL é uma ferramenta simples, que une em uma única interface recursos para uma eficiente criação e manipulação do modelo (pré-processamento) aliado a uma análise da estrutura rápida e transparente e a uma visualização de resultados rápida e efetiva (pós-processamento). Além disso, o programa é fornecido de forma gratuita na internet, se tornando a forma ideal e mais usual de estudos de estruturas por estudantes de graduação.

## **2.4. Variação da tensão em cordoalhas de protensão**

A protensão não aderente é só um dos vários tipos de protensão existentes no mercado, porém foi o tipo escolhido para o estudo do presente trabalho devido à dificuldade de se avaliar de uma forma geral, ou genérica, e numérica, o acréscimo de tensão em problemas de vigas protendidas com cordoalhas engraxadas após o ELU, tanto de forma experimental como por meio de modelos computacionais.

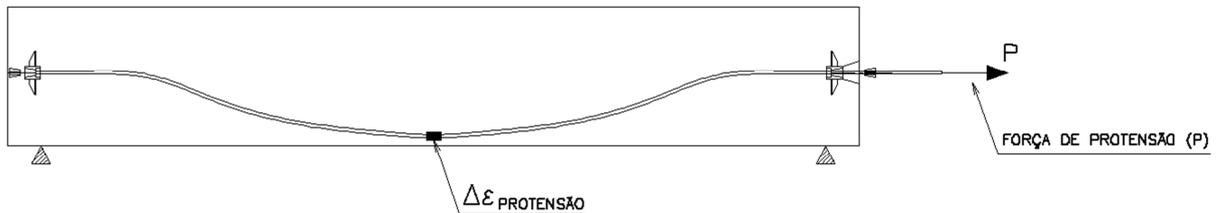
Voelcker (2004, p. 05) cita em seu trabalho tal dificuldade da seguinte forma:

O projeto de estruturas não aderente é dificultado pela ausência de compatibilidade de deformações entre aço e concreto. Para que seja satisfeita a condição de segurança à ruptura no Estado Limite Ultimo, é necessário que os esforços resultantes do concreto e das armaduras, tanto cabos não aderentes como barras passivas aderentes, equilibrem os esforços externos atuantes. Dessa maneira, para realização de um projeto que garanta a segurança e seja econômico, é fundamental a determinação precisa das tensões atuantes nas armaduras de protensão.

Com isso, para que essa determinação das tensões atuantes nas armaduras de protensão seja feita de forma precisa, é necessário primeiramente compreender como ocorre este acréscimo de tensão.

Quando a peça de concreto é protendida, ela fica sujeita às cargas da força de protensão e do seu peso próprio, como é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Cordoalhas engraxadas sujeitas apenas às tensões de protensão

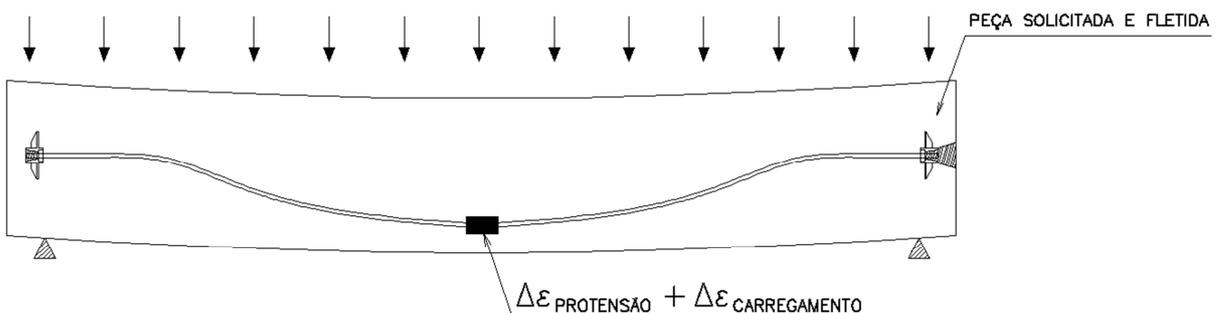


Fonte: A autora (2014).

Com isso, e sem outras influências, a tensão na seção transversal dos cabos é constante e conhecida.

Porém, quando a peça é solicitada e as flechas, imediata e ao longo do tempo, aparecem, o cabo se alonga um pouco mais, surgindo novas tensões que são somadas às tensões já existentes, como foi exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Acréscimo de tensões nas cordoalhas com a viga solicitada



Fonte: A autora (2014).

No entanto, como não há aderência entre o cabo e o concreto, as cordoalhas podem se mover dentro da bainha e se alongar mais, surgindo então um acréscimo de tensão nessas cordoalhas. Assim, conforme é dito no trabalho de Almeida Filho (2002), em peças protendidas sujeitas à flexão, a tensão no cabo de protensão pode reduzir ou aumentar, dependendo da curvatura de flexão, ou concavidade da peça, e da localização do cabo.

Tendo em vista o fato do acréscimo de tensão nas cordoalhas sem aderência ser um valor de difícil avaliação numérica, vários autores desenvolveram métodos aproximados de cálculo, onde alguns são descritos no decorrer deste trabalho.

## 2.5. Variação de tensão em cordoalhas de protensão segundo a NBR 6118 (2014)

Segundo o item 17.2.2 da norma da, NBR 6118 (2014), em relação à armaduras ativas sem aderência, na ausência de valores experimentais ou quando há análises não-lineares que não se mostram adequadas, os valores do acréscimo das tensões para estruturas usuais de edifícios devem ser as apresentadas na Equação (1) e na Equação (2), devendo ainda ser divididos pelos devidos coeficientes de ponderação.

- Para elementos com relação vão/altura útil igual ou menor que 35.

$$\Delta\sigma_p = 70 + \frac{fck}{100\rho_p} \quad (1)$$

Com  $\Delta\sigma_p$  em megapascal (MPa) e não podendo ultrapassar o valor de 420 MPa.

- Para elementos com relação vão/altura útil maior que 35.

$$\Delta\sigma_p = 70 + \frac{fck}{300\rho_p} \quad (2)$$

Com  $\Delta\sigma_p$  em megapascal (MPa) e não podendo ultrapassar o valor de 210 MPa.

Onde, pela Equação (3):

$$\rho_p = \frac{A_p}{b_c \times d_p} \quad (3)$$

Onde:

$\Delta\sigma_p$  é o acréscimo de tensão nas armaduras ativas sem aderência em megapascal (MPa);

$fck$  é a resistência característica do concreto em megapascal (MPa);

$\rho_p$  é taxa geométrica da armadura ativa em porcentagem;

$b_c$  é a largura da mesa de compressão em metros (m);

$d_p$  é a altura útil referida à armadura ativa em metros (m).

Esses valores fornecidos pela NBR 6118 (2014) são valores genéricos, isto é, que não seguem, de forma rígida, a geometria de cada peça protendida, pois foram baseados em

ensaios laboratoriais que consideravam apenas alguns parâmetros para a elaboração da equação. Assim, é válida a verificação desses valores por meio de estudos com análises matemáticas e ensaios experimentais para diferentes modelos de peças de concreto protendidas com cordoalhas sem aderência.

Vale ressaltar que a norma brasileira citada acima adota método idêntico ao do código americano ACI 318-08 (2008), embora ela utilize, em outros itens de seu conteúdo, conceitos do código europeu CEB-FIP Model Code (2010). Essas outras normas, além de outros métodos empíricos ligados a elas, serão descritas nos itens a seguir.

## **2.6. Outros métodos para previsão do incremento de tensão**

Como foi dito anteriormente, devido à complexidade do cálculo do incremento de tensão em cordoalhas engraxadas após o ELU, vários autores desenvolveram métodos de cálculo para obtenção de valores aproximados desse acréscimo de tensão. Barbieri (2014) fez a classificação desses métodos como empíricos, semi-empíricos e numéricos.

Métodos empíricos consistem em equações que expressam o valor do acréscimo de tensão diretamente em função de alguns parâmetros característicos do elemento. São métodos baseados em ensaios experimentais onde se estabeleceu correlações entre esses parâmetros e o valor do incremento de tensão nas cordoalhas engraxadas.

Já os métodos semi-empíricos são equações que apresentam um maior embasamento teórico. Segundo Voelcker (2004, p. 37) “[...] utilizam-se do equilíbrio de esforços no Estado Limite Ultimo para cálculo da profundidade da linha neutra e deformações nos materiais. Entretanto, estes métodos ainda consideram coeficientes determinados experimentalmente [...]”.

Por fim, os métodos numéricos são aquelas equações totalmente baseadas na teoria, sem influência de ensaios laboratoriais.

No caso do presente trabalho, serão estudados os métodos empíricos, já que o foco é a comparação com a norma brasileira NBR 6118 (2014) a qual se baseia em ensaios experimentais, como foi dito anteriormente.

Assim, serão descritos abaixo alguns métodos empíricos mais conhecidos para o cálculo do incremento de tensão em cordoalhas engraxadas após o ELU.

### 2.6.1. Tao e Du (1985)

O trabalho de Tao e Du (1985) foi baseado em experimentos com 26 vigas de concreto, submetidas a carregamentos nos terços médios, assim como o modelo proposto no trabalho em questão.

Os resultados encontrados nos ensaios apontaram uma relação entre a variável  $\rho_p$ , mostrada abaixo, e o valor do incremento de tensão nas cordoalhas engraxadas. A regressão obtida pelos autores é apresentada na Equação (4).

$$f_{ps} = f_{pe} + 78,6 - 192 \times \rho_p \quad (4)$$

Onde:

$f_{ps}$  é a tensão última de protensão em quilo newton por centímetro quadrado (kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{pe}$  é a tensão efetiva de protensão em quilo newton por centímetro quadrado (kN/cm<sup>2</sup>);

$\rho_p$  é taxa geométrica da armadura ativa em porcentagem.

Porém, tem-se como ponto negativo desse método a sua restrição de utilização para casos onde a variável  $\rho_p$  seja menor ou igual a 0,3.

### 2.6.2. ACI 318 (1999/2008)

O American Concrete Institute (ACI), por meio do código ACI 318 (1999 / 2008), faz uma previsão do valor do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas após o ELU. A equação utilizada no código foi desenvolvida primeiramente por Mattock et al., em 1971, e depois incrementada por Mojtahedi e Gamble, em 1978, para que fosse levado em consideração a esbeltez à flexão. A Equação é mostrada na Equação (5).

$$f_{ps} = f_{pe} + 6,89 + \frac{f_{ck} b d_p}{k A_{ps}} \quad (5)$$

Onde:

$f_{ps}$  é a tensão última de protensão em quilo newton por centímetro quadrado (kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{pe}$  é a tensão efetiva de protensão em quilo newton por centímetro quadrado (kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{ck}$  é a tensão resistente do concreto à compressão em quilo newton por centímetro quadrado (kN/cm<sup>2</sup>);

$b$  é a largura da seção transversal em centímetros (cm);

$d_p$  é a altura útil da armadura de protensão em centímetros (cm);

$A_{ps}$  é a área de armadura ativa em centímetros quadrados (cm<sup>2</sup>);

$k$  é um coeficiente em que:

$$k = 100; \text{ para } L/dp \leq 35;$$

$$k = 300; \text{ para } L/dp > 35.$$

É importante ressaltar que o valor da tensão última de protensão não deve ultrapassar o valor da tensão convencional de escoamento do aço de protensão e nem os valores estabelecidos nas Equações (6) e (7) para  $L/dp \leq 35$  e  $L/dp > 35$ , respectivamente.

$$f_{ps} \leq f_{pe} + 41,4 \quad (6)$$

$$f_{ps} \leq f_{pe} + 20,7 \quad (7)$$

É considerado um ponto negativo deste método o fato de parâmetros ditos importantes, como o tipo de carregamento e a quantidade de armadura passiva, não serem utilizados na previsão da tensão última de protensão.

### 2.6.3. Naaman et al. (2002)

Naaman et al. (2002), integrantes do Sub-comitê de estudo da tensão em cabos de protensão não aderentes do comitê 423 da junta ACI-ASCE, propuseram uma equação, como recomendação para substituição das utilizadas no código ACI 318-99 (1999) vigente na época. Tal equação foi elaborada visando acomodar muitos dos fatores que foram ignorados na equação da ACI, como a presença combinada de armaduras de reforço e de protensão em peças com protensão parcial, a relação entre extensão e profundidade, o padrão de carregamento em elementos contínuos, o efeito do módulo de elasticidade do aço de protensão, dentre outros. A Equação proposta é mostrada na Equação (8).

$$f_{ps} = f_{pe} + \frac{E_p L_1}{1866 L_2} \quad (8)$$

Onde:

$f_{ps}$  é a tensão última de protensão em Megapascal (MPa);

$f_{pe}$  é a tensão efetiva de protensão em Megapascal (MPa);

$E_p$  é o módulo de elasticidade do aço de protensão em Megapascal (MPa);

$L_1$  é a soma dos comprimentos dos vãos carregados que contém cabos, em metros (m);

$L_2$  é a extensão total do cabo não aderente, entre ancoragens, em metros (m).

#### **2.6.4. CEB-FIP (2010)**

O Comitê Euro-Internacional do Concreto (Comité Euro-international du Béton – CEB), em seu código de normas para o concreto CEB-FIP Model Code (2010), não apresenta expressões para a determinação do valor do incremento de tensão no ELU. Diferentemente dos outros documentos citados, ele apenas aconselha que, na falta de uma análise baseada na compatibilidade de deslocamentos, o valor desse incremento não deve ser considerado na verificação e dimensionamento à ruptura.

#### **2.7. Trabalhos experimentais envolvendo estudo de tensões**

Uma das maneiras de se quantificar o acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de vigas protendidas após o ELU é por meio de ensaios experimentais. Neste item serão descritos, de forma sucinta, dois trabalhos, um que aborda todo o procedimento do ensaio, elaborado por Silva Filho (2010) e outro que aborda em sua metodologia a utilização de extensômetros para medir tensão em aço, elaborado por Vieira (2014). O primeiro trabalho é todo teórico, nenhuma prática foi feita. No segundo trabalho os citados extensômetros foram aplicados em barras de aço comuns e não em cordoalhas. Assim, na falta de orientações acessíveis sobre a instrumentação de cordoalhas engraxadas para medir o acréscimo de tensão nas mesmas após o ELU, os citados trabalhos vem como um auxílio para que a metodologia do trabalho em questão, visando procedimento experimental de instrumentação de cordoalhas engraxadas, seja desenvolvida nos capítulos seguintes.

É importante destacar a escolha desses trabalhos como referência se deu, dentre outros motivos, pelo fato de ambos terem sido desenvolvidos com materiais e equipamentos disponíveis na UFC, assim como o presente trabalho. Por fim, o último item faz algumas indicações sobre a aplicação de extensômetros.

### 2.7.1. Orientações de Silva Filho (2010)

Silva Filho (2010) propôs um ensaio para determinar o incremento de tensão em cordoalhas engraxadas de uma viga protendida após o ELU. O modelo proposto por ele, com a aplicação de carga nos terços médios da peça protendida, se adequa a muitos outros que já foram testados e obtiveram resultados positivos.

De acordo com Voelcker (2002),

Considerando que o incremento de tensão na armadura não aderente é proporcional à soma de curvaturas ao longo do elemento, pode-se admitir que as zonas plastificadas, constituídas pelas seções de máxima curvatura, exercem maior influência no valor do incremento de tensão na armadura não aderente. Admitindo-se que diferentes disposições de carregamento teoricamente afetam o comprimento da zona plastificada, pode-se afirmar, portanto, que o tipo de carregamento aplicado influencia no valor do incremento de tensão na armadura não aderente.

Assim, justifica-se o uso da aplicação das cargas nos terços médios da viga protendida do ensaio.

#### 2.7.2.1. Fabricação da viga e dos aparelhos de apoio

Os materiais necessários para a fabricação da viga são listados na Tabela 1.

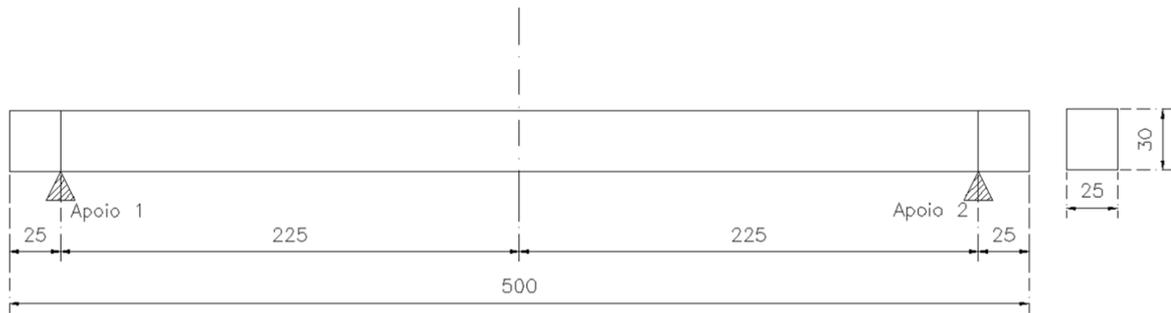
Tabela 1 – Materiais necessários para a fabricação da viga

DESCRIÇÃO	UN	QUANTIDADE
Formas para concreto	m <sup>2</sup>	4,25
Ancoragem ativa para cabo com 1 cordoalha de 12,7 mm	un	2,00
Ancoragem passiva para cabo com 1 cordoalha de 12,7 mm	un	2,00
Armadura de cordoalha CP-190RB	kg	10,00
Armadura CA-50A média D = 6.3 a 10 mm	kg	16,03
Concreto p/ vibr. Fck 30 Mpa com agregado adquirido	m <sup>3</sup>	0,5
Desmoldante para formas	l	2,00

Fonte: A autora (2014), baseado em SILVA FILHO (2010).

Com esses materiais é possível fabricar uma viga de seção transversal 25×30 e com 5 metros de comprimento, como mostra a Figura 11.

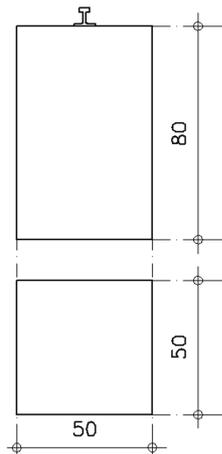
Figura 11 – Desenho da fôrma da viga protendida do ensaio



Fonte: A autora (2014).

Para os aparelhos de apoio da viga do ensaio, Silva Filho (2010) propõe que sejam fabricados apoios com a seguinte geometria apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Vistas frontal e inferior do aparelho de apoio da viga do ensaio



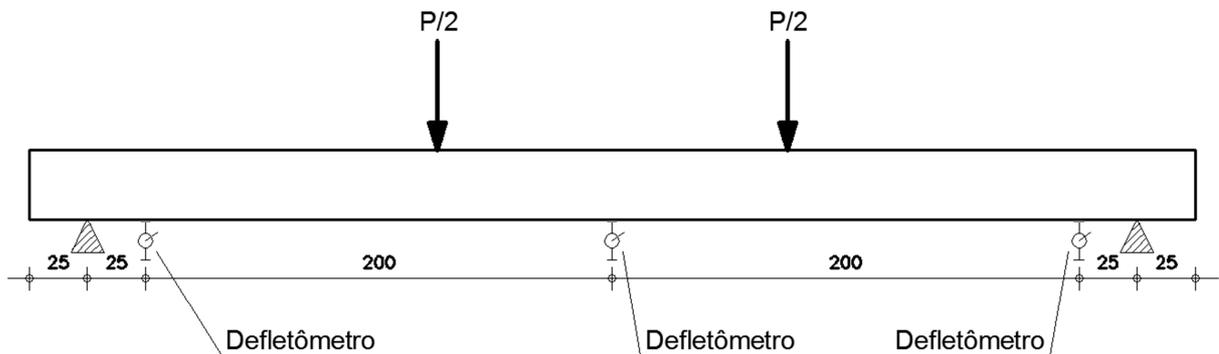
Fonte: A autora (2014), baseado em SILVA FILHO (2010).

É recomendado para este modelo ser montado com apoios de trilhos metálicos que atuarão sobre os blocos de concreto. Isso será necessário para que o apoio funcione como um apoio do primeiro gênero, impedindo apenas o deslocamento horizontal para baixo.

#### 2.7.2.2. Acoplamento de todos os instrumentos de medição

Os instrumentos de medida utilizados no programa experimental têm como objetivo medir dois parâmetros: os deslocamentos verticais da viga e as tensões nas cordoalhas de protensão não aderente. Para a medição dos deslocamentos da viga, se faz necessário o uso de três defletômetros acoplados à suportes magnéticos para relógio comparador. A posição desses defletômetros na viga está indicada na Figura 13.

Figura 13 – Locação dos defletômetros



Fonte: SILVA FILHO (2010)

Para as tensões nas cordoalhas engraxadas, devem ser utilizados extensômetros elétricos de resistência, cujo nome pelo qual é conhecido é “strain gage”. Cada extensômetro deve ser fixado a uma cordoalha antes da montagem da viga. Este é um dos passos mais importantes para a pesquisa, pois estão dependendo dele os resultados de acréscimo de tensão após o ELU da viga. Como se trata de um procedimento não realizado antes na UFC, os testes com os strain gage farão parte da metodologia do presente trabalho, como subsídio para a concretização de todo programa experimental. O item 2.7.3 abordará de forma mais completa o assunto de aplicação de extensômetros.

Outro equipamento de medição necessário é a célula de carga, que mede a força que está sendo aplicada à viga. Segundo Silva Filho (2010) é necessária a utilização de três células de carga, uma para o ponto onde o macaco hidráulico aplicará a carga, e outras duas para cada ponto de aplicação da carga na viga.

Um pórtico de reação, como mostrado na Figura 14, também será utilizado, o qual irá reagir ao carregamento aplicado, importante para que as deformações provenientes das forças de reação não sejam influentes nos resultados do ensaio da viga.

Figura 14 – Pórtico de reação disponível na UFC



Fonte: SILVA FILHO (2010)

Por fim, é necessário também um macaco hidráulico, responsável pela aplicação da carga de ruptura, previamente calculada, na viga. A Figura 15 mostra um exemplo de macaco hidráulico.

Figura 15 – Macaco hidráulico disponível na UFC



Fonte: Fornecida por Mylene Vieira

A lista de Equipamentos necessários na realização do programa experimental, com suas respectivas quantidades, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Equipamentos necessários na realização do programa experimental

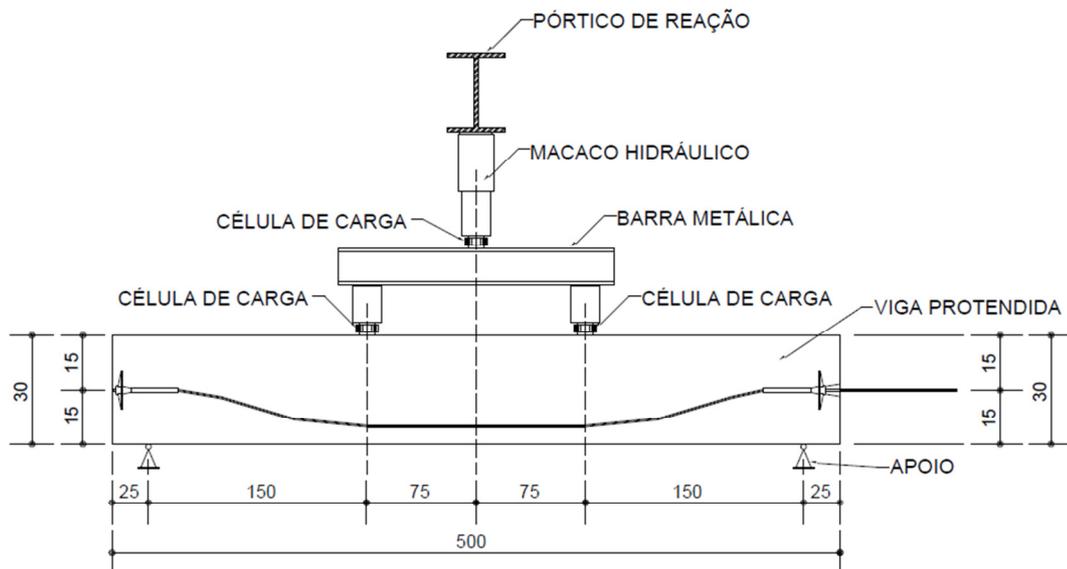
DESCRIÇÃO	UN	QUANTIDADE
Pórtico de reação	un	1,00
Macaco hidráulico	un	1,00
Defletômetros	un	3,00
Suporte magnético para relógio comparador	un	3,00
Células de carga	un	3,00
Perfil I metálico para transferência dos esforços	m	2,50

Fonte: SILVA FILHO (2010).

### 2.7.2.3. Conferência do posicionamento dos elementos

Com a viga pronta e todos os instrumentos obtidos, Silva Filho (2010) indica como realizar a montagem do sistema do programa experimental, posicionando os elementos em seu devido local. Deve-se obter uma disposição de equipamentos e materiais como o que está mostrado no esquema da Figura 16.

Figura 16 – Sistema pronto do programa experimental



Fonte: SILVA FILHO (2010)

### 2.7.2.4. Recomendações para a execução

Silva Filho (2010) recomenda alguns passos para se fazer na execução de forma que auxilie na obtenção correta dos resultados.

1. Realizar o “escorvamento” da viga – Realizar o escorvamento da viga trata-se de aplicar um carregamento inicial ao sistema e depois descarrega-lo, antes do ensaio propriamente dito. Esta etapa se faz necessária para eliminar eventuais folgas nos apoios e nos sistemas de fixação dos equipamentos de cargas e dos instrumentos de medição. É recomendada, nesta fase do ensaio, a aplicação de uma carga com um valor em torno de 10% da carga máxima.
2. Ao carregamento aplicado – O carregamento aplicado à viga deve ser calculado previamente de forma que o valor da carga leve a viga à ruína. Recomenda-se uma aplicação do carregamento de maneira gradual, realizando-se as observações do modelo e as medições em cada incremento de carga. O número mínimo de incrementos do carregamento deve ser 10.
3. Ao realizar as leituras dos instrumentos de medição – As leituras dos instrumentos de medição devem ser feitas em dois momentos. A primeira leitura é aconselhada ser feita imediatamente após a aplicação do incremento de carga. Já para a segunda leitura dos instrumentos de medição, deve-se primeiramente aguardar a estabilização dessas leituras. E esses dois momentos devem ser repetidos para cada etapa de carregamento.

#### *2.7.2.5. Atingindo o Estado Limite Último (ELU)*

O chamado Estado Limite Último refere a segurança das estruturas ao colapso, quer pelo esmagamento do concreto, quer pela deformação excessiva do aço. Como foi dito anteriormente, a carga na viga deve ser aplicada de forma gradual, com incrementos de carga de valor aproximado à 10% da carga máxima, até que a viga pretendida chegue à ruína, isto é, atinja o ELU.

O cálculo da carga máxima, ou carga de ruptura, deve ser feita antes do ensaio, de forma que seja possível estimar o valor dos incrementos de carga.

#### *2.7.2. Orientações de Vieira (2014)*

Vieira propõe alguns procedimentos de execução que são diferentes dos propostos por Silva Filho (2010). O primeiro é com relação ao modelo de apoio da viga, onde o modelo utilizado por Vieira (2014), e em outros ensaios mais atuais na UFC, está representado na Figura 17.

Figura 17 – Vistas frontal e inferior do aparelho de apoio da viga do ensaio



Fonte: Fornecida por Mylene Vieira

É possível observar que este outro modelo também funciona como um apoio do primeiro gênero, pois o cilindro metálico funciona como rótula e impede somente o deslocamento vertical para baixo.

Outra diferença proposta no trabalho de Vieira (2014) é com relação à quantidade de células de cargas. Segundo Vieira (2014) somente uma célula de carga é necessária, operando no ponto de atuação do macaco hidráulico.

### ***2.7.3. Recomendações na aplicação de extensômetros***

Uma das formas mais comuns para a análise experimental de tensões é com o uso de extensômetros de resistência variável, ou strain gages. Trata-se de um sensor elétrico cujo princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência quando submetido a uma deformação. Essa variação de resistência pode ser medida com precisão e correlacionada com o valor da tensão aplicada e com a deformação resultante devido a mesma.

Sabe-se que o strain gage é um equipamento de alta precisão e muito delicado. Assim, algumas orientações para o processo da sua aplicação, em qualquer tipo de material, são necessárias:

#### **1. Preparação da superfície:**

Tanto a superfície do strain gage quanto a superfície da peça onde ele será aplicado devem estar absolutamente limpas, isentas de qualquer traço de gordura. Esta etapa visa facilitar a operação seguinte, de aplicação do strain gage sobre a superfície da peça.

Segundo Barreto Jr. (2002) “a boa colagem depende do adesivo e dos cuidados no seu manuseio: é de regra geral uma boa limpeza de maneira a evitar a contaminação do local de colagem e do próprio extensômetro com óleos, graxas, poeiras e outros agentes prejudiciais à boa colagem.”.

E ainda, sobre a preparação da superfície onde o Strain gage será aplicado, a Measurements Group (1992, p. 18) afirma que,

O objetivo da preparação da superfície consiste em desenvolver uma superfície quimicamente limpa com uma rugosidade apropriada para as necessidades de instalação do gage, com uma alcalinidade superficial de PH correto, e linhas de calibre visível para a localização e a orientação do strain gage.

Assim, é quase que paranoica a preocupação com a limpeza da chamada zona nobre da peça, isto é, aquela onde será instalado o strain gage. Recomenda-se ainda o uso de pinças e luvas cirúrgicas.

## 2. Preparação da fiação:

Em um primeiro momento, pode parecer que a fiação é um aspecto de menor importância em uma aplicação de extensometria. Porém, na prática, pode ser uma grande fonte de problemas se não houver um planejamento adequado antes da sua aplicação no procedimento experimental. Com isso, os principais cuidados recomendados nesta etapa são:

- Ao cortar o isolamento para deixar o condutor descoberto, cuidar para não marcar este com o alicate, pois isto leva a uma quebra do mesmo com qualquer movimento da fiação;
- Preparar todas as pontas dos fios para receber a solda, isto é, deixar, previamente, todas as pontas dos fios estanhadas;
- Na montagem dos cabos sobre as peças, dar flexibilidade a estes em pontos onde se prevê que possam ocorrer movimentos sobre estas.

Por fim, com relação à soldagem desses fios, a recomendação geral, por vários autores, é como afirma Andolfato, et al. (2004) que diz que “a soldagem dos fios no extensômetro é feita com solda de estanho sem o uso de pastas comuns ou ácidos para facilitar a soldagem.”. O uso de outros materiais que não a solda de estanho pode prejudicar a leitura dos resultados.

### 3. Aplicação do extensômetro:

Para a aplicação do extensômetro, é de recomendação geral que as etapas de preparação da superfície, tanto do strain gage quanto do local onde ele será aplicado, e de preparação da fiação estejam prontas. Isso é importante para que o extensômetro não fique exposto por muito tempo, buscando evitar contaminações ou outros imprevistos que danifiquem o material.

Após a colagem do strain gage na peça, é altamente recomendado que se garanta a colagem do material, pois se não for feito corre-se o risco do extensômetro soltar na hora do procedimento experimental, comprometendo, assim, os resultados. Para isso, primeiramente deve-se garantir que a cola, de acordo com as especificações do fabricante, ficou tempo suficiente junto a peça antes de se realizar qualquer medição com o strain gage. Chama-se este processo de cura.

Segundo Barreto Jr (2002) “O adesivo e o extensômetro requerem durante a cura uma pressão sobre eles a fim de eliminar o excesso de adesivo e bolhas de ar que porventura possam ficar sob o extensômetro.”. E ainda, Andolfato et al. (2004) afirma que “[...]as condições de cura tem amplo efeito na colagem e no desempenho do extensômetro [...]”. Assim, devem-se tomar os devidos cuidados nessa fase do procedimento.

### 4. Proteção do extensômetro.

Por fim, e não menos importante, faz-se necessário proteger os extensômetros colados à peça, pois, segundo Andolfato et al. (2004),

O desempenho dos extensômetros é facilmente degradado pela ação da umidade, ataques químicos ou por choques mecânicos. Como resultado, os extensômetros necessitam de graus de proteção que variam de acordo com a severidade do ambiente em que ele operará.

Essa proteção pode se dar de várias maneiras, isto é, dependendo do tipo de material onde o strain gage está aplicado, existem no mercado inúmeros materiais que garantem essa proteção, podendo ser escolhido qualquer um que garanta a impermeabilização da peça e não seja corrosivo (como é o caso de alguns silicones). O importante é que desta operação final é que depende a vida da instalação.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Considerações iniciais**

O estudo numérico do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas para casos de peças protendidas pode ser feito por meio de análises não lineares em programas computacionais e por meio de programas experimentais. Ambos os meios podem retornar resultados numéricos, que podem ser comparados para um mesmo caso de peça protendida, tendo em vista que esses resultados tendam para um valor análogo.

Com isso, é possível realizar estudos, onde o objetivo final é a obtenção de dados sobre o acréscimo de tensão em cordoalhas de protensão, de forma teórica e experimental, como é o caso do presente trabalho. Porém, neste estudo, o programa experimental não se dará por completo, todavia será fornecida toda a metodologia para a instrumentação das cordoalhas com extensômetros elétricos de resistência, etapa fundamental para a obtenção final de dados em um programa experimental. A etapa teórica será abordada de forma simples, visando facilitar a reprodução do método. No mais, toda a metodologia do presente trabalho visa um servir de subsídio para a realização de estudos numéricos do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas, fornecendo informações de ordem teórica e experimental.

Em resumo, este capítulo trata da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho em questão, a qual será abordada por meio de duas vias: o estudo numérico do modelo de viga adotado e o procedimento experimental em cordoalhas engraxadas. Em seguida, será descrito como ambos os procedimentos, teórico e experimental, irão contribuir para que seja atingido o objetivo geral do presente trabalho.

#### **3.2. Estudo teórico: avaliação numérica do modelo de viga em estudo**

Com o intuito de se avaliar o acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de um modelo de viga protendida depois de atingido o ELU, fez-se inicialmente uma modelagem computacional. Para isso, as seguintes etapas metodológicas foram seguidas:

1. Caracterização geométrica e dos materiais do modelo de viga do estudo;
2. Cálculo da representação da ação da protensão
3. Cálculo da carga que levará a viga a ruína;
4. Desenho do projeto da viga;

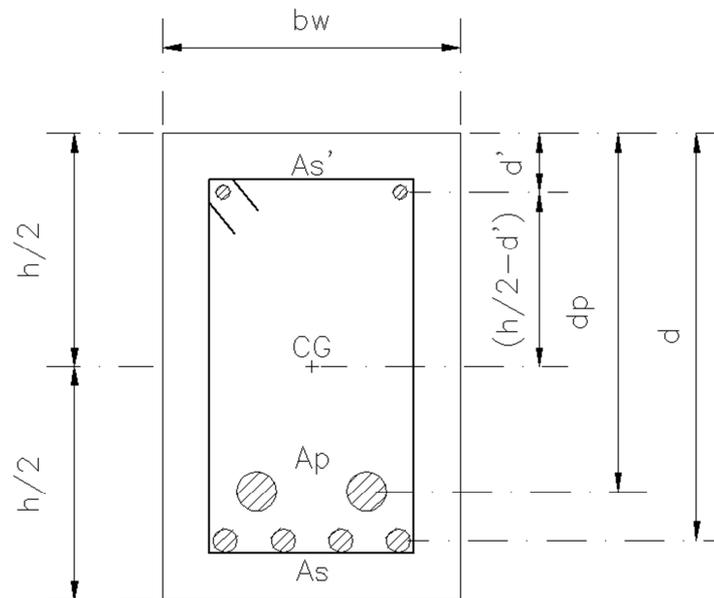
5. Cálculo da ação da protensão utilizando o método da carga equivalente
6. Elaboração do modelo com a representação do cabo de protensão
7. Aplicação dos incrementos de carga

Essas etapas serão abordadas nos itens a seguir.

### 3.2.1. Caracterização geométrica e dos materiais do modelo de viga do estudo

Para efeito de estudo, foi prevista uma viga de geometria retangular, assim como no ensaio elaborado por Silva Filho (2010). A escolha da geometria, de dimensões  $19 \times 30$  cm, diferente da sugerida na metodologia de Silva Filho (2010), se deu por seguir a modulação de fôrmas plásticas para concretagem de vigas elaborada e utilizada por uma importante empresa do ramo da protensão em Fortaleza. Uma seção transversal genérica da viga, com a representação das armaduras ativas e passivas, é apresentada na Figura 18

Figura 18 – Seção transversal genérica da viga



Fonte: A autora (2014), adaptado de SILVA FILHO (2010)

As outras características da viga foram determinadas a partir das dimensões da sua seção transversal, de forma que todas as armaduras pudessem ficar bem posicionadas e atendendo aos requisitos de projeto.

Assim, baseado na Figura 18, as características da viga escolhida para o presente estudo são apresentadas na Tabela 3, mostrada abaixo.

Tabela 3 – Características da viga do estudo

PARÂMETRO	VALOR	UNID.
bw	19	cm
h	30	cm
d	26	cm
d'	4	cm
dp	23	cm
As	4 $\phi$ 8	un
As'	2 $\phi$ 6,3	un
Ap	2 $\times$ CP 190 RB 12,7	un
Asw	25 $\phi$ 6,3 c/ 20	un
fck	30	MPa
c	3	cm

Fonte: A autora (2014).

Por fim, determinou-se que a viga teria um vão de 4,50 m, de apoio a apoio, sendo caracterizada como uma viga isostática. A partir das definições iniciais, descritas acima, se fez necessário o cálculo de alguns parâmetros, fundamentais para o estudo, relacionados ao material e geometria da viga e dos cabos. São eles:

1. Módulo de Elasticidade
2. Coeficiente de Poisson
3. Coeficiente de dilatação térmica
4. Peso próprio da viga
5. Área da seção das cordoalhas
6. Momento de inércia da seção transversal

O cálculo desses parâmetros está apresentado no Capítulo de resultados.

### ***3.2.2. Cálculo da representação da ação da protensão***

Como já foi comentado, em peças protendidas o efeito da protensão com cordoalhas engraxadas é de difícil modelagem pela não aderência entre esse material e o concreto. Assim, uma das maneiras encontradas de representar a ação da protensão no modelo computacional, e que vai ser utilizada no presente estudo, é por meio de uma variação de temperatura uniforme.

Para isso, fez-se necessária a utilização do conceito de dilatação linear, que consiste na variação considerável de apenas uma dimensão de um material, como é o caso dos

cabos de protensão. A partir deste conceito, utilizou-se a Equação (9) para calcular o valor dessa variação de temperatura.

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (9)$$

Onde

$\varepsilon$  é a deformação sofrida no cabo;

$\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica, previamente calculado;

$\Delta T$  é a variação de temperatura.

Assim, fez-se necessário o cálculo dessa deformação ( $\varepsilon$ ) que o cabo irá sofrer. Para isso, utilizou-se a lei de Hooke, onde, conhecida a constante de proporcionalidade, ou módulo de elasticidade, e determinada a tensão no cabo pela proporção entre força e área, determinou-se facilmente essa deformação pela Equação (10).

$$\sigma_p = \varepsilon_p E_p \quad (10)$$

Onde  $\sigma_p$  é tensão de protensão.

### 3.2.3. Cálculo da carga de ruptura

O próximo passo foi definir o momento resistente da viga, o qual pode ser obtido por meio da flexão simples utilizando os dados apresentados anteriormente e programas computacionais específicos. Primeiramente, determinou-se o valor da armadura equivalente que existe na seção da viga considerando as armaduras ativas como armaduras resistentes da seção, a partir da Equação (11).

$$A_s = A_{s_{\text{EXISTENTE}}} + A_{p_{\text{EQUIVALENTE}}} \quad (11)$$

A partir desse valor de armadura total é possível se determinar o valor do momento resistente da viga que, no caso do presente estudo, foi calculado por meio de programas computacionais.

Pelo esquema apresentado na Figura 19, sabe-se que o momento fletor máximo é dado pela Equação (12).

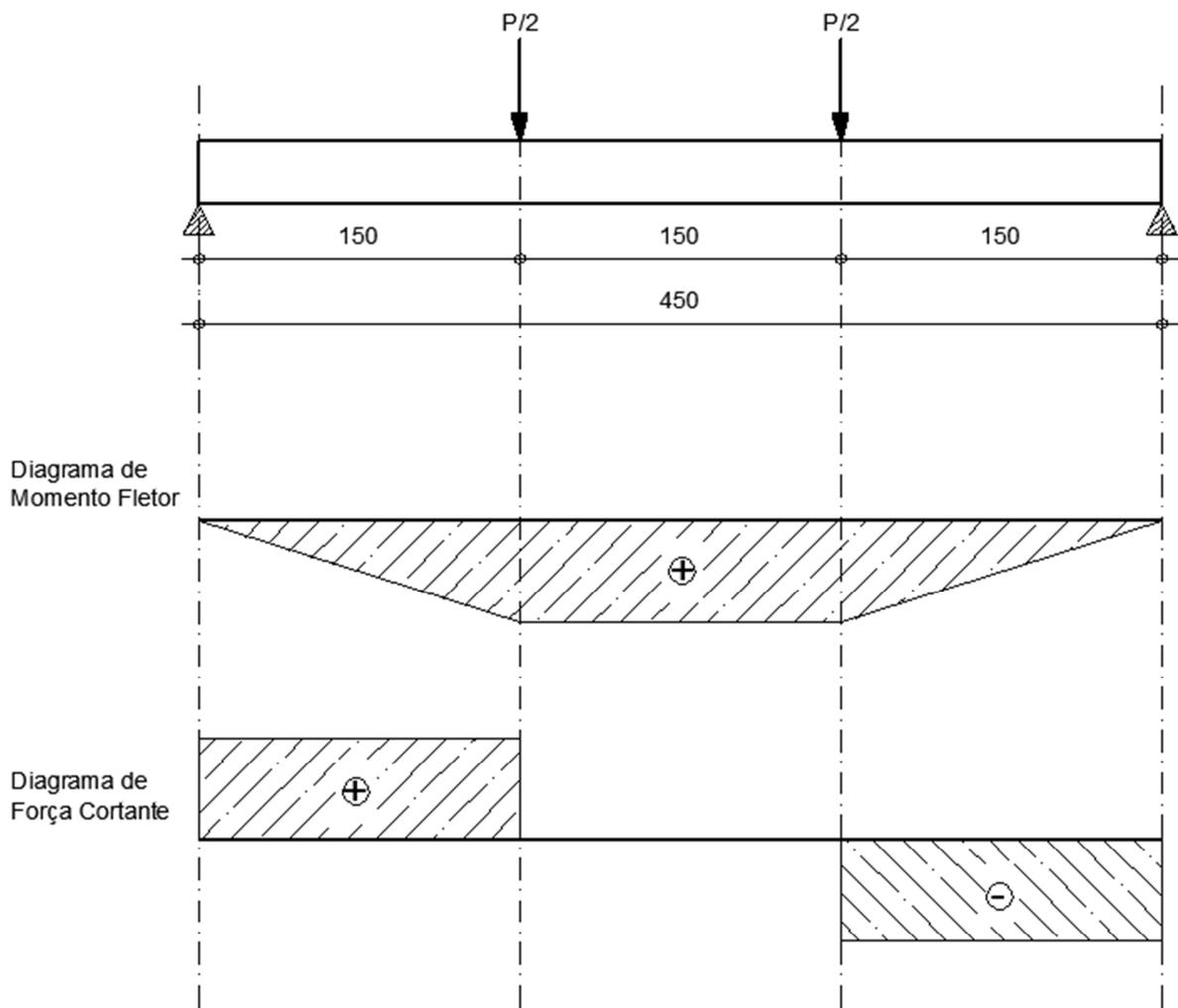
$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P}{2}(1,50) \quad (12)$$

Onde P é a força aplicada à viga.

Dessa forma, conhecendo o valor do momento máximo esperado, tem-se o valor da carga P que leva a viga à ruína.

O traçado do cabo foi feito de acordo com o tipo de carga aplicada, onde foi levado em consideração parâmetros de limites de raio mínimo, além da concordância vertical do cabo. A representação esquemática do ensaio e os seus respectivos diagramas estão apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Representação da viga solicitada e seus diagramas de esforços



Fonte: A autora (2014), adaptado de SILVA FILHO (2010)

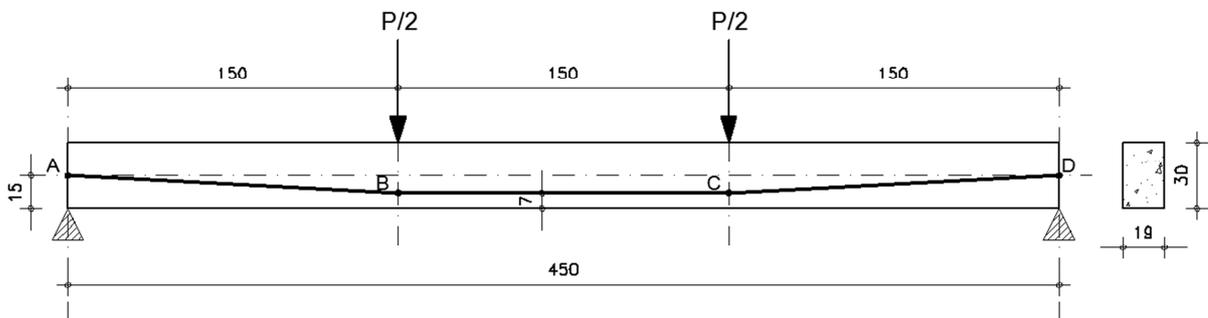
### 3.2.4. Desenho do projeto da viga

Tendo sido definidos os parâmetros geométricos da viga e a carga que a leva à ruína, fez-se necessária a elaboração de um projeto, com desenhos de fôrmas, armaduras, cortes esquemáticos e notas explicativas, para a execução da mesma, facilitando o bom entendimento por parte dos leitores. Os projetos de execução da viga em estudo se encontram no Apêndice A.

### 3.2.5. Cálculo da ação da protensão utilizando o método da carga equivalente

A partir do traçado do cabo definido anteriormente, fez-se uso do método da carga equivalente para se calcular a ação da protensão na viga e, assim, ter uma base de validação na elaboração do modelo a ser criado. O modelo de viga utilizado, com a representação do cabo de protensão, é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Modelo de viga do estudo com representação do cabo de protensão



Fonte: A autora (2014).

A partir desse modelo e desse traçado de cabo, calcula-se a carga equivalente e seus respectivos diagramas de esforços. Os resultados desse cálculo são apresentados no Capítulo seguinte.

### 3.2.6. Elaboração do modelo computacional da viga protendida

Primeiramente, fez-se necessária a escolha do programa computacional para a elaboração do modelo. A escolha do programa foi feita de forma que fosse um programa de fácil acesso e fácil manuseio pelos estudantes, para que o modelo de elaborado se torne

acessível e de simples reprodução. Assim, o programa que mais se adequou as necessidades do estudo foi o programa FTOOL.

Com isso, elaborou-se o modelo de viga, onde, de maneira geral, considerou-se a viga representada pelo seu eixo, apoiada sobre dois apoios, um do primeiro e outro do segundo gênero, e o cabo de protensão ligado a ela por barras rígidas rotuladas nos pontos de mudança de ângulo. As etapas de elaboração do modelo são descritas abaixo:

1. Traçado da viga – A viga deve ser representada pelo seu eixo e os apoios representados como apoios do primeiro gênero, com as dimensões e distâncias estabelecidas em projeto;
2. Divisão da viga em nós – Etapa necessária para estabelecer os pontos de cálculo dos esforços. Decidiu-se colocar um nó a cada 0,75 m.
3. Marcação dos pontos representativos da cordoalha – Marcam-se os pontos onde as cordoalhas estarão localizadas em relação ao eixo da viga, com suas respectivas alturas, de acordo com o traçado pré-estabelecido em projeto;
4. Traçado da cordoalha – Os pontos representativos da cordoalha devem ser ligados por barras, na falta do elemento ‘cabo’ no programa computacional utilizado;
5. Traçado das barras rígidas de ligação viga/cordoalha – Os pontos da cordoalha onde há mudança de ângulo devem estar ligados à viga por meio de barras rígidas. Assim, têm-se duas barras rígidas, que representam a não aderência das cordoalhas ao concreto;
6. Definição das características de cada barra – As propriedades geométricas e do material, de cada barra da viga e das cordoalhas, devem ser definidas de acordo com o que foi estabelecido em projeto, etapa mostrada no item 3.2.1. Para as barras rígidas de ligação, devem ser aplicadas propriedades de forma que a rigidez seja garantida;
7. Aplicação da variação de temperatura – representou-se a ação da protensão por meio de uma variação de temperatura, como já foi dito. Esta deve ser aplicada às barras que representam os cabos de protensão;

8. Validação do modelo – o modelo de viga protendida deve ser validado a partir dos resultados de esforços com o método da carga equivalente. Faz-se isso tornando, momentaneamente, a viga rígida e verificando se os esforços gerados com a variação de temperatura (que representa os esforços de protensão) são iguais aos gerados a partir da aplicação da carga equivalente. Se os resultados coincidirem, pode-se afirmar que o modelo elaborado reproduz de forma satisfatória o efeito da protensão;
9. Aplicação de carga representando o peso da viga – em situações reais há a atuação do peso da viga como carga atuante no sistema, peso que não é considerado nas análises do programa computacional escolhido. Assim, deve-se representar o peso próprio da viga como um carregamento uniforme atuando ao longo de toda a estrutura;
10. Aplicação dos casos de carregamento – incrementos de cargas de  $P/2 = 5 \text{ kN}$  devem ser aplicado aos terços médios da viga, até o valor da carga de ruptura, calculado previamente, para a obtenção dos resultados finais.

### ***3.2.7. Obtenção dos resultados: estudo do acréscimo de tensão***

O programa dará como resultados os diagramas de esforços da viga elaborada, e é necessária a interpretação desses dados de forma que o acréscimo de tensão seja obtido e estudado.

Deve-se analisar o gráfico relativo aos esforços normais, pois deseja-se obter as tensões nas cordoalhas de protensão e estas trabalham somente com força axial, isto é, normal à sua seção transversal. O valor de carga que aparecer no centro da cordoalha deve ser dividido pela área da seção transversal das armaduras ativas atuantes, obtendo-se o valor da tensão de protensão. O valor do acréscimo de tensão é igual a diferença entre o valor da tensão inicial e o valor dessa tensão calculada.

Além disso, é necessário levar em consideração as fissuras que aparecerão e que influenciarão nessa tensão. Assim, para tornar os resultados mais fieis a realidade, considerou-se na análise dos resultados o momento de fissuração, isto é, após a carga que leva ao o momento de fissuração diminuiu-se o momento de inércia de forma a representar o aparecimento das fissuras nos resultados.

Os resultados de acréscimo de tensão no centro das cordoalhas, considerando o momento de fissuração e cada incremento de carga até a carga de ruptura, são apresentados no Capítulo seguinte.

### **3.3. Procedimento experimental: orientação para instrumentação de cordoalhas engraxadas**

Visando a realização futura de um programa experimental para medir o acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas de uma viga protendida, se fez necessário verificar a melhor maneira de se instrumentar uma cordoalha de protensão de modo a medir corretamente essas tensões. Para isso, as seguintes etapas metodológicas foram seguidas:

1. Escolha das cordoalhas a serem utilizadas no procedimento;
2. Escolha do tipo de extensômetro a ser utilizado no procedimento;
3. Obtenção dos materiais e instrumentos necessários;
4. Limpeza da superfície da cordoalha que receberá o extensômetro;
5. Realização do procedimento correto de colagem dos extensômetros;
6. Preparação da fiação para conexão com aparelho de leitura;
7. Proteção do local onde os extensômetros foram colados;
8. Realização da protensão para obtenção dos resultados.

#### ***3.3.1. Escolha das cordoalhas a serem ensaiadas***

Escolheu-se para ser ensaiadas duas cordoalhas de 7 fios, de 4,80 m de comprimento, do tipo CP 210 RB 12,7, isto é, duas cordoalhas de protensão com diâmetro nominal de 12,7 mm, tensão última de 210 kgf/mm<sup>2</sup> e com baixa relaxação. A Figura 21 mostra os cabos utilizados no ensaio.

Figura 21 – Cabos de protensão utilizados no ensaio



Fonte: A autora (2014).

A escolha desse tipo de cordoalha se deu pelo fato de ser um cabo com um material mais resistente, além de ser, no ano de presente estudo, uma novidade no mercado. Porém, apesar do procedimento experimental ter sido desenvolvido apenas com esse material, é possível afirmar que os resultados que serão relatados valem da mesma maneira para outras cordoalhas engraxadas, de mesmas características geométricas, mas com aços de menor resistência.

### ***3.3.2. Escolha do tipo de extensômetro***

Com o estudo realizado sobre os tipos de extensômetros existentes, verificou-se que os fabricantes têm à disposição uma grande variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, permitindo assim a escolha correta para cada caso específico.

Basicamente, a escolha do strain gage para o presente estudo se deu levando em consideração três fatores:

1. A dimensão do extensômetro;
2. O tipo, ou propósito, do extensômetro:
  - a. De acordo com a precisão da medição;
  - b. De acordo com a sensibilidade do extensômetro;
3. O coeficiente de expansão linear.

Primeiramente a dimensão do strain gage teria que ser tal que se adequasse à geometria das cordoalhas, isto é, que fosse possível colar o extensômetro completamente ao longo da cordoalha, sem que faltasse alguma parte.

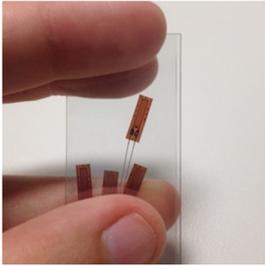
Em seguida, foram consultados os catálogos dos fabricantes do equipamento e verificou-se uma grande quantidade de tipos de extensômetros, com diferentes propriedades e funções. A escolha, então, foi feita baseando-se na precisão e na sensibilidade do extensômetro, as quais deveriam atender ao alongamento previsto para a cordoalha, após o ELU, de aproximadamente 7 mm/m.

Escolhido o tipo, fez-se necessária a escolha do modelo, que leva em consideração o coeficiente de expansão linear o tipo de material do qual é feito o strain gage. O resultado da escolha é apresentado no Capítulo seguinte.

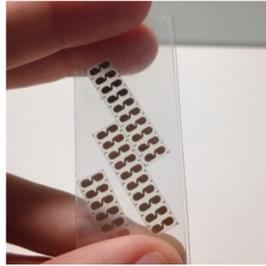
### ***3.3.3. Caracterização dos materiais e equipamentos necessários***

A escolha dos materiais a serem utilizados no procedimento experimental é uma etapa fundamental e sua qualidade influencia diretamente na qualidade dos resultados obtidos. Com isso, os materiais foram criteriosamente selecionados para que a probabilidade de erros fosse minimizada. Na Figura 22 abaixo, são mostrados os materiais e equipamentos utilizados na instrumentação de cordoalhas de protensão.

Figura 22 – Materiais e equipamentos necessários para a instrumentação de cordoalhas



a) Extensômetros elétricos de resistência



b) Bases para solda



c) Fita adesiva transparente



d) Algodão em discos e cotonete



e) Querosene



f) Lixa para metais nº 120



g) Álcool isopropílico



h) Fita isolante comum



i) Fita isolante de autofusão



j) Cola tipo cianoacrilática



k) Cabo tipo manga 4×26 AWG blindado



l) Estanho em fio para solda



m) Ferro de solda  
Fonte: A autora (2014).



n) Luvas cirúrgicas



o) Pinças

### ***3.3.4. Preparo da superfície***

O preparo da superfície obedeceu as seguintes etapas:

1. Corte de uma parte da bainha plástica – Etapa necessária para que seja possível manusear os fios de aço;
2. Limpeza grossa com um pano – Deve-se retirar toda a graxa das cordoalhas no local onde será feita a colagem do strain gage. Então, primeiramente, retirou-se toda a graxa do local somente com um pano;
3. Limpeza com querosene – O querosene é capaz de dissolver a graxa existente nas cordoalhas e, por isso, continuando a limpeza grossa, utilizou-se cotonetes (tendo em vista alcançar locais menos acessíveis) com querosene para limpar mais ainda as cordoalhas visando a melhor eliminação dessa graxa das cordoalhas;
4. Limpeza com a lixa para metais – Apesar dos procedimentos 2 e 3, é necessário, por todos os motivos citados no item 2.7.3, garantir que 100% da graxa seja eliminada das cordoalhas. Com isso, utilizou-se uma lixa para metais, nº 80, e a cordoalha foi lixada no local de aplicação do strain gage, com a finalidade de eliminar qualquer gordura ainda presente na superfície da cordoalha. Pode-se perceber que no caso de cordoalhas engraxadas, diferentemente das barras de aço comuns, as lixas para metais ajudam no sentido de limpeza superficial, e não de uniformizar a peça, pois as cordoalhas não possuem ranhuras como as barras de aço comum;
5. Limpeza fina com o álcool isopropílico – Para finalizar a limpeza da superfície, fez-se uma limpeza fina com o auxílio de algodão em disco (pois o algodão em qualquer outra forma pode soltar fiapos que atrapalham o procedimento) e do álcool isopropílico (álcool para limpeza de equipamentos eletrônicos).

Na Figura 23 é possível verificar o procedimento de preparo da superfície.

Figura 23 – Procedimento de preparo da superfície



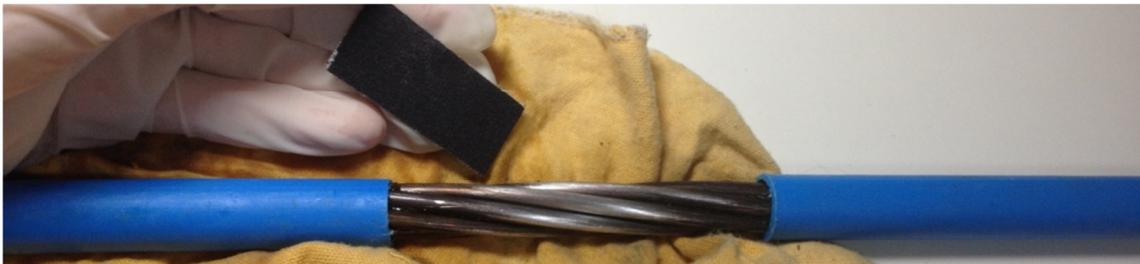
a) Corte da bainha plástica



b) Limpeza grossa com um pano comum



c) Limpeza com querosene



d) Limpeza com a lixa para metais



e) Limpeza fina com álcool isopropílico

Fonte: A autora (2014).

É importante destacar que todas as etapas foram realizadas em locais limpos e isolados, como laboratórios, diminuindo a probabilidade de contaminação do material.

### 3.3.5. Procedimento de colagem dos extensômetros

Com a superfície da cordoalha preparada para receber o extensômetro, a primeira providência foi colocar um pedaço de fita isolante, afastada alguns centímetros do local escolhido para a colagem. Esse procedimento ajuda a impedir que os fios do extensômetro toquem diretamente o aço das cordoalhas, o que poderia causar a queima dos aparelhos por curto circuito. A Figura 24 mostra a cordoalha de protensão com a fita isolante.

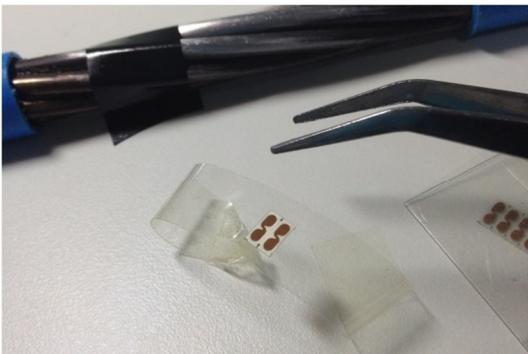
Figura 24 – Fita isolante para impedir contato do strain gage com o aço das cordoalhas



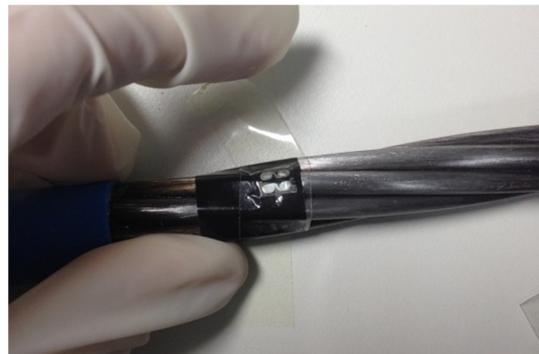
Fonte: A autora (2014).

Em seguida, realizou-se a colagem de uma base de solda, a qual foi obtida com os mesmos fornecedores dos strain gages. Seu manuseio foi feito com o auxílio de pinças e sua colagem, com a ajuda de fita adesiva, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Colagem das bases para solda



a) Preparação da base



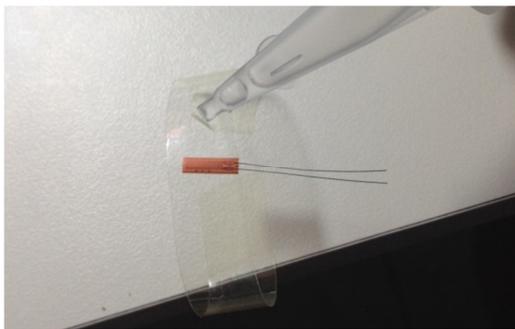
b) Colagem da base

Fonte: A autora (2014).

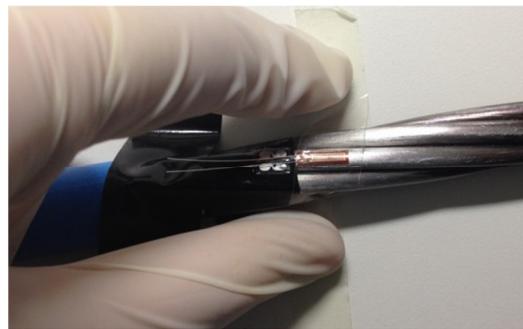
Com a proteção feita e a base colada, foi possível realizar a colagem do strain gage propriamente dita. Os passos seguidos são descritos abaixo:

1. Preparação do strain gage para receber a cola – Como o manuseio dos extensômetros nunca deve ser feito com a mão, utilizou-se luvas cirúrgicas limpas e pinças para transferi-lo do envelope de proteção para uma base feita de fita adesiva. Com o extensômetro na base, foi passada a cola, como mostra a Figura 26 (a);
2. Posicionamento e colagem do strain gage na cordoalha – Pode-se perceber que a fita adesiva transparente se torna de grande importância no auxílio ao correto posicionamento do strain gage na cordoalha, como mostra a Figura 26 (b). Pressionou-se o extensômetro com o dedo, por cima da fita adesiva, por aproximadamente um minuto e em seguida, com bastante cuidado, retirou-se a fita adesiva (ver Figura 26 (c)) e verificou-se se a colagem estava garantida;

Figura 26 – Procedimento de colagem dos extensômetro



a) Colocação da cola no extensômetro



b) Posicionamento do strain gage



c) Retirando a fita adesiva com cuidado

Fonte: A autora (2014).

### 3.3.6. Preparação da fiação para conexão com aparelho de leitura

Com relação à fiação, a primeira providência a ser tomada é a soldagem dos fios do extensômetro na base para solda e, com a soldagem feita, o corte dos excessos de fio, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – União do strain gage com a base para solda

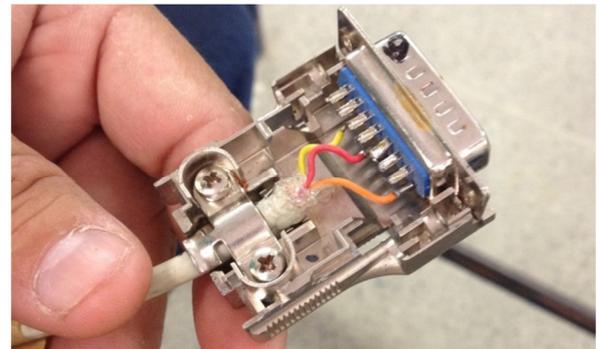


a) Soldagem dos fios do extensômetro na base para solda      b) Corte os excessos de fio

Fonte: A autora (2014).

Em seguida, foi verificada a fiação para o equipamento de coleta de dados utilizado do estudo em questão. O equipamento é da marca HBM e é constituído por duas unidades de leitura eletrônica, denominadas *Spider8*. O Spider é um aparelho que possibilita a conexão de strain gages em pontes de wheatstone e armazena os valores de tensão na ponte para cada instante de tempo. Nele, se faz necessária a utilização de conectores DB15M, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Conector DB15M



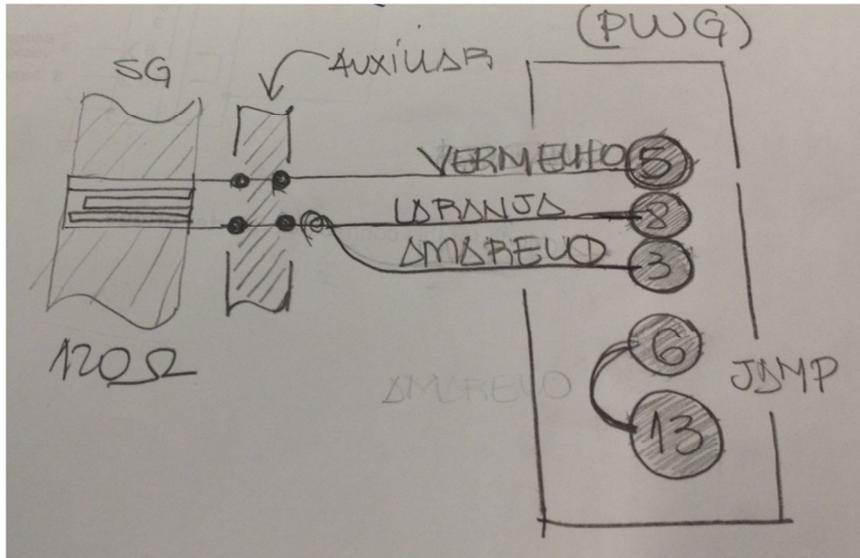
a) Conector DB15M montado

b) Conector DB15M por dentro

Fonte: A autora (2014).

Com isso, fez-se a ligação dos conectores DB15M com os cabos tipo manga, de acordo com o manual mostrado na Figura 29

Figura 29 – Manual de ligação dos cabos ao conector DB15M para o equipamento *Spider 8*



Fonte: A autora (2014).

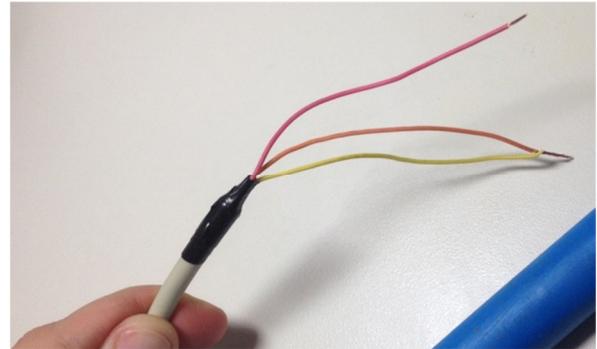
Logo após, preparou-se a outra ponta do cabo, como é descrito nas etapas abaixo e mostrado na Figura 30.

1. Retirada da blindagem – Retirou-se a blindagem de aproximadamente 10 cm para ter acesso aos cabos em seu interior;
2. Preparação dos cabos – Uniu-se os cabos amarelo e laranja e eliminou-se o cabo marrom. Colocou-se um pedaço de fita isolante na base onde a blindagem foi cortada para proteção;
3. Realização do procedimento de estanhagem – Com o fio de estanho para solda estanhou-se as duas pontas restantes (a do fio vermelho e a da junção dos fios laranja e amarelo);
4. Soldagem dos cabos à base – Assim, com os cabos preparados e estanhados, realizou-se a soldagem dos mesmos à base para soldagem, preparada anteriormente.

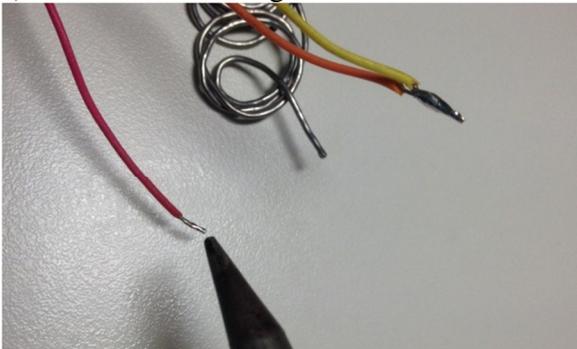
Figura 30 – Preparação da fiação



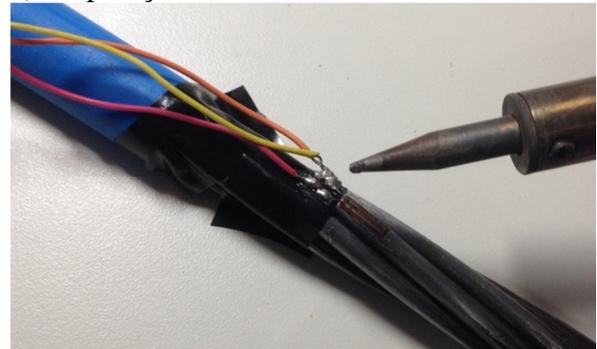
a) Retirada da blindagem



b) Preparação dos cabos



c) Procedimento de estanhagem



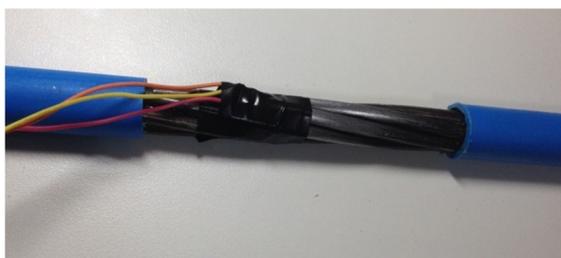
d) Soldagem dos cabos à base

Fonte: A autora (2014).

### 3.3.7. Proteção dos extensômetros nas cordoalhas

Esta etapa consiste em criar uma camada que impeça o sistema preparado anteriormente de entrar em contato com agentes que possam afetar seu desempenho. Assim, fez-se necessário o isolamento e a impermeabilização do sistema. Primeiramente colocou-se uma camada de fita isolante ao redor do extensômetro e da base e, em seguida, colocou-se uma camada de fita de autofusão para que o sistema não venha a entrar em curto circuito ou ainda se danificado pela graxa que ainda existe no restante da cordoalha. A Figura 31 mostra o procedimento de proteção do sistema.

Figura 31 – Procedimento de proteção dos extensômetros nas cordoalhas



a) Proteção isolante

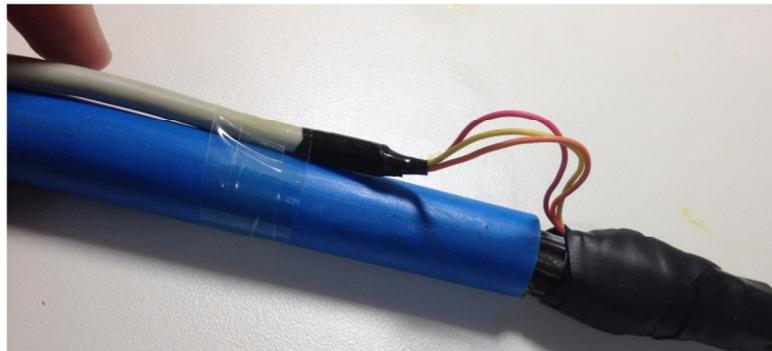


b) Proteção com fita de autofusão

Fonte: A autora (2014).

Com o sistema protegido, o cabo ainda blindado foi preso por meio de abraçadeiras plásticas, com certa folga, ao cabo de protensão, de modo a impedir seu deslocamento com o manuseio e até mesmo sua desarticulação da base de solda. A Figura 32 mostra o cabo preso pela abraçadeira plástica.

Figura 32 – Folga no cabo para evitar descolamento da solda



Fonte: A autora (2014).

### ***3.3.8. Realização da protensão para obtenção dos resultados***

A última etapa consiste na protensão do cabo instrumentado para a obtenção de dados e para verificar se a instrumentação foi feita de forma satisfatória. Para isso, utilizou-se uma pista de protensão, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Pista de protensão para ensaio com cordoalhas de protensão



Fonte: A autora (2014).

Os cabos de protensão foram dispostos na pista e conectados ao equipamento de obtenção de dados. Em uma das pontas o cabo ficou preso por uma cunha e na outra foi protendido com o macaco hidráulico, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Cabos dispostos na pista de protensão



a) Ponta do cabo presa pela cunha



b) Ponta do cabo protendida

Fonte: A autora (2014).

Com os cabos instrumentados protendidos, os dados foram coletados em computador. O capítulo seguinte irá apresentar estes dados.

### 3.4. Contribuição das etapas metodológicas para programa experimental

Como foi dito anteriormente, é possível realizar um estudo numérico do acréscimo de tensão em cordoalhas de protensão, acréscimo esse que se dá pela flexão da peça protendida, por meio de uma avaliação numérica ou por ensaios em laboratório. Na falta destes, a NBR 6118 (2014) fornece uma fórmula para se chegar ao valor deste acréscimo. Assim, as etapas metodológicas podem ser comparadas e seus valores conferidos com o que sugere a norma.

É possível afirmar, então, que um estudo teórico complementa o estudo laboratorial, e vice versa, sendo esta a contribuição que todas as etapas metodológicas, teórica e experimental, do presente trabalho, têm a fornecer.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Considerações iniciais

Esta seção expõe os resultados dos estudos realizados no presente trabalho. São apresentados dois tópicos, além das considerações iniciais, no qual o primeiro trata dos resultados do estudo teórico, e o segundo, dos resultados do procedimento experimental.

### 4.2. Resultados do estudo teórico

#### 4.2.1. Resultado da caracterização geométrica e dos materiais do modelo em estudo

A partir da definição do modelo de viga a ser estudado, com suas características iniciais escolhidas e apresentadas no capítulo anterior, fez-se necessário o cálculo de alguns parâmetros, fundamentais para o estudo.

##### 4.2.1.1. Parâmetros do material da viga

Os parâmetros do material da viga, o concreto, a serem definidos são o Módulo de Elasticidade ( $E_{cs}$ ), o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o Coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ).

O valor de  $E_{cs}$  foi calculado a partir da na Equação (13):

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

Com o valor de  $f_{ck}$  previamente definido e igual a 30 MPa.

Para o valor de  $\nu$ , utilizou-se o valor estabelecido na NBR 6118 (2014), que admite para o concreto um coeficiente de Poisson, relativo às deformações elásticas, igual a 0,2.

Por fim, o valor de  $\alpha$  ficou estabelecido como 0 (zero), pois, para efeito de cálculo, não se desejava que a variação de temperatura (utilizada para representar o efeito da protensão) tivesse influência direta na viga.

Em resumo, os parâmetros do material da viga estão descritos na Tabela 4

Tabela 4 – Características do material da viga

PARÂMETRO	RESULTADO
Módulo de Elasticidade ( $E_{cs}$ )	26.000 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,2
Coefficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ )	0

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.1.2. Parâmetros do material das cordoalhas

Para as cordoalhas, os parâmetros a serem definidos são Módulo de Elasticidade ( $E_p$ ), Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o Coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ).

O valor de  $E_p$  ficou como é estabelecido na NBR 6118 (2014), isto é, igual a 200.000 MPa. Já para o valor de  $\nu$ , utilizou-se o valor usual para o material aço, onde ele é igual a 0,3. Por fim, o valor de  $\alpha$  ficou estabelecido em  $10^{-5}/^{\circ}C$ , que é o valor mínimo do coeficiente para o material aço.

Em resumo, os parâmetros do material das cordoalhas estão descritos na Tabela 5

Tabela 5 – Características do material das cordoalhas

PARÂMETRO	RESULTADO
Módulo de Elasticidade ( $E_p$ )	200.000 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3
Coefficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ )	$10^{-5}/^{\circ}C$

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.1.3. Parâmetros do material das barras rígidas

Para as barras rígidas, os mesmos parâmetros do material da viga foram utilizados. Os parâmetros escolhidos são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do material das barras rígidas

PARÂMETRO	RESULTADO
Módulo de Elasticidade ( $E_{cs}$ )	26.000 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,2
Coefficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ )	0

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.1.4. Propriedades da seção da viga

Definiu-se a seção transversal da viga no programa FTOOL como uma seção genérica para que fosse possível modificar os valores do momento de inércia, diminuindo-o ao utilizar cargas maiores do que a que leva ao momento de fissuração. Para as propriedades da seção da viga, os parâmetros necessários foram: área (A), área efetiva para cisalhamento (Ac), momento de inércia da seção transversal (I), altura da seção (h), posição do centro de gravidade ( $\bar{y}$ ).

Utilizou-se o mesmo valor para A e Ac, igual ao valor a área da seção transversal da viga. Para o valor de I foi utilizado o valor da Equação (14):

$$bw \times h^3/12 \quad (14)$$

Por fim, a altura da seção (h) foi previamente definida e o valor de  $\bar{y}$  ficou como metade da altura h.

Assim, os parâmetros da seção da viga utilizados como dados de entrada do programa estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros da seção transversal da viga

PARÂMETRO	RESULTADO
Área (A)	57000 mm <sup>2</sup>
Área efetiva para cisalhamento (Ac)	57000 mm <sup>2</sup>
Momento de inércia (I)	4,275 × 10 <sup>8</sup> mm <sup>4</sup>
Altura da seção (h)	300 mm
Posição do centro de gravidade ( $\bar{y}$ )	150 mm

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.1.5. Propriedades da seção das cordoalhas

Definiu-se a seção transversal das cordoalhas no programa FTOOL também como uma seção genérica para que fosse possível definir um valor de momento de inércia bem baixo, o qual representasse um material flexível, como são as cordoalhas de protensão. Para as propriedades da seção das cordoalhas, os parâmetros necessários foram: área (A), área efetiva para cisalhamento (Ac), momento de inércia da seção transversal (I), altura da seção (h), posição do centro de gravidade ( $\bar{y}$ ).

Para o valor de A e Ac utilizou-se o mesmo valor, a área equivalente às duas cordoalhas, escolhidas para armadura ativa da viga. Calculou-se pela Equação (15):

$$2 \times \pi \times (r)^2 \quad (15)$$

Sendo r o valor do raio da seção da cordoalha, igual a 6,35 mm.

Para o valor de I decidiu-se utilizar um valor bem pequeno, de forma que representasse bem a flexibilidade do cabo de protensão. A altura da seção (h) foi definida a partir da área de duas cordoalhas, isto é, utilizou-se uma altura equivalente. Por fim, o valor de  $\bar{y}$  ficou como metade da altura equivalente (h).

Os parâmetros da seção dos cabos utilizados como dados de entrada do programa estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros da seção transversal das cordoalhas de protensão

PARÂMETRO	RESULTADO
Área (A)	200 mm <sup>2</sup>
Área efetiva para cisalhamento (Ac)	200 mm <sup>2</sup>
Momento de inércia (I)	10 <sup>-22</sup> mm <sup>4</sup>
Altura da seção (h)	15,958 mm
Posição do centro de gravidade ( $\bar{y}$ )	7,979 mm

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.1.6. Propriedades da seção das barras rígidas

Definiu-se a seção transversal das barras rígidas como retangulares e de grandes dimensões, para que a rigidez dessas barras ficasse garantida. Para as propriedades da seção das barras rígidas, os parâmetros necessários foram somente base (b) e altura (h).

Os parâmetros da seção das barras rígidas, utilizados como dados de entrada do programa, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros da seção transversal das barras rígidas

PARÂMETRO	RESULTADO
Base (b)	10.000 mm <sup>2</sup>
Altura (h)	10.000 mm <sup>2</sup>

Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.2. Resultado do cálculo da representação da ação da protensão

Sabendo que o modelo escolhido para o estudo é composto por duas cordoalhas de protensão do tipo CP 190 RB 12,7 e que, por isso, a carga aplicada de protensão é igual a 280 kN (cada cabo recebe uma força de protensão igual a 140 kN), calculou-se a tensão de protensão, como mostrado na Equação (16).

$$\sigma_p = \frac{P}{A_{ps}} = \frac{280}{0,0002} = 1.400.000 \text{ kPa} = 1400 \text{ MPa} \quad (16)$$

E então, pela lei de Hooke, calculou-se o deslocamento que as cordoalhas apresentam com a protensão, como apresentado na Equação (17).

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} = \frac{1400}{200.000} = 0,007 = 7 \text{ mm/m} \quad (17)$$

Assim, foi possível calcular o valor da variação de temperatura capaz de representar o efeito dessa protensão por meio da fórmula da dilatação térmica, como já comentado. O valor dessa variação de temperatura é apresentado na Equação (18).

$$0,007 = 10^{-5} \times \Delta T \rightarrow \Delta T = 700^\circ\text{C} \quad (18)$$

Como se trata de uma compressão, então se assume o valor negativo, isto é  $\Delta T = -700^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.3. Resultado do cálculo da carga que levará a viga à ruína

Primeiramente, determinou-se o valor da armadura equivalente considerando as armaduras ativas como armaduras resistentes da seção, a partir da Equação (19).

$$A_s = 4 \times 0,5 + 2 \times \frac{13,00}{4,35} = 7,98 \text{ cm}^2 \quad (19)$$

Por meio de programas computacionais, determinou-se o valor do momento resistente da viga utilizando esse valor de armadura equivalente, obtendo-se o valor da Equação (20).

$$M_d = 64,18 \text{ kN} \times \text{m} \quad (20)$$

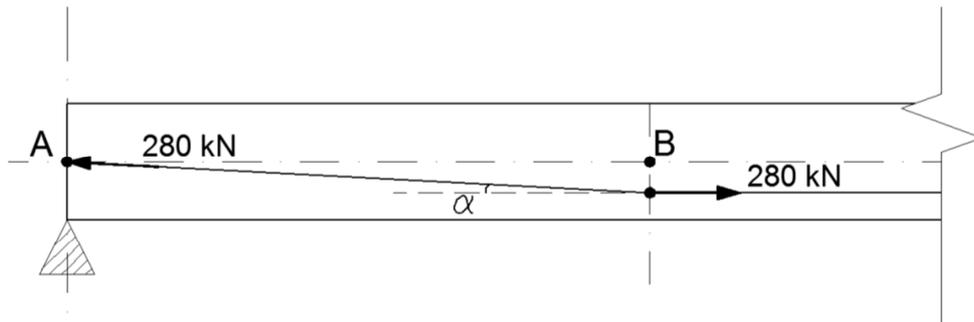
Com isso, conhecendo o momento máximo esperado para o modelo de viga em estudo, a partir da Equação (12) apresentada no Capítulo anterior, determinou-se o valor da carga P que leva a viga à ruína, valor apresentado na Equação (21).

$$P = 85,58 \text{ kN} \quad (21)$$

#### 4.2.4. Resultado do cálculo da ação da protensão pelo método da carga equivalente

A partir do traçado do cabo (exemplificado na Figura 20) e utilizando a simetria da viga, calculou-se a carga equivalente de protensão nos pontos A e B. Esses pontos são mostrados no detalhe do cabo de protensão, apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Detalhe do cabo de protensão para cálculo da carga equivalente



Fonte: A autora (2014).

Primeiramente descobriu-se o valor do ângulo  $\alpha$ , calculado pela sua tangente, como é mostrado na Equação (22).

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0,15-0,07}{1,50} \rightarrow \alpha = 3,053^\circ \quad (22)$$

Com o valor de  $\alpha$  conhecido, foi possível determinar as componentes da força aplicada à cordoalha, como mostram as Equações (23), (24) e (25).

$$Px = 280(1 - \cos \alpha) \rightarrow Px = 0,397 \text{ kN} \quad (23)$$

$$P_y = 280(\sin \alpha) \rightarrow P_y = 14,91 \text{ kN} \quad (24)$$

$$M = 0,397(0,15 - 0,07) \rightarrow M = 0,032 \text{ kN.m} \quad (25)$$

Onde

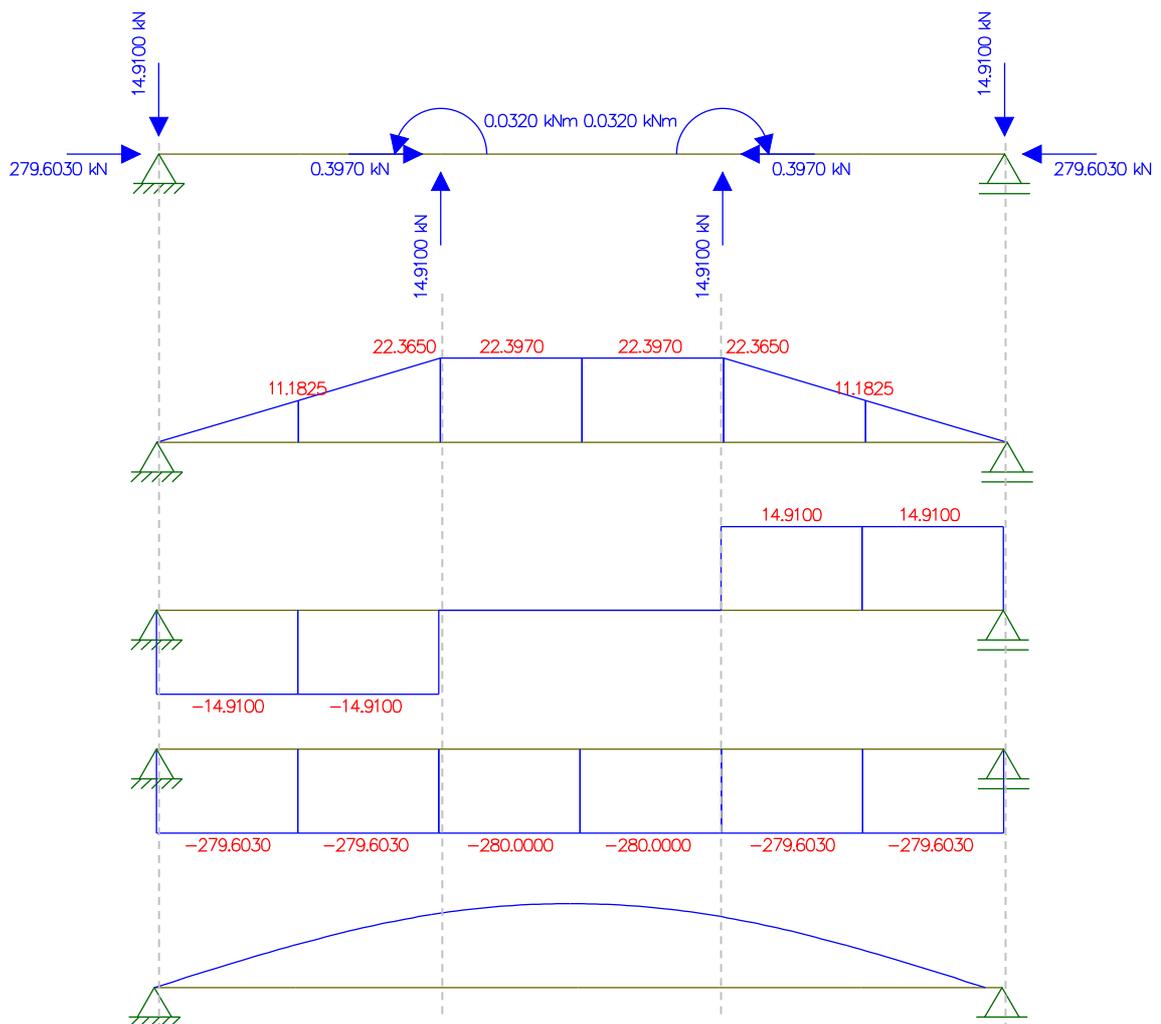
$P_x$  é a componente horizontal da força;

$P_y$  é a componente vertical da força;

$M$  é o momento causado pela força;

Com os valores das componentes da força definidos, foi possível determinar, por meio do programa FTOOL, o modelo da viga com a carga equivalente, assim como seus respectivos diagramas de esforços, como é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Diagrama de esforços da carga equivalente de protensão

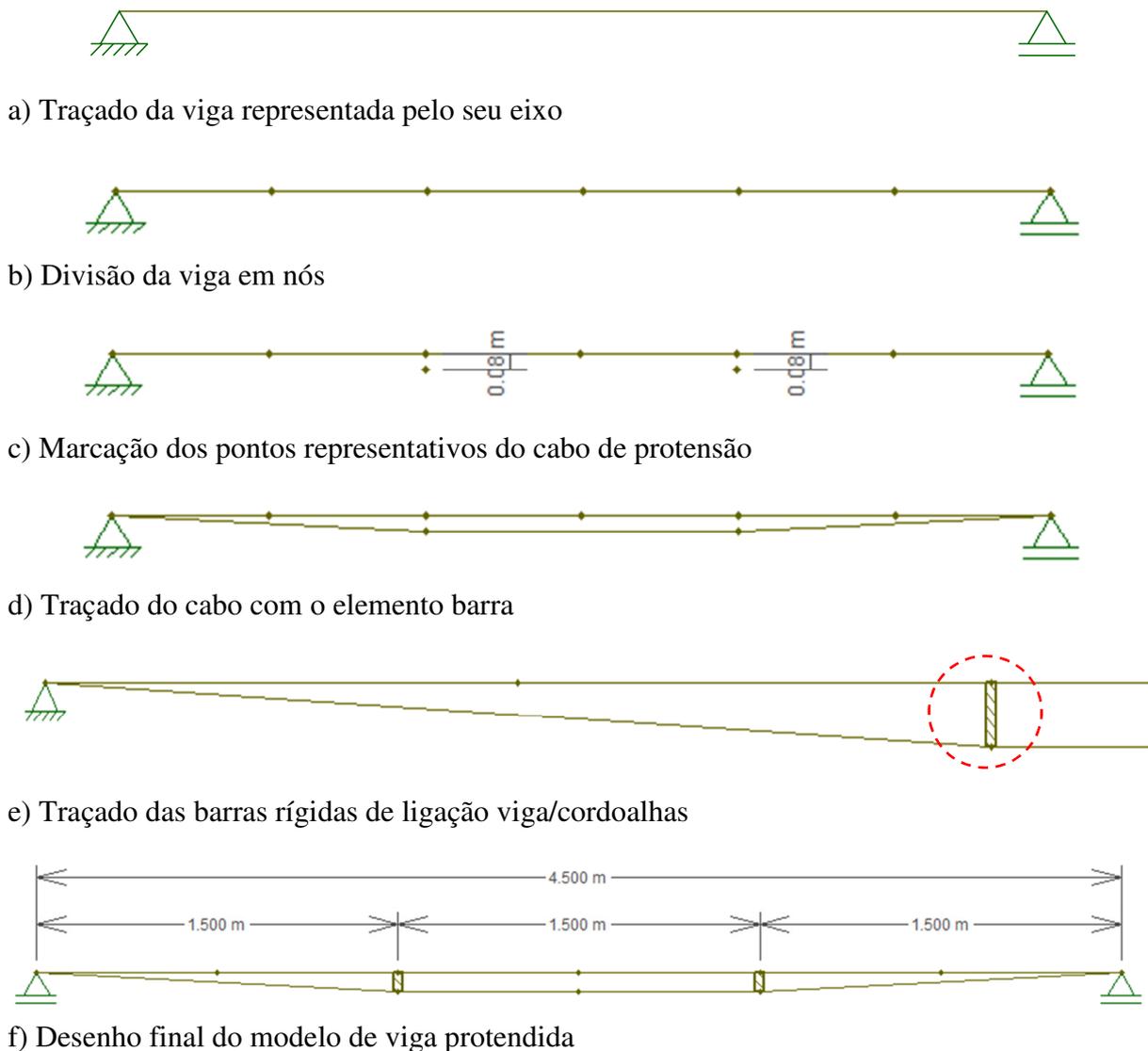


Fonte: A autora (2014).

#### 4.2.5. Resultado da elaboração do modelo computacional da viga protendida

A seguir serão apresentados os resultados da elaboração de um modelo computacional que representasse a viga protendida. Para o desenho do modelo, como é mostrado na Figura 37, seguiu-se as etapas descritas no Capítulo de metodologia.

Figura 37 – Etapas de elaboração do modelo de viga protendida

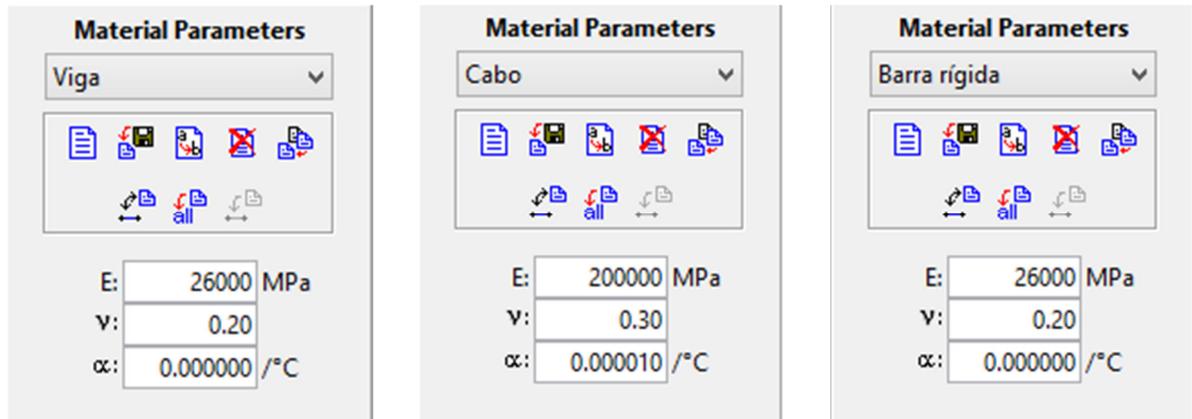


Fonte: A autora (2014).

Após a elaboração do desenho, foi necessário aplicar as características geométricas e do material de cada elemento presente no modelo, valores cujo procedimento de cálculo foi descrito previamente no item 4.2.1. As características geométricas e dos

materiais como dados de entrada do programa FTOOL são apresentados na Figura 38 e na Figura 39 a seguir.

Figura 38 – Dados de entrada do FTOOL: parâmetros dos materiais



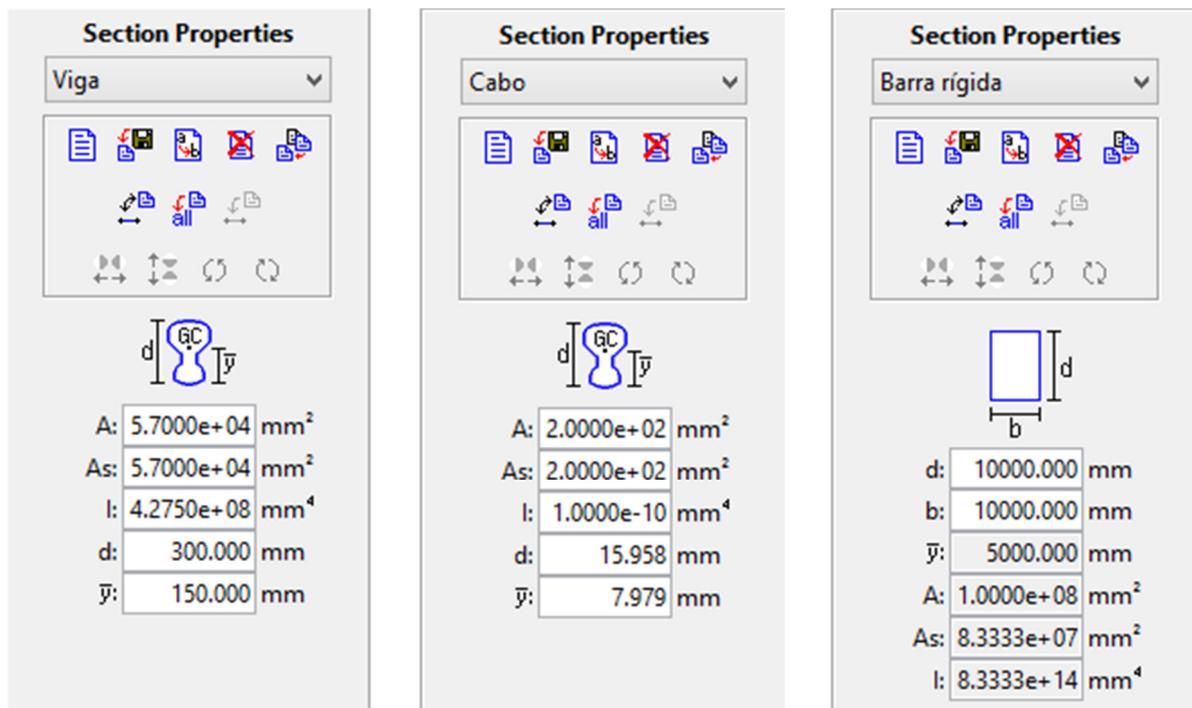
a) Parâmetros do material da viga

b) Parâmetros do material do cabo

c) Parâmetros do material das barras rígidas

Fonte: A autora (2014).

Figura 39 – Dados de entrada do FTOOL: propriedades das seções



a) Propriedades da seção transversal da viga

b) Propriedades da seção transversal do cabo

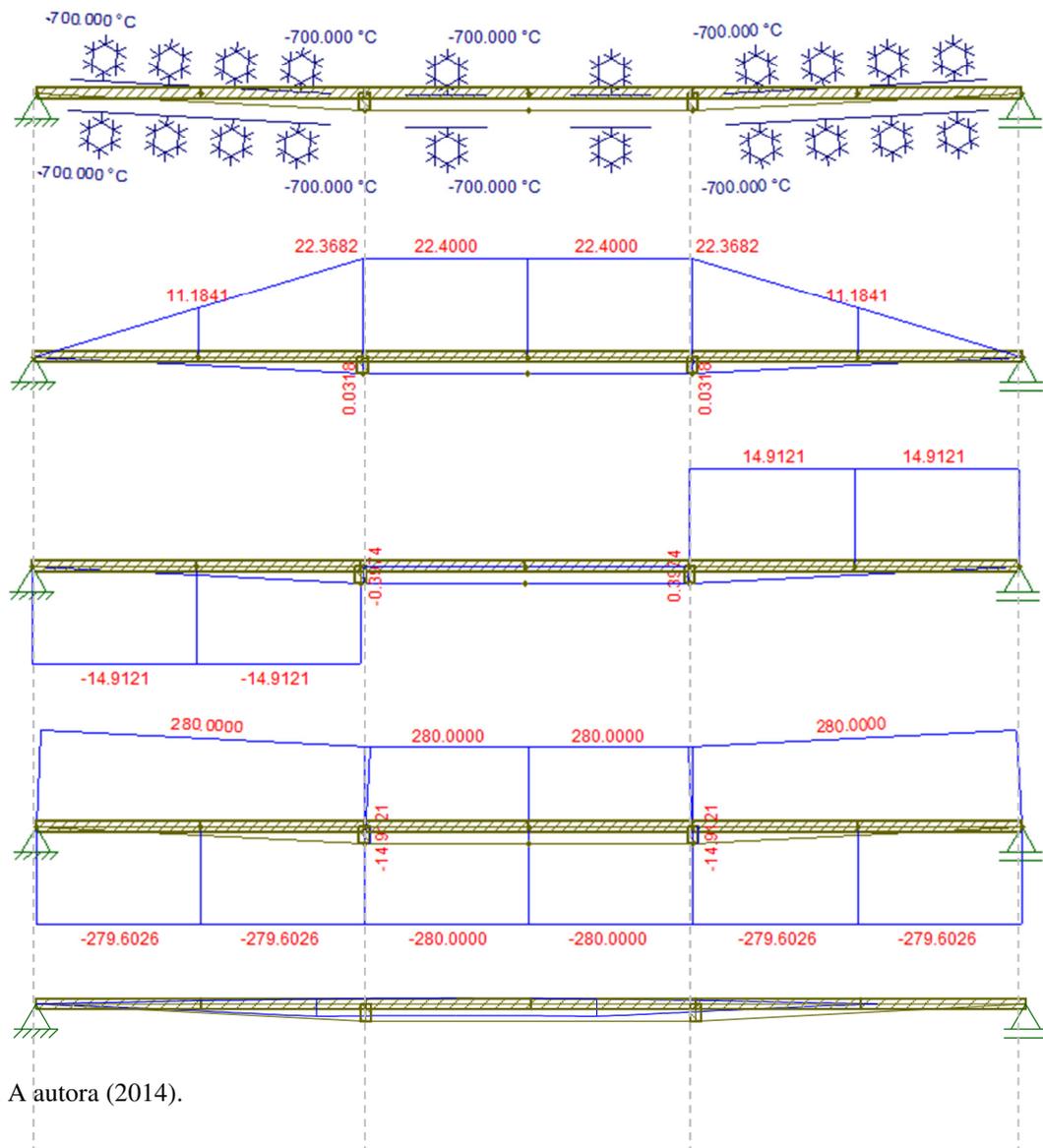
c) Propriedades da seção transversal das barras rígidas

Fonte: A autora (2014).

Com isso, aplicou-se nas barras que representam o cabo de protensão a variação de temperatura, também previamente calculada, representando a força de protensão. É

importante ressaltar que primeiramente, antes de buscar os dados de tensão nas cordoalhas, deve-se fazer a validação do modelo elaborado. Para isso, admitiu-se que a viga seria rígida, isto é, que seus deslocamentos não iriam influenciar nos resultados dos esforços gerados pela protensão. Os diagramas de esforços do modelo são apresentados na Figura 40.

Figura 40 – Diagrama de esforços do modelo de viga protendida com aplicação da variação de temperatura e admitindo viga rígida



Fonte: A autora (2014).

A partir desses resultados, é possível afirmar que uma variação de temperatura equivalente à carga de protensão representa bem o efeito dessa carga, pois os resultados dos diagramas desse modelo foram iguais aos diagramas da viga com as cargas equivalentes de protensão. Porém, isso só ocorreu quando a rigidez da viga foi garantida, impedindo que a

viga se deformasse e influenciasse nos esforços da protensão. Assim, pode-se dizer que o modelo elaborado é válido.

#### 4.2.6. Resultado da aplicação dos incrementos de carga

Com o modelo validado, retirou-se a opção de viga rígida, pois a mesma não representa a realidade, e ainda aplicou-se um carregamento uniforme representando o peso próprio da viga. O valor do peso próprio da viga foi calculado de acordo com a Equação (27).

$$A_{viga} \times \gamma_{concreto} \quad (26)$$

Onde:

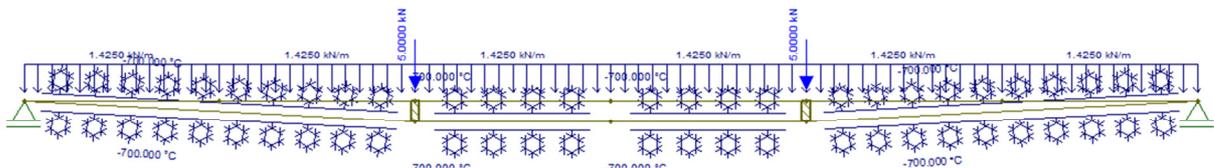
$$A_{viga} = \text{área da seção transversal da viga} = 0,057 \text{ m}^2$$

$$\gamma_{concreto} = \text{peso específico do concreto} = 25 \text{ kN/m}^3$$

Assim, foi aplicado o carregamento uniforme com o valor de 1,425 kN/m.

Iniciou-se então o processo de obtenção de dados de esforço normal nas cordoalhas com a aplicação da carga nos terços médios da viga. A Figura 41 exemplifica um dos casos analisados no modelo.

Figura 41 – Exemplo de caso analisado no modelo de viga protendida



a) Viga protendida com carga de 5 kN nos terços médios



b) Diagrama de esforço normal do caso com carga de 5 kN nos terços médios

Fonte: A autora (2014).

Considerando que para se determinar o valor exato do momento de inércia da viga no instante da ruína são necessários cálculos mais complexos, decidiu-se, baseado na literatura, utilizar um valor médio entre 50% e 25% do valor da inércia total após a fissuração para calcular o acréscimo de tensão nas cordoalhas de protensão. Assim, analisou-se os casos para 4 diferentes valores de momentos de inércia da viga:

1.  $I = 100\% = 4,275 \times 10^8 \text{ mm}^4$ , que é o momento de inércia da viga sem fissura;
2.  $I = 50\% = 2,1375 \times 10^8 \text{ mm}^4$ , que é 50% do momento de inércia total da viga;
3.  $I = 25\% = 1,06875 \times 10^8 \text{ mm}^4$ , que é 25% do momento de inércia total da viga;
4.  $I_{\text{médio}} = \text{média de } 50\% \text{ e } 25\%$ , que é a média entre as inércias iguais a 50% e 25% do momento de inércia total da viga.

Com as cargas aplicadas nos terços médios da viga, iniciando em 0 kN e, com incrementos de carga de 5 kN, finalizando em 45 kN, observou-se os esforços normais nos cabos de protensão. A partir desses esforços, a tensão nas cordoalhas foi calculada e, conseqüentemente, o acréscimo de tensão nas mesmas.

A Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 mostram os resultados para cada valor de momento de inércia em estudo. Os resultados para a carga de ruína, igual a 42,79 kN em cada terço médio da viga, foi destacado em cada Tabela.

Tabela 10 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 100% do momento de inércia total

<b>CARGA APLICADA (kN)</b>	<b>FORÇA AXIAL (kN)</b>	<b>TENSÃO NAS CORDOALHAS – s (MPa)</b>	<b>ACRÉSCIMO DE TENSÃO – Ds (MPa)</b>
0	267.6148	1338	-62
5	269.6718	1348	-52
10	271.7288	1359	-41
15	273.7858	1369	-31
20	275.8428	1379	-21
25	277.8998	1389	-11
30	279.9568	1400	0
35	282.0138	1410	10
40	284.0708	1420	20
42,79	285.2186	1426	26
45	286.1278	1431	31

Fonte: A autora (2014).

Tabela 11 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 50% do momento de inércia total

<b>CARGA APLICADA (kN)</b>	<b>FORÇA AXIAL (kN)</b>	<b>TENSÃO NAS CORDOALHAS – s (MPa)</b>	<b>ACRÉSCIMO DE TENSÃO – Ds (MPa)</b>
0	262.7980	1314	-86
5	266.8253	1334	-66
10	270.8526	1354	-46
15	274.8799	1374	-26
20	278.9072	1395	-5
25	282.9345	1415	15
30	286.9618	1435	35
35	290.9891	1455	55
40	295.0164	1475	75
42,79	297.2637	1486	86
45	299.0437	1495	95

Fonte: A autora (2014).

Tabela 12 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com 25% do momento de inércia total

<b>CARGA APLICADA (kN)</b>	<b>FORÇA AXIAL (kN)</b>	<b>TENSÃO NAS CORDOALHAS – s (MPa)</b>	<b>ACRÉSCIMO DE TENSÃO – Ds (MPa)</b>
0	253.7487	1269	-131
5	261.4776	1307	-93
10	269.2065	1346	-54
15	276.9353	1385	-15
20	284.6642	1423	23
25	292.3930	1462	62
30	300.1219	1501	101
35	307.8507	1539	139
40	315.5796	1578	178
42,79	319.8923	1599	199
45	323.3085	1617	217

Fonte: A autora (2014).

Tabela 13 – Resultados de acréscimo de tensão para modelo de viga protendida com a média entre 50% e 25% do momento de inércia total

CARGA APLICADA (kN)	FORÇA AXIAL (kN)	TENSÃO NAS CORDOALHAS – s (MPa)	ACRÉSCIMO DE TENSÃO – Ds (MPa)
0	258.2734	1291	-109
5	264.1515	1321	-79
10	270.0296	1350	-50
15	275.9076	1380	-20
20	281.7857	1409	9
25	287.6638	1438	38
30	293.5419	1468	68
35	299.4199	1497	97
40	305.2980	1526	126
42,79	308.5780	1543	143
45	311.1761	1556	156

Fonte: A autora (2014).

Como já foi dito, essa variação do momento de inércia representa a presença da fissuração na peça protendida e a sua consideração nos cálculos visa tornar o modelo mais próximo da realidade.

#### 4.2.7. Resultado do cálculo do momento de fissuração

Para determinar o momento de fissuração utilizou-se a Equação (27).

$$\sigma = \frac{P}{Ac} - \frac{Mr - Mp}{w} = \alpha \times f_{ct} \quad (27)$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão na viga, igual a  $\alpha \times f_{ct}$ ;

$\alpha$  é um fator de ponderação, igual a 1,5 para seções retangulares;

$f_{ct}$  é igual a  $0,7 \times 0,3 \times f_{ck}^{2/3} = 2,0275 \text{ MPa}$ ;

P é a força de protensão, igual a 280 kN;

Ac é a área da seção transversal da viga, igual a 0,057 m<sup>2</sup>;

Mp é o momento da força de protensão, igual a  $280 \times 0,08 = 22,4 \text{ kN.m}$ ;

W é o módulo de resistência, igual a  $I_c/y_t = 0,00285 \text{ m}^3$ ;

Mr é o momento de fissuração que se deseja determinar.

Assim, foi encontrado um valor de momento de fissuração de 45,06 kN.m, o qual dividido pelo braço de alavanca, igual a 1,50 m, fornece o valor da carga que leva à abertura da primeira fissura, como é mostrado na Equação (28).

$$P = \frac{45,06}{1,50} \cong 30 \text{ kN} \quad (28)$$

Então, quando a carga aplicada nos terços médios da viga for igual a 30 kN deve-se utilizar os dados obtidos com o valor do momento de inércia reduzido.

Visando analisar o efeito da diminuição da rigidez da viga, é possível comparar os valores do momento fletor e as flechas na viga para cada carga aplicada e para cada momento de inércia em estudo, como é mostrado na Tabela 14.

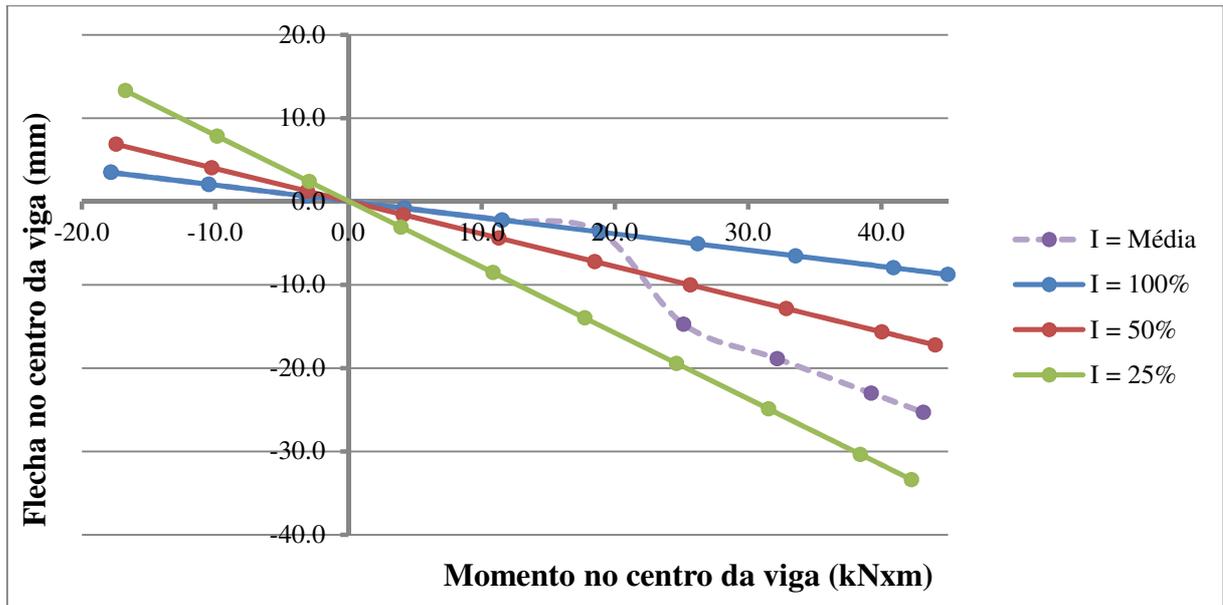
Tabela 14 – Resultados do momento fletor e da flecha na viga

CARGA	MOMENTO (kN.m)				FLECHA NA VIGA (d) (mm)			
	I=100%	I=50%	I=25%	MÉDIA 50% e 25%	I=100%	I=50%	I=25%	MÉDIA 50% e 25%
0	-17.8	-17.4	-16.7	-	3.5	6.9	13.3	-
5	-10.5	-10.2	-9.8	-	2.1	4.0	7.8	-
10	-3.1	-3.1	-2.9	-	0.6	1.2	2.4	-
15	4.2	4.1	4.0	-	-0.8	-1.6	-3.1	-
20	11.5	11.3	10.9	-	-2.2	-4.4	-8.5	-
25	18.9	18.5	17.7	-	-3.7	-7.2	-14.0	-
30	26.2	25.7	24.6	25.2	-5.1	-10.0	-19.4	-14.7
35	33.6	32.9	31.5	32.2	-6.5	-12.9	-24.9	-18.9
40	40.9	40.0	38.4	39.2	-8.0	-15.7	-30.4	-23.0
42.79	45.0	44.1	42.3	43.2	-8.8	-17.2	-33.4	-25.3
45	48.2	47.2	45.3	46.3	-9.4	-18.5	-35.8	-27.1

Fonte: A autora (2014).

As informações da Tabela 14 estão dispostas em forma de gráfico, para uma melhor visualização dos resultados, na Figura 42.

Figura 42 – Gráfico momento fletor no centro da viga × flecha no centro da viga



Fonte: A autora (2014).

É possível perceber que a declividade das retas aumenta quanto menor for o valor do momento de inércia, ou seja, a flecha no centro da viga aumenta quão menor for a rigidez da peça.

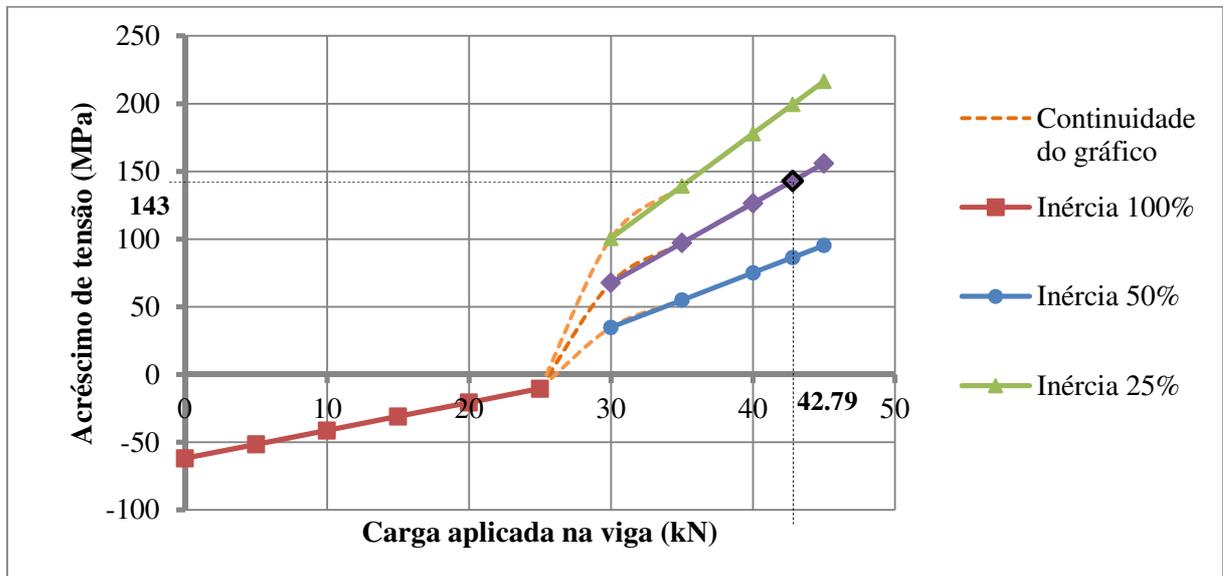
A linha tracejada representa o comportamento mais próximo da realidade. É considerado primeiramente o valor do momento de inércia total, até o momento da abertura da primeira fissura. Então, o valor da inércia é reduzido para o valor médio entre 50% e 25% do valor total, mostrando que após a fissuração da peça a rigidez da viga diminui consideravelmente.

#### 4.2.8. Resultados do acréscimo de tensão

##### 4.2.8.1. Acréscimo de tensão de acordo com o modelo computacional elaborado

A Figura 43 mostra o gráfico do valor do acréscimo de tensão variando com a carga aplicada à viga. Neste gráfico é considerado o acréscimo de tensão para a viga com inércia de 100% até a carga que leva ao momento de fissuração e, em seguida, são apresentados os valores de acréscimo de tensão para a viga com inércia de 50%, 25% e a média desses dois valores, representando o aparecimento de fissuras.

Figura 43 – Gráfico carga aplicada na viga × acréscimo de tensão considerando o momento de fissuração



Fonte: A autora (2014).

É possível perceber que o valor do acréscimo de tensão no momento em que a viga atinge o ELU, isto é, quando é aplicado à viga uma carga total de 85,58 kN (carga nos terços médios igual a 42,79 kN), é de aproximadamente 143 MPa, considerando uma inércia média entre 50% e 25% da inércia total.

Esse valor pode ser comparado ao que já foi sugerido anteriormente, por normas e por outros autores, como os que são expostos no Capítulo 2 (Revisão bibliográfica) do presente trabalho.

#### 4.2.8.2. Acréscimo de tensão de acordo com Tao e Du (1985)

O acréscimo de tensão para o modelo de viga protendida em estudo foi calculado pela fórmula sugerida por Tao e Du (1985), apresentada na Equação (4) do presente trabalho. A tal fórmula possui uma restrição de utilização para casos onde a variável  $\rho_P$  seja menor do que 0,3%, o que não é o caso do modelo em estudo, como mostra a Equação (29).

$$\rho_P = \frac{b_c \times d_p}{A_c} = \frac{19 \times 23}{2} = 0,00458 = 0,458\% \quad (29)$$

A Equação (30) mostra o valor do acréscimo de tensão utilizando a Equação de Tao e Du (1985).

$$\Delta\sigma_p = 140 + 78,6 - 192 \times 0,458 \cong 131 \text{ MPa} \quad (30)$$

#### 4.2.8.3. Acréscimo de tensão de acordo com ACI 318 (1999/2008)

A norma americana ACI 318 (1999/2008) sugere uma fórmula para o cálculo do acréscimo de tensão, apresentada na Equação (5) do presente trabalho. Aplicando à citada fórmula os valores do modelo em estudo, foram obtidos os resultados apresentados na Equação (31).

$$\Delta\sigma_p = 6,89 + \frac{3}{100} \times \frac{19 \times 23}{2} = 134 \text{ MPa} \quad (31)$$

#### 4.2.8.4. Acréscimo de tensão de acordo com Naaman et al. (2002)

Como já foi dito, Naaman et al. (2002), propuseram uma equação, como recomendação para substituição das utilizadas no código ACI 318-99 (1999) vigente na época, a qual é apresentada na Equação (8) do presente trabalho. Aplicando à citada equação os valores do modelo em estudo, foram obtidos os resultados apresentados na Equação (32).

$$\Delta\sigma_p = \frac{200.000}{1866} \times \frac{4,50}{4,504} \cong 107 \text{ MPa} \quad (32)$$

#### 4.2.8.5. Acréscimo de tensão de acordo com NBR 6118 (2014)

Sendo a relação vão/altura útil do modelo de viga do estudo menor que 35, utilizando a fórmula sugerida na norma NBR 6118 (2014), apresentada na Equação (1) do presente trabalho, calculou-se o valor do acréscimo de tensão e obteve-se o seguinte resultado mostrado na Equação (33)

$$\Delta\sigma_p = 70 + \frac{30}{100} \times \frac{19 \times 23}{2} = 136 \text{ MPa} \quad (33)$$

#### 4.2.8.6. Discussão dos resultados do acréscimo de tensão

A Tabela 15 mostra os valores de acréscimo de tensão obtidos pelo modelo computacional em estudo e pelos citados autores.

Tabela 15 – Resultados de acréscimo de tensão em cordoalhas de protensão

<b>FONTE</b>	Modelo computacional elaborado no presente trabalho	Tao e Du (1985)	ACI 318 (1999/2008)	Naaman et al. (2002)	NBR 6118 (2014)
<b>RESULTADO (MPa)</b>	143	131	134	107	136

Fonte: A autora (2014).

É possível perceber que somente o valor obtido pela equação sugerida por Naaman et al. (2002) divergiu dos outros resultados. Isso comprova o que afirma Voelcker (2004) quando diz que tal equação é tida por outros autores como uma aproximação conservadora.

O valor de acréscimo de tensão obtido pelo modelo computacional é um pouco superior aos outros resultados, aproximadamente 5% maior do que o valor encontrado pela equação da NBR 6118 (2014). Sabendo que no modelo computacional utilizou-se valores médios, e não valores exatos, de momento de inércia para calcular o acréscimo de tensão, imagina-se que seja essa imprecisão uma das causas da pequena diferença nos resultados.

### 4.3. Resultados do procedimento experimental

Visando apresentar orientações para a instrumentação de cordoalhas engraxadas com extensômetros elétricos de resistência, dois cabos de protensão foram instrumentados e ensaiados em uma pista de protensão, como é descrito no Capítulo anterior, e os resultados são apresentados a seguir.

#### 4.3.1. Resultado da escolha dos parâmetros do tipo de extensômetro

De acordo com a metodologia de escolha dos extensômetros, mencionada no Capítulo anterior, decidiu-se que, para o caso em estudo e de acordo com a disponibilidade do

mercado, as características dos extensômetros elétricos de resistência que melhor se adequariam seriam os apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Características dos extensômetros elétricos de resistência utilizados no estudo

PARÂMETRO	RESULTADO	JUSTIFICATIVA
Marca	Kyowa	Disponibilidade no mercado e facilidade de compra.
Propósito	Série KGF	São extensômetros que tem como propósito medição de tensão de forma geral, ou genérica. Possui limite de deformação, a temperatura ambiente, de aproximadamente 5%, precisão e sensibilidade ideais para o ensaio em questão.
Dimensões	Comprimento da grade = 5 mm	Decidiu-se por um comprimento da grade igual a 5 mm, o que garante um comprimento da base igual a 9.4 mm, suficiente para o objetivo do ensaio. Além disso, seu manuseio é mais fácil do que nos gages menores, o que ajuda a diminuir os erros de instrumentação.
Resistência	120 OHMS	Única resistência disponível para o propósito do extensômetro, porém adequada a todos os materiais e equipamentos.
Padrão	C1	Uniaxial, conduz a uma extremidade.
Coefficiente de expansão linear	$11 \times 10^{-6}/C^{\circ}$	Coefficiente correspondente ao aço comum.

Fonte: A autora (2014).

Com isso, tem-se o strain gage escolhido como extensômetro elétrico de resistência *Kyowa*, modelo KGF-5-120-C1-11.

#### 4.3.2. Resultados da protensão para verificação de instrumentação

Com as cordoalhas escolhidas para o ensaio devidamente instrumentadas, de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo anterior, realizou-se a protensão das mesmas para verificar se a instrumentação com os extensômetros elétricos de resistência estaria adequada para que, em um futuro programa experimental com vigas em concreto protendido, seja possível medir o acréscimo de tensão utilizando a metodologia desenvolvida.

As cordoalhas foram dispostas na pista de protensão, ligadas ao equipamento de transferência de dados, o *Spider 8*, que, por sua vez, estava ligado ao computador onde eram feitas as leituras desses dados. A Figura 44 ilustra as cordoalhas instrumentadas dispostas na pista de protensão.

Figura 44 – Cabos com cordoalhas instrumentadas dispostos na pista de protensão



Fonte: A autora (2014).

Utilizou-se um macaco hidráulico para aplicar a protensão, o qual fornecia o valor da pressão aplicada na unidade ‘bar’. A cada 50 bar de pressão aplicado pelo macaco hidráulico verificava-se a deformação medida na cordoalha. Para o cálculo dos outros parâmetros, transformou-se a pressão para a unidade ‘kPa’ e, em seguida, multiplicando-se essa pressão pela área do êmbolo do macaco, obteve-se a força aplicada pelo equipamento, como mostra a Equação (34)

$$\text{Força} = \text{Pressão} \times 0,00394 \text{ m}^2 \quad (34)$$

A tensão em cada cordoalha foi obtida dividindo o valor da força aplicada pela área de sua seção transversal. Por fim, a divisão dessa tensão na cordoalha pela deformação obtida no ensaio, forneceu o valor do módulo de elasticidade para cada valor de pressão. A partir desse procedimento, os resultados são apresentados a seguir.

#### 4.3.2.1. Resultados para a primeira cordoalha ensaiada

Para a primeira cordoalha ensaiada, os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos no ensaio experimental com a primeira cordoalha

<b>PRESSÃO (bar)</b>	<b>PRESSÃO (kPa)</b>	<b>FORÇA (kN)</b>	<b>s (MPa)</b>	<b>e (mm)</b>	<b>e (mm/m)</b>	<b>Ep (Gpa)</b>
0	0	0	0	0	0	0
50	5000	19,7	195,243	584	0,584	334,3199
100	10000	39,4	390,486	1427	1,427	273,6409
150	15000	59,1	585,728	2264	2,264	258,714
200	20000	78,8	780,971	3287	3,287	237,5939
250	25000	98,5	976,214	4200	4,2	232,4319
300	30000	118,2	1171,46	5070	5,07	231,0566
350	35000	137,9	1366,7	-	-	-
405	40500	159,57	1581,47	-	-	-

Fonte: A autora (2014).

Neste primeiro ensaio, quando se atingiu a pressão de aproximadamente 330 bar, o equipamento de medição perdeu o sinal com a cordoalha instrumentada. Isso ocorreu devido à uma configuração no programa da leitura de dados, onde utilizou-se um range de 4000, isto é, uma margem que limitava o valor dos resultados recebidos. Com isso, as configurações do programa foram modificadas para um range de 10.000 para realizar uma segunda tentativa de protensão.

Na segunda tentativa de protensão, por um erro de montagem do sistema, a cunha travou o cabo e, na tentativa de se retirar esta cunha para retirar a tensão do cabo, uma das cordoalhas rompeu, inutilizando o material, como é mostrado na Figura 45 e Figura 46.

Figura 45 – Cordoalha inutilizada do ensaio



Fonte: A autora (2014).

#### 4.3.2.2. Resultados para a segunda cordoalha ensaiada

Tendo a primeira cordoalha sido inutilizada, fez-se necessário um segundo ensaio com outro cabo. Para a segunda cordoalha ensaiada realizou-se duas protensões, cada uma até atingir a capacidade máxima de pressão do macaco hidráulico. Os resultados são apresentados na Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 18 – Resultados obtidos na primeira protensão do ensaio experimental com a segunda cordoalha

<b>PRESSÃO (bar)</b>	<b>PRESSÃO (kPa)</b>	<b>FORÇA (kN)</b>	<b>s (MPa)</b>	<b>e (mm)</b>	<b>e (mm/m)</b>	<b>Ep (Gpa)</b>
0	0	0	0	0	0	0
50	5000	19,7	195,243	630	0,63	309,9092
100	10000	39,4	390,486	1530	1,53	255,2194
150	15000	59,1	585,728	2350	2,35	249,2461
200	20000	78,8	780,971	3250	3,25	240,2988
250	25000	98,5	976,214	4160	4,16	234,6668
300	30000	118,2	1171,46	5060	5,06	231,5132
350	35000	137,9	1366,7	6010	6,01	227,4043
405	40500	159,57	1581,47	7310	7,31	216,3429

Fonte: A autora (2014).

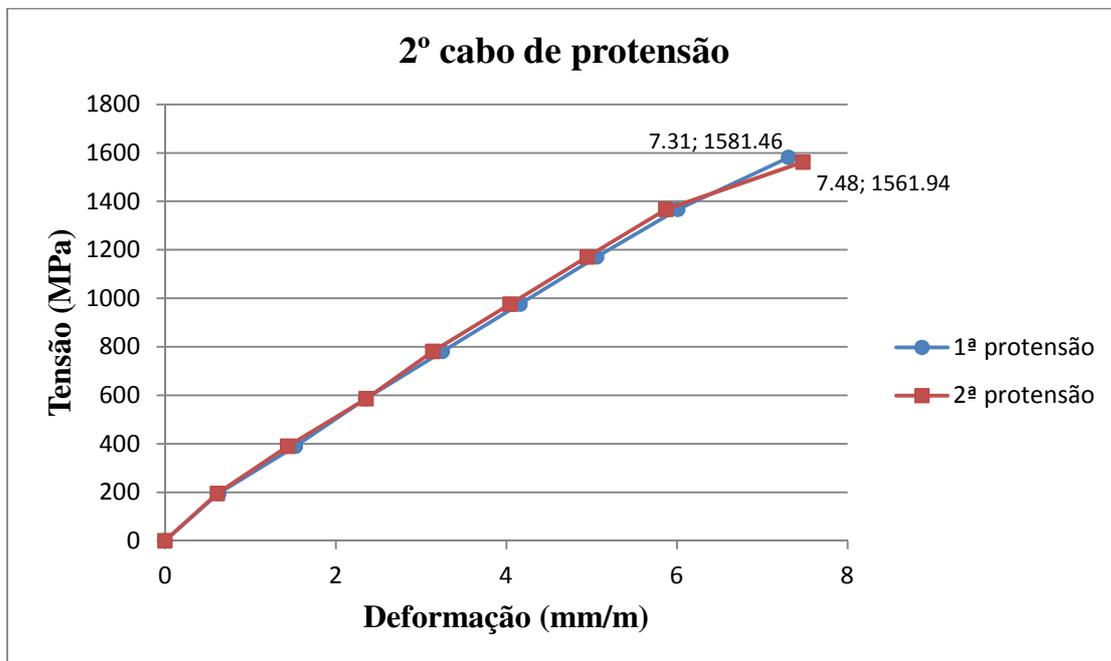
Tabela 19 – Resultados obtidos na segunda protensão do ensaio experimental com a segunda cordoalha

PRESSÃO (bar)	PRESSÃO (kPa)	FORÇA (kN)	s (MPa)	e (mm)	e (mm/m)	Ep (Gpa)
0	0	0	0	0	0	0
50	5000	19,7	195,243	615	0,615	317,468
100	10000	39,4	390,486	1439	1,439	271,359
150	15000	59,1	585,728	2358	2,358	248,4005
200	20000	78,8	780,971	3138	3,138	248,8755
250	25000	98,5	976,214	4046	4,046	241,2788
300	30000	118,2	1171,46	4950	4,95	236,658
350	35000	137,9	1366,7	5870	5,87	232,8279
405	40500	159,57	1561,94	7480	7,48	208,8158

Fonte: A autora (2014).

Dispondo esses dados em forma de gráfico, é possível elaborar a curva tensão  $\times$  deformação para cada um dos ensaios, como é mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Gráfico tensão  $\times$  deformação para as duas protensões do segundo cabo



Fonte: A autora (2014).

Utilizando a Lei de Hooke verificou-se o módulo de elasticidade para os valores máximos obtidos em cada uma das protensões, como é mostrado na última coluna da Tabela 18 e Tabela 19. De acordo com a NBR 7483 (2008) ensaios individuais que resultem em

desvios maiores que 5% em relação a 200 GPa, que é o valor teórico de referência, podem indicar erros cometidos no ensaio, não sendo, todavia, motivo de rejeição do material ensaiado. A norma diz ainda que se um mesmo lote apresentar 2 valores de E diferentes, deve-se adotar o valor mais próximo de 200 GPa. Com isso, dos dois valores obtidos no ensaio, adota-se para o material estudado o valor de 208,82 GPa, valor 4,41% maior do que o valor de referência.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações iniciais

Serão apresentadas, a seguir, as principais conclusões obtidas ao longo do estudo realizado nesta monografia. Elas englobam as contribuições das análises feitas neste estudo, tanto numérica e empírica quanto experimental, da tensão última em cordoalhas de protensão, visto as já citadas dificuldades em se estudar este assunto.

### 5.2. Conclusões sobre o estudo teórico

O presente estudo apresentou um modelo computacional de viga protendida, elaborado no programa FTOOL, para auxiliar o estudo numérico da tensão última de protensão em cordoalhas não aderentes.

No Capítulo 2 foram apresentadas equações, encontradas em normas e fornecidas por outros autores, empregadas para calcular a tensão última em cordoalhas. Tais equações forneceram valores de acréscimo de tensão próximos ao valor obtido com o modelo numérico deste estudo, com exceção da equação elaborada por Naaman et al. (2002) que, como já foi dito, trata-se de uma equação conhecida como conservadora. É importante ressaltar que estas equações provêm de métodos empíricos, já que o foco seria a comparação com a norma brasileira NBR 6118 (2014), a qual se baseia igualmente em ensaios experimentais. Assim, compreende-se a importância da comparação com outras equações, baseadas em outros métodos, visando dar suporte à validade do estudo em questão.

No Capítulo 3 foram mostradas as etapas metodológicas que devem ser seguidas para se chegar ao modelo numérico de viga protendida elaborado. Observou-se que o traçado do cabo influencia diretamente na facilidade da elaboração do desenho. No programa computacional escolhido só é possível representar os elementos em forma de barras, ou seja, na falta do elemento “cabo” é necessário representar este por meio de várias barras, tendo sido essa dificuldade em se traçar um cabo parabólico um dos fatores que influenciaram na escolha do modelo de viga com traçado de cabo reto.

O Capítulo 4 apresentou os resultados da análise numérica. Observou-se primeiramente que a consideração da perda de rigidez da viga após o momento de fissuração é essencial para a obtenção correta dos resultados. Observou-se também que é possível afirmar, diante dos resultados obtidos, que o modelo elaborado atendeu às necessidades do estudo,

visto que os valores encontrados foram condizentes com estudos empíricos e numéricos realizados por outros autores, se tornando, assim, um meio válido e simples para o estudo da protensão.

Por fim, acredita-se que o presente trabalho pode contribuir para a elaboração de trabalhos futuros, mesmo tratando de um único modelo genérico, pois indicou um caminho, fácil e eficaz, para a elaboração de outros modelos.

### **5.3. Conclusões sobre o procedimento experimental**

O estudo em questão também teve como foco a orientação para a instrumentação de cordoalhas engraxadas com extensômetros elétricos de resistência, visando a obtenção de dados referentes à deformação sofrida por estas após a aplicação da força de protensão em ensaios experimentais.

No Capítulo 2 foram apresentados trabalhos envolvendo o estudo de tensões, onde se apresentou um norte para a elaboração de um programa experimental completo para o estudo da tensão última em cordoalhas engraxadas de vigas protendidas. Apesar de suas orientações serem de grande auxílio, neles a instrumentação foi colocada de forma genérica, não se tratando diretamente da instrumentação do material a ser estudado neste trabalho, ficando então desconhecidas as dificuldades que, em um programa experimental completo com instrumentação de cordoalhas de protensão, o pesquisador poderia enfrentar.

No Capítulo 3 foram mostradas as etapas metodológicas que devem ser seguidas para se instrumentar corretamente uma cordoalha engraxada com extensômetros elétricos de resistência. Ficou clara a dificuldade na etapa de limpeza do material pela existência da graxa, que garante a não aderência das cordoalhas com o concreto. Com isso, conclui-se que o foco na limpeza do local de aplicação do extensômetro deve ser grande por ser de extrema importância, para o sucesso do procedimento experimental, a garantia da união entre o material, no caso a cordoalha, e o instrumento de medição, o strain gage.

O Capítulo 4 apresentou os resultados da protensão das cordoalhas instrumentadas. Observou-se primeiramente que durante o ensaio, com o alongamento sofrido nas cordoalhas, a fiação que liga os strain gages ao equipamento de leitura sofre um deslocamento. Esse deslocamento, caso os fios estejam presos, ou aderidos a algum outro material, pode causar o rompimento da ligação e, conseqüentemente, a perda da instrumentação e do ensaio. Percebeu-se que para que as cordoalhas instrumentadas sejam protendidas dentro da viga concretada, o local da instrumentação deve ser protegido de

alguma forma, garantindo a proteção do extensômetro e o livre deslocamento da fiação. Foi pensado inicialmente em uma proteção plástica, como a bainha do cabo de protensão, porém com um diâmetro maior, sendo vedado nas extremidades para impedir a entrada do concreto no local. Porém, fica como sugestão para trabalhos futuros a elaboração deste aparato de proteção. Observou-se também que o tipo de strain gage escolhido suportou o alongamento sofrido pelas cordoalhas, sem descolar ou deixar de coletar as informações. Com isso, conclui-se que os parâmetros escolhidos para os extensômetros foram adequados para os objetivos do estudo.

Com os valores do procedimento experimental dando uma diferença menor que 5% dos resultados teóricos, é possível afirmar que os resultados foram condizentes, que a instrumentação das cordoalhas foi feita de forma correta e satisfatória, e que a metodologia apresentada no presente trabalho pode contribuir para a elaboração de trabalhos futuros.

#### **5.4. Sugestões para trabalhos futuros**

Visando dar continuidade ao presente estudo, agregando valor ao tema apresentado, a seguir serão apresentadas algumas sugestões para a elaboração de novos trabalhos.

- a) Realizar o procedimento experimental completo, ensaiando uma ou mais vigas protendidas, para determinar o valor do acréscimo de tensão em cordoalhas engraxadas;
- b) Estudar outros modelos de viga, de características físicas e geométricas diferentes da estudada no presente trabalho;
- c) Gerar modelo computacional, similar ao estudado neste trabalho, para traçados parabólicos de cordoalhas;
- d) Calcular o valor real da rigidez da viga protendida no ELU para obter valores de acréscimo de tensão mais próximos da realidade utilizando o modelo computacional elaborado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA FILHO, F. M. **Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas**. São Carlos, São Paulo, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete: ACI Committe 318**. Farmington Hills, 2008.

ANDOLFATO, R. A., CAMACHO, J. S. e BRITO, G. A. **Extensometria básica**. Universidade Estadual Paulista. Ilha solteira, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7483**: cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – especificação. Rio de Janeiro, 2008.

BARBIERI, R. A. **Modelo numérico para a análise à flexão de elementos com protensão aderente e não aderente**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BARRETO JR. E. **Conhecendo o extensômetro elétrico de resistência** - Manual técnico.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estrutura em concreto protendido: calculo e detalhamento** / Roberto Chust Carvalho – São Paulo: Pini, 2012.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 2010**. Lousanne, 2010.

LEONHARDT, Fritz. **Construção de concreto : vol. 5 : concreto protendido** / Fritz Leonhardt; tradução João Luís Escosteguy Merino. – Rio de Janeiro : Ed. Interciência, 1983.

Lin, T. Y. **Load-Balancing Method for Design na Analysis of Prestressed Concrete Structures**. – ACI Journal, Proceedings V.60, 1963.

LOUREIRO, Giordano José. **Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas.** – Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006 (p. 1734 – 1755).

MARTHA, Luiz Fernando. **FTOOL: um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas.** - Versão Educacional 3.00. Versão Lisboa. Rio de Janeiro, 2012.

MEASUREMENTS GROUP. **Student manual for strain gage technology.** Raleigh, 1993.

MOTA, Joaquim Eduardo. **Introdução ao concreto protendido:** notas de aula. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

NAAMAN, A. E.; BURNS, N.; FRENCH, C.; GAMBLE, W. L.; MATTOCK, A. H. **Stresses in unbonded prestressing tendons at ultimate: Recommendation.** ACI Structural Journal, Farmington Hills, 2002.

SILVA FILHO, Carlos Alberto Ibiapina e. **Procedimentos para ensaio de viga de concreto protendido com cordoalha não aderente /** Carlos Alberto Ibiapina e Silva Filho. – Fortaleza, 2010.

TAO, X; DU, G. **Ultimate Stress of unbonded tendons in partially prestressed concrete beams.** PCI Journal, Chicago, 1985.

VIEIRA, Mylene de Melo. **Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono.** – Fortaleza, 2014.

**APÊNDICE A – PROJETOS PARA A EXECUÇÃO DA VIGA PROTENDIDA DO  
ESTUDO**

**TABELA DE FERROS**

ACO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO UNIT (cm)	TOTAL (cm)
VPE 19x30	SDA	1	8,3	2	986
	SDA	2	8	4	2152
	SDA	3	8,3	41	3638

RESUMO AÇO CA 50-60			
ACO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
SDA	8,3	48	12
SDA	8	72	9
Peso Total SDA =			21 kg

**TABELA DE PROTENSÃO**

VIGAS	CABO N-	TIPO	QUANT.	SEÇÃO DE PROTENSÃO (m)	COMP. UNITÁRIO PARA CORTE (m)	FORÇA - tf	ALONGAMENTO (mm)
VPE	C1	1 # 12,7	2	19x30	8,11	14 tf	28

**ANCORAGENS PARA MONOCORDALHA ENGRAXADA E PLASTIFICADA**

ANCORAGENS ATIVAS . . . . . 2 Unidades

ANCORAGENS ATIVAS PRÉ-BLOCADAS.. 2 Unidades

**CORDALHA ENGRAXADA E PLASTIFICADA**

**AÇO DURO CP 190-RB**

Peso por metro linear: 0,89kg/m

Ø 12,7mm: 12,22m --> 11 kg

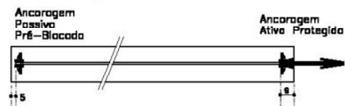
**NOTAS DA PROTENSÃO**

1. Cabos 1Ø12,7mm/CP 190RB-EP Mono-Cordalha Engraxada e Plastificada
2. Protender com 10 dias desde que fck >25 MPa.
3. Protender os cabos do centro para as extremidades.
4. Pa = Força Inicial de Protensão = 14 tf.  
 $\mu$  = Atrito Cabo Bainha = 0,07  
 k = Coeficiente de Perda em Linha = 0,0035 rad/m  
 $\Delta$  = Acomodação da Ancoragem = 6mm  
 Ep = Módulo de Elasticidade do Aço = 196 GPa  
 Ap = Área da Cordalha = 0,99 cm<sup>2</sup>

5. Ancoragens Passivas serão Pré-Blocadas.

6. Ancoragens Ativas Protegidas com Tampo e Graxa Anti-Corrosiva.

7. Convenções:

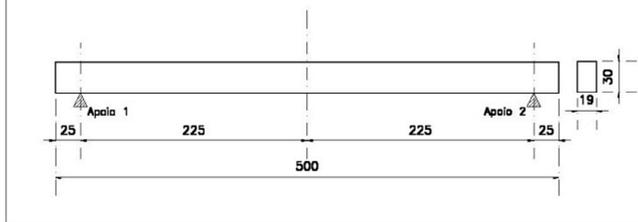


**NOTAS DA VIGA**

- 1 - fck=30MPa
- 2 - AÇO CA-50
- 3 - COBRIMENTO DA ARMADURA: C=3,0cm

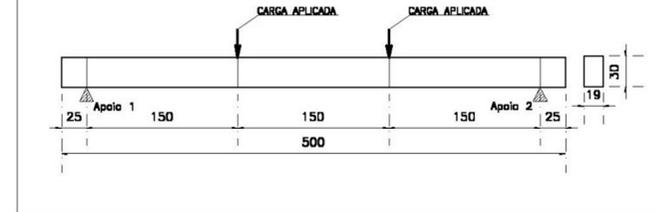
**FORMA DA VIGA (VPE 19X30)**

sec. 1/75



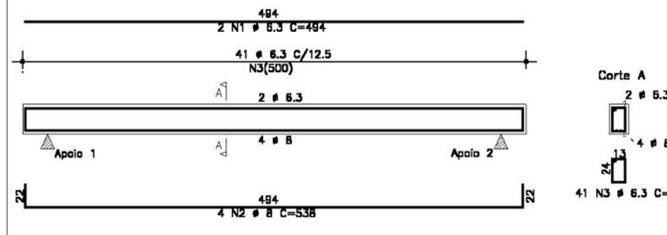
**LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE APLICAÇÃO DA CARGA NA VIGA (VPE 19X30)**

sec. 1/75



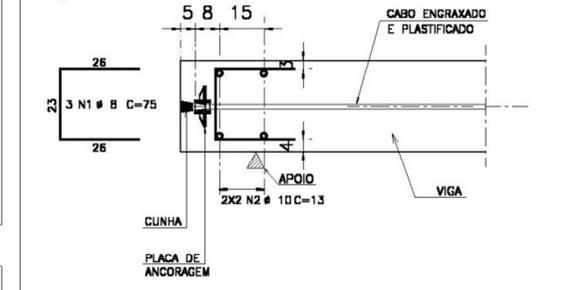
**ARMADURA PASSIVA DA VIGA (VPE 19X30)**

sec. 1/75



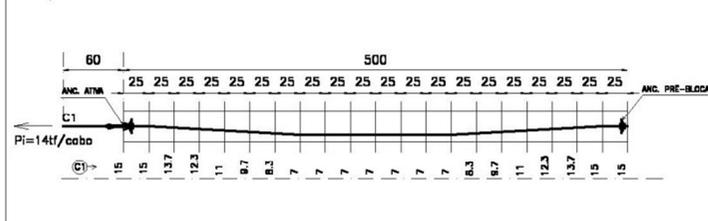
**VPE 19X30 DET. ANCORAGEM PASSIVA**

sec. 1/25



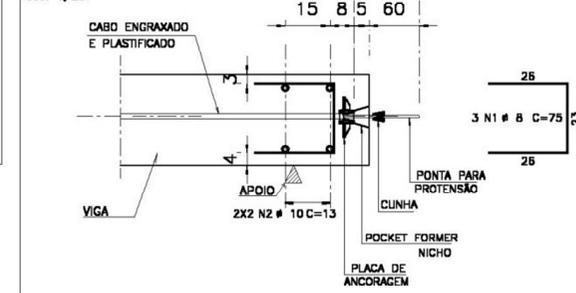
**ARMADURA ATIVA DA VIGA (VPE 19X30)**

CABOS C1 (2X)  
sec. 1/75



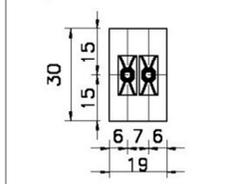
**VPE 19X30 DET. ANCORAGEM ATIVA**

sec. 1/25



**VIGA - VISTA FRONTAL SEÇÃO COM 2 CABOS C1**

sec. 1/25



CLIENTE:			
<b>VIGA PROTENDIDA DO ENSAIO</b>			
ASSUNTO:	DATA:	ESCALA:	PRIMEIRA No.
ARMADURA DE PROTENSÃO DOS CABOS DA VIGA E ARMADURAS PASSIVAS	NOVEMBRO/2014	IND.	
	REVISÃO:		
	MARIANA LEITE		01/01