Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Paulo José Barreto Teixeira

Verificação Experimental da Largura Efetiva em Mesas de Vigas com Seção "T"

Rio de Janeiro
2018

Paulo José Barreto Teixeira

Verificação Experimental da Largura Efetiva em Mesas de Vigas com Seção “T”

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Profª. Drª. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

T266 Teixeira, Paulo José Barreto.
Verificação experimental da largura efetiva em mesas de vigas com seção “T” / Paulo José Barreto Teixeira. – 2018.
266f.

Orientadora: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Vigas de concreto- Teses. 3. Concreto armado - Teses. 4. Resistência de materiais- Teses. 5. Deformações e tensões - Teses. I. Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega.II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.072.22

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Paulo José Barreto Teixeira

Verificação Experimental da Largura Efetiva em Mesas de Vigas com Seção "T"

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Profª. Drª. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares(Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Drª.Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Drª. Ana Maria Abreu Jorge Teixeira
Instituto Militar de Engenharia – IME-RJ

Prof. Drª. Claudia Maria de Oliveira Campos
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Dr. Sergio Luiz González Garcia
Universidade Norte Fluminense-UENF

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória. A meus pais (*in memorian*), por tudo que me ensinaram. A minha querida esposa Isabel Cristina, por toda a paciência e dedicação. A minha filhinha Maria Luiza, pelos sorrisos que me fizeram prosseguir, mesmo com dificuldades.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Profª. Doutora Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares por toda a ajuda e demonstração de força de vontade, pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos, dando estímulos para o início do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a fase de créditos do doutorado.

Ao Prof. Doutor Luciano Ornelas, por gentilmente ter cedido vários materiais que foram usados na confecção de elementos de apoio e aplicação de cargas.

Ao meu amigo Alan Sirqueira pelas muitas ajudas, e pela inegável boa vontade em auxiliar na fabricação dos aparatos necessários para os ensaios.

A graduanda e técnica PROATEC Beatriz Bravin (Bia), que sempre com muita dedicação e gentileza caracterizou e ensaiou os materiais empregados na confecção dos modelos.

E não poderia deixar de registrar minha imensa gratidão aos amigos da "equipe de concretagem": Vanessa; Beatriz Nogueira e Pedro Fernandes, pois sem a sua colaboração não teria sido possível confeccionar as dez vigas.

E separadamente, agradecer aos amigos Deborah Castanheira e Bruno Costa, dado a gigantesca ajuda que me deram durante todas as fases dessa pesquisa, me apoiando e incentivando. Reconhecendo que, sem essa ajuda, teria sido praticamente impossível concluir esse estudo.

Ao amigo Augusto Cesar, que na fase final desse trabalho colaborou com diversas sugestões, bem como auxiliou na criação de várias rotinas computacionais. A amiga Tatiane Capellani, pela ajuda na fase de formatação dos textos.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista. Aos funcionários do laboratório da UERJ: Paulo Inácio e Antonio Inácio.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

À FAPERJ pelo apoio financeiro, na fase de créditos.

...Reconsidera atitudes mentais e recomeça o labor. O futuro se consolida mediante as realizações do presente..

O rio muda o curso, a montanha desaparece, a árvore fenece, o grão germina, enquanto esperam... A mão grandiloqüente do tempo tudo muda. O que agora parece sombras, logo mais surge e ressurge em ouro fulvo de luz...

Joanna de Angelis

RESUMO

TEIXEIRA, Paulo José Barreto. *Verificação experimental da largura efetiva em mesas de vigas com seção "T".*2018.266f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O concreto armado ainda se apresenta como um dos principais materiais utilizados na confecção de elementos estruturais. Dentre os elementos estruturais confeccionados em concreto armado, as vigas figuram como parte essencial na constituição dos pavimentos. Em alguns casos, para reduzir a seção das vigas é necessário que o projetista utilize uma porção da laje como parte constitutiva na seção da viga em formato de "T". Em geral, essa largura de mesa que contribuirá com a resistência à compressão é adotada com base em recomendações normativas. No entanto, nessas recomendações não há qualquer distinção entre o tipo de carga aplicada, tratando a largura efetiva como relação puramente geométrica entre os vão teóricos e a seção transversal da viga . Mas, ao observar-se a literatura mais tradicional de concreto armado, são expostas várias recomendações que procuram calcular a largura efetiva da mesa em função das tensões que nela se distribuem. Esta tese apresenta uma pesquisa experimental realizada para verificara distribuição de tensões ao longo da mesa, através da integração da área sob essa curva, calcular a largura efetiva experimental. As deflexões (flechas) também são utilizadas em um processo que, através da inércia experimental calcula a largura efetiva. O principal objetivo dos testes foi o de identificar a largura de mesa que efetivamente contribui na seção da viga. Os resultados permitiram um comparativo das larguras efetivas, variando-se parâmetros, tais como o tipo de carregamento, a seção transversal e o vão da viga.

Palavras-chave: Vigas "T"; Largura Efetiva de Mesa; Concreto Armado.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Paulo José Barreto. *Experimental verification of effective width on "T" beams. 2*018.266f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Reinforced concrete still presents itself as one of the main materials used in the construction of structural elements. Among the structural elements made of reinforced concrete, the beams are an essential part of the construction of the floors. In some cases, to reduce the section of the beams it is necessary that the designer use a portion of the slab as a constituent part in the section of the "T" beam. In general, this flange width that will contribute to the compressive strength is adopted based on normative recommendations. However, in these recommendations there is no distinction between the type of load applied, treating the effective width as a purely geometric relation between the theoretical span. But when we look at the more traditional literature on reinforced concrete, we present several recommendations that try to calculate the effective width of the flange in function of the tensions that are distributed in it. This thesis presents an experimental research carried out to investigate the distribution of tensions along the flange, to calculate the effective experimental width by integrating the area under this curve. The deflections (arrows) are also used in a process that, through experimental inertia, seeks to calculate the effective width. The main objective of the tests was to identify the flange width that makes an effective contribution in the section of the beam. The results allowed a comparison of the effective widths, varying some parameters.

Keywords: "T" Beams; Effective Width; Reinforced Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Larguras colaborantes, resumidas por Rüsch [6].....27

Figura 2 - Modelo estrutural estudado por HARRY e UDOH, ensaiado por HUSSAIN *et al* (2013) 28

Figura 3 – Seção transversal da viga estudada por HARRY e UDOH, proposta por HUSSAIN *et al* (2013) 28

Figura 4 - Modelo numérico B, estudado por HARRY e UDOH(2016) 29

Figura 5– Padrões de Fissuração das Vigas estudadas por HARRY e UDOH (2016) 30

Figura 6 - Modelos de lajes estudadas por KHALAF *et a*l (2014).....30

Figura 7 – Detalhe das vigas estudadas porSalamana e Nassif [8] 32

Figura 8- Distribuição das deformações da viga porSalamana e Nassif [8] 33

Figura 9– Distribuição de tensões na laje por KEE PAIK (2008).....34

Figura 10– Largura colaborante segundoRieg [10] 34

Figura 11– Esquema de ensaio de Rieg [10], adaptado pelo autor.....34

Figura 12– Influência do tipo de carregamento na largura efetiva, segundoRieg [10] 35

Figura 13– Modelo estudado por CASTRO *et al* (2006), adaptado pelo autor.....36

Figura 14 – Comparativos b_{ef} / b_f,obtidos por CASTRO *et al* (2006), para vigas com h_f=12 cm, variando-se b_f 37

Figura 15 – Comparativos b_{ef} / b_f, por CASTRO *et al* (2006), para vigas com b_f=1,5m, variando-se h_f.....37

Figura 16 –Comparativos b_{ef} / b_f ,obtidos por CASTRO *et al* (2006), para vigas com b_f=1,5m, variando-se o vão 38

Figura 17 – Carregamentos estudados porLoo e Sutandi [12].....39

Figura 18 – Distribuição de tensões em metade da viga porLoo e Sutandi [12] 40

Figura 19 – Largura colaborante adotada pela NBR-6118 (2014)[1].....41

Figura 20 - Distancia entre apoios, para determinação da largura colaborante 43

Figura 21- As distancias $b_{eff,\,1}$,$b_{eff,\,2}$, b_1 e b_2 do EUROCODE[13].....43

Figura 22- As distâncias b_{m1}, b_{m2} e b_{m3} da DIN 4224 45

Figura 23– Redução da largura colaborante da laje em região de carga concentrada de acordo com Leonhardt [14].....45

Figura 24– Largura efetiva. 46
Figura 25 - Distribuição de tensões na estrutura composta por vigas e chapa de aço 47
Figura 26– Largura colaborante para regiões de momento positivo (Chen *et al*[18])48
Figura 27– Viga com dois tramos e cargas concentradas utilizado porKüçükarslan [20] 49
Figura 28– Viga com dois tramos e carregamento distribuído utilizado por Küçükarslan [20].....50
Figura 29 - Viga com carga concentrada no meio do vão 50
Figura 30– Viga com carga distribuída ao longo do vão 51
Figura 31– Distribuição de tensões em uma seção “T” 55
Figura 32– Instrumentação utilizada por WIESE (1964) 55
Figura 33 – Armaduras longitudinais e instrumentação da viga- Modelo III. 56
Figura 34 – Instrumentação para vigas com dois apoios e carga pontual.....56
Figura 35 – Detalhe da instrumentação da viga do modelo I e II. 57
Figura 36 – Detalhes da Instrumentação das vigas com três apoios e cargas pontuais.....57
Figura 37 – Instrumentação para vigas com dois apoios e carga distribuída na alma. 58
Figura 38– Instrumentação em vigas com carga distribuída na alma. 58
Figura 39 – Equipamento de aquisição de dados 58
Figura 40- Viga M-I- V-3–Estribos e barras longitudinais 59
Figura 41- Viga de estribos contínuos fixados às barras longitudinais.....60
Figura 42– Vigas do modelo I após a concretagem. 60
Figura 43 - Esquema da aplicação de cargas. 61
Figura 44– Viga M-I-V-1 posicionada para ensaio. 61
Figura 45– Chapa posicionada sob os apoios.....61
Figura 46– Posição dos transdutores de deslocamento.....62
Figura 47– Gráfico carga x deslocamento vertical da viga MI-V-1 62
Figura 48– Posição dos strain gage de S-1 a S-5 e S-8 a S-12, na mesa da viga....63
Figura 49 – Curvas carga X deformações de M-I-V-1, strain gages S-1 a S-5.....63
Figura 50– Curvascarga X deformações de M-I-V-1, strain gagesS-8 a 12. 64
Figura 51 – Curvascarga X deformações na armadura longitudinal de M-I-V1, extensômetros 17 e 18. 64

Figura 52– Fissuras de M-I-V-1, lado esquerdo 65
Figura 53 – Fissuras de M-I-V, lado direito 65
Figura 54– Padrão de fissuração de M-I-V-1 na ruptura. 66
Figura 55– Aspecto da extremidade de M-I-V-1 após ruptura (vista frontal) 66
Figura 56– Esquema da aplicação de cargas 67
Figura 57– Viga M-I-V-2 posicionada para ensaio 67
Figura 58– Chapa posicionada sob os apoios.....68
Figura 59– Posição dos transdutores.....68
Figura 60– Curvas carga x flecha da viga M-I -V-2 69
Figura 61– Posição dos strains de S-1 a S-12, na mesa da viga 69
Figura 62– Curvas Carga X Deformações de M-I-V-2, extensômetrosS-1 a S-5 70
Figura 63– Curva Carga X Deformações de M-I-V-2, strains S-8 a S-11 70
Figura 64– Curvas Carga X Deformações de M-I-V2, strains 17 e 18 71
Figura 65– Aspecto fissurado de M-I-V-2.....71
Figura 66– Padrão de fissuração de M-I-V-2 na ruptura 72
Figura 67 – Aspecto da extremidade de M-II-V2 após ruptura (vista frontal) 72
Figura 68– Esquema da aplicação de cargas 73
Figura 69– Viga M-I-V-3 posicionada para ensaio 73
Figura 70– Posição dos transdutores.....74
Figura 71 – Gráfico carga x flecha. 74
Figura 72 – Posição dos strains de S-1 a S-12, na mesa da viga 75
Figura 73 – Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strains S-1 a S-5 75
Figura 74– Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strains S-8,S-9 e S-11.....75
Figura 75– Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strain 17 76
Figura 76– Aspecto fissurado de M-I-V3 76
Figura 77– Aspecto de M-I-V3 na ruptura 77
Figura 78– Aspecto do desplacamento de M-I-V3 na ruptura 77
Figura 79– Esquema da aplicação de cargas 78
Figura 80– Viga M-II-V-1 posicionada para ensaio 79
Figura 81– Chapa posicionada sob os apoios.....79
Figura 82– Posição dos transdutores.....80
Figura 83– Gráfico carga x flecha 80
Figura 84 – Posição dos strain gages de S-7 a S-22, na mesa da viga 81
Figura 85– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strain gages S-7 a S-10 81

Figura 86– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-11 a S-14 82
Figura 87– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-19 a S-21 82
Figura 88– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-1 e S-2 83
Figura 89– Aspecto fissurado de M-II-V1 83
Figura 90– Aspecto de M-II-V1 na ruptura 84
Figura 91– Aspecto da extremidade de M-II-V1 após ruptura (vista frontal) 84
Figura 92– Aspecto da extremidade de M-II-V1 após ruptura (vista lateral) 85
Figura 93 – Esquema da aplicação de cargas 85
Figura 94– Viga M-II-V-2 posicionada para ensaio 86
Figura 95 – Lâmina de neoprene posicionada sob o perfil de aplicação de carga....86
Figura 96– Posição dos transdutores.....87
Figura 97– Gráfico carga x flecha 87
Figura 98 – Posição dos strain gages de S-7 a S-22, na mesa da viga 88
Figura 99– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, strain gages S-7 a S-10. 88
Figura 100– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, strain gages S-11 a S-13 ...88
Figura 101– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2 noextensômetro S-19 89
Figura 102– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, extensômetrosS-1 e S-2 89
Figura 103– Aspecto fissurado de M-II-V2 90
Figura 104– Aspecto de M-II-V2 na ruptura 90
Figura 105– Extremidade de M-II-V2 após ruptura (frontal e detalhe lateral).....91
Figura 106– Esquema da aplicação de cargas. 91
Figura 107– Viga M-II-V-3 posicionada para ensaio 92
Figura 108– Apoio Intermediário da viga.....92
Figura 109– Posição dos transdutores.....93
Figura 110– Gráfico carga x flecha 93
Figura 111– Posição dos strains de S-7 a S-22, na mesa da viga 94
Figura 112– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetros S-7 a S-10 .94
Figura 113 – Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetros S-11 a S-14 94
Figura 114– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetros S-1 e S-2 ...95
Figura 115– Aspecto fissurado de M-II-V3 95
Figura 116– Aspecto de M-II-V3 na ruptura 96
Figura 117– Características da viga do modelo III 96
Figura 118– Armadura – Estribos e barras longitudinais do modelo III 97

Figura 119 - Vigas após a concretagem.....98
Figura 120– Perfil para aplicação de carga.....98
Figura 121– Viga M-III-V-1 posicionada para ensaio 99
Figura 122– Chapa posicionada sob os apoios.....99
Figura 123 – Posição dos transdutores.....100
Figura 124– Gráfico carga x flecha 100
Figura 125– Posição dos extensômetros de S-1 a S-12, na mesa da viga. 101
Figura 126 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain gages S-1 a S-4 ...101
Figura 127– Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain gages S-5 a S-8 101
Figura 128 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strains 9 a 12 102
Figura 129 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain16.....102
Figura 130– Aspecto fissurado de M-III-V1 103
Figura131 – Aspecto de M-III-V1 na ruptura 103
Figura 132 – Aspecto de M-III-V1 após ruptura.....103
Figura 133 – Detalhe dos perfis para aplicação das cargas.....104
Figura 134 – Viga M-III-V-2 posicionada para ensaio 104
Figura 135– Chapa e dispositivo sob os apoios.....105
Figura 136 – Posição dos transdutores.....105
Figura 137 – Gráfica carga x flecha 106
Figura 138– Posição dos strain de S-1 a S-8, na mesa da viga.....106
Figura 139 – Gráfica Carga X Deformações de M-III-V2, strain S-2 a S-4.....107
Figura 140– Gráfica Carga X Deformações de M-III-V-2, strains S-5 a S-8.....107
Figura 141 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V2, strains S-13 e S-14 108
Figura 142 – Aspecto fissurado de M-III-V-2.....108
Figura 143– Aspecto de M-III-V-2 na ruptura 109
Figura144 – Aspecto de M-III-V-2 após ruptura 109
Figura 145 – Detalhe dos perfis para aplicação das cargas.....110
Figura 146– Viga M-III-V-3 posicionada para ensaio 110
Figura 147– Chapa de reforço sob os apoios.....111
Figura 148 – Posição dos transdutores.....111
Figura 149 – Gráfico carga x flecha 112
Figura 150 – Posição dos extensômetros de S-1 a S-8, na mesa da viga 112
Figura 151 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V3, extensômetrosS-1 a S-4 112
Figura 152 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V-3, strains S-6 a S-9.....113

Figura 153 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V-3, strains13 e 14 113
Figura 154 – Aspecto fissurado de M-III-V-3 114
Figura 155– Aspecto de M-III-V-3 na ruptura 114
Figura 156 – Aspecto de M-III-V-3 após ruptura 115
Figura 157 – Detalhe do perfil para aplicação das cargas 116
Figura 158 – Viga M-III-V-4 posicionada para ensaio 116
Figura 159 – Chapa de reforço sob os apoios..... 117
Figura 160 – Posição dos transdutores..... 117
Figura 161 – Gráfico carga x flecha 118
Figura 162 – Posição dos strains de S-1 a S-8, na mesa da viga 118
Figura 163 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V4, strains S-1 a S-4 119
Figura 164 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V3, strains S-9 a S-6 119
Figura 165 – Aspecto da ruptura da viga M-III-V-4..... 120
Figura 166 – Aspecto e detalhe da ruptura da viga M-III-V-4 120
Figura 167 – Curva Tensão x Deformação (NBR-6118)[1] 121
Figura 168 – Escolha do grau polinomial no Excel [22]..... 122
Figura 169 – Função polinomial da Linha de tendência 123
Figura 170 – Obtenção da área sob a curva através de integração..... 123
Figura 171 – Detalhe da extensometria 125
Figura 172 – Gráfico de evolução das tensões calculadas 126
Figura 173 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado direito .. 127
Figura 174 – Posição dos extensômetros 128
Figura 175 – Gráfico de evolução das tensões no lado esquerdo..... 129
Figura 176 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado esquerdo 131
Figura 177 – Detalhe da extensometria 131
Figura 178 – Gráfico de evolução das tensões no lado direito..... 132
Figura 179 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado direito .. 133
Figura 180 - Curvas de tensões para o lado esquerdo 134
Figura 181 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado esquerdo 136
Figura 182 – Detalhe da extensometria 136
Figura 183 - Trajetória de tensões do lado direito 137
Figura 184 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimentais lado direito 139

Figura 185 - Desenvolvimento das tensões através das cargas 139
Figura 186 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....140
Figura 187 – Detalhe da extensometria 141
Figura 188 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 142
Figura 189 – Região de maiores tensões para as cargas 143
Figura 190 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....145
Figura 191 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 146
Figura 192 – Ponto de localização das maiores tensões 146
Figura 193 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....148
Figura 194 – Comparativo entre os pontos de localização das tensões 148
Figura 195 – Variação da relação $b_{f,\ exp} / b_f$ ao longo do vão 149
Figura 196 – Detalhe da extensometria 149
Figura 197 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 150
Figura 198 – Regiões de picos curvas de tensões para as cargas 151
Figura 199 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....153
Figura 200 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 154
Figura 201 – Valores máximos de tensões para as cargas.....154
Figura 202 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....156
Figura 203 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 156
Figura 204 – Detalhe da extensometria 157
Figura 205 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 157
Figura 206 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 158
Figura 207 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....160
Figura 208 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 161
Figura 209 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 161
Figura 210 – Comparativo das curvas de tensões para as cargas.....162
Figura 211 – Detalhe da extensometria 162
Figura 212 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 163
Figura 213 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 164
Figura 214 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....165
Figura 215 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 166
Figura 216 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 167
Figura 217 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....168
Figura 218 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas 168

Figura 219 – Detalhe dos picos de tensões para as cargas.....169
Figura 220 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas.....170
Figura 221 – Detalhe das curvas de tensões para as cargas 170
Figura 222 – Detalhe da extensometria 171
Figura 223 - Comportamento das curvas de tensões para as cargas.....172
Figura 224 - Pontos de maiores tensões para as cargas 172
Figura 225 - Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas 174
Figura 226 - Comportamento das curvas de tensões para as cargas.....175
Figura 227 - Detalhe das curvas de tensões para as cargas 175
Figura 228 - Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas 177
Figura 229 - Curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-12.....178
Figura 230 - Detalhes de tensões para as cargas em S-9 a S-12.....178
Figura 231 - Detalhes de tensões para as cargas em S-9 a S-12.....180
Figura 232 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-2.....180
Figura 233 – Detalhe da extensometria 181
Figura 234 - Curvas de tensões para as cargas de S-1 a S-4.....182
Figura 235- Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-1 a S-4 182
Figura236 - Detalhes de tensões para as cargas em S-1 a S-4.....183
Figura237 - Curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-6 184
Figura238 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-6 185
Figura239 - Detalhes de tensões para as cargas em S-6 a S-9.....186
Figura240 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-3.....187
Figura241 – Detalhe da extensometria 188
Figura242 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-4 a S-1 189
Figura243 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-4 a S-1 189
Figura244 - Detalhes de tensões para as cargas em S-1 a S-4.....191
Figura245 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-8 a S-5 192
Figura 246 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-8 a S-5. 193
Figura 247 - Detalhes de tensões para as cargas em S-5 a S-8.....195
Figura 248 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-4.....195
Figura 249 - Relação entre as deformações do aço e do concreto.....198
Figura 250 – Rotina para o calculo de $b_{f,\ exp}$, para a viga no Estadio I 199
Figura 251 – Rotina para o calculo de $b_{f,\ exp}$, para a viga no Estadio II 200
Figura 252 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MI-V2.....201

Figura 253 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MI-V2 203
Figura 254 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MI-V3 205
Figura 255 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MI-V3 205
Figura 256 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V1 208
Figura 257 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V1 208
Figura 258 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V2 210
Figura 259 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V2 211
Figura 260 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V3 213
Figura 261 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V3 213
Figura 262 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V1 215
Figura 263 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V1 215
Figura 264 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V1 217
Figura 265 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V2 218
Figura 266 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V3 220
Figura 267 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V3 220
Figura 268 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V4 223
Figura 269 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V4 223
Figura 270 - Comparativos das relações *bf,exp / bf*. para as vigas do modelo I, carga de 220kN 224
Figura 271 - Comparativos das relações *bf,exp* / *bf*. para as vigas do modelo II, para vigas com vão de 2,0 m 225
Figura 272 - Comparativos das relações *bf,exp / bf*. para as vigas do modelo III, para vigas com vão de 2,0 m 225
Figura 273 - Comparativos das relações *bf,exp / bf*. para a viga M-II-V-3, para vigas com vão de 1,0 m 226
Figura 274 - Comparativos das relações bf,exp / bf. para a viga M-III-V-2, para vigas com vão de 1,0 m 227

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do elemento estudado por HARRY e UDOH(2016) 29
Tabela 2–Largura das Mesas estudadas por HARRY e UDOH (2016).....29
Tabela 3 - Resumo dos modelos propostos por KHALAF *et a*l (2014).....31
Tabela 4 - Resumo das vigas estudadas porSalamana e Nassif [8] 32
Tabela 5- Resumo dos elementos estudados por Rieg [10].....35
Tabela 6 - Resumo das larguras efetivas b_{ef} encontradas porRieg [10].....36
Tabela 7 - Resumo dos parâmetros estudados por Loo e Sutandi [12] 38
Tabela 8-Dimensões dos modelos de Loo e Sutandi [12] 39
Tabela 9 -Resumo dos resultados deLoo e Sutandi [12].....40
Tabela 10 - Características dos modelos estudados.....54
Tabela 11 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga125
Tabela 12 - Funções polinomiais integradas para o lado direito 127
Tabela 13 - Posição dos extensômetros S-8 a S-12 na mesa da viga 128
Tabela 14 - Polinômios das curvas de tensões o lado esquerdo 130
Tabela 15 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga132
Tabela 16 - Polinômios das curvas de tensões o lado direito.....133
Tabela 17 - Polinômios representativos das curvas 135
Tabela 18 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga137
Tabela 19 - Polinômios das curvas de Tensões nos extensômetros S-1 a S-5 138
Tabela 20 - Equações polinomiais das curvas de tensões.....140
Tabela 21 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga.....142
Tabela 22 - Equações Polinomiais das curvas de tensões 144
Tabela 23 - Posições calculadas a partir das deformações dos strains S-11, S-12, S-13 e S-14.....145
Tabela 24 - Polinômios das curvas de tensões 147
Tabela 25 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga.....150
Tabela 26 - Polinômios e larguras efetivas 152
Tabela 27 - Posições dos extensômetros S-11 a S1S-12, S-13 e S-14 153
Tabela 28- Polinômios e larguras efetivas 155
Tabela 29 - Polinômios e larguras efetivas 159
Tabela 30 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga.....160

Tabela 31 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga.....163
Tabela 32 - Polinômios e larguras efetivas 165
Tabela 33 - Posição dos extensômetros S-8, S-7, S-6 e S-5 na mesa da viga.....166
Tabela 34 - Polinômios e larguras efetivas 167
Tabela 35 - Polinômios e larguras efetivas 169
Tabela 36 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga.....171
Tabela 37 - Funções polinomiais das curvas de tensões.....173
Tabela 38 - Posição dos extensômetros S-8, S-7, S-6 e S-5 na mesa da viga.....174
Tabela 39 - Funções polinomiais das curvas de tensões.....176
Tabela 40 - Posição dos extensômetros S-12 a S-9 177
Tabela 41 - Funções polinomiais das curvas de tensões.....179
Tabela 42 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga.....181
Tabela 43 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1.....183
Tabela 44 - Posição na mesa dos extensômetros S-9 a S-6 184
Tabela 45 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-9 a S-6.....186
Tabela 46 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga.....188
Tabela 47 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1.....190
Tabela 48 (continuação) - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1.....191
Tabela 49 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-5 a S-8.....194
Tabela 50 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MI-V1.....201
Tabela 51 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MI-V3.....204
Tabela 52 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V1.....207
Tabela 53 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V2.....210
Tabela 54 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V3.....212
Tabela 55 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MIII-V1.....214
Tabela 56 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V3.....217
Tabela 57 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MIII-V3.....219
Tabela 58 - Largura efetiva bf,exp, calculada a partir da flecha para MIII-V4 222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI-318	American Concrete Institute
NBR – 6118	Norma Brasileira para Estruturas de Concreto
EUROCODE 2	European Committee for Standardisation
BS-8110	Norma Britânica para Estruturas de Concreto
CP	Corpo de prova de concreto
LEC	Laboratório de Engenharia Civil da UERJ
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
N	Newton
kN	Kilonewton
kN/m^2	Kilonewton por metro quadrado
MPa	Megapascal
S	Extensômetro de resistência elétrica (strain gage)

LISTA DE SÍMBOLOS

b_w	Espessura da alma
b_f	Largura da mesa
$bf,_{exp}$	Largura efetiva da mesa, verificada experimentalmente
h_f	Altura da mesa da laje nervurada
h_w	Altura da alma da viga
α	Coeficiente que depende do carregamento, dos vãos e das condições de contorno das vigas
f_c	Resistência à compressão simples
f_{ct}	Resistência à tração simples
E_{cs}	Módulo de Elasticidade do secante do concreto
f_{ck}	Resistência a compressão do concreto aos 28 dias
σ_{max}	Tensão máxima na mesa.
b_{ef}	Largura efetiva (colaborante) da mesa
l	Distância inter-eixos da nervura principal
L	Vão teórico da viga
ε_s	Deformação do aço
ε_c	Deformação no concreto
σ_c	Tensão no concreto
σ_s	Tensão no aço
A_a	Área da seção transversal do aço estrutural
A_c	Área da seção transversal do concreto
A_s	Área da seção transversal do aço da armadura
h	Altura total da seção transversal da viga “T”
h_f	Altura da mesa da viga seção transversal “T”

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **25**
GENERALIDADES **25**
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **27**
1.1. O conceito de largura colaborante **27**
1.2. Prescrições Normativas sobre Largura Efetiva **40**
1.2.1. Prescrições da Norma Brasileira (NBR-6118/2014) 40
1.2.2. Prescrições da norma Americana – ACI-318(2006) 41
1.2.3. Prescrições da norma Européia – EUROCODE (2004) 42
1.2.4. Prescrições da norma Britânica – British Standards BS-8110 43
1.2.5. Prescrições da norma Alemã – DIN 4224 44
1.3. Métodos Para Determinação Da Largura Efetiva **46**
1.3.1. Métodos Utilizando a Curva de Tensões 46
1.3.2. Método Utilizando as Deflexões (Flechas) 49
1.3.2.1. Para Vigas com Três Apoios e Carga Concentrada 49
1.3.2.2. Para Vigas com Três Apoios e Carga Distribuída 50
1.3.2.3. Para Vigas com Dois Apoios e Carga Concentrada 50
1.3.2.4. Para Vigas com Dois Apoios e Carga Uniformemente Distribuída 51
2. PROGRAMA EXPERIMENTAL **53**
2.1. Modelos Propostos e Parâmetros de Estudo **53**
2.2. Instrumentação das Vigas para Verificação das Deformações **55**
2.3. Ensaios das Vigas do Modelo I **59**
2.3.1 Confecção das Vigas do Modelo I 59
2.3.2 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo I 60
2.3.2.1 Ensaio da Viga M-I-V-1 60
2.3.2.2 Ensaio da Viga M-I-V-2 67
2.3.2.3 Ensaio da Viga M-I-V-3 73
2.4. Ensaios das Vigas do Modelo II **78**
2.4.1 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo II 78
2.4.1.1 Ensaio da Viga M-II-V-1 78
2.4.1.2 Ensaio da Viga M-II-V-2 do Modelo II 85
2.4.1.3 Ensaio da Viga M-II-V-3 do Modelo II 91

2.5. Ensaios das Vigas do Modelo III 96
2.5.1 Confecção das Vigas do Modelo III 96
2.5.2 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo III 98
2.5.2.1 Ensaio da Viga M-III-V-1 98
2.5.2.2 Ensaio da Viga M-III-V-2 103
2.5.2.3 Ensaio da Viga M-III-V-3 109
2.5.2.4 Ensaio da Viga M-III-V-4 115
3. DETERMINAÇÃO DA LARGURA EFETIVA ATRAVÉS DAS TENSÕES ... 121
3.1. Cálculo das Tensões 121
3.2. Integração das Curvas de Tensão 122
3.3. Análise das Tensões e Determinação das Larguras Efetivas das Vigas 124
3.3.1 Análise das tensões e Largura efetiva das Vigas MI-V-1 124
3.3.2 Análise das tensões e Largura efetiva das Vigas MI-V2 131
3.3.3 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MI-V-3 136
3.3.4 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-1 141
3.3.5 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-2 149
3.3.6 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-3 156
3.3.7 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-1 162
3.3.8 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-2 170
3.3.9 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-3 180
3.3.10 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-4 187
3.4. Obtenção da Largura Efetiva Através das Flechas 196
3.4.1 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MI-V2 200
3.4.2 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MI-V3 203
3.4.3 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V1 206
3.4.4 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V2 209
3.4.5 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V3 211
3.4.6 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V1 214
3.4.7 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V2 216
3.4.8 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V3 218
3.4.9 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V4 221
3.5. Comparativos dos Resultados de Larguras Efetivas 224
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 228
4.1. INTRODUÇÃO 228

4.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES 229
4.3. TRABALHOS FUTUROS 230
REFERÊNCIAS 232
ANEXO A- EQUIPAMENTOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS 238
ANEXO B- ARMADURAS E MATERIAIS DAS VIGAS DOS MODELOS M-I, M-II E M-III 239
ANEXO C– ROTINAS COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES EXPERIMENTAIS E DA LARGURA EFETIVA 243
ANEXO D– DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES EXPERIMENTAIS 246

INTRODUÇÃO

Generalidades

Em algumas estruturas não é conveniente ao projetista a utilização de vigas com uma altura muito elevada, quer por questões ligadas ao projeto arquitetônico, quer por alguma particularidade construtiva. Nesse caso, uma solução bastante usual é a utilização de vigas com seção “T”, em que parte da zona comprimida está localizada no interior da própria laje.

Ao utilizar uma seção “T” o projetista passa a ter que avaliar qual a largura da mesa (b_f) que deverá ser considerada no dimensionamento da seção. Em geral, essa decisão será baseada nos diversos códigos normativos disponíveis (NBR-6118 [1], CEB [2], ACI-318 [3]). Essas normativas tratam, em geral, a dimensão da largura efetiva da mesa apenas em função de parâmetros, tais como relação entre vãos e zonas de momentos positivos ou negativos.

Com o objetivo de simplificar as premissas de projeto, as normas desconsideram parâmetros tais como: relações geométricas das vigas e tipo de carregamento aplicado. No entanto, ao recorrer-se ao estudo de literatura tradicional do concreto, observa-se que existem outros parâmetros que influenciam na largura de mesa que efetivamente contribuirá na composição do banzo superior da viga.

O estudo apresentado teve como objetivo uma avaliação (baseada em dados experimentais) da largura que efetivamente contribuirá no momento resistente interno da viga. Buscou-se variar os parâmetros geométricos, os tipos de carregamentos e as zonas de momento positivo ou negativo.

Foram ensaiadas dez vigas, variando-se os tipos de carregamento que foram aplicados de forma concentrada, bem como distribuída. As relações entre as medidas da seção e os vãos foram igualmente variadas. Com isso, foi possível verificar para que parâmetros as considerações normativas eram realmente adequadas.

Motivação

A motivação desse trabalho foi a observação de que, nas principais normas de concreto, armado a largura efetiva figura somente como um valor estimado em função dos vãos, não sendo levado em conta o tipo de carregamento que será aplicado, nem as relações entre os parâmetros geométricos da seção. No entanto, uma consulta à literatura mais tradicional mostra o quão simplificada são as determinações normativas que versam sobre largura efetiva de mesa em seções ‘T”.

Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é determinar, a partir de dados experimentais, a largura efetiva de mesa que contribui na resistência da seção. Dessa forma, é também possível avaliar a influência do tipo de carregamento aplicado na evolução dessa largura.

Descrição do Trabalho

A presente tese foi dividida em quatro capítulos. No Capítulo I, é apresentada a introdução da tese, onde discorreu a respeito do conceito de “Largura Efetiva de Mesa”.No Capítulo II, é mostrado o programa experimental, onde foram ensaiadas dez vigas, com a utilização de instrumentação em todas elas, para que por meio dos dados obtidos por essa instrumentação, fossem calculadas as larguras efetivas experimentais. O Capítulo III apresenta o cálculo da largura efetiva utilizando as tensões e as flechas, determinadas experimentalmente. O Capítulo IV apresenta as principais conclusões do estudo.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. O conceito de largura colaborante

A indicação da largura da laje que realmente contribui para a resistência à flexão é comumente dada pelas normas de forma indicativa. Estes valores indicativos são obtidos a partir deestudos experimentais e são, normalmente, a favor da segurança. Mas, para se calcular de forma mais precisa o valor da largura colaborante é necessário recorrer a outras referencias bibliográficas, tais como, as que serão apresentadas no texto a seguir.

O primeiro estudo que procurou calcular, de maneira mais precisa, a largura colaborante de uma seção “T” foi realizado em 1924 por Von Karmàn [4]. Esses estudos foram ampliados por Metzer [5], que analisou pela primeira vez a influência entre a rigidez da laje e a da viga que compunham as seções “T”.

Os estudos de Metzer [5] foram complementados por Girkmann em 1948, que ensaiou outros tipos de carregamentos, verificando-se a influencia da posição e do tipo de carga aplicada na obtenção experimental da largura efetiva (ou colaborante) de uma seção “T”. Por meio dos dados obtidos por esses dois autores Rüsch [6], elaborou o resumo de curvas abaixo Figura 1.

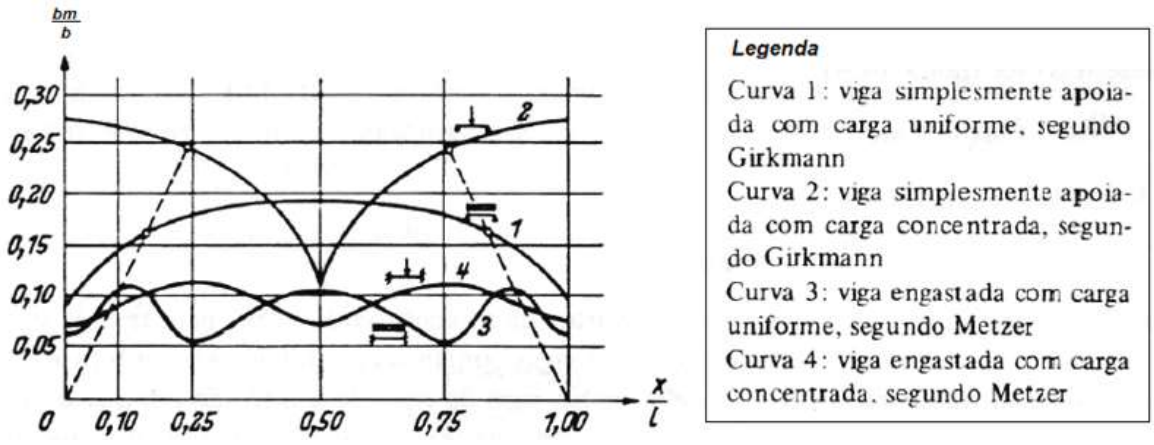


Figura 1 - Larguras colaborantes, resumidas por Rüsch [6]

É possível notar, a partir das curvas que a largura efetiva sofre considerável influência, principalmente, do tipo de carregamento aplicado e do esquema estrutural da viga.

Embora, em primeira análise pareça que o tema permaneceu sendo ignorado, considerando-se apenas as simplificações dos códigos mais tradicionais de

concreto, a determinação da largura efetiva da mesa vem sendo tema de diversos trabalhos no meio acadêmico internacional que serão citatos na seqüência desse texto.

As pesquisas de HUILI *et al* (2017) avaliaram a largura efetiva em vigas de pontes com seção fechada (tipo caixão), utilizando as recomendações normativas do Japão.

Em 2016, foi publicado o estudo de HARRY e UDOH que verificou o efeito da largura da mesa no comportamento de vigas submetidas à flexão, avaliando seu comportamento fissurado. Esses pesquisadores estudaram a largura efetiva por meio de modelagem computacional, utilizando para validação os modelos experimentais de viga “T” ensaiados por HUSSAIN *et al*, conforme o detalhe da seção transversal é apresentado na Figura 3.

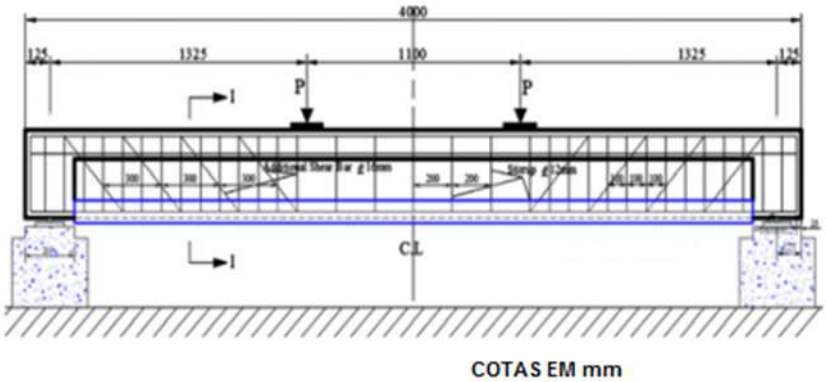


Figura 2 - Modelo estrutural estudado por HARRY e UDOH, ensaiado por HUSSAIN *et al* (2013)

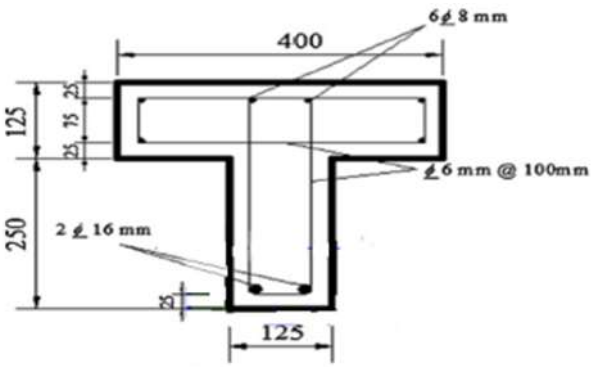


Figura 3 – Seção transversal da viga estudada por HARRY e UDOH, proposta por HUSSAIN*et al* (2013)

As características dos materiais da viga estudada por HARRY e UDOH (2016) é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo do elemento estudado por HARRY e UDOH (2016)

Viga de Validação	$A_{s,\ long}\phi$ (mm)	f_{ck} do concreto (MPa)	Comprimento total da viga (m)	Largura total da mesa - b_f (m)	Espessura da mesa - h_f (m)
V-1	16,00	30,70	3,75	0,40	0,125

Os autores mantiveram todos os outros parâmetros constantes, variando apenas a largura da mesa da viga. Três diferentes larguras da mesa (b_f) foram selecionadas para esta investigação, conforme o apresentado naTabela 2.

Tabela 2–Largura das Mesas estudadas por HARRY e UDOH (2016)

Modelo	Largura total da mesa - b_f (m)
A	0,20
B	0,40
C	0,60

Os modelos apresentados na tabela precedente foi feita utilizando o software LS-DYNA [7], e um dos elementos modelados é apresentado na Figura 4.

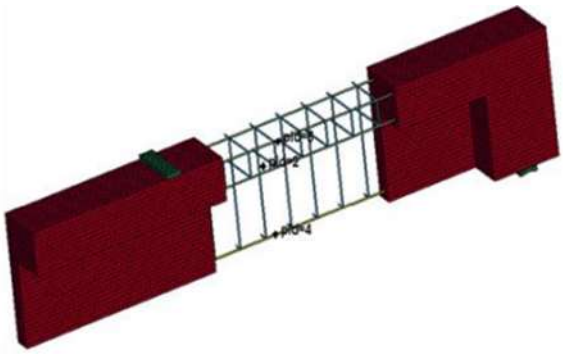


Figura 4 - Modelo numérico B, estudado por HARRY e UDOH (2016)

Ao analisarem os resultados de seu estudo HARRY e UDOH (2016) concluíram que, mesmo alterando-se a largura da mesa o padrão de fissuração das vigas permaneceu os mesmos. Entretanto, esses autores ressaltam que esses resultados dizem respeito apenas aos três valores de largura de mesa estudada (0,20m; 0,40m e 0,60m).

O padrão de fissuração obtido no software LS-DYNA [7] são apresentados na figura 5, para as vigas com largura de mesa 0,20m, 0,40m e 0,60m, para um deslocamento no centro do vão das vigas de 28,0mm.

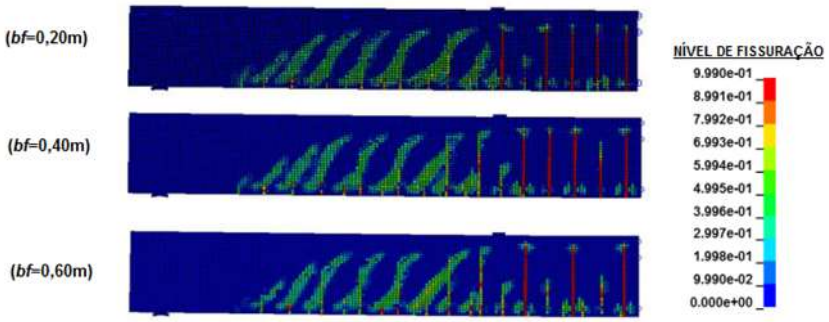


Figura 5– Padrões de Fissuração das Vigas estudadas por HARRY e UDOH (2016)

KHALAF *et al* (2014) estudaram a largura efetiva de estruturas mistas constituídas por vigas metálicas, com lajes nervuradas. Os autores analisaram numericamente e experimentalmente seis grupos de vigas, num total de 138 modelos experimentais. Os parâmetros que os autores variaram foram as condições de contorno das lajes, espessura das mesmas, vão e tipo de carregamento aplicado.

O esquema dos modelos ensaiados por KHALAF *et al* (2014) é apresentado na Figura 6.

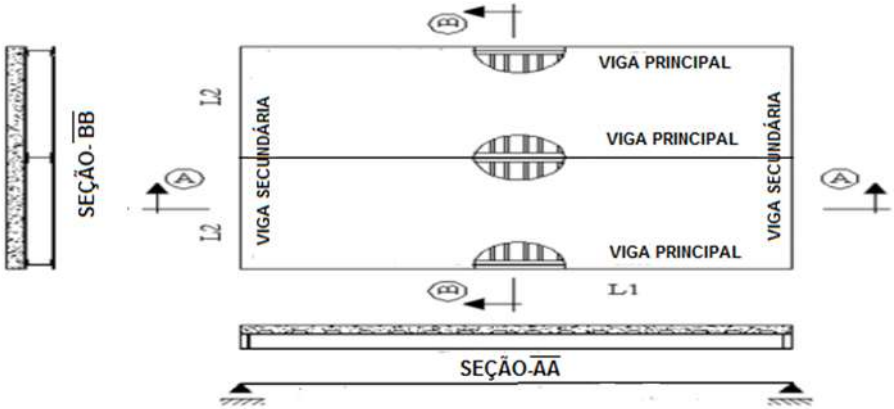


Figura 6 - Modelos de lajes estudadas por KHALAF *et al* (2014)

Os modelos testados consistem em lajes contínuas de dois vãos, com vigas principais simplesmente apoiadas de comprimento total igual a 2,815 m (exceto o Grupo “F” que tem L1 variando de1,562m a 3,128m), e vigas secundárias com as mesmas secções transversais da viga principal.

Os detalhes dos modelos ensaiados por KHALAF *et al* (2014) para determinação da largura efetiva são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo dos modelos propostos por KHALAF *et a*l (2014)

Grupo	Quantidade de modelos	Condições de contorno	Tipos de carregamento	Comprimento do vão (m)
A	12	Com vigas secundárias	Uniforme	0,96
				1,89
B	24	Com e sem vigas secundárias	Uniforme	0,96
				1,89
C	30	Com vigas secundárias	Uniforme	0,96
				1,89
D	36	Com vigas secundárias	Uniforme	0,96
				1,89
E	24	Com vigas secundárias	Uniforme, com carga centrada no meio do vão	0,96
				1,89
F	12	Com vigas secundárias	Uniforme	1,69

Ao analisarem os modelos acima resumidos, os autores observaram que para cargas uniformemente distribuídas, a largura efetiva permanecia praticamente a mesma. Esse comportamento só era alterado pela presença de cargas pontuais, ocasionando a redução da largura efetiva.

Além disso, KHALAF *et a*l (2014) constataram que a presença das vigas secundárias afeta diretamente a largura efetiva, uma vez que altera significativamente as condições de contorno dos elementos adjacentes a elas.

Um estudo numérico e experimental foi feito por Salamana e Nassif [8], para determinação da largura efetiva em vigas mistas, com seção “T”. Nesse estudo, as variáveis utilizadas foram: a largura da mesa de concreto: a quantidade de conectores e a seção dos perfis de aço sob a mesa de concreto.

As características dos elementos estudados por Salamana e Nassif [8] são resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo das vigas estudadas por Salamana e Nassif [8]

Viga	Largura da Mesa b_f (m)	Relação b_f / L	Número de Conectores	Perfil Metálico
B1	0,61	0,25	100	W150 x 24
B2	0,86	0,35	100	W150 x 24
B3	1,12	0,46	100	W150 x 24
B4	1,12	0,46	75	W150 x 24
B5	1,12	0,46	50	W150 x 24
B6	0,61	0,25	100	W150 x 13,5
B7	0,86	0,35	100	W150 x 13,5
B8	1,12	0,46	100	W150 x 13,5

Os autores moldaram oito vigas de concreto, utilizando para sua instrumentação strain gages (para verificar deformações) e LVDT para medição dos deslocamentos. O esquema de ensaio e instrumentação das vigas é apresentado na Figura 7.

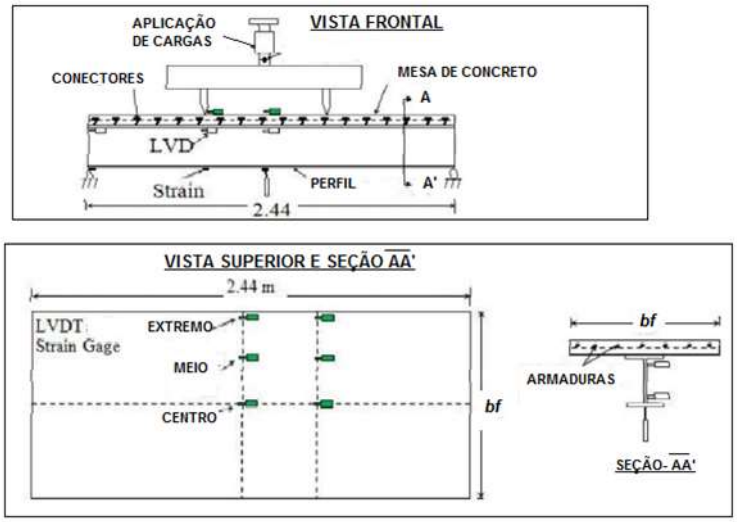


Figura 7 – Detalhe das vigas estudadas por Salamana e Nassif [8]

O modelo numérico foi desenvolvido com o auxilio do software ABAQUS[9], tendo sido validado com base nos dados experimentais obtidos pelos autores. A distribuição das deformações de um dos modelos (após a análise), para diferentes estágios de carga, é apresentado na Figura 8.

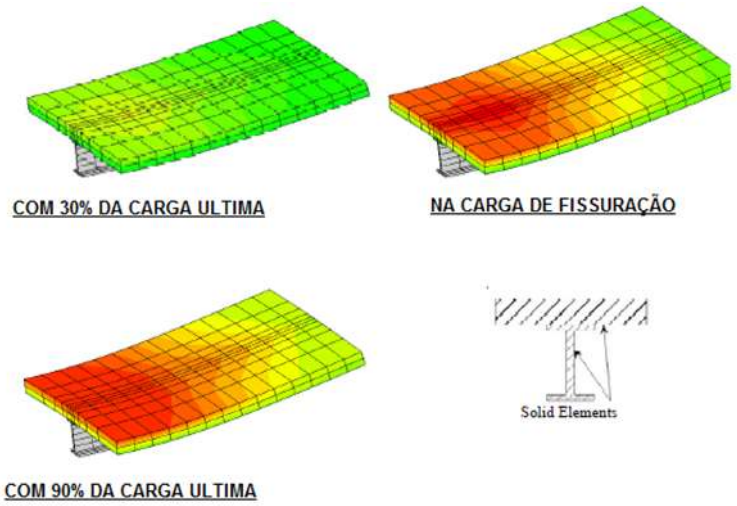


Figura 8- Distribuição das deformações da viga por Salamana e Nassif [8]

Através do comparativo entre as deformações experimentais e as deformações obtidas no ABAQUS [9], os autores puderam concluir que os fatores que mais afetam a largura efetiva (b_{ef}) são: a largura total da mesa (b_f) e a quantidade de conectores, uma vez que uma redução de 25% na quantidade de conectores resultou em um decréscimo de 19% da relação b_{ef}/ b_f. Além disso, esses autores concluíram que de maneira geral, os códigos normativos são bastante conservadores quando fazem uma estimativa da largura da mesa a ser considerada.

Em 2008, KEE PAIK verificou a largura efetiva em placas através da curva de distribuições de tensões ao longo da mesa, de acordo com as formulações clássicas Teoria da Elasticidade

O autor fez uma série de considerações a respeito das correlações entre a largura efetiva da placa e as deformações por ela apresentadas, utilizando-se dos mesmos conceitos propostos por Von Karmàn [4] e Metzer [5], nos meados dos anos 30 do século 20.

A distribuição típica de tensões obtidas na mesa, para carregamentos uniformemente distribuídos, que foi estudado por KEE PAIK (2008), é apresentada na Figura 9. As formulações propostas por esse autor serão estudadas de maneira mais pormenorizada em item subseqüente desse texto.

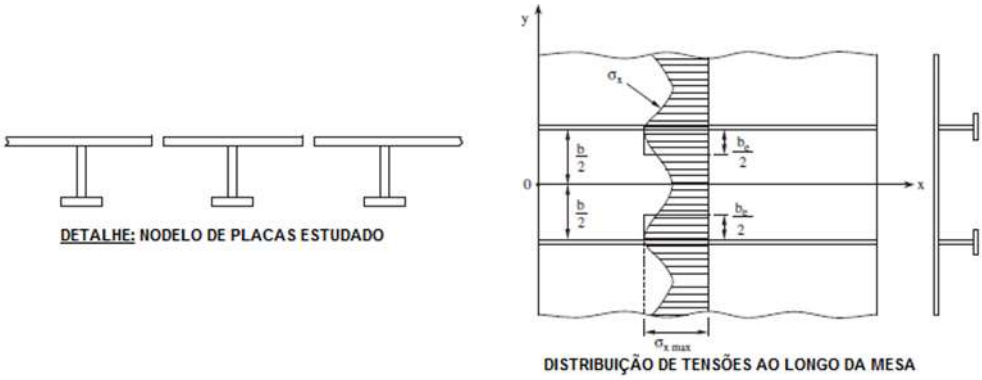


Figura 9– Distribuição de tensões na laje por KEE PAIK (2008)

As pesquisas de Rieg [10] verificaram de maneira analítica e experimental a largura efetiva da mesa de seis vigas, que foram devidamente instrumentadas no laboratório da universidade de Stuttgart. A Figura 10 mostra uma das estruturas ensaiadas pelo autor.

Figura 10– Largura colaborante segundoRieg [10]

Os modelos eram constituídos por perfil “I” de aço e a mesa era composta por laje de concreto, cuja largura total variou de 4,25m a 5,40m. Foi mantido para todas as vigas de teste um comprimento total de viga de 4,25m. A configuração do modelo ensaiado por Rieg [10] é apresentada na Figura 11.

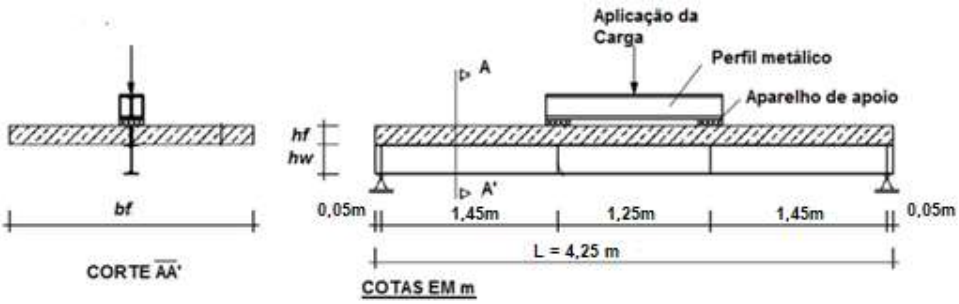


Figura 11– Esquema de ensaio de Rieg [10], adaptado pelo autor

O autor varia em seus ensaios, a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) e a espessura da laje da mesa (h_f), determinando a largura de mesa (b_{ef}) efetivamente mobilizada em cada situação.

As características das vigas ensaiadas pelo autor são apresentadas na tabela abaixo (Tabela 5).

Tabela 5- Resumo dos elementos estudados por Rieg [10]

Viga	Perfil metálico	f_{ck} do concreto (Mpa)	Comprimento total da viga (m)	Largura total da mesa - b_f (m)	Espessura da mesa - h_f (cm)
VT-1	IPE 240	20	4,25	4,00	16,0
VT-2		30		4,00	16,0
VT-3		25		4,00	16,0
VT-4		25		5,40	16,0
VT-5		25		4,00	26,0
VT-6		30		4,00	26,0

Ao analisar os resultados experimentais e compará-los com resultados obtidos analíticamente o autor conclui, que a espessura da mesa (h_f) tem uma influência direta na largura efetiva (b_{ef}), assim como tipo de carregamento.

Além disso, concluiu que a abertura das fissuras na mesa de concreto torna a análise de estruturas mistas mais complexa de ser representada em modelos analíticos.

A influência do tipo de carregamento na determinação da largura efetiva, de acordo com os estudos de Rieg [10], é representada na Figura 12.

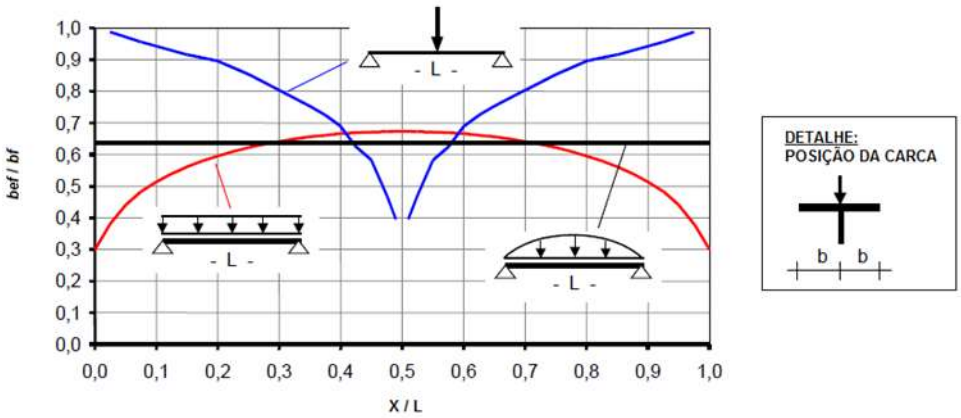


Figura 12– Influência do tipo de carregamento na largura efetiva, segundo Rieg [10]

Os resultados de largura efetiva de vigas mistas, obtidos pelo autor encontram-se resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo das larguras efetivas b_{ef} encontradas por Rieg [10]

Viga	Largura efetiva da mesa b_{ef} (m)	Relação b_{ef} / b_f	Largura total da mesa b_f (m)
VT-1	1,38	0,35	4,00
VT-2	1,74	0,44	4,00
VT-3	Não apresentados pelo autor		4,00
VT-4	3,29	0,61	5,40
VT-5	2,56	0,64	4,00
VT-6	2,28	0,57	4,00

No ano de 2006, CASTRO *et al* realizaram pesquisa sobre a determinação da largura efetiva *(b_{ef})* em vigas mistas. O modelo consiste de uma laje de concreto de 12 centímetros de espessura e um perfil IPE 300. A largura total da laje é de 2,5 metros. O vão considerado é de 6,0 metros.

Esses autores utilizaram um aço com limite de escoamento de 275 MPa, e concreto com resistência à compressão de 30 Mpa e à tração 2 MPa. Para a análise do modelo de Elementos Finitos, os autores utilizaram o software ADAPTIC [11].

O modelo estudado por CASTRO *et al* (2006) é apresentados na Figura 13.

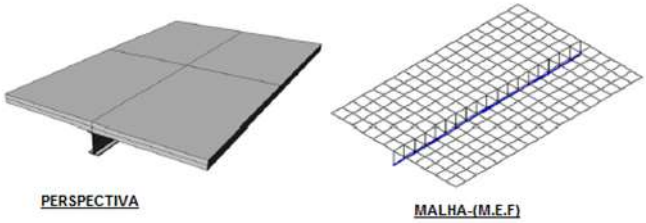


Figura 13– Modelo estudado por CASTRO *et al* (2006), adaptado pelo autor

Os autores basearam seus estudos numéricos na variação de três parâmetros: O primeiro deles foi a largura total da mesa (b_f = 1,50m, b_f = 2,50m e b_f = 3,50m), mantendo-se constante a espessura da mesa 0,12 m; o segundo parâmetro foi à altura total da mesa tendo h_f= 8,0 cm, h_f= 12,0 cm e h_f=15,0 cm; o terceiro parâmetro alterado foi a medida do vão, de L=6,0m para L=10,0m.

AFigura 14 apresenta os resultados da variação do primeiro parâmetro estudado.

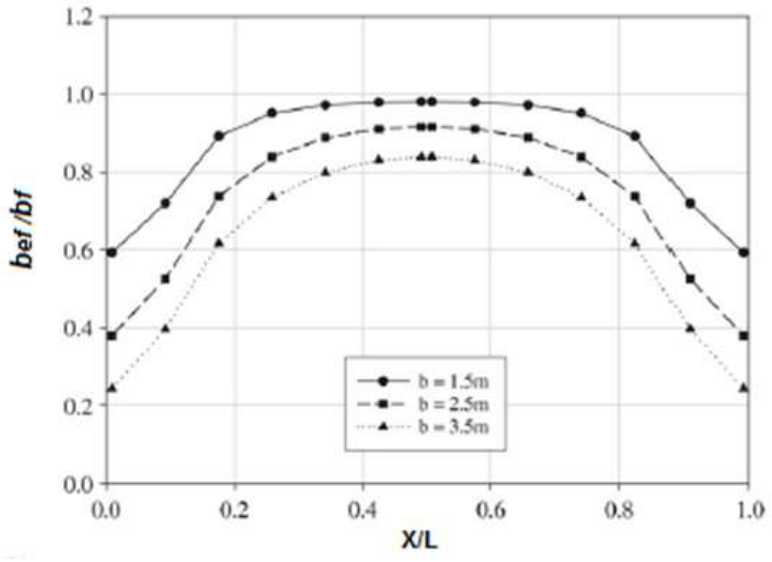


Figura 14 – Comparativos b_{ef} / b_f,obtidos por CASTRO *et al* (2006), para vigas com h_f = 12 cm, variando-se b_f

O gráfico ilustrando a análise do segundo parâmetro variado por CASTRO *et al* (2006) são apresentados na Figura 15.

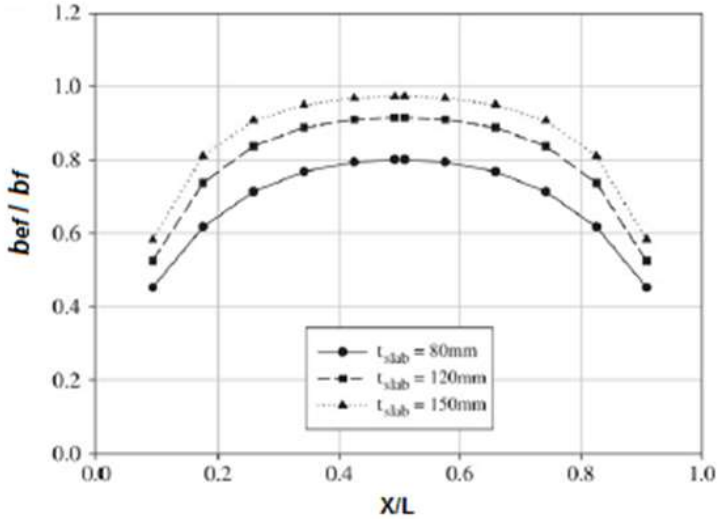


Figura 15 – Comparativos b_{ef} / b_f, por CASTRO *et al* (2006), para vigas com b_f=1,5m, variando-se h_f

O gráfico ilustrando a análise do terceiro parâmetro variado por CASTRO *et al* (2006) é apresentado na Figura 16. Nesse caso, o autor fixou h_f = 12 cm, b_f =1,50m e variando o vão.

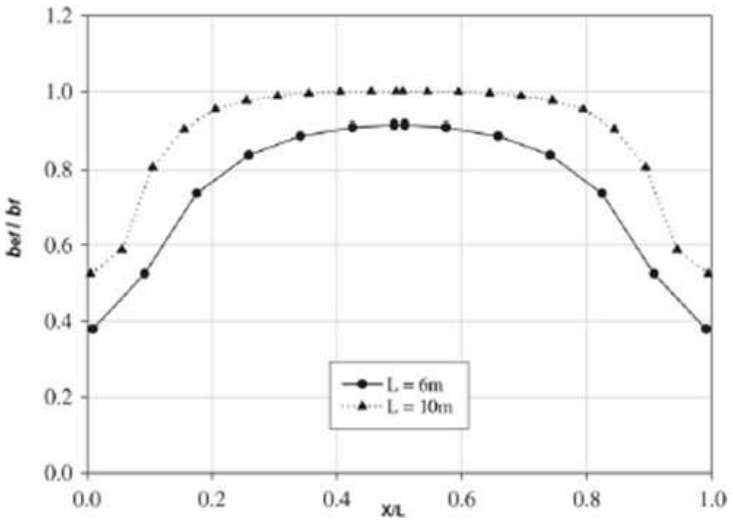


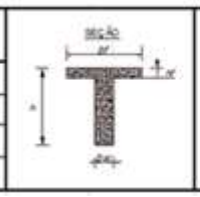
Figura 16 –Comparativos b_{ef} / b_f ,obtidos por CASTRO *et al* (2006), para vigas com b_f=1,5m, variando-se o vão

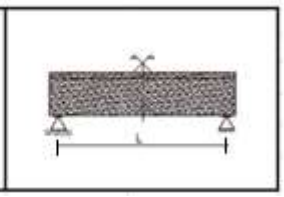
Os autores concluíram em seu estudo que a largura efetiva não depende só da largura total da mesa (b_f), sendo influenciada também pela espessura da mesa (h_f) e pelo vão. Cabe ressaltar, que esses autores limitaram suas análises a carregamentos uniformemente distribuídos. Concluíram, também, que a redistribuição de esforços na mesa é mais acentuada após o início da fissuração do concreto.

Em 1986, Loo e Sutandi [12] publicaram um artigo onde foi realizado um estudo paramétrico, propondo formulações para a determinação da largura efetiva na mesa de seções “T”. Esses autores basearam seus estudos na variação da relação entre parâmetros que se encontra resumida na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos parâmetros estudados por Loo e Sutandi [12]

Relações entre Parâmetros	Valores analisados		
b_f / L	0,25	0,50	0,75
L/h	10,00	15,00	20,00
b_w / h	0,250	0,375	0,500
h_f / h	0,20	0,30	0,40





Além da variação dos parâmetros indicados na tabela anterior, os autores propuseram como parâmetro a variação do tipo de carregamento, conforme indicado na Figura 17.

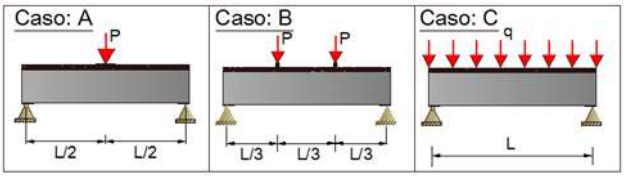


Figura 17 – Carregamentos estudados por Loo e Sutandi [12]

Os autores analisaram seis modelos de vigas, com o objetivo de realizar um estudo paramétrico utilizando o processo de regressão linear. As características desses modelos foram resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões dos modelos de Loo e Sutandi [12]

Modelo	Tipos de carregamento	Vão L (m)	Largura da Mesa b_f (cm)	Largura da alma b_w (cm)	Espessura da Mesa h_f (cm)	Altura total h (cm)
1	Centro da viga	2,70	84,00	10,50	3,70	19,00
2	Terços da viga	2,70			2,50	17,75
3	Centro da viga	2,70			2,45	17,70
4	Terços da viga	2,70			2,40	17,60
5	Centro da viga	1,35			2,45	17,60
6	Centro da viga	1,35			3,70	18,85

Com a utilização do método dos elementos finitos, os autores constataram que a distribuição de tensões na mesa altera-se conforme o tipo de carregamento aplicado (pontual, conforme os casos A e B; ou distribuída na mesa conforme o caso C). Essa distribuição de tensões diferenciada é apresentada na Figura 18.

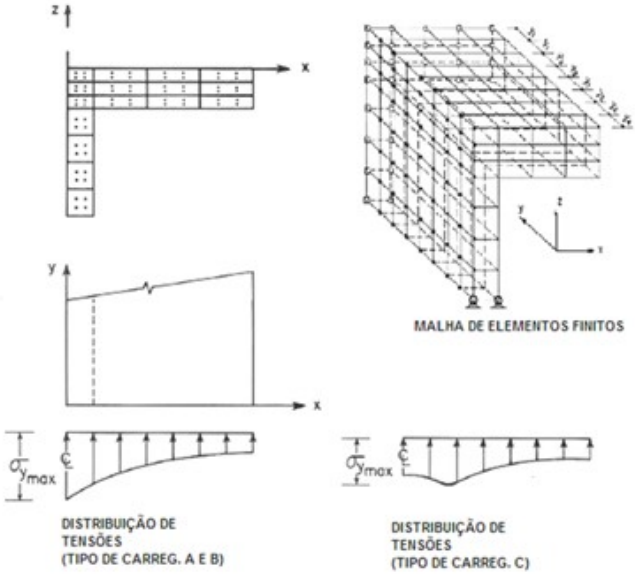


Figura 18 – Distribuição de tensões em metade da viga por Loo e Sutandi [12]

Com a utilização do processo de regressão linear e do MEF, os autores chegaram a resultados que se encontram agrupados na Tabela 9. Nessa tabela, os resultados obtidos por Loo e Sutandi [12] são comparados com os resultados experimentais e com a prescrição normativa (CEB [2]).

Tabela 9 -Resumo dos resultados de Loo e Sutandi [12]

Modelo	Resultados experimentais b_{ef} / b_f	Resultados MEF b_{ef} / b_f	Resultados R.Linear b_{ef} / b_f
1	0,73	0,77	0,57
2	0,77	0,77	0,61
3	0,82	0,76	0,54
4	0,78	0,77	0,61
5	0,51	0,51	0,41
6	0,57	0,53	0,43

1.2. Prescrições Normativas sobre Largura Efetiva

1.2.1. Prescrições da Norma Brasileira (NBR-6118/2014)

De acordo com a NBR-6118 (2014) [1], a consideração da seção “T” pode ser feita para estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e

deslocamentos na estrutura, de uma forma mais realista, no lado da viga em que houver laje colaborante.

A largura colaborante da laje b_f é obtida pela largura da viga b_w acrescida de no máximo 10% da distância *a* entre pontos de momento fletor nulo, para cada lado da viga em que houver laje colaborante.

Ainda de acordo com a norma brasileira, a distância *a* pode ser estimada, em função do comprimento *L* do tramo considerado, como se apresenta a seguir:

– viga simplesmente apoiada: $a = 1{,}00L$

– tramo com momento em uma só extremidade: $a = 0{,}75L$;

– tramo com momentos nas duas extremidades: $a = 0{,}60L$;

– tramo em balanço: $a = 2{,}00L$

Alternativamente, a distância *a* pode ser obtida mediante exame dos diagramas de momentos fletores na estrutura.

No caso de vigas contínuas, permite-se calculá-las com uma largura colaborante única para todas as seções, inclusive nos apoios sob momentos negativos, desde que essa largura seja calculada a partir do trecho de momentos positivos onde a largura resulte mínima.

Devem ser respeitados os limites b_1 e b_3 conforme indicado na Figura 19.

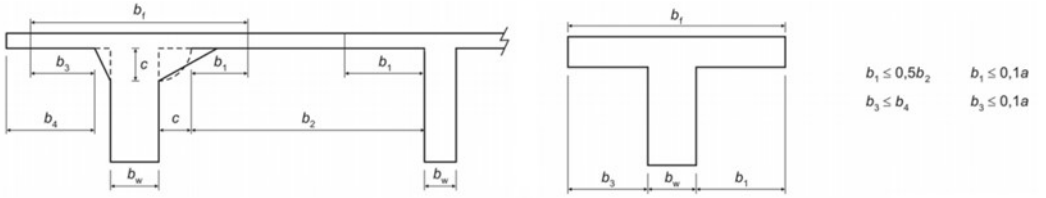


Figura 19 – Largura colaborante adotada pela NBR-6118 (2014) [1]

1.2.2. Prescrições da norma Americana – ACI-318 (2006)

A norma Americana ACI-318 (2006) [3] recomenda alguns cuidados a serem observados na execução de vigas com seção “T”. Essas recomendações foram transcritas abaixo:

1. Na seção T, a mesa e alma devem ser construídos integralmente ou de outra maneira ligados em conjunto de forma eficaz.

2. Largura da laje colaborante de uma viga T não deve exceder um quarto do comprimento do vão da viga, e a largura do flange colaborante em cada lado da alma não deve exceder:

a) oito vezes a espessura da laje *e*

b) uma vez e meia a distância livre de entre vigas

• Para vigas com uma laje de um só lado, a largura considerada como colaborante não deve exceder:

a) um décimo do comprimento do vão da viga;

b) seis vezes a espessura da mesa *e*;

c) a metade da distância livre entre vigas.

3. Em vigas isoladas, onde o formato de "T" é utilizado para fornecer uma mesa como área de compressão adicional, a largura colaborante deve ser inferior a quatro vezes a espessura da alma.
4. As armaduras transversais devem ser calculadas para transportar o total das cargas sobre a largura.
5. Para outras vigas "T" com armaduras auxiliando na compressão da mesa, toda a largura da mesa deverá ser considerada como colaborante.
6. Nos casos em que houver necessidade de armadura de cisalhamento, a mesma não deve ser mais espaçada do que cinco vezes a espessura da laje, sendo este valor sempre inferior 45 cm.

1.2.3. Prescrições da norma Européia – EUROCODE (2004)

A norma européia EUROCODE (2004) [13] recomenda alguns cuidados a serem observados na execução de vigas com seção "T". Essas recomendações encontram-se transcritras abaixo:

A largura colaborante da mesa b_{ef}, deve basear-se na distância entre os pontos de momento nulo e bordos da viga, chamada nesse código de L_0, como mostrado na Figura 20 e na Figura 21. As relações entre os vãos e a largura a ser considerada como efetiva podem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$b_{eff} = b_w + b_{eff,1} + b_{eff,2} \quad (1)$$

$$b_{eff,1} = (0{,}2b_1 + 0{,}1L_0), \text{ sendo que } \leq 0{,}2L_0 \text{ e} \leq b_1 \quad (2)$$

Onde:

$b_{eff,\ 2}$ pode ser calculado de maneira similar ao $b_{eff,1}$, mas substituindo-se o valor de b_1 por b_2.

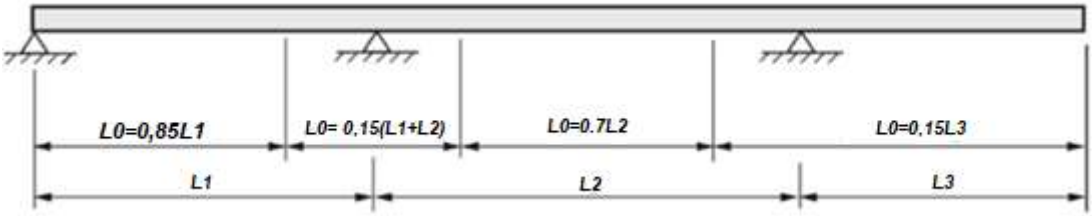


Figura 20 - Distancia entre apoios, para determinação da largura colaborante

As distancias denominadas de $b_{eff,\ 1}$e $b_{eff,\ 2}$, b_1 e b_2 são ilustradas na Figura 21.

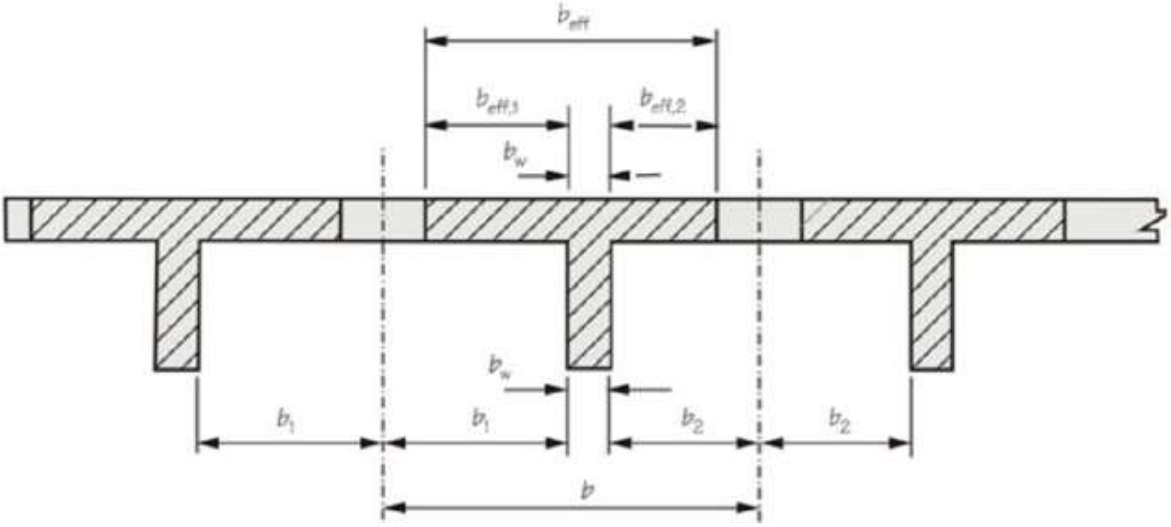


Figura 21- As distancias $b_{eff,\ 1}$,$b_{eff,\ 2}$, b_1 e b_2 do EUROCODE [13]

1.2.4. <u>Prescrições da norma Britânica – British Standards BS-8110</u>

De acordo com a norma britânica BS-8110, quando não houver a possibilidade de uma determinação mais precisa da largura colaborante em uma seção “T” ou “L”, devem ser adotados os seguintes valores de b_{eff}:

a) Para vigas com seção “T”: Adotar a largura da alma acrescida deL_Z / 5 ou largura, ou adotar a largura total da mesa quando L_z resultar menor do que esse valor;

b) Para vigas com seção “L”: Adotar a largura da alma acrescida de L_Z /10, ou a largura total da mesa quando L_z resultar menor do que esse valor;

Onde:

L_Z = é a distância entre pontos de momento nulo, o que, para uma viga contínua, pode ser tomado como 0,7 vezes a largura total da mesa.

1.2.5. Prescrições da norma Alemã – DIN 4224

De acordo com Leonhardt [14], a norma alemã DIN 4224 propõe a seguinte formula empírica para a determinação da largura colaborante:

$$b_{ef} = \frac{1}{3} L_0 \tag{3}$$

Onde:

L_0 é a distância entre pontos de momento nulo. Por simplificação a norma permite a adoção dos seguintes valores de l_0:

- Em vigas de um só vão – $L_0=L$;
- Em vigas em balanço (com laje comprimida) – $L_0 = 1,5L$;
- Em vão internos de vigas continuas – $L_0 = 0,6L$;
- Em vão extremos de vigas continuas – $L_0 = 0,8L$.

O cálculo de valores mais precisos adotado pela norma alemã é baseado nas pesquisas de Brendel [15] que sugere a adoção de coeficientes que servem somente quando não existirem cargas concentradas.

A largura colaborante de uma seção “T” deverá ser tomada utilizando as seguintes expressões:

- Para vigas isoladas e vigas de bordo: $b_{ef} = b_0 + b_{m1} + b_{m2}$;
- Para vigas isoladas e vigas internas: $b_{ef} = b_0 + b_{m2} + b_{m3}$.

Com distâncias b_{m1}, b_{m2} e b_{m3} indicadas na figura a seguir (Figura 22).

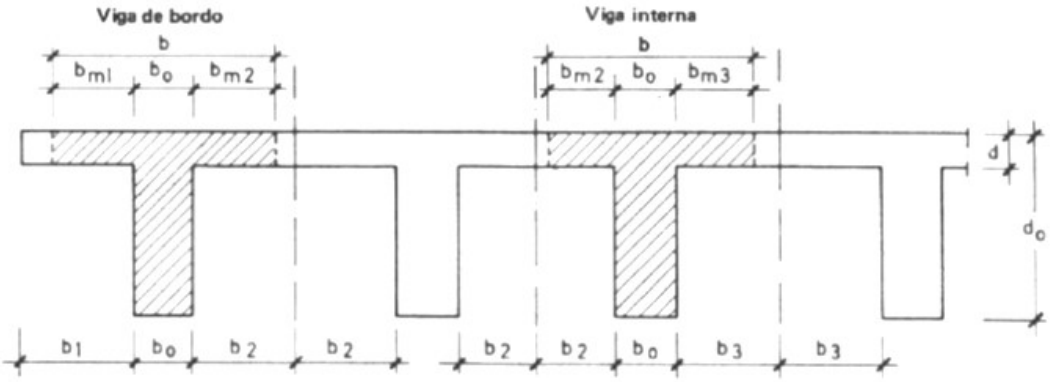


Figura 22- As distâncias b_{m1}, b_{m2} e b_{m3} da DIN 4224

Quando existe carga concentrada aplicada na viga, ou nas regiões próximas aos apoios, ocorre uma redução na largura efetiva (ou colaborante) das vigas T. Essa redução foi estudada por Metzer [5] e por uma questão de simplificação aparece indicada na norma alemã como 40% da largura total da mesa. A redução na largura efetiva é apresentada na Figura 23.

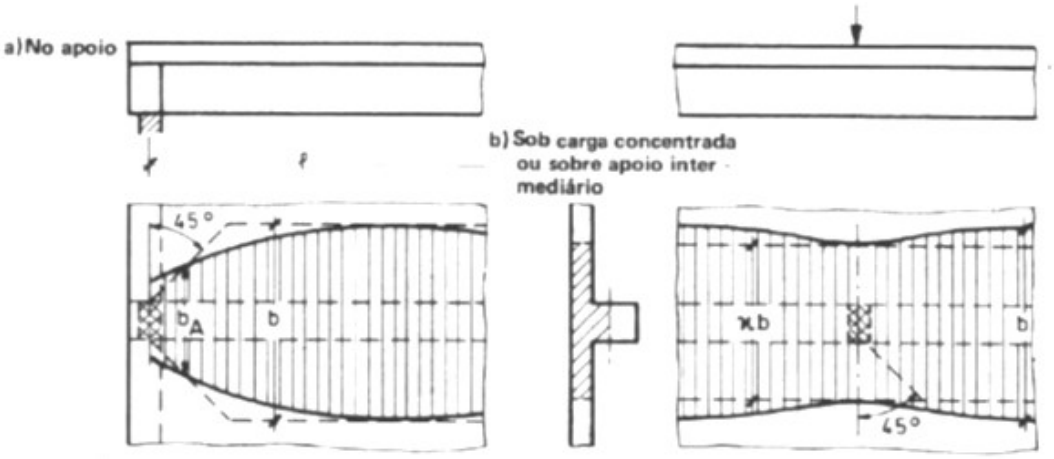


Figura 23– Redução da largura colaborante da laje em região de carga concentrada de acordo com Leonhardt [14]

De acordo com a DIN 4224, a redução da largura colaborante da laje (b_{red}) pode, também, ser calculada de maneira mais precisa pela expressão a seguir:

$$b_{red} = \frac{M_q + 0{,}6M_P}{M_q + M_P} b \tag{4}$$

Onde:

M_q – parcela de momentos devido a ação de cargas distribuídas;

M_p – parcela de momentos devido a ação de cargas concentrada;

b – largura total da mesa da viga.

1.3. Métodos Para Determinação Da Largura Efetiva

1.3.1. Métodos Utilizando a Curva de Tensões

De acordo com Rüsch [6], o valor da largura efetiva pode ser obtido integrando-se a área sob a curva de tensões σ_x, e dividindo-se este valor pela tensão máxima σ_{max}, conforme o ilustrado na Figura 24.

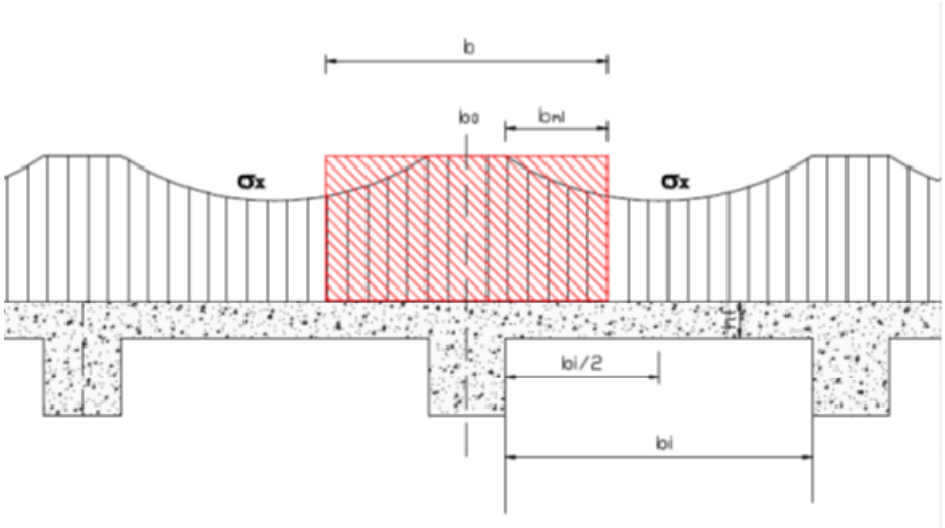


Figura 24– Largura efetiva.

Neste caso, a largura da laje colaborante é dada por:

$$b_{ef} = \frac{\int_0^{b_i/2} \sigma_x \, dy}{\sigma_{max}} \tag{5}$$

Onde:

b_{ef} é a largura efetiva de mesa;

$\sigma_x.dy$ é a integral da área sob a curva de tensões σ_x;

σ_{max} é a tensão máxima na mesa.

O mesmo conceito de largura efetiva apresentado foi utilizado por Salamana e Nassif [8] em seu estudo, que utilizando vigas metálicas e lajes de concreto, empregou equação idêntica à apresentada acima para comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e valores numéricos calculados com a utilização de programa de elementos finitos.

Os parâmetros considerados no estudo de Salamana e Nassif [8] foram: a largura colaborante da laje de concreto, a porcentagem de pinos conectores utilizados e a variação da seção da viga de aço.

A mesma metodologia de cálculo através da integração da curva de tensões proposta por Rüsch [6] pode ser utilizada também para chapas finas, conforme o apresentado no estudo desenvolvido por Jeom [16], combinando vigas metálicas unidas por chapa de aço, conforme figura reproduzida abaixo.

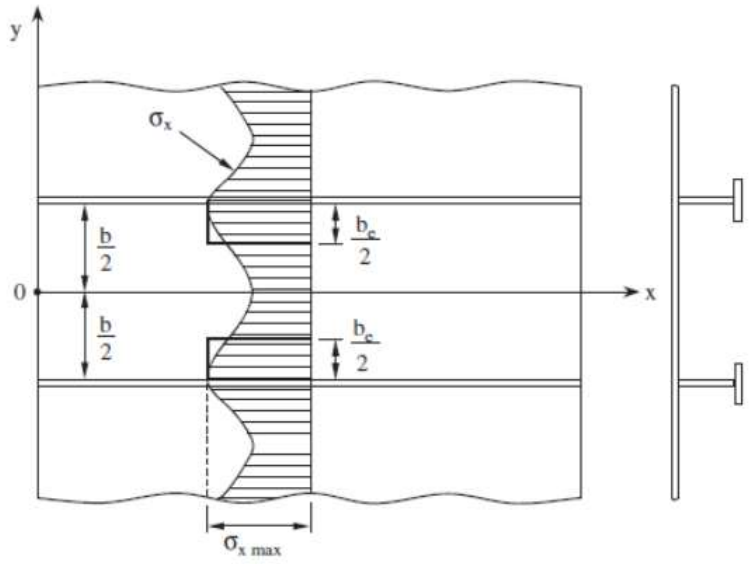


Figura 25 - Distribuição de tensões na estrutura composta por vigas e chapa de aço

Os autores Chen *et al* [17] propõe um conjunto de expressões diferentes, levando-se em consideração se a região que está sendo avaliada é de momentos positivos ou negativos. Para as regiões de momentos positivos, a expressão proposta é abaixo reproduzida.

$$b_{ef} = \frac{C_{slab}}{F} = \frac{C_{slab}}{0{,}5t_{slab}\left(\sigma_{max} + \sigma_{min}\right)} \tag{6}$$

Onde:

C_{slab} é a resultante de compressão no concreto;

F é a força por unidade de largura da laje;

t é a espessura da mesa comprimida de concreto;

σ_{max} é tensão máxima de compressão (na parte superior da mesa);

σ_{min} é tensão mínima de compressão (na parte inferior da mesa).

Foi transcrita a seguir a figura apresentada pelos autores (Figura 26).

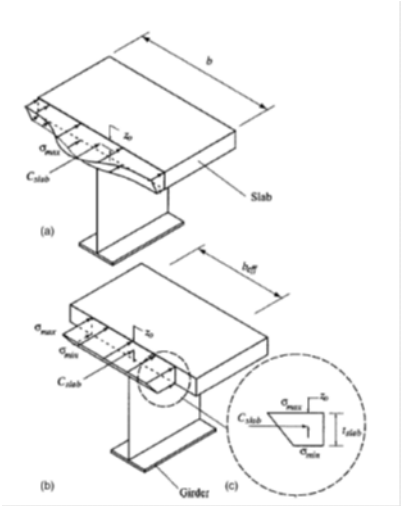


Figura 26– Largura colaborante para regiões de momento positivo (Chen *et al* [18])

Para as regiões de momentos fletores negativos, de acordo com o proposto por Chen *et al* [18] pode ser utilizada a seguinte expressão para a determinação da largura colaborante efetiva.

$$b_{ef} = \frac{T_{total}}{F} = \frac{T_{total}}{0{,}5t_{slab}\left(\sigma_{max} + \sigma_{min}\right) + T_{rebar_top} + T_{rebar_bot}} \tag{7}$$

Onde:

T_{total} é a resultante das forças atuantes no concreto;

F é a força por unidade de largura da laje;

t é a espessura da mesa comprimida de concreto;

σ_{max} é tensão máxima de compressão (na parte superior da mesa);

σ_{min} é tensão mínima de compressão (na parte inferior da mesa);

T_{rebar_top} é força por unidade de largura nas armaduras do bordo superior da mesa;

T_{rebar_bot} é força por unidade de largura nas armaduras do bordo inferior da mesa.

Os autores Chen *et al* [18] também fizeram um estudo paramétrico para determinação da largura colaborante em estruturas de pontes mistas (concreto e aço), utilizando o software ABAQUS [9]. Neste estudo foram feitas ao todo 240 análises, incluindo a comparação com resultados experimentais.

1.3.2. Método Utilizando as Deflexões (Flechas)

Uma das maneiras de determinar-se a largura efetiva da mesa de uma seção T é a utilização das expressões do campo de deslocamentos da viga. Esses campos de deslocamentos podem ser obtidos por meio de expressões já consagradas da mecânica dos sólidos, tais como as apresentadas por Timoshenko [19].

Esse método foi utilizado por Küçükarslan [20], que para os diversos tipos de carregamentos e condições de contorno apresentou várias formulações para a obtenção da largura efetiva, utilizando os campos de deslocamentos. Algumas das expressões utilizadas por esse autor serão apresentadas nos itens a seguir.

1.3.2.1. Para Vigas com Três Apoios e Carga Concentrada

Para duas cargas concentradas (Figura 27), aplicadas no meio de cada tramo da viga, conforme Küçükarslan [20], integrando-se a curva elástica, obtêm-se a expressão do campo de deslocamentos.

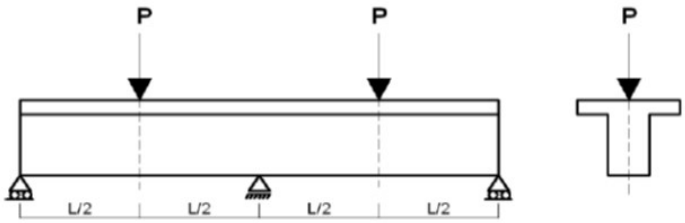


Figura 27– Viga com dois tramos e cargas concentradas utilizado por Küçükarslan [20]

A expressão obtida através da integração da equação de linha elástica e da aplicação das condições de contorno, para um intervalo $L/2 \leq x \leq L$ é apresentada a seguir:

$$v(x) = \frac{P}{96EI}\left\{5x^3 - 16\left(x - \frac{L}{2}\right)^3 - 3L^2x\right\} \tag{8}$$

1.3.2.2. Para Vigas com Três Apoios e Carga Distribuída

Para cargas uniformemente distribuídas, aplicadas ao longo da mesa (figura a seguir), conforme apresentado por Küçükarslan [20], integrando-se a equação de linha elástica obtêm-se a expressão do campo de deslocamentos.

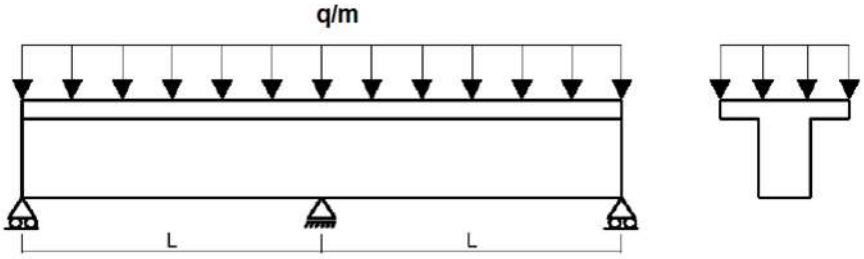


Figura 28– Viga com dois tramos e carregamento distribuído utilizado por Küçükarslan [20]

A equação do campo de deslocamentos da viga, no ponto de maior deslocamento (x = 0,422 L), será dada pela expressão a seguir.

$$|v|_{max} = -5{,}416 \times 10^{-3} \frac{wL^4}{EI} \tag{9}$$

1.3.2.3. Para Vigas com Dois Apoios e Carga Concentrada

Para uma viga biapoiada sujeita a carga concentrada, aplicada no meio do vão (figura 29), obtem-se o expressão do campo de deslocamentos através da teoria da mecânica dos sólidos, tal como a proposta por Timoshenko [19] e transcrita a seguir (equação 10).

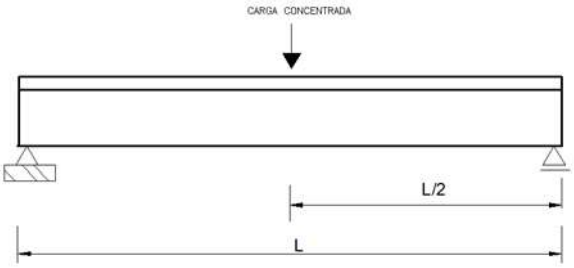


Figura 29 - Viga com carga concentrada no meio do vão

$$v(x)_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \tag{10}$$

Onde:

$V(x)_{max}$ – Deslocamento máximo (que ocorre em x= *L/2*)

P – Carga concentrada (aplicada em *L/2*);

L – Vão de cálculo da viga;

E – Módulo de Elasticidade do concreto (obtido experimentalmente);

I – Momento de Inércia da seção T, dado pela expressão extraída de Carvalho e Figueiredo [26], transcrita a seguir:

$$I = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f.\left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w.h.\left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad (11)$$

Onde:

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w).\left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w.\frac{h^2}{2}}{A_g} \quad (12)$$

$$A_g = (b_f - b_w).h_f + b_w.h$$

1.3.2.4. Para Vigas com Dois Apoios e Carga Uniformemente Distribuída

O campo de deslocamentos de uma viga biapoiada sujeita a carga uniformemente distribuída, aplicada ao longo da alma ou na mesa da viga (Figura 30), pode ser obtido através de expressão apresentada por Timoshenko [19] e transcrita a seguir (equação 13).

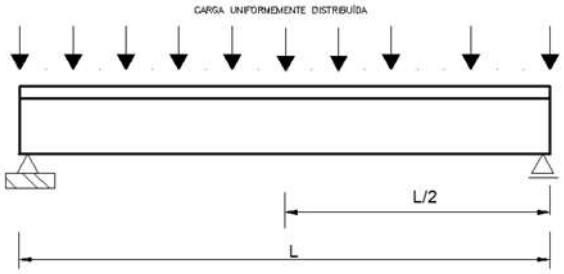


Figura 30– Viga com carga distribuída ao longo do vão

$$v(x)_{max} = \frac{5QL^4}{384EI} \quad (13)$$

Onde:

$v(x)_{max}$ – Deslocamento máximo (que ocorre em x = *L/2*);

Q – Carga Uniformemente Distribuída;

L – Vão de cálculo da viga;

E – Módulo de Elasticidade do concreto (obtido experimentalmente);

I – Momento de inércia da seção “T”, dado pela equação 11, apresentada anteriormente.

O procedimento para determinação da largura efetiva, por meio das flechas, será utilizado no item 3.4 dessa tese. Nesse estudo, o procedimento adotado foi o cálculo das larguras efetivas utlizando a aplicação dos valores experimentais das flechas nas expressões do campo de deslocamentos, considerando o tipo de carregamento e as condições de contorno de cada viga.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Modelos Propostos e Parâmetros de Estudo

Os modelos propostos serão compostos por vigas de seções “T” em concreto armado, com comprimento de total de 210 cm, resultando em um vão finais de cálculo de 200 cm.

A resistência à compressão do concreto foi fixada em 35 MPa. Esse parâmetro foi mantido fixo para todos os modelos, pois de acordo com estudos já mencionados não há grande influência da resistência do concreto na determinação da largura efetiva da mesa.

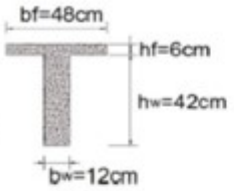
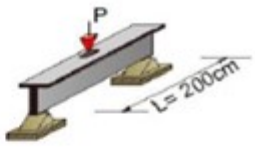
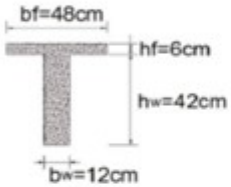
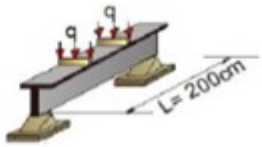
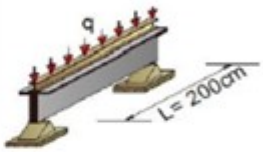
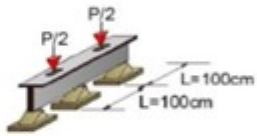
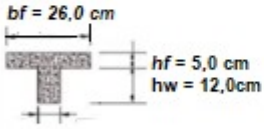
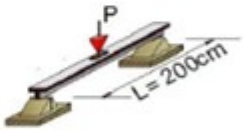
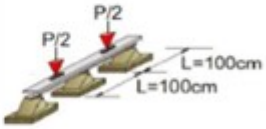
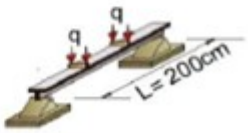
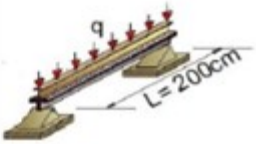
Nesse estudo foram usadas as seguintes relações:

- b_f/L – relação entre largura total da mesa e comprimento do vão, variando de 0,13 a 0,48;
- L/h – relação entre vão e altura total da viga, variando de 2,08 a 11,77;
- b_w/h – relação entre largura da alma e altura total da viga, variando de 0,25 a 0,41;
- h_f/h – relação entre a espessura da mesa e altura total da viga, variando de 0,10 a 0,29;
- Tipo e posição de carregamento aplicado na viga, cujos detalhes de aplicação são detalhados no item seguinte.

Para a avaliação da influencia desses parâmetros foram confeccionados os modelos experimentais que foram denominados como: **M-I, M-II, e M-III**. Nesses modelos, os carregamentos aplicados foram sempre monotônicos, com o ponto de aplicação variando de acordo com a viga que se estava ensaiando.

Os detalhes das armaduras transversais e longitudinais dos modelos I, II e III são apresentados no anexo B, que encontra-se ao final desse texto. As características geométricas de cada modelo são apresentadas na Tabela 10:

Tabela 10 - Características dos modelos estudados

Modelo de Viga	Número de Viga	Relações de Parâmetros Estudados				Detalhe da Seção	Detalhe do Tipo de Carregamento
		b_f/L	L/h	b_w/h	h_f/h		
M-I	V-1	0,24	4,2	0,25	0,13		
	V-2	0,24	4,2	0,25	0,13		
	V-3	0,24	4,2	0,25	0,13		
M-II	V-1	0,24	4,2	0,25	0,13		
	V-2	0,24	4,2	0,25	0,13		
	V-3	0,48	2,08	0,25	0,13		
M-III	V-1	0,13	11,77	0,41	0,29		
	V-2	0,26	5,88	0,41	0,29		
	V-3	0,13	11,77	0,41	0,29		
	V-4	0,13	11,77	0,41	0,29		

2.2. Instrumentação das Vigas para Verificação das Deformações

Uma viga com seção “T” quando sujeita a um carregamento distribuído ou concentrado apresenta um estado de tensões normais que age ao longo da mesa, bem como de tensões cisalhantes agindo na interface alma/mesa da seção. Esse estado de tensões é apresentado por Rusch [6] e por Bernat e Canet [21], sendo mostrado na Figura 31.

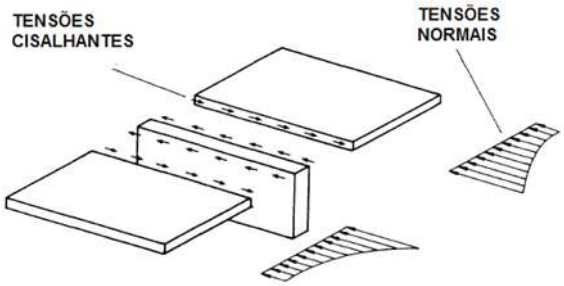


Figura 31– Distribuição de tensões em uma seção “T”

No entanto, a maneira mais usual de obtenção dessas tensões é feita por intermédio das deformações. Esse procedimento já é bastante consagrado, tendo sido utilizado por WIESE (1964) em seus estudos (Figura 32).

Figura 32– Instrumentação utilizada por WIESE (1964)

As deformações verificadas na viga podem ser convertidas em tensões, por meio de equações físicas adequadas para o concreto. No entanto as expressões desenvolvidas nessa lei somente são válidas na fase elástica dos materiais. Para a fase plástica torna-se necessária a utilização de outras expressões, que serão abordadas nesse texto mais adiante.

A obtenção das deformações foi através de extensômetros de resistência elétrica (strain gages), colados nos pontos onde se deseja conhecer as deformações.

.

Nas armaduras longitudinais dos modelos I, II e III foram colados extensômetros, que posteriormente receberam proteção mecânica com a aplicação de resina e borracha de silicone, que são fabricadas para essa finalidade. O aspecto da instrumentação de uma das armaduras instrumentadas é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Armaduras longitudinais e instrumentação da viga- Modelo III.

Nas vigas com dois apoios, sujeitas a cargas concentradas na mesa, os strain gages foram posicionados a L/4 e L/2 (ao lado da placa de aplicação de cargas), conforme Figura 34. Os extensômetros foram dispostos paralelamente à face da mesa da viga, distando entre si aproximadamente 3,5cm.

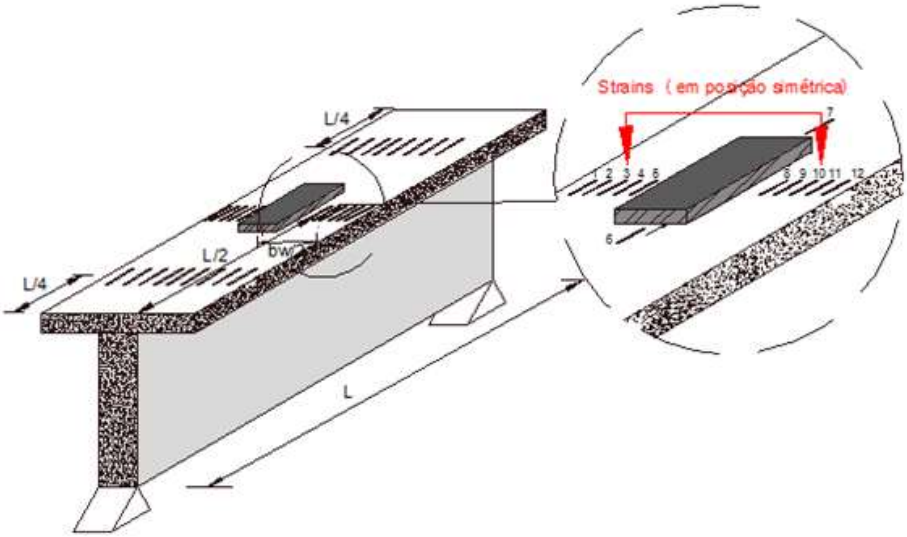


Figura 34 – Instrumentação para vigas com dois apoios e carga pontual.

O aspecto da extensometria realizada na mesa nos modelos II e III de vigas ensaiadas é apresentadona Figura 35.

Figura 35 – Detalhe da instrumentação da viga do modelo I e II.

Nas vigas com três apoios (M-II- Viga V-3 e M-III- Viga V-2), sujeitas a cargas concentradas na mesa, os strain gages foram posicionados em L/4 (ao lado da placa de aplicação de cargas) e no apoio interno, conforme a Figura 36. Os extensômetros foram dispostos paralelamente na superfície da mesa da viga.

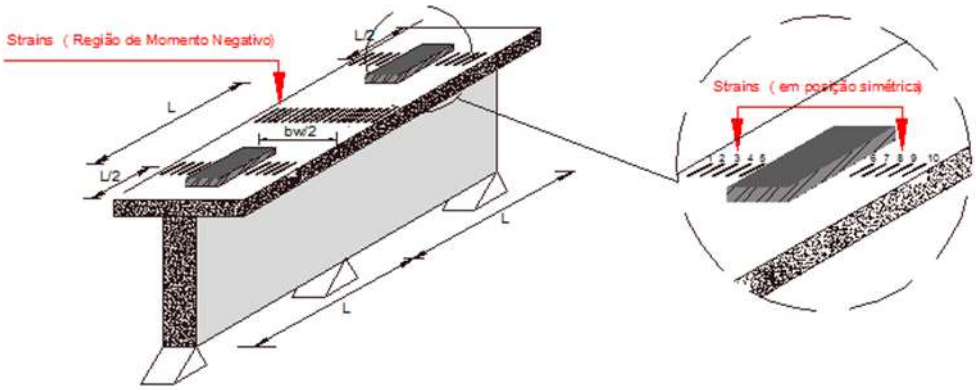


Figura 36 – Detalhes da Instrumentação das vigas com três apoios e cargas pontuais.

Para vigas com dois apoios (Modelo II – Vigas V1 e V2 e Modelo III –Vigas V3 e V4), sujeitas a cargas distribuídas na alma e na mesa, os strain gages foram posicionados de forma idêntica, em L/4 e L/2 conforme a Figura 37. Os extensômetros foram dispostos com a maior dimensão paralela ao comprimento da viga.

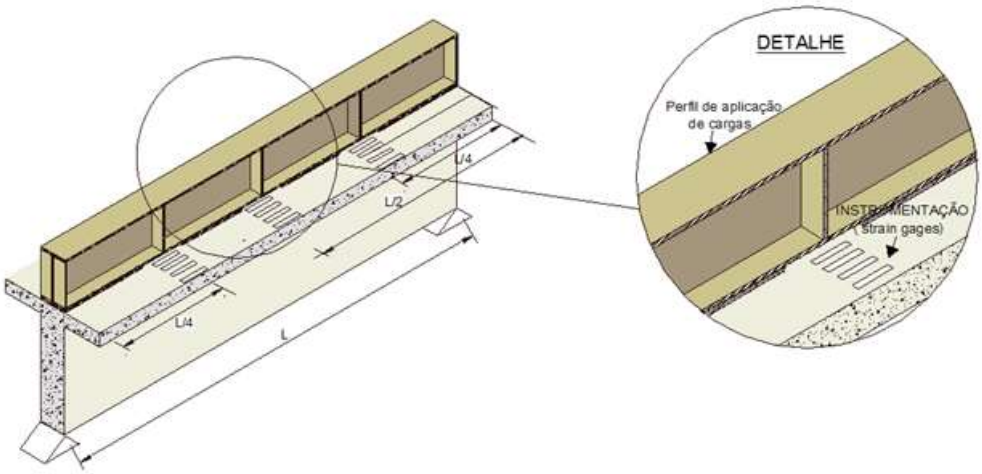


Figura 37 – Instrumentação para vigas com dois apoios e carga distribuída na alma.

O aspecto da disposição da instrumentação de viga com carga distribuída na direção da alma é mostrado na Figura 39.

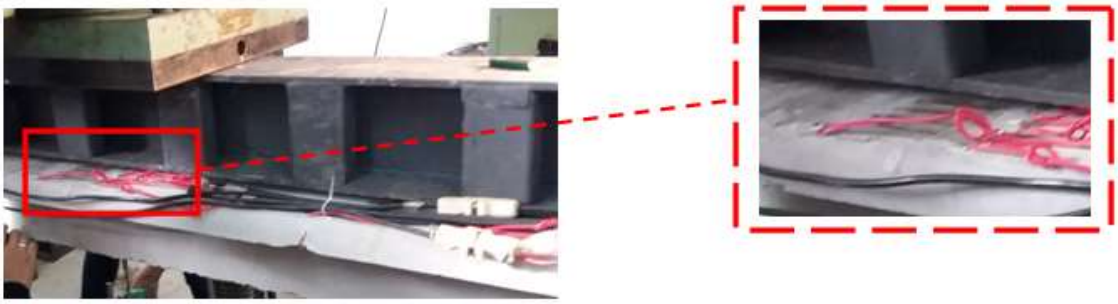


Figura 38– Instrumentação em vigas com carga distribuída na alma.

O equipamento de aquisição de dados utilizado foi da marca NATIONAL INSTRUMENTS, modelo PXI 1050, com capacidade de leitura de 24 canais de extensômetros e 24 canais de deslocamentos. A foto desse equipamento é apresentada na figura 39.

Figura 39 – Equipamento de aquisição de dados

2.3. Ensaios das Vigas do Modelo I

2.3.1 Confecção das Vigas do Modelo I

A apresentação dos resultados das vigas do modelo I não será feita separadamente por tratar-se de vigas com a mesma seção, mesmo tipo de carregamento aplicado, mudando apenas o ângulo de inclinação dos estribos (no caso de M-I- V-3 foi a 90º, e para os demais inclinados sob um ângulo α=45°).

As vigas pertencentes ao modelo I receberam a seguinte nomenclatura:

- Viga M-I- V-1- Viga com estribos contínuos inclinados, e concreto com resistência a compressão (aos 28 dias) de 39,43MPa;
- Viga M-I- V-2- Viga com estribos contínuos inclinados, e concreto com resistência a compressão (aos 28 dias) de 36,81MPa;
- Viga M-I- V-3- Viga com estribos comuns posicionados a 90º, e concreto com resistência a compressão (aos 28 dias) de 38,53MPa.

As vigas possuíam armadura longitudinal idêntica que (detalhada no apêndice A), sendo diferentes apenas na utilização de estribos contínuos e inclinados em duas vigas, e estribos comuns na outra viga (M-I- V-3). A Figura 40 mostra o aspecto de parte da armadura dessa viga.

Figura 40- Viga M-I- V-3–Estribos e barras longitudinais

O detalhe do projeto das armaduras das vigas do modelo 1 é apresentado no anexo B.

A Figura 41 mostra o aspecto dos estribos contínuos utilizados nas vigas M-I- V-1 e M-I- V-2, depois de fixados a duas barras da armadura longitudinal. O detalhe do projeto das armaduras das vigas do modelo 1 é apresentado no anexo B.

A armadura das vigas foram constituídas de quatro barras de 16 mm de diâmetro como longitudinal, dispostas em duas camadas e, na parte superior da viga, foram posicionadas duass barras de 8 mm de diâmetro. Como armaduras longitudinais e transversais foram utilizadas na mesa de 6,3mm de diâmetro.

As vigas dos modelos M-I e M-II possuíam a mesma armadura longitudinal, diferindo nas armaduras transversais, uma vez que as vigas do modelo II tinham maior quantidade de estribos, para evitar a ruptura por cisalhamento prevista para as vigas do modelo I. As três vigas após a concretagem são apresentadas na Figura 41.

Figura 41– Vigas do modelo I após a concretagem.

2.3.2 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo I

As três vigas apresentaram comportamento distinto, mesmo considerando que possuíam armaduras longitudinais idênticas. Provavelmente, isso se deve ao fato de terem sido adotados inclinações diferentes de estribos para as vigas da série I. Por esse motivo, os resultados serão apresentados separadamente nos itens que se seguem.

2.3.2.1 Ensaio da Viga M-I-V-1

A viga M-I-V-1 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira pontual, nos centro do vão. Essa carga foi aplicada na superfície da mesa da viga, através de chapa metálica que media 21cm x 12cm, sendo o seu comprimento 1/10 do comprimento total da viga mostrada na Figura 42.

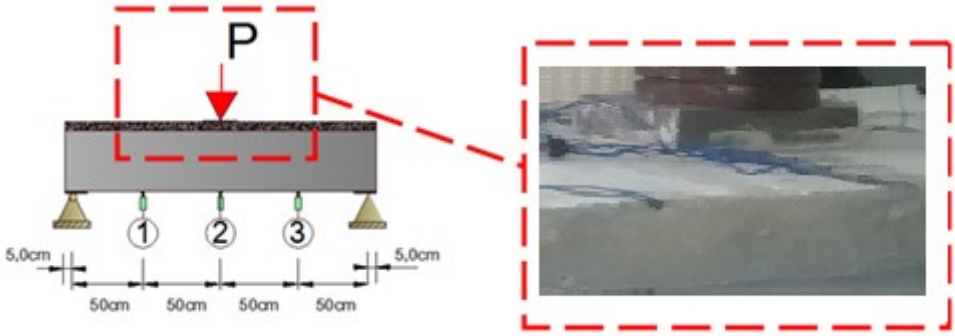


Figura 42 - Esquema da aplicação de cargas.

O aspecto geral da viga MI-V-1, antes do início do ensaio é apresentado na Figura 43.

Figura 43– Viga M-I-V-1 posicionada para ensaio.

Com a finalidade de distribuir melhor os esforços de cisalhamento nos extremos da viga, foram usadas chapas metálicas de ½" de espessura na região dos apoios, conforme mostrado na Figura 44. Esse procedimento foi adotado, após o ensaio de M-I-V-1 que sofreu ruptura localizada na região próxima a um dos apoios.

Figura 44– Chapa posicionada sob os apoios.

As flechas que ocorreram na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores de deslocamento, dispostos nas posições equivalentes a L/2 e L/4. A disposição dos transdutores utilizados está apresentada naFigura 45.

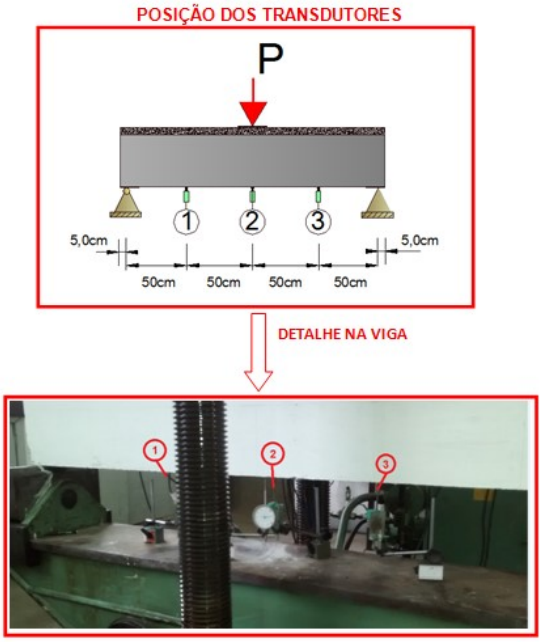


Figura 45– Posição dos transdutores de deslocamento

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas na Figura 46.

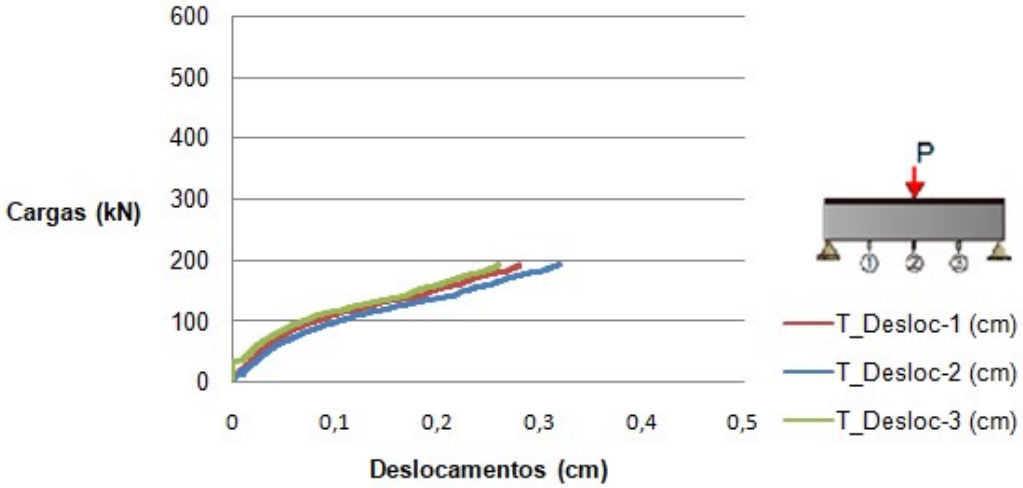


Figura 46– Gráfico carga x deslocamento vertical da viga MI-V-1

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos pré-determinados da mesa. A localização dos strains gages S-1 a S-5 e S-8 a S-12 é apresentada na Figura 47.

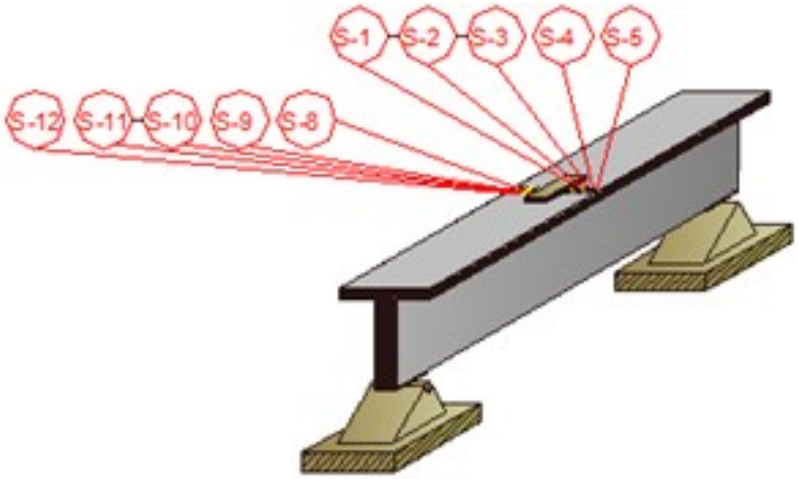


Figura 47– Posição dos strain gage de S-1 a S-5 e S-8 a S-12, na mesa da viga.

As deformações obtidas nos strain gages de S-1 a S-5 são apresentadas no gráfico a seguir (Figura 48). E as deformações de S-8 a S-12 são apresentadas na Figura 49.

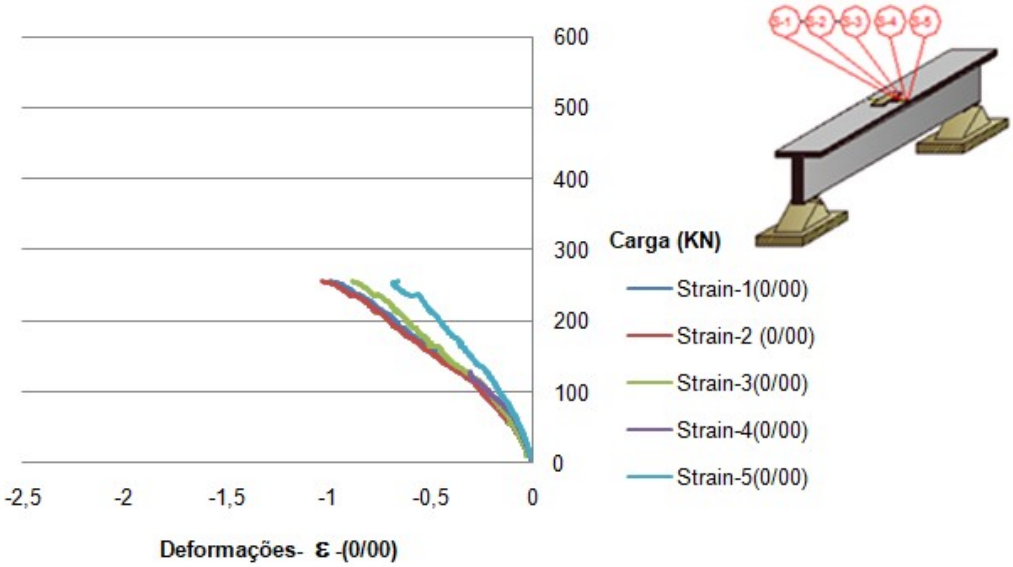


Figura 48 – Curvas carga X deformações de M-I-V-1, strain gagesS-1 a S-5.

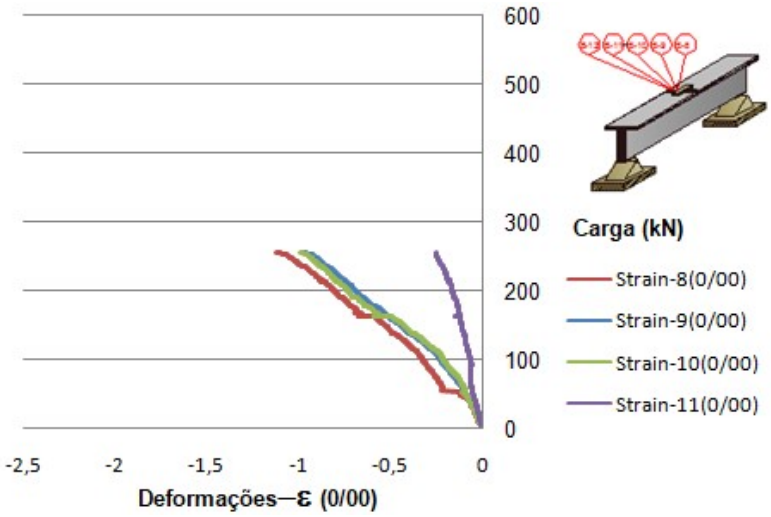


Figura 49– Curvas carga X deformações de M-I-V-1, strain gages S-8 a 12.

As deformações na armadura longitudinal, nos pontos de maior momento fletor (meio do vão) são apresentadas na Figura 50.

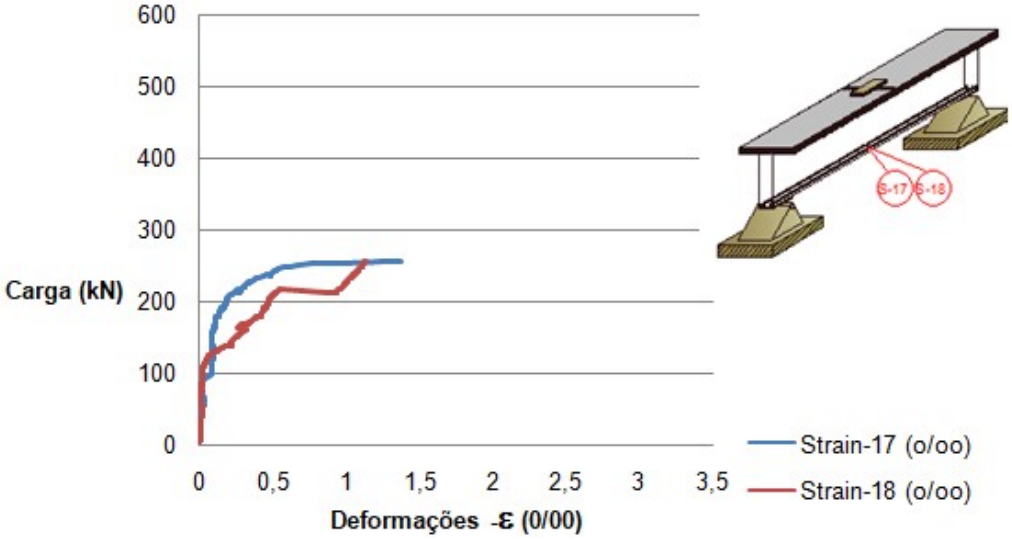


Figura 50 – Curvas carga X deformações na armadura longitudinal de M-I-V1, extensômetros S-17 e S-18.

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-I-V-1 para uma carga de 44,0kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma é apresentado na Figura 51 e Figura 53, respetivamente para os lados direito e esquerdo da viga.

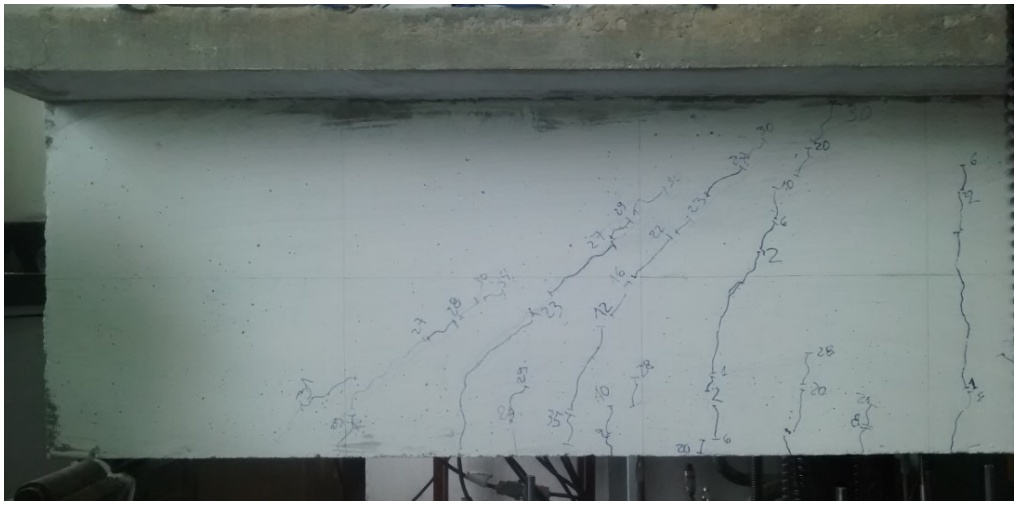


Figura 51– Fissuras de M-I-V-1, lado esquerdo

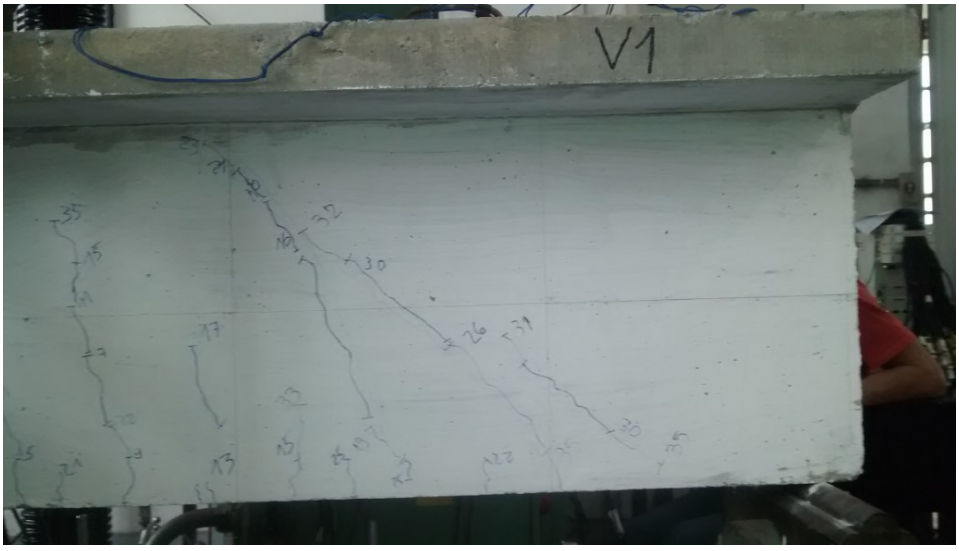


Figura 52 – Fissuras de M-I-V, lado direito

A ruptura da viga M-I-V-1 foi por cisalhamento, que pode ser explicado pelo fato dessa viga integrar, também, parte de um estudo sobre utilização de estribos contínuos.Nessa viga, não chegou a ocorrer esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 53 e no respectivo detalhe.

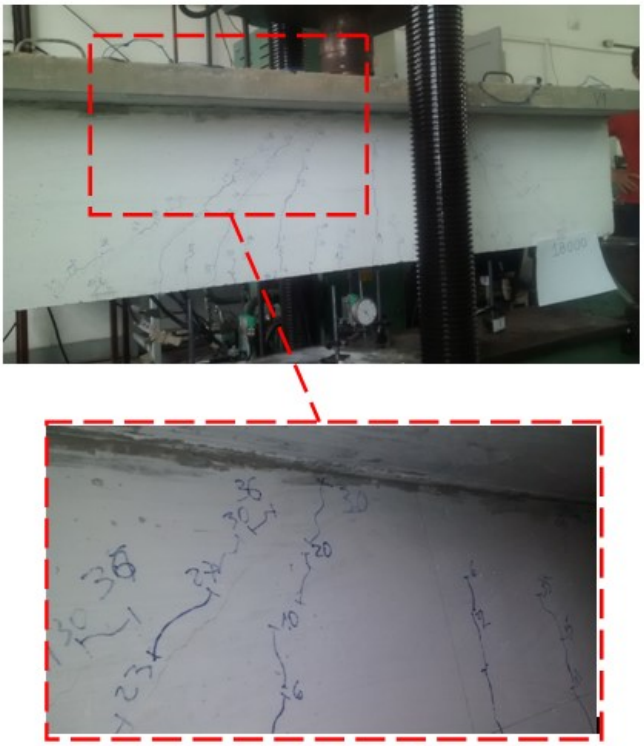


Figura 53– Padrão de fissuração de M-I-V-1 na ruptura.

Quando foi atingida uma carga de 255,83kN ocorreu à ruptura e desplacamento total do concreto na lateral da viga. Cabe ressaltar que nessa fase do ensaio as fissuras já haviam evoluído e alcançado a parte superior da alma, o que já caracterizava a ruína da viga. O aspecto final da extremidade viga M-I-V1 é mostrado na Figura 54 (vista frontal).

Figura 54– Aspecto da extremidade de M-I-V-1 após ruptura (vista frontal)

2.3.2.2 Ensaio da Viga M-I-V-2

A viga M-I-V-2 foi ensaiada com o carregamento concentrado no centro do vão. Essa carga era aplicada na superfície da mesa da viga, através de chapa metálica, conforme a Figura 55.

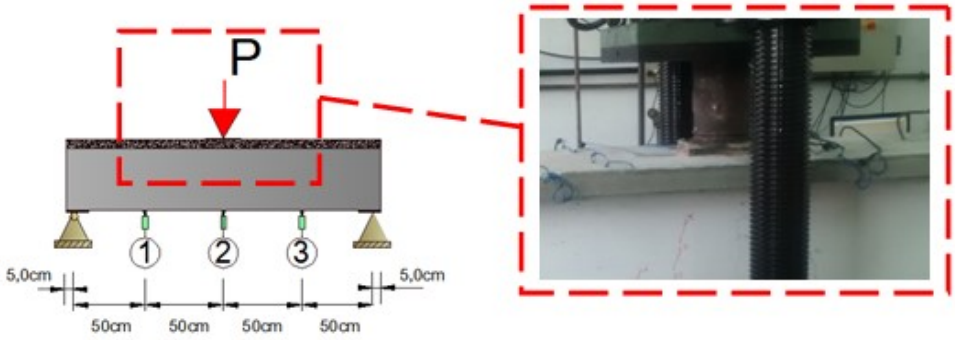


Figura 55– Esquema da aplicação de cargas

O aspecto geral da viga V-2 (do modelo I), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 56.

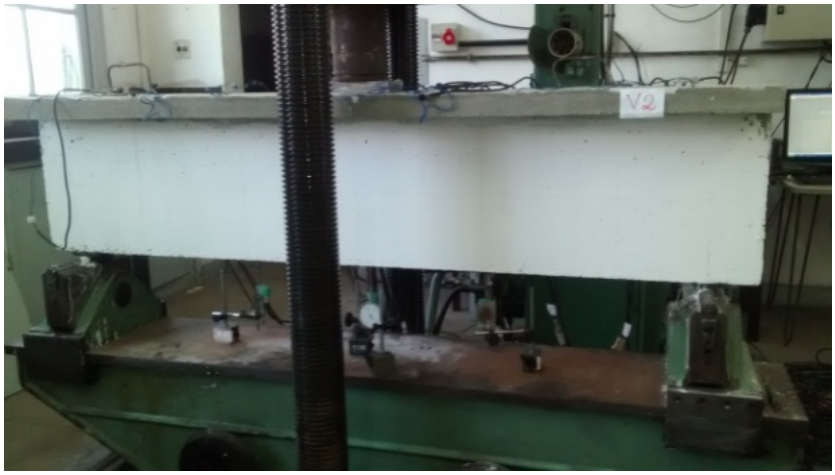


Figura 56– Viga M-I-V-2 posicionada para ensaio

Assim como em M-I-V-1, foram usadas chapas metálicas de ½” de espessura na região dos apoios da viga, conforme mostrado na Figura 57.

Figura 57– Chapa posicionada sob os apoios

As flechas que ocorreram na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos no meio do vão (L/2), , bem como na região próxima aos terços. A posição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 58). Por medida de segurança, os transdutores foram retirados em uma carga de 200kN.

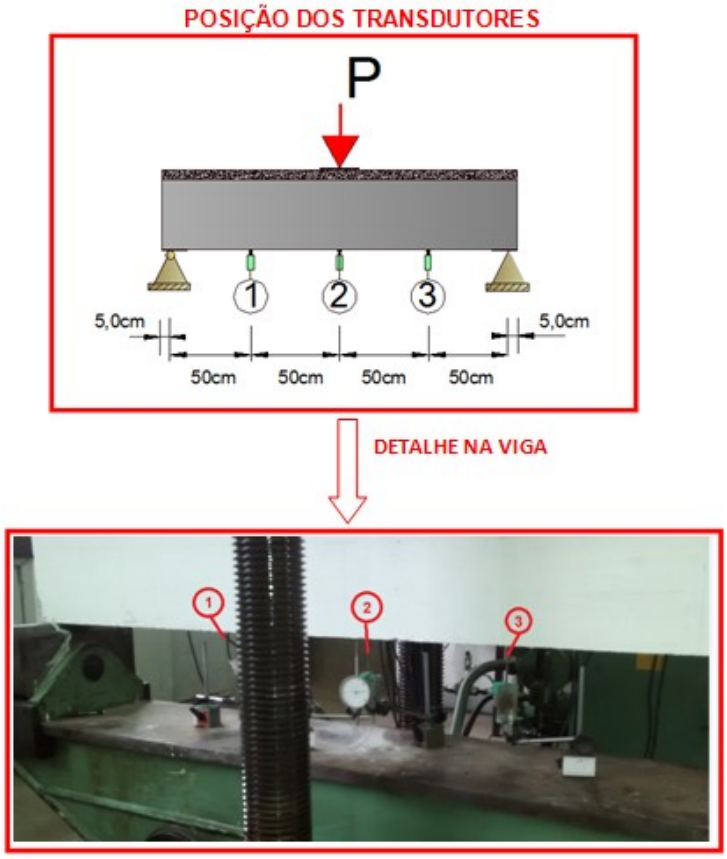


Figura 58– Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas na Figura 59.

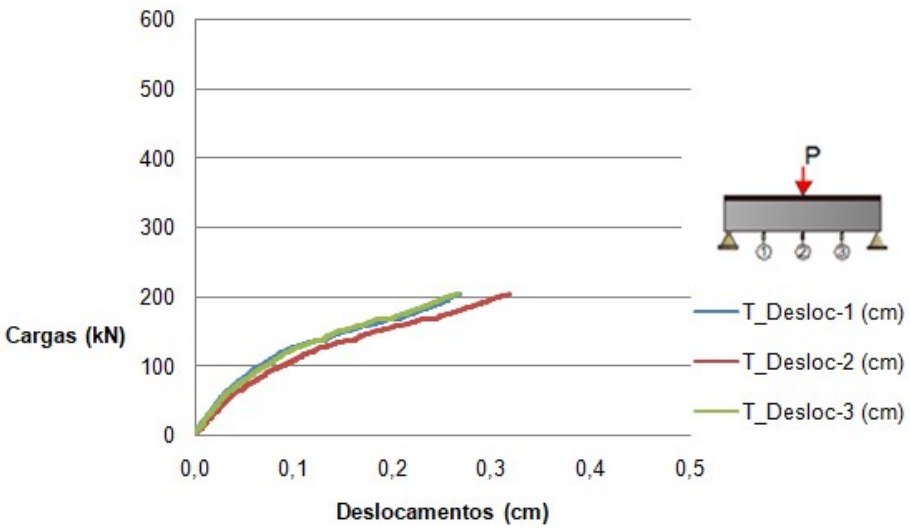


Figura 59– Curvas carga x flecha da viga M-I -V-2

As deformações no concreto e no aço foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica (strain gages), que foram posicionados em pontos pré-determinados da mesa e das armaduras. A localização dos strains de S-1 a S-12, que se encontravam posicionados na mesa, é apresentada na Figura 60.

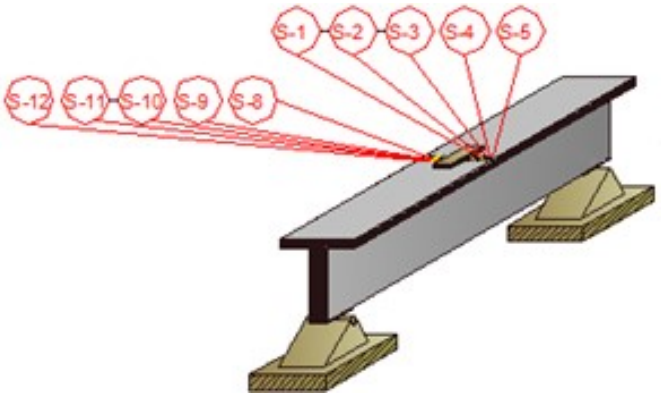


Figura 60– Posição dos strains de S-1 a S-12, na mesa da viga

As deformações obtidas nos extensômetrosde S-1 a S-5 são apresentadas na Figura 61. As deformações de S-8 a S-11 são apresentadas na Figura 62.

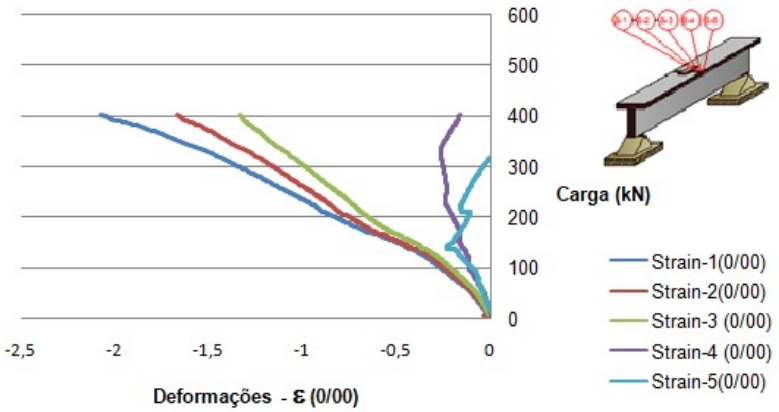


Figura 61– Curvas Carga X Deformações de M-I-V-2, extensômetros S-1 a S-5

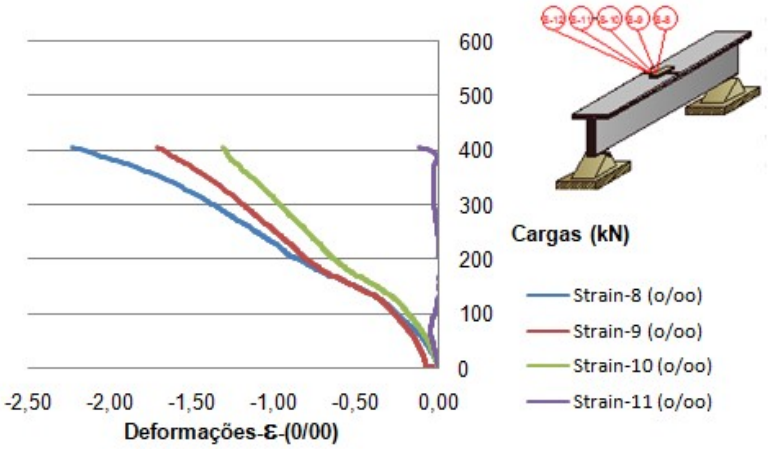


Figura 62– Curva Carga X Deformações de M-I-V-2, strains S-8 a S-11

O extensômetro S-12, localizado na extremidade da mesa, apresentou problema durante o ensaio e por esse motivo suas deformações não são mostradas no gráfico anterior.

As deformações na armadura longitudinal, nos pontos de maior momento fletor (meio do vão) são apresentadas na Figura 63. A deformação máxima observada no armadura longitudinal foi de aproximadamente 1,8 $^{0}/_{00}$ para o extensômetro S-18 e 3,0 $^{0}/_{00}$ para o extensômetro S-17, não sendo obtidos maiores valores de leitura em razão dos extensômetros pararem de funcionar por conta da fissuração do concreto na região que circundava esses dispositivos.

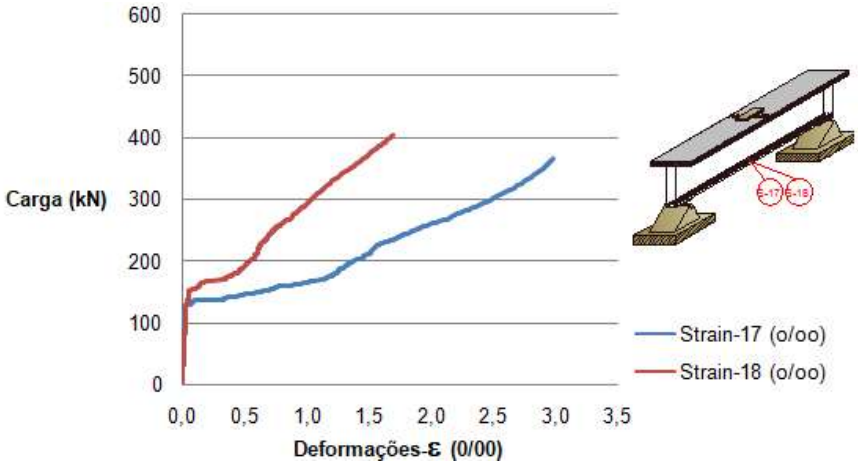


Figura 63– Curvas Carga X Deformações de M-I-V2, strains S-17 e S-18

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-I-V-2 para uma carga de 70,0kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,02mm) até carga de 150 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 64.

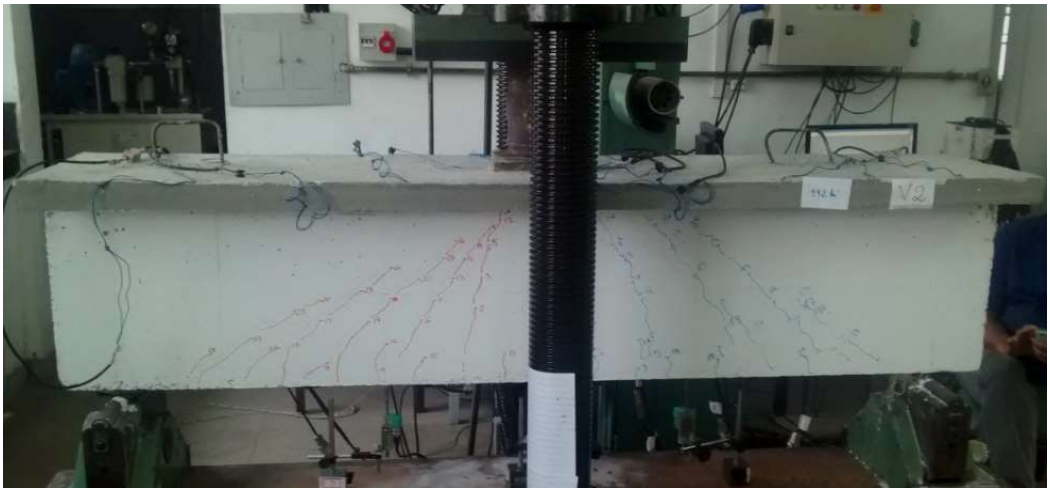


Figura 64– Aspecto fissurado de M-I-V-2

A ruptura da viga M-I-V-2 foi por cisalhamento, com fissuras que alcançaram a mesa. No entanto, não chegou a ocorrer esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 65 e no detalhe ampliado.

Figura 65– Padrão de fissuração de M-I-V-2 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 402,0kN ocorreu à ruptura por cisalhamento com desplacamento do concreto na face inferior da viga. Cabe ressaltar que nessa fase do ensaio as fissuras já haviam evoluído e alcançado a parte superior da alma, o que já caracterizava a ruína da viga. O aspecto final da viga M-I-V2 é mostrado na Figura 66.

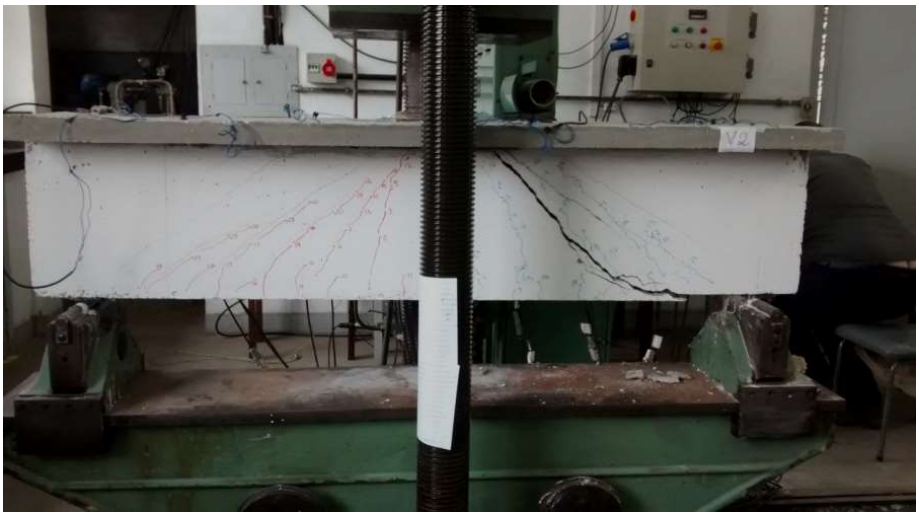


Figura 66 – Aspecto da extremidade de M-II-V2 após ruptura (vista frontal)

2.3.2.3 Ensaio da Viga M-I-V-3

A viga M-I-V-3 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira idêntica as vigas anteriores. Essa carga era aplicada na superfície da mesa da viga, através de chapa metálica, mostrada na figura 68.

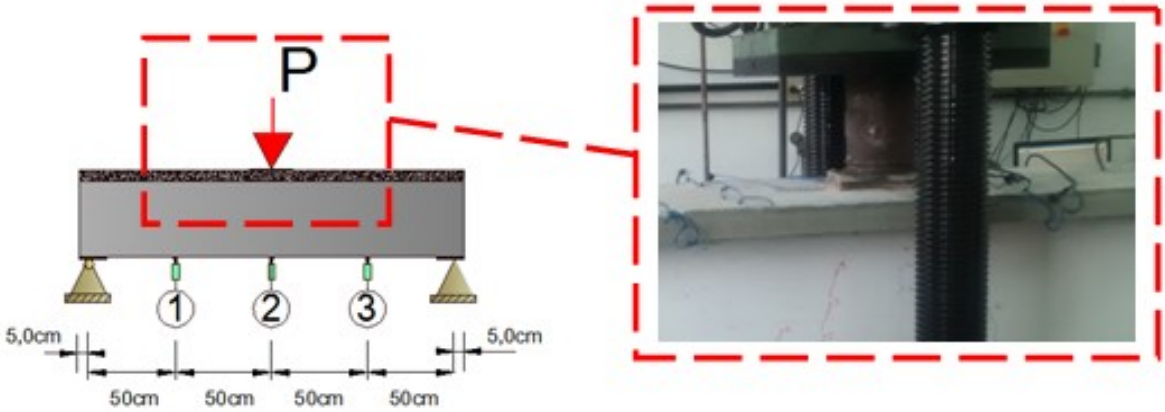


Figura 67– Esquema da aplicação de cargas

O aspecto geral da viga V-3 (do modelo I), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 68.

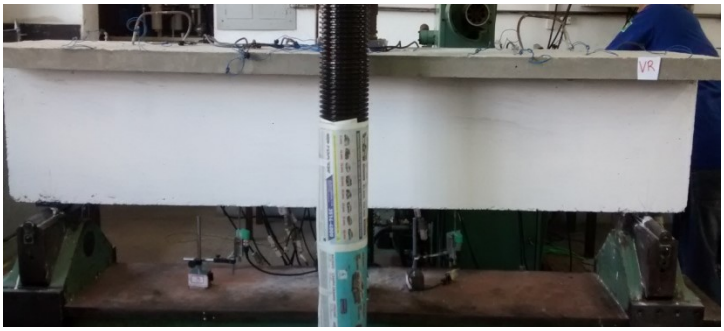


Figura 68– Viga M-I-V-3 posicionada para ensaio

Para uma melhor distribuição das tensões cisalhantes nas regiões dos apoios foram utilizadas chapas já mostradas, em arranjo similar ao mostrado na viga anterior

As flechas na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores de deslocamento, dispostos no meio do vão (L/2), que é o ponto onde ocorreram os maiores deslocamentos, bem como na região próxima aos terços. Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na Figura 69.

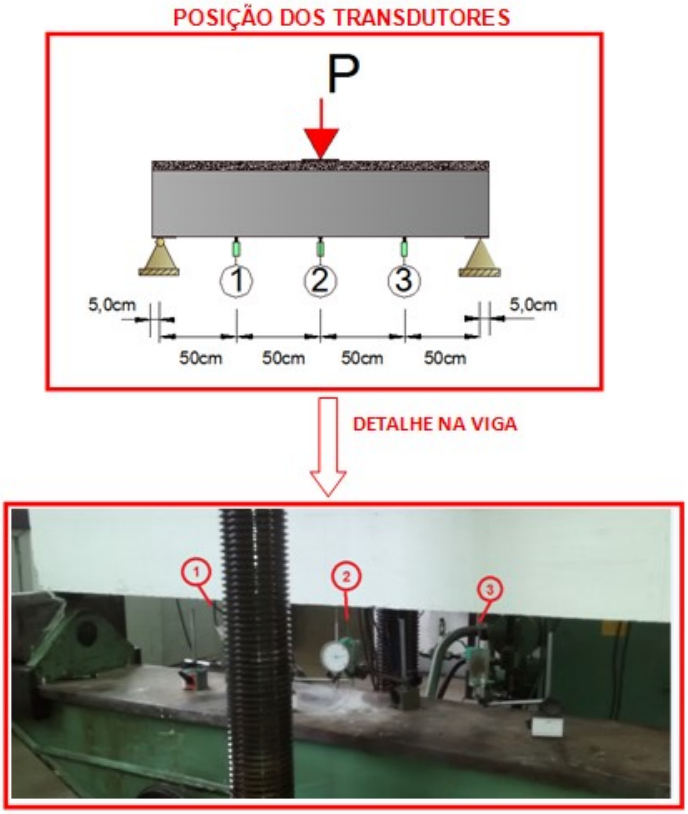


Figura 69– Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas no gráfico a seguir (Figura 70).

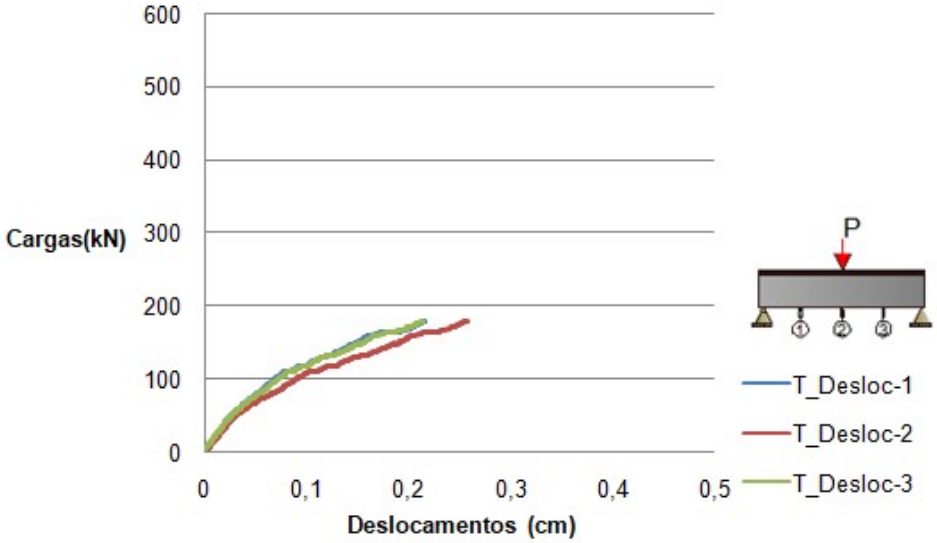


Figura 70 – Gráfico carga x flecha.

As deformações na superfície da mesa e na armadura longitudinal foram obtidas com a instalação de strain gages, que foram posicionados em da

mesa(próximos a placa de aplicação de cargas). A localização dos strain gages de S-1 a S-12, que se encontravam dispostosconforme o apresentado na Figura 71.

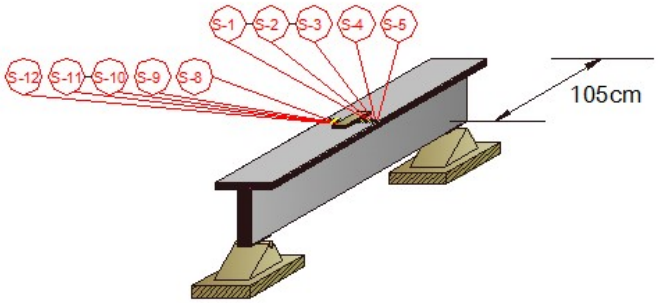


Figura 71 – Posição dos strains de S-1 a S-12, na mesa da viga

As deformações obtidas nos strain gages de S-1 a S-5 são apresentadas no gráfico abaixo (Figura 72). E as deformações de S-8 a S-11 são apresentadas na Figura 73.

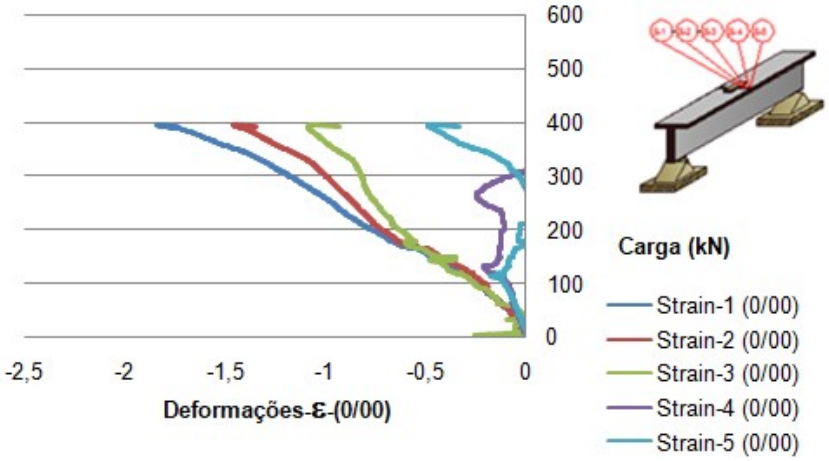


Figura 72 – Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strains S-1 a S-5

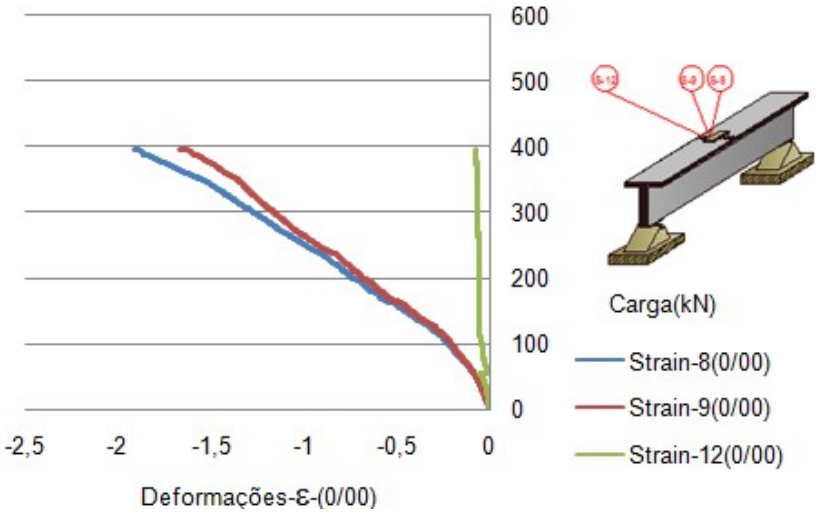


Figura 73– Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strains S-8, S-9 e S-11

Cabe ressaltar, que os strain gages S-10 e S-11, localizados na extremidade da mesa, apresentaram problema durante o ensaio e por esse motivo suas deformações não são apresentadas no gráfico anterior.

As deformações de tração na armadura longitudinal no strain gage S-17, que estava posicionado no centro do vão, são apresentadas na Figura 74. O strain gage S-18, também localizado na armadura principal de flexão apresentou problemas de funcionamento, não sendo suas deformações na figura.

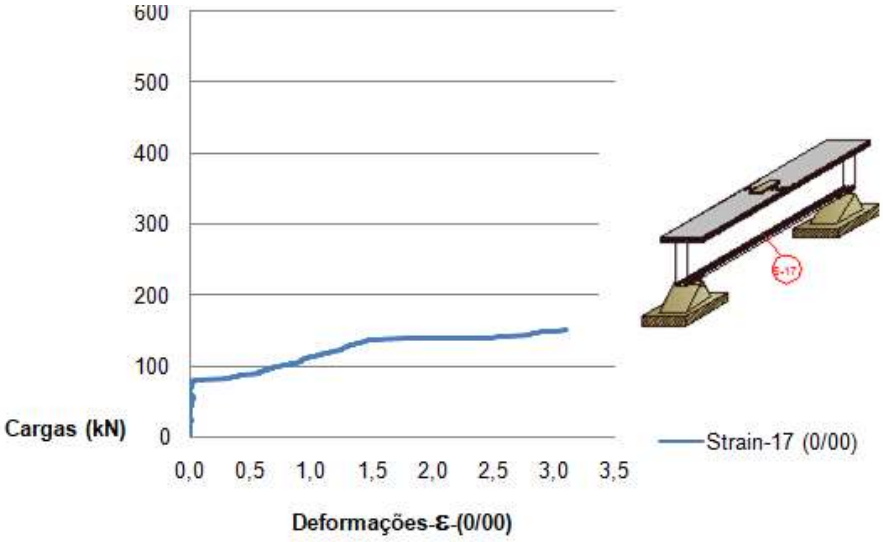


Figura 74– Gráfico Carga X Deformações de M-I-V3, strain S-17

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-I-V-3 para uma carga de 74,0kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,04mm) numa carga de 145 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 75.

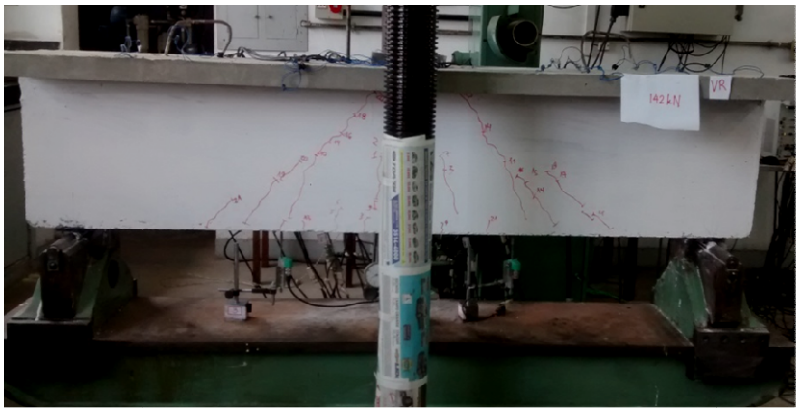


Figura 75– Aspecto fissurado de M-I-V3

A ruptura da viga M-I-V3 deu-se por cisalhamento, com a evolução das fissuras que alcançaram a mesa com inclinação próxima dos 45^0. O concreto na

região da mesa sofreu esmagamento na região sob a placa de aplicação de cargas, conforme mostrado na Figura 76 e no respectivo detalhe.

Figura 76– Aspecto de M-I-V3 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 396 kN ocorreu à ruptura de biela comprimida na alma e despalcamento na face inferior da viga. Cabe ressaltar que nessa fase do ensaio as fissuras já haviam evoluído e alcançado a parte superior da alma. Ocorreu também desplacamento do concreto na parte inferior da mesa, conforme mostrado na Figura 77.

Figura 77– Aspecto do desplacamento de M-I-V3 na ruptura

2.4. Ensaios das Vigas do Modelo II

2.4.1 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo II

As vigas desse modelo possuíam a mesma armadura longitudinal da série anterior, tendo como diferencial o fato de possuírem uma maior quantidade de armadura transversal (estribos) para evitar que ocorresse a ruptura por cisalhamento, que havia sido prevista para as vigas do modelo anterior.

As três vigas apresentaram comportamento bastante distinto, mesmo considerando que possuíam armaduras idênticas. Isso se deve ao fato de terem sido adotados tipos de carregamentos diferentes para cada viga. Por esse motivo, os resultados serão apresentados separadamente nos itens que se seguem.

2.4.1.1 Ensaio da Viga M-II-V-1

A viga M-II-V-1 foi ensaiada com o carregamento sendo nos terços do vão. As cargas eram aplicadaspela prensa hidráulica sobre perfil metálico que as transmitia para tarugos metálicos dispostos sobre a mesa da viga, na região dos terços do vão, conforme o mostrado na figura 79.

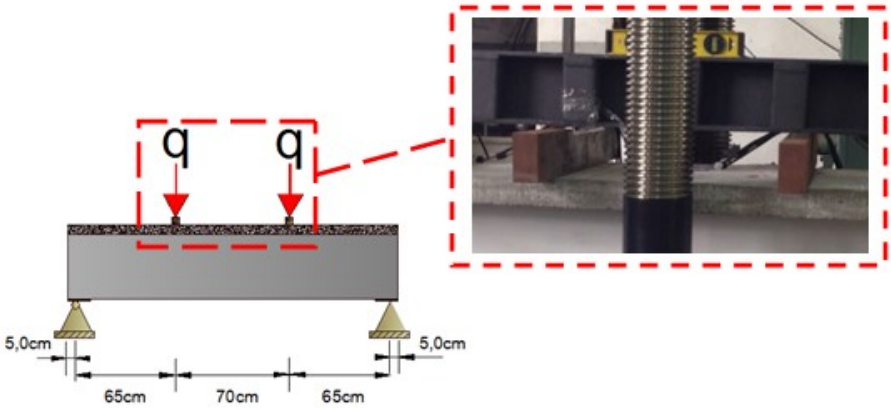


Figura 78– Esquema da aplicação de cargas

O aspecto geral da viga M-II-V-1-, antes do ensaio é apresentado na Figura 79.

Figura 79– Viga M-II-V-1 posicionada para ensaio

Com a finalidade de distribuir melhor os esforços de cisalhamento nos extremos da viga, foram usadas chapas metálicas de ½” de espessura na região dos apoios, conforme mostrado na Figura 80.

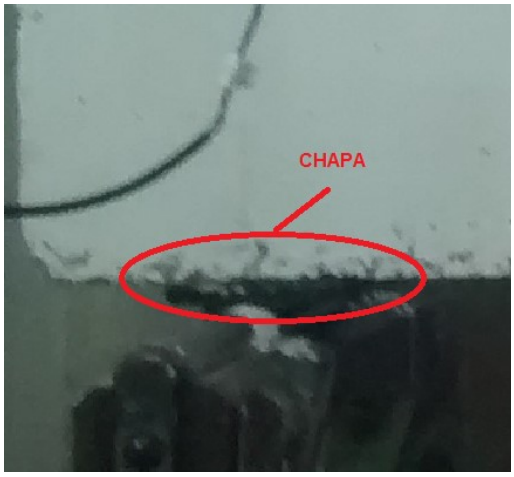


Figura 80– Chapa posicionada sob os apoios

As deflexões (flechas) que ocorreram na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos no meio do vão (L/2), que é o ponto onde ocorreram os maiores deslocamentos, bem como na região próxima aos terços. Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 81).

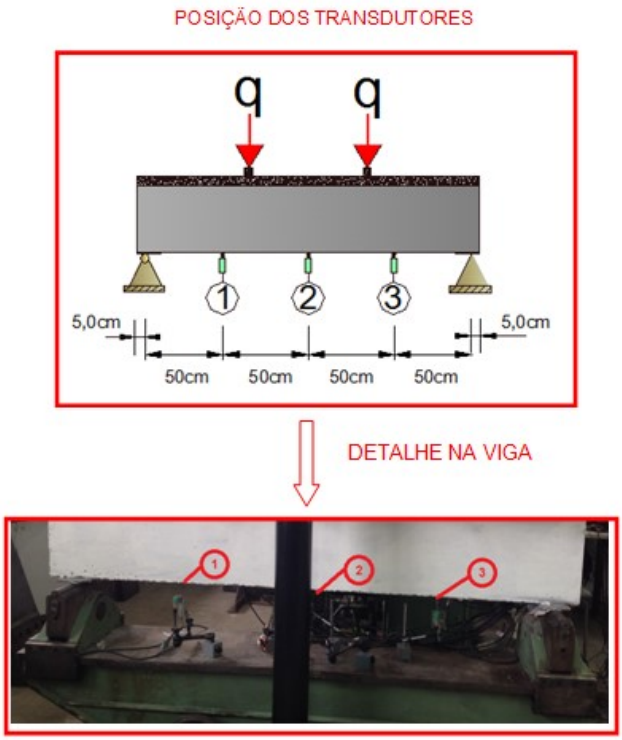


Figura 81– Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas naFigura 82.

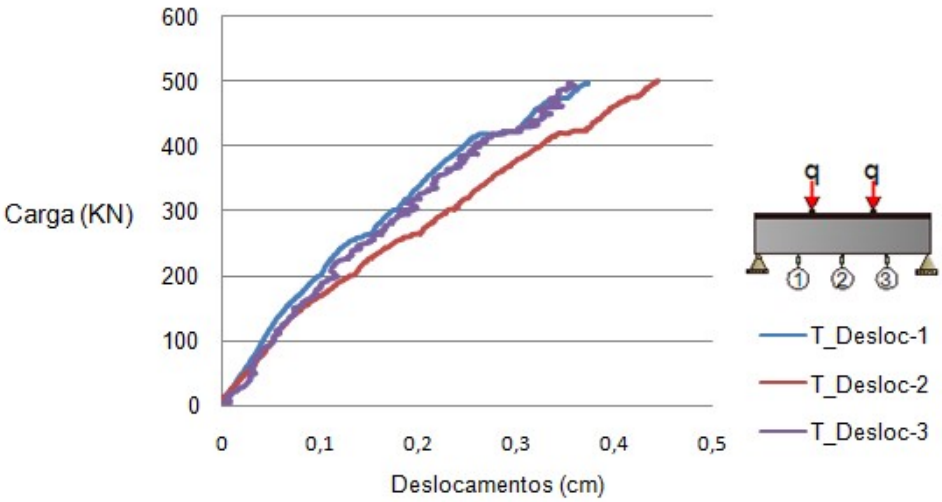


Figura 82– Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas por extensômetros de resistência elétrica (strain gages), que foram posicionados em pontos pré-determinados da mesa. A localização dos strains de S-7 a S-22, é apresentada na Figura 83.

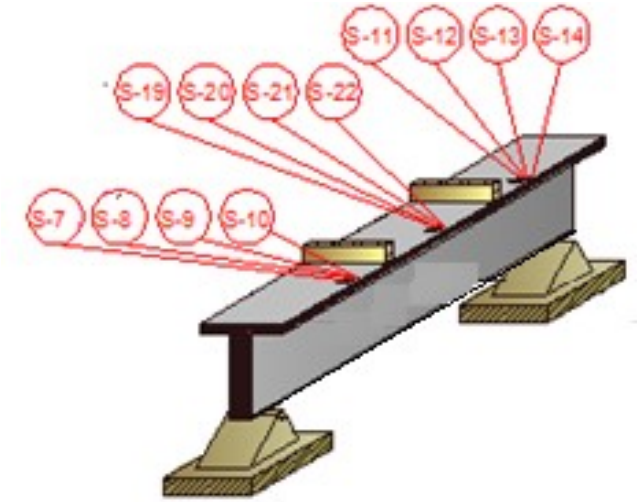


Figura 83 – Posição dos strain gages de S-7 a S-22, na mesa da viga

As deformações na região dos strain gages de S-7 a S-10 são apresentadas no gráfico abaixo (Figura 84). É possível observar na figura a seguir que o estensômetro S-10 apresentou problemas em seu funcionamento, havendo interrupção de suas leituras para uma carga de 200kN.

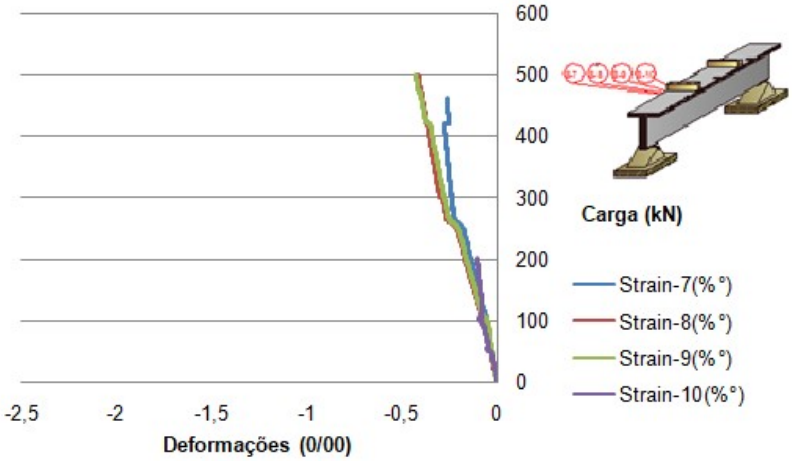


Figura 84– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strain gages S-7 a S-10

As deformações nos strain gages numerados de S-11 a S-14 são apresentadas na Figura 85, onde é possível notar que que S-13 apresentou problemas em seu funcionamento para uma carga de 200KN. Isso provavelmente ocorreu em razão do aparecimento de fissuras no concreto na região desse extensômetro.

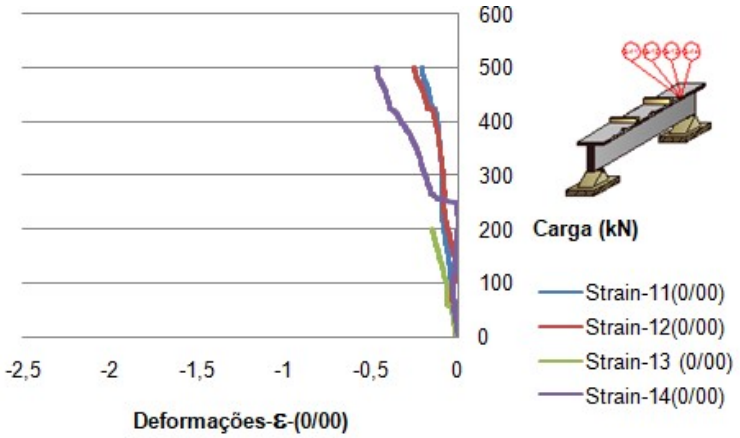


Figura 85– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-11 a S-14

Na Figura 86 são apresentadas as deformações nos strain gages de S-19 a S-21, localizados no ponto central da viga (ponto de maior deslocamento). O strain S-22 apresentou defeito, não sendo apresentados seus resultados de deformações.

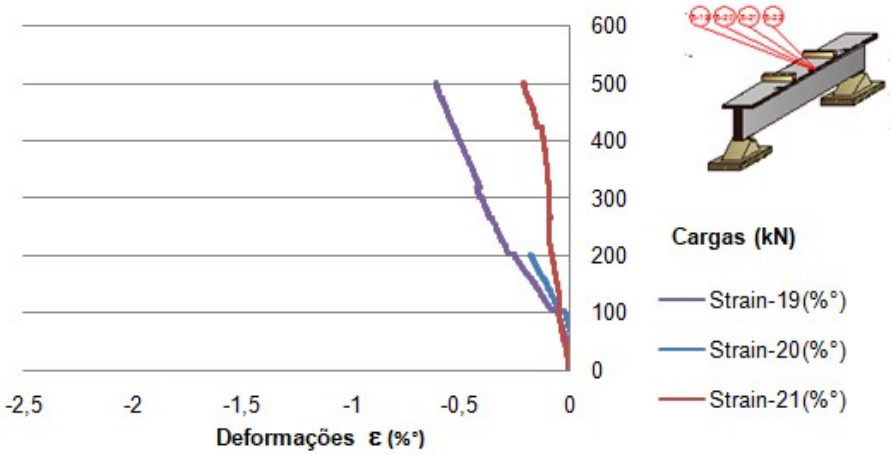


Figura 86– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-19 a S-21

A armadura longitudinal teve suas deformações de tração verificadas na região de momento fletor máximo, sendo esses valores apresentados na Figura 87. Nessa figura pode-se observar que as armaduras apresentaram deformações bastante próximas, alcançando um valor máximo de aproximadamente 1,5 $^{0}/_{00}$.

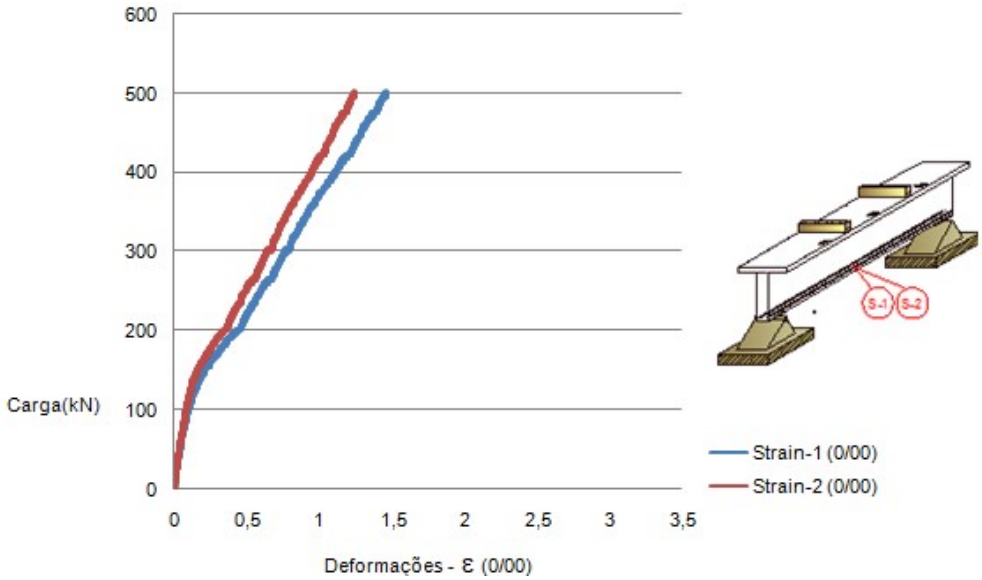


Figura 87– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V1, strains S-1 e S-2

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-II-V-1 para uma carga de 100,49 kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,02mm) numa carga de 254,94 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 88.

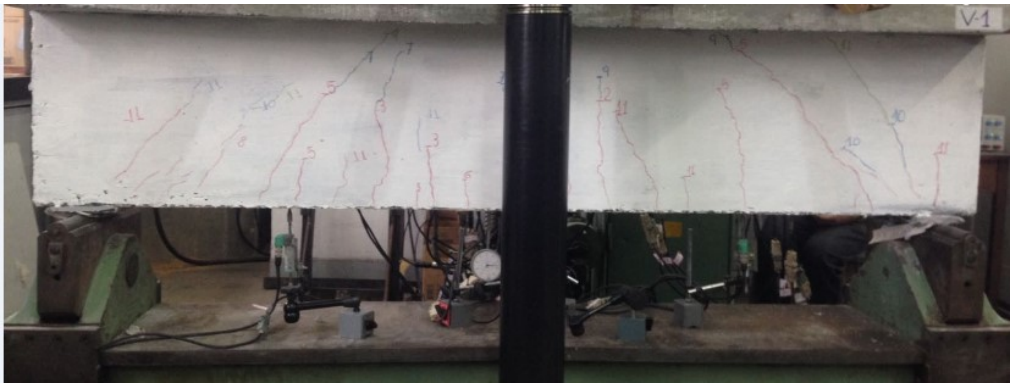


Figura 88– Aspecto fissurado de M-II-V1

A ruptura da viga M-II-V1 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que alcançaram a mesa. No entanto, não chegou a ocorrer esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 89 e no detalhe.

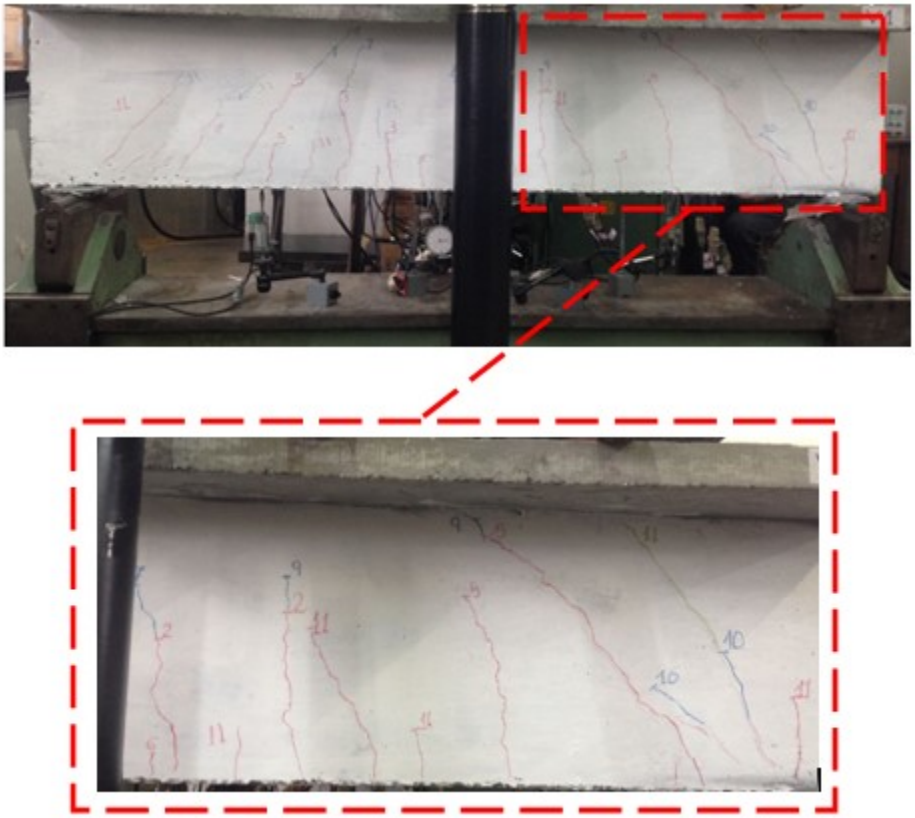


Figura 89– Aspecto de M-II-V1 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 500,39kN ocorreu à ruptura e desplacamento total do concreto na lateral da viga. Cabe ressaltar que nessa fase do ensaio as fissuras já haviam evoluído e alcançado a mesa, o que já caracterizava a ruína da viga. O aspecto final da extremidade viga M-II-V1 é mostrado na Figura 90(vista frontal), e na Figura 91 (vista lateral).

Figura 90– Aspecto da extremidade de M-II-V1 após ruptura (vista frontal)

Figura 91– Aspecto da extremidade de M-II-V1 após ruptura (vista lateral)

2.4.1.2 Ensaio da Viga M-II-V-2 do Modelo II

A viga M-II-V-2 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira distribuída, ao longo da alma. Essa carga era transferida através de perfil metálico, mostrado na Figura 92.

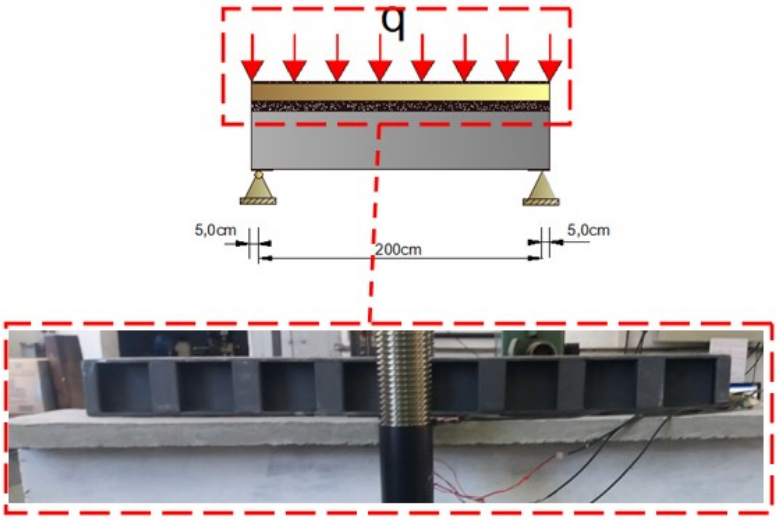


Figura 92 – Esquema da aplicação de cargas

O aspecto geral da viga V-2 (do modelo II), antes do início do ensaio é apresentado na Figura 93.

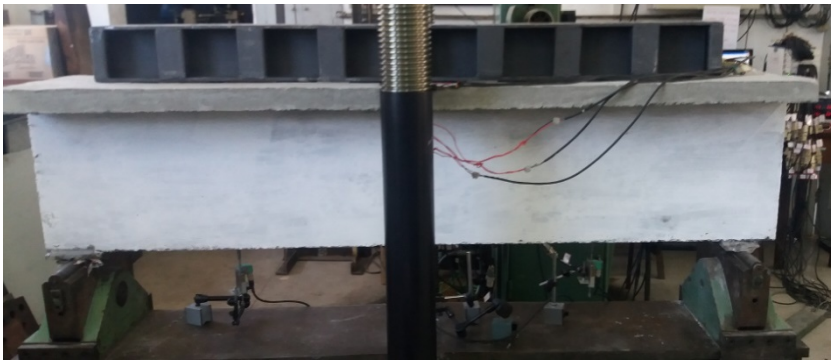


Figura 93– Viga M-II-V-2 posicionada para ensaio

Com a finalidade de distribuir melhor as cargas aplicadas pelo perfil para a alma da viga, foi colocada uma lâmina de neoprene de 5,0 mm de espessura, conforme o mostrado na figura a seguir. Essa lâmina possuía a mesma largura da alma da viga (12cm).

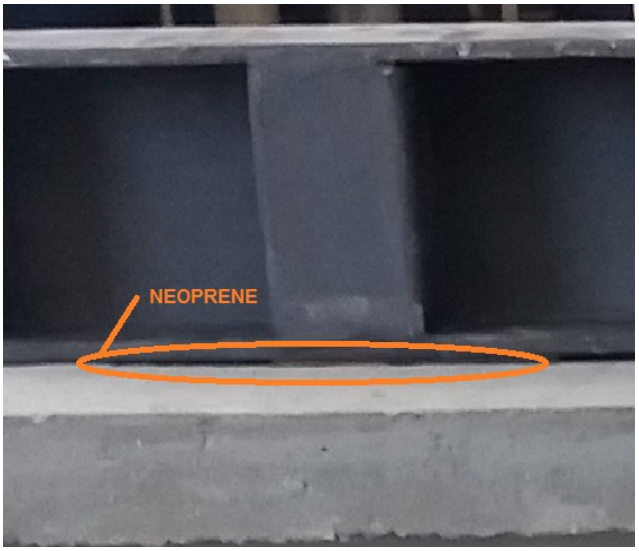


Figura 94 – Lâmina de neoprene posicionada sob o perfil de aplicação de carga

As deflexões (flechas) que ocorreram foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos da seguinte maneira: um no meio no meio do vão (L/2); dois na região próxima aos terços (0,25L e O,75L). A posição dos transdutores está apresentada na Figura 95.

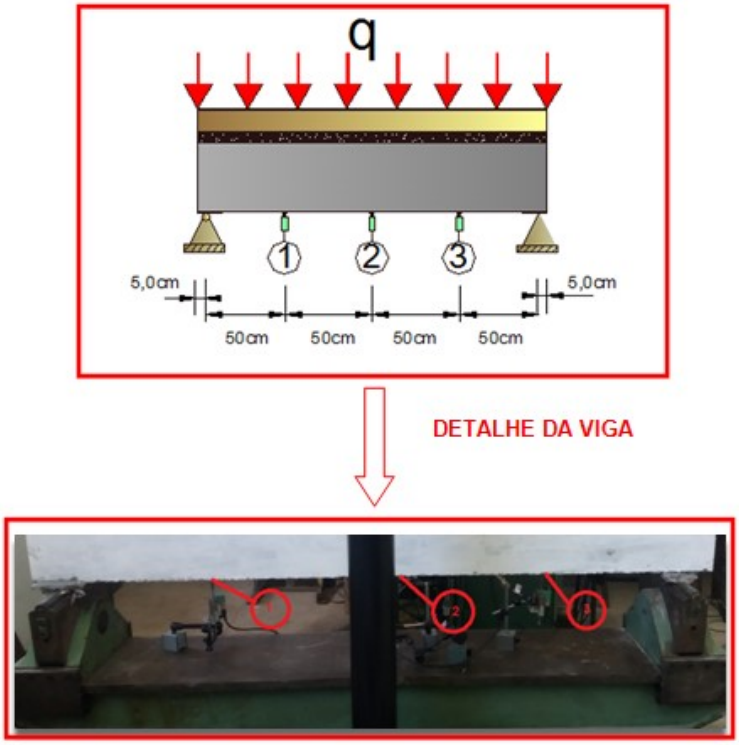


Figura 95– Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1 e 3 são apresentadas na Figura 96. O transdutor 2 apresentou problemas durante o ensaio.

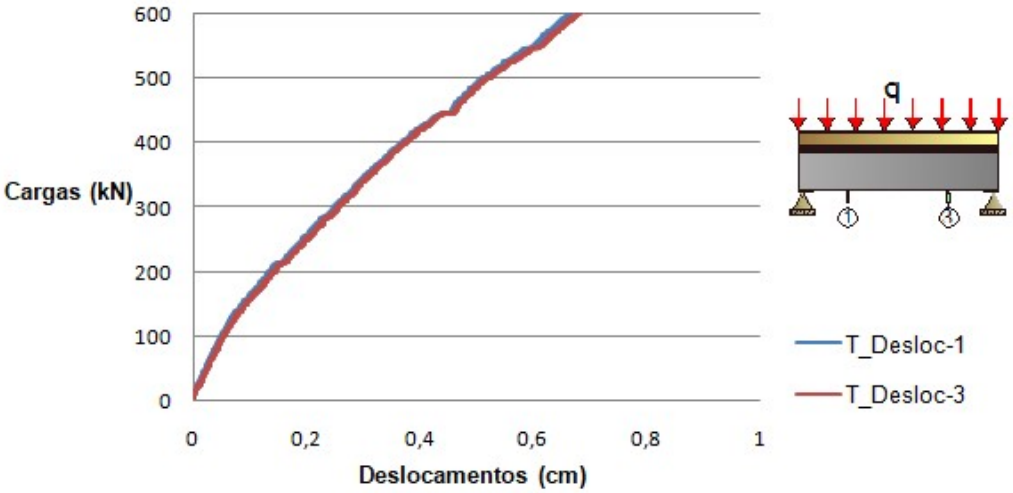


Figura 96– Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas com strain gages, que foram colados em três posições ao longo da da mesa. A localização dos strain gages de S-7 a S-22, é apresentada na Figura 97.

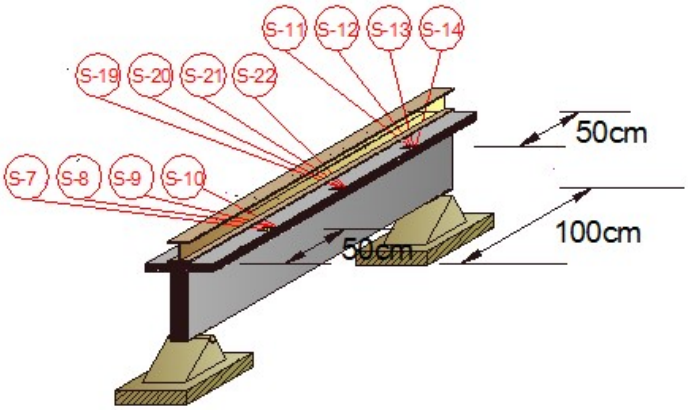


Figura 97 – Posição dos strain gages de S-7 a S-22, na mesa da viga

As deformações obtidas nos strain gages de S-7 a S-10 são apresentadas no gráfico abaixo (Figura 98). E as deformações de S-11 a S-13 são apresentadas na Figura 99. É possível verificar na figura um comportamento bastante semelhante entre os quatro extensômetros com acréscimo de cargas ao longo do ensaio.

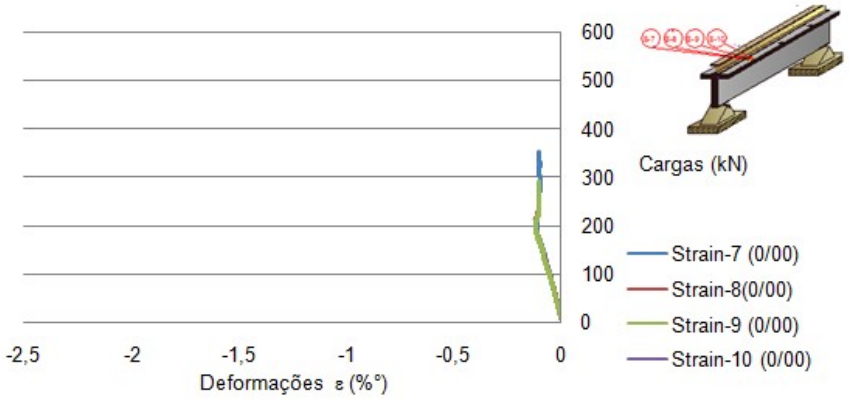


Figura 98– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, strain gages S-7 a S-10.

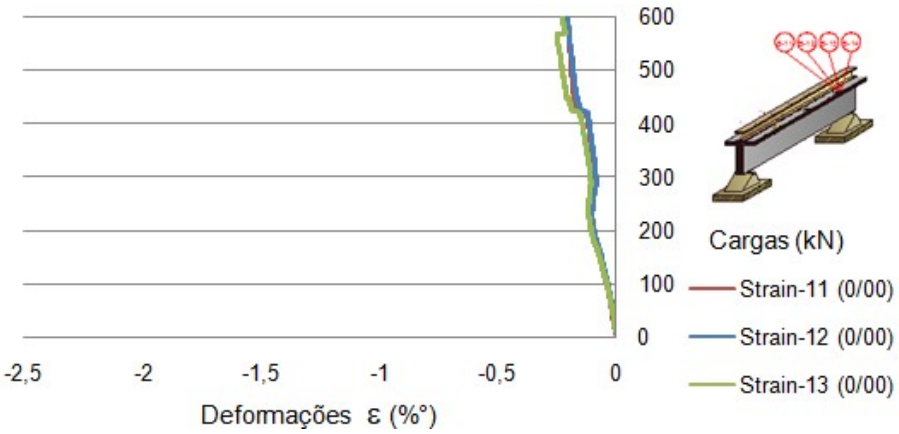


Figura 99– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, strain gages S-11 a S-13

Na Figura 100 são apresentadas as deformações no strain S-19, localizado no ponto central da viga (ponto de maior deslocamento). Os demais strains, localizados paralelos ao strain 19, apresentaram problemas no funcionamento durante o ensaio.

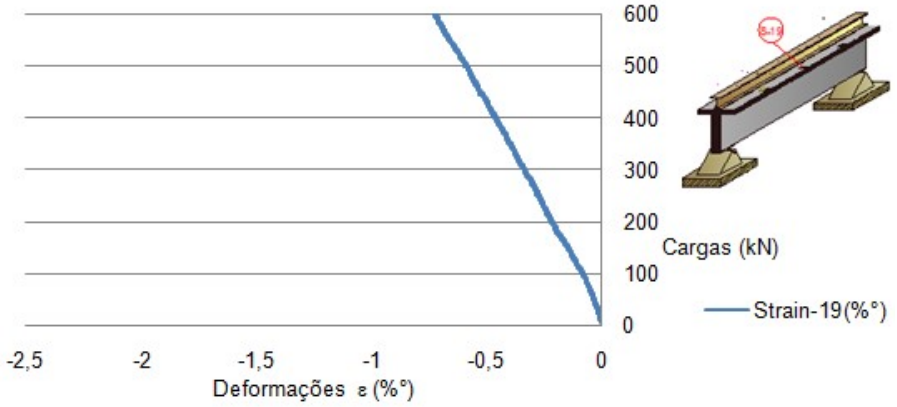


Figura 100– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2 noextensômetro S-19

As armaduras longitudinais, localizadas na parte inferior da viga, tiveram suas deformaçõesverificadas através dos extensômetros S-1 e S-2, posicionados conforme o mostrado na Figura 101.

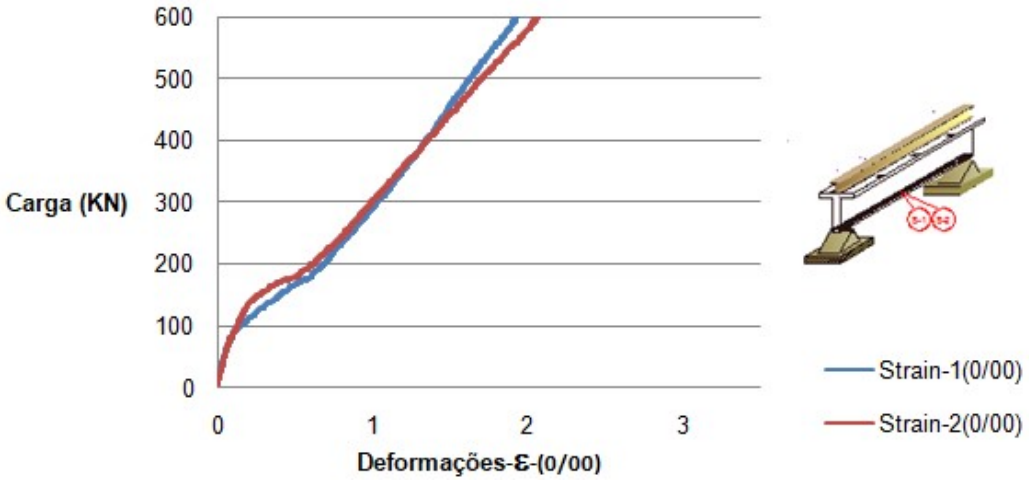


Figura 101– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V2, extensômetrosS-1 e S-2

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-II-V-2 para uma carga de 96,8kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,02mm) numa carga de 130 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 102.

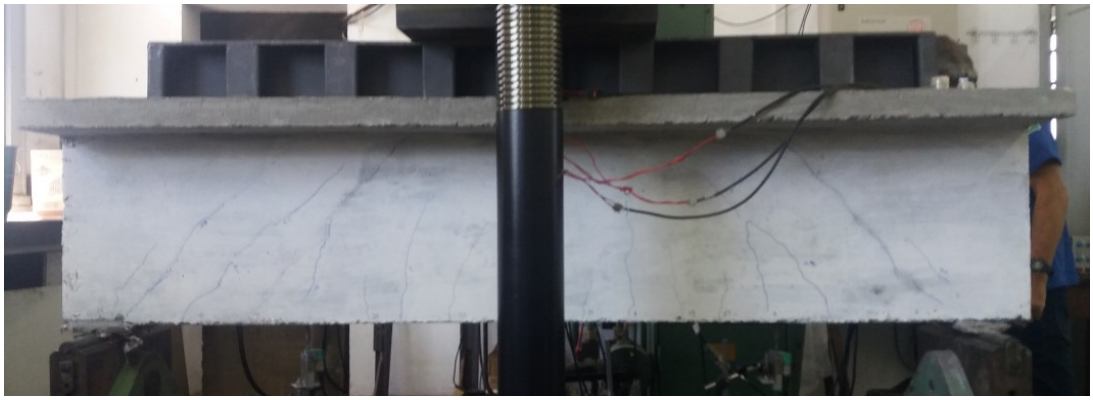


Figura 102– Aspecto fissurado de M-II-V2

A ruptura da viga M-II-V2 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que alcançaram a mesa. Não chegou a ocorrer esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 103 e no respectivo detalhe.

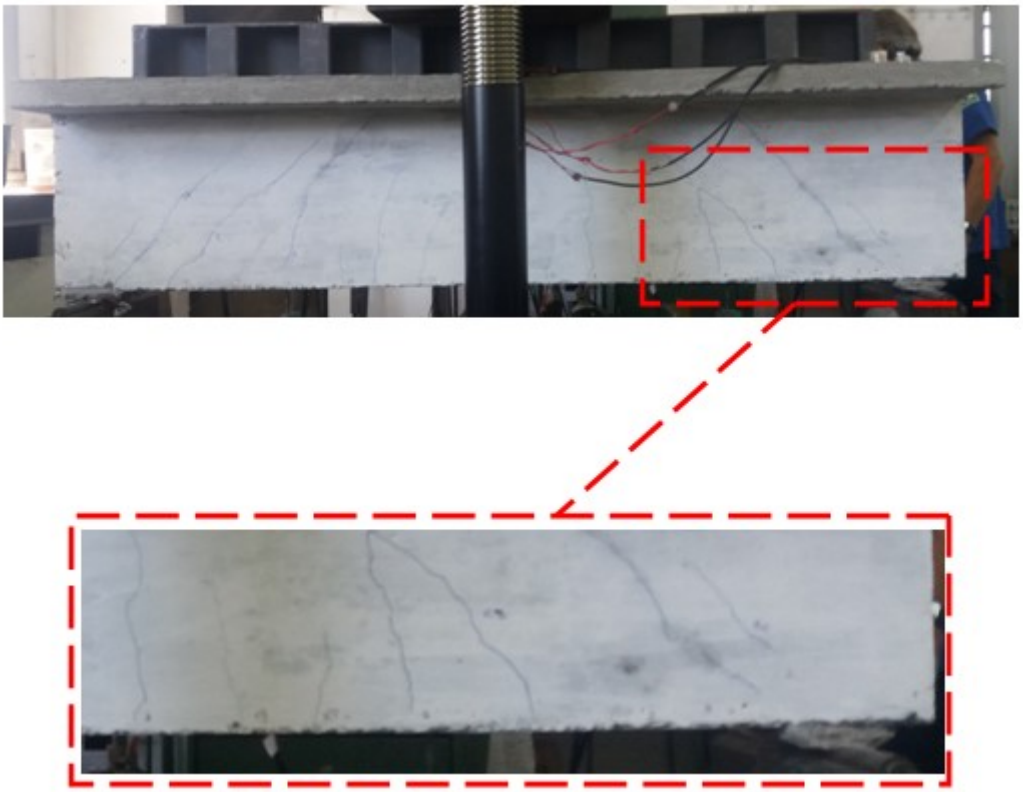


Figura 103– Aspecto de M-II-V2 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 500,39kN ocorreu à ruptura e desplacamento total do concreto na lateral da viga. Cabe ressaltar que nessa fase do ensaio as fissuras já haviam evoluído e alcançado a mesa, o que já caracterizava a ruína da viga. O aspecto final da extremidade viga M-II-V2 é mostrado na Figura 104 (vista frontal e detalhe lateral).

Figura 104– Extremidade de M-II-V2 após ruptura (frontal e detalhe lateral)

2.4.1.3 Ensaio da Viga M-II-V-3 do Modelo II

O ensaio da viga M-II-V-3 ocorreu com o carregamento sendo aplicado de maneira pontual, na região central da alma. Essa viga possuía um apoio intermediário, que a dividia em dois tramos. As cargas eram transferidas através de perfil e chapas metálicas na região central de cada tramo, conforme mostrado na Figura 105.

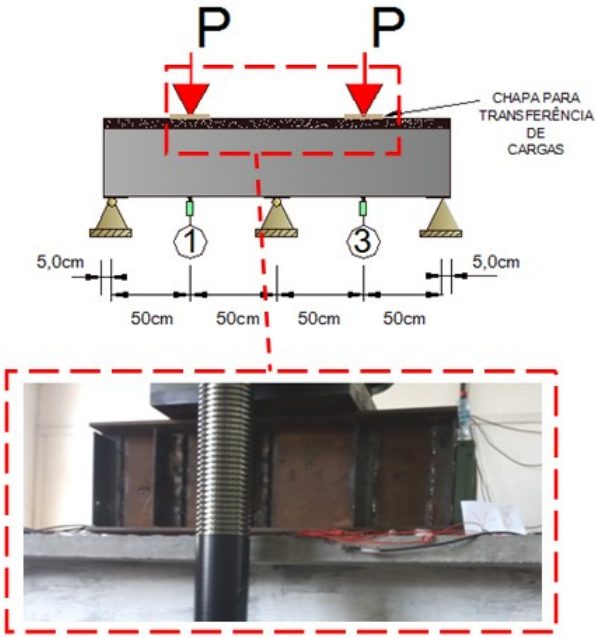


Figura 105– Esquema da aplicação de cargas.

O aspecto geral da viga V-3 (do modelo II), antes do início do ensaio é apresentado na Figura 107.

Figura 106– Viga M-II-V-3 posicionada para ensaio

Com o objetivo de dividir a viga em dois tramos, foi confeccionado um apoio intermediário, que foi posicionado sobre o berço da prensa, confome mostrado na Figura 107.

Figura 107– Apoio Intermediário da viga

As flechas na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores, ligados ao equipamento de aquisição de dados, estando dispostos no meio de cada tramo (L/2). Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 108).

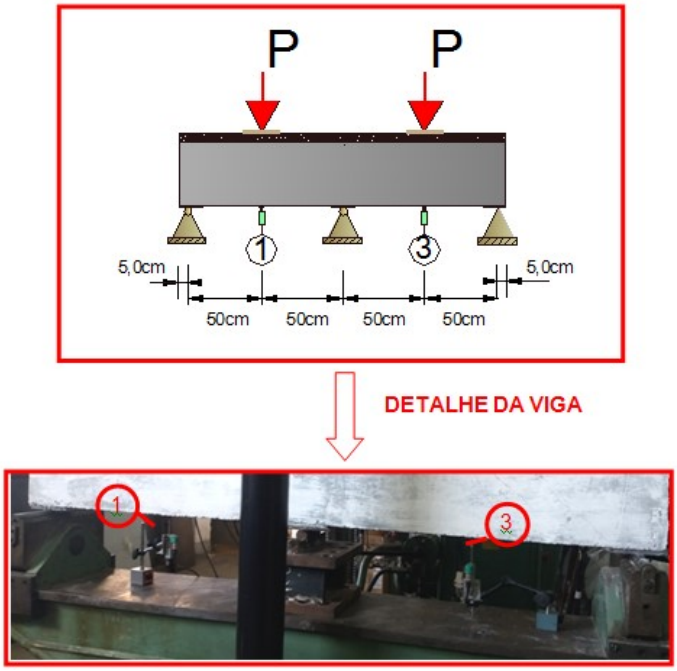


Figura 108– Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1 e 3, localizados no centro dos tramos da viga, são apresentadas na Figura 109. Pode-se observar no gráfico que as curvas das flechas medidas nos dois transdutores possuem comportamento bastante semelhante, chegando a sobrepor-se até uma carga total de 500KN, que representa 250 kN aplicados em cada tramo.

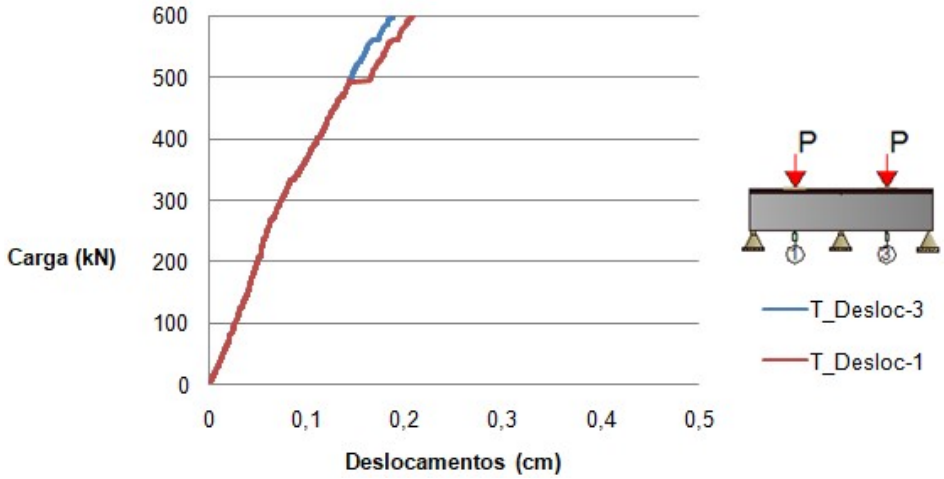


Figura 109– Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos da mesa, dispostos na região adjacente às chapas de aplicação de cargas. A localização dos extensômetros de S-7 a S-22 é apresentada na Figura 110.

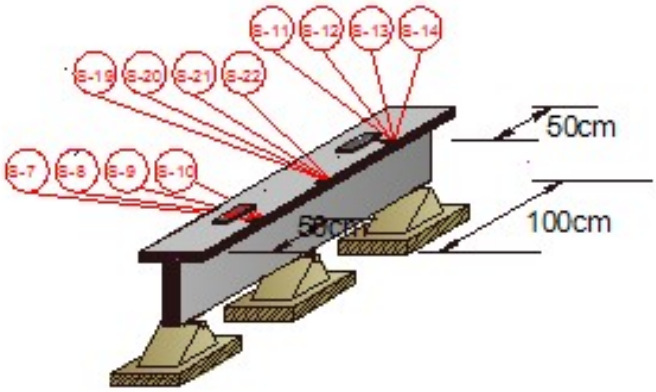


Figura 110– Posição dos strains de S-7 a S-22, na mesa da viga

As deformações obtidas nos extensômetros de S-7 a S-10 são apresentadas no gráfico abaixo (Figura 111). E as deformações de S-11 a S-14 são apresentadas na Figura 112.

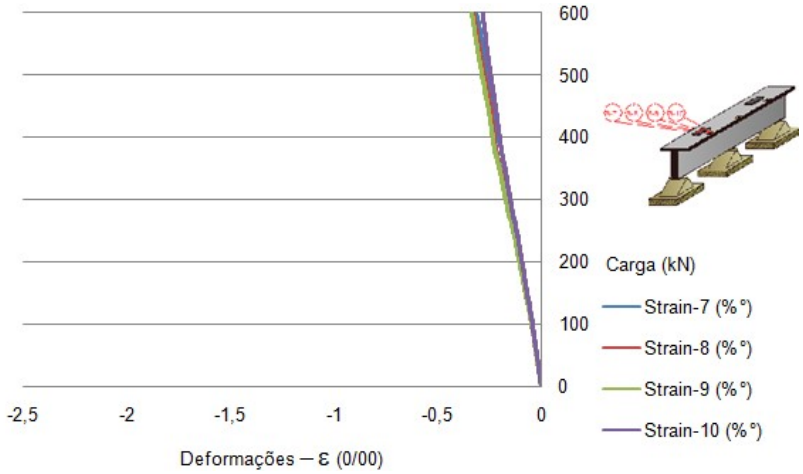


Figura 111– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetros S-7 a S-10

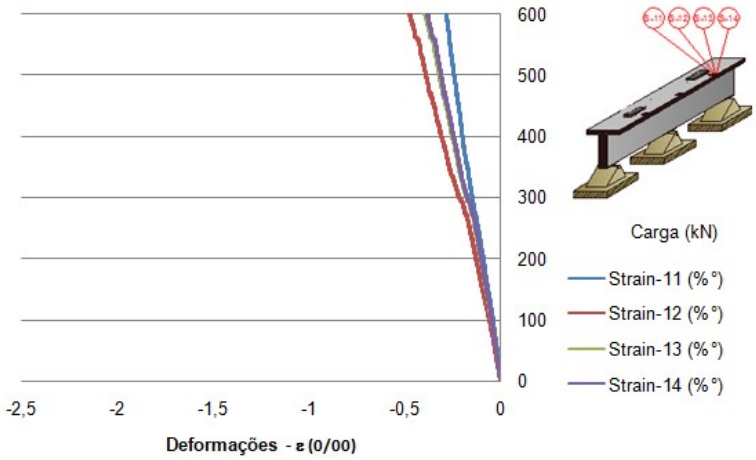


Figura 112 – Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetros S-11 a S-14

As deformações na armadura longitudinal, na região do apoio central (meio do vão) são apresentadas no gráfico a seguir (Figura 113). Pode-se notar que ocorreram pequenas deformações nessas armaduras, uma vez que nessa viga esses pontos de instrumentação encontravam-se sobre o apoio intermediário.

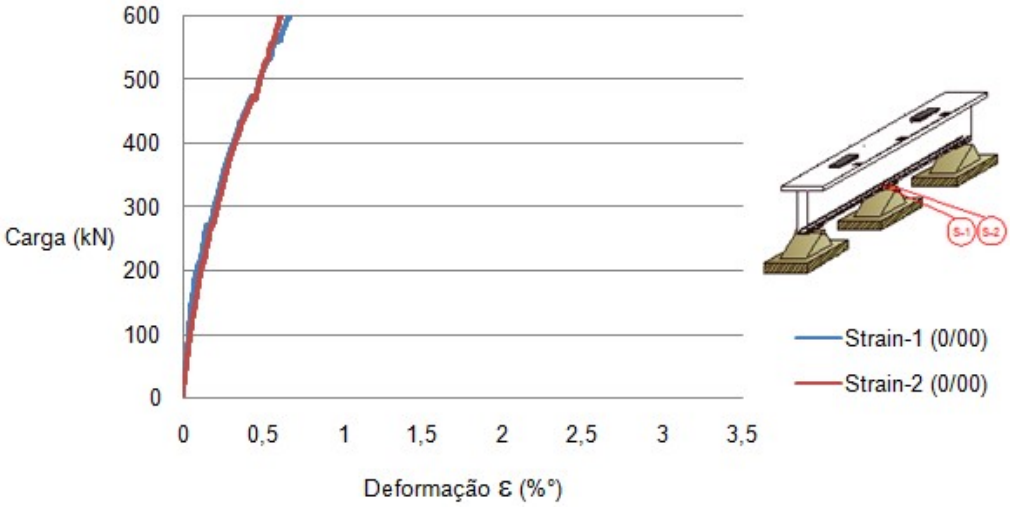


Figura 113– Gráfico Carga X Deformações de M-II-V3, extensômetrosS-1 e S-2

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-II-V-3 para uma carga de 501kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras numa carga de 680,10 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 114.

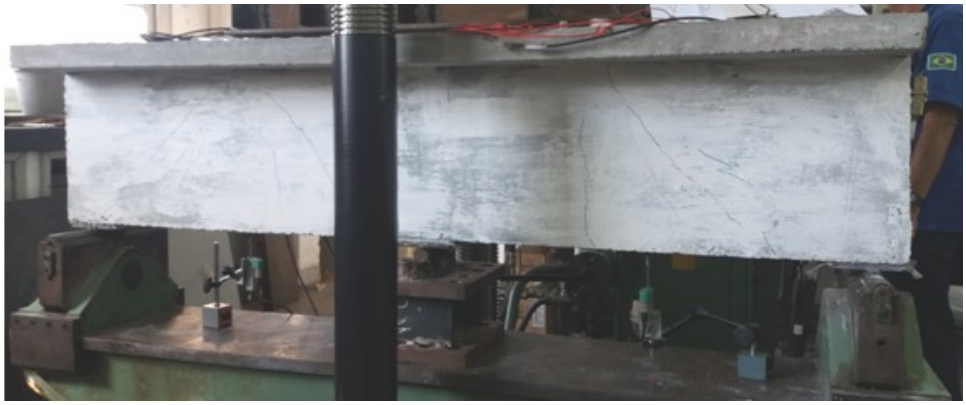


Figura 114– Aspecto fissurado de M-II-V3

A ruptura da viga M-II-V3 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que alcançaram a mesa. No entanto, não chegou a ocorrer esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 115 e no respectivo detalhe.

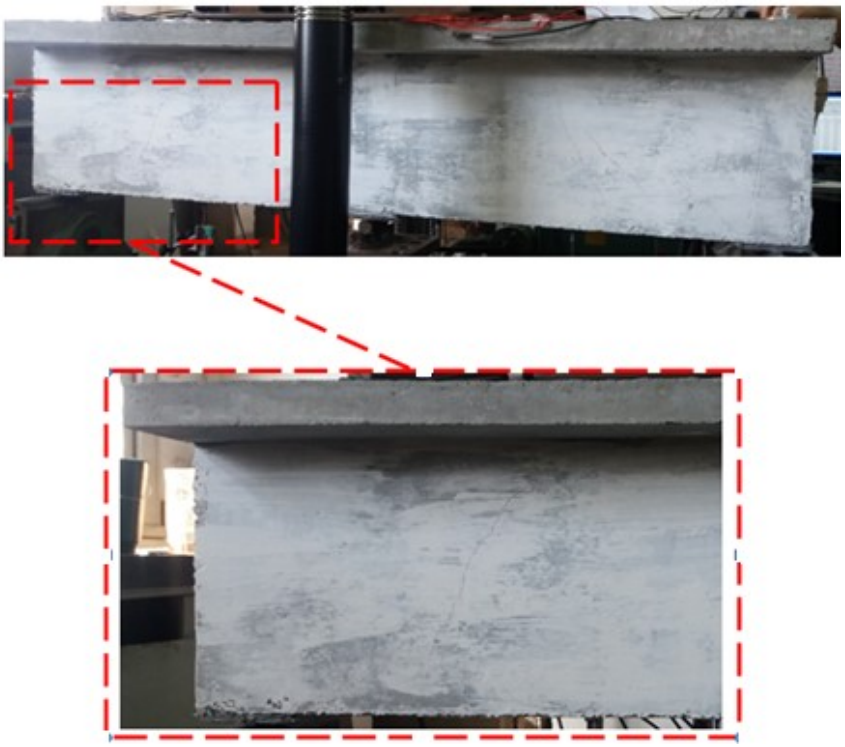


Figura 115– Aspecto de M-II-V3 na ruptura

2.5. Ensaios das Vigas do Modelo III

2.5.1 Confecção das Vigas do Modelo III

Foram concretadas quatro vigas que pertencem ao modelo dois, cuja geometria foi detalhada na Figura 116. Essas vigas foram armadas, instrumentadas e, em seguida, concretadas simultaneamente no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ (LEC).

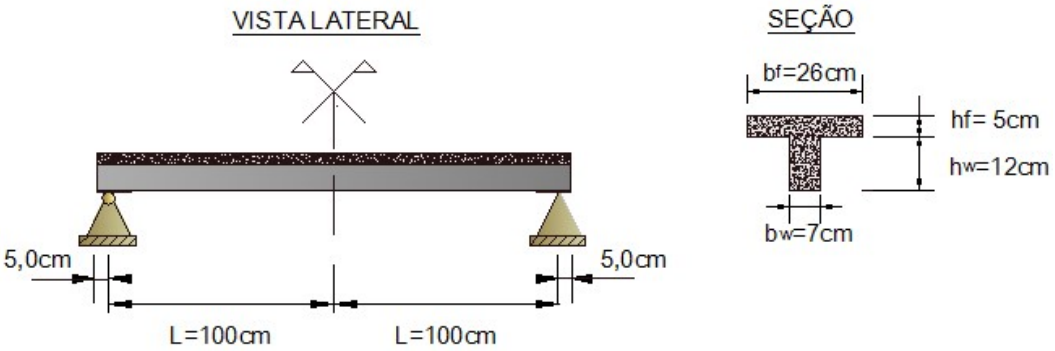


Figura 116– Características da viga do modelo III

As vigas pertencentes ao modelo III receberam a seguinte nomenclatura:

- Viga M- III-V-1- Viga com carga pontual, na região central do vão;
- Viga M- III-V-2- Viga com cargas pontuais, tendo apoio intermediário na região central do vão;
- Viga M- III-V-3- Viga onde foram aplicadas cargas distribuídas na mesa, nos terços médios do vão;
- Viga M- III-V-4- Viga com carga uniformemente distribuída na região da alma.

As vigas possuíam armadura longitudinal (principal) no diâmetro de 6.3mm e uma armadura superior (armadura de montagem) de 5.0 mm. Os detalhes dessas armaduras são apresentados na Figura 117. O detalhamento das armaduras transversais e longitudinais será apresentado no apêndice desse texto.

Figura 117– Armadura com estribos e barras longitudinais do modelo III

Pelo fato das armaduras serem acomodadas apenas na alma da seção, os cobrimentos tiveram que ser reduzidos para: 1,5cm de cobrimento lateral e 2,0cm de cobrimento inferior.

O concreto foi lançado manualmente e adensado com vibrador de imersão. Todo o processo de lançamento e adensamento do concreto foi executado conservando os cobrimentos previamente determinados, através da utilização de espaçadores.

O aspecto das três vigas após a concretagem é apresentado na Figura 118.

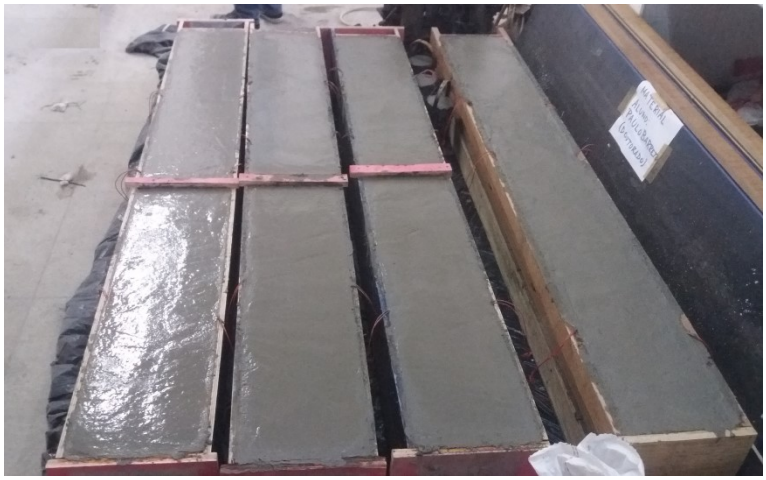


Figura 118 - Vigas após a concretagem

2.5.2 Resultados dos Ensaios das Vigas do Modelo III

As quatro vigas possuíam seção transversal e armaduras idênticas, sendo adotados tipos de carregamentos distintos para cada viga. Por esse motivo, os resultados serão apresentados separadamente nos itens que se seguem.

2.5.2.1 Ensaio da Viga M-III-V-1

A viga M-III-V-1 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira pontual, no meio do vão. Essa carga era aplicada na direção da alma da viga, através de perfil metálico reforçado, possuindo dimensões de contato com a viga de 21cm x 7,0cm, mantendo uma relação de 1/10 do comprimento da viga. Esse perfil é mostrado na Figura 119.

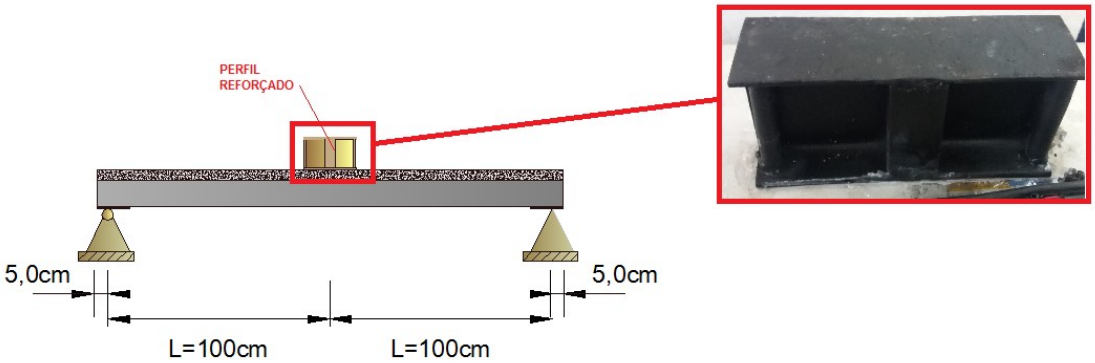


Figura 119– Perfil para aplicação de carga

O aspecto geral da viga V-1 (do modelo III), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 120.

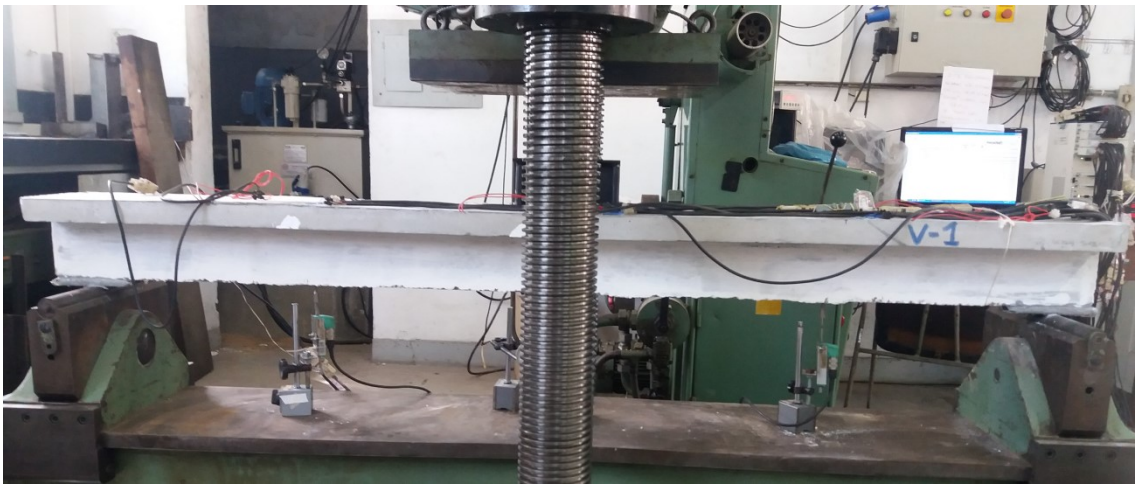


Figura 120– Viga M-III-V-1 posicionada para ensaio

Por tratar-se de uma viga com alma muito esbelta, foram usadas chapas metálicas de ½" de espessura na região dos apoios, com o objetivo de melhor distribuir os esforços de cisalhamento na região dos apoios, conforme mostrado na Figura 121.

Figura 121– Chapa posicionada sob os apoios

As flechas foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos no meio do vão (L/2), onde ocorreram os maiores deslocamentos, bem como na região próxima aos terços médios. Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 122).

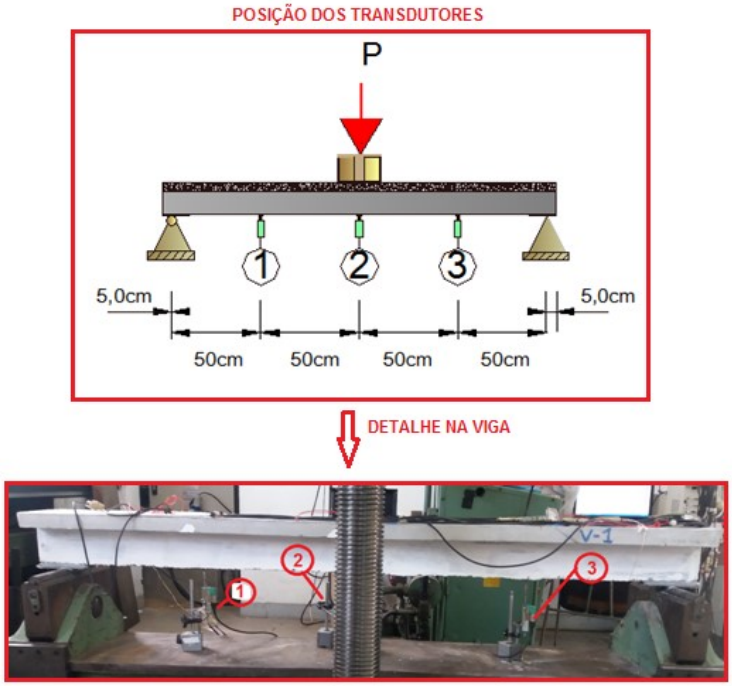


Figura 122 – Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas na Figura 123. Nessa figura pode-se notar uma proximidade no comportamento das curvas dos transdutores 1 e 3, indicando simetria na distribuição das cargas durante o ensaio.

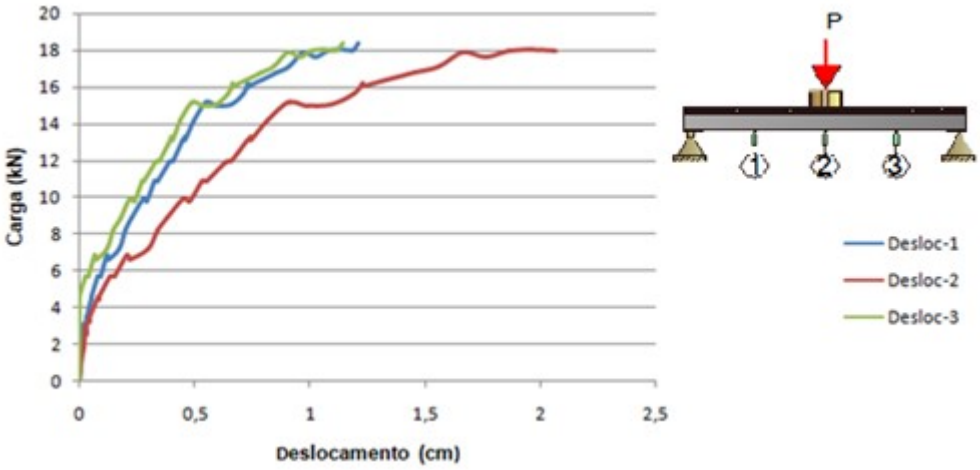


Figura 123– Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos da mesa e da armadura longitudinal. A localização dos extensômetros de S-1 a S-12, que se encontravam posicionados na mesa, é apresentada na Figura 124.

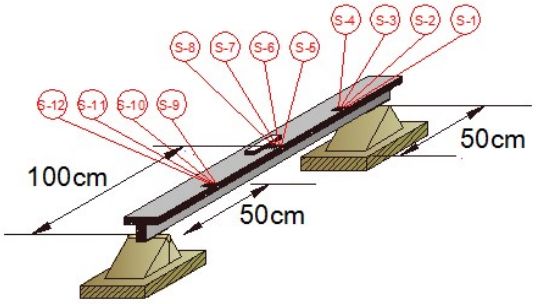


Figura 124– Posição dos extensômetros de S-1 a S-12, na mesa da viga.

As deformações de compressão, obtidas nos extensômetros de S-1 a S-4, são apresentadas na Figura 125. E as deformações de S-5 a S-8 são apresentadas na Figura 126. É possível notar-se comportamento semelhante entre as curvas, inclusive com inflexões dos gráficos nos mesmos valores de cargas.

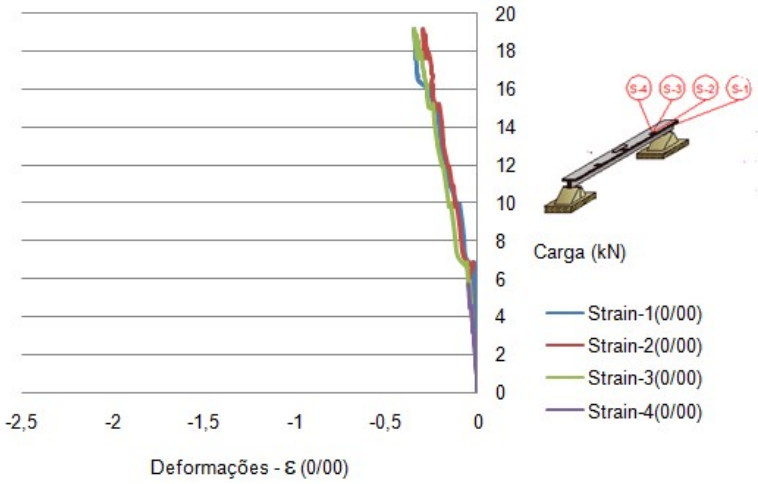


Figura 125 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain gages S-1 a S-4

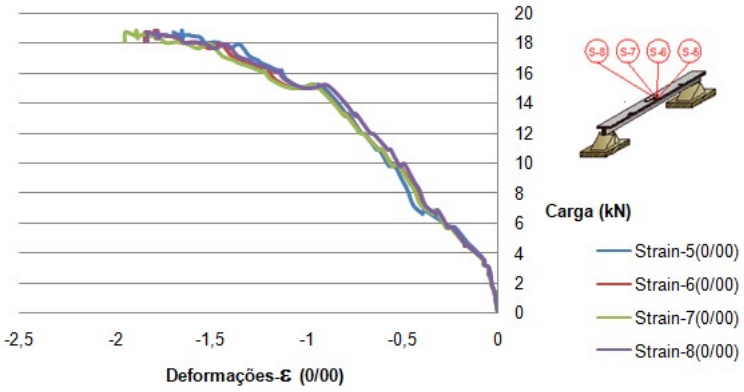


Figura 126– Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain gages S-5 a S-8

No gráfico da Figura 127 são apresentadas as deformações nos extensômetros de S-9 a S-12, posicionados de maneira simétrica aos demais cuja numeração vai de S-1 a S-4.

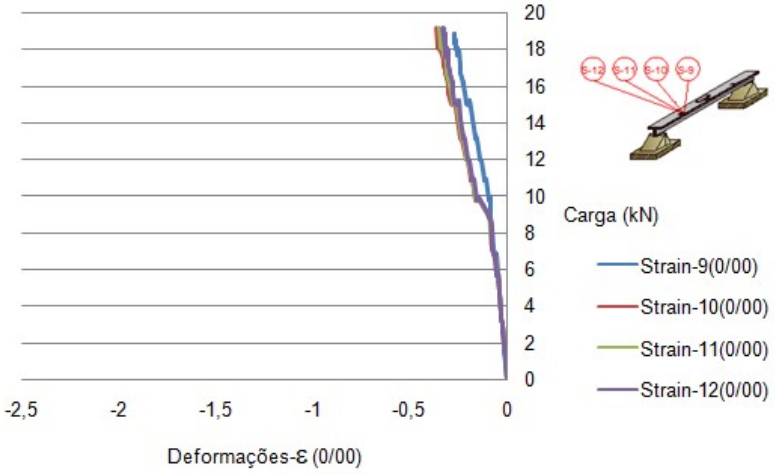


Figura 127 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strains S-9 a S-12

As deformações na armadura longitudinal, no ponto de maior momento fletor (meio do vão) são apresentadas na Figura 128.

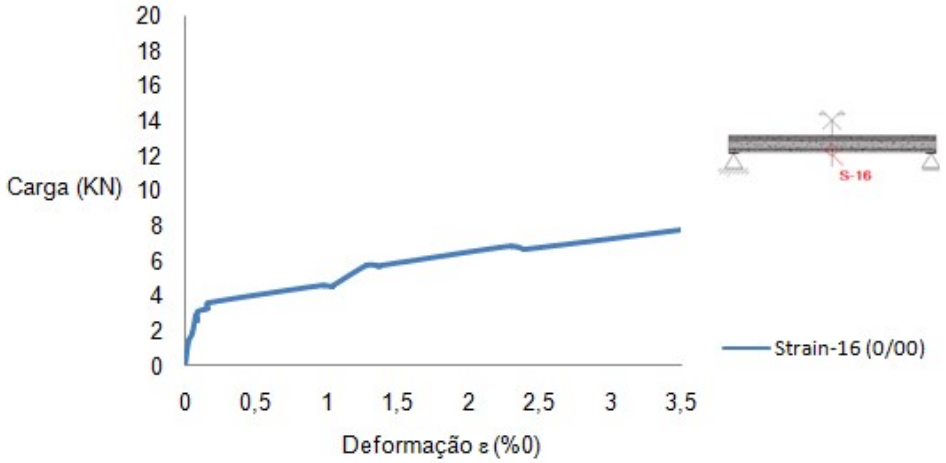


Figura 128 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V1, strain S-16

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-III-V-1 para uma carga de 3,10 kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,05mm) numa carga de 6,9 kN. O aspecto geral das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 129.

Figura 129– Aspecto fissurado de M-III-V1

A ruptura da viga M-III-V1 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que alcançaram a mesa, ocasionando posterior esmagamento do concreto na mesa (banzo comprimido), conforme mostrado na figura no respectivo detalhe.

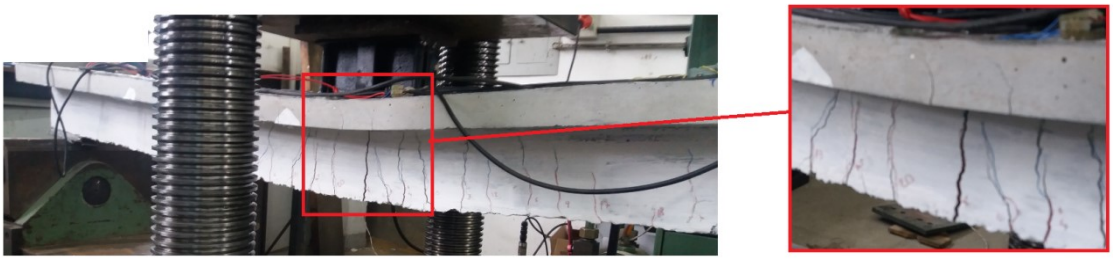


Figura130 – Aspecto de M-III-V1 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 18,70kN ocorreu à ruptura das armaduras inferiores (A_s de flexão) o que resultou na completa fratura da viga, na região central, onde estava sendo aplicada a carga. O aspecto final da viga M-III-V1 é mostrado na Figura 131.

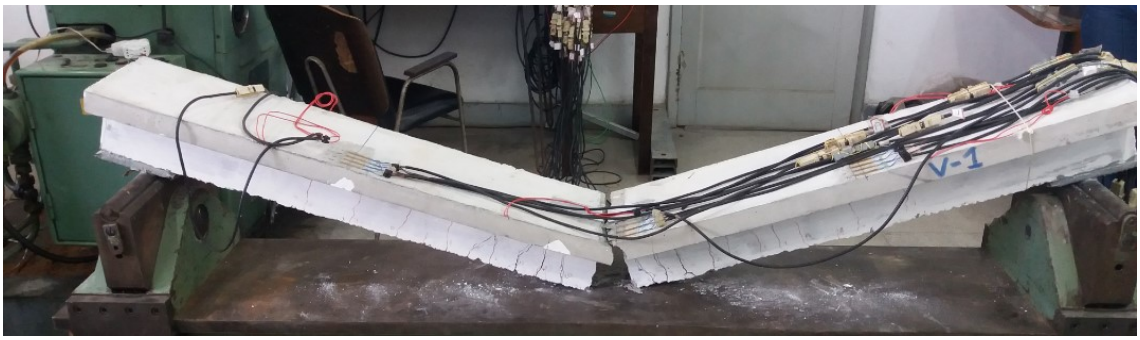


Figura 131 – Aspecto de M-III-V1 após ruptura

2.5.2.2 Ensaio da Viga M-III-V-2

A viga M-III-V-2 foi ensaiada a inserção de apoio intermediário, dividindo a viga em dois tramos. Cada tramo recebeu o carregamento de maneira pontual, no

meio do vão. Essa carga era aplicada na direção da alma da viga, através de dois perfis metálicos reforçados, cuja medida da superfície de contato era 21cm x 7,0cm sobre os quais se apoiava o perfil de aplicação de carga, conforme mostrado na Figura 132.

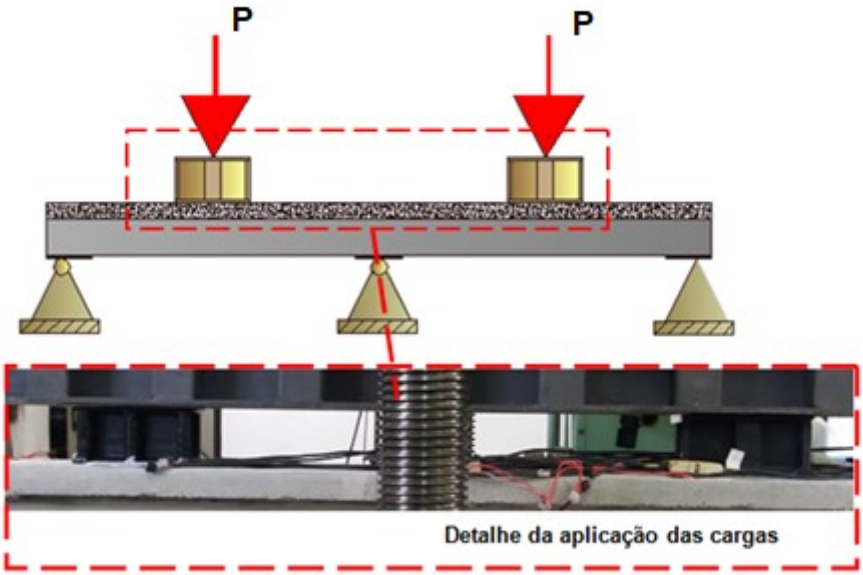


Figura 132 – Detalhe dos perfis para aplicação das cargas

O aspecto geral da viga V-2 (do modelo III), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 133.

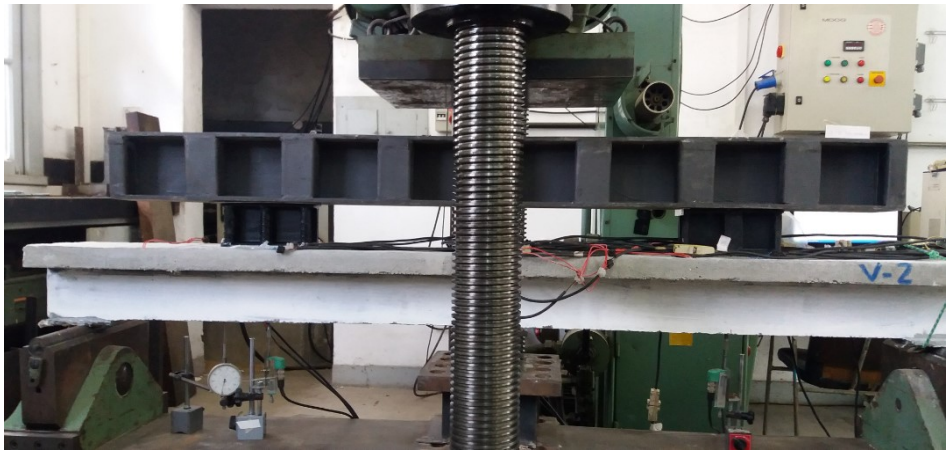


Figura 133 – Viga M-III-V-2 posicionada para ensaio

Por tratar-se de uma viga com alma muito esbelta, foram usadas chapas metálicas na região dos três apoios, com o objetivo de melhor distribuir os esforços de cisalhamento, conforme mostrado na Figura 134. Nessa figura é mostrado, também, o detalhe do dispositivo usado como apoio na região central da viga.

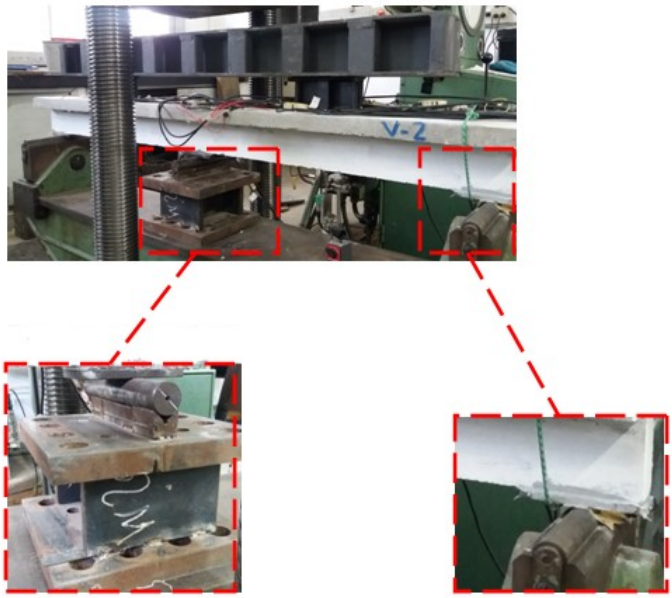


Figura 134– Chapa e dispositivo sob os apoios

As flechas foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos no meio de cada tramo (L/2), que foi o ponto onde ocorreram os maiores deslocamentos. Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 135).

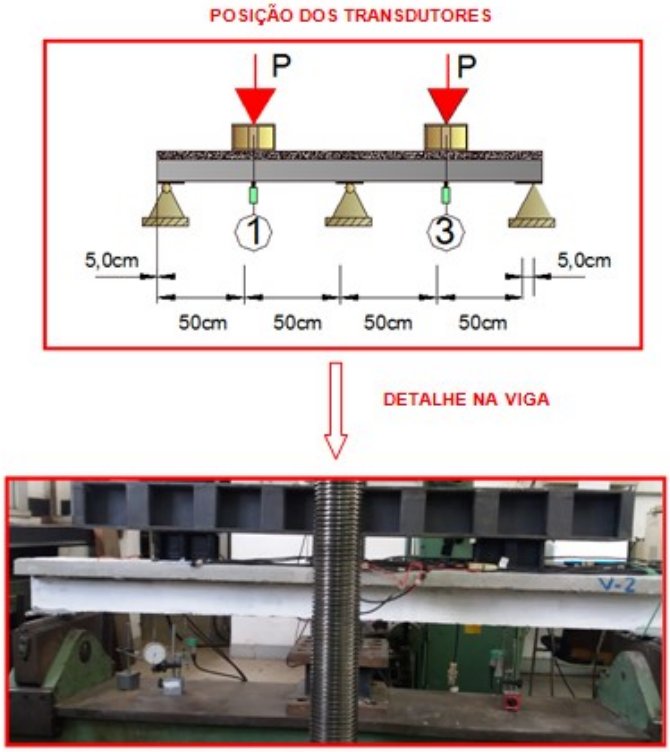


Figura 135 – Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, e 3 são apresentadas na Figura 136.

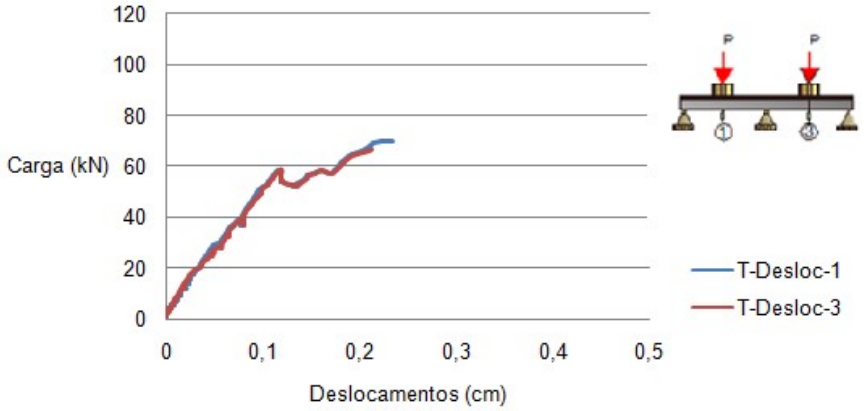


Figura 136 – Gráfica carga x flecha

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos na lateral das chapas de aplicação de cargas. A localização dos extensômetros de S-1 a S-8, que se encontravam posicionados na mesa, é apresentada na Figura 137.

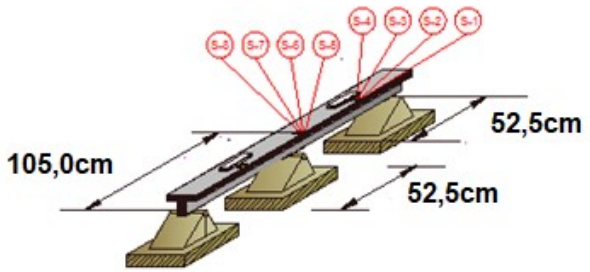


Figura 137– Posição dos strain de S-1 a S-8, na mesa da viga

O extensômetro S-1 apresentou problemas de funcionamento, por cota disso, seus dados não são apresentados no gráfico. Para as deformações obtidas nos strain gages de S-2 a S-4 foram elaborados os gráficos a seguir (Figura 138).

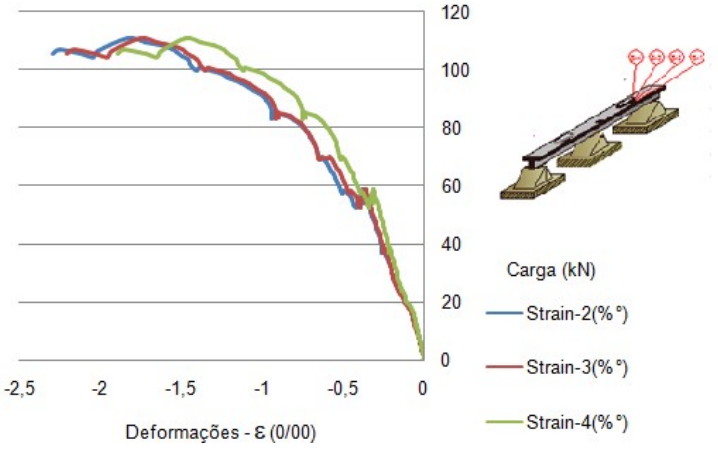


Figura 138 – Gráfica Carga X Deformações de M-III-V2, strain S-2 a S-4

E as deformações de S-5 a S-8 que estavam colados na região da mesa localizada sobre o apoio central (região de momentos negativos) são apresentadas na figura abaixo.

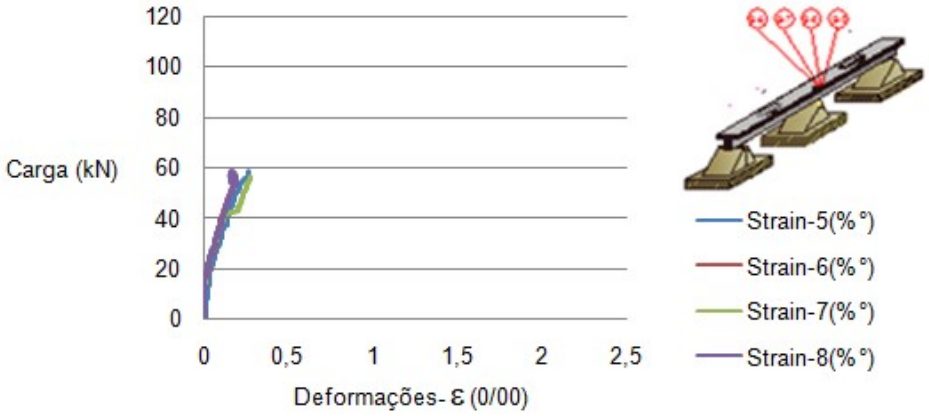


Figura 139– Gráfica Carga X Deformações de M-III-V-2, strains S-5 a S-8

As deformações na armadura longitudinal foram verificadas por extensômetros localizados no centro de cada tramo (L/2). As curvas que representam essas deformações são apresentadas na Figura 140.

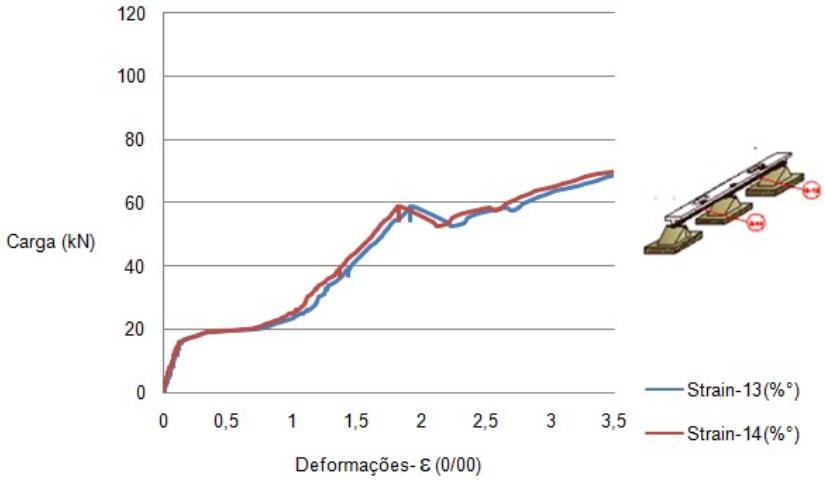


Figura 140 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V2, strains S-13 e S-14

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-III-V-2 para uma carga de 12,0 kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,05mm) numa carga de 30 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 141.

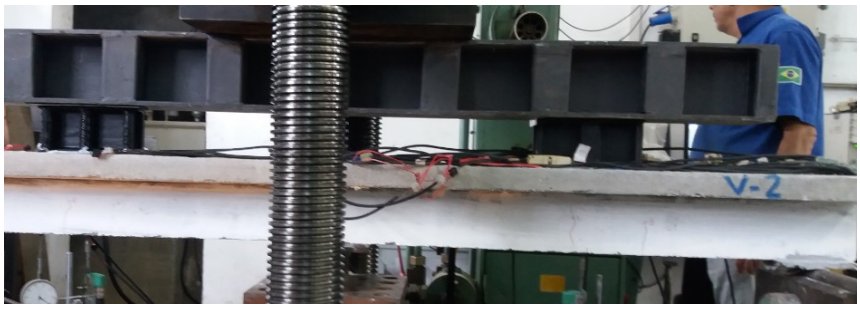


Figura 141 – Aspecto fissurado de M-III-V-2

A ruptura da viga M-III-V-2 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que apareceram na mesa, na região de momentos negativos ocasionando conseqüente fissura do concreto na mesa (banzo tracionado), conforme mostrado na Figura 142 e detalhe. Esse comportamento já era esperado uma vez que esse modelo de viga não possuía armadura na parte superior da mesa, para combater os momentos negativos naquela região.

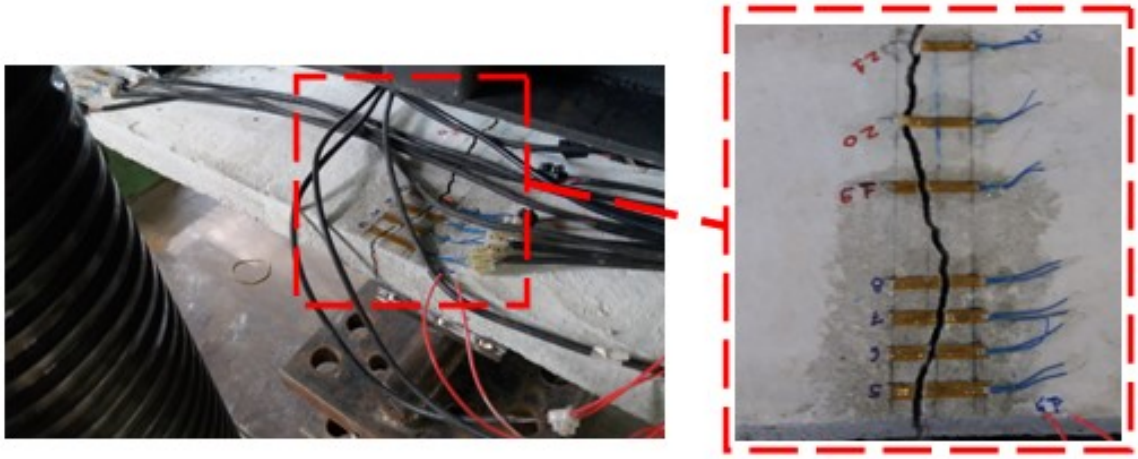


Figura 142– Aspecto de M-III-V-2 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 110,80 kN ocorreu à ruptura da mesa o que resultou na completa fratura da viga, na região central, onde estava localizado o apoio central. O aspecto final da viga M-III-V-2 é mostrado na Figura143.

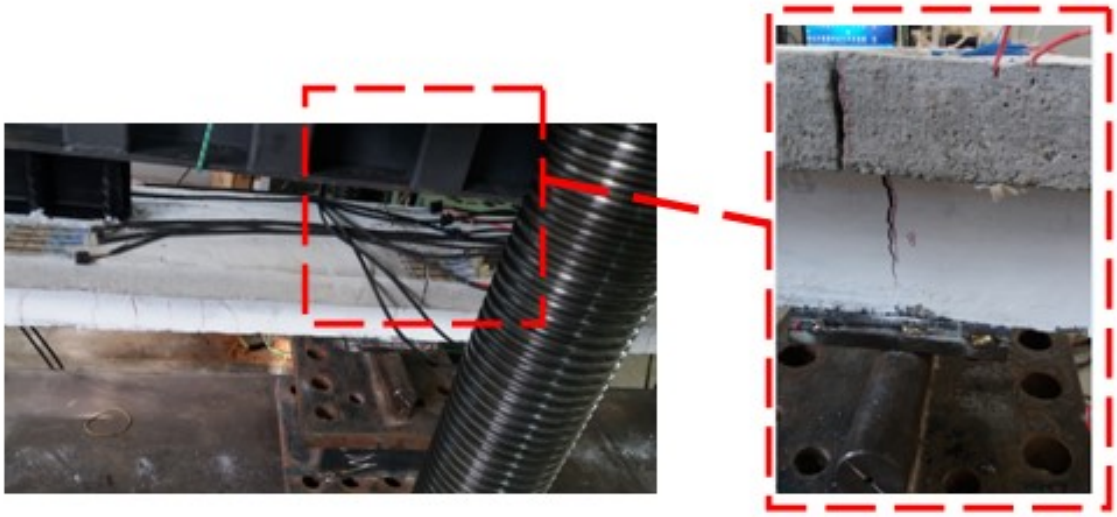


Figura143 – Aspecto de M-III-V-2 após ruptura

2.5.2.3 Ensaio da Viga M-III-V-3

A viga M-III-V-3 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira pontual, em região próxima aos terços do vão. Essa carga era aplicada na direção da mesa da viga, através de dois tarugos cilíndricos metálicos, sobre os quais se apoiava o perfil de distribuição de carga, conforme mostrado na Figura 144.

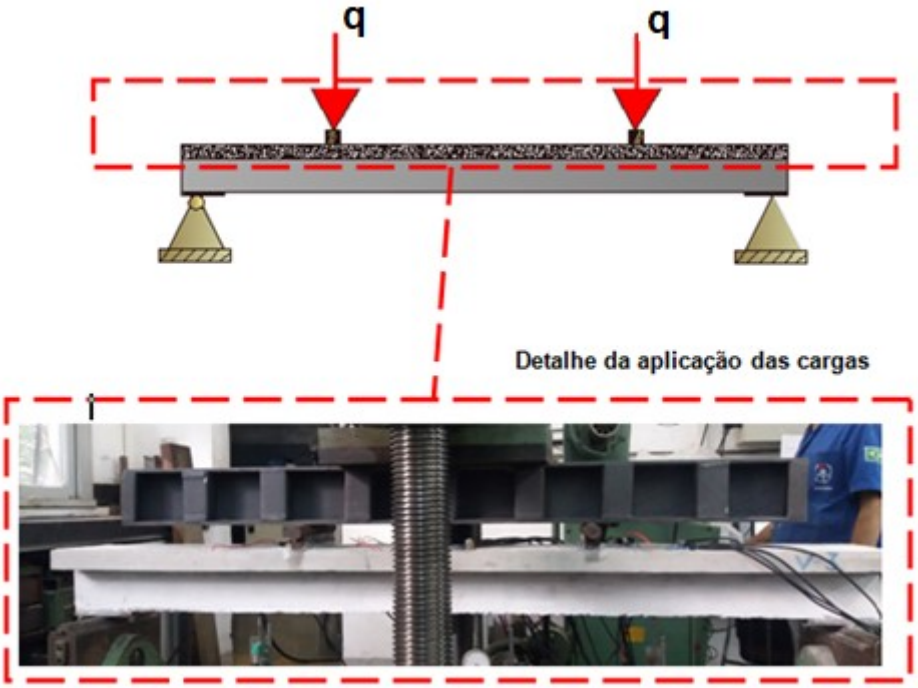


Figura 144 – Detalhe dos perfis para aplicação das cargas

O aspecto geral da viga V-3 (do modelo III), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 145.

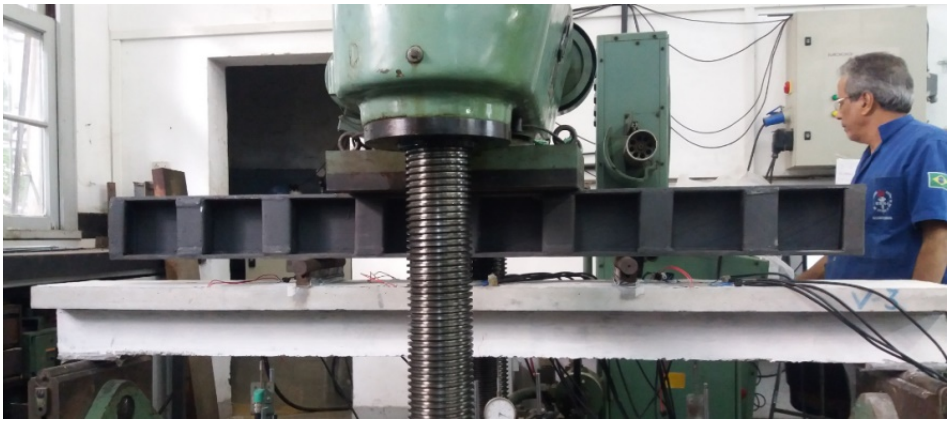


Figura 145– Viga M-III-V-3 posicionada para ensaio

Por tratar-se de uma viga com alma muito esbelta, foram usadas chapas metálicas na região dos dois apoios, conforme mostrado na Figura 146.

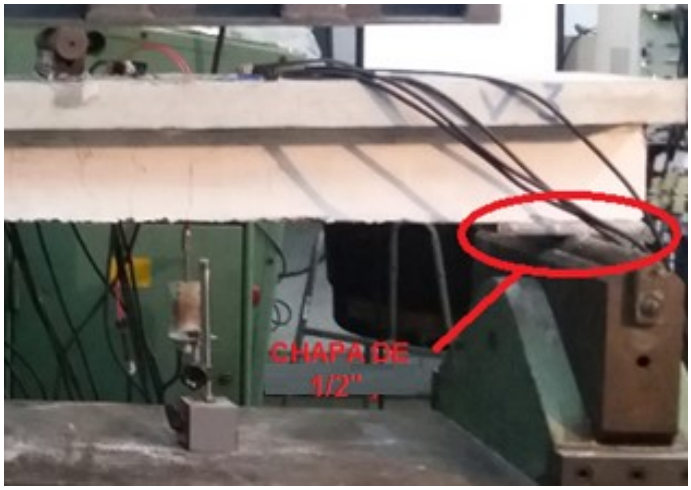


Figura 146– Chapa de reforço sob os apoios

As flecha que ocorreram na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos na direção da aplicação da carga, que é o ponto onde ocorreram os maiores deslocamentos, bem como na região próxima aos terços médios. A posição dos transdutores utilizados está apresentada Figura 147.

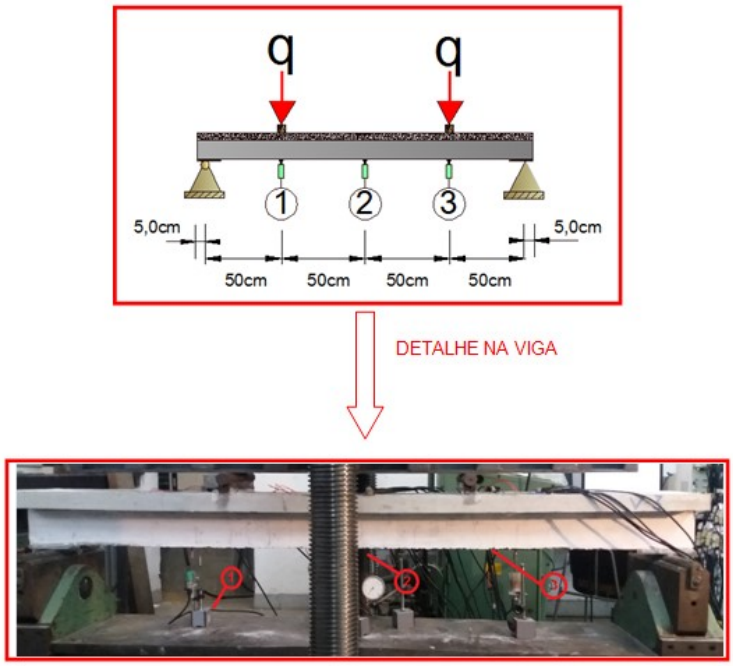


Figura 147 – Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas no gráfico abaixo (Figura 148).É possível observar que os gráficos dos transdutores 1 e 3 apresentam semelhança no comportamento das curvas, indicando haver uma distribuição simétrica das cargas na viga.

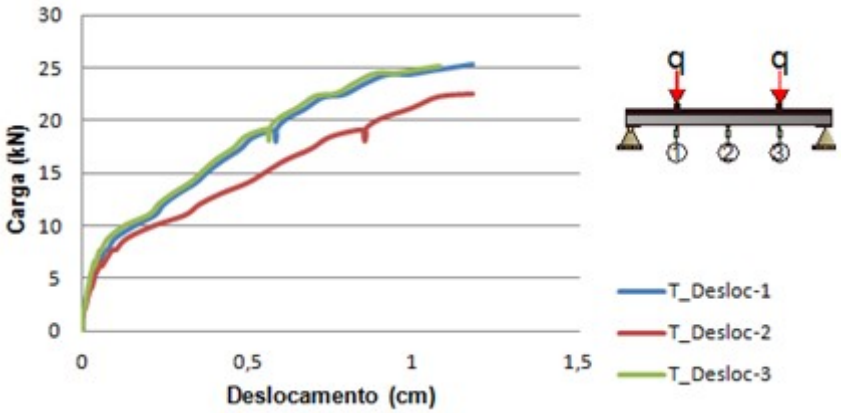


Figura 148 – Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos pré-determinados da mesa. A localização dos extensômetros de S-1 a S-8, que se encontravam posicionados na mesa, é apresentada na Figura 149.

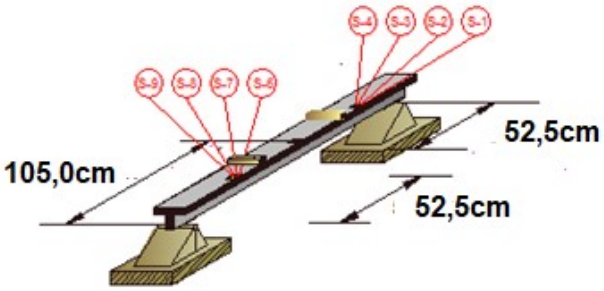


Figura 149 – Posição dos extensômetros de S-1 a S-8, na mesa da viga

Para as deformações obtidas nos strain gages de S-1 a S-4 foram elaborados os gráficos a seguir Figura 150.

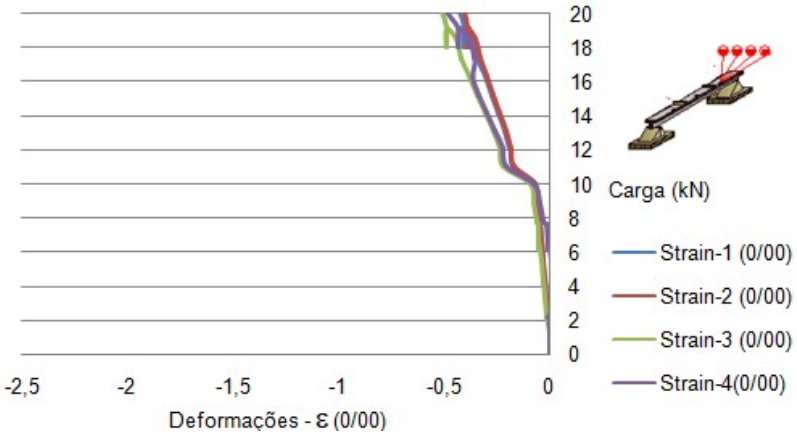


Figura 150 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V3, extensômetrosS-1 a S-4

E as deformações de S-6 a S-9 que estavam colados na região da mesa localizada na região L/4 o são apresentadas na Figura 151.

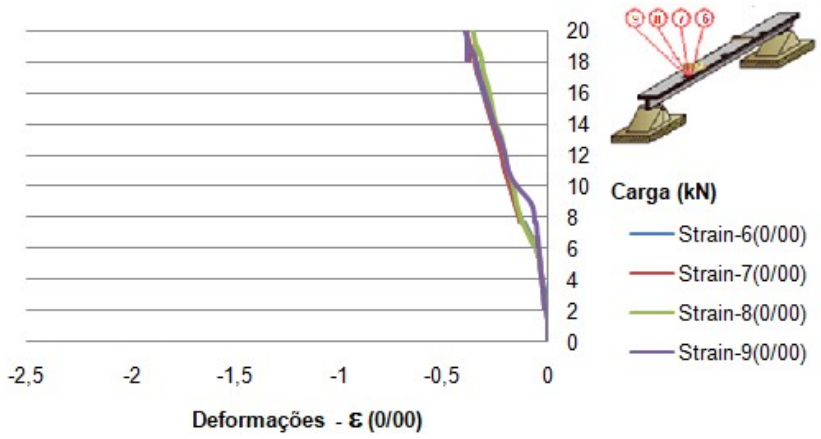


Figura 151 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V-3, strains S-6 a S-9

As deformações na armadura longitudinal, no ponto de maior momento fletor (meio do vão) são apresentadas no gráfico a seguir (Figura 152).

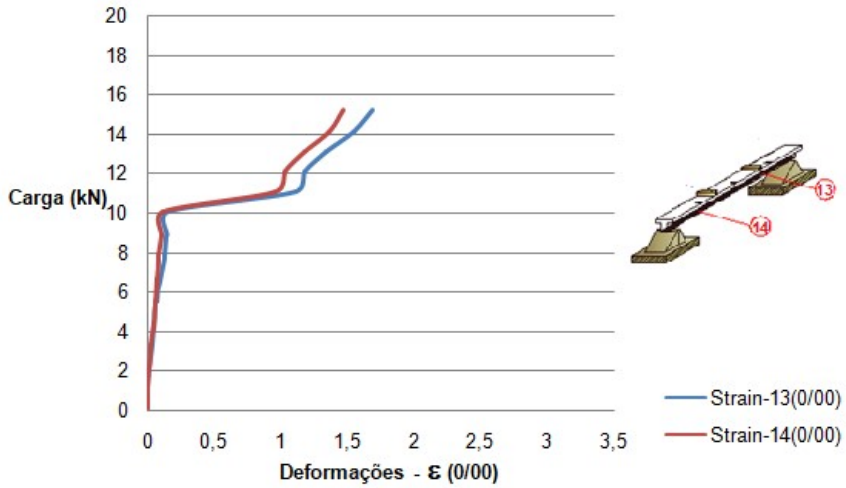


Figura 152 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V-3, strains13 e 14

As primeiras fissuras visíveis surgiram na viga M-III-V-3 para uma carga de 6,2 kN, sendo registrada uma acentuação na abertura das fissuras (passando de 0,01mm para 0,05mm) numa carga de 17 kN. O aspecto das fissuras registradas na região da alma (banzo tracionado) é apresentado na Figura 153.

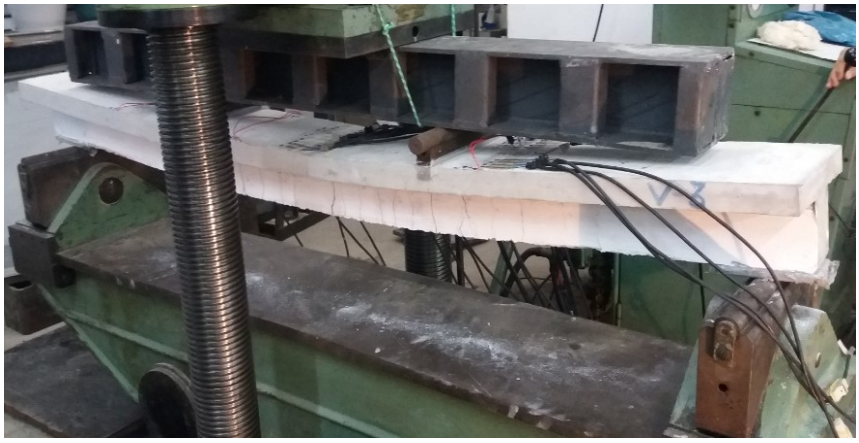


Figura 153 – Aspecto fissurado de M-III-V-3

A ruptura da viga M-III-V-3 deu-se por flexão, com a evolução das fissuras que apareceram na alma, evoluindo para a mesa, ocasionando conseqüente fissura do concreto nessa região (banzo comprimido), conforme mostrado na Figura 154 e no respectivo detalhe. Nessa fase a viga chegou a apresentar uma abertura de fissura, na região central do vão, de 5,0 mm.

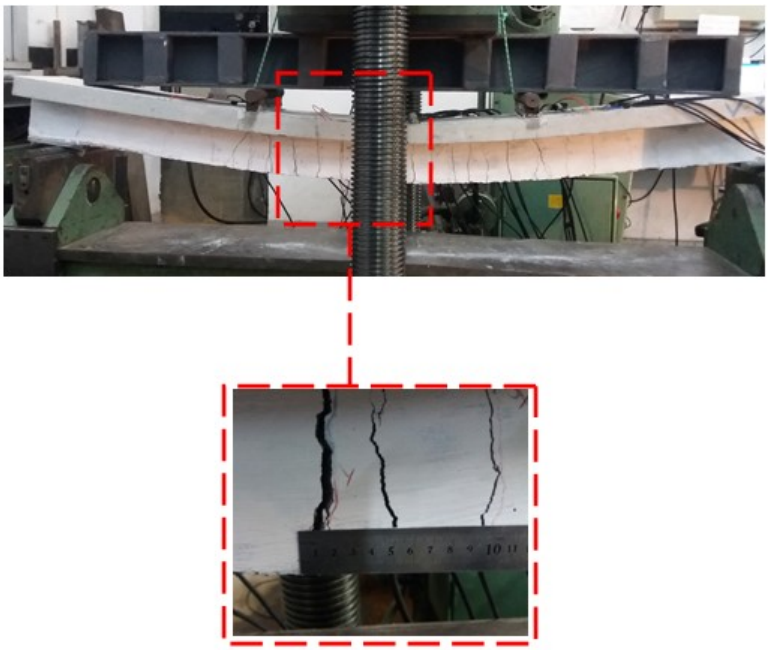


Figura 154– Aspecto de M-III-V-3 na ruptura

Quando foi atingida uma carga de 28,86 kN ocorreu à ruptura da mesa o que resultou na completa fratura da viga, na região central. O aspecto final da viga M-III-V-3 é mostrado na Figura 155.

Figura 155 – Aspecto de M-III-V-3 após ruptura

2.5.2.4 Ensaio da Viga M-III-V-4

A viga M-III-V-4 foi ensaiada com o carregamento sendo aplicado de maneira distribuída ao longo da alma. Essa carga era aplicada viga através de perfil metálico, apoiado sobre um flifete de neoprene com 7,0cm de espessura. O arranjo desse ensaio é apresentado na Figura 156.

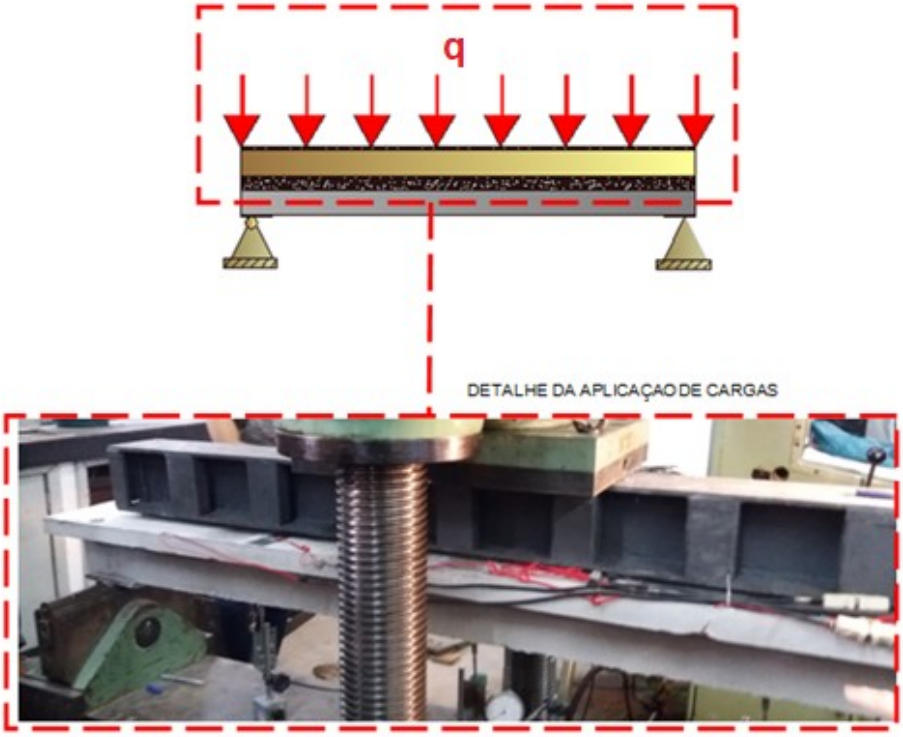


Figura 156 – Detalhe do perfil para aplicação das cargas

O aspecto geral da viga V-4 (do modelo III), antes do início do ensaio é apresentado a na Figura 157.

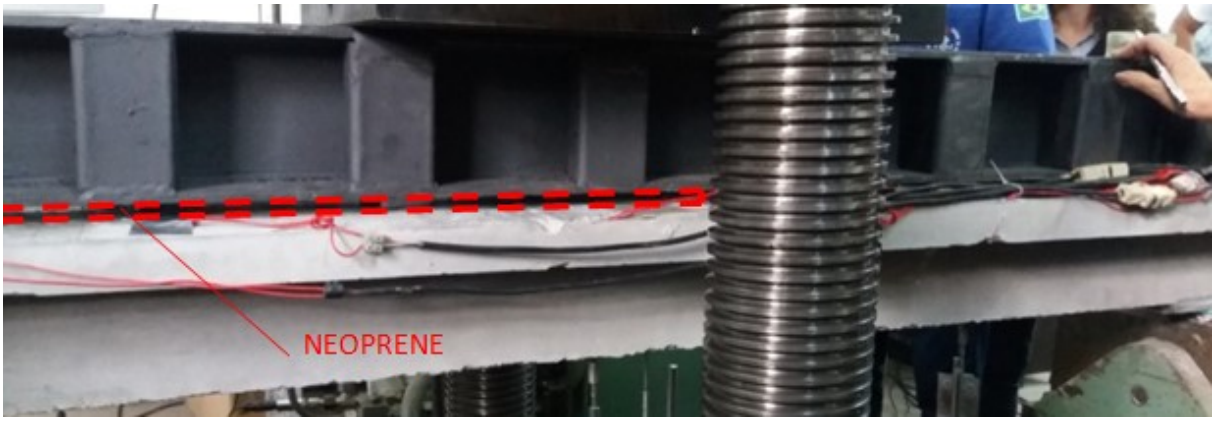


Figura 157 – Viga M-III-V-4 posicionada para ensaio

Por tratar-se de uma viga com alma muito esbelta, foram usadas chapas metálicas na região dos dois apoios, com o objetivo conforme mostrado na Figura 158.

Figura 158 – Chapa de reforço sob os apoios

As deflexões (flechas) que ocorreram na viga ensaiada foram medidas com a utilização de transdutores, dispostos na direção da aplicação da carga, que é o ponto onde ocorreram os maiores deslocamentos, bem como na região próxima aos terços médios. Aposição dos transdutores utilizados está apresentada na figura a seguir (Figura 159).

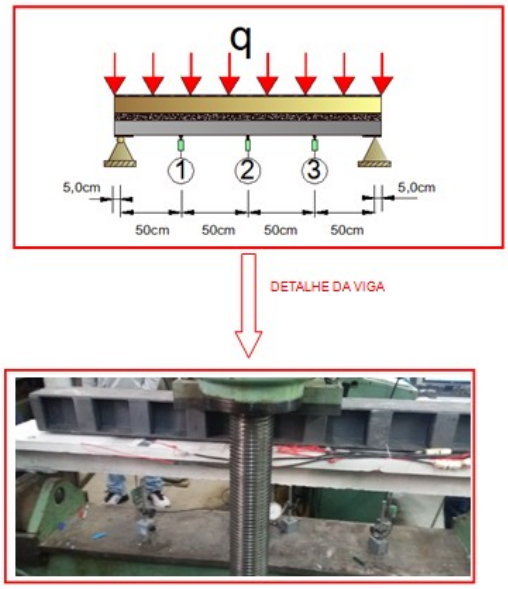


Figura 159 – Posição dos transdutores

As flechas medidas pelos transdutores 1, 2 e 3 são apresentadas na Figura 160. No gráfico é possível notar maiores deslocamentos na viga na região do transdutor de número 3.

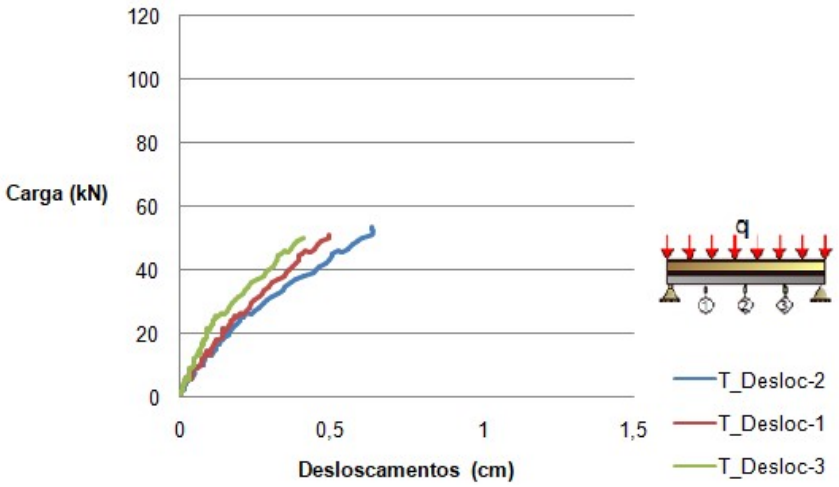


Figura 160 – Gráfico carga x flecha

As deformações foram obtidas com a instalação de extensômetros de resistência elétrica, que foram posicionados em pontos pré-determinados da mesa. A localização dos extensômetros de S-1 a S-8, que se encontravam posicionados na mesa, é apresentada na Figura 161.

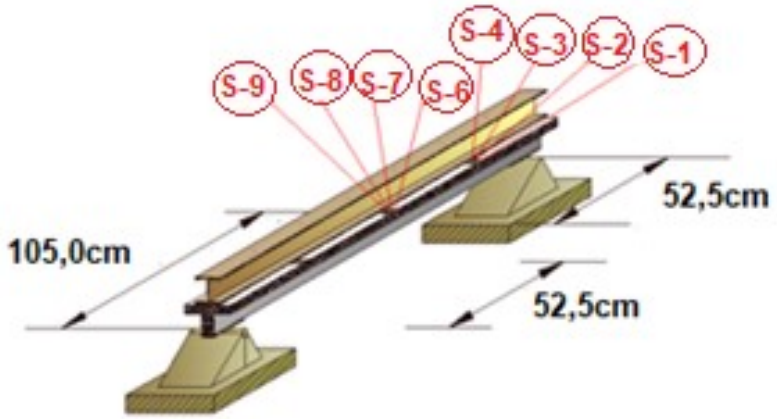


Figura 161 – Posição dos strains de S-1 a S-8, na mesa da viga

Para as deformações obtidas nos strain gages de S-1 a S-4 foram elaborados os gráficos a seguir (Figura 162).

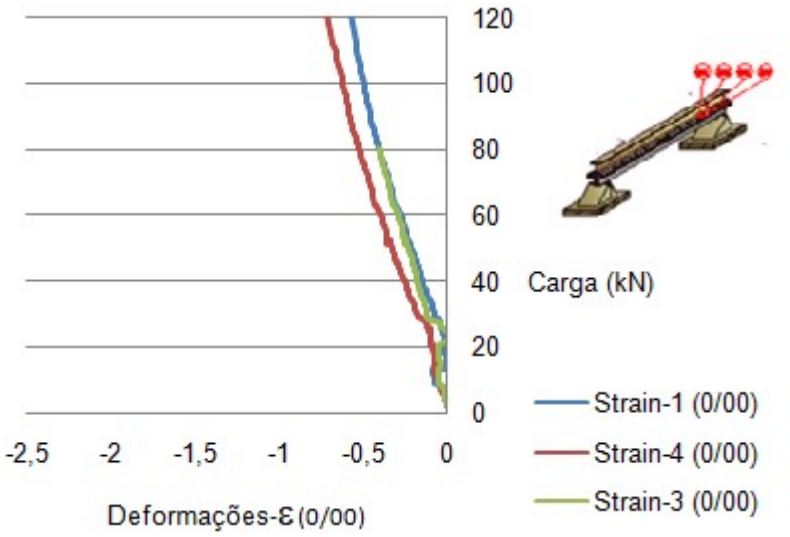


Figura 162 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V4, strains S-1 a S-4

Para as deformações obtidas nos strain gages de S-9 a S-6 foram elaborados os gráficos a seguir (Figura 163). Esses strains localizavam-se no centro da viga (x = 0,50L).

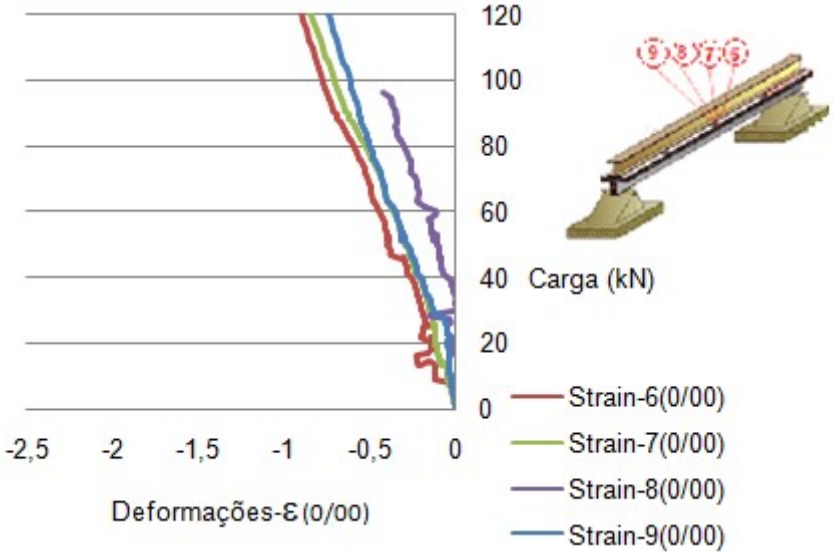


Figura 163 – Gráfico Carga X Deformações de M-III-V3, strains S-9 a S-6

Com relação ao modo de ruptura, para a viga M-III-V-4 ocorreu fissuração na alma, ocorrendo a ruina total da viga para uma carga de 58,10kN. O aspecto da ruptura dessa viga é apresentado na figura a seguir (Figura 164).

Figura 164 – Aspecto da ruptura da viga M-III-V-4

Na figura anterior é possível notar que a ruptura da viga V-4 deu-se por esmagamento de biela comprimida, na região próxima ao apoio. No momento em que ocorreu essa ruptura, tanto a alma quanto a mesa da viga já encontravam-se bastante danificadas por fissuras, chegando a ocorrer desplacamento do concreto da mesa, conforme apresentado na figura a seguir (Figura 165).

Figura 165 – Aspecto e detalhe da ruptura da viga M-III-V-4

3. DETERMINAÇÃO DA LARGURA EFETIVA ATRAVÉS DAS TENSÕES

3.1. Cálculo das Tensões

O cálculo das tensões é um fator importante no estudo da largura efetiva na mesa de uma viga. A determinação dessas tensões possibilita que sejam traçadas as curvas de distribuição, para que através da integração das mesmas sejam obtidas as larguras efetivas.

Por tratar-se de seções de concreto cujas zonas comprimidas encontram-se com deformações inferiores a 2,0 $^0/_{00}$ foi utilizada a curva proposta na NBR-6118 (2014) [1], apresentada na figura a seguir (Figura 166).

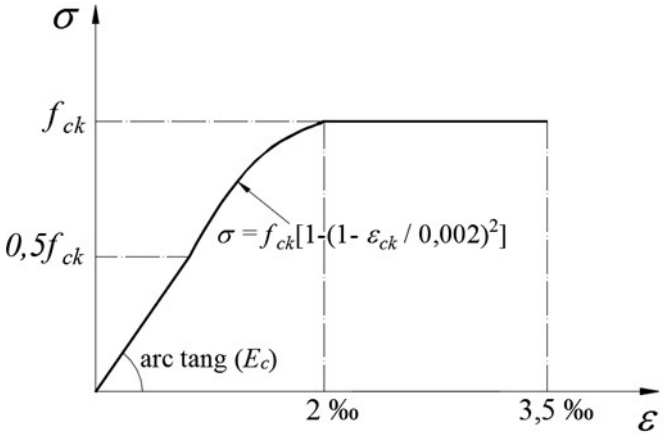


Figura 166 – Curva Tensão x Deformação (NBR-6118) [1]

As deformações verificadas experimentalmente na mesa foram aplicadas na equação abaixo, obtendo-se as tensões.

$$\sigma_{compr,} = f_{ck}\left[1-\left(1-\frac{\varepsilon_{ck}}{0,002}\right)^2\right] \quad (14)$$

Onde:

$\sigma_{compr,}$ - é a tensão de compressão no concreto;

f_{ck} – é a resistência a compressão no concreto;

ε_{ck} - é a deformação no concreto (dados experimentais).

Com base nas tensões experimentais foram traçadas as curvas de tensões, para o valor de cada carregamento aplicado nas vigas ensaiadas, sendo essas curvas apresentadas nos itens subseqüentes desse texto.

3.2. Integração das Curvas de Tensão

Após o cálculo das tensões e o respectivo traçado de suas curvas foi preciso determinar um polinômio que represente essas curvas. Nesse trabalho foram adotadas funções polinomiais mono variáveis, devido a uma maior simplicidade na integração desse tipo de função.

Cada função polinomial foi obtida através do procedimento de regressão da curva de tendências do Excel [22]. Em geral, as linhas de tendência que melhor representaram as funções de tensões são compostas por polinômios de terceiro e quarto grau. A caixa de diálogos utilizada para escolha do grau polinomial da linha de tendência é mostrado na Figura 167.

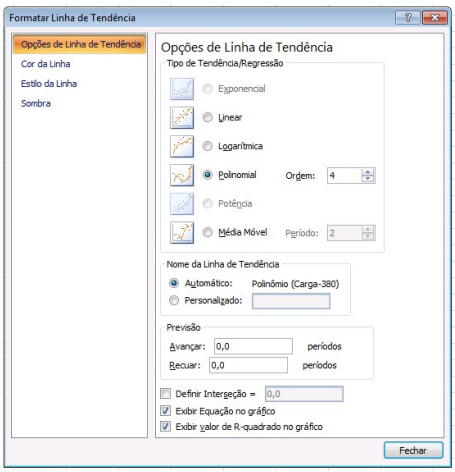


Figura 167 – Escolha do grau polinomial no Excel [22]

Após a escolha do grau do polinômio, era possível verificar sua adequação a curva de tensões através do parâmetro R^2, conforme ilustrado na Figura 168.

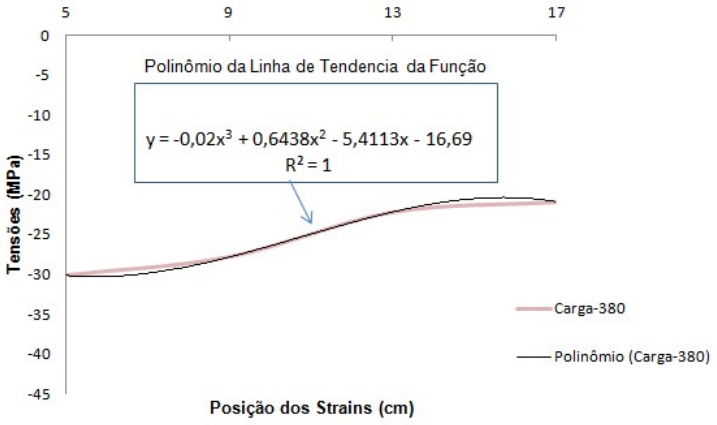


Figura 168 – Função polinomial da Linha de tendência

A verificação da adequação da linha de tendência aos valores reais da tensão foi testada através da aplicação dos valores de *x* (posição dos strains) na função polinomial *y* (x) obtida. Ou seja, se tomar-se como exemplo a função apresentada na figura anterior ($y = -0{,}02x^3 + 0{,}6438x^2 - 5{,}4113x - 16{,}69$), ao substituir o valor da variável fazendo x=5,0cm, obtém-se: $y = -0{,}02(5)^3 + 0{,}6438(5)^2 - 5{,}4113(5) - 16{,}69 = -30{,}15$, sendo exatamente esse o valor da tensão experimental nesse ponto.

A integração dessa linha de tendência fez-se necessária para a obtenção da área sob a curva do gráfico de tensões. Ou seja, a integração da função polinomial (f(x)) fornece a área sob a curva, conforme o apresentado na expressão a seguir:

$$A = \int_{sf}^{si} fx(dx) \tag{15}$$

O limite de integração está fixado pela posição do strain inicial (s_i), próximo ao meio da viga e do strain final (s_f), localizado na extremidade da mesa. A obtenção dessa área é ilustrada na Figura 169.

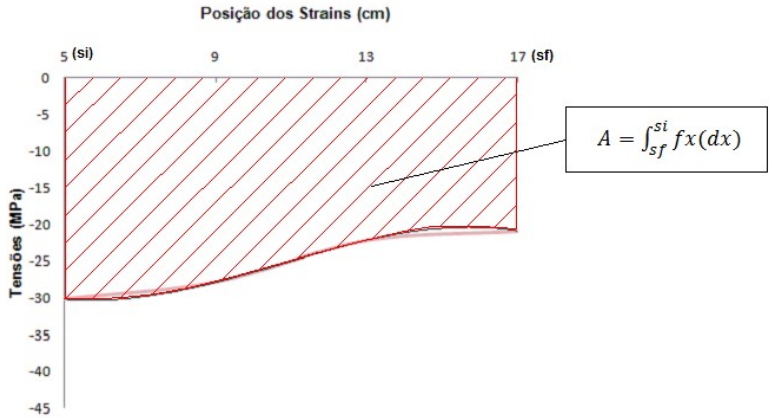


Figura 169 – Obtenção da área sob a curva através de integração

Uma vez definidos os limites da integração, a função era inserida em uma rotina elaborada com o auxílio do software MATLAB [23], permitindo uma maior agilidade no processo. A sintaxe dessa rotina é apresentada no anexo C desse texto.

O resultado obtido no processo de integração definida das funções polinomiais das tensões era aplicado na expressão a seguir (equação 16), em processo análogo ao proposto por diversos autores já referenciados no capítulo de revisão bibliográfica do presente trabalho, obtendo-se o valor da largura efetiva da mesa.

$$b_{ef,exp} = \frac{1}{\sigma max} \int_{sf}^{si} fx(dx) \tag{16}$$

O conjunto de valores obtidos no processo anteriormente descrito foi organizado para cada viga, encontrando-se agrupados nos itens a seguir. Pode-se observar que tanto a função polinomial que representa a curva de tensões, quanto às tensões máximas, apresentam sinais negativos devido a estarem retratando as tensões de compressão no concreto.

3.3. Análise das Tensões e Determinação das Larguras Efetivas das Vigas

3.3.1 Análise das tensões e Largura efetiva das Vigas MI-V-1

A análise de tensões na mesa da viga foi MI-V1 feita com base nas deformações medidas nos pontos de extensometria. Nesses pontos foram verificadas as deformações, sendo as mesmas convertidas em tensões através da formulação proposta pela NBR-6118/2014 [1].

Cada extensômetro dessa viga recebeu uma numeração e essa mesma numeração é empregada na representação das tensões, ou seja: os extensômetro S-1 originou as leituras te tensão σ_s-1; assim como o extensômetro S-2 originou as leituras te tensão σ_s-2, e assim sucessivamente conforme apresentado na figura abaixo (Figura 170).

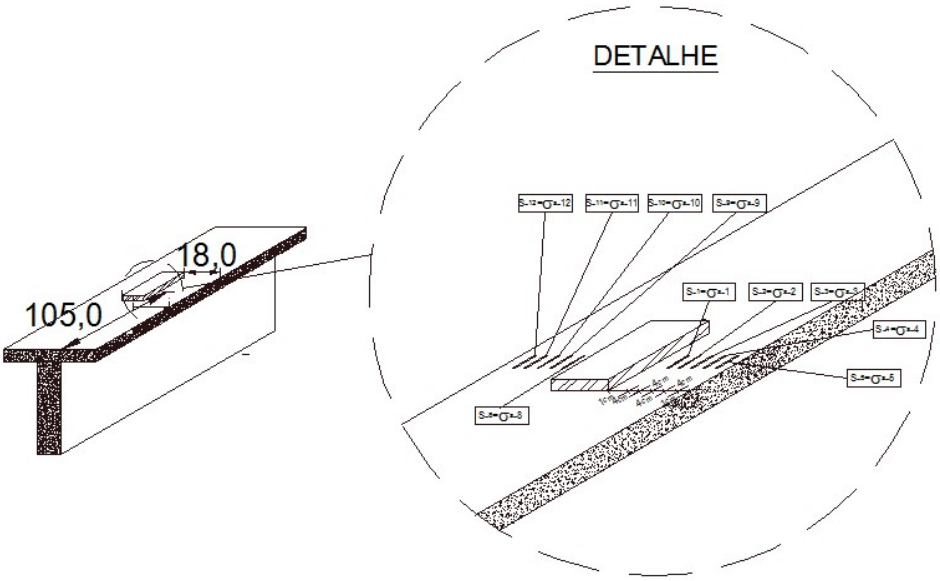


Figura 170 – Detalhe da extensometria

As posições dos strains na mesa, tendo como referência a alma da viga, são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 11).

Tabela 11 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
1,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
5,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
9,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
13,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
17,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0 cm		

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas e resumidas na tabela D1, no anexo D. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 252,29kN, quando a viga sofreu escorregamento do apoio, conforme mostrado no capítulo anterior. Convém ressaltar que a capacidade de carga da viga era para uma carga última em torno de 400kN.

As tensões foram calculadas tendo como base o valor da resistência a compressão do concreto no dia do ensaio que era de 39,43MPa. É conveniente ressaltar que aparecem na tabela valores de tensão superiores a tensão máxima do

concreto, sendo possivelmente explicado pela concentração de tensões na região da mesa adjacente à chapa de transferência de cargas.

O gráfico com as tensões para os strains do lado direito da viga (strains de S-1 a S-5), cujos valores encontram-se agrupados na tabela anterior são apresentados no gráfico a seguir (Figura 171). O objetivo desse gráfico foi a avaliação do desenvolvimento da curva de tensões para intervalos de carga de 10kN, até a carga as ultimas cargas atingidas pela viga, antes do escorregamento do apoio.

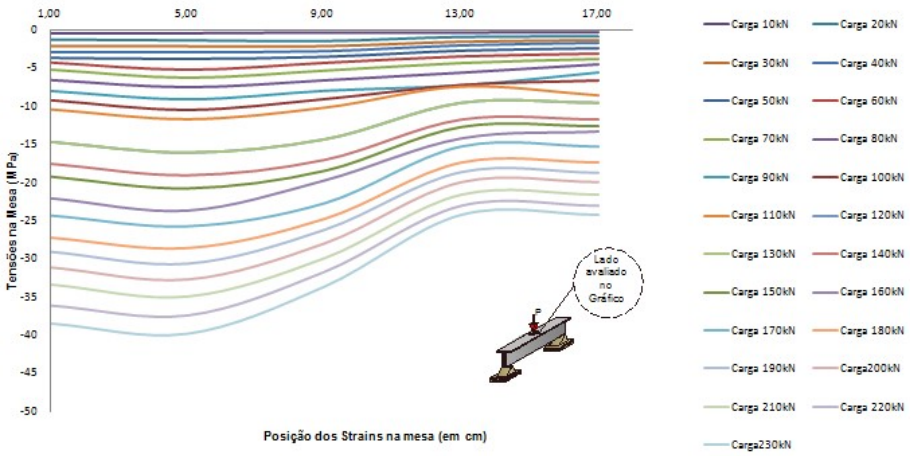


Figura 171 – Gráfico de evolução das tensões calculadas

É possível observar no gráfico que, para cargas até 5,0kN, a distribuição de tensões é praticamente constante na mesa da viga (nas posições de S-1 a S-5). A partir dessa carga o strain S-2 começou a indicar uma maior concentração de tensões.

A medida que o carregamento evolui, é possível notar uma maior concentração de tensões nos strains mais próximos da chapa de aplicação de cargas (strains S-1 a S-2), chegando a ser, em muitos casos, quatro vezes maior que as tensões medidas no strain S-4.

A partir das curvas de tensões foram obtidos os polinômios que representam a linha de tendências que melhor tangenciam as curvas, ou seja, aqueles que possuem uma melhor aproximação (R^2=1) em relação ao traçado das curvas de tensões. Esses polinômios foram integrados no software MATLAB [23], tendo como limites de integração a posição dos strains mais extremos, ou seja: x =1,0 e x =17,0.

As funções polinomiais obtidas, a sintaxe utilizada para integração no MATLAB [23], assim como as larguras efetivas encontradas são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 12).

Tabela 12 - Funções polinomiais integradas para o lado direito

Carga (kN)	(R^2)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Área (cm^2)	*bf,exp* (cm)
10	$R^2 = 1$	5E-05*x^4 - 0.001*x^3 + 0.02*x^2 - 0.061*x - 0.510	-0,55	-9,12	16,47
20	$R^2 = 1$	-0.000*x^4 + 0.008*x^3 - 0.089*x^2 + 0.279*x - 1.482	-1,38	-17,78	12,92
40	$R^2 = 1$	-0.000*x^4 + 0.007*x^3 - 0.073*x^2 + 0.233*x - 3.069	-2,91	-11,08	3,8
60	$R^2 = 1$	0.000*x^4 - 0.011*x^3 + 0.189*x^2 - 1.053*x - 3.393	-5,21	-11,61	2,23
80	$R^2 = 1$	0.000*x^4 - 0.012*x^3 + 0.195*x^2 - 1.072*x - 5.775	-7,6	-17,8	2,34
100	$R^2 = 1$	9E-05*x^4 - 0.008*x^3 + 0.191*x^2 - 1.214*x - 8.181	-10,5	-103,5	9,9
120	$R^2 = 1$	-0.000*x^4 + 0.016*x^3 - 0.039*x^2 - 0.532*x - 11.73	-13,7	-59,36	-4,33
140	$R^2 = 1$	-0.001*x^4 + 0.036*x^3 - 0.220*x^2 + 0.015*x - 17.37	-19	-168,3	8,84
160	$R^2 = 1$	-0.000*x^4 - 0.000*x^3 + 0.241*x^2 - 1.772*x - 20.57	-23,7	-189,7	8
180	$R^2 = 1$	-0.001*x^4 + 0.038*x^3 - 0.159*x^2 - 0.328*x - 26.77	-28,6	-226,4	7,92
200	$R^2 = 1$	-0.001*x^4 + 0.029*x^3 - 0.029*x^2 - 0.929*x - 30.21	-32,7	-343,1	10,49
220	$R^2 = 1$	-0.001*x^4 + 0.023*x^3 + 0.072*x^2 - 1.283*x - 34.90	-37,4	-429	11,48
230	$R^2 = 1$	-0.001*x^4 + 0.026*x^3 + 0.057*x^2 - 1.290*x - 37.30	-39,8	-440,3	11,05

Na tabela anterior é possível constatar que, para valores iniciais, os polinômios monovariáveis ao serem integrados resultaram em maiores larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), mas a medida que o carregamento aumenta vai ocorrendo uma melhor adequação entre os resultados encontrados e as cargas.

Ou seja, desconsiderando os três primeiros valores, é possível verificar que a medida que o carregamento aumenta, a largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$) aumenta concomitantemente, variando entre 2,17cm a 11,48cm.

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na Figura 172.

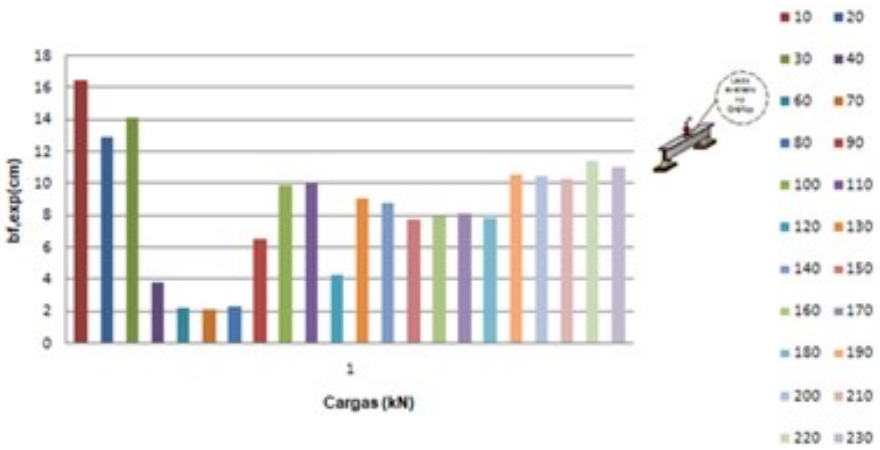


Figura 172 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado direito

Para o lado Esquerdo da chapa de aplicações de cargas foram empregados os strains de S-8 a S-12, cujas distancias em relação a alma da viga são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 13).

Tabela 13 - Posição dos extensômetros S-8 a S-12 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
1,00	Deformações S-8	Tensões s-8
5,00	Deformações S-9	Tensões s-9
9,00	Deformações S-10	Tensões s-10
13,00	Deformações S-11	Tensões s-11
17,00	Deformações S-12	Tensões s-12
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

Os strains referenciados na tabela anterior são mostrados na figura abaixo (Figura 173).

Figura 173 – Posição dos extensômetros

As tensões calculadas para os strains com numeração de S-8 a S-12 são apresentadas na tabela D2, presente nos anexos desse trabalho. Nessa tabela, é possível notar que o ultimo carregamento apresentado para o lado esquerdo é inferior ao da tabela para o lado direito. Isso se deve ao fato de a maior parte dos strains do lado esquerdo ter apresentado problemas de funcionamento durante o ensaio.

O gráfico com as tensões para os strains do lado esquerdo da viga (strains de S-8 a S-12), cujos valores encontram-se agrupados na tabela anterior são apresentados no gráfico a seguir (Figura 174). O objetivo desse gráfico foi à avaliação do desenvolvimento da curva de tensões para intervalos de carga de 10kN.

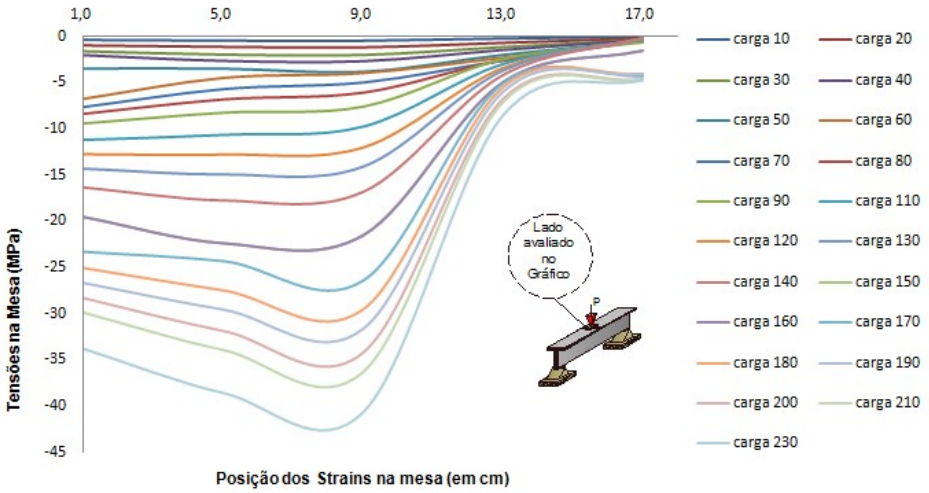


Figura 174 – Gráfico de evolução das tensões no lado esquerdo

É possível observar no gráfico que, novamente para cargas até 5,0kN, a distribuição de tensões é praticamente constante na mesa da viga (nas posições de S-8 a S-12). A partir dessa carga o strain S-10 começou a indicar uma maior concentração de tensões, sendo um comportamento anômalo, pois esse strain não era o mais próximo da placa.

À medida que o carregamento evolui, é possível notar uma maior concentração de tensões nos strains S-9 e S-10, chegando a ser, em muitos casos, quatro vezes maior que as tensões medidas no strain S- 9 e até dez vezes maiores que o strain S-12.

Com base nas curvas de distribuição de tensões foram inseridas as linhas de tendência, com o auxilio do software Excel [22]. Para cada linha de tendência foi inserido um polinômio, buscando sempre uma melhor aproximação deste com a curva.

As tensões no lado esquerdo da viga tiveram um comportamento bastante diferenciado, em relação ao lado direito. Uma parte dessa diferença pode ser atribuída a um funcionamento irregular dos strains S-11 e S-12, cujas tensões calculadas chegaram a ser cinco vezes menores que as do strain S-8.

Essas diferenças na configuração das curvas de tensões se refletiram nas funções polinomiais e no resultado da integração de cada curva,obtendo-se, também, maiores larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$) conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 14 - Polinômios das curvas de tensões o lado esquerdo

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax. (MPa)	Área (cm²)	bf,exp (cm)
10	-1E-05*x^4 - 0.000*x^3 + 0.011*x^2 - 0.062*x - 0.341	-0,393	0,79	2,00
20	-0.000*x^4 + 0.011*x^3 - 0.140*x^2 + 0.633*x - 1.287	-0,78	7,10	-9,08
30	-0.000*x^4 + 0.005*x^3 - 0.043*x^2 + 0.157*x - 1.255	-1,14	-26,52	23,32
40	-0.000*x^4 + 0.006*x^3 - 0.050*x^2 + 0.170*x - 1.656	-1,53	-41,40	18,04
50	-0.000*x^4 + 0.005*x^3 - 0.041*x^2 + 0.114*x - 2.060	-1,98	-20,73	10,45
60	-0.000*x^4 + 0.008*x^3 - 0.064*x^2 + 0.184*x - 2.563	-2,44	-47,74	19,60
70	-0.000*x^4 + 0.008*x^3 - 0.066*x^2 + 0.190*x - 3.367	-3,23	-32,46	10,04
80	-0.000*x^4 + 0.012*x^3 - 0.103*x^2 + 0.339*x - 4.161	-3,91	-64,15	16,40
90	-0.000*x^4 + 0.014*x^3 - 0.125*x^2 + 0.427*x - 4.921	-4,61	-70,41	15,29
100	-0.000*x^4 + 0.019*x^3 - 0.179*x^2 + 0.638*x - 5.798	-5,32	-102,74	19,31
110	-0.000*x^4 + 0.019*x^3 - 0.179*x^2 + 0.638*x - 5.798	-6,06	-102,74	16,95
120	-0.001*x^4 + 0.044*x^3 - 0.423*x^2 + 1.476*x - 7.855	-6,76	-29,02	4,29
130	-0.001*x^4 + 0.055*x^3 - 0.541*x^2 + 1.904*x - 9.150	-7,73	-106,41	13,76
140	-0.001*x^4 + 0.059*x^3 - 0.531*x^2 + 1.670*x - 10.32	-9,13	-153,88	16,85
150	-0.002*x^4 + 0.060*x^3 - 0.539*x^2 + 1.689*x - 11.46	-10,26	-137,81	13,44
160	-0,002*x^4 + 0,060*x^3 - 0,546*x^2 + 1,889x - 12,86	-11,89	-152,62	12,84
170	-0.002*x^4 + 0.076*x^3 - 0.696*x^2 + 2.236*x - 13.50	-13,79	-146,62	10,63
180	-0.003*x^4 + 0.095*x^3 - 0.885*x^2 + 2.937*x - 15.93	-15,10	-146,62	9,71
190	-0.003*x^4 + 0.107*x^3 - 1.014*x^2 + 3.477*x - 17.66	-16,59	-59,88	3,61
200	-0.003*x^4 + 0.122*x^3 - 1.179*x^2 + 4.203*x - 20.84	-17,70	-36,82	2,08
210	-0.003*x^4 + 0.119*x^3 - 1.136*x^2 + 4.028*x - 22.11	-19,11	-93,23	4,88
220	-0.004*x^4 + 0.129*x^3 - 1.238*x^2 + 4.435*x - 23.56	-20,24	-207,70	10,26
230	-0.004*x^4 + 0.133*x^3 - 1.281*x^2 + 4.646*x - 24.79	-21,30	-183,88	8,63

As larguras efetivas experimentais apresentaram, para esse lado da viga, uma variação de 2,0 a 18,0cm, sendo os resultados de maiores larguras para as cargas iniciais, de maneira análoga ao ocorrido no lado oposto da mesa.

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na Figura 175.

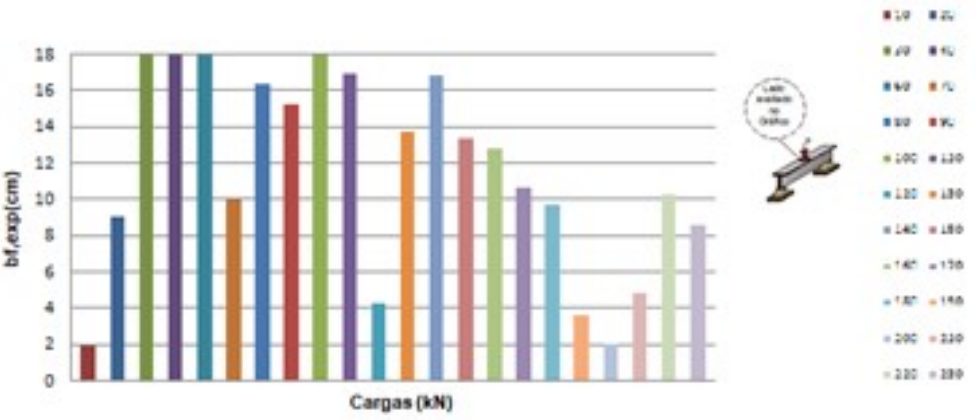


Figura 175 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado esquerdo

3.3.2 Análise das tensões e Largura efetiva das Vigas MI-V2

A análise de tensões na mesa da viga foi MI-V2 feita com base nas deformações medidas nos pontos de extensometria. Nesses pontos foram verificadas as deformações, sendo as mesmas convertidas em tensões através da formulação proposta pela NBR-6118/2014 [1].

Cada extensômetro dessa viga recebeu uma numeração e essa mesma numeração é empregada na representação das tensões, ou seja: os extensômetro S-1 originou as leituras te tensão σ_s-1, de maneira análoga a viga anteriormente analisada, conforme apresentado na figura a seguir (Figura 176).

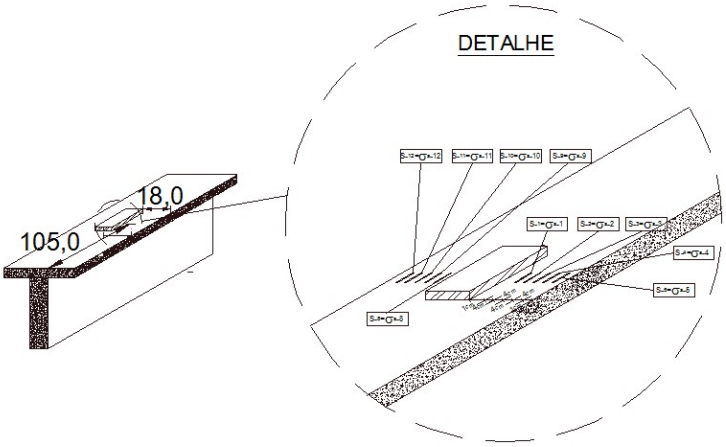


Figura 176 – Detalhe da extensometria

As tensões das tabelas subseqüentes foram calculadas até uma carga de 350kN, pois a partir desse valor, a maior parte dos extensômetros da mesa começou

a apresentar funcionamento irregular, até a ruptura da viga que se deu para uma carga de 406,0 kN.

Para o lado direito foram calculadas as tensões, com base nos extensômetros posicionados de acordo com a tabela abaixo .

Tabela 15 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
1,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
5,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
9,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
13,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
17,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As tensões calculadas para o lado direito da viga, com base nas deformações dos strains S-1 a S-5 são apresentadas na tabela a D3 do anexo.

As tensões apresentadas na tabela anterior foram calculadas para um valor de carga de 350kN, sendo traçadas as curvas de tensões para esses valores. Essas curvas são apresentadas na figura a seguir (Figura 177).

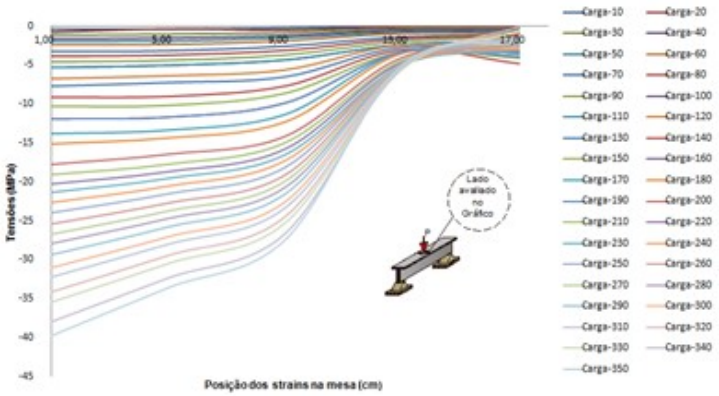


Figura 177 – Gráfico de evolução das tensões no lado direito

É possível notar no gráfico que para valores de tensão até 5MPa, correspondendo a uma carga de 90kN, a distribuição das tensões é praticamente uniforme ao longo da mesa. Com o aumento da carga e, por conseguinte da tensão, pode-se verificar que as curvas de tensões passam a ter pontos de máxima no strains S-1, e tendo valores mínimos nos strains S-4 e S-5.

Utilizando os polinômios das curvas de tensões, que foram integrados em intervalo correspondente as posições dos strains extremos, foram elaboradas a tabela a seguir (Tabela 16).

Tabela 16 - Polinômios das curvas de tensões o lado direito

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Área (cm^2)	*bf,exp* (cm)
20	-0.000*x^4 + 0.011*x^3 - 0.140*x^2 + 0.633*x - 1.287	-0,78	-22,62	28,92
40	-0.000*x^4 + 0.006*x^3 - 0.050*x^2 + 0.170*x - 1.656	-1,53	-41,40	27,04
60	-0.000*x^4 + 0.008*x^3 - 0.064*x^2 + 0.184*x - 2.563	-2,44	-28,73	11,80
80	-0.000*x^4 + 0.012*x^3 - 0.103*x^2 + 0.339*x - 4.161	-3,91	-64,15	16,40
100	-0.000*x^4 + 0.019*x^3 - 0.179*x^2 + 0.638*x - 5.798	-5,32	-29,43	5,53
120	-0.001*x^4 + 0.044*x^3 - 0.423*x^2 + 1.476*x - 7.855	-6,76	-29,02	4,29
140	-0.001*x^4 + 0.059*x^3 - 0.531*x^2 + 1.670*x - 10.32	-9,13	-40,19	4,40
160	-0.002*x^4 + 0.076*x^3 - 0.696*x^2 + 2.236*x - 13.50	-11,89	-34,66	2,92
180	-0.003*x^4 + 0.107*x^3 - 1.014*x^2 + 3.477*x - 17.66	-15,10	-59,88	3,97
200	-0.003*x^4 + 0.122*x^3 - 1.179*x^2 + 4.203*x - 20.84	-17,70	-56,82	3,21
220	-0.004*x^4 + 0.129*x^3 - 1.238*x^2 + 4.435*x - 23.56	-20,24	-117,19	5,79
240	-0.004*x^4 + 0.142*x^3 - 1.380*x^2 + 5.068*x - 26.47	-22,65	-124,17	5,48
260	-0.005*x^4 + 0.170*x^3 - 1.665*x^2 + 6.199*x - 30.05	-25,35	-184,56	7,28
280	-0.005*x^4 + 0.187*x^3 - 1.845*x^2 + 6.958*x - 33.24	-27,95	-66,06	2,36
300	-0.006*x^4 + 0.205*x^3 - 2.042*x^2 + 7.840*x - 37.08	-31,09	-231,18	7,44
320	-0.006*x^4 + 0.223*x^3 - 2.231*x^2 + 8.671*x - 40.83	-34,17	-105,13	3,08
340	-0.007*x^4 + 0.259*x^3 - 2.582*x^2 + 10.09*x - 45.67	-37,91	-85,23	2,25
360	-0.008*x^4 + 0.292*x^3 - 2.912*x^2 + 11.47*x - 50.22	-41,38	-94,56	2,29

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na figura a seguir (Figura 178).

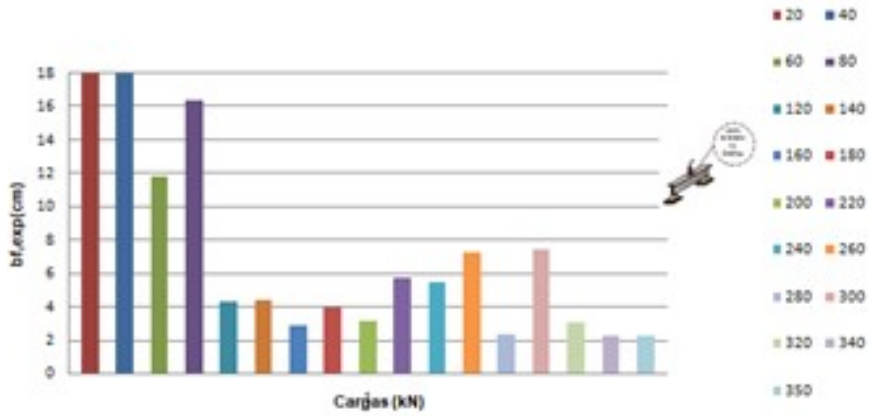


Figura 178 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado direito

Para o lado esquerdo da viga MII-V-2 foram traçadas as curvas apresentadas na tabela a seguir, de acordo com a curva da NBR-6118 [1], para os extensômetros S-8 a S-12, que respectivamente, verificaram as deformações que foram convertidas nas tensões σ-8 a σ-12, apresentadas na tabela D do anexo.

Com os valores de tensões apresentados na tabela anterior, foram traçadas as curvas de tensões, para valores de carga até 350kN. Para cargas acima desse valor, os extensômetros começaram a apresentar problemas na leitura das deformações, impossibilitando o cálculo das respectivas tensões.

As curvas de tensões para o lado esquerdo da viga são apresentadas na Figura 179.

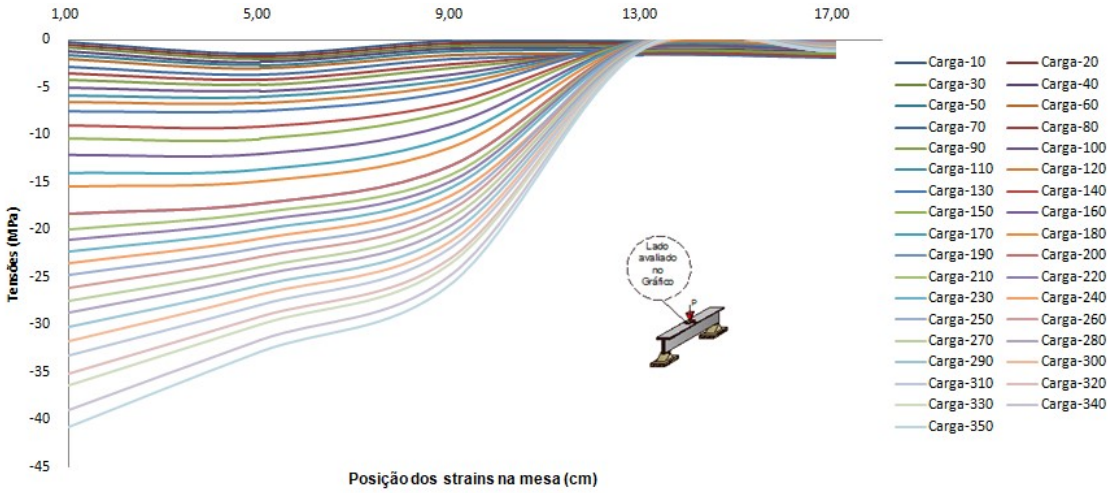


Figura 179 - Curvas de tensões para o lado esquerdo

Nesse lado da viga, em geral, o strain S-9, que se encontrava localizado a 5,0cm da chapa de transferência de carga, apresentou maiores deformações e respectivamente, maiores tensões. Nesse ponto as tensões calculadas para esse strain foram superiores aos demais extensômetros até valores de carga de 120kN, quando as maiores tensões começaram a ocorrer no strain S-8, localizado a 1,0cm da chapa de transferência de cargas.

A partir das curvas traçadas, para diversos carregamentos, utilizando o recurso de regressão do software Excel [22], foi possível a determinação dos polinômios que melhor representassem as curvas de tensões. Esses polinômios são resumidos na tabela a seguir.

Tabela 17 - Polinômios representativos das curvas

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Área (cm^2)	***bf,exp***(cm)
20	0.000*x^4 - 0.033*x^3 + 0.449*x^2 - 2.106*x + 1.224	-1,76	-19,05	10,82
40	0.000*x^4 - 0.033*x^3 + 0.442*x^2 - 2.031*x + 0.386	-2,35	-10,71	4,56
60	0.000*x^4 - 0.031*x^3 + 0.425*x^2 - 1.932*x - 0.539	-3,06	-23,82	7,79
80	0.000*x^4 - 0.014*x^3 + 0.246*x^2 - 1.222*x - 2.602	-4,21	-88,42	21,00
100	-0.000*x^4 + 0.012*x^3 - 0.033*x^2 -0.190*x - 4.861	-5,40	91,39	16,92
120	-0.001*x^4 + 0.035*x^3 - 0.260*x^2 + 0.650*x - 7.02	-6,66	23,86	3,58
140	-0.001*x^4 + 0.057*x^3 - 0.459*x^2 + 1.238*x - 9.89	-9,19	17,47	1,90
160	-0.002*x^4 + 0.086*x^3 - 0.727*x^2 + 2.161*x - 13.6	-12,00	-114,03	9,50
180	-0.003*x^4 + 0.121*x^3 - 1.075*x^2 + 3.441*x - 17.9	-15,50	-122,26	7,89
200	-0.004*x^4 + 0.147*x^3 - 1.349*x^2 + 4.518*x - 21.6	-18,29	29,70	1,62
220	-0.005*x^4 + 0.178*x^3 - 1.681*x^2 + 5.940*x - 25.4	-21,02	-72,53	3,45
240	-0.005*x^4 + 0.184*x^3 - 1.757*x^2 + 6.369*x - 28.3	-23,51	96,05	4,09
260	-0.006*x^4 + 0.218*x^3 - 2.102*x^2 + 7.710*x - 31.9	-26,12	56,98	2,18
280	-0.007*x^4 + 0.237*x^3 - 2.307*x^2 + 8.620*x - 35.3	-28,79	-140,41	4,88
300	-0.008*x^4 + 0.258*x^3 - 2.529*x^2 + 9.621*x - 39.0	-31,72	-265,08	8,36
320	-0.008*x^4 + 0.284*x^3 - 2.813*x^2 + 10.91*x - 43.5	-35,18	-73,59	2,09
340	-0.009*x^4 + 0.313*x^3 - 3.122*x^2 + 12.34*x - 48.4	-38,93	-130,30	3,35
350	-0.009*x^4 + 0.326*x^3 - 3.265*x^2 + 13.03*x - 50.9	-40,82	-32,83	0,80

Analisando as tabelas que resumem os polinômios, para o lado esquerdo e direito, é possível observar que essas funções não se adéquam aos valores extremos de cargas, ou seja: para cargas muito baixas onde a distribuição de tensões é praticamente linear ou para cargas mais altas onde já ocorreu excessiva fissuração na região que circunda os strains.

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na Figura 180.

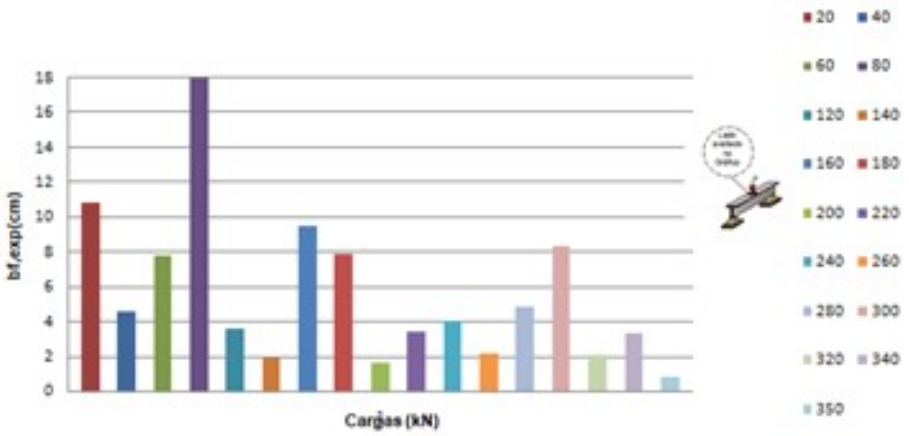


Figura 180 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimental no lado esquerdo

3.3.3 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MI-V-3

A análise de tensões na mesa da viga foi MI-V3 feita com base nas deformações medidas nos pontos de extensometria. Nesses pontos foram verificadas as deformações, sendo as mesmas convertidas em tensões.

Cada extensômetro dessa viga recebeu uma referencia numérica. Essa mesma numeração é empregada na representação das tensões, ou seja: os extensômetro S-1 originou as leituras te tensão σ_s-1, de maneira análoga as outras vigas do Modelo-I, anteriormente analisados. Essa codificação de números de strain gages é apresentada para a figura abaixo (Figura 181).

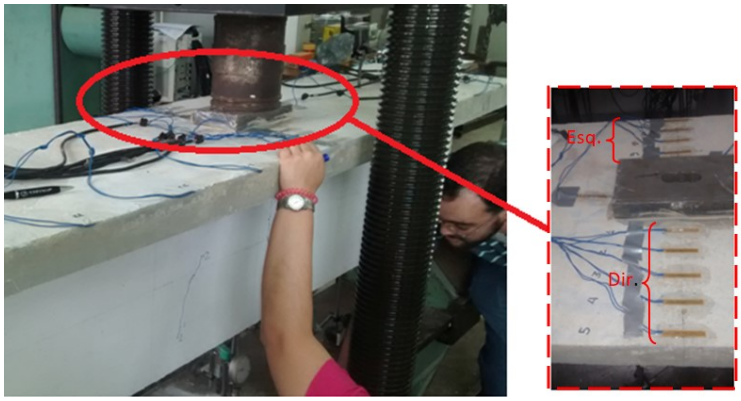


Figura 181 – Detalhe da extensometria

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas e resumidas na tabela D4 do anexo. Convém ressaltar que as tensões da tabela subseqüente foram calculadas até uma carga de 350kN, pois a partir desse valor, a maior parte dos extensômetros da mesa

Para o lado direito foram calculadas as tensões, com base nos extensômetros posicionados de acordo com a tabela 18.

Tabela 18 - Posição dos extensômetros S-1, S-2, S-3, S-4 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
1,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
5,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
9,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
13,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
17,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As tensões que foram obitidas através das deformações dos strains comnumeração de S-1 a S-4 (lado direito da viga) são apresentados na tabela D4, apresentada no anexo.

As curvas definidas a partir das tensões apresentadas na tabela anterior foram traçadas, com o objetivo de demonstrar a evolução do comportamento da trajetória de tensões. Essas curvas são apresentadas na Figura 182.

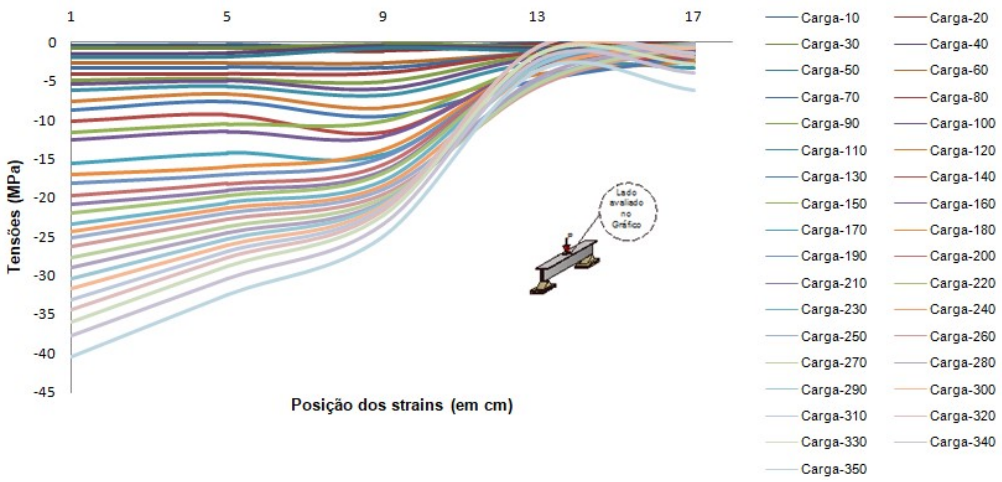


Figura 182 - Trajetória de tensões do lado direito

Com base no traçado das curvas de trajetórias de tensões foram determinados os polinômios que representavam essas curvas (para o lado direito da viga). Cada polinômio foi verificado, através da substituição na função polinomial y(x) do valor da abscissa x em cada ponto, encontrando-se o mesmo valor da tensão que havia sido calculado para o aquele ponto.

Para as curvas que representam o estado de tensões nessa viga, os polinômios que mais se aproximaram da curva de tensões foram polinômios de 4º

grau. Cabe ressaltar que foram testados, através da regressão do Excel [22] outros graus de polinômio, que não apresentaram o devido grau de aproximação em relação à curva de tensões.

Com o auxílio de rotina elaborada no software MATLAB [23], foi possível realizar a integração desses polinômios, tendo como limites de integração os valores x=1,0cm e x=17,0cm (limites superior e inferior de integração).

Os valores das áreas sob as curvas de tensões foram calculados, obtendo-se, também, as larguras efetiva experimentais, em intervalos de carga de 20kN, até uma carga 350kN, quando a maior parte dos strains na mesa parou de funcionar. Esses dados apresentam-se resumidos na tabela 19.

Tabela 19 - Polinômios das curvas de Tensões nos extensômetros S-1 a S-5

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σ max (MPa)	Area (cm^2)	***bf,exp*** (cm)
20	-0.000*x^4 + 0.02*x^3 - 0.221*x^2 + 0.802*x - 1.354	-0,75	14,957	18,0
40	0.000*x^4 - 0.021*x^3 + 0.247*x^2 - 0.894*x - 0.795	-1,46	-175,51	18,0
60	-0.000*x^4 + 0.021*x^3 - 0.218*x^2 + 0.761*x - 3.271	-2,71	-13,88	5,12
80	-0.001*x^4 + 0.040*x^3 - 0.407*x^2 + 1.404*x - 5.227	-4,19	-33,78	8,06
100	-0.002*x^4 + 0.090*x^3 - 0.973*x^2 + 3.56*x - 8.141	-6,02	-58,75	9,76
120	-0.002*x^4 + 0.104*x^3 - 1.175*x^2 + 4.490*x - 10.99	-8,50	-88,23	10,38
140	-0.003*x^4 + 0.109*x^3 - 1.131*x^2 + 4.144*x - 14.69	-11,63	-66,12	5,69
160	-0.004*x^4 + 0.161*x^3 - 1.702*x^2 + 6.213*x - 17.30	-12,63	-56,93	4,51
180	-0.004*x^4 + 0.136*x^3 - 1.325*x^2 + 4.619*x - 20.47	-17,05	-128,06	7,51
200	-0.005*x^4 + 0.174*x^3 - 1.715*x^2 + 6.097*x - 24.35	-19,80	-106,39	5,37
220	-0.005*x^4 + 0.183*x^3 - 1.813*x^2 + 6.608*x - 26.99	-22,03	-69,59	3,16
240	-0.005*x^4 + 0.189*x^3 - 1.897*x^2 + 7.13*x - 29.75	-24,33	-28,84	1,19
260	-0.004*x^4 + 0.163*x^3 - 1.651*x^2 + 6.477*x - 31.32	-26,34	-41,14	1,56
280	-0.005*x^4 + 0.194*x^3 - 1.964*x^2 + 7.788*x - 34.98	-28,97	-43,07	1,49
300	-0.007*x^4 + 0.253*x^3 - 2.532*x^2 + 9.928*x - 39.30	-31,66	-50,05	1,58
320	-0.008*x^4 + 0.282*x^3 - 2.820*x^2 + 11.17*x - 43.00	-34,38	-80,41	2,34
340	-0.008*x^4 + 0.272*x^3 - 2.705*x^2 + 10.95*x - 46.29	-37,78	-185,24	4,90
350	-0.008*x^4 + 0.272*x^3 - 2.704*x^2 + 11.07*x - 49.09	-40,46	-211,12	5,22

Na tabela acima é possível verificar que as funções polinomiais utilizadas não apresentaram um resultado coerente para as primeiras cargas. È mostrado na tabela que o valor encontrado para os maiores valores de carga causa uma mobilização, que na maioria dos casos, não chega a alcançar 50% da dimensão da aba da mesa que era de 18,0cm.

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na figura a seguir (Figura 183).

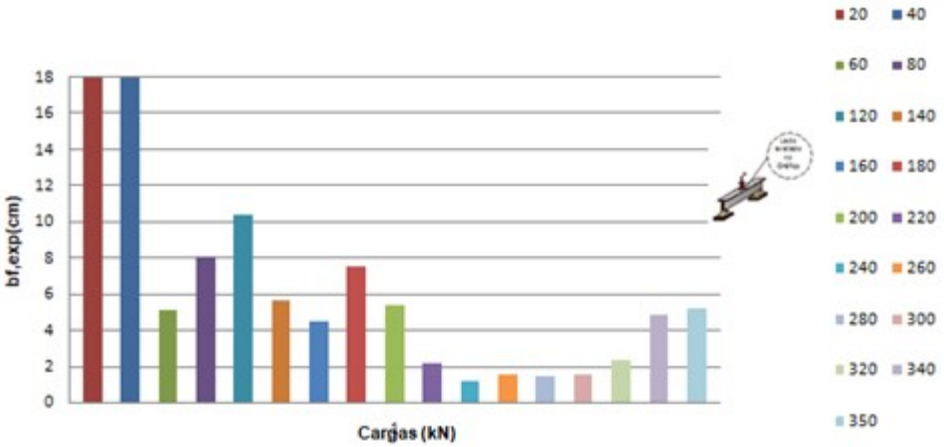


Figura 183 – Gráfico de evolução da largura efetiva experimentais lado direito

O lado esquerdo da viga teve as verificações de deformações possíveis em apenas três extensômetros (S-8, S-9 e S-12). Os demais extensômetros colados naquele lado da viga (S-10 e S-11) apresentaram defeito, que foi constatado na calibração que antecedeu ao ensaio.

Os valores de tensões que foram calculados para o lado esquerdo de MI-V-3 foram resumidos na tabela D5, apresentada nos anexos.Com os valores calculados para as tensões do lado esquerdo da viga MI-V-3 foram traçadas as curvas de tensões, para valores de carga até 360 kN, que são apresentados na figura abaixo (Figura 184).

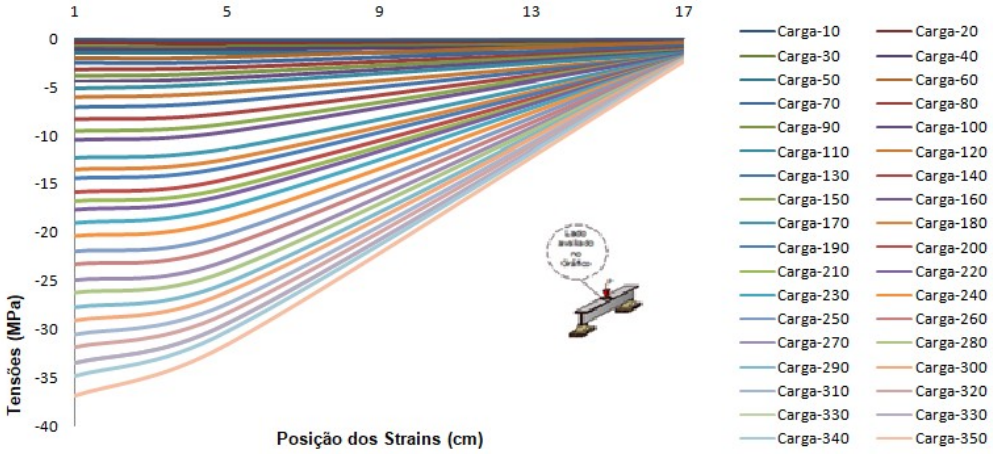


Figura 184 - Desenvolvimento das tensões através das cargas

Uma vez traçadas as curvas, foram obtidos os polinômios que representam cada uma dessas curvas. Esses polinômios são resumidos na tabela a seguir (Tabela 20).

Convém ressaltar, que por motivos já explicados, as curvas de tensões para o lado esquerdo apresentaram configuração bastante diferenciadas das curvas do lado direito, sendo representadas por polinômios de menor grau.

Tabela 20 - Equações polinomiais das curvas de tensões

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
20	0.003*x^2 - 0.052*x- 0.351	-0,53	-8,19	15,34
40	0.002*x^2 - 0.032*x- 0.992	-1,02	-17,21	16,84
60	0.007*x^2 - 0.022*x- 1.972	-1,99	-23,26	11,70
80	0.006*x^2 + 0.01*x- 3.212	-3,20	-40,13	12,56
100	0.008*x^2 + 0.042*x- 4.455	-4,40	-52,13	11,84
120	0.012*x^2 + 0.046*x- 6.118	-6,06	-71,62	11,82
140	0.021*x^2 + 0.024*x- 8.404	-8,36	-96,62	11,56
160	0.028*x^2 + 0.044*x- 10.48	-10,41	-115,50	11,09
180	0.037*x^2 + 0.047*x- 13.58	-13,50	-149,93	11,11
200	0.045*x^2 + 0.051*x- 15.92	-15,83	-173,70	10,97
220	0.05*x^2 + 0.088*x- 17.81	-17,67	-190,42	10,78
240	0.060*x^2 + 0.063*x- 20.48	-20,36	-220,37	10,82
260	0.072*x^2 + 0.025*x- 23.42	-23,33	-253,23	10,86
280	0.079*x^2 + 0.078*x- 26.34	-26,19	-280,86	10,72
300	0.081*x^2 + 0.223*x- 29.37	-29,07	-305,18	10,50
320	0.081*x^2 + 0.394*x- 32.30	-31,83	-327,44	10,29
340	0.076*x^2 + 0.670*x- 35.55	-34,81	-347,88	9,99
350	0.068*x^2 + 0.930*x- 37.90	-36,91	-361,14	9,78

Os valores encontrados para as diversas larguras efetivas, de acordo com as cargas aplicadas, são apresentados na figura a seguir (Figura 185).

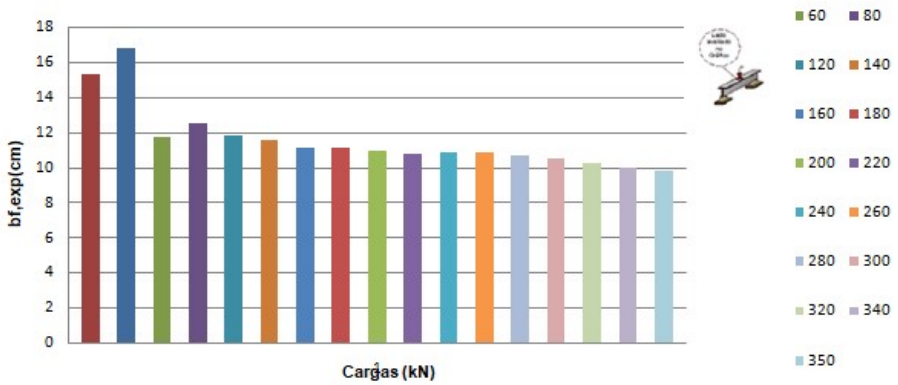


Figura 185 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

3.3.4 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-1

A viga MII-V-1 foi carregada em pontos localizados nos terços da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos próximos as regiões de aplicação de cargas. Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, tendo sidos esses pontos selecionados com base na literatura já apresentada no item de revisão bibliográfica dessa tese.

A análise de tensões na mesa da viga foi MII-V3 feita com base nas deformações medidas nos pontos de extensometria. Nesses pontos foram verificadas as deformações, sendo as mesmas convertidas em tensões através da formulação proposta pela NBR-6118/2014 [1].

Cada extensômetro dessa viga recebeu uma referencia numérica. Essa mesma numeração é empregada na representação das tensões, ou seja: os extensômetro S-1 originou as leituras te tensão σ_s-1, de maneira análoga as outras vigas do Modelo-I, anteriormente analisados.

Essa codificação de números de strains é apresentada para a figura abaixo (Figura 186).

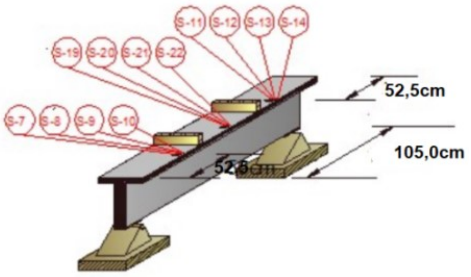


Figura 186 – Detalhe da extensometria

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas e resumidas na tabela D6, dos anexos desse texto. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 400 kN, quando a viga sofreu ruptura, conforme mostrado no capítulo anterior

As tensões verificadas nos strains S-7, S-8, S-9 e S-10, localizados no trecho de O, 25L, são apresentadas na Tabela 21. As tensões obtidas a partir desses extensômetros foram resumida na tabela D6, apresentada nos anexos.

As tensões apresentadas na tabela anterior foram calculadas para extensômetros colados na superfície da viga em pontos pré-determinados cujas distâncias em relação à alma da viga estão resumidos na tabela abaixo (Tabela 21).

Tabela 21 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
5,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
9,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
13,00	Deformações S-9	Tensões σ-9
17,00	Deformações S-10	Tensões σ-10
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

As curvas de tensões calculadas a partir das deformações dos strains numerados de S-7 a S-10 são apresentadas na figura a seguir (Figura 187).

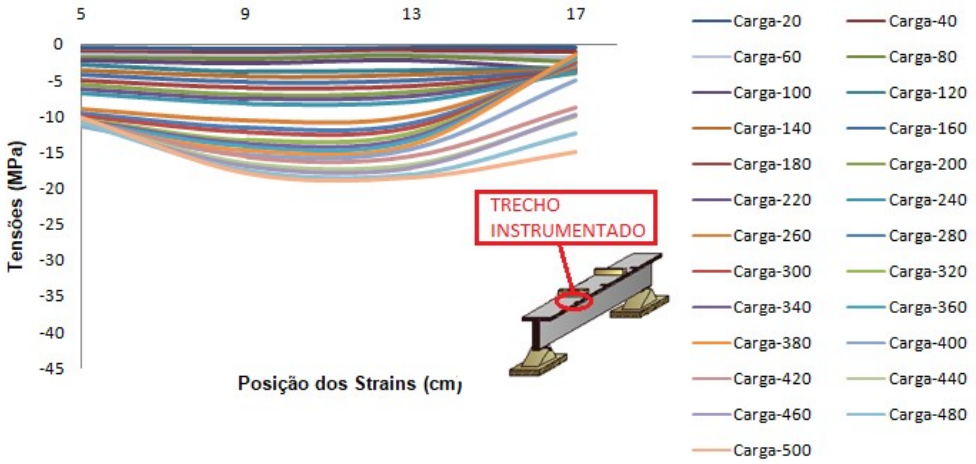


Figura 187 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

As curvas para cargas até 160 kN apresentaram valores de tensões bastante próximos, causando um comportamento aproximadamente constante nas curvas de tensões. Para cargas acima desse valor, as maiores tensões passam a ocorrer na região entre os strains S-8 e S-9, localizado a uma distancia de 9,0 e 13 cm da alma. Para ilustração do descrito nesse parágrafo, foi elaborada a Figura 188, cuja escala foi propositalmente alterada para melhor visualização.

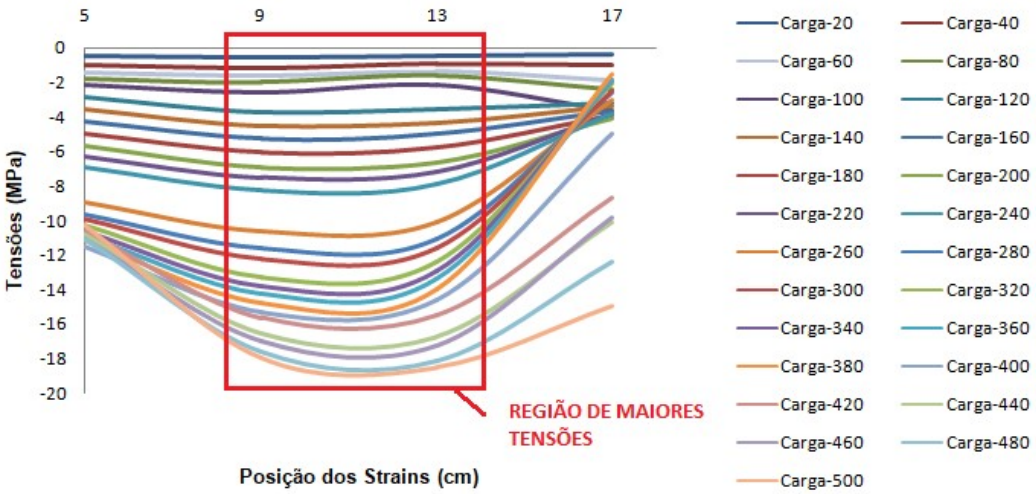


Figura 188 – Região de maiores tensões para as cargas

A partir das curvas de tensões foram determinadas as funções polinomiais que mais se aproximavam de sua trajetória. Essas funções polinomiais se encontram resumidas na tabela abaixo (Tabela 22).

A observação desse ponto de máxima apresentado nessa figura tem como finalidade mostrar a distinção da distribuição de tensões para regiões e carregamentos diferentes nas vigas estudadas.

Tabela 22 - Equações Polinomiais das curvas de tensões

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp*(cm)
20	-0.000*x^3 + 0.025*x^2 - 0.281*x + 0.401	-0,57	-7,62	13,35
40	-0.001*x^3 + 0.060*x^2 - 0.619*x + 0.820	-1,16	-3,17	2,74
60	-0.003*x^3 + 0.106*x^2 - 1.027*x + 1.503	-1,92	-10,52	5,48
80	-0.004*x^3 + 0.143*x^2 - 1.350*x + 1.944	-2,39	-9,54	3,99
100	-0.007*x^3 + 0.217*x^2 - 2.070*x + 3.624	-3,66	-28,49	7,79
120	-0.002*x^3 + 0.095*x^2 - 1.204*x + 1.042	-3,54	-36,25	10,23
140	-0.000*x^3 + 0.054*x^2 - 0.875*x - 0.490	-4,32	-35,20	8,15
160	-0.000*x^3 + 0.046*x^2 - 0.853*x - 1.113	-5,25	-52,54	10,00
180	0.000*x^3 + 0.027*x^2 - 0.741*x - 2.015	-6,07	-78,90	13,00
200	0.001*x^3 + 0.010*x^2 - 0.691*x - 2.656	-6,96	-86,40	12,42
220	0.003*x^3 - 0.058*x^2 - 0.081*x - 4.918	-7,52	-100,10	13,31
240	0.005*x^3 - 0.086*x^2 + 0.078*x - 5.753	-8,27	-92,38	11,17
260	0.011*x^3 - 0.230*x^2 + 1.121*x - 10.15	-10,61	-112,94	10,64
280	0.014*x^3 - 0.307*x^2 + 1.665*x - 12.09	-11,60	-125,14	10,78
300	0.014*x^3 - 0.291*x^2 + 1.335*x - 11.09	-12,25	-131,16	10,70
320	0.014*x^3 - 0.264*x^2 + 0.793*x - 9.447	-13,30	-139,90	10,52
340	0.016*x^3 - 0.311*x^2 + 1.135*x - 10.56	-13,79	-141,67	10,27
360	0.017*x^3 - 0.326*x^2 + 1.167*x - 10.68	-14,25	-142,10	9,97
380	0.019*x^3 - 0.375*x^2 + 1.492*x - 11.62	-14,78	-147,24	9,97
400	0.011*x^3 - 0.159*x^2 - 0.409*x - 6.831	-15,30	-161,76	10,57
420	0.004*x^3 + 0.044*x^2 - 2.496*x + 0.173	-15,62	-174,28	11,16
440	0.003*x^3 + 0.071*x^2 - 2.968*x + 1.769	-16,72	-195,06	11,66
460	0.005*x^3 + 0.039*x^2 - 2.811*x + 1.399	-17,23	-188,40	10,93
480	0.000*x^3 + 0.172*x^2 - 4.135*x + 5.214	-18,13	-208,74	11,52

Com base nas larguras experimentais $b_{f,\ exp}$, calculadas para cada carga, foi elaborada a figura a seguir (Figura 189).

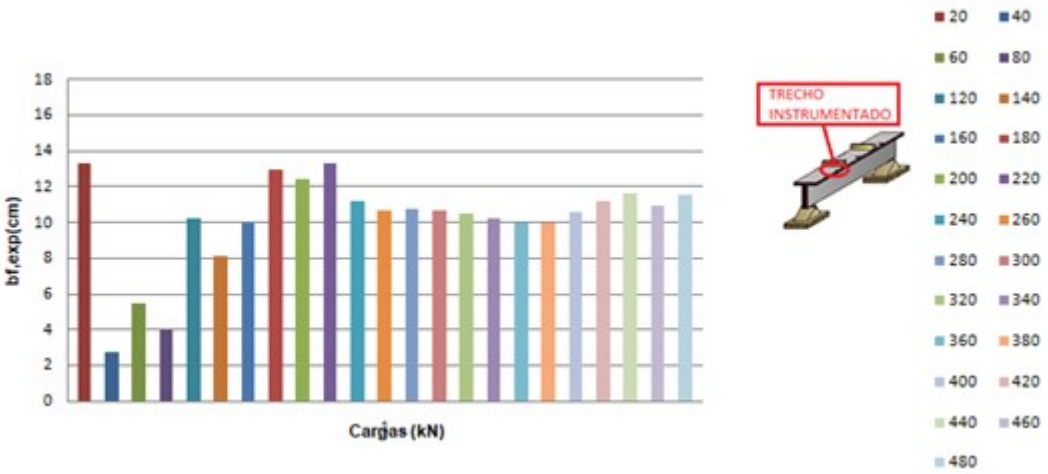


Figura 189 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

As tensões verificadas nos strains S-11, S-12, S-13 e S-14, localizados no trecho de O, 50L, são apresentadas na Tabela 23. A posição desses extensômetros é resumida na tabela D7.

Tabela 23 - Posições calculadas a partir das deformações dos strains S-11, S-12, S-13 e S-14

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
5,00	Deformações S-11	Tensões σ-11
9,00	Deformações S-12	Tensões σ-12
13,00	Deformações S-13	Tensões σ-13
17,00	Deformações S-114	Tensões σ-14
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As curvas de tensões calculadas a partir das deformações dos strains numerados de S-11 a S-14 são apresentadas na Figura 190.

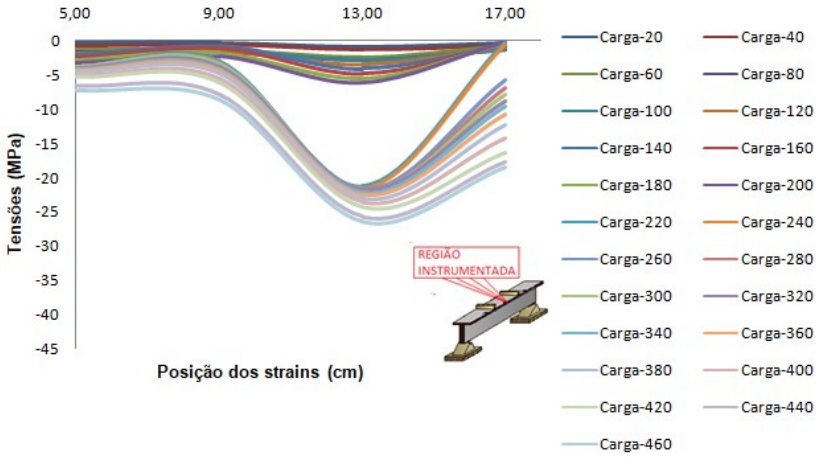


Figura 190 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

As curvas para cargas até 100 kN apresentaram valores de tensões bastante próximos, causando um comportamento aproximadamente constante nas curvas de tensões. Para cargas acima desse valor, as maiores tensões passam a ocorrer na região do strain gage S-13, localizado a uma distancia de 13,0 da alma. Para ilustração do descrito nesse parágrafo, foi elaborada a Figura 191, cuja escala foi propositalmente alterada para melhor visualização.

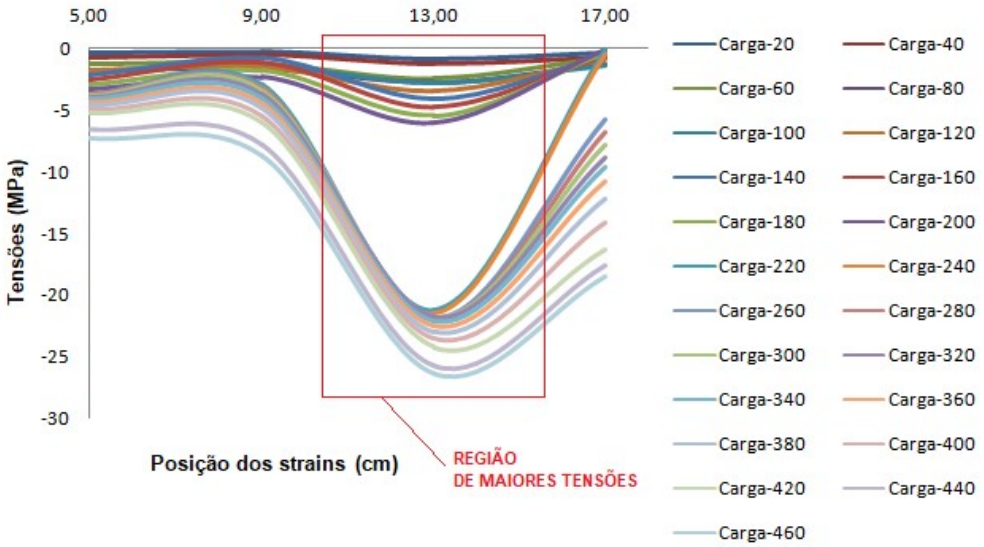


Figura 191 – Ponto de localização das maiores tensões

A partir das curvas de tensões foram determinadas as funções polinomiais que mais se aproximavam de sua trajetória. Essas funções polinomiais se encontram resumidas na tabela a seguir (Tabela 24).

Tabela 24 - Polinômios das curvas de tensões

Carga (kN)	(R^2)	Sintaxe no MATLAB	σ max (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp (cm)*
20	$R^2 = 1$	0.004*x^3 - 0.142*x^2 + 1.343*x - 4.073	-0,81	-15,34	19,03
40	$R^2 = 1$	0.005*x^3 - 0.188*x^2 + 1.828*x - 5.912	-1,25	-26,08	20,93
60	$R^2 = 1$	0.010*x^3 - 0.333*x^2 + 3.038*x - 9.486	-2,43	-37,04	15,24
80	$R^2 = 1$	0.010*x^3 - 0.309*x^2 + 2.833*x - 9.376	-2,72	-24,48	8,99
100	$R^2 = 1$	0.011*x^3 - 0.379*x^2 + 3.621*x - 11.99	-2,76	-42,83	15,54
120	$R^2 = 1$	0.017*x^3 - 0.549*x^2 + 5.098*x - 15.77	-3,41	-40,20	11,79
140	$R^2 = 1$	0.029*x^3 - 0.947*x^2 + 9.125*x - 27.75	-4,05	-38,92	9,60
160	$R^2 = 1$	0.033*x^3 - 1.061*x^2 + 10.14*x - 30.86	-4,77	-41,30	8,66
180	$R^2 = 1$	0.035*x^3 - 1.103*x^2 + 10.40*x - 31.73	-5,44	-43,01	7,90
200	$R^2 = 1$	0.037*x^3 - 1.153*x^2 + 10.74*x - 32.83	-6,03	-49,68	8,24
220	$R^2 = 1$	0.152*x^3 - 4.705*x^2 + 43.07*x - 120.4	-21,21	-118,69	5,60
240	$R^2 = 1$	0.151*x^3 - 4.690*x^2 + 42.89*x - 120.0	-21,51	-134,44	6,25
260	$R^2 = 1$	0.139*x^3 - 4.362*x^2 + 40.12*x - 112.7	-21,81	-137,68	6,31
280	$R^2 = 1$	0.137*x^3 - 4.291*x^2 + 39.50*x - 111.1	-21,87	-128,45	5,87
300	$R^2 = 1$	0.133*x^3 - 4.179*x^2 + 38.51*x - 108.5	-21,75	-132,07	6,07
320	$R^2 = 1$	0.127*x^3 - 4.013*x^2 + 36.96*x - 104.3	-21,72	-145,68	6,71
340	$R^2 = 1$	0.126*x^3 - 3.979*x^2 + 36.61*x - 103.5	-22,12	-148,74	6,72
360	$R^2 = 1$	0.124*x^3 - 3.915*x^2 + 36.03*x - 102.1	-22,49	-147,80	6,57
380	$R^2 = 1$	0.121*x^3 - 3.842*x^2 + 35.36*x - 100.5	-22,94	-162,71	7,09
400	$R^2 = 1$	0.117*x^3 - 3.713*x^2 + 34.15*x - 97.51	-23,53	-163,56	6,95
420	$R^2 = 1$	0.113*x^3 - 3.592*x^2 + 33.03*x - 94.70	-24,20	-167,46	6,92
440	$R^2 = 1$	0.110*x^3 - 3.510*x^2 + 32.1*x - 93.15	-25,70	-202,92	7,90
460	$R^2 = 1$	0.109*x^3 - 3.454*x^2 + 31.53*x - 92.11	-26,39	-197,03	7,47
480	$R^2 = 1$	0.104*x^3 - 3.292*x^2 + 29.95*x - 88.74	-27,25	-210,00	7,71

Com base nas larguras experimentais $b_{f,\ exp}$, calculadas para cada carga, foi elaborada a figura a seguir (Figura 192).

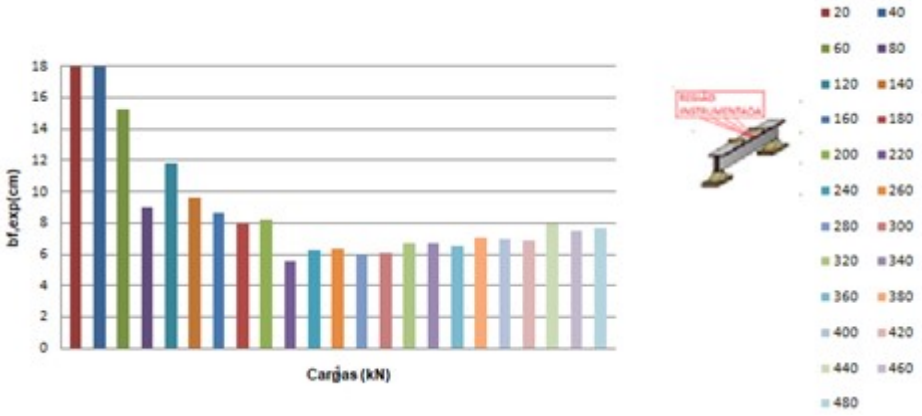


Figura 192 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Para possibilitar um melhor comparativo entre o desenvolvimento das curvas de tensões situadas em pontos diferentes da viga (x= 0,25L e x=0,50L) foi elaborada a figura a seguir (Figura 193).

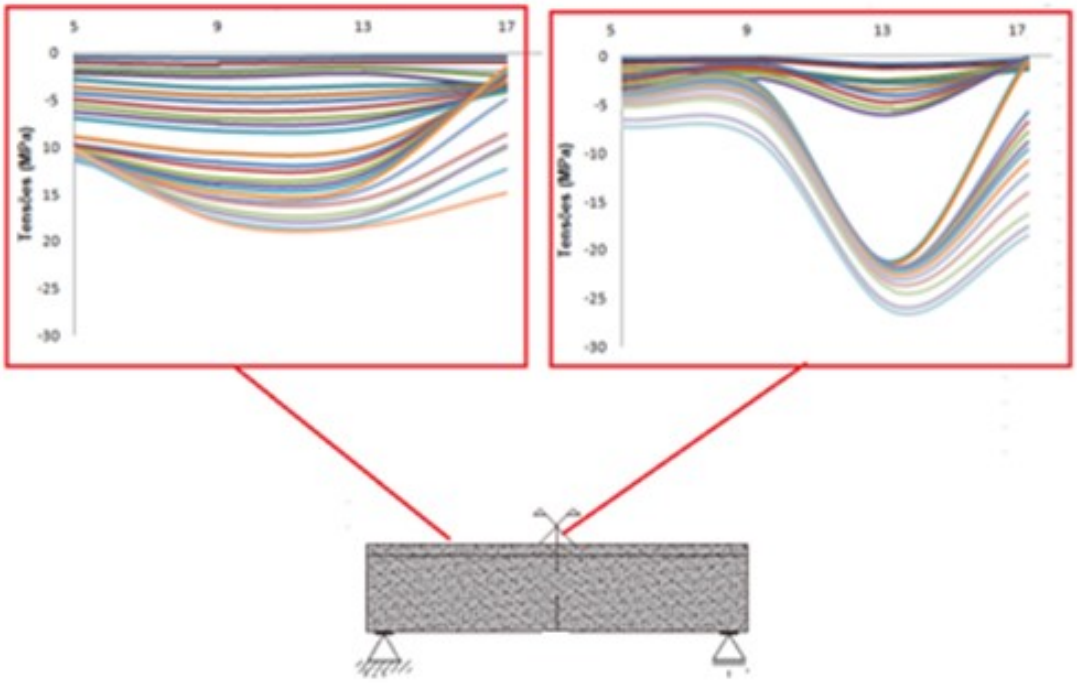


Figura 193 – Comparativo entre os pontos de localização das tensões

Com o objetivo de ilustrar a variação da largura efetiva ao longo do vão, nas posições x-0, 25L; x=0,50L; x=0,75L, foi elaborada a figura a seguir (Figura 194). Nota-se que o valor mínimo da relação entre a largura efetiva experimental ($b_{f,\ exp}$) e a largura real da aba $b_f$alcançam 0,40. Cabe ressaltar que o tipo de carregamento aplicado nessa viga não foi estudado por Rieg [10], aproximando-se da relação $b_{f,exp}$/ b_f encontrada pelo autor para cargas pontuais que foi 0,30.

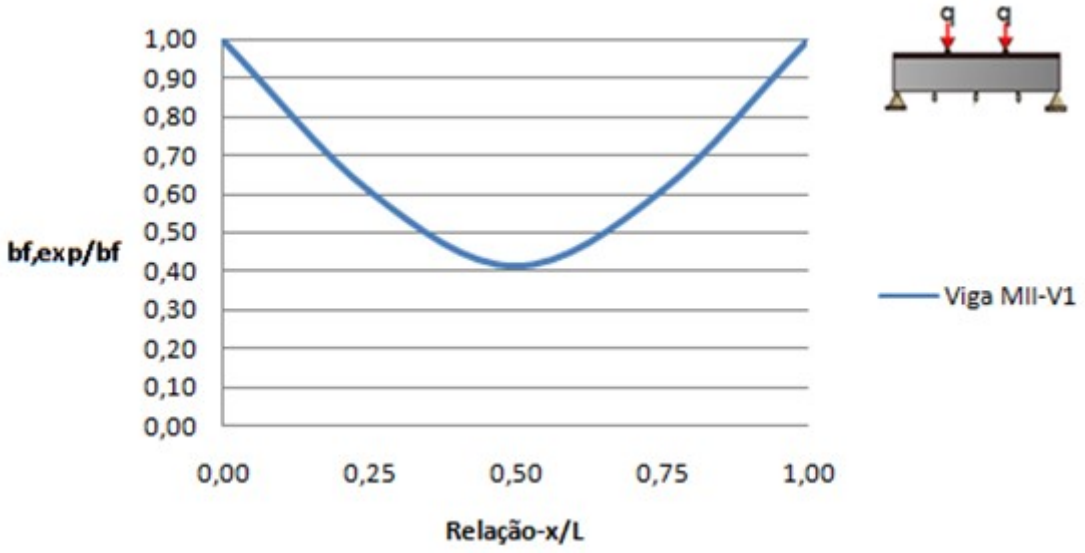


Figura 194 – Variação da relação $b_{f,\ exp}/b_f$ ao longo do vão

3.3.5 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-2

A viga MII-V-2 foi carregada ao longo da alma da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos próximos as regiões de aplicação de cargas. Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, tendo sidos esses pontos selecionados com base na literatura já apresentada no item de revisão bibliográfica dessa tese.

A codificação de números de strains é apresentada para a figura abaixo (Figura 195).

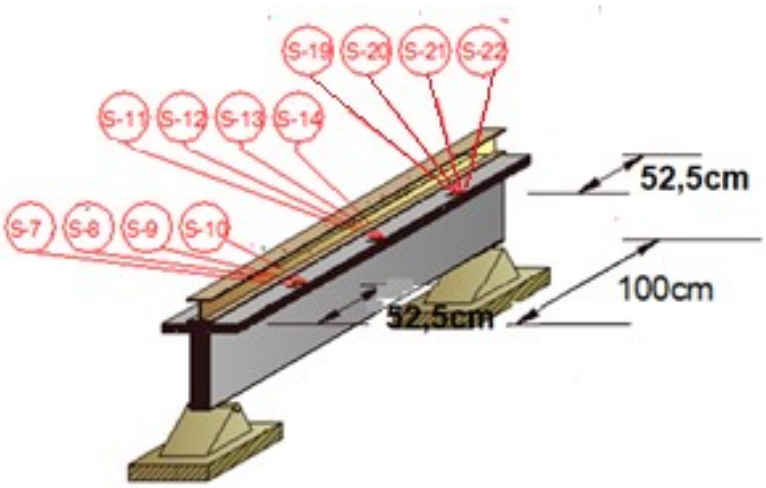


Figura 195 – Detalhe da extensometria

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas e resumidas na tabela no anexo D. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 460 kN, quando a viga sofreu ruptura, conforme mostrado no capítulo anterior

As tensões verificadas nos strain gages S-7, S-8, S-9 e S-10, localizados no trecho de O, 25L, são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
5,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
9,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
13,00	Deformações S-9	Tensões σ-9
17,00	Deformações S-10	Tensões σ-10
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

As tensões apresentadas na tabela D8 (do anexo) foram calculadas para extensômetros colados na superfície da mesa, nos pontos relacionados anteriormente.

As curvas de tensões calculadas a partir das deformações dos strains numerados de S-7 a S-10 são apresentadas na figura a seguir (Figura 196).

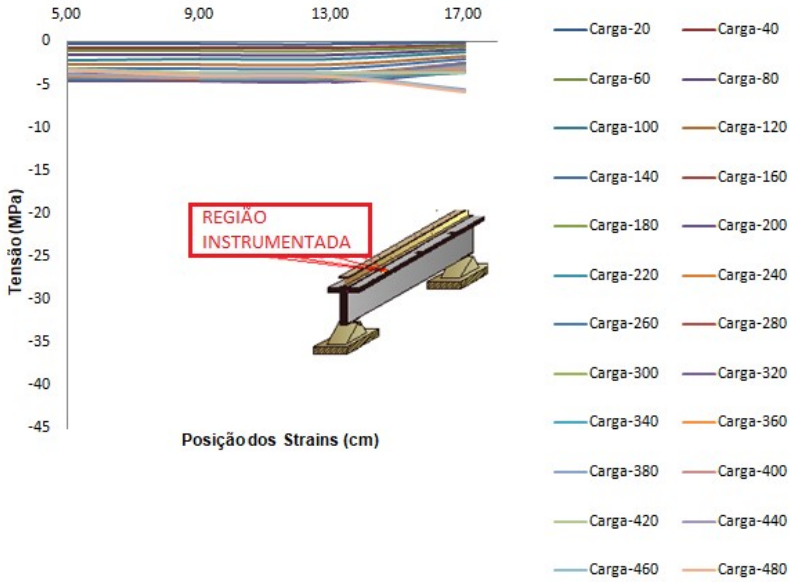


Figura 196 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

As curvas para cargas até 420 kN apresentaram valores de tensões bastante próximos, com ligeira elevação na região do strain S-9. Para cargas acima desse valor, as maiores tensões passam a ocorrer na região do strain S-10, localizado a uma distancia de 17,0 da alma. Para ilustração do descrito nesse parágrafo, foi elaborada a Figura 197, cuja escala foi alterada.

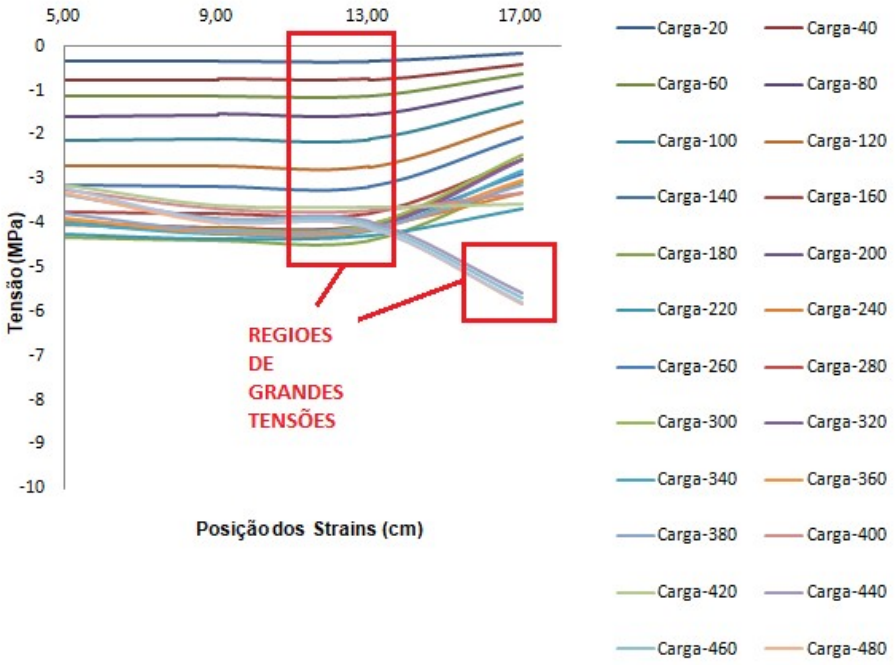


Figura 197 – Regiões de picos curvas de tensões para as cargas

A partir das curvas de tensões apresentadas foram determinadas as funções polinomiais. Essas funções polinomiais se encontram resumidas na tabela abaixo (Tabela 26).

Tabela 26 - Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	(R^2)	Sintaxe no MATLAB	σ max (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
20	$R^2 = 1$	0.000*x^3 - 0.013*x^2 + 0.120*x - 0.635	-0,324	-12,53	38,66
40	$R^2 = 1$	0.000*x^3 - 0.026*x^2 + 0.223*x - 1.344	-0,747	-28,19	37,75
60	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.035*x^2 + 0.297*x - 1.902	-1,121	-18,76	16,74
80	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.052*x^2 + 0.462*x - 2.816	-1,851	-30,22	16,32
100	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.065*x^2 + 0.575*x - 3.651	-2,099	-30,20	14,39
120	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.073*x^2 + 0.610*x - 4.271	-2,726	-35,79	13,13
140	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.075*x^2 + 0.614*x - 4.666	-3,174	-41,51	13,08
160	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.082*x^2 + 0.682*x - 5.488	-3,773	-41,45	10,99
180	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.087*x^2 + 0.706*x - 6.081	-4,396	-51,82	11,79
200	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.075*x^2 + 0.581*x - 5.911	-4,681	-57,26	12,23
220	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.021*x^2 + 0.130*x - 4.491	-4,274	-49,52	11,59
240	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.034*x^2 + 0.236*x - 4.513	-4,084	-56,54	13,85
260	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.056*x^2 + 0.409*x - 4.928	-4,043	-53,08	13,13
280	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.077*x^2 + 0.580*x - 5.301	-4,043	-47,77	11,82
300	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.077*x^2 + 0.558*x - 5.208	-4,031	-49,56	12,29
320	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.071*x^2 + 0.485*x - 4.993	-4,141	-47,04	11,36
340	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.057*x^2 + 0.371*x - 4.709	-4,161	-57,06	13,71
360	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.036*x^2 + 0.155*x - 3.976	-4,145	-63,98	15,44
380	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.019*x^2 - 0.014*x - 3.384	-4,112	-52,06	12,66
400	$R^2 = 1$	0.000*x^3 + 0.007*x^2 - 0.236*x - 2.278	-3,712	-47,32	12,75
420	$R^2 = 1$	-0.000*x^3 + 0.034*x^2 - 0.469*x - 1.561	-3,623	-26,38	7,28
440	$R^2 = 1$	-0.005*x^3 + 0.161*x^2 - 1.586*x + 1.238	-3,954	-41,16	10,41
460	$R^2 = 1$	-0.005*x^3 + 0.160*x^2 - 1.581*x + 1.219	-4,015	-42,32	10,54
480	$R^2 = 1$	-0.005*x^3 + 0.171*x^2 - 1.708*x + 1.669	-4,088	-36,13	8,84

Os valores de larguras efetivas experimentais $b_{f,exp}$, calculados na tabela anterior, foram resumidos no gráfico a seguir (Figura 198).

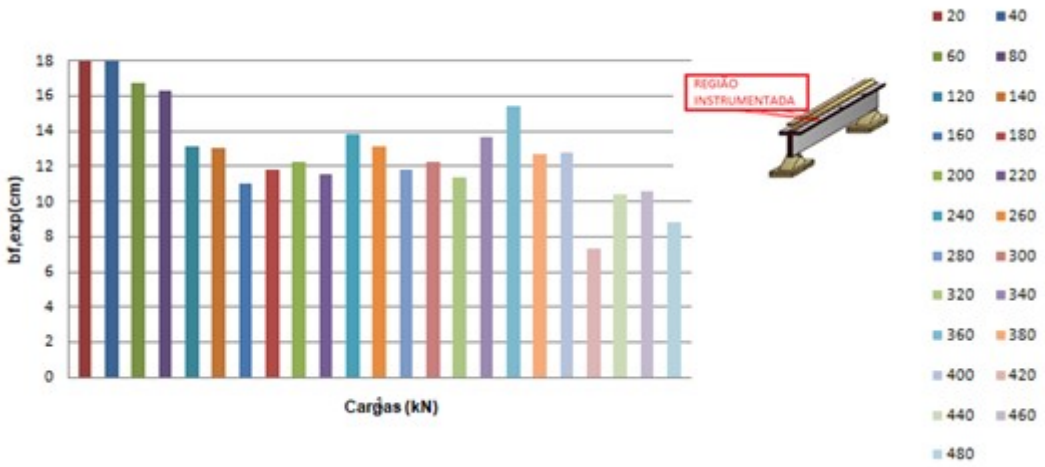


Figura 198 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

As tensões verificadas nos strains S-11, S-12, S-13 e S-14, localizados no trecho de O,50L, foram apresentadas na tabela D9, apresentadano anexo. A posição desses extensômetros é resumida na tabela abaixo (Tabela 27).

Tabela 27 - Posições dos extensômetros S-11 a S1S-12, S-13 e S-14

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
5,00	Deformações S-11	Tensões σ-11
9,00	Deformações S-12	Tensões σ-12
13,00	Deformações S-13	Tensões σ-13
17,00	Deformações S-114	Tensões σ-14
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105cm		

Com base nos valores de tensões apresentados na tabela anterior, foi traçado o gráfico de tensões apresentado na figura a seguir (Figura 199).

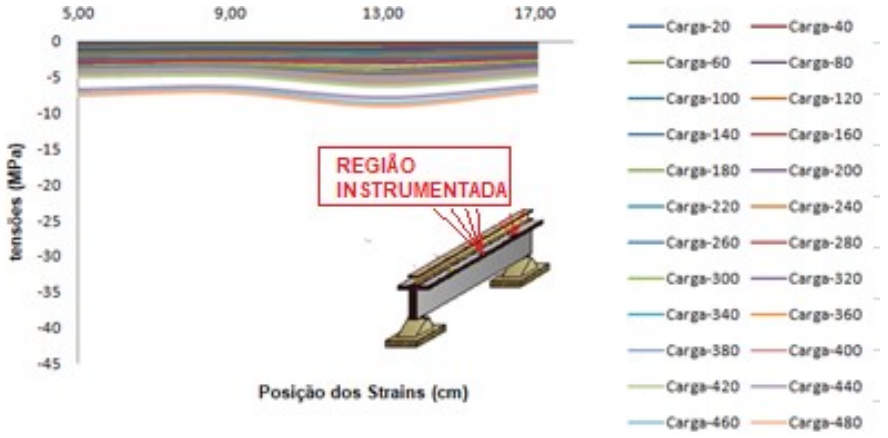


Figura 199 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Assim como já proposto anteriormente, para proporcionar uma melhor visualização do comportamento da curva de tensões, a escala do gráfico anterior foi modificada para tornar possível a observação do desenvolvimento das curvas de tensão.

No gráfico abaixo (Figura 200) é possível notar que ocorre maiores valores de tensões na região do strain gage S-13, localizado a 13,0 cm, na perpendicular da alma da viga.

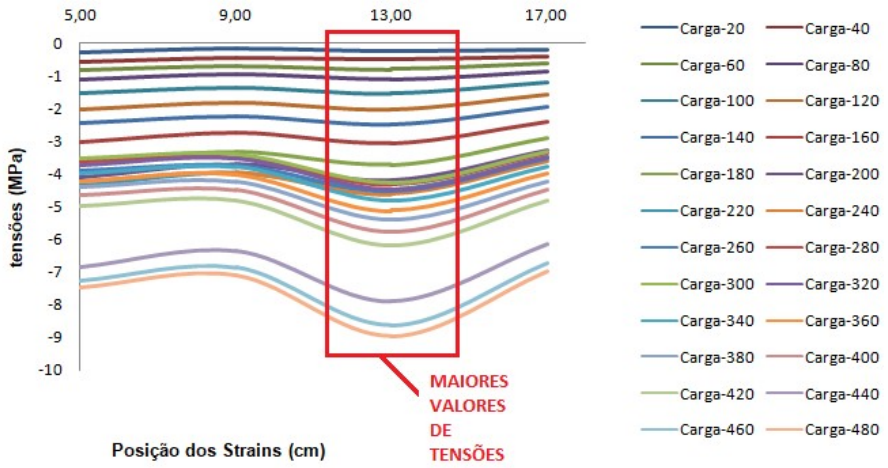


Figura 200 – Valores máximos de tensões para as cargas

Com base no traçado das curvas de tensões anteriormente apresentadas foi possível, através do procedimento de regressão do software Excel [22], a determinação dos polinômios que representam o traçado das curvas de tensões. Novamente, com a integração desses polinômios são determinadas as áreas sob as curvas dos gráficos, possibilitando o cálculo da largura efetiva experimental $b_{ef,\ exp}$.

Os valores desses polinômios são apresentados na tabela abaixo (Tabela 28).

Tabela 28- Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	(R^2)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp*(cm)
20	$R^2 = 1$	0.000*x^3 - 0.029*x^2 + 0.308*x - 1.195	-0,274	-1,97	7,19
40	$R^2 = 1$	0.000*x^3 - 0.028*x^2 + 0.298*x - 1.462	-0,572	-2,29	4,00
60	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.047*x^2 + 0.480*x - 2.239	-0,836	-12,81	15,32
80	$R^2 = 1$	0.001*x^3 - 0.054*x^2 + 0.549*x - 2.707	-1,117	-18,17	16,27
100	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.074*x^2 + 0.735*x - 3.640	-1,532	-23,32	15,22
120	$R^2 = 1$	0.002*x^3 - 0.088*x^2 + 0.869*x - 4.507	-2,024	-28,38	14,02
140	$R^2 = 1$	0.003*x^3 - 0.109*x^2 + 1.071*x - 5.503	-2,492	-36,46	14,63
160	$R^2 = 1$	0.004*x^3 - 0.129*x^2 + 1.258*x - 6.599	-3,054	-36,12	11,83
180	$R^2 = 1$	0.005*x^3 - 0.158*x^2 + 1.538*x - 8.009	-3,716	-41,64	11,21
200	$R^2 = 1$	0.005*x^3 - 0.187*x^2 + 1.821*x - 9.261	-4,193	-65,59	15,64
220	$R^2 = 1$	0.006*x^3 - 0.192*x^2 + 1.866*x - 9.620	-4,469	51,22	-11,46
240	$R^2 = 1$	0.006*x^3 - 0.212*x^2 + 2.018*x - 9.834	-4,608	51,21	-11,11
260	$R^2 = 1$	0.007*x^3 - 0.221*x^2 + 2.078*x - 9.648	-4,510	-49,13	10,89
280	$R^2 = 1$	0.007*x^3 - 0.219*x^2 + 2.042*x - 9.220	-4,311	-45,55	10,57
300	$R^2 = 1$	0.007*x^3 - 0.233*x^2 + 2.178*x - 9.517	-4,270	-53,51	12,53
320	$R^2 = 1$	0.008*x^3 - 0.252*x^2 + 2.377*x - 10.29	-4,469	-46,12	10,32
340	$R^2 = 1$	0.008*x^3 - 0.273*x^2 + 2.566*x - 11.04	-4,824	-63,68	13,20
360	$R^2 = 1$	0.009*x^3 - 0.288*x^2 + 2.701*x - 11.65	-5,118	-56,40	11,02
380	$R^2 = 1$	0.009*x^3 - 0.301*x^2 + 2.800*x - 12.05	-5,406	-69	12,74
400	$R^2 = 1$	0.010*x^3 - 0.321*x^2 + 2.991*x - 12.83	-5,752	-52	9,03
420	$R^2 = 1$	0.011*x^3 - 0.343*x^2 + 3.192*x - 13.71	-6,166	-63	10,16
440	$R^2 = 1$	0.013*x^3 - 0.437*x^2 + 4.160*x - 18.42	-7,895	-79	10,02
460	$R^2 = 1$	0.015*x^3 - 0.479*x^2 + 4.512*x - 19.73	-8,624	-95	10,99
480	$R^2 = 1$	0.015*x^3 - 0.495*x^2 + 4.652*x - 20.31	-8,957	-109	12,15

Utilizando os valores de largura efetiva experimental, calculados na tabela anterior, foi elaborado o gráfico a seguir, com a evolução da largura efetiva para as cargas (Figura 201).

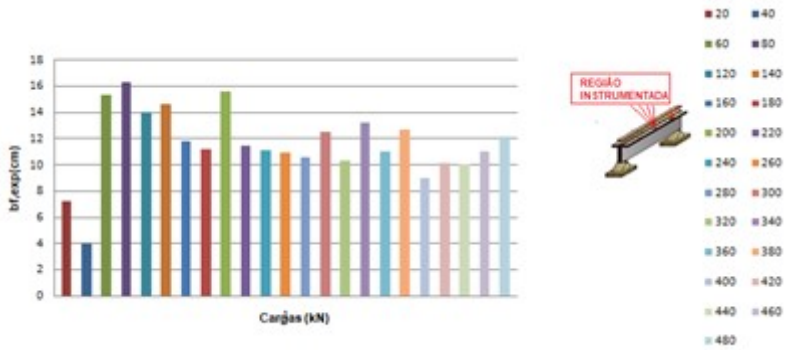


Figura 201 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Objetivando uma comparação entre os comportamentos das tensões para os dois lados da viga, cujos pontos instrumentados já foram detalhados em gráficos anteriores, foi elaborada a figura abaixo, contemplando os dois trechos avaliados da viga, ou seja, os trechos 0,25L e 0,50L (Figura 202).

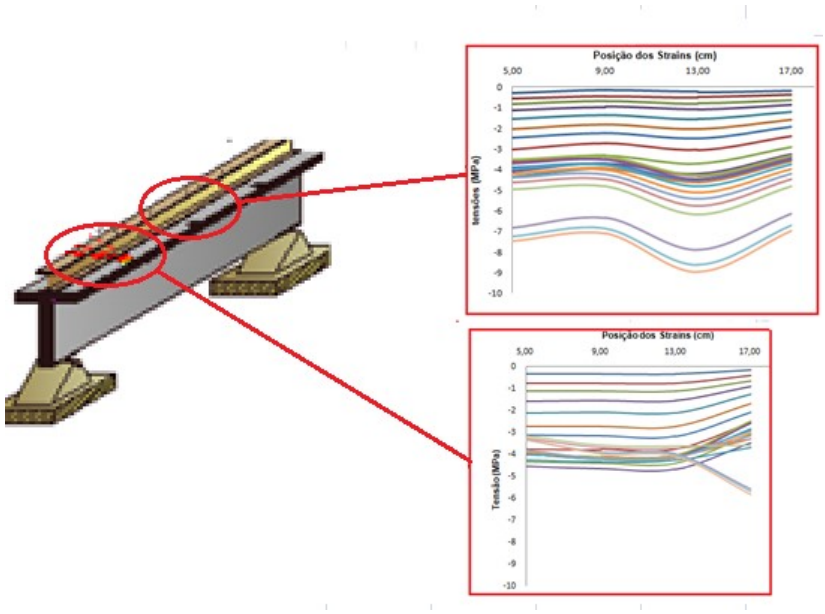


Figura 202 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

3.3.6 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MII-V-3

A viga MII-V-3 foi carregada em dois pontos da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos próximos as regiões de aplicação de cargas. Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,50L, tendo sidos esses pontos selecionados com base na literatura já apresentada no item de revisão bibliográfica dessa tese.

A codificação de números de strain gages é apresentada na Figura 203.

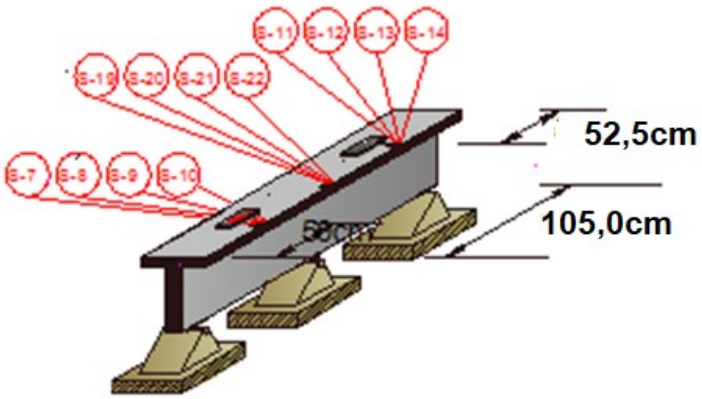


Figura 203 – Detalhe da extensometria

As tensões foram determinadas a partir das deformações de cada extensômetro. Essas tensões verificadas nos strain gages S-7, S-8, S-9 e S-10, localizados no trecho de O, 50L, são apresentadas na tabela D9, que é apresentada nos itens finais desse texto.

Embora a viga tenha suportado uma carga de 439,34kN, as tensões são calculadas para um valor de carga de 360 kN, pois para valores acima dessa carga diversos extensômetros apresentaram problemas de funcionamento.

A partir dos valores apresentados na tabela anterior foi possível traçar o gráfico com o desenvolvimento da curva de tensões, para as cargas apresentadas na tabela anterior. O gráfico das curvas de tensões dos strain gages S-7 a S-10 são mostrados na Figura 204.

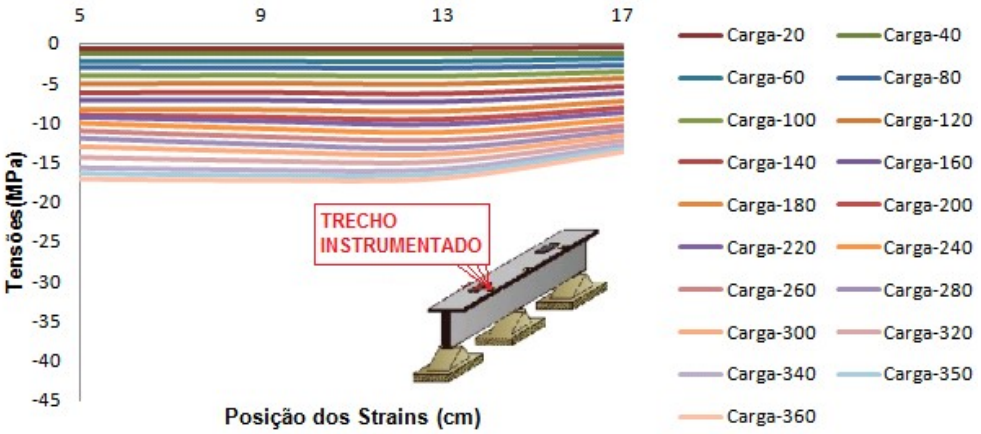


Figura 204 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Para propiciar uma melhor visualização das curvas de tensões, foi elaborada a figura abaixo (Figura 205), cujo eixo vertical (eixo y) teve sua escala reduzida,

permitindo que as inflexões sofridas por cada curva tornem-se um pouco mais perceptíveis.

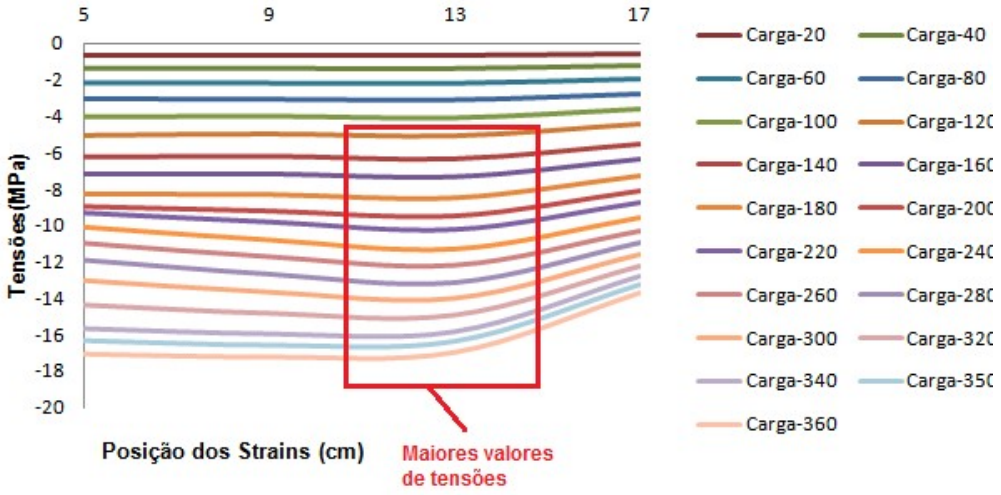


Figura 205 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Na figura anterior é possível notar que as curvas de tensões possuem um desenvolvimento praticamente constante, na região compreendida entre os strain gages S-7 e S-10 para uma carga até 200kN. A partir desse valor as tensões no strain gage S-9 passam a apresentar valor um pouco maior, mas que de maneira geral, não chegam a diferir mais de 3,0MPa entre si.

Utilizando as curvas de tensões anteriormente apresentadas, para os strain gages com numeração entre S-7 e S-10, foram determinados os polinômios que representam as curvas de tensões, agrupados na tabela abaixo (Tabela 29).

Tabela 29 - Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
20	0.000*x^3 - 0.007*x^2 + 0.060*x - 0.796	-0,646	9,54	-14,78
40	0.000*x^3 - 0.009*x^2 + 0.076*x - 1.532	-1,355	-17,47	12,89
60	0.000*x^3 - 0.017*x^2 + 0.138*x - 2.505	-2,194	-29,67	13,52
80	0.001*x^3 - 0.029*x^2 + 0.239*x - 3.664	-3,126	-37,98	12,15
100	0.001*x^3 - 0.056*x^2 + 0.507*x - 5.413	-4,104	-66,68	16,25
120	0.002*x^3 - 0.069*x^2 + 0.632*x - 6.737	-5,032	-66,10	13,13
140	0.003*x^3 - 0.087*x^2 + 0.782*x - 8.342	-6,344	-73,56	11,60
160	0.003*x^3 - 0.098*x^2 + 0.852*x - 9.401	-7,322	-94,58	12,92
180	0.004*x^3 - 0.115*x^2 + 0.990*x - 10.88	-8,509	-100,52	11,81
200	0.004*x^3 - 0.123*x^2 + 0.980*x - 11.33	-9,489	-120,01	12,65
220	0.004*x^3 - 0.128*x^2 + 0.937*x - 11.36	-10,240	-134,03	13,09
240	0.005*x^3 - 0.136*x^2 + 0.932*x - 11.97	-11,280	-134,05	11,88
260	0.005*x^3 - 0.139*x^2 + 0.932*x - 12.83	-12,200	-149,16	12,23
280	0.006*x^3 - 0.151*x^2 + 1.035*x - 14.04	-13,123	-148,51	11,32
300	0.006*x^3 - 0.161*x^2 + 1.145*x - 15.52	-14,000	-167,71	11,98
320	0.006*x^3 - 0.158*x^2 + 1.153*x - 16.95	-14,908	-179,03	12,01
340	0.006*x^3 - 0.162*x^2 + 1.222*x - 18.52	-15,828	-195,14	12,33
350	0.006*x^3 - 0.158*x^2 + 1.187*x - 19.09	-16,341	-200,22	12,25
360	0.006**x^3 - 0.172**x^2 + 1.337*x - 20.29	-16,963	-217,16	12,80

Utilizando os valores de largura efetiva experimental, calculados na tabela anterior, foi elaborado o gráfico a seguir (Figura 206), com a evolução da largura efetiva para as cargas.

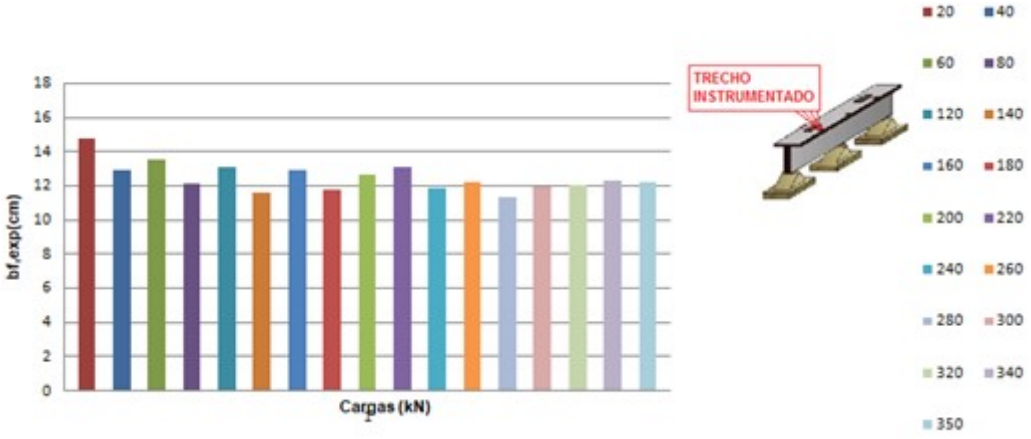


Figura 206 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

As tensões apresentadas nas tabelas anteriores, bem como o a integração dos polinômios da tabela acima, foram considerados para os extensômetros colados na superfície da viga em pontos cujas distâncias em relação à alma da viga estão resumidos na tabela D10, apresentada nos anexos.

Tabela 30 - Posição dos extensômetros S-7, S-8, S-9 e S-10 na alma da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
5,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
9,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
13,00	Deformações S-9	Tensões σ-9
17,00	Deformações S-10	Tensões σ-10
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 52,5cm- Tramo		

Convém ressaltar que essa viga possui apoio intermediário, ou seja, a distancia de 52,5cm para a viga MII-V-3 equivale à posição 0,50L.

De maneira análoga ao procedimento desenvolvido para o tramo anterior da viga, as tensões foram determinadas a partir das deformações verificadas nos strains S-11, S-12, S-13 e S-14, localizados no trecho de O, 50L, e são apresentadas na tabela abaixo constante no anexo D11.

A partir dos valores apresentados na tabela anterior foi possível traçar o gráfico com o desenvolvimento da curva de tensões, para as cargas apresentadas na tabela anterior. O gráfico das curvas de tensões dos strains S-11 a S-14 são mostrados na Figura 207.

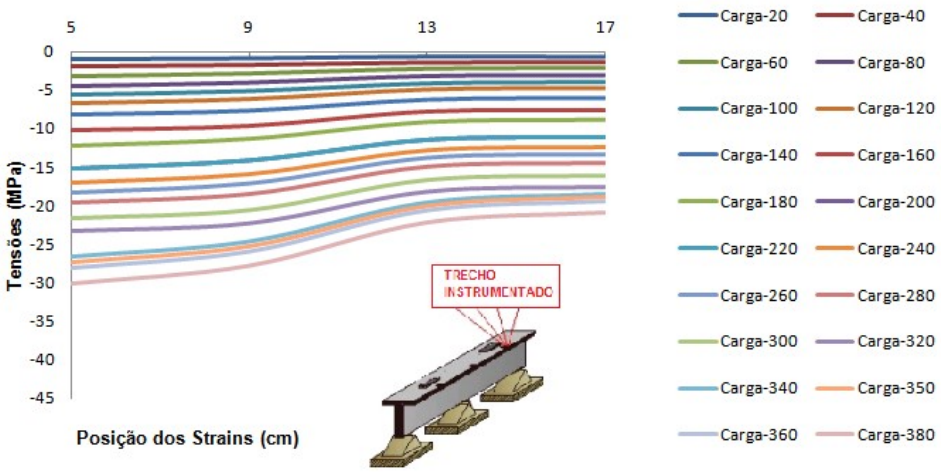


Figura 207 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Para uma melhor visualização das curvas de tensões, foi elaborada a figura abaixo (Figura 208), cujo eixo vertical (eixo y) teve sua escala reduzida, permitindo que as inflexões sofridas por cada curva tornem-se um pouco mais perceptíveis.

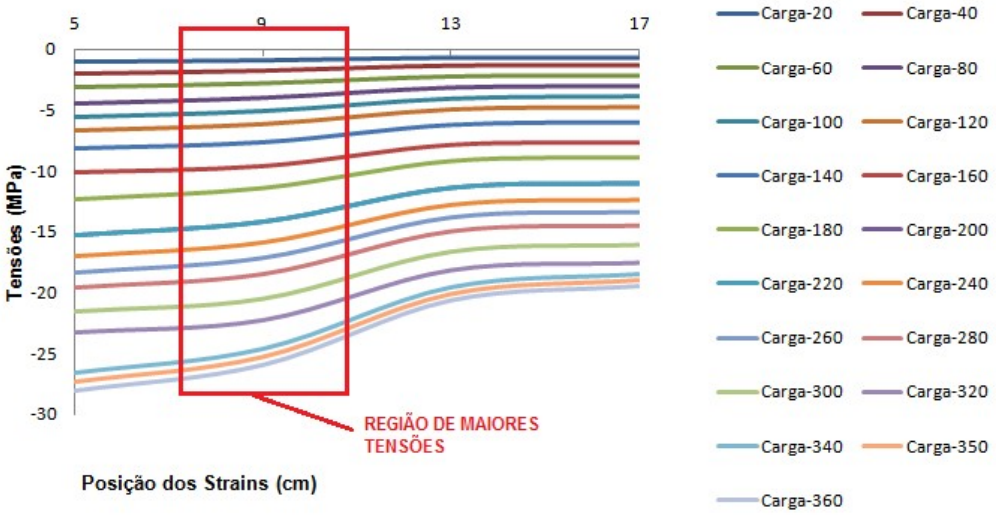


Figura 208 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Na figura anterior é possível notar que as curvas de tensões possuem um desenvolvimento praticamente constante, na região compreendida entre os strain gages S-11 e S-14, para cargas até 120kN. A partir desse valor as tensões nos strain gages S-11 e S-12 passam a apresentar valor um pouco maior, mas que de maneira geral, não chegam a diferir mais de 2,5 MPa entre si.

Para permitir um comparativo entre as curvas de tensões nos dois tramos da viga MII-V-3, foi elaborada a figura Figura 209.

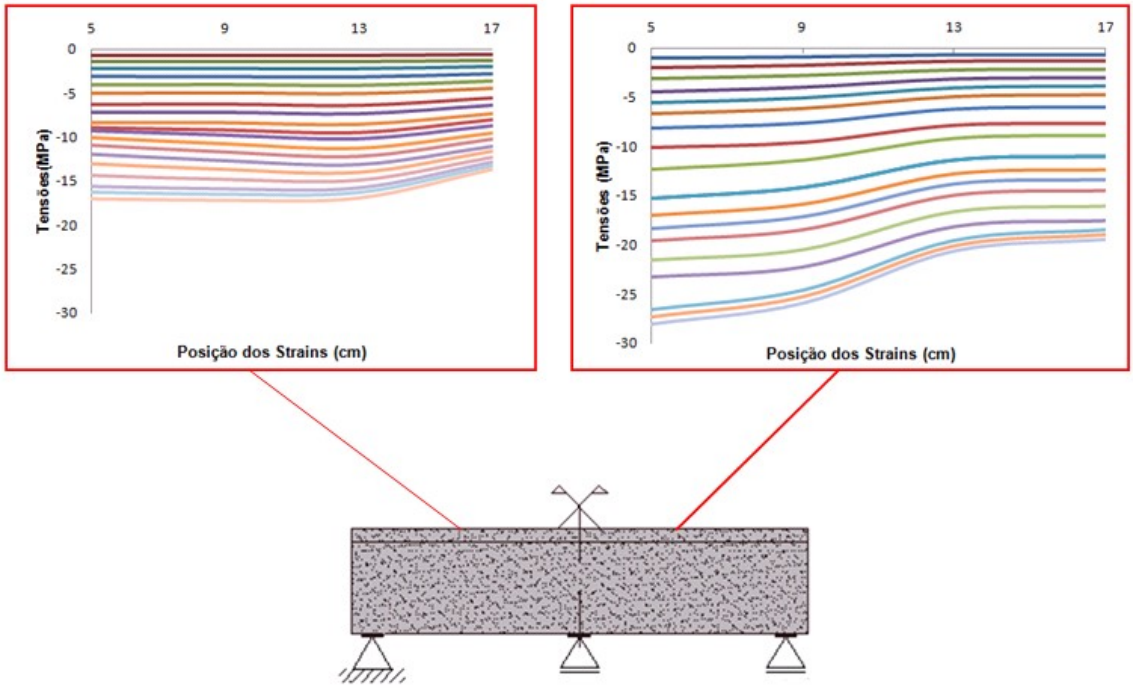


Figura 209 – Comparativo das curvas de tensões para as cargas

3.3.7 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-1

A viga MIII-V-1 foi carregada pontualmente no centro do vão da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos próximos as regiões de aplicação de cargas. Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, tendo sidos esses pontos selecionados com base na literatura já apresentada no item de revisão bibliográfica dessa tese.

A codificação de números de strains é apresentada para a Figura 210.

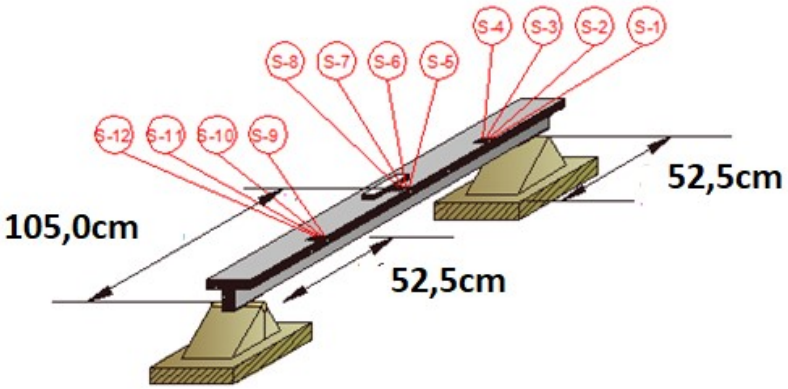


Figura 210 – Detalhe da extensometria

A posição desses extensômetros é resumida na tabela abaixo (Tabela 31).

Tabela 31 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
4,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
6,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
8,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas e resumidas na tabela D12 dos anexos. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 19,70 kN, quando a viga sofreu ruptura, conforme mostrado no capítulo anterior.

Nessa tabela a numeração dos strains encontra-se em ordem decrescente, em razão de manter-se a numeração adotada na instrumentação da viga. Nessa viga o strain gage S-4 é o mais próximo da alma, e o strain gage S-1 é o mais distante.

A partir dos valores apresentados na tabela anterior foi possível traçar o gráfico com o desenvolvimento da curva de tensões, para as cargas apresentadas na tabela anterior. O gráfico das curvas de tensões dos strain gages S-4 a S-1 são mostrados na Figura 211.

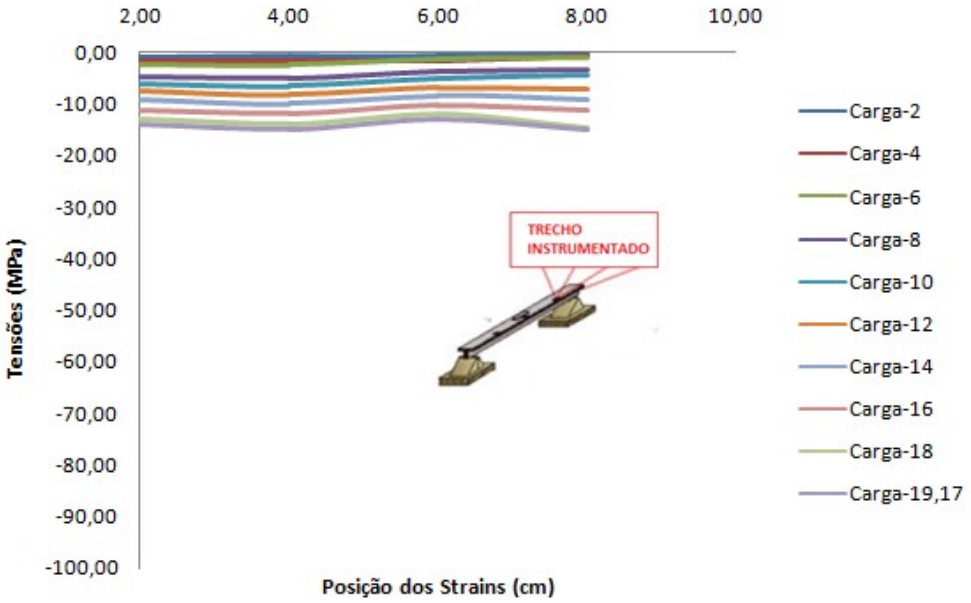


Figura 211 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Para uma melhor visualização dos pontos de maiores tensões a escala do eixo vertical da figura a seguir (Figura 212) foi alterada.

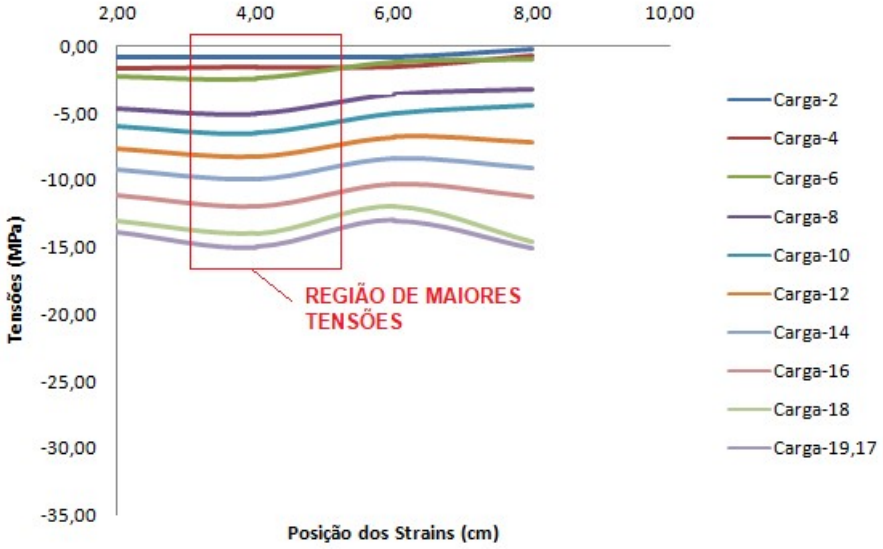


Figura 212 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Nas curvas apresentadas na figura anterior, torna-se possível verificar que as tensões possuem uma distribuição praticamente constante até 4,0 kN. Para valores acima dessa carga, as tensões passam a apresentar maiores valores na região do strain gage S-4.

Tendo como base o desenvolvimento das curvas de tensões, foram determinadas as funções polinomiais que melhor se adequavam a essas curvas. Para essa distribuição de tensões, os polinômios que melhor se aproximaram foram os de 3º grau, sendo essas funções apresentadas na tabela a seguir (Tabela 32).

Tabela 32 - Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σ_{max} (MPa)	Area (cm^2)	$bf_{,exp}$ (cm)
2	0.010*x^3 - 0.130*x^2 + 0.498*x - 1.365	-0,806	-4,89	6,07
4	0.015*x^3 - 0.186*x^2 + 0.701*x - 2.401	-1,620	-9,32	5,76
6	-0.050*x^3 + 0.777*x^2 - 3.343*x + 1.739	-2,41	-10,32	4,29
8	-0.057*x^3 + 0.916*x^2 - 4.052*x + 0.240	-5,01	-24,37	4,86
10	-0.057*x^3 + 0.930*x^2 - 4.192*x - 0.895	-6,47	-33,03	5,10
12	-0.079*x^3 + 1.200*x^2 - 5.263*x - 1.241	-8,18	-44,32	5,42
14	-0.092*x^3 + 1.381*x^2 - 6.056*x - 1.879	-9,90	-54,79	5,54
16	-0.104*x^3 + 1.566*x^2 - 6.885*x - 2.757	-11,93	-66,08	5,54
18	-0.160*x^3 + 2.302*x^2 - 9.804*x - 1.281	-14,60	-78,27	5,36
19,17	-0.149*x^3 + 2.178*x^2 - 9.401*x - 2.632	-15,12	-83,90	5,55

Em conformidade com os valores calculados na tabela anterior, foram plotados no gráfico a seguir (Figura 213) a largura efetiva para x = 0,25L.

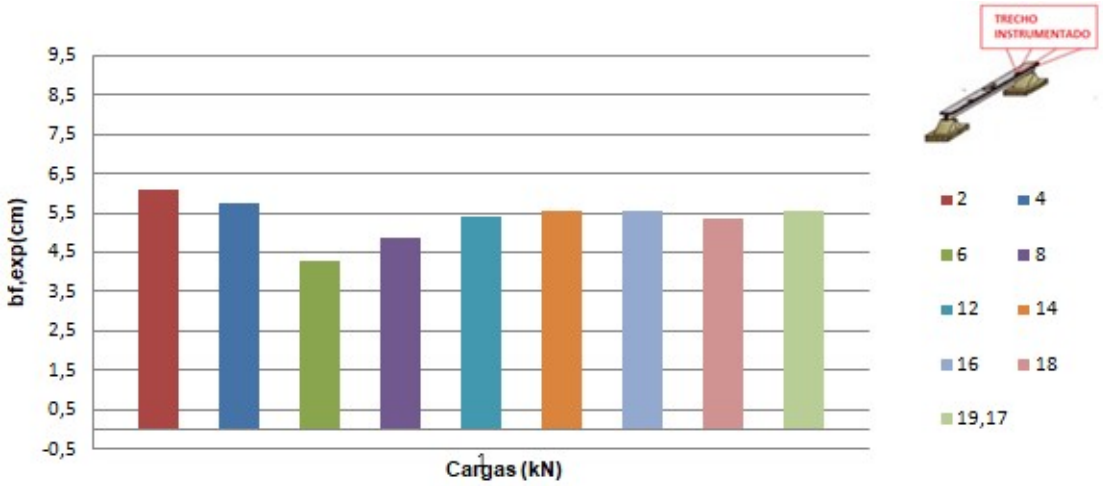


Figura 213 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Em procedimento análogo ao anteriormente apresentado, as tensões no meio da viga (x = 0,50L) foram calculadas com base nas deformações obtidas nos strains instalados naquela posição. As posições desses strain gages, a partir da alma da viga, são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 33).

Tabela 33 - Posição dos extensômetros S-8, S-7, S-6 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
4,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
6,00	Deformações S-6	Tensões σ-6
8,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As tensões obtidas nos strain gages S-8 a S-5 são apresentadas na tabela D13 dos anexos desse texto. Com base nos valores de tensões apresentados nessa tabela, foram plotadas as curvas de tensões para os strains localizados no meio da viga (x = 0,50L), ou seja, nos strain gage S-8 a S-5, apresentados na Figura 214.

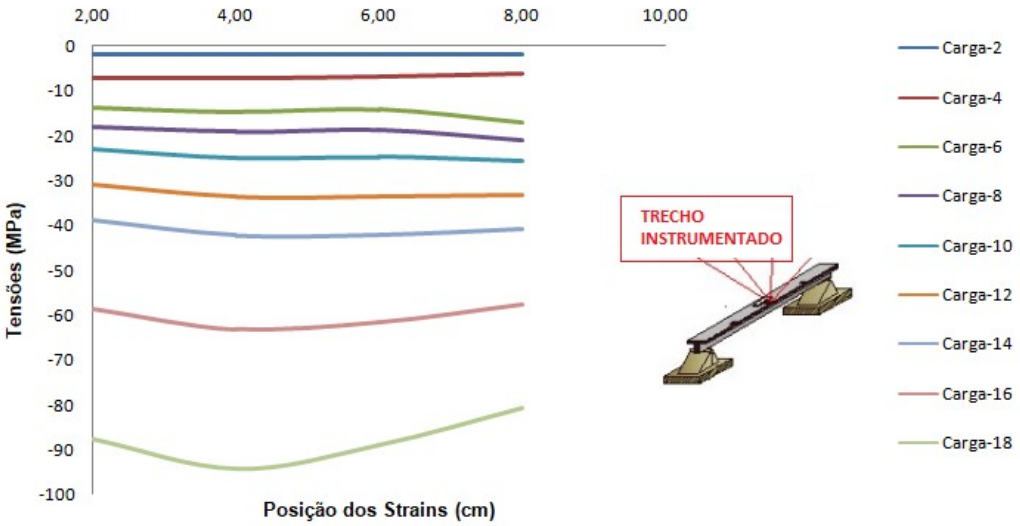


Figura 214 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Na figura anterior é pode ser verificado que os valores de tensões que são verificadas nessa posição da viga (x=0,50L) são maiores que os valores encontrados na posição (x=0,25L), sendo essa condição facilmente justificável por tratar-se exatamente do ponto de aplicação da carga, onde ocorreram os maiores momentos fletores.

È possível verificar-se, também na figura, que as maiores tensões ocorreram na direção do strain S-7, localizado na mesa a 4,0cm da alma da viga. Esse comportamento é apresentado na Figura 215.

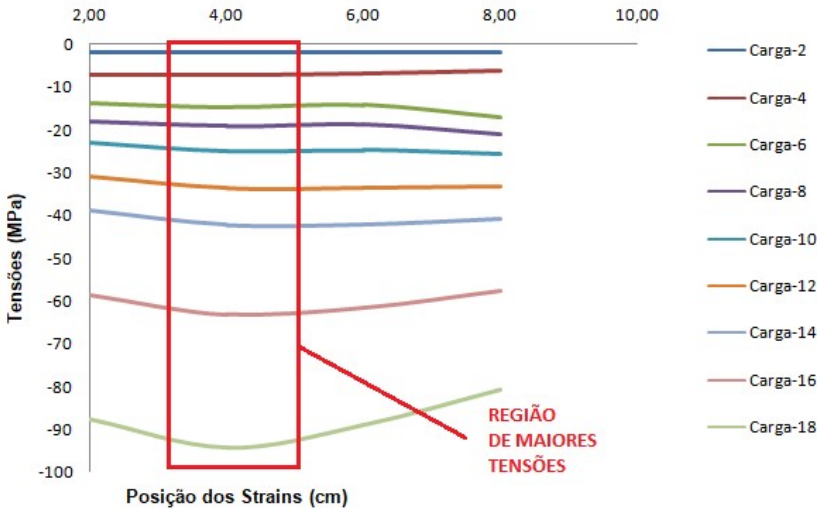


Figura 215 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

Com o auxilio das curvas apresentadas na figura anterior, foram determinados os polinômios que melhor se aproximam do traçado de cada curva. Esses polinômios são resumidos na tabela abaixo (Tabela 34).

Tabela 34 - Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	(R^2)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	$bf_{,exp}$ (cm)
2	$R^2 = 1$	-0.000*x^3 + 0.022*x^2 - 0.190*x 1.603	-2,03	-11,62	5,74
4	$R^2 = 1$	-0.002*x^3 + 0.088*x^2 - 0.512*x 6.476	-7,29	-41,47	5,69
6	$R^2 = 1$	-0.090*x^3 + 1.216*x^2 - 5.141*x 7.728	-14,60	-88,11	6,03
8	$R^2 = 1$	-0.085*x^3 + 1.236*x^2 - 5.653*x 10.85	-19,19	-113,74	5,93
10	$R^2 = 1$	-0.065*x^3 + 1.043*x^2 - 5.363*x 15.92	-24,90	-147,49	5,92
12	$R^2 = 1$	-0.055*x^3 + 1.025*x^2 - 5.986*x 22.61	-33,71	-199,14	5,91
14	$R^2 = 1$	-0.054*x^3 + 1.103*x^2 - 6.808*x 29.11	-42,18	-248,68	5,90
16	$R^2 = 1$	-0.073*x^3 + 1.640*x^2 - 10.06*x 44.50	-63,21	-367,74	5,82
18	$R^2 = 1$	-0.182*x^3 + 3.687*x^2 - 20.42*x - 59.97	-94,31	-415,90	4,41

Em conformidade com os valores calculados na tabela anterior, foram plotados no gráfico a seguir (Figura 216) os valores da largura efetiva para x = 0,50L, para o trecho cuja instrumentação foi numerada de strain gages S-5 a S-8. Nota-se que a largura efetiva experimental mantem-se quase constante nesse ponto do vão, para o tipo de carregamento aplicado.

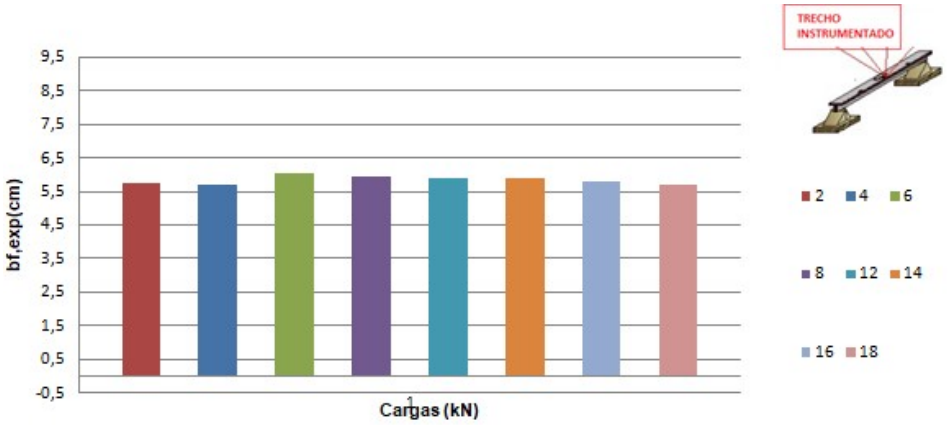


Figura 216 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

As tensões foram calculadas na viga MIII-V1, também em para x=0,75L, com base nas deformações dos strain gages S-9, S-10, S-11 e S-12, sendo essas tensões resumidas na tabela D14, do anexo apresentado nos ítens finais desse texto.

Com os valores de tensões que foram calculadas e apresentadas na tabela anterior, foram traçadas as curvas de tensões, sendo apresentadas na Figura 217.

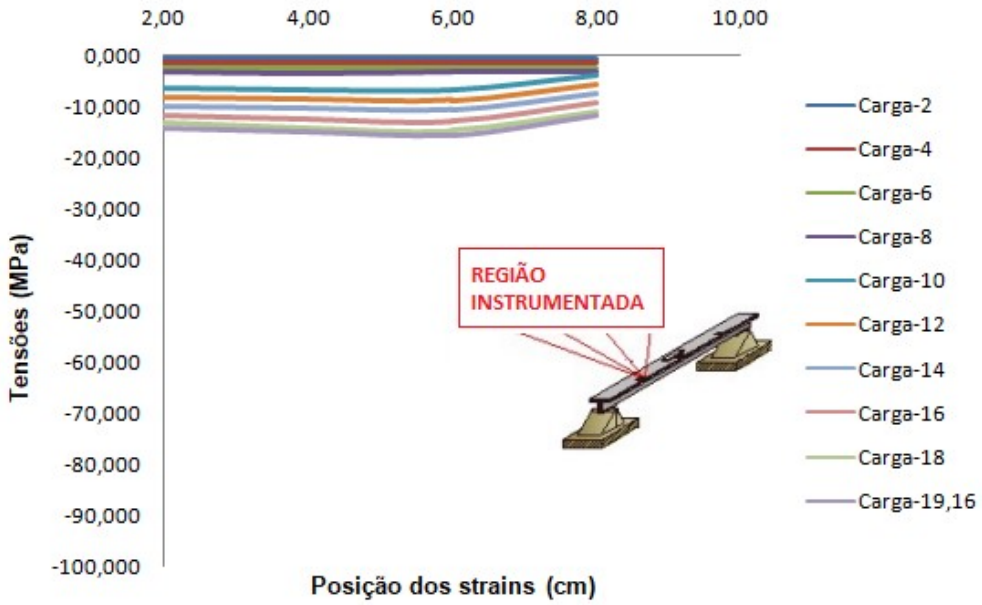


Figura 217 – Desenvolvimento das curvas de tensões para as cargas

As tensões calculadas apresentaram valores quase constantes ao longo da largura da mesa, tendo esses valores alcançado o seu máximo na região próxima ao strain gage S-11. Para uma melhor visualização, a escala do gráfico anterior foi alterada, com o intuito de permitir uma observação mais detalhada do comportamento das curvas (Figura 218).

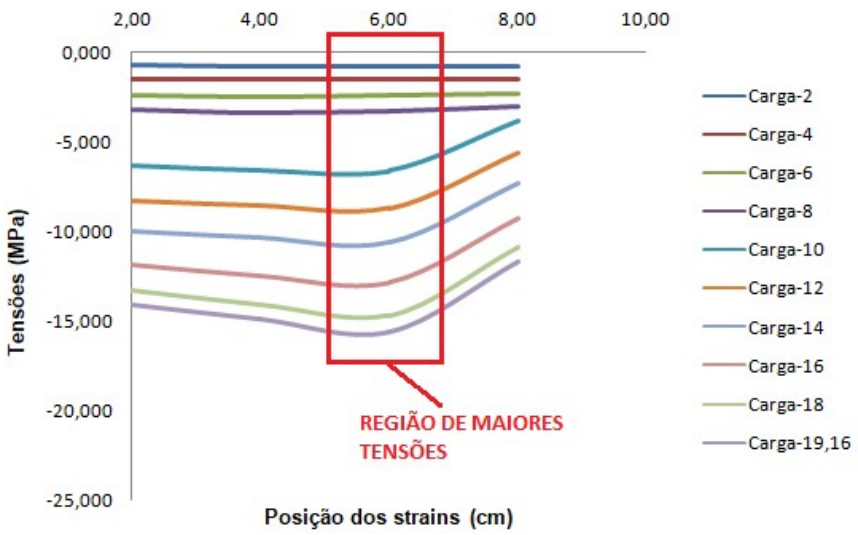


Figura 218 – Detalhe dos picos de tensões para as cargas

Com base nas curvas de tensões foram determinadas as funções polinomiais monovariáveis que, através do procedimento de regressão do software Excel [22], foram verificados.Esses polinômios para a posição da viga x=0,75L foram resumidos na tabela abaixo (Tabela 35).

Tabela 35 - Polinômios e larguras efetivas

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	$bf,_{exp}$(cm)
2	-0.002*x^3 + 0.038*x^2 - 0.182*x - 0.481	-0,762	-4,00	5,25
4	0.000*x^3 - 0.004*x^2 - 0.018*x - 1.409	-1,507	-9,67	6,42
6	-0.003*x^3 + 0.057*x^2 - 0.302*x - 1.988	-2,479	-14,47	5,84
8	-0.003*x^3 + 0.078*x^2 - 0.456*x - 2.529	-3,335	-18,81	5,64
10	0.056*x^3 - 0.648*x^2 + 2.196*x - 8.544	-6,610	-37,13	5,62
12	0.063*x^3 - 0.732*x^2 + 2.478*x - 10.81	-8,700	-49,24	5,66
14	0.069*x^3 - 0.806*x^2 + 2.688*x - 12.64	-10,590	-60,23	5,69
16	0.078*x^3 - 0.917*x^2 + 2.985*x - 14.73	-12,844	-73,33	5,71
18	0.089*x^3 - 1.057*x^2 + 3.463*x - 16.68	-14,659	-82,99	5,66
19,16	0.094*x^3 - 1.127*x^2 + 3.713*x - 17.72	-15,564	-88,39	5,68

Em conformidade com os valores calculados na tabela anterior, foram plotados no gráfico a seguir (Figura 219) os valores da largura efetiva para x=0,75L.

Nota-se que a largura efetiva experimental mantem-se quase constante nesse ponto do vão, para o tipo de carregamento aplicado.

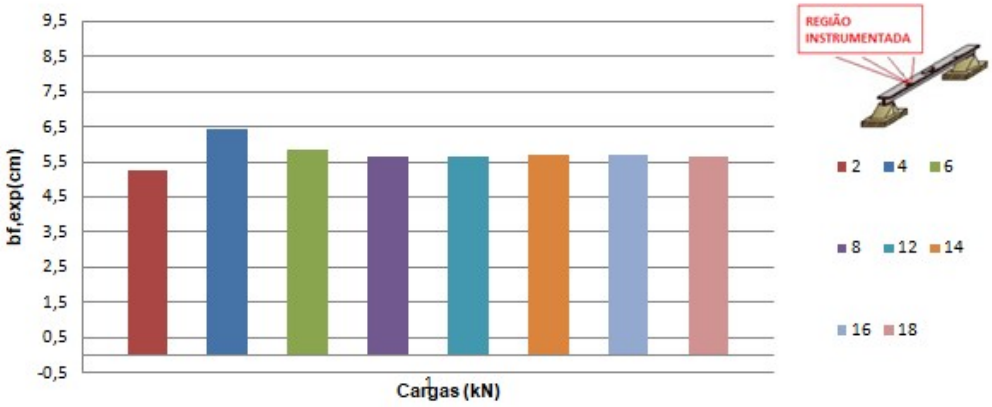


Figura 219 – Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Com o objetivo de proporcionar uma melhor observação do comportamento das curvas de tensões nas três regiões instrumentadas da viga (x = 0,25L, x = 0,50L e x = 0,75L) foi elaborada a figura abaixo (Figura220).

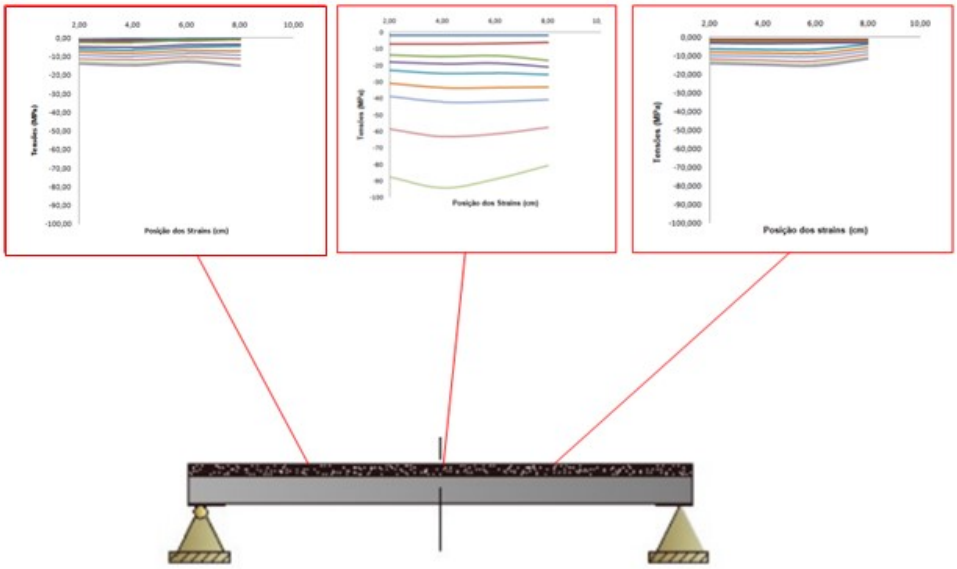


Figura220 – Detalhe das curvas de tensões para as cargas

3.3.8 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-2

A viga MIII-V-2 foi carregada pontualmente no centro do vão da viga, sendo que as condições de contorno dessa viga eram compostas por 3 apoios, sendo dois extremos e um no meio do vão.

A instrumentação dessa viga era posicionada ao longo do vão, em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, tendo sidos esses pontos selecionados com o objetivo de possibilitar a análise e representação gráfica a ser abordada mais adiante.

A codificação de números de strains é apresentada para a figura abaixo (Figura 221).

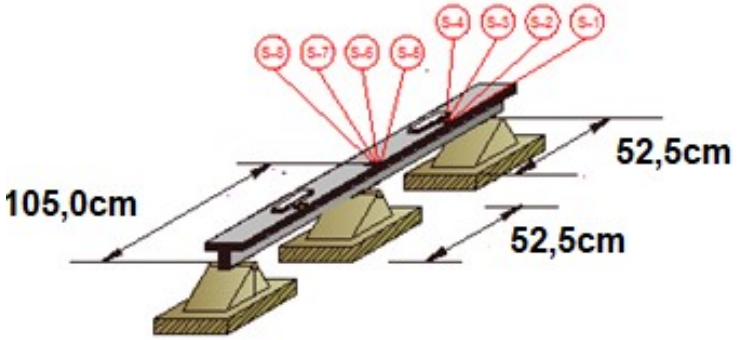


Figura 221 – Detalhe da extensometria

A posição desses extensômetros é resumida na tabela abaixo (Tabela 36).

Tabela 36 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
4,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
6,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
8,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

Nessa tabela a numeração dos strains encontra-se em ordem decrescente, em razão de manter-se a numeração adotada na instrumentação da viga. Nessa viga o strain gage S-4 é o mais próximo da alma, e o strain gage S-1 é o mais distante, tendo suas tensões resumidas na tabela D15, apresentada nos anexos.

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro são apresentadas na tabela do anexo. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 54,0 kN, sendo a carga de ruptura da viga 55,55kN (Figura 222).

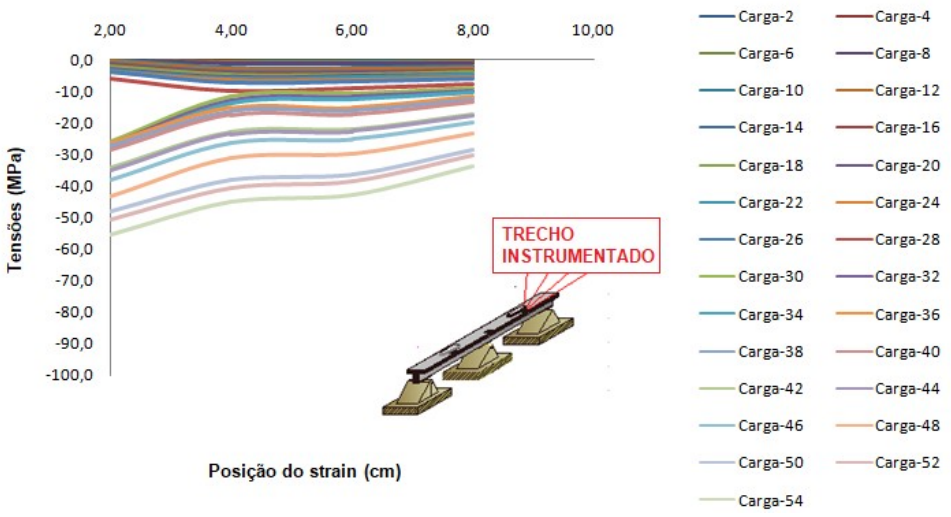


Figura 222 - Comportamento das curvas de tensões para as cargas

Com o objetivo de melhor visualização do desenvolvimento das curvas de tensões, foi elaborada a figura abaixo (Figura 223), cuja escala do eixo vertical foi reduzida.

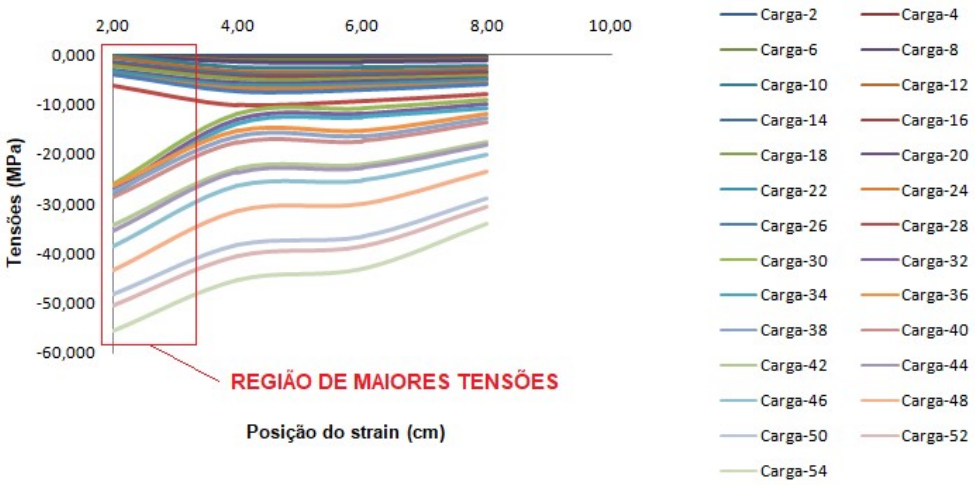


Figura 223 - Pontos de maiores tensões para as cargas

Na figura anterior é possível constatar que as maiores tensões encontram-se na região do strain S-4, que encontrava-se a 2,0cm do ponto de aplicação da carga. As tensões nesse ponto alcançaram valores que se aproximaram do dobro da carga do strain S-1, localizado na extremidade da mesa da viga.

A partir das curvas das tensões foram verificados os polinômios das curvas de tensões, para que com base neles fossem resolvidas as integrais definidas e encontradas as áreas sob as curvas de tensões. Essas funções polinomiais são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 37).

Tabela 37 - Funções polinomiais das curvas de tensões

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	$bf_{,exp}$ (cm)
2	-0.001*x^3 + 0.037*x^2 - 0.313*x + 0.477	-0,317	-1,33	4,20
4	-0.008*x^3 + 0.170*x^2 - 1.128*x + 1.630	-0,749	-3,66	4,88
6	-0.012*x^3 + 0.263*x^2 - 1.692*x + 2.424	-1,033	-4,27	4,13
8	-0.017*x^3 + 0.358*x^2 - 2.321*x + 3.337	-1,438	-6,80	4,73
10	-0.041*x^3 + 0.795*x^2 - 4.839*x + 6.818	-2,533	-12,52	4,94
12	-0.042*x^3 + 0.832*x^2 - 5.101*x + 6.574	-3,299	-16,65	5,05
14	-0.043*x^3 + 0.849*x^2 - 5.194*x + 6.041	-3,916	-20,80	5,31
16	-0.039*x^3 + 0.795*x^2 - 4.937*x + 5.184	-4,372	-23,23	5,31
18	-0.042*x^3 + 0.847*x^2 - 5.181*x + 5.069	-4,844	-25,56	5,28
20	-0.047*x^3 + 0.924*x^2 - 5.576*x + 4.897	-5,629	-30,61	5,44
22	-0.047*x^3 + 0.931*x^2 - 5.626*x + 4.568	-6,060	-32,90	5,43
24	-0.047*x^3 + 0.951*x^2 - 5.779*x + 4.220	-6,731	-36,22	5,38
26	-0.061*x^3 + 1.198*x^2 - 7.165*x + 6.155	-7,272	-38,98	5,36
28	-0.083*x^3 + 1.564*x^2 - 8.922*x + 5.955	-10,015	-53,84	5,38
30	0.285*x^3 - 5.054*x^2 + 29.36*x - 66.70	-25,912	-77,77	3,00
32	0.282*x^3 - 4.997*x^2 + 29.11*x - 67.54	-27,046	-83,80	3,10
34	0.279*x^3 - 4.961*x^2 + 28.99*x - 68.27	-27,892	-88,79	3,18
36	0.299*x^3 - 4.959*x^2 + 26.82*x - 62.48	-26,280	-98,41	3,74
38	0.301*x^3 - 4.987*x^2 + 26.99*x - 63.84	-27,391	-104,14	3,80
40	0.300*x^3 - 4.967*x^2 + 26.93*x - 65.07	-28,680	-110,98	3,87
42	0.302*x^3 - 4.975*x^2 + 27.14*x - 71.20	-34,388	-140,76	4,09
44	0.306*x^3 - 5.038*x^2 + 27.51*x - 72.68	-35,351	-145,04	4,10
46	0.313*x^3 - 5.123*x^2 + 27.97*x - 76.36	-38,401	-160,46	4,18
48	0.322*x^3 - 5.193*x^2 + 28.17*x - 81.54	-43,386	-188,12	4,34
50	0.286*x^3 - 4.425*x^2 + 23.38*x - 79.42	-48,065	-226,80	4,72
52	0.292*x^3 - 4.502*x^2 + 23.79*x - 82.46	-50,551	-239,56	4,74
54	0.304*x^3 - 4.653*x^2 + 24.53*x - 88.45	-55,560	-266,42	4,80

Os valores calculados na tabela anterior, foram plotados no gráfico a seguir(Figura 224) os valores da largura efetiva para x=0,75L. Nota-se que a largura

efetiva experimental mantem-se quase constante nesse ponto do vão, para o tipo de carregamento aplicado.

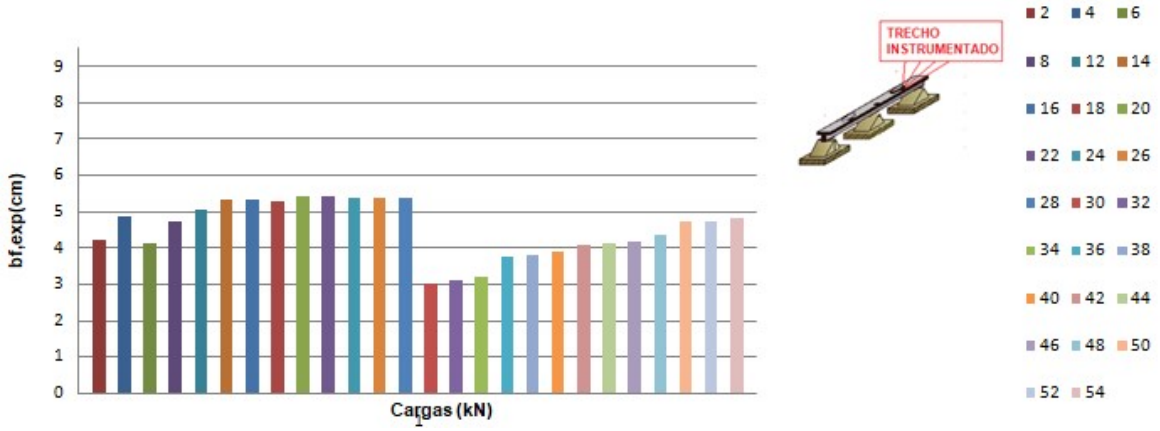


Figura 224 - Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Para verificar as tensões, na região central da viga, onde situava-se o apoio intermediário, foram utilizados os dados obtidos a partir da leitura dos strains S-5 a S-8. Convém destacar que trata-se da região sobre o apoio intermediário, que por conseguinte, possui momentos fletores negativos.

A posição, em relação a mesa da viga é apresentada na tabela a seguir (Tabela 38).

Tabela 38 - Posição dos extensômetros S-8, S-7, S-6 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
4,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
6,00	Deformações S-6	Tensões σ-6
8,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

Nessa tabela a numeração dos extensômetros(strains gages) encontra-se em ordem decrescente, sendo o strain S-8 é o mais próximo da alma, e o strain gage S-5 é o mais distante da alma

As tensões lidas nos strains gages S-8 a S-5 foram resumidas na tabela D16dos anexos. Nessa tabela são apresentados os valores apenas até uma carga de 26,0kN. Tal procedimento se deve ao fato dessa região da viga apresentar

deformações de tração, causando a fissuração do banzo superior da viga e, consequente falha na leitura desses extensômetros.

Tendo como base as tensões apresentadas na tabela D16, foi possível determinar as curvas de tensões para essa região da viga, que conforme já esclarecido,possuía momentos negativos. Essas curvas são apresentadas na figura abaixo (Figura 225).

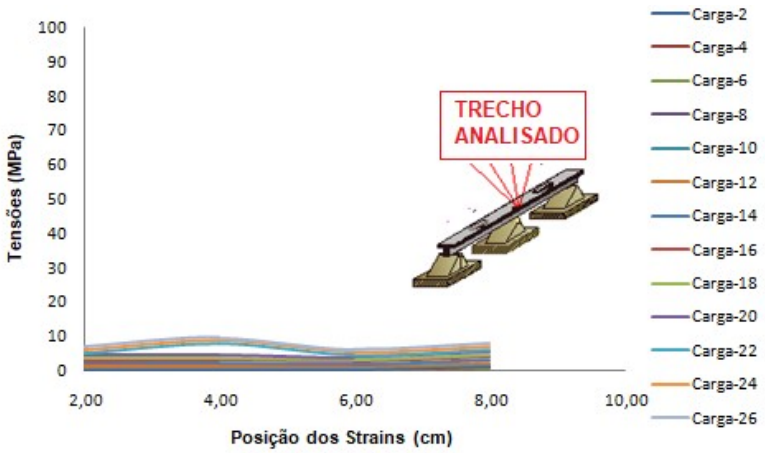


Figura 225 - Comportamento das curvas de tensões para as cargas

Para possibilitar uma melhor observação do comportamento das curvas de tensões foi elaborada a Figura 226, cujo eixo vertical do gráfico teve seu valor reduzido, possibilitando melhor observação das inflexões de cada curva.

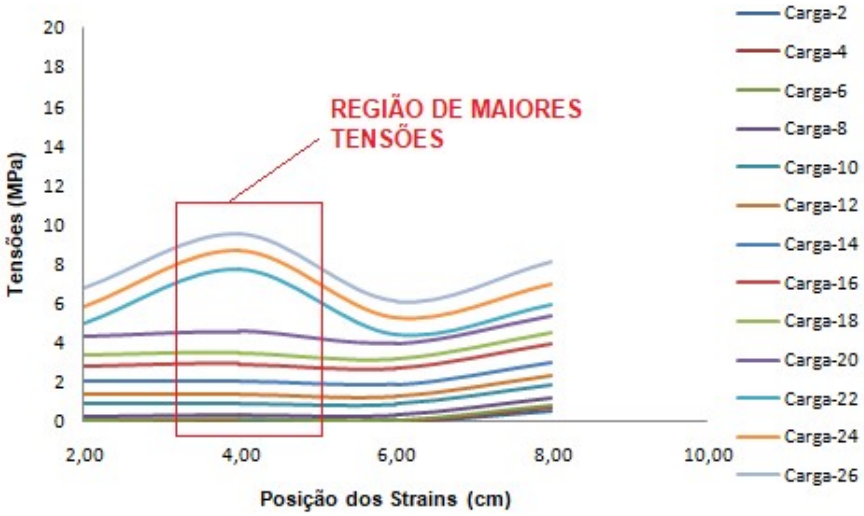


Figura 226 - Detalhe das curvas de tensões para as cargas

Nessas curvas de tensões é possível observar que as maiores tensões (de tração) ocorrem na região do strain S-7 que encontrava-se localizado a 4,0cm da

alma da viga. Esse comportamento das curvas de tensões na região de momentos negativos mostra-se diferenciado da região de aplicação de cargas (região central dos tramos), onde as maiores tensões ocorrem nos extensômetros mais próximos da alma.

A partir das curvas de tensões foram obtidos os polinômios para a região central da viga, localizada sobre o apoio intermediário, sendo esses polinômios resumidos na tabela a seguir.

Tabela 39 - Funções polinomiais das curvas de tensões

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm²)	$bf,_{exp}$ (cm)
2	0.014*x^3 - 0.201*x^2 + 0.876*x - 1.185	0,534	**0,32**	0,60
4	0.014*x^3 - 0.171*x^2 + 0.602*x - 0.580	0,731	0,13	0,18
6	0.018*x^3 - 0.235*x^2 + 0.930*x - 0.999	0,849	0,79	0,93
8	0.020*x^3 - 0.263*x^2 + 1.047*x - 0.955	1,202	1,90	1,58
10	0.022*x^3 - 0.289*x^2 + 1.130*x - 0.373	1,859	5,55	2,98
12	0.026*x^3 - 0.329*x^2 + 1.252*x + 0.014	2,350	8,89	3,78
14	0.031*x^3 - 0.404*x^2 + 1.576*x + 0.257	3,051	12,57	4,12
16	0.035*x^3 - 0.461*x^2 + 1.813*x + 0.819	3,969	17,56	4,42
18	0.039*x^3 - 0.522*x^2 + 2.060*x + 1.086	4,502	20,40	4,53
20	0.058*x^3 - 0.800*x^2 + 3.278*x + 0.556	5,411	26,44	4,89
22	0.229*x^3 - 3.516*x^2 + 16.07*x - 14.93	7,757	35,41	4,57
24	0.234*x^3 - 3.595*x^2 + 16.43*x - 14.54	8,687	40,38	4,65
26	0.241*x^3 - 3.681*x^2 + 16.71*x - 13.87	9,575	45,49	4,75

Os valores calculados na tabela precedente, foram plotados no gráfico a seguir (Figura 227) os valores da largura efetiva para x=0,75L. Nota-se que a largura efetiva experimental começa com valores abaixo de 2,0cm, em seguida mantendo-se quase constante,em valores próximos a 4,5cm.

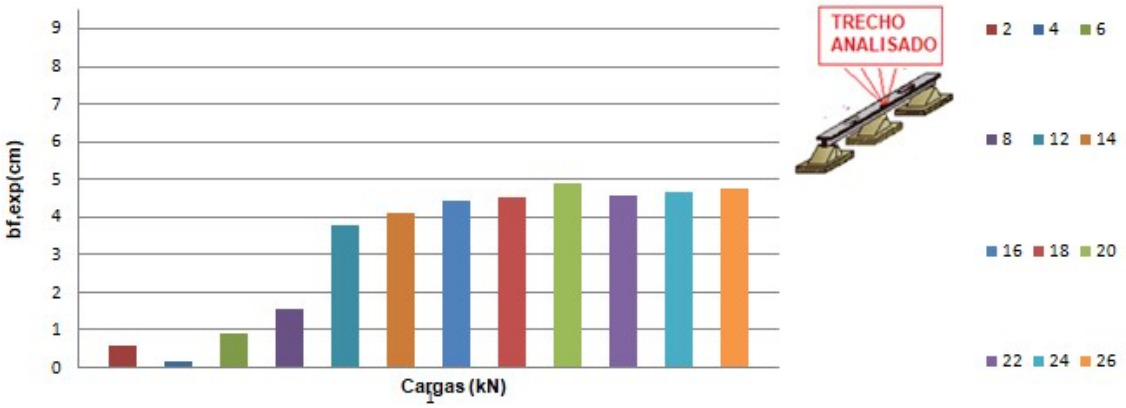


Figura 227 - Gráfico de evolução da largura efetiva pelas cargas

Para os strain gages com numeração de S-9 a S-12 foram feitos procedimentos idênticos aos utilizados anteriormente para determinação das tensões. Esses strains localizavam-se em posições relacionadas na tabela abaixo (Tabela 40), sendo esse trecho instrumentado localizado a 52,5cm do apoio intermediário (x= 0,50L).

Tabela 40 - Posição dos extensômetros S-12 a S-9

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-12	Tensões σ-12
4,00	Deformações S-11	Tensões σ-11
6,00	Deformações S-10	Tensões σ-10
8,00	Deformações S-9	Tensões σ-9
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 0,50cm,a partir do apoio intermediário		

Tendo como base as deformações obtidas nesses strain gages foram calculadas as tensões atuantes nessa região da viga, sendo os valores dessas resumidos na tabela D17 dos anexos.

Para os valores de tensões apresentados na tabela anterior foram elaboradas as curvas de tensões para as cargas aplicadas, sendo essas curvas apresentadas na figura abaixo (Figura 228).

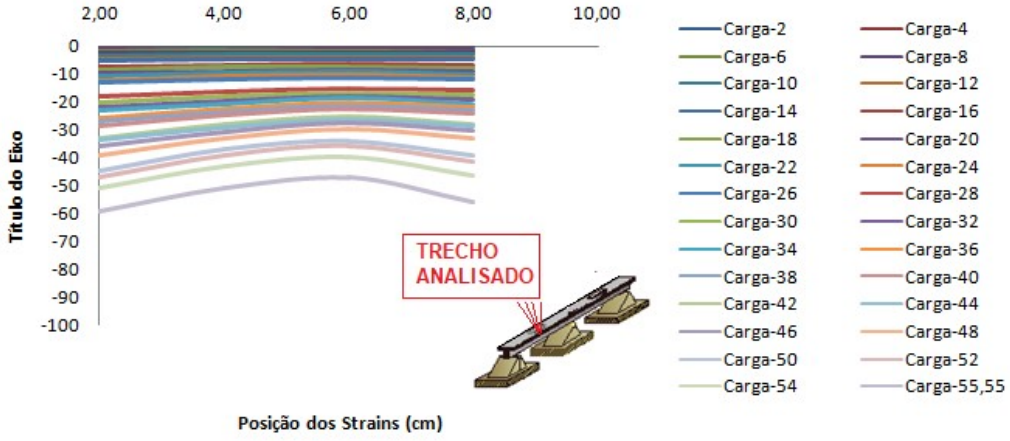


Figura 228 - Curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-12

Buscando uma melhor visualização do comportamento dessas curvas, foi elaborada a Figura 229, cujo eixo vertical teve o seu valor de máxima reduzido, para facilitar a observação dos detalhes de cada curva.

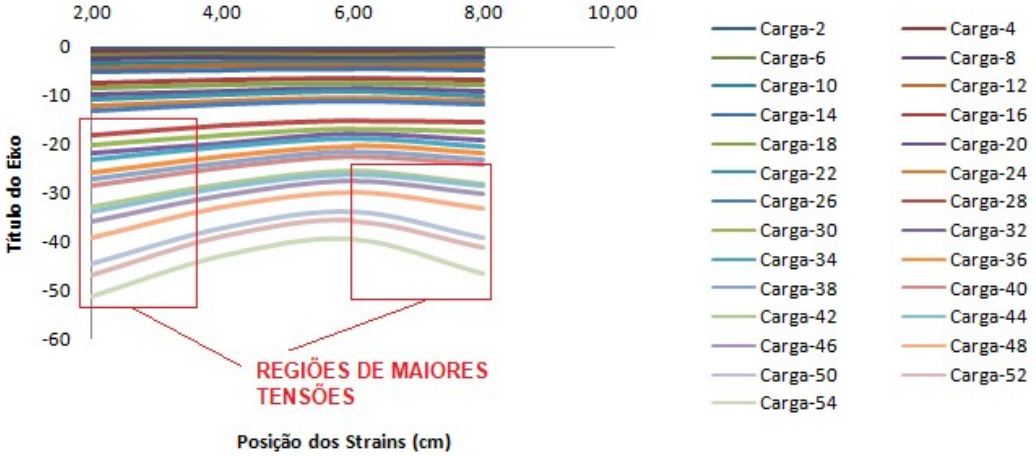


Figura 229 - Detalhes de tensões para as cargas em S-9 a S-12

É possível notar na figura anterior que, de maneira geral, as maiores tensões na mesa desse trecho da viga ocorreram para o strain gage S-12, localizado a 2,0cm da alma. No entanto, para cargas acima de 40kN devido ao estado de fissuração da viga, ocorreu uma elevação nas tensões na região do strain S-8 que encontrava-se próximo a extremidade da mesa. É importante ressaltar esse comportamento das tensões só ocorreu em carga próxima a carga de ruptura da viga que foi de 55,5kN.

Com base nas curvas de tensões foram determinados os polinômios que representam o traçado de cada curva, e a partir desses polinômios foi realizada a integração da área sob cada curva. Esses polinômios são resumidos na tabela a seguir

Nessa tabela observam-se valores de largura efetiva ($b_{f,exp}$), que foram encontrados através da integração das áreas sob as curvas, variando de 6,13cm a 4,96cm, sendo esses valores coerentes com os encontrados no outro tramo da viga, cujo ponto de aplicação do carregamento e as condições de contorno nos apoios são idênticas.

Nessa tabela é possível constatar que os polinômios que melhor descreveram as funções das curvas de tensões foram os de 3ºgrau. Essas funções polinomiais são resumidas na tabela a seguir (Tabela 41).

Tabela 41 - Funções polinomiais das curvas de tensões

Carga(kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
2	0.006*x^3 - 0.100*x^2 + 0.478*x - 1.136	-0,530	-3,16	5,96
4	0.005*x^3 - 0.092*x^2 + 0.458*x - 1.885	-1,293	-7,93	6,13
6	0.008*x^3 - 0.142*x^2 + 0.733*x - 2.820	-1,855	-10,63	5,73
8	0.013*x^3 - 0.212*x^2 + 1.065*x - 3.983	-2,594	-14,30	5,51
10	0.009*x^3 - 0.166*x^2 + 0.954*x - 4.935	-3,616	-19,70	5,45
12	0.009*x^3 - 0.177*x^2 + 1.079*x - 6.054	-4,529	-24,51	5,41
14	0.007*x^3 - 0.161*x^2 + 1.054*x - 6.803	-5,278	-29,11	5,51
16	-0.002*x^3 - 0.026*x^2 + 0.597*x - 8.704	-7,636	-40,72	5,33
18	-0.005*x^3 + 0.012*x^2 + 0.492*x - 9.509	-8,521	-45,38	5,33
20	-0.012*x^3 + 0.081*x^2 + 0.334*x - 10.88	-9,984	-53,89	5,40
22	-0.015*x^3 + 0.114*x^2 + 0.275*x - 11.78	-10,899	-58,58	5,37
24	-0.012*x^3 + 0.060*x^2 + 0.623*x - 13.70	-12,311	-65,67	5,33
26	-0.014*x^3 + 0.080*x^2 + 0.601*x - 14.69	-13,279	-70,95	5,34
28	-0.022*x^3 + 0.197*x^2 + 0.346*x - 19.42	-18,127	-95,48	5,27
30	-0.020*x^3 + 0.127*x^2 + 0.874*x - 22.36	-20,269	-107,00	5,28
32	-0.055*x^3 + 0.603*x^2 - 0.914*x - 22.18	-22,039	-115,30	5,23
34	-0.059*x^3 + 0.633*x^2 - 0.875*x - 23.45	-23,153	-120,79	5,22
36	-0.052*x^3 + 0.478*x^2 + 0.258*x - 27.89	-25,884	-132,34	5,11
38	-0.054*x^3 + 0.498*x^2 + 0.299*x - 29.41	-27,264	-138,91	5,09
40	-0.062*x^3 + 0.586*x^2 + 0.083*x - 30.65	-28,637	-146,20	5,11
42	-0.068*x^3 + 0.559*x^2 + 0.968*x - 36.63	-33,013	-166,19	5,03
44	-0.063*x^3 + 0.490*x^2 + 1.274*x - 37.91	-33,913	-171,18	5,05
46	-0.068*x^3 + 0.527*x^2 + 1.422*x - 40.39	-35,987	-180,50	5,02
48	-0.074*x^3 + 0.508*x^2 + 2.112*x - 44.78	-39,116	-195,46	5,00
50	-0.080*x^3 + 0.423*x^2 + 3.454*x - 52.60	-44,647	-151,41	4,39
52	-0.091*x^3 + 0.528*x^2 + 3.285*x - 54.84	-46,889	-234,61	5,00
54	-0.110*x^3 + 0.717*x^2 + 2.929*x - 59.06	-51,228	-258,23	5,04

Tendo como base as larguras efetivas experimentais $b_{f,exp}$ resumidas na tabela anterior, foi elaborada a figura abaixo (Figura 230), relacionando essas larguras experimentais às suas respectivas cargas.

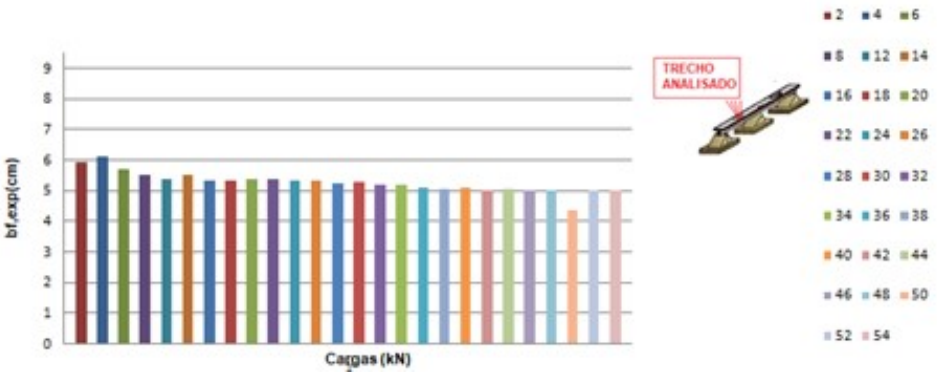


Figura 230 - Detalhes de tensões para as cargas em S-9 a S-12

Com o objetivo de possibilitar comparações entre as configurações das curvas de tensões em cada tramo da viga, bem como na região de momentos negativos, foi elaborada a Figura 231.

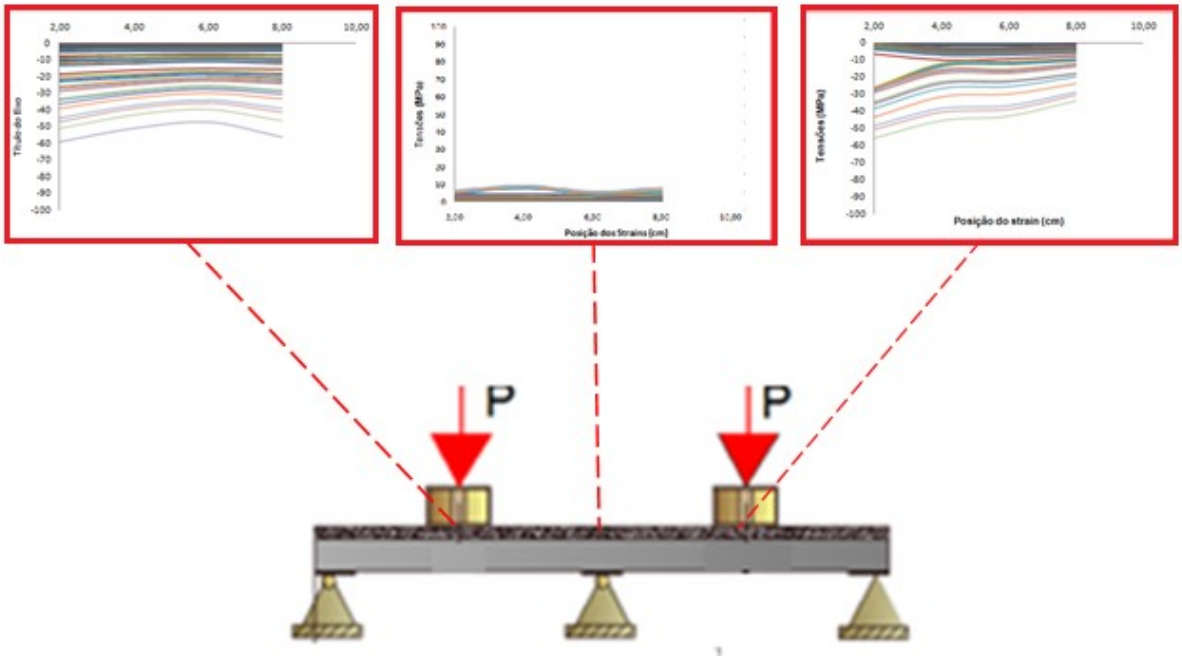


Figura 231 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-2

3.3.9 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-3

A viga MIII-V-3 foi carregada pontualmente nos terços da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos próximos as regiões de aplicação de cargas.

Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, tendo sidos esses pontos selecionados com base na literatura já apresentada no item de revisão bibliográfica dessa tese.

A codificação de números de strains é apresentada para a figura abaixo(Figura 232).

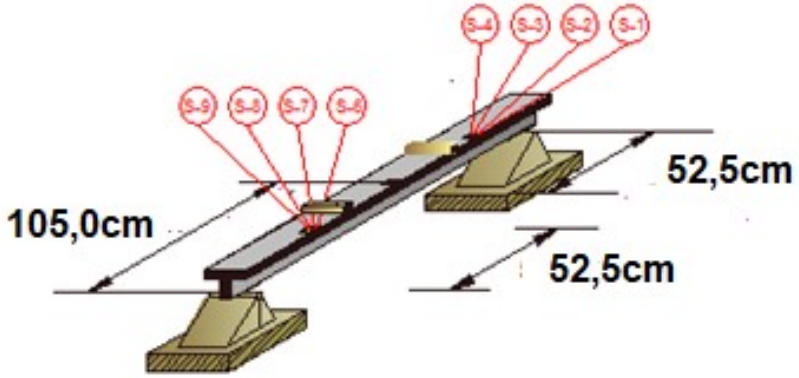


Figura 232 – Detalhe da extensometria

A posição dos extensômetros S-4 a S-1 é resumida na tabela abaixo (Tabela 42), estando esses strains localizados em x=0,25L.

Tabela 42 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
4,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
6,00	Deformações S-2	Tensões σ-2
8,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas. Essas tensões são calculadas para um valor de carga de 28,86 kN, quando a viga sofreu ruptura, conforme mostrado no capítulo anterior. Essas tensões encontram-se resumidas na tabela D18, nos anexos desse texto.

Tendo como base os valores de tensões calculados para cada strain da viga, foram traçadas as curvas de tensões, que encontram-se apresentadas na Figura 233.

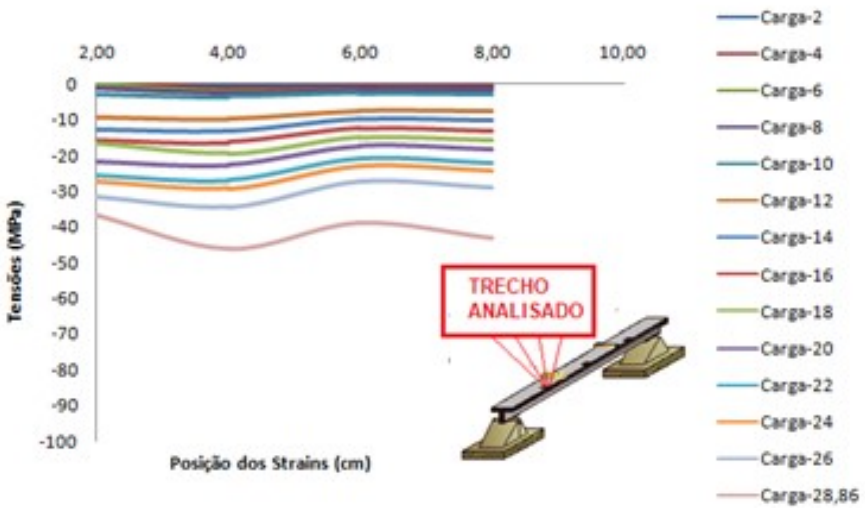


Figura 233 - Curvas de tensões para as cargas de S-1 a S-4

Com a finalidade de permitir uma melhor visualização das particularidades das curvas de tensões, o gráfico anterior teve sua escala vertical alterada, sendo reapresentado com algumas áreas assinaladas na figura a seguir (Figura 234).

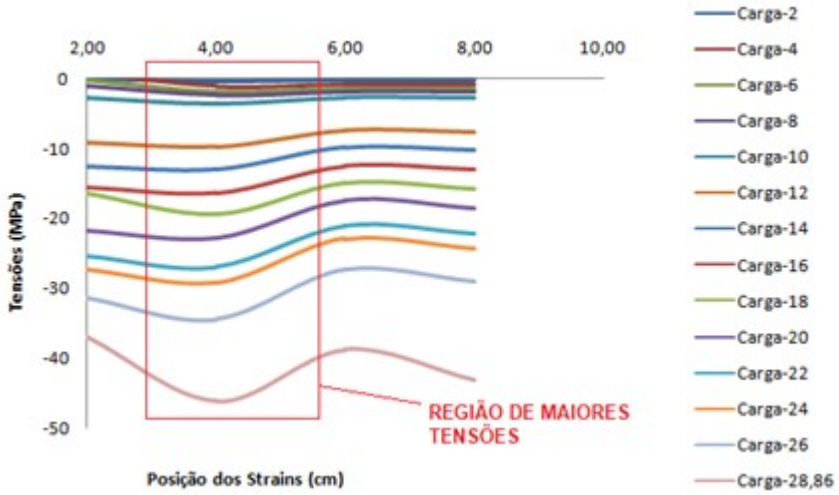


Figura 234- Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-1 a S-4

Na figura anterior é possível constatar-se que os maiores valores de tensões encontram-se na região do strain gage S-3, localizado a 4,0cm da alma da viga. É interessante ressaltar que esses tensões possuem um valor de aproximadamente 2,0MPa acima da tensão registrada no strain mais próximo da alma (strain S-4).

Nessa figura é possível notar que as curvas de tensões comportam-se de maneira quase constante até cargas próximas a 8,0 kN, quando devido ao aumento da fissuração da viga, e por consequência, diminuição da rigidez à flexão as curvas de tensões passam a ter inflexão na região do strain gage S-3.

A partir das curvas foram obtidas as funções polinomiais apresentadas na Tabela 43.

Tabela 43 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp*(cm)
2	-0.011*x^3 + 0.194*x^2 - 0.990*x + 1.277	-0,326	-0,67	2,04
4	-0.055*x^3 + 0.964*x^2 - 5.277*x + 8.119	-1,115	-3,74	3,36
6	-0.054*x^3 + 0.933*x^2 - 4.953*x + 6.477	-1,912	-8,06	4,22
8	-0.050*x^3 + 0.842*x^2 - 4.301*x + 4.618	-2,348	-10,87	4,63
10	-0.052*x^3 + 0.826*x^2 - 3.852*x + 1.966	-3,575	-18,04	5,05
12	-0.112*x^3 + 1.702*x^2 - 7.330*x - 0.521	-9,793	-51,33	5,24
14	-0.145*x^3 + 2.184*x^2 - 9.220*x - 1.792	-13,023	-68,34	5,25
16	-0.188*x^3 + 2.835*x^2 - 12.11*x - 1.263	-16,387	-86,36	5,27
18	-0.267*x^3 + 4.146*x^2 - 18.91*x + 6.935	-19,457	-101,50	5,22
20	-0.268*x^3 + 4.037*x^2 - 17.25*x - 1.174	-22,809	-119,69	5,25
22	-0.306*x^3 + 4.619*x^2 - 19.94*x - 1.542	-27,001	-143,58	5,32
24	-0.331*x^3 + 5.009*x^2 - 21.74*x - 1.219	-29,274	-155,62	5,32
26	-0.398*x^3 + 6.063*x^2 - 26.73*x + 0.941	-34,509	-183,63	5,32
28,86	-0.594*x^3 + 9.222*x^2 - 43.38*x + 17.75	-46,228	-251,48	5,44

Com base nas larguras efetivas experimentais $b_{f,exp}$ resumidas na tabela anterior, foi elaborada a figura abaixo (Figura235), relacionando essas larguras experimentais às suas respectivas cargas.

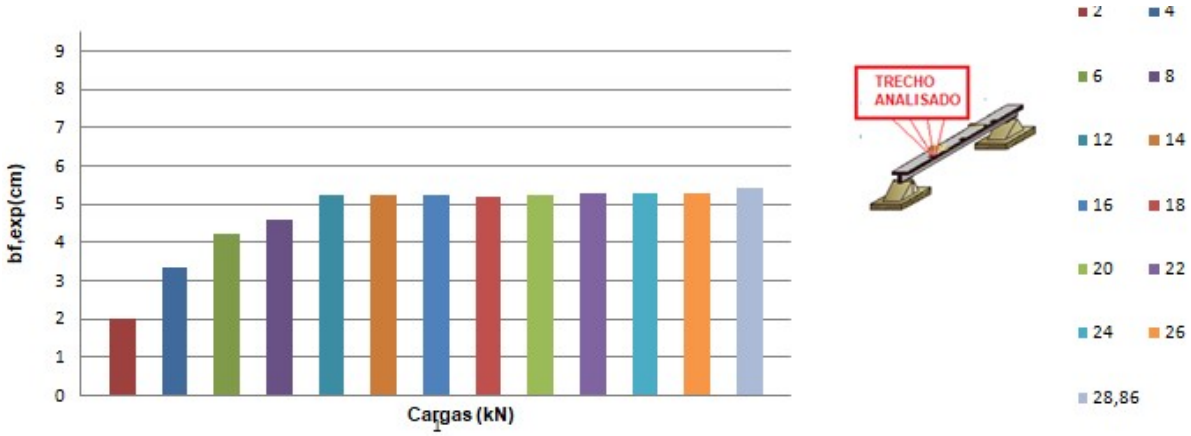


Figura235 - Detalhes de tensões para as cargas em S-1 a S-4

Na tabela anterior é possível notar que os valores da largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$) obtidos através de integração das curvas de tensões possuem

um menor valor (2,0 cm) apenas para a carga de 2,0 kN, variando para boa parte das cargas em valores próximos a 5,0cm.

Analisando o trecho da viga correspondente a x=0,50L foram instalados os strain gages com numeração de S-9 a S-6. Os detalhes da posição desses strains são apresentados na tabela abaixo (Tabela 44).

Tabela 44 - Posição na mesa dos extensômetros S-9 a S-6

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-9	Tensões σ-9
4,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
6,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
8,00	Deformações S-6	Tensões σ-6
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As tensões verificadas nos strain gages com numeração de S-9 a S-6 foram resumidas no anexo D19, para valores de cargas até 28,86kN, quando a viga sofreu ruptura, conforme apresentado em capítulo precedente desse texto.

A partir das tensões resumidas na tabela D19, foram elaboradas as curvas de tensões, apresentadas a seguir. Cada curva apresentada é calculada para um respectivo valor de carga aplicada. Essas curvas de tensões são mostradas na Figura236.

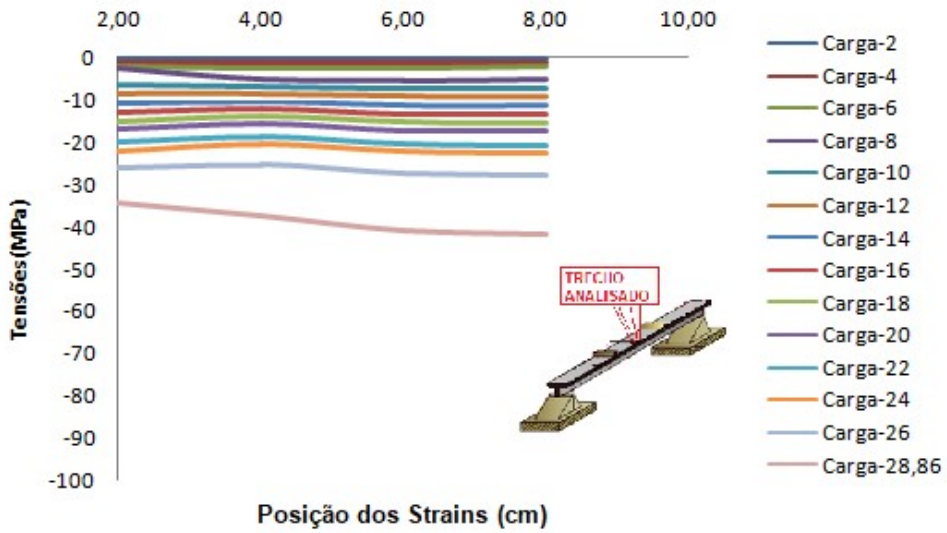


Figura236 - Curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-6

Objetivando uma melhor visualização do comportamento e dos pontos de valores máximos das curvas de tensões foi elaborada a figura a seguir (Figura237), onde a região em que ocorrem os valores máximos de tensões dos strains S-9 a S-6 encontra-se assinalada.

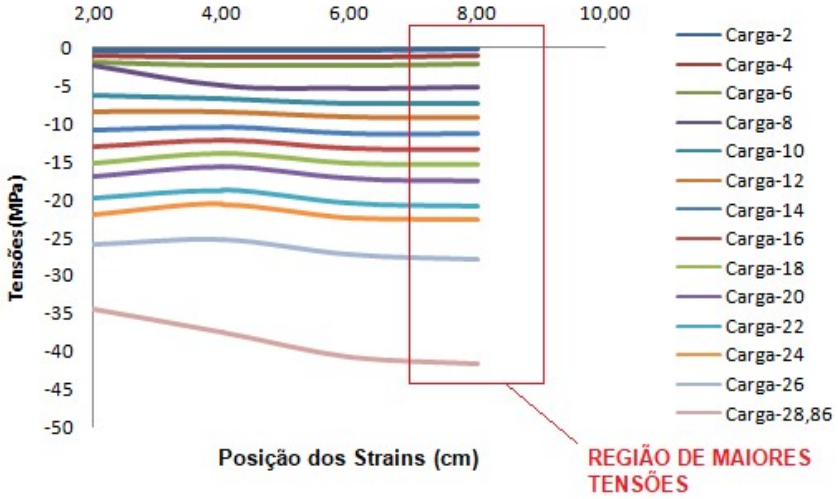


Figura237 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-9 a S-6

Na figura anterior é possível constatar-se que os maiores valores de tensões encontram-se na região do strain S-6, localizado na extremidade da mesa da viga. No entanto, a diferença entre esses valores de tensões (na extremidade) e os demais não ultrapassa o valor de 2,0 MPa, estando a distribuição das tensões quase linear.

A partir das curvas das tensões foram verificados os polinômios das regressões que representavam essas curvas, para que com base neles fossem resolvidas as integrais definidas e encontradas as áreas sob as curvas de tensões. Essas funções polinomiais são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 45).

Tabela 45 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-9 a S-6

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	$bf_{,exp}$ (cm)
2	0.000*x^3 - 0.007*x^2 + 0.017*x - 0.362	-0,33	-2,84	8,59
4	-0.000*x^3 + 0.023*x^2 - 0.187*x - 0.809	-1,20	-6,60	5,46
6	-0.007*x^3 + 0.145*x^2 - 0.909*x - 0.564	-2,34	-13,43	5,74
8	-0.042*x^3 + 0.817*x^2 - 5.049*x + 4.798	-5,29	-28,27	5,33
10	0.012*x^3 - 0.153*x^2 + 0.295*x - 6.274	-7,34	-42,26	5,75
12	0.028*x^3 - 0.422*x^2 + 1.735*x - 10.41	-9,13	-52,75	5,77
14	0.048*x^3 - 0.753*x^2 + 3.431*x - 15.18	-11,32	-65,69	5,80
16	0.066*x^3 - 1.067*x^2 + 5.037*x - 19.42	-13,34	-77,35	5,80
18	0.078*x^3 - 1.281*x^2 + 6.167*x - 23.08	-15,34	-89,12	5,81
20	0.088*x^3 - 1.426*x^2 + 6.770*x - 25.55	-17,45	-100,01	5,73
22	0.085*x^3 - 1.362*x^2 + 6.294*x - 27.61	-20,78	-118,96	5,73
24	0.093*x^3 - 1.497*x^2 + 7.040*x - 30.74	-22,65	-129,88	5,73
26	0.081*x^3 - 1.299*x^2 + 5.833*x - 33.05	-27,86	-158,92	5,70
28,86	0.056*x^3 - 0.732*x^2 + 1.367*x - 34.73	-41,71	-233,23	5,59

Utilizando as larguras efetivas experimentais $b_{f,exp}$resumidas na tabela anterior, foi elaborada a Figura 238, relacionando essas larguras experimentais às cargas aplicadas.

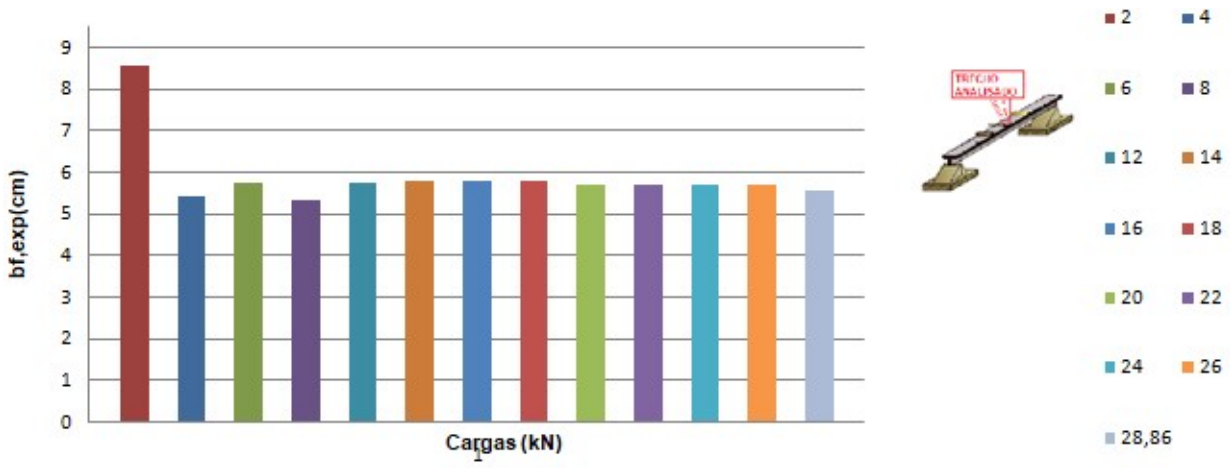


Figura 238 - Detalhes de tensões para as cargas em S-6 a S-9

A partir da tabela anterior é possível verificar que os valores da largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$), para o trecho da viga localizado em x= 0,50L, permanecem variando entre 5,3cm e 5,8cm. O único valor divergente desse intervalo é o resultante da integração da curva para uma carga aplicada de 2,0kN. Provavelmente, tal fato se deve a alguma inadequação no método de resolução por

integração, para valores iniciais de carga, quando as tensões verificadas nos strains ainda são muito próximas de zero.

Com o objetivo de um comparativo entre as tensões apresentadas ao longo da mesa da viga, nas posições x=0,25L e x=0,50L, foi elaborada a figura a seguir (Figura 239).

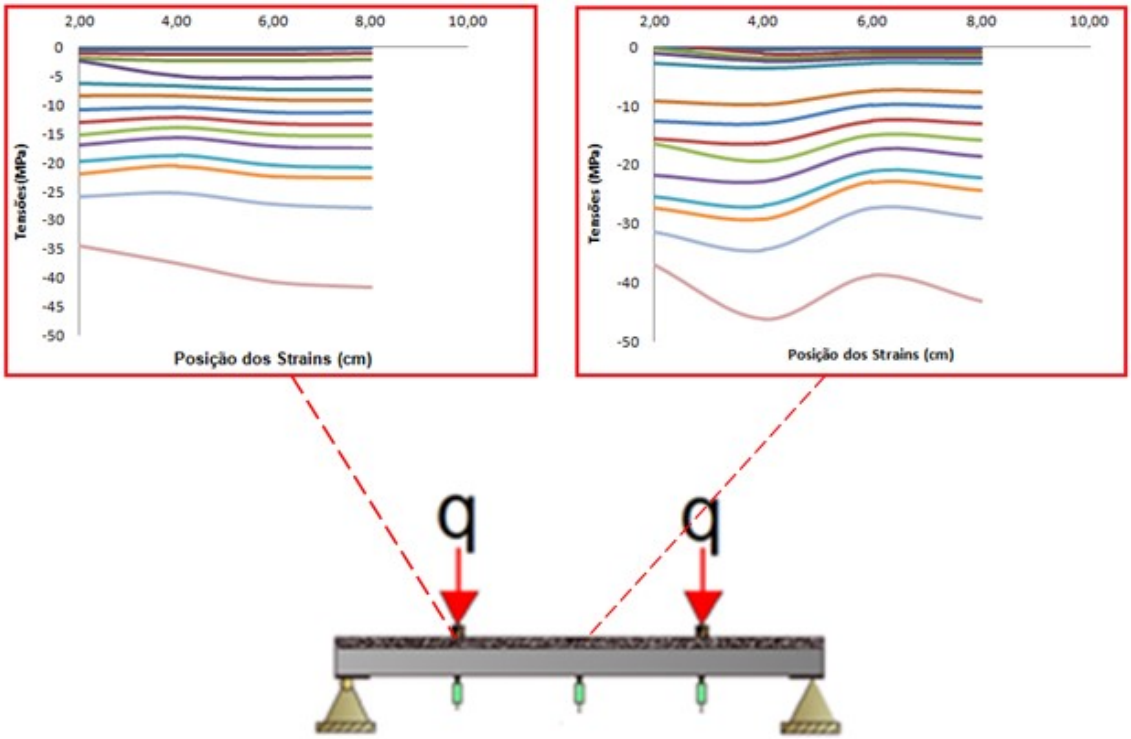


Figura 239 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-3

3.3.10 Análise das tensões e Largura efetiva da Viga MIII-V-4

A viga MIII-V-4 teve carregamento uniformemente distribuído aplicado naao longo da alma da viga, sendo a instrumentação localizada em pontos idênticos aos definidos em vigas anteriores. Essa instrumentação era posicionada ao longo do vão da viga em pontos que representam 0,25L, 0,50L e 0,75L, conforme detalhado na figura a seguir.

A codificação de números de strains é apresentada para a figura abaixo (Figura240).

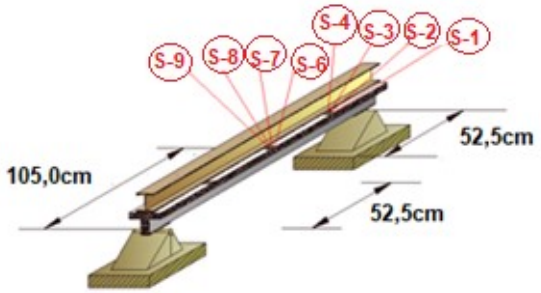


Figura240 – Detalhe da extensometria

A posição dos extensômetros S-4 a S-1 é resumida na tabela abaixo (Tabela 46), estando esses strains localizados em x=0,25L.

Tabela 46 - Posição dos extensômetros S-4, S-3, S-2 e S-1 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-4	Tensões σ-4
4,00	Deformações S-3	Tensões σ-3
6,00	Deformações S-2	**Sem Leituras**
8,00	Deformações S-1	Tensões σ-1
Localização dos pontos na viga: 0,25L= 52,5cm		

As tensões determinadas a partir das deformações de cada extensômetro foram calculadas até um valor de carga de 58,10 kN, quando a viga sofreu ruptura.. Essas tensões encontram-se resumidas na tabela D20, no anexo D desse texto.

Conforme foi apresentado na tabela anterior, o extensômetro S-2 que estava localizado afastado 6,0cm da mesa apresentou problemas logo após o inicio do ensaio, consequentemente não efetuando leituras. Mesmo assim, foi possível obter e calcular as tensões para os demais strains Utilizando os valores de tensões calculados e apresentados na tabela anterior, foram elaboradas as curvas de tensões para cada carregamento, sendo apresentadas na Figura241.

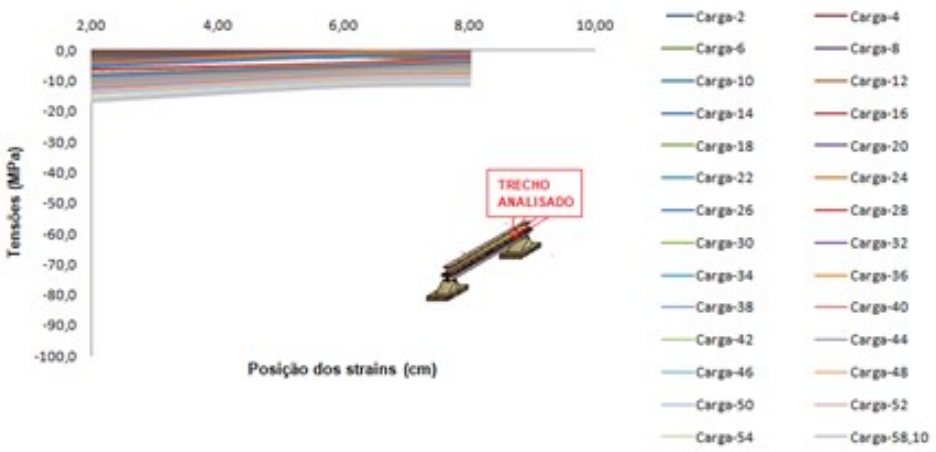


Figura241 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-4 a S-1

Para possibilitar uma melhor visualização dos pontos de tensões máximas, foi elaborada a figura a seguir (Figura242)cujo valor máximo do eixo vertical foi reduzido, destacando as inflexões sofridas por cada curva.

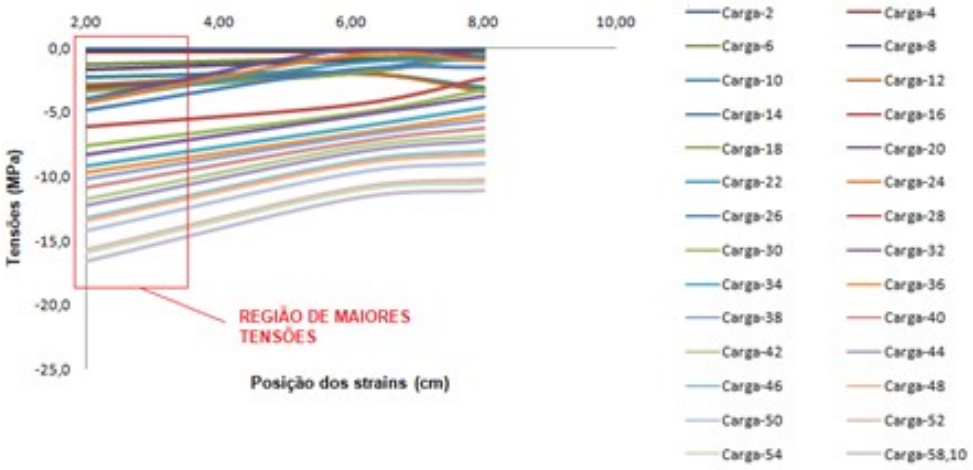


Figura242 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-4 a S-1

Os maiores valores de tensões foram registrados, conforme mostrado na figura anterior, na região do strain gage S-4 que estava localizado a 2,0 cm da alma da viga. Nesse strain foram registrados valores de tensões em média 4,0 MPa superiores aos demais strains.

A observação do ponto de máxima, apresentado nessa figura, tem como finalidade mostrar a distinção da distribuição de tensões para regiões e carregamentos diferentes nas vigas estudadas.

Utilizando o recurso de regressão do software Excel [22] foram determinados os polinômios que representavam o traçado de cada curva, sendo essas funções polinomiais resumidas na tabela a seguir. Para a conformação de tensões nesse

trecho da viga os polinômios com melhor aproximação (R^2=1) foram os de segundo grau.

Na tabela a seguir (Tabela 47) é possível verificar que os valores de largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$) encontrados através da integração das funções polinomiais estiveram (na média) próximos de 4,24cm, o que constitui uma mobilização de aproximadamente 44% da largura real da aba da mesa que era de 9,5cm.

Tabela 47 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σ_{max} (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
2	0.011*x^2 - 0.111*x + 0.115	-0,15	-0,8	5,11
4	0.009*x^2 - 0.083*x - 0.234	-0,38	-2,4	6,17
6	-0.002*x^2 + 0.133*x - 1.502	-1,24	-5,4	4,31
8	-0.009*x^2 + 0.239*x - 2.085	-1,64	-6,9	4,17
10	-0.110*x^2 + 0.972*x - 3.795	-3,07	-12	3,94
12	-0.157*x^2 + 1.491*x - 5.206	-3,33	-13	3,86
14	0.073*x^2 - 0.281*x - 2.734	-3,00	-13	4,18
16	0.077*x^2 - 0.313*x - 2.830	-3,15	-13	4,27
18	0.062*x^2 - 0.155*x - 3.239	-3,30	-14	4,14
20	-0.157*x^2 + 1.491*x - 5.206	-3,91	-13	3,29
22	-0.095*x^2 + 1.492*x - 6.653	-4,05	-11	2,74
24	-0.191*x^2 + 2.465*x - 8.433	-4,27	-8,7	2,05
26	-0.114*x^2 + 1.700*x - 7.779	-4,83	-15	3,07
28	0.102*x^2 - 0.381*x - 5.789	-6,14	-29	4,72

Tabela 48 (continuação) - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-4 a S-1

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σ_{max}(MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
30	0.053*x^2 + 0.194*x - 8.238	-7,637	-34,7	4,54
32	0.008*x^2 + 0.665*x - 9.634	-8,267	-36,51	4,42
34	0.005*x^2 + 0.702*x - 10.56	-9,135	-41,46	4,54
36	-0.002*x^2 + 0.775*x - 11.24	-9,705	-44,53	4,59
38	-0.002*x^2 + 0.775*x - 11.24	-10,11	-44,53	4,4
40	-0.027*x^2 + 1.027*x - 12.06	-10,89	-46,09	4,23
42	-0.055*x^2 + 1.330*x - 13.33	-11,7	-49,32	4,22
44	-0.082*x^2 + 1.635*x - 14.63	-12,27	-52,51	4,28
46	-0.109*x^2 + 1.955*x - 16.66	-13,19	-59,62	4,52
48	-0.109*x^2 + 1.962*x - 16.93	-13,45	-61,03	4,54
50	-0.123*x^2 + 2.116*x - 17.99	-14,25	-65,12	4,57
52	-0.123*x^2 + 2.116*x - 17.99	-15,65	-65,12	4,16
54	-0.136*x^2 + 2.277*x - 19.66	-15,88	-72,5	4,56
56	-0.144*x^2 + 2.343*x - 19.99	-16,14	-73,84	4,57
58,1	-0.144*x^2 + 2.361*x - 20.69	-16,55	-77,5	4,68

Utilizando as larguras efetivas experimentais $b_{f,exp}$resumidas na tabela anterior, foi elaborada a figura abaixo (Figura243), relacionando essas larguras experimentais às cargas aplicadas.

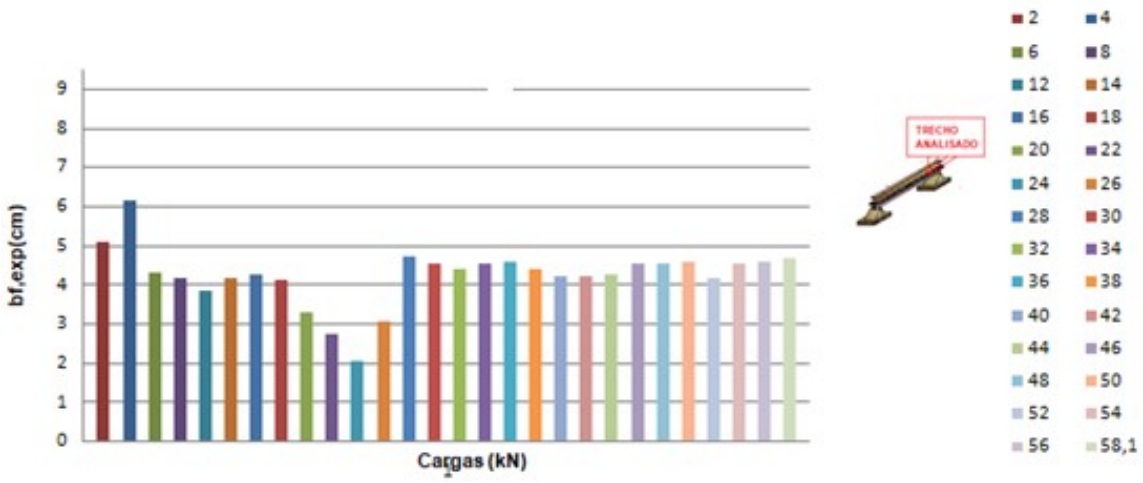


Figura243 - Detalhes de tensões para as cargas em S-1 a S-4

Um procedimento análogo ao utilizado nos pontos de instrumentação anteriores foi utilizado para os extensômetros localizados na região equivalente a 0,50L, ou seja, no centro do vão. Nesse trecho a posição dos strain gages S-8 a S-5 é resumida na tabela abaixo (Tabela).

Tabela 49 - Posição dos strain gages S-8, S-7, S-6 e S-5 na mesa da viga

Posição na mesa (cm)	Strain	Tensões Equivalentes
2,00	Deformações S-8	Tensões σ-8
4,00	Deformações S-7	Tensões σ-7
6,00	Deformações S-6	Tensões σ-6
8,00	Deformações S-5	Tensões σ-5
Localização dos pontos na viga: 0,50L= 105,0cm		

As tensões foram calculadas e resumidasna tabela D21, até uma carga de 58,10 kN quando a viga sofreu ruptura. Com base nos dados dessa tabela foram traçadas as curvas de tensões para os strains com numeração de S-8 a S-5, apresentadas na figura a seguir (Figura 245).

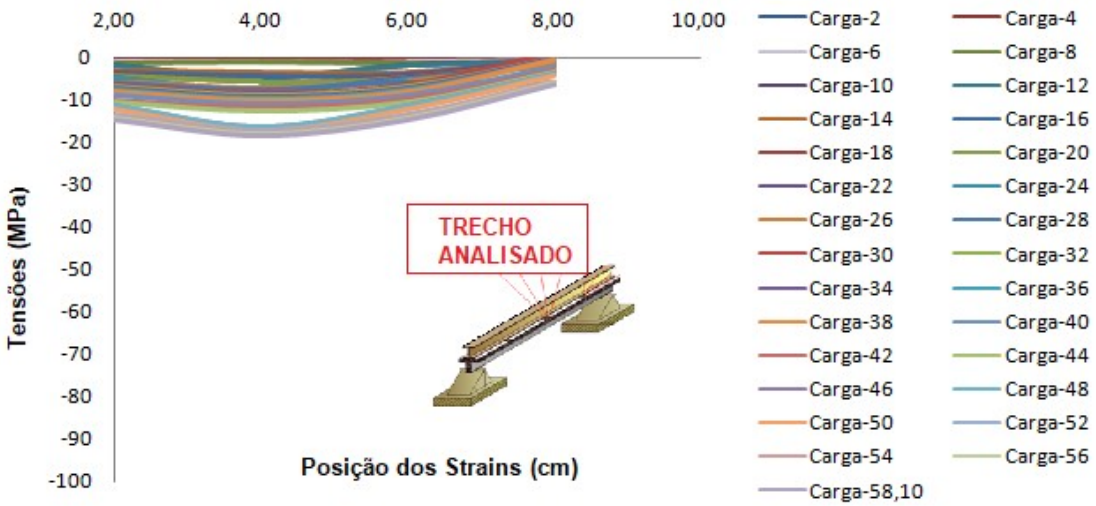


Figura244 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-8 a S-5

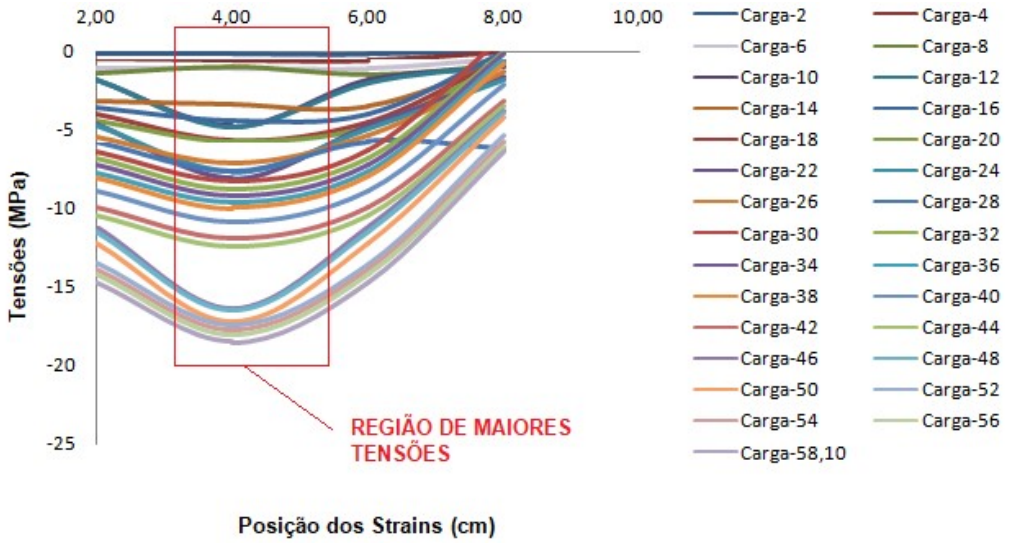


Figura 245 - Detalhes das curvas de tensões para as cargas de S-8 a S-5.

Os maiores valores de tensões foram registrados, conforme mostrado na figura anterior, na região do strain gage S-7 que estava localizado a 4,0cm da alma da viga. Nesse strain foram registrados valores de tensões em média 4,0MPa superiores aos demais strains.

Esse aspecto da curva de tensões está em conformidade com o apresentado por Smiderle *et al* [24], para vigas com cargas uniformemente distribuídas. Também apresenta conformidade com os estudos de Loo e Sutandi [12].

Na tabela a seguir (Tabela 49) é possível verificar que os valores de largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$) encontrados através da integração das funções polinomiais estiveram próximos de 4,52cm, o que constitui uma mobilização de aproximadamente 47% da largura real da aba da mesa que era de 9,5cm.

Nos dados apresentados na tabela a seguir, também é possível verificar que os maiores valores de largura efetiva apresentam-se justamente para os menores valores de carga. Tal fato se explica por certa inadequação das funções polinomiais para representar as curvas iniciais de tensão, cujos valores são quase constantes e próximos de zero.

Tabela 49 - Polinômios das curvas de tensões dos extensômetros S-5 a S-8

Carga (kN)	Sintaxe no MATLAB	σmax (MPa)	Area (cm^2)	*bf,exp* (cm)
2	0.005*x^3 - 0.065*x^2 + 0.246*x - 0.421	-0,16	-0,97	6,08
4	0.011*x^3 - 0.142*x^2 + 0.518*x - 1.051	-0,54	-3,40	6,28
6	0.014*x^3 - 0.185*x^2 + 0.698*x - 1.813	-1,09	-6,74	6,20
8	0.038*x^3 - 0.563*x^2 + 2.492*x - 4.436	-1,45	-7,68	5,30
10	-0.164*x^3 + 2.715*x^2 - 13.18*x + 15.04	-4,77	-16,32	3,42
12	-0.156*x^3 + 2.594*x^2 - 12.67*x + 14.36	-4,79	-17,27	3,60
14	0.061*x^3 - 0.732*x^2 + 2.554*x - 5.849	-3,39	-19,23	5,68
16	0.048*x^3 - 0.438*x^2 + 0.869*x - 3.992	-4,40	-22,51	5,12
18	-0.002*x^3 + 0.392*x^2 - 3.125*x + 0.678	-5,71	-25,87	4,53
20	0.019*x^3 + 0.037*x^2 - 1.434*x - 1.856	-5,72	-28,56	4,99
22	-0.128*x^3 + 2.016*x^2 - 9.415*x + 5.990	-8,10	-38,38	4,74
24	-0.107*x^3 + 1.999*x^2 - 10.43*x + 8.965	-7,69	-32,42	4,21
26	-0.023*x^3 + 0.713*x^2 - 4.469*x + 0.815	-7,14	-32,86	4,60
28	-0.146*x^3 + 2.608*x^2 - 13.32*x + 12.81	-7,65	33,52	-4,38
30	0.031*x^3 + 0.100*x^2 - 2.424*x - 2.198	-8,26	-37,49	4,54
32	0.012*x^3 + 0.361*x^2 - 3.497*x - 1.384	-8,82	-40,33	4,57
34	0.022*x^3 + 0.226*x^2 - 2.947*x - 2.463	-9,20	-42,78	4,65
36	0.023*x^3 + 0.217*x^2 - 2.921*x - 2.910	-9,63	-45,17	4,69
38	0.023*x^3 + 0.219*x^2 - 2.961*x - 3.151	-9,98	-47,48	4,76
40	0.013*x^3 + 0.338*x^2 - 3.418*x - 3.534	-10,90	-53,70	4,93
42	0.014*x^3 + 0.335*x^2 - 3.412*x - 4.579	-11,95	-59,27	4,96
44	0.017*x^3 + 0.306*x^2 - 3.327*x - 5.158	-12,48	-62,01	4,97
46	-0.167*x^3 + 3.294*x^2 - 17.64*x + 12.23	-16,35	-72,77	4,45
48	-0.159*x^3 + 3.180*x^2 - 17.13*x + 11.34	-16,52	-73,80	4,47
50	-0.145*x^3 + 2.990*x^2 - 16.38*x + 9.798	-17,20	-78,19	4,55
52	-0.070*x^3 + 1.812*x^2 - 10.85*x + 1.504	-17,41	-83,46	4,79
54	-0.066*x^3 + 1.751*x^2 - 10.55*x + 0.732	-17,73	-85,26	4,81
56	-0.068*x^3 + 1.774*x^2 - 10.66*x + 0.558	-18,07	-87,78	4,86
58,1	-0.064*x^3 + 1.727*x^2 - 10.48*x - 0.107	-18,54	-90,19	4,87

Com a largura efetiva experimental ($b_{f,exp}$) apresentada na tabela anterior, foi elaborada a Figura 246.

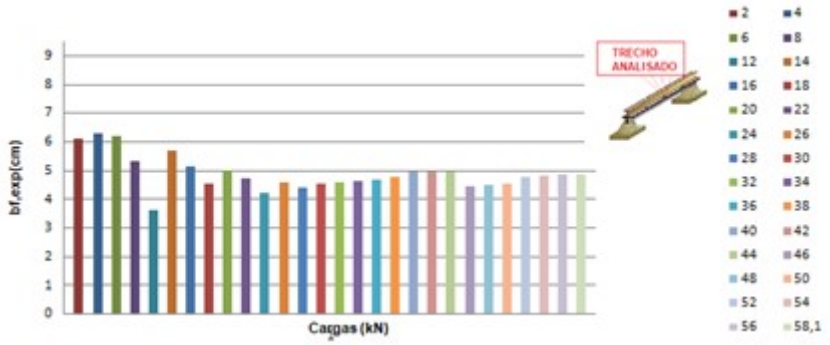


Figura 246 - Detalhes de tensões para as cargas em S-5 a S-8

Tanto na figura quanto na tabela anteriores, é possível notar que conforme ocorrido em outras vigas desse estudo as larguras efetivas apresentam um valor maior para as cargas iniciais, sendo esse fato provavelmente decorrente da inadequação do procedimento de integração para os primeiros carregamentos, cujas curvas de tensões encontram-se quase linearmente distribuídas.

Com o objetivo de possibilitar um melhor comparativo entre os comportamentos das curvas de tensões, para os trechos de viga em x= 0,25L e x = 0,50L, foi elaborada a figura abaixo (Figura 247).

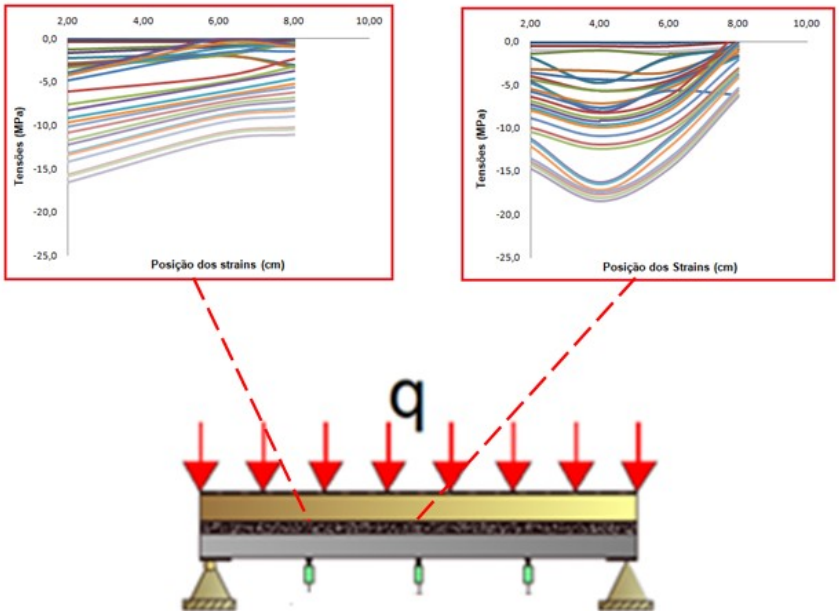


Figura 247 - Comparativos de tensões para as cargas na viga MIII-V-4

3.4. Obtenção da Largura Efetiva Através das Flechas

Um dos métodos de obtenção da largura efetiva apresentado por Pinto [25], e também por Küçükarslan [20], é através dos deslocamentos (flechas) que ocorrem para cada tipo de carregamento. Esse procedimento calcula a largura efetiva (b_{ef}) através do momento de inercia da seção transversal.

Nesse procedimento, para cada deslocamento sofrido pela viga é calculado o momento de inércia experimental, capaz de influenciar a rigidez flexional da viga. Apos a obtenção da inércia experimental ($I_{,exp}$) é calculada a respectiva largura efetiva da mesa ($b_{f,exp}$) através do Teorema de Steiner.

Para que seja possível estimar-se a largura efetiva da mesa da viga, inicialmente deverá ser determinada a posição da linha neutra da seção, para a qual serão determinadas as distâncias dos eixos paralelos, para aplicação da formulação de Steiner.

No caso de vigas de concreto, onde haverá a contribuição simultânea do concreto e da armadura, a altura da linha neutra pode ser calculada pela formulação proposta por Carvalho e Figueiredo [26], apresentada seguir (equação 17). Mas convém ressaltar que essa expressão só é valida para determinação da inércia no estádio I (viga não fissurada).

$$y_h = \frac{(b_f - b_w).\left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w.\left(\frac{h^2}{2}\right) + A_s.(\alpha - 1).d}{A_h} \tag{17}$$

Onde:

y_h – altura da linha neutra, considerando a contribuição das armaduras;

b_f – *largura da mesa da viga;*

b_w – largura da alma da viga;

h_f– espessura da mesa;

h – altura da alma;

A_s – área das armaduras de flexão;

α – coeficiente, que é dado pela razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto ($\alpha = E_s/E_c$);

d – altura útil da seção;

A_h – Área da seção homogeneizada, dada pela expressão a seguir (equação 18):

$$A_h = (b_f - b_w).h_f + (b_w.h) + A_s.(\alpha - 1) \tag{18}$$

Após ocorrer a fissuração, a determinação da altura da linha neutra passa a ter uma formulação um pouco mais complexa, sendo apresentada por Ghali *et al.*[27] e reproduzida por Sussekind [28] através do seguinte conjunto de equações:

$$a1.x^2 + a2.x + a3 = 0 \tag{19}$$

Onde:

x – é a posição da linha neutra, considerando-se a viga já fissurada, sendo dado pela solução de:

$$x = \frac{-a2 \pm \sqrt{a2^2 - 4.a1.a2}}{2.a1} \tag{20}$$

Onde:

$a_1 = bw/2$;

$$a_2 = h_f.(b_f - b_w) + (\alpha - 1).A'_s + (\alpha.A_s)$$
$$a_3 = d'.(\alpha - 1).A'_s - (d.\alpha.A_s) - \frac{h_f^2}{2}.(b_f - b_w) \tag{21}$$

Onde:

b_f – largura da mesa da viga;

b_w – largura da alma da viga;

h_f– espessura da mesa;

A_s – área das armaduras de flexão (banzo tracionado);

$A_{s'}$ – área das armaduras de flexão(banzo comprimido);

α – coeficiente, que é dado pela razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto (α = E_s/E_c);

d – altura útil da seção (da armadura inferior até a fibra mais comprimida);

d' – altura (da armadura superior até a fibra mais tracionada).

Para as vigas apresentadas nesse estudo, a posição x da linha neutra foi definida por semelhança de triângulos, conforme apresentado na Figura 248 e também, na expressão a seguir:

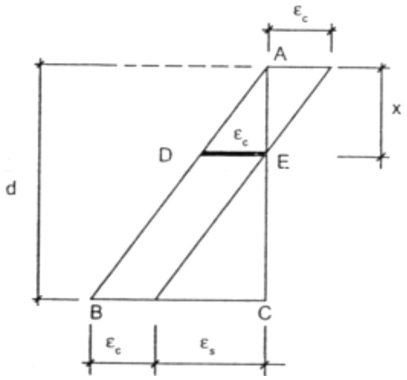


Figura 248 - Relação entre as deformações do aço e do concreto

De onde é possível obter-se as seguintes relações:

$$\frac{x}{\varepsilon_c} = \frac{d}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}.d \tag{22}$$

Onde:

ε_c – deformação específica (de compressão) no concreto;

ε_s – deformação específica (de tração) na armadura;

Uma vez determinada (experimentalmente) a posição das armaduras, era obtida a inércia experimental ($I_{exp.}$), através da aplicação dos valores da flecha experimental nas expressões do campo de deslocamentos das vigas. Por exemplo, para as vigas do modelo I, onde o campo de deslocamentos é dado por:

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \tag{23}$$

Reescreve-se a expressão, substituindo os termos teóricos pelos experimentais, obtendo-se:

$$I_{exp} = \frac{PL^3}{48E\delta_{exp}} \tag{24}$$

Onde:

I_{exp} – Momento de Inércia obtido experimentalmente;

P – carga concentrada aplicada na viga;

L – vão da viga;

δ_{exp} – deflexão (flecha) medida experimentalmente, no meio do vão.

Uma vez determinada a inércia experimental, a mesma era igualada a expressão do momento de inércia de uma seção T, considerando-se duas situações:

1. Na primeira etapa dos carregamentos, as vigas ainda não se encontravam fissuradas, logo se tem a expressão (equação 25) apresentada por Carvalho e Figueiredo [26]:

$$I_{exp} = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f.\left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w.h.\left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s.(\alpha - 1).(y_h - d)^2 \quad (25)$$

2. Na segunda etapa dos carregamentos, as vigas ainda não se encontravam fissuradas, logo se tem a expressão apresentada (equação 26) por Ghali *et al.*[27]:

$$I_{exp} = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.x^3}{12} + (b_f - b_w).\left(x - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha.A_s.(x - d)^2 + (\alpha - 1).A_s^{'}(d - x)^2 \quad (26)$$

Com o intuito de facilitar a rotina dos cálculos que serão apresentados em seguida, foram elaboradas duas rotinas computacionais, com o auxílio do software MAXIMA [29]. Essas duas rotinas computacionais levaram em conta as duas possibilidades já mencionas:

- Para a fase não fissurada da viga foi utilizada a rotina apresentada na figura a seguir (Figura 249):

```
kill(all)$
ratsimp(false)$

print("Equação para o Estádio 1:")$;
print(I_estadio1=((bf−bw)·hf^3)/12+(bw·h^3)/12+(bf−bw)·hf·(yh−hf/2)^2+bw·h(yh−h/2)^2+As·(α−1)·(yh−d)^2)$;
/·Inercia da seção no Estádio 1·/
I:1.8·10^5$ print("Inercia da seção Estádio 1: ",I,"cm^4")$;
/·Posição da linha neutra·/
yh:18.3$ print("Posição da linha neutra: ",yh,"cm")$;
/·Largura da alma·/
bw:12$ print("Largura da alma: ",bw,"cm")$;
/·Altura da mesa·/
hf:6$ print("Altura da mesa: ",hf,"cm")$;
/·Relação entre Es/Ec·/
α:6.43$ print("Relação entre Es/Ec: ",n,"adm")$;
/·Área de aço inferior·/
As:4.92$ print("Área de aço da armadura inferior: ",As,"cm²")$;
/·Área de aço na parte superior·/
Asb:1.0$ print("Área de aço da armadura superior: ",Asb,"cm²")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do As·/
d:46$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura superior: ",d,"cm")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do Asb·/
t:2$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura inferior: ",t,"cm")$;
/·Altura total da peça·/
h:48$ print("Altura total da peça: ",h,"cm")$;
print("")$;
parametros:ev(matrix([I,yh,bw,hf,α,As,Asb,d,t,h]));

subst(
  [
    I=parametros[1,1], yh=parametros[1,2],bw=parametros[1,3],hf=parametros[1,4],α=parametros[1,5],As=parametros[1,6],
    d=parametros[1,8],h=parametros[1,10]],
  ((bf−bw)·hf^3)/12+(bw·h^3)/12+(bf−bw)·hf·(yh−hf/2)^2+bw·h·(yh−(h)/2)^2+As·(α−1)·(yh−d)^2−I=0)$;
bf:rhs(float(solve(%,bf))[1]);

print("")$
print("Largura efetiva da mesa: ", bf,"cm")$;
```

Figura 249 – Rotina para o calculo de $b_{f,\ exp}$, para a viga no Estadio I

- Para a fase do carregamento onde a viga encontrava-se no estádio II, onde a inércia experimental passa a depender da posição x da linha neutra, definida experimentalmente, foi utilizada a rotina abaixo (Figura 250):

```
kill(all)$ratsimp:false$

print("Equação de Ghali, Frave e Sussekind:")$;
print(I=(bf·hf^3)/12+bf·hf·((x−hf/2)^2)+(bw·((x−hf)^3))/3+n·((As·(d−x)^2)+Asb·(x−t)^2))$;
/·Inercia da seção fissurada·/
I:516$ print("Inercia da seção fissurada : ",I,"cm^4")$;
/·Posição da linha neutra·/
x:4.5$ print("Posição da linha neutra: ",x,"cm")$;
/·Largura da alma·/
bw:7$ print("Largura da alma: ",bw,"cm")$;
/·Altura da mesa·/
hf:5$ print("Altura da mesa: ",hf,"cm")$;
/·Relação entre Es/Ec·/
n:6.43$ print("Relação entre Es/Ec: ",n,"adm")$;
/·Área de aço inferior·/
As:0.32$ print("Área de aço da armadura inferior: ",As,"cm²")$;
/·Área de aço na parte superior·/
Asb:0.32$ print("Área de aço da armadura superior: ",Asb,"cm²")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do As·/
d:15$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura superior: ",d,"cm")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do Asb·/
t:2$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura inferior: ",t,"cm")$;
print("")$;
parametros:ev(matrix([I,x,bw,hf,n,As,Asb,d,t]))$;

subst([I=parametros[1,1], x=parametros[1,2],bw=parametros[1,3],hf=parametros[1,4],n=parametros[1,5],As=parametros[1,6],Asb=parametros[1,7],d=parametros[1,8],t=
    (bf·hf^3)/12+bf·hf·((x−hf/2)^2)+(bw·((x−hf)^3))/3+n·((As·(d−x)^2)+Asb·(x−t)^2)=I);
bf:rhs(float(solve(%,bf))[1])$;
print("")$
print("Largura efetiva da mesa: ", bf,"cm")$;
```

Figura 250 – Rotina para o calculo de $b_{f,\,exp}$, para a viga no Estadio II

Utilizando as duas rotinas computacionais mostradas anteriormente foram calculadas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), com base nas flechas experimentais, conforme será mostrado nos itens a seguir.

3.4.1 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MI-V2

Para a viga MI-V1, cujo carregamento foi aplicado no centro do vão, foram calculadas as inércias experimentais I_{exp}, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{PL^3}{48E\delta_{exp}} \tag{27}$$

Onde:

I,exp – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 50).

Tabela 50 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MI-V1

Carga (kN)	Desloc. δexp.(cm)	Strain - 4 (0/00) – Concreto	Strain – 15 (0/00) - Aço	L.N, *exp. (x)*-cm	I,exp (cm^4)	*bf*total,exp (cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0	0	0	0,00	0	48,00	18,00
10,00	0,0066	0,0011	0,0029	12,65	9280,21	48,00	18,00
20,00	0,0129	0,0021	0,0058	11,23	9430,81	48,00	16,80
40,00	0,0260	0,0015	0,0068	8,31	9367,60	48,00	18,00
60,00	0,0395	0,0018	0,0071	9,30	9240,51	46,00	17,00
80,00	0,0631	0,0025	0,0082	10,75	7716,10	41,60	14,80
100,00	0,0882	0,0117	0,0253	14,55	6906,49	38,00	13,00
120,00	0,0993	0,0164	0,0327	15,36	6127,81	29,10	8,55
140,00	0,1645	0,0189	0,0461	13,38	5084,38	26,28	7,14
160,00	0,2134	0,0619	0,1133	16,26	4565,91	27,07	7,54
180,00	0,2678	0,1714	0,3616	14,79	4093,89	35,78	11,89
200,00	0,3080	0,1985	0,4830	13,40	3955,33	38,16	13,08

Tendo como base a tabela anterior, foi elaborado o gráfico (Figura 252) para mostrar a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 200kN, quando foram retirados os transdutores de deslocamento.

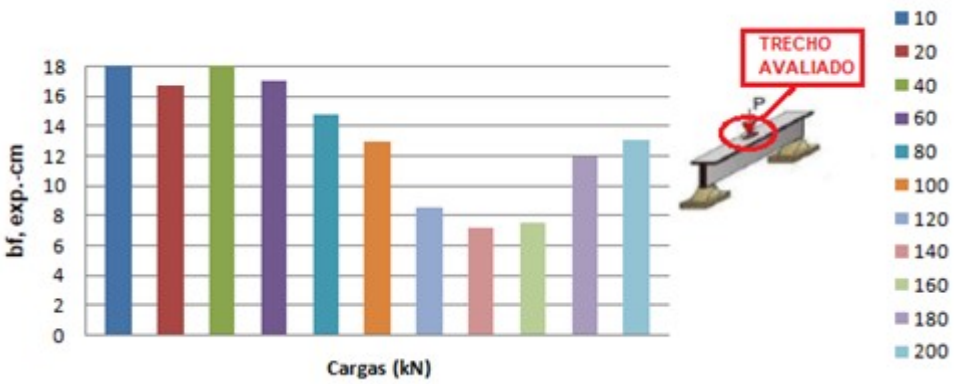


Figura 251 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MI-V2

Os resultados da largura efetiva obtidos para MI-V2 apresentaram uma grande oscilação, quando calculados através das flechas experimentais, quando comparado com os valores de $b_{f,exp}$ determinados pelo metodologia das flechas experimentais.

Convém ressaltar que a obtenção das larguras efetivas através das flechas experimentais envolve a determinação de uma inércia experimental que represente de maneira coerente o valor real da rigidez da viga em cada fase de carregamento. Por tratar-se de concreto armado, a rigidez é diretamente influenciada pelo estado de fissuração em que o banzo tracionado se encontre, podendo ou não contribuir de maneira mais efetiva no aumento do momento de inércia.

A medida que o concreto abaixo da linha neutra sofre fissuração, ele passa a contribuir cada vez menos mo momento de inércia da seção. No entanto, dependendo do estado de fissuração de uma determinada região da viga ainda haverá uma pequena influencia desse concreto, mesmo apresentado-se fraturado. O que termina distanciado os resultados de inércia experimental obtida dos valores teóricos.

Nos estudos que foram referenciados nesse texto observou-se que esses autores calcularam as larguras efetivas através das flechas para modelos numéricos. No entanto, para esse estudo foi feito o mesmo cálculo para modelos experimentais, o que envolve maior número de variáveis.

A determinação da inércia experimental demanda a observação, através do estado de fissuração bem como da posição experimental da linha neutra, para buscar uma melhor representação da inércia nos estádios I e II.

Para cada fase de fissuração buscou-se utilizar a expressão mais adequada, para obtenção de $b_{f,exp}$, através das flechas. Observando-se que para as primeiras fases de carregamento, os resultados apresentam maiores valores de $b_{f,exp}$, indicando uma possível colaboração de toda a largura, uma vez que para pequenos valores de carga, a contribuição das armaduras ainda não se faz totalmente efetiva, estando o concreto contribuindo integralmente no momento de inércia

Para possibilitar um comparativo entre os métodos de obtenção da largura efetiva pelos dois métodos propostos nessa pesquisa, foi elaborado o gráfico a seguir (figura 253). Nessa figura, são representados os valores da razão entre a

largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são plotadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

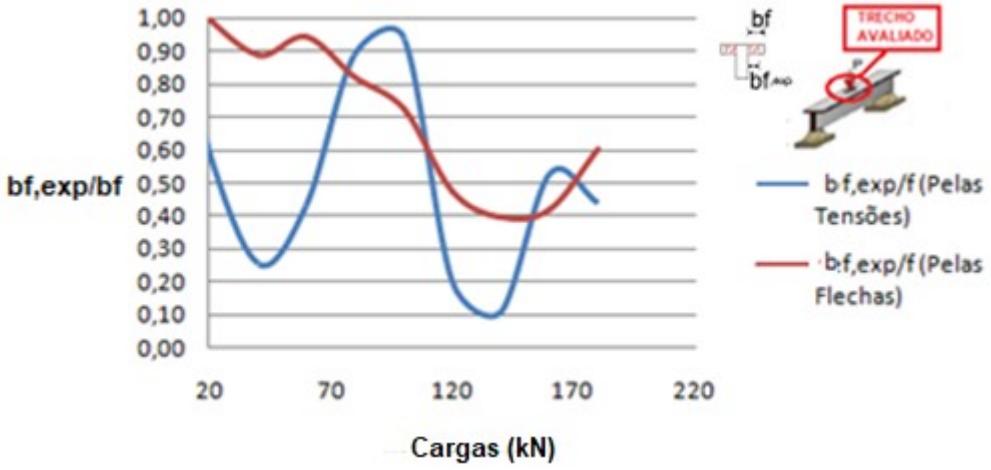


Figura 252 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MI-V2

Analisando a figura o comportamento das curvas é possível notar uma grande diferença entre as relações $b_{f,exp}./b_f$ para as duas metodologias de cálculo, sendo essa viga a que apresentou maiores dispersões, com relações variando entre 1,0 e 0,10.

A relação $b_{f,exp}./b_f$ determinada pelas tensões apresenta maiores valores no início do ensaio, diminuindo a medida que o carregamento aumenta. Embora em primeira vista pareça contraditório que maiores cargas mobilizem menores larguras, esses resultados corroboram com os estudos apresentados por diversos autores apresentados no capítulo de revisão bibliográfica.

Essa diminuição da largura efetiva para cargas concentradas é explicada pelo fato de, a medida que o carregamento aumenta passa a ocorrer maior concentração de tensões na região que circunda a chapa de aplicação de cargas, ficando essas tensões cada vez mais restritas a essa região e espraiando-se menos para o restante da alma.

3.4.2 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MI-V3

Para a viga MI-V3, cujo carregamento foi aplicado no centro do vão, foram calculadas as inércias experimentais Iexp, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{PL^3}{48E\delta_{exp}} \tag{28}$$

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais *($b_{f,exp}$)*, resumidas na tabela a seguir (Tabela 51).

Tabela 51 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MI-V3

Carga (kN)	Desloc. δExp. (cm)	Strain – 4 (0/00) - Concreto	Strain – 15 (0/00) - Aço	L.N, *exp.(x)* - cm	I,exp (cm^4)	*bf*total,exp (cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0	0	0	0,00	0	48,00	18,00
10,00	0,0066	0,0011	0,0029	12,65	9280,21	48,00	18,00
20,00	0,0129	0,0021	0,0058	12,23	9430,81	48,00	18,00
40,00	0,0260	0,0015	0,0068	8,31	9367,60	46,00	17,00
60,00	0,0395	0,0018	0,0071	9,30	9240,51	41,60	14,80
80,00	0,0631	0,0025	0,0082	10,75	7716,10	38,16	13,08
100,00	0,0882	0,0117	0,0253	14,55	6906,49	29,10	8,55
120,00	0,0993	0,0164	0,0327	15,36	6127,81	34,78	11,39
140,00	0,1645	0,0189	0,0461	13,38	5184,38	34,54	11,27
160,00	0,2134	0,0619	0,1133	13,26	4565,91	35,78	11,89
180,00	0,2678	0,1714	0,3616	14,79	4093,89	36,16	12,08
200,00	0,3080	0,1985	0,4830	13,40	3955,33	34,38	11,19

Com base a tabela precedente, foi elaborado o gráfico (Figura 253 e Figura 254) para mostrar a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 200kN, quando foram retirados os transdutores de deslocamento.

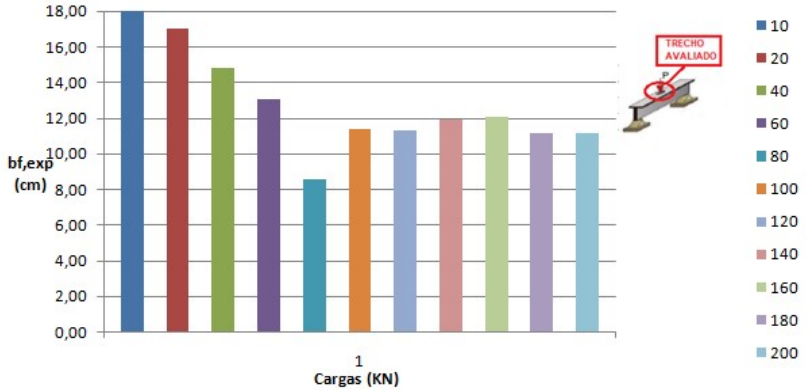


Figura 253 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MI-V3

Para um comparativo entre os métodos de obtenção da largura efetiva pelos dois procedimentos dessa pesquisa, foi elaborado o gráfico a seguir (figura 255). Nessa figura, são representados os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são plotadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

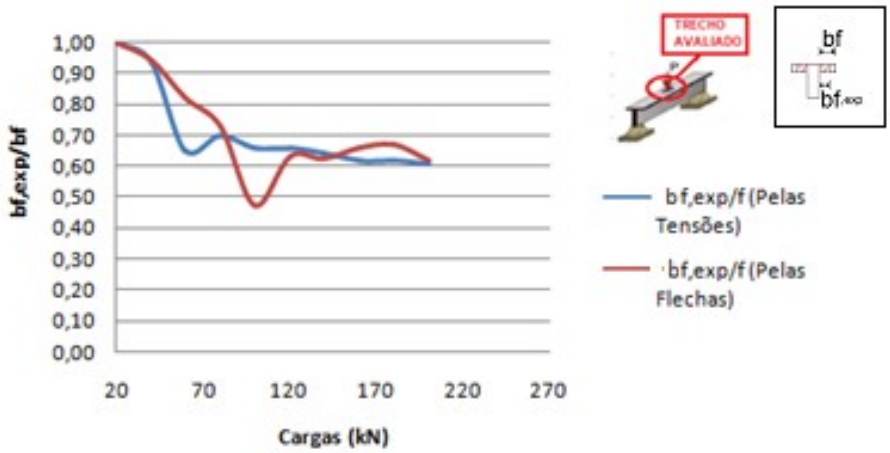


Figura 254 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MI-V3

Na figura 256 é possível notar que as relações $b_{f,exp}./b_f$ calculadas pelas tensões e pelas flechas apresentaram pequenas divergências, para cargas inferiores até 120KN. A partir desse valor os valores entre as duas curvas aproximam-se bastante, chegando a convergir.

Para intervalos de carga entre 120kN e 220kN, as larguras efetivas calculadas por ambos os métodos estiveram próximas a 60% da largura real da mesa (aproximadamente 10,8cm), sendo esse resultado cerca em torno de 10% maior que

o da viga anterior, considerando o método da determinação pela integração da curva de tensões.

Embora nas tabelas 24 e 26 as larguras efetivas tenham sido calculadas pelas tensões para valores de carga até 350kN, os cálculos para a largura efetiva através da flecha foram apresentados apenas para uma fase do ensaio em que ainda eram obtidos deslocamentos e deformações que permitiam a mensuração das flechas e a posição experimental da linha neutra. Para valores acima dessas cargas,uma parte desses dados parou de ser captada pelo equipamento de aquisição.

3.4.3 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V1

Para a viga MII-V1, cujo carregamento foi aplicado nos pontos x=0,25L e x=0,75L, foram calculadas as inércias experimentais I_{exp}, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{P.a}{24E\delta_{exp}}.\left(3.L^2 - 4.a^2\right) \tag{29}$$

Onde:

I, exp – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

a – é a distancia entre o apoio e ponto de aplicação da carga, nesse caso, *a*=50,0cm;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 52).

Tabela 52 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V1

Carga (kN)	Desloc. δexp (cm)	Strain – 7 (0/00) - Concreto	Strain-16 (0/00) - Aço	L.N, *exp.(x)*- cm	I,exp (cm^4)	*bf*total,exp (cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0,000	0	0	0	0	48,00	18,00
20,00	0,008	-0,0123	0,0122	23,09	258323,79	48,00	18,00
40,00	0,020	-0,0249	0,0247	23,09	181385,25	48,00	18,00
60,00	0,031	-0,0353	0,0233	27,71	169855,55	31,00	9,50
80,00	0,044	-0,0453	0,0394	24,60	157438,06	41,90	14,95
100,00	0,056	-0,0544	0,0534	23,21	158455,15	47,50	17,75
120,00	0,068	-0,0715	0,1098	18,14	153545,15	46,16	17,08
140,00	0,083	-0,0901	0,1381	18,16	156697,54	47,44	17,72
160,00	0,098	-0,1051	0,158	18,38	147618,86	47,20	17,60
180,00	0,118	-0,1222	0,1884	18,10	134311,25	43,39	15,70
200,00	0,136	-0,1387	0,2137	18,10	127641,65	40,40	14,20
220,00	0,151	-0,1535	0,2337	18,24	125691,20	39,53	13,77
240,00	0,167	-0,1671	0,2135	20,20	121076,90	37,45	12,73
260,00	0,197	-0,2142	0,2167	22,87	112184,63	30,91	9,46
280,00	0,216	-0,2314	0,2396	22,60	108787,68	30,32	9,16
300,00	0,236	-0,2368	0,2787	21,13	108227,93	26,40	7,20
320,00	0,258	-0,2458	0,2411	23,22	104992,25	24,99	6,50
340,00	0,275	-0,2536	0,2395	23,66	105193,11	24,80	6,40
360,00	0,292	-0,2588	0,2346	24,13	104548,20	23,24	5,62
380,00	0,314	-0,2654	0,2327	24,51	101527,61	20,92	4,46
400,00	0,337	-0,272	0,234	24,73	101527,26	20,89	4,45
420,00	0,370	-0,254	0,2368	23,81	98019,58	22,67	5,34
440,00	0,402	-0,2578	0,2451	23,58	94471,22	21,28	4,64
460,00	0,421	-0,262	0,2508	23,50	95186,93	21,50	4,75
480,00	0,454	-0,2631	0,2545	23,38	92664,82	20,57	4,29
500,00	0,475	-0,2615	0,2592	23,10	92752,50	21,56	4,78

Com base a tabela anterior, foi elaborado o gráfico (Figura 255 e Figura 256) plotando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais,

para os intervalos de carga até 500kN, quando foram retirados os transdutores de deslocamento.

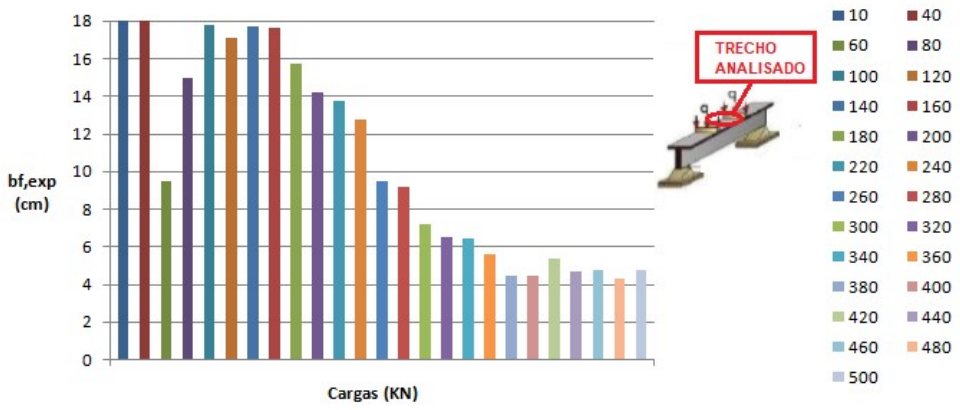


Figura 255 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V1

Para possibilitar um comparativo entre os métodos de obtenção da largura efetiva, foi elaborado o gráfico a seguir (figura 257). Nessa figura, são representados os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são plotadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

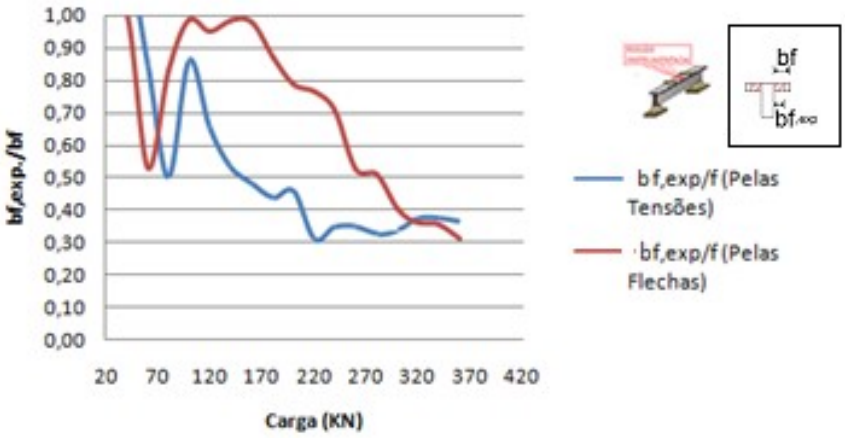


Figura 256 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V1

Na figura anterior é possível notar que os dois métodos de cálculo da largura efetiva apresentam um comportamento semelhante, mas com o método de determinação pelas flechas apresentando um desenvolvimento de resultados cerca de 20% maiores que pelo método das flechas.

Esses resultados foram calculados para a posição x=0,50L, ou seja, no meio do vão, onde para esse tipo de carregamento ocorre flexão pura. Pode-se notar que para esse tipo de carregamento a largura efetiva mobilizada é próxima dos 60% para cargas próximas a 70kN, aproximando-se do resultado das vigas anteriores.

Entretanto, a medida que o carregamento ultrapassa os 170kN a largura de mesa efetivamente mobilizada diminui, chegando apenas a 40% (aproximadamente 7,2cm).

3.4.4 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V2

Para a viga MII-V2, cujo carregamento foi aplicado distribuído ao longo da alma, foram calculadas as inércias experimentais I_{exp}, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{Q.L^2}{8E\delta_{exp}} \tag{30}$$

Onde:

$I_{,\ exp}$ – é a inercia experimental da viga;

Q – é a carga distribuída aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

A carga distribuída Q é obtida através da divisão da carga total aplicada pela prensa (concentrada sobre o meio do perfil), pelo comprimento total do perfil. Ressalta-se que esse perfil cobria exatamente todo o comprimento da viga, ou seja, o perfil possuía 200cm.

As deflexões experimentais foram obtidas através dos transdutores de deslocamentos, localizados nas posições mostradas na figura 96, que eram conectados ao equipamento de aquisição de dados.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 53).

Tabela 53 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V2

Carga (kN)	Desloc. δexp.(cm)	Strain – 11 (0/00) - Concreto	Strain-16 (0/00)- Aço	L.N, *exp. (x)*- cm	I,exp (cm^4)	*bf*total,exp (cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0,000	0,0000	0,0000	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00
20,00	0,008	-0,0068	0,0085	20,44	5617,45	48,00	18,00
40,00	0,020	-0,0148	0,0159	22,18	4548,71	46,06	17,03
60,00	0,030	-0,0216	0,0258	20,96	4320,74	47,26	17,63
80,00	0,041	-0,0296	0,0330	21,75	4022,72	45,37	16,69
100,00	0,053	-0,0394	0,0380	23,42	3893,55	44,62	16,31
120,00	0,068	-0,0519	0,0420	25,42	3602,75	38,09	13,05
140,00	0,085	-0,0633	0,0410	27,92	3342,46	34,67	11,34
160,00	0,102	-0,0758	0,0530	27,07	3155,33	35,56	11,78
180,00	0,125	-0,0931	0,0680	26,58	2861,51	34,38	11,19
200,00	0,141	-0,1036	0,0780	26,24	2803,09	34,27	11,14
220,00	0,168	-0,1098	0,0830	26,20	2559,33	34,34	11,17
230,38	0,179	-0,1127	0,0890	25,70	2494,11	34,47	11,24

Com os valores da tabela anterior foi elaborado o gráfico (Figura 257 e Figura 258) plotando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 230kN, quando ocorreu falha na leitura dos transdutores de deslocamento.

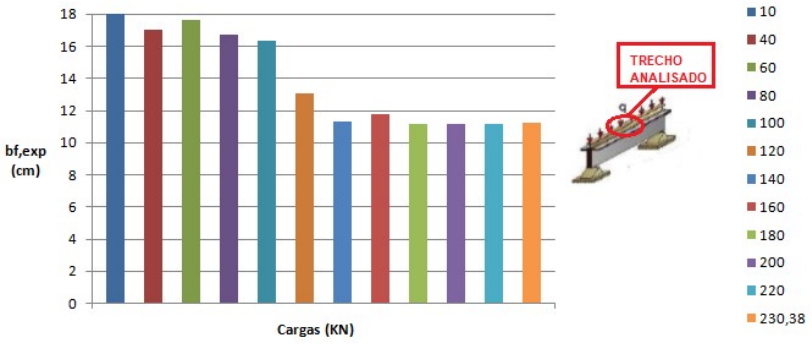


Figura 257 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V2

Para um comparativo entre os métodos de obtenção da largura efetiva, foi elaborado o gráfico a seguir (figura 259). Nessa figura, são representados os valores

da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são representadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

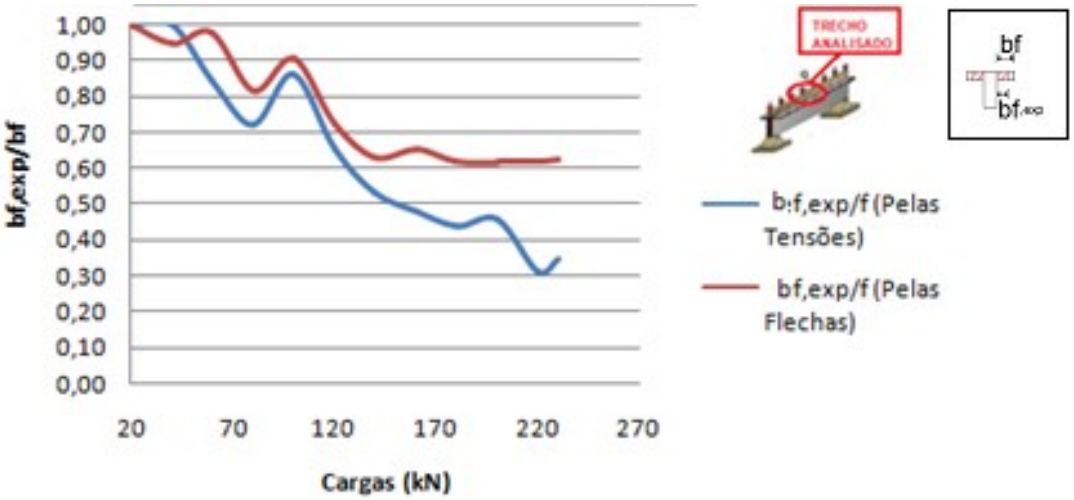


Figura 258 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V2

Para valores de carga acima de 170kN a viga apresentou na posição x=0,50L valores de largura efetiva próximos a 60% da largura real da aba (aproximadamente 10,8cm. No entanto, na posição x=0,25L, conforme apresentado na tabela 35, os valores aproximam-se de 66% (cerca de 13,0cm de largura efetiva mobilizada).

Para carga de 220kN a largura mobilizada calculada pelas flechas passa a diferir da calculada pelas tensões em cerca de 25%. Tal diferença possivelmente surge da diferença entre a inércia experimental e a que verdadeiramente colabora na inércia da viga.

Como já foi mencionado anteriormente, a inércia experimental que foi utilizada no cálculo da largura efetiva possui a característica de desprezar totalmente a contribuição do concreto fissurado no banzo tracionado da viga. No entanto, do ponto de vista prático é possível que uma parcela desse concreto continue contribuindo, ainda que reduzidamente com a inércia total da viga.

3.4.5 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MII-V3

Na viga MII-V3 o carregamento foi aplicado concentrado em dois pontos da alma da alma, tendo essa viga um apoio intermediário, as inércias experimentais I_{exp} foram determinadas a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{7.P.L^3}{78E\delta_{exp}} \tag{31}$$

Onde:

$I_{,exp}$ – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 54).

Tabela 54 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V3

Carga (kN)	Desloc. δexp. (cm)	Strain-7 (0/00) - Concreto	Strain-17 (0/00)- Aço	L.N, exp.(x)- cm	I,exp (cm^4)	bftotal,exp (cm)	bf,exp (aba) (cm)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	48,00	18,00
20,00	0,008	0,008	0,018	14,74	6043,55	39,40	13,70
40,00	0,017	0,017	0,036	15,02	6357,28	31,80	9,90
60,00	0,028	0,028	0,051	16,25	6369,82	63,26	25,63
80,00	0,040	0,040	0,058	18,78	6422,57	47,86	17,93
100,00	0,051	0,051	0,053	22,59	6747,84	39,86	13,93
120,00	0,063	0,063	0,059	23,75	6945,46	38,70	13,35
140,00	0,078	0,078	0,066	24,96	6804,76	38,24	13,12
160,00	0,089	0,089	0,084	23,61	6656,44	38,54	13,27
180,00	0,103	0,103	0,104	22,86	6135,07	39,48	13,74
200,00	0,110	0,110	0,110	23,00	5962,26	39,52	13,76
220,00	0,114	0,114	0,119	22,51	5846,71	40,08	14,04
240,00	0,123	0,123	0,132	22,13	5635,94	40,76	14,38
260,00	0,154	0,134	0,144	22,11	5005,38	41,34	14,67
280,00	0,164	0,144	0,166	21,40	4915,98	42,52	15,26
300,00	0,177	0,157	0,168	22,22	4741,73	41,42	14,71
320,00	0,192	0,172	0,167	23,33	4635,29	40,34	14,17
340,00	0,206	0,186	0,191	22,70	4440,74	41,08	14,54
360,00	0,220	0,200	0,205	22,72	4468,91	41,06	14,53
380,00	0,203	0,183	0,212	21,34	4345,70	43,24	15,62
400,00	0,217	0,197	0,219	21,79	4426,20	42,30	15,15

Com os valores da tabela anterior foi elaborado o gráfico (Figura 259 e Figura 260) plotando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 230kN, quando ocorreu falha na leitura dos transdutores de deslocamento.

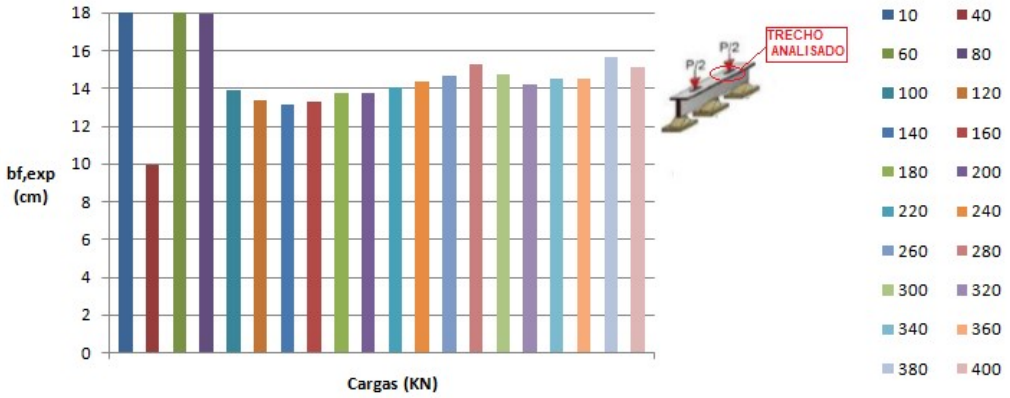


Figura 259 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MII-V3

Para possibilitar um comparativo entre os valores de largura efetiva, obtidos pelos dois métodos apresentados foi elaborado o gráfico a seguir (figura 261). Nessa figura, são representados os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são representadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

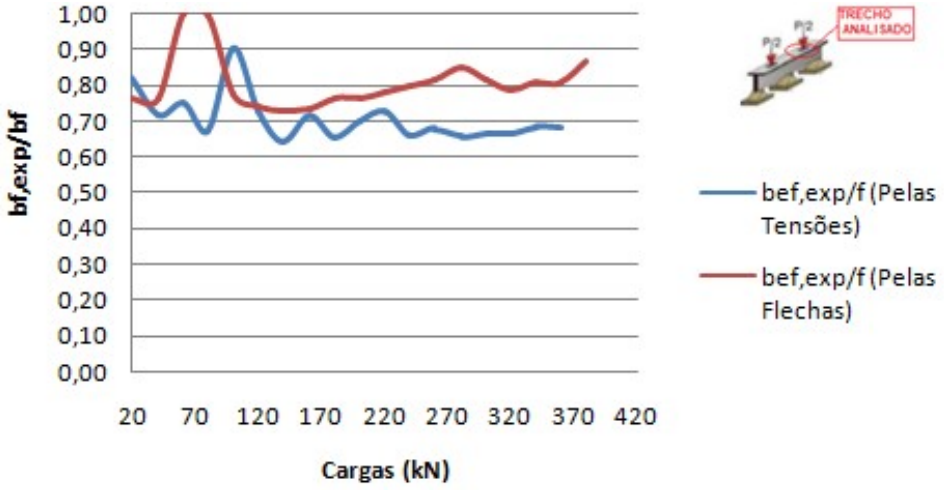


Figura 260 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MII-V3

No gráfico da figura 261 é possível constatar-se que as curvas encontram-se num intervalo de 70% a 80% de mobilização da largura total, ou seja, de um total de 18cm de aba foram mobilizados de 12,6cm a 14,4cm da aba. Alem disso, convém ressaltar que as curvas obtidas por métodos diferentes possuem comportamento com alguns pontos de inflexão semelhantes.

É importante salientar que essa viga possuía um apoio intermediário, o que alterava seu vão para 105,cm, Ou seja, embora essa viga possua características geométricas idênticas às demais, com a diminuição do vão a largura de mesa mobilizada passou a ser cerca de 20% maior.

3.4.6 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V1

Na viga MIII-V1 o carregamento foi aplicado concentrado no meio do vão, na direção da alma da alma, e suas inércias experimentais I_{exp} foram determinadas a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{P.L^3}{48E\delta_{exp}} \tag{32}$$

Onde:

$I_{,exp}$ – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 55).

Tabela 55 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MIII-V1

Carga (kN)	Desloc.δ exp.(cm)	Strain-8 (0/00)- Concreto	Strain-11 (0/00) - Aço	L.N, *exp. (x)*- cm	I,exp (cm^4)	*bf*total,exp (cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	26,00	9,50
2,00	0,018	0,030	0,016	9,80	6687,47	20,56	6,78
4,00	0,084	0,173	0,080	10,24	2843,01	17,48	5,24
6,00	0,150	0,259	0,129	10,03	2398,33	15,52	4,26
8,00	0,334	0,409	0,376	7,82	1480,71	14,78	3,89
10,00	0,477	0,514	0,532	7,37	1298,61	14,56	3,78
12,00	0,654	0,668	0,797	6,84	1134,81	14,34	3,67
14,00	0,815	0,812	1,095	6,39	1063,25	13,86	3,43
16,00	1,228	1,148	1,504	6,49	806,54	14,12	3,56
18,00	1,959	1,580	2,311	6,09	568,57	13,98	3,49
18,51	2,216	1,729	2,483	6,16	516,87	20,56	6,78

Baseando-se na tabela anterior foi elaborado o gráfico (Figura 261 e Figura 262) mostrando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 18,0kN, quando ocorreu a ruptura da viga por flexão.

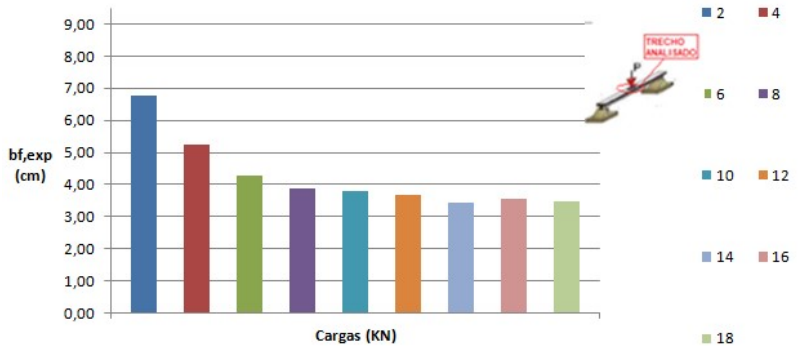


Figura 261 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V1

Para ilustrar a diferença entre os valores de largura efetiva, obtidos pelos dois métodos foi elaborado o gráfico a seguir (figura 263), representando os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, as relações $b_{f,exp}$ / b_f. Observa-se que a determinação dessa relação apresentou valores bantante diferentes em relação as duas metologias, com menores valores para o método das flechas. Isso ocorreu possivelmente por diferenças entre a inércia experimental calculada e a inércia real da viga fissurada.

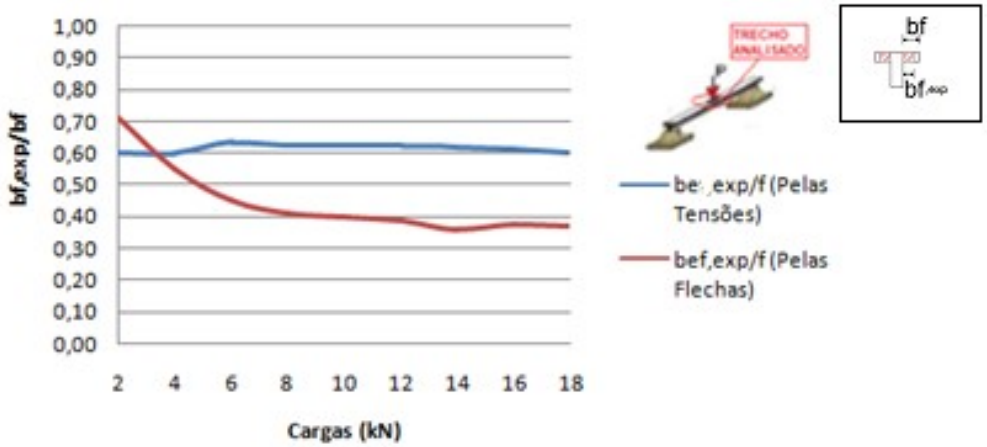


Figura 262 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V1

O trecho da viga representado no gráfico está posicionado no centro do vão, estando os valores das curvas compreendidos entre 40% e 60% da largura total. Ou seja, os valores da largura da aba efetivamente mobilizados estão entre 3,8cm e 5,9cm. Cabe lembrar que as vigas desse modelo (MIII) possuem apenas 9,5cm de aba.

No caso das relações $b_{f,exp}$ / b_f calculadas através da integração das curvas de tensões, os valores mantiveram-se constantes ao longo da aplicação das cargas, permanecendo com valores próximos de 5,9cm. Para as curvas calculadas através

das flechas experimentais, esses valores apresentam uma variação inicial, estabilizando-se para cargas acima 8,0kN em torno de 4,0cm (correspondendo a aproximadamente 45% de mobilização da aba).

3.4.7 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V2

Conforme já mostrado anteriormente, na viga MII-V3 o carregamento foi aplicado concentrado em dois pontos da alma da alma, tendo essa viga um apoio intermediário. As inércias experimentais I_{exp} foram determinadas a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{7.P.L^3}{78E\delta_{exp}} \tag{33}$$

Onde:

$I_{,exp}$ – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

Convém ressaltar que o principal objetivo da inserção do apoio intermediário foi o estudo da variação da largura efetiva, em uma viga com características geométricas idênticas às demais da mesma série, sendo separada em dois tramos de menores vãos (L=1,00).

Alem disso, foram estudadas as larguras efetivas nas regiões de momentos negativos, localizadas no centro do comprimento total da viga. Observou-se nessa região que a largura efetiva calculada através das tensões ficou em valores próximos a 4,5cm, correspondendo a 47% de mobilização da largura efetiva da aba.

Para o cálculo da largura efetiva através das flechas foram utilizadas as rotinas computacionais já apresentadas, sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 56).

Tabela 56 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MII-V3

Carga (kN)	Desloc.δ exp.(cm)	Strain – 4 (0/00) - Concreto	Strain - 5 (0/00) - Aço	L.N, *exp. (x)* - cm	I exp (cm^4)	bf,exp. (total)	bf,exp. (aba)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	26,00	9,5
5,00	0,0080	0,0185	0,0144	8,43	1528,08	15,54	4,27
10,00	0,0145	0,0350	0,0197	9,60	1682,77	16,72	4,86
15,00	0,0236	0,0553	0,0302	9,70	1554,05	15,40	4,2
20,00	0,0345	0,1083	0,0474	10,43	1416,68	12,60	2,8
25,00	0,0426	0,1431	0,0640	10,36	1434,21	12,72	2,86
30,00	0,0565	0,1675	0,0926	9,66	1299,30	14,28	3,64
35,00	0,0656	0,1900	0,1115	9,45	1305,11	14,32	3,66
40,00	0,0795	0,2226	0,1413	9,18	1229,98	14,56	3,78
45,00	0,0879	0,2450	0,1662	8,94	1251,59	15,56	4,28
50,00	0,1007	0,2726	0,2026	8,60	1214,09	16,46	4,73

Baseando-se na tabela anterior foi elaborado o gráfico (Figura 263 e Figura 264) plotando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 58,7kN, quando ocorreu a ruptura da viga por flexão.

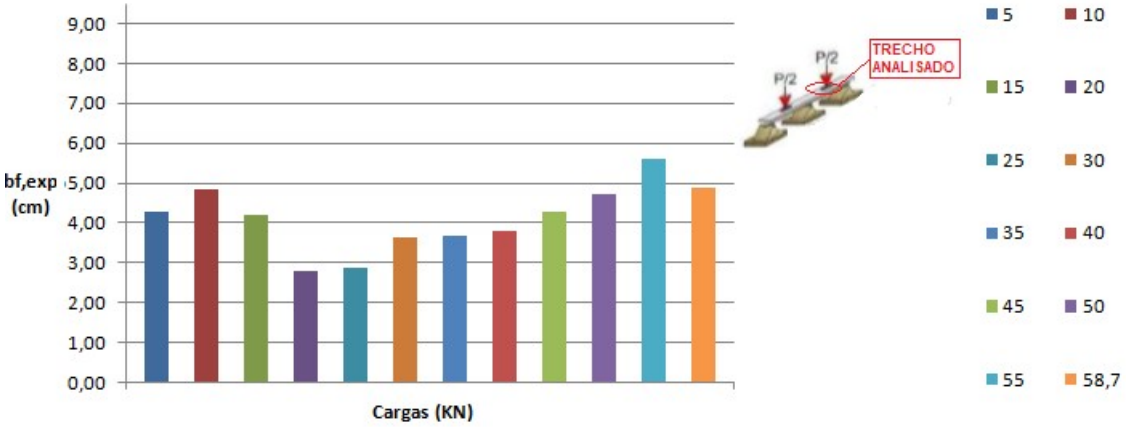


Figura 263 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V1

Para demonstrar a diferença entre os valores de largura efetiva, obtidos pelos dois métodos foi elaborado o gráfico a seguir (figura 265), na qual são representados

os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são representadas as relações $b_{f,exp} / b_f$.

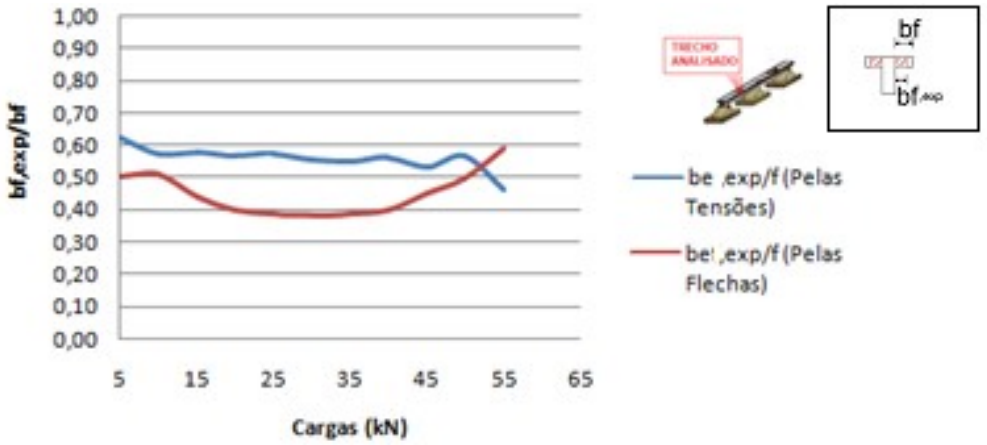


Figura 264 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V2

Na figura precedente é possível verificar que a largura efetiva obtida pelas flechas mobilizou cerca de 60% da aba, enquanto pelo calculo a partir das flechas essa mobilização ficou em torno de 40% da largura real da aba. No entanto, ambos os métodos mostraram resultados praticamente contínuos, para parte do intervalo de cargas.

Cabe ressaltar que o resultado encontrado nessa viga corrobora os conceitos apresentados por LEONHARDT (2008) e RÜSCH (1981) que afirmam que há uma redução da largura efetiva nas regiões de momentos negativos. No caso da viga em estudo, a largura reduziu de 60% na região de aplicação das cargas(meio do vão) para 47% (região do apoio intermediário).

3.4.8 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V3

Com base nos resultados experimentais da viga MIII-V3, cujo carregamento foi aplicado nos pontos x=0,25L e x=0,75L, foram calculadas as inércias experimentais Iexp, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{P.a}{24E\delta_{exp}}.\left(3.L^2 - 4.a^2\right) \tag{34}$$

Onde:

$I_{,exp}$ – é a inercia experimental da viga;

P – é a carga concentrada aplicada na viga;

a – é a distancia entre o apoio e ponto de aplicação da carga, nesse caso, *a*=50,0cm;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas,sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir (Tabela 57).

Tabela 57 - Largura efetiva $b_{f,exp}$, calculada a partir da flecha para MIII-V3

Carga (kN)	Desloc. δexp. (cm)	Strain - 9 (0/00) - Concreto	Strain - 14 (0/00) - Aço	L.N, *exp. (x)*	I,exp (cm^4)	*bftotal,exp*(cm)	*bf*,exp (aba) (cm)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	o	0,00	26,00	9,50
2,00	0,0081	0,0077	0,0141	5,65	13857,05	26,00	9,50
4,00	0,0271	0,0565	0,0446	8,94	8235,28	26,00	9,50
6,00	0,0392	0,0671	0,0555	8,76	8556,48	17,76	5,38
8,00	0,1034	0,0726	0,0873	7,26	4326,03	15,66	4,33
10,00	0,2155	0,1521	0,1128	9,19	2594,08	16,72	4,86
12,00	0,3534	0,7968	1,0366	6,95	1897,91	15,50	4,25
14,00	0,5002	0,6672	1,3703	5,24	1564,42	18,42	5,71
16,00	0,6142	0,7817	1,5721	5,31	1455,92	19,08	6,04
18,00	0,7476	0,8549	1,8099	5,13	1345,64	18,46	5,73
20,00	0,8514	0,9782	1,9504	5,34	1312,83	18,94	5,97

Empregando-se os valores de $b_{f,exp}$da tabela anterior foi elaborado o gráfico (Figura 265 e Figura 266)plotando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 58,7kN, quando ocorreu a ruptura da viga por flexão.

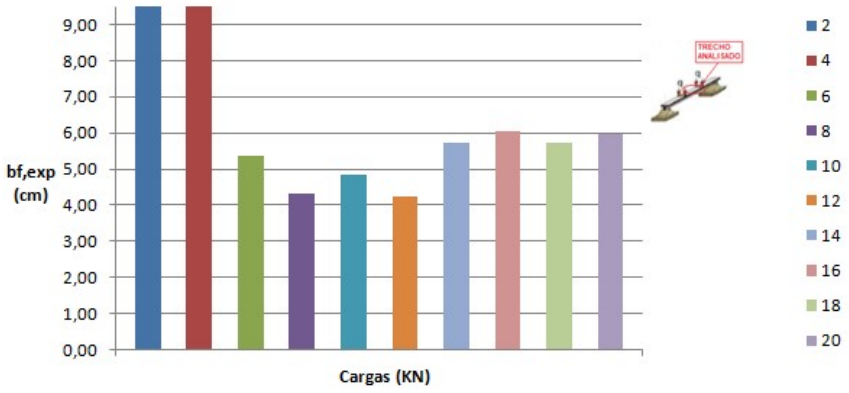


Figura 265 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V3

Para traçar um comparativo dos valores de largura efetiva, obtidos pelos dois métodos foi elaborado o gráfico a seguir (figura 267), na qual são representados os valores da razão entre a largura experimental $b_{f,exp}$ e a largura real da aba da mesa b_f, ou seja, para cada carga são representadas as relações $b_{f,exp} / b_f$

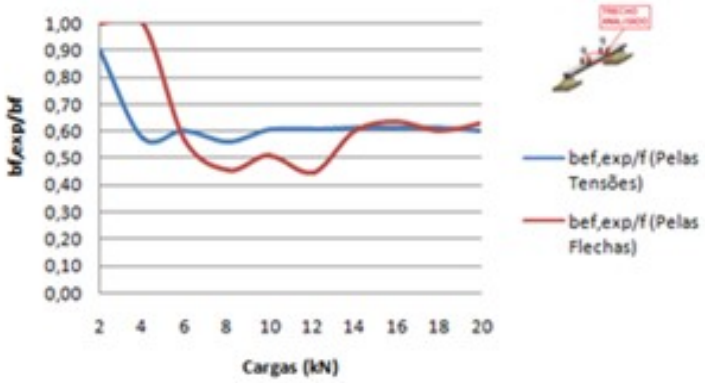


Figura 266 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V3

Os valores apresentados no gráfico anterior (figura 267) mostram que as larguras efetivas calculadas por ambos os métodos propostos nesse texto possuem maiores valores de mobilização nas primeiras cargas. No entanto, a medida que o carregamento aumenta, os valores tendem a convergir para uma relação em torno dos 60% (aproximadamente 5,7cm).

Vale ressaltar que esses valores são referentes a posição x=0,50L, ou seja, o centro do vão. Na tabela 57 pode ser observado que na região de aplicação das cargas (x=0,25L e x=0,75L) a largura efetiva mobilizada ficou sempre próxima de 5,2cm, ou seja, aproximadamente 55% da largura da aba.

3.4.9 Cálculo da Largura Efetiva na Viga MIII-V4

Para a viga MIII-V4, cujo carregamento foi aplicado distribuído ao longo da alma, foram calculadas as inércias experimentais I_{exp}, a partir do campo de deslocamentos abaixo:

$$I_{exp} = \frac{5Q.L^4}{384E\delta_{exp}} \tag{35}$$

Onde:

$I_{,exp}$ – é a inercia experimental da viga;

Q – é a carga distribuída aplicada na viga;

L – vão total da viga (L=200cm);

E – Módulo de elasticidade do concreto;

δ_{exp} – deslocamento experimental (flecha), ocorrido em x=0,50L.

A carga distribuída Q foi obtida pela divisão da carga total aplicada pela prensa, pelo comprimento total da viga, ou seja, Q=P/L, resultando em Q(kN/m). O módulo de Elasticidade do concreto foi obtido experimentalmente, sendo de 32GPa.

As deflexões experimentais foram obtidas através dos transdutores de deslocamentos, localizados nas posições mostradas na figura 160, que eram conectados ao equipamento de aquisição de dados.

Na tabela subseqüente, são apresentadas as deformações no concreto (strain gage S-9) e no aço (strain gage S-14), que foram utilizados na determinação da posição experimental da linha neutra, através de semelhança de triângulos, conforme já mostrado na figura 250.

O valor da inércia experimental era inserido nas rotinas computacionais já apresentadas, sendo obtidas as larguras efetivas experimentais ($b_{f,exp}$), resumidas na tabela a seguir.

Tabela 58 - Largura efetiva bf,exp, calculada a partir da flecha para MIII-V4

Carga (kN)	Desloc. δexp. (cm)	Strain-9 (0/00)-Concreto	Strain-14 (0/00)-Aço	L.N, exp. (x)	I,exp (cm^4)	b*ftotal,exp* (cm)	b*f,exp* (aba) (cm)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	26,00	9,50
2,00	0,004	0,002	0,002	15,000	3861,32	26,00	9,50
4,00	0,012	0,009	0,010	12,279	2666,30	26,00	9,50
6,00	0,022	0,017	0,021	9,456	2171,92	14,76	3,88
8,00	0,032	0,023	0,027	7,805	2055,96	13,78	3,39
10,00	0,049	0,029	0,055	7,768	1657,48	16,14	4,57
12,00	0,072	0,033	0,063	5,596	1361,71	18,66	5,83
14,00	0,083	0,033	0,064	5,191	1366,02	19,24	6,12
16,00	0,096	0,037	0,070	5,522	1350,35	19,38	6,19
18,00	0,114	0,040	0,062	5,474	1285,83	18,56	5,78
20,00	0,141	0,039	0,152	7,722	1155,85	18,56	5,78
22,00	0,147	0,040	0,187	5,238	1218,12	19,66	6,33
24,00	0,163	0,049	0,124	5,191	1196,55	19,50	6,25
26,00	0,182	0,060	0,041	4,866	1161,45	16,50	4,75
28,00	0,197	0,090	0,046	8,258	1152,07	16,36	4,68
30,00	0,218	0,130	0,046	8,835	1117,14	15,96	4,48
32,00	0,238	0,145	0,349	9,087	1093,22	15,84	4,42
34,00	0,260	0,254	0,776	6,326	1061,27	16,12	4,56
36,00	0,278	0,479	0,921	5,725	1051,57	16,70	4,85
38,00	0,294	0,518	0,874	5,401	1051,55	15,56	4,28
40,00	0,325	0,501	0,952	5,464	998,41	16,56	4,78

Com base nos valores de $b_{f,exp}$ da tabela precedente foi elaborado o gráfico (Figura 267 e Figura 268) mostrando a variação da largura efetiva, calculada através das flechas experimentais, para os intervalos de carga até 40,0kN, quando ocorreu a ruptura da viga por flexão.

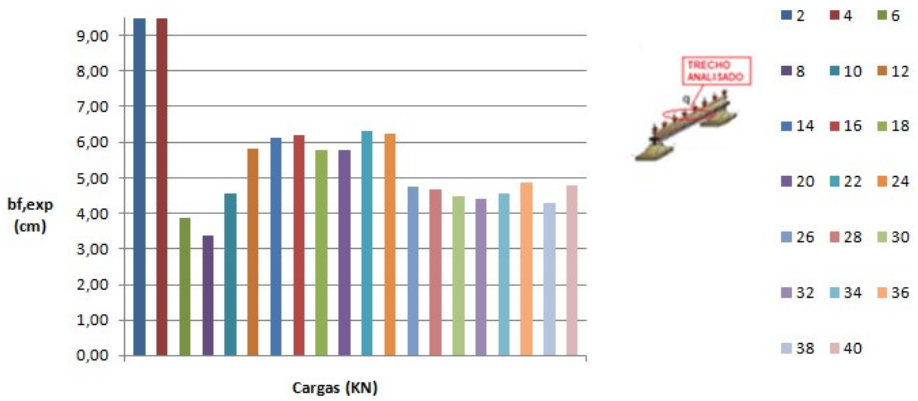


Figura 267 - Evolução da largura efetiva nas cargas em MIII-V4

Com o objetivo de fazer um comparativo entre os dois métodos utilizados para o cálculo da largura efetiva, foi elaborado o gráfico abaixo, onde podem ser observadas as variações das relações $b_{f,exp} / b_f$, para as cargas aplicadas.

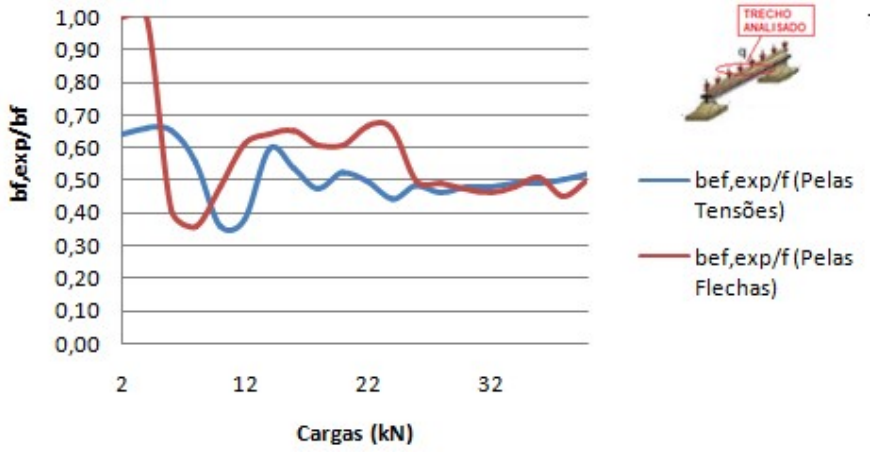


Figura 268 - Comparativo das larguras efetivas nas cargas em MIII-V4

Conforme pode ser observado na figura anterior, as variações das relações $b_{f,exp}$ / b_f, calculadas pelos dois métodos apresentam um comportamento semelhante, possuindo as mesmas inflexões nas curvas em diversos pontos, e convergindo para cargas finais (acima de 25kN).

Os valores mobilizados de largura efetiva foram variando entre 60% e 70% da largura total da aba. Ou seja, a largura efetiva de aba que foi realmente utlizada nessa viga foi de aproximadamente 6,17cm, não chegando a mobilizar a largura total da aba (9,5cm) nem mesmo nas cargas finais.

Na figura 269 é possível verificar que a determinação da largura efetiva da aba determinada pelo método das flechas apresenta maiores valores de largura mobilizada nas cargas iniciais. Isso ocorre pelo fato de que para as primeiras cargas

a viga ainda não apresenta fissuras, o que faz com que toda a seção contribua com sua inércia. Com a evolução do estado de fissuração a contribuição das armaduras passa a ser mais efetiva, enquanto o concreto passa a contribuir menos no banzo tracionado.

3.5. Comparativos dos Resultados de Larguras Efetivas

As variações das larguras efetivas da mesa calculadas experimentalmente, nas seções estudadas nesse texto foram resumidas nos gráficos a seguir, separados por séries de vigas. Esses gráficos foram elaborados a partir dos resultados obtidos somente pelas tensões experimentais, tendo como objetivo principal mostrar o quanto ocorre de vaiação da largura efetiva ao se variarem os principais parâmetros estudados nessa pesquisa.

Na figura 270 são apresentados os resultados das relações $bf_{,exp}/b_{f.}$ das vigas do Modelo I, para uma carga de 220kN, que foi a carga máxima atingida pela viga V-1, antes de sofrer escorregamento dos apoios. Nesse gráfico, observa-se que os valores prescritos pela NBR-6118/2014 e pelo EUROCODE 2/2004 são constantes, considerando uma mobilização total da mesapara as vigas com vão de 2,0 m.

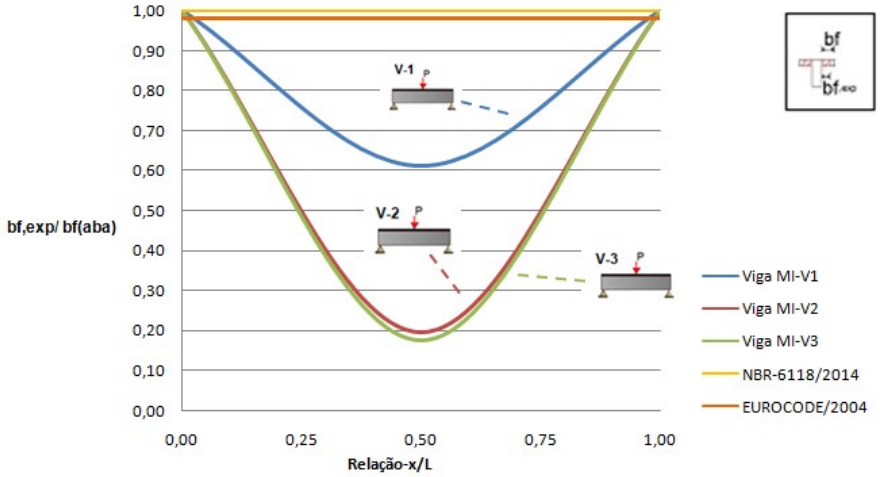


Figura 269 - Comparativos das relações $b_{f,exp}/b_{f.}$ para as vigas do modelo I, carga de 220kN

Na figura anterior é possível constatar que os valores da largura efetiva para as vigas V-2 e V-3 são bastante semelhantes, com apenas 20% da da mobilização para uma carga de 220kN. No entanto, para a viga V-1 a largura mobilizada chegou a 60%.

Na figura 271 é possível constatar que a variação de tipo de carregamento influencia sobremaneira a mobilização da largura da mesa em relação a largura da aba, para cada posição x/ L ao longo do vão das vigas. A viga M-II-V-3 não foi apresentada nessa figura por possuir apoio intermediário,ou seja,vão de 1,0 m o que altera os parâmetros de comparação com as prescrições normativas, uma vez que a NBR-9118/2-2014 e o EUROCODE 2/2004 baseiam a determinação da largura colaborante da mesa em função do vão.

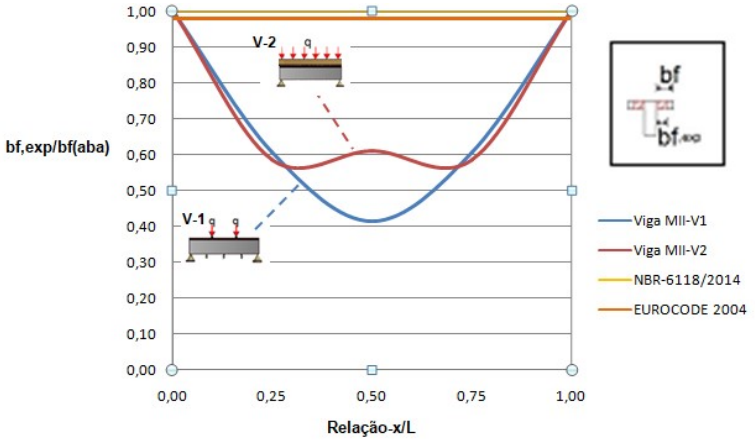


Figura 270 - Comparativos das relações $b_{f,exp}$ / b_f. para as vigas do modelo II, para vigas com vão de 2,0 m

A figura 272 foi elaborada para a série de vigas do modelo III, em carga de 26kN. Esse valor foi adotado em função de ser o ultimo valor de carga com leitura dos srains, no trecho de momento negativo de MIII-V-2. Nesse gráfico são apresentados os resultados para as vigas com vão de 2,0 m, em um comparativo com as prescrições normativas da NBR-6118/2014 e do EUROCODE 2/2004.

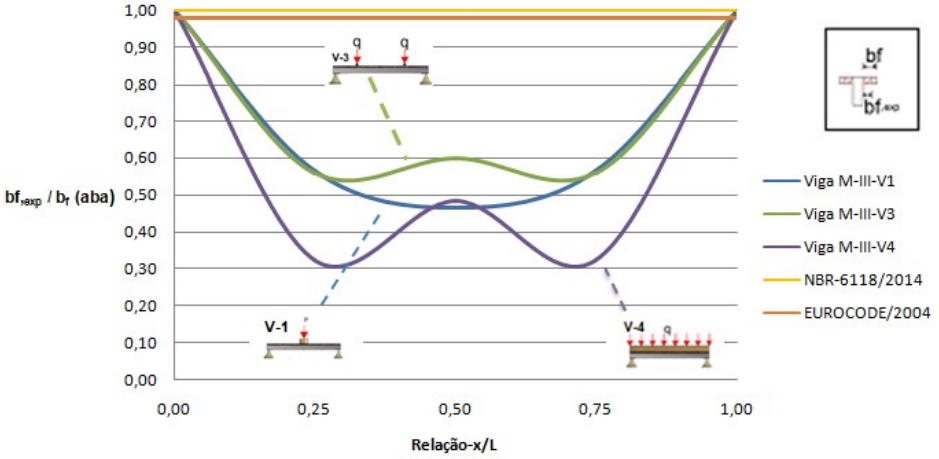


Figura 271 - Comparativos das relações $b_{f,exp}$ / b_f. para as vigas do modelo III, para vigas com vão de 2,0 m

È possível constatar na figura anterior que a única viga cuja mobilização da largura da mesa teve um comportamento semelhante com os modelos anteriores foi V-1, que foi ensaiada com carregamendo pontual, aplicado no meio do vão. Os demais gráficos mostram que houveram sensíveis variações nas relações $b_{f,exp}$ / b_f, nas posições x=0,25L, x=0,50L e x=0,75L.

Os resultados das relações $b_{f,exp}$ / b_f, para viga M-II-V-3 são apresentados na figura 273, sendo comparada com os resultados das prescrições normativas (NBR-6118/2014 e EUROCODE 2/2004). Observa-se que essas prescriçõesnormativas não preconizam valores adequados de mobilização da mesa, para cargas pontuais. Isso se deve ao fato de tratarem a determinação da largura efetiva apenas como um parâmetro geométrico, estando diretamente associado a distância entre pontos de momento nulo.

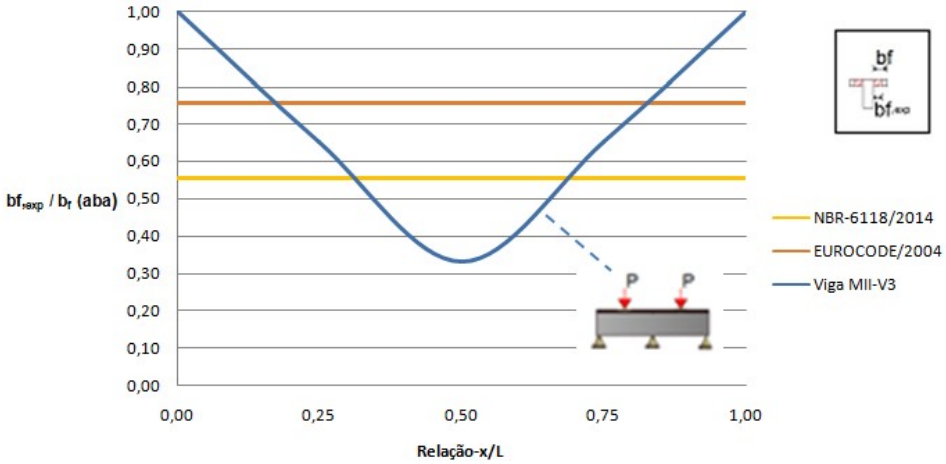


Figura 272 - Comparativos das relações $b_{f,exp}$ / b_f. para a viga M-II-V-3, para vigas com vão de 1,0 m

Assim como na figura anterior, foi elaborado separadamente o gráfico da viga M-III-V-2, cujo vão era de 1,0 m, o que altera o valor previsto pelas normas NBR-6118/2014 e EUROCODE 2/2004, para consideração da largura colaborante da mesa. As relações são apresentadas na figura 274. Nessa figura constata-se também a influencia dos parâmetros geométricos da seção, uma vez que essa viga apresenta relações $b_{f,exp}$/ b_f. bastante distinta em relação à viga da figura anterior, que possuía igualmente três apoios.

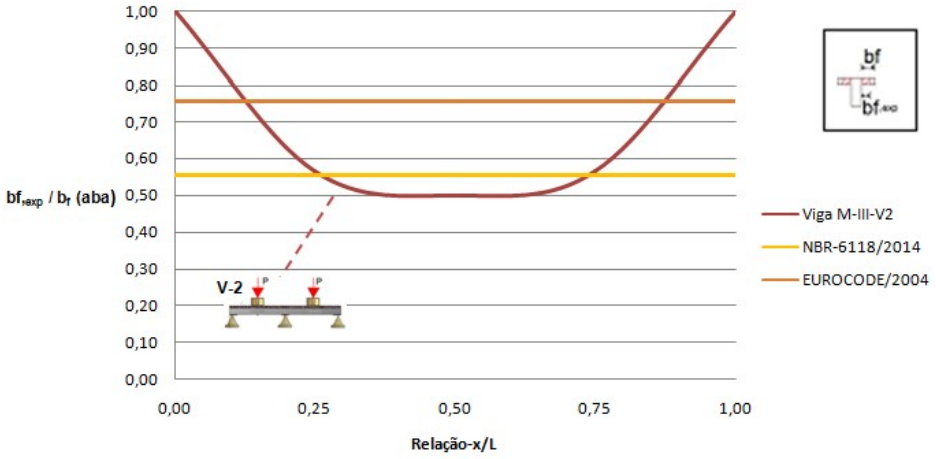


Figura 273 - Comparativos das relações bf,exp / bf. para a viga M-III-V-2, para vigas com vão de 1,0 m

É importante salientar que mesmo variando-se os parâmetros geométricos entre as seções estudadas, para vigas com carregamento pontual, no centro do vão (x=0,50L), os valores das larguras efetivas estiveram em torno de 45% da largura total. Embora a figura 270 mostre mobilizações em torno de apenas 20% da largura total, cabe lembrar que ela foi elaborada apenas para uma carga de 220kN. Para as cargas ultimas de MII-V2 e MII-V-3 essas larguras mobilizadas alcaçam, também, cerca de 40%.

A inserção de um apoio intermediário, reduzindo os vão para 1,0 m, ocasionou uma mudança das relações $b_{f,exp}/b_{f.}$ que pode ser notada na configuração dos gráficos apresentados nas figuras 273 e 274, quando comparados às vigas de mesma seção, mas com vão de 2,0m. Para essas vigas ocorreu uma aproximação entre os valores experimentais e as recomendações normativas da NBR-6118/2014 e o EUROCODE 2/2004.

As recomendações normativas mostraram-se bastante conservadoras, e de maneira geral, distando-se bastante dos resultados exterimentais. Por ser calculada em função do vão e da distância entre os pontos de momento nulo, a largura colaborante prevista nessas normas termina por considerar uma mobilização da largura da mesa muito maior que a verificada experimentalmente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. Introdução

A utilização dos preceitos normativos relacionados à estimativa de uma largura de mesa colaborante (ou largura efetiva) tende a apresentar valores bastante conservadores, com resultados que não levam em conta quaisquer fatores além dos parâmetros de comprimento de vãos e posição das vigas na estrutura (vão interno ou externo) e distância entre pontos de momento nulo .

Ao realizarem-se os ensaios que compuseram essa pesquisa, foi possível verificar que o tipo de carregamento aplicado influencia diretamente a largura de mesa que será efetivamente mobilizada, sendo mais determinante que os parâmetros geométricos da seção das vigas.

Ressalta-se que os métodos analíticos utilizados (integração de curva de tensões e determinação através das flechas experimentais) dependem diretamente da precisão dos dados coletados. No caso específico de vigas de concreto, onde os strain gages foram colados sobre a superfície da mesa, a interface entre cola/strain gages/viga passou a representar um ponto bastante crítico, que exigiu maiores cuidados de preparação dos ensaios.

Qualquer pequeno problema de colagem ou de aquisição de dados de um strain gage pode acarretar uma grande variação na configuração da distribuição de tensões na mesa, causando uma alteração da largura efetiva calculada.

No caso das larguras efetivas calculadas pelas flechas, ocorre uma melhor análise quando são obtidos os valores de flechas experimentais até as ultimas cargas aplicadas. No entanto, levando-se em conta o estado de fissuração dessasvigas, nem sempre é seguro manter os transdutores de deslocamentos sob as mesmas, devido à possibilidade de danos a esses dispositivos e os seus cabos de conexão.

4.2. Principais conclusões

Nos ensaios realizados, a variação dos parâmetros geométricos das vigas foi idealizada levando em conta as limitações dimensionais dos equipamentos disponíveis no LEC. Na maior parte das referencias consultadas haviam maiores dimensões de largura total de mesa b_f, sendo nesse laboratório limitada a 58,0cm.

Por conta dessas limitações, o presente estudo acabou reduzindo as possibilidades de variação dos parâmetros geométricos das vigas a valores cujos ensaios fossem exeqüíveis nos equipamentos disponíveis. Mas em uma análise dos resultados, foi verificado que o fator preponderante de alteração da mobilização na largura da mesa é o tipo de carregamento aplicado, que independe da geometria da seção.

Outro fator de limitação foi a quantidade de canais disponíveis no equipamento de aquisição de dados. Em geral, durante os ensaios foram utilizados todos os 24 canais disponíveis para aquisição dos dados de deformações. O aumento no numero de canais significaria uma maior quantidade de pontos instrumentados, podendo-se ter redundância e consequentemente dando uma possibilidade de verificação dos dados faltantes ou divergentes.

Quanto aos reultados obtidos nas vigas do modelo I, foi constatado que com excessão da viga V-1, as larguras efetivas para cargas pontuais estiveram em torno de 45% da largura real da aba, ou seja, dos 18cm de largura da aba foram mobilizados apenas 8,10cm, para as cargas próximas a ruptura da viga.

Para as vigas do modelo II, essas larguras variaram em função do vão e do tipo de carregamento aplicado em cada viga, mas de maneira geral, essa variação ficou num intervalo de 35% a 60%, para a posição x=0,50L (meio do vão). Nas posições 0,25L e 0,75L, as variações das larguras mobilizadas assumiram valores entre 30% e 60% da largura total da aba.

Para as vigas dos modelos III, ocorreram variações da largura efetiva mobilizada entre 45% e 60%, sendo que para o trecho 0,50L esses valores foram menores para a viga com carga concentrada. Nas posições 0,25L e 0,75L, esses

valores situaram-se num intervalo de 30% a 55% de largura efetiva para todas as vigas.

Com relação a alteração do vão, através da inserção de um apoio intermediário, que dividiu as vigas MII-V-3 e MIII-V-2 em dois tramos, foi verificado uma diminuição da mobilização da largura da aba da viga para V-3 e um ligeriro aumento da largura mobilizada para V-2, sempre referenciados a outra viga de mesmo modelo co carga pontual no meio do vão.

A variação dos parâmetros geométricos teve uma menor influência em relação a mobilização da largura da aba. Esses parâmetros, que diferiram entre as vigas dos modelos II e III, influenciaram menos a porcentagem de largura mobilizada, quando comparados aos efeitos da variação do tipo de carregamento.

Esses estudos corroboraram o que foi encontrado nas principais referencias que tratam de largura efetiva. No entanto, tanto o que foi observado no referencial teórico quanto nos ensaios experimentais, mostra que as considerações normativas a respeito do assunto são bastante simplistas.

4.3. Trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser mencionadas:

- Realizar ensaios de vigas com dimensões diferentes, dando preferência a dimensões maiores de mesa, buscando uma maior proximidade com os ensaios internacionais;
- Realizar ensaios variando-se o F_{ck} das vigas, com o objetivo de verificar a influencia desse parâmetro na largura efetiva da mesa;
- Executar maior número de ensaios, com o objetivo de comprovar a validade dos percentuais de largura efetiva de mesa obtidos nessapesquisa;

- Executar ensaios com um maior número de extensômetros, coma possibilidade de melhor avaliação do desenvolvimento das curvas de tensões;
- Realizar ensaios com instrumentação na parte inferior da mesa da viga, objetivando a observação do desenvolvimento das tensões ao longo da espessura da mesa;
- Realizar uma análise, através do MEF, para comparar os dados numéricos comosresultados experimentais obtidos;

REFERÊNCIAS

[1] ABNT NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[2] CEB, Comité Euro-International du Betón – CEB-FIP Model Code, 1990.

[3] ACI 318-08, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 2008.

[4] Von Karman, Th., 1924. Die Mittragende Breite. August-Föppel-Festschrift, Springer Verlag, Berlin, p. 114-127.

[5] Metzer, W., 1929. Die Mittragende Breite, Luftfahrtforschung, vol. 04, p. 1-20.

[6] Rüsch, H., Concreto Armado e Protendido: Propriedades dos Materiais e Dimensionamento. 1ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. Campus, 1981.

[7] LS-DYNA, Inc. Theory Reference.

[8] Salamana, T.; Nassif, H. H., 2011. Effective flange width for composite steel beams, The Journal of Engineering Research, vol. 8, p. 28-43.

[9] Abaqus, Inc. Theory Reference (Version 6.14), 2014.

[10] Rieg, A.,Verformungsbezogene Mittragende Breite Niedriger Verbundträger. 2006. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Stutgart, Alemanha, 2006.

[11] ADAPTIC, Inc. Theory Reference.

[12] Loo, Y.; Sutandi, T. D., 1986. Effective flange width formulas T-beams, Concrete International, vol. 12, p. 40-45.

[13] EUROCODE 2, EN 1992-1-1: 2004. Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

[14] Leonhardt, F., Construções De Concreto. Vol. 3, 1ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. Interciência, 2008.

[15] Brendel, G., 1964. Strength of the Compression Slab of T-Beams Subject to Simple Bending, ACI Journal, vol. 61, p. 57-75.

[16] Jeom, K. P., 2008. Some recent advances in the concepts of plate-effectiveness evaluation, Science Direct, vol. 12, p. 203-216.

[17] Chen, S. S.; Aref, A. J.; Chiewanichakorn, M., 2007. Proposed Effective Width Criteria for Composite Bridge Girdes, Journal of Bridge Engineering, vol. 12, p. 325-338.

[18] Chen, S. S.; Aref, A. J.; Chiewanichakorn, M., 2008. Effective flange width of composite girders in negative moment region, Journal of The Transportation Research Board, vol. 12, p. 203-216.

[19] Timoshenko, S. P.; Gere, J. E., Mecânica dos Solos. Vol. 1 e 2, 1ª Edição.Rio de Janeiro, Brasil: Ed. LTC, 1989.

[20] Küçükarslan, S., A Finite Element Study on the Effective Width of Flanged Sections. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Middle East Technical Univesity, EUA, 2010.

[21] Bernat, A. R. M.; Canet, J.M., 1985. Estudio del Ancho Eficaz en Secciones en “T” de Hormigón Armado e Identificación de los Parámetros Significativos en Su Respuesta Estructural, Informes de la Construcción, vol. 37, n. 375.

[22] Excel, Inc. Theory Reference.

[23] MATLAB, Inc. Theory Reference.

[24] Smiderle, C.; Campos, A.; Pacheco, A. R., 2007. Estudo Paramétrico na Determinação da Largura Colaborante da Mesa de Vigas T de Concreto Armado através do Método dos Elementos Finitos, II Congresso Brasileiro de Pontes, Rio de Janeiro.

[25] Pinto, F. M. P. M.,Larguras Efectivas em Vigas Mistas Submetidas a Diferentes Tipos de Carregamento. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Portugal, 2009.

[26] Carvalho, R. C.; Figueiredo, J. R.,Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado. 3ª Edição.São Paulo, Brasil: EdUFSCar – Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2010.

[27] Ghali, A.; Favre, R.; Eldbadry, M., Concrete Structures – Stresses and Deformation. Third Edition.London, England: Spon Press, 2002.

[28] Sussekind, J. C.,Curso de Concreto. Volume 1 – Concreto Armado. 3ª Edição.São Paulo, Brasil: Globo, 1989.

[29] MAXIMA, Inc. Theory Reference.

[30] Andolfato, R. P.; Camacho, J. S.; Brito, G. A., Extensometria Básica, Apostila – UNESP, 2004.

[31] Bazant, Z.P., 1983. Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, vol. 16, p. 155-177.

[32] Montoya, P. J.; Meseguer, A. G.; Cabré, F. M., Hormigón armado. 13ª Edição. Barcelona, Espanha: Gustavo Gilli, 1991.

[33] SAP 2000, User' Manual, 2011.

[34] Schwetz, P. F., Análise Numérico – Experimental de Lajes Nervuradas Sujeitas a Cargas Estáticas de Serviço. 2011. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

[35] Schwetz, P. F., Análise Teórico – Experimental de uma Laje Nervurada em Modelo Reduzido Sujeita a um Carregamento Linear. 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

[36] Souza, S. do S. M. de, Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

[37] Teixeira, P. J. B., Verificação Experimental da Largura Colaborante em Mesas de Lajes Nervuradas. 2012. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

[38] Timoshenko, S. P.; Goodier, J. N., Theory of Elasticity. 3ª Edição. Nova Iorque, EUA: McGraw Hill Editora, 1970.

[39] ABNT NBR 5739, Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[40] ABNT NBR 5738, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

[41] ABNT NBR 8261, Perfil tubular, de aço-carbono, formado à frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

[42] ABNT NBR 12655, Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[43] ABNT NBR 7211, Agregados para concreto – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

[44] ABNT NBR 7251, Agregados em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

[45] ABNT NBR NM 45, Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[46] ABNT NBR NM 52, Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

[47] ABNT NBR 11768, Aditivos para concreto de cimento Portland. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

[48] ASTM C494/C 494M, Specification for Chemical Admixtures for Concrete. American Institute of Steel Construction, 2001.

[49] ABNT NBR NM 67, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

[50] ABNT NBR 8522, Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ANEXO A- EQUIPAMENTOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os equipamentos de aquisição de dados e os transdutores utilizados são apresentados nas figuras A1 e A2.

Figura A1 – Equipamento de aquisção de dados

Figura A2 – Transdutores utilizados na medição dos deslocamentos

ANEXO B- ARMADURAS E MATERIAIS DAS VIGAS DOS MODELOS M-I, M-II E M-III

Os detalhes das armaduras das vigas dos modelos M-I e M-II são apresentados nas figuras B1 e B2. Os detalhes das armaduras do modelo M-III são apresentados na figura B3.

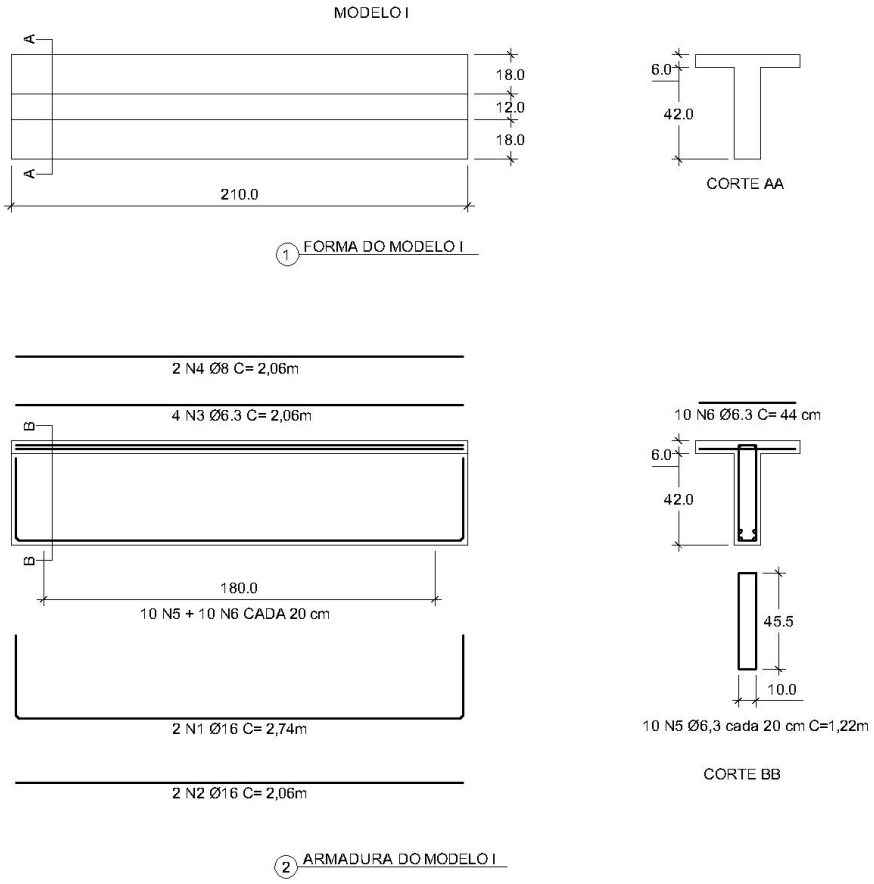


Figura B1 – Armaduras das vigas dos modelos M-I

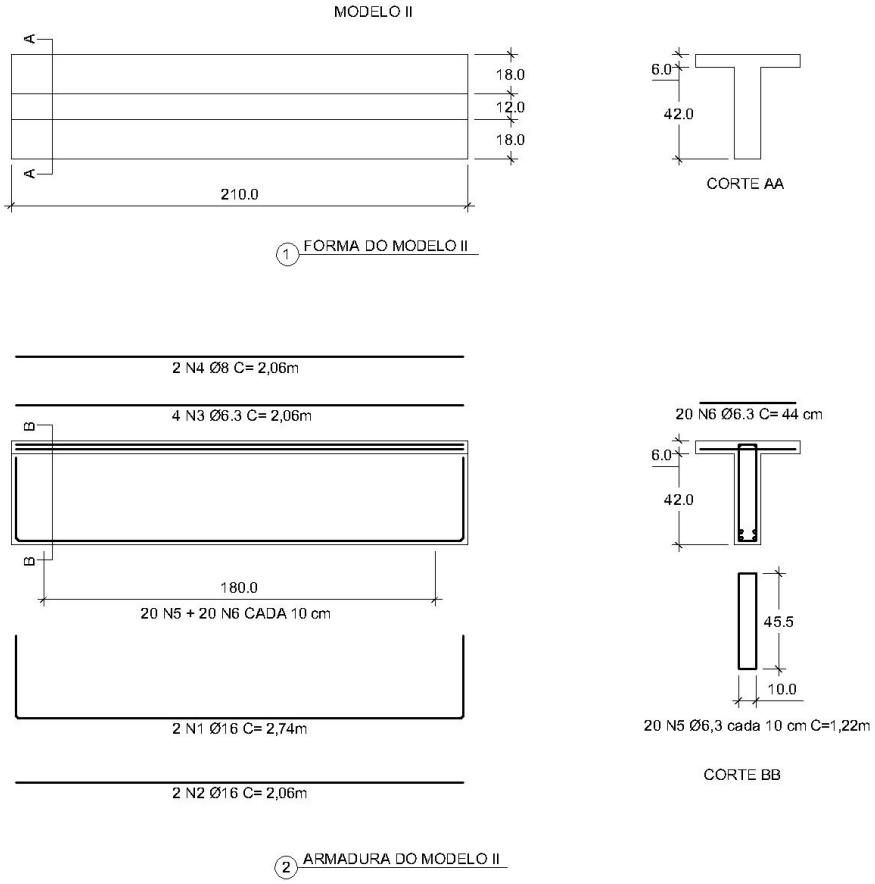


Figura B2 – Armaduras das vigas dos modelos M-I

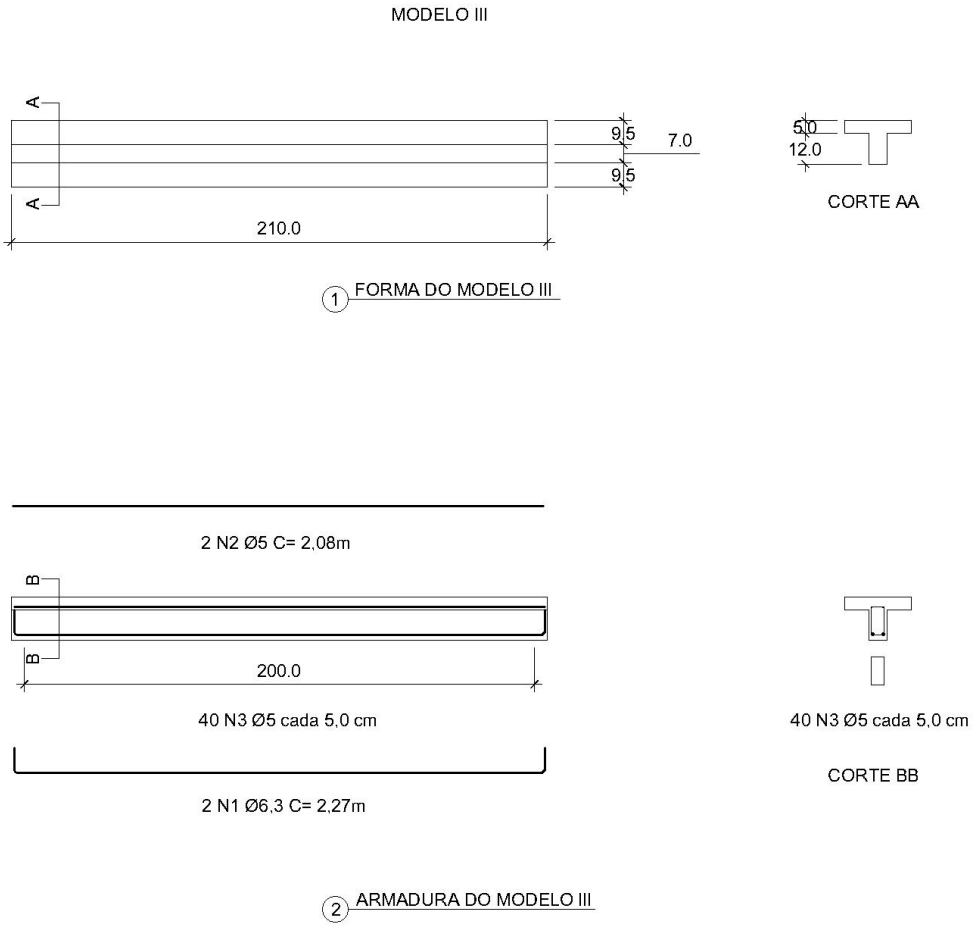


Figura B3 – Armaduras das vigas dos modelos M-III

O ensaio de compressão realizado nas corpos de prova do concreto utilizado nas vigas foram realizados de acordo com a NBR-5739/2007, sendo mostrados nas figuras B4 e B5, e os resultados desses ensaios resumidos na tabela B1.

Figura B4- Ensaio de compressão no concreto

Figura B5- Aspecto doscorpos de prova após o ensaio

Tabela B1 – Resistências a compressão dos corpos de prova ensaiados

Modelo	Viga	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
M-I	V-1	39,43
	V-2	36,81
	V-3	38,53
M-II	V-1	39,50
	V-2	38,50
	V-3	38,43
M-III	V-1	39,70
	V-2	39,80
	V-3	39,50
	V-4	38,10

ANEXO C– ROTINAS COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES EXPERIMENTAIS E DA LARGURA EFETIVA

Para integração das curvas de tensões foi desenvolvida no software MATLAB uma rotina para integração. A sintaxe dessa rotina permitiu que fossem inseridas as funções polinomiais das curvas de tensões obtidas experimentalmente. Essa rotina é apresendada a seguir.

```
clear
clear all
syms x
f=input('Digite a função a integrar: ');
a=input('Digite o intervalo inferior: ');
b=input('Digite o intervalo superior: ');
funcao=double (int(f,x,a,b))
```

Após o processamento da rotina, o programa apresentou na linha de comandos a tela a mostrada na figura C1.

Figura C1 – Rotina no MATLAB para integração das curvas de tensões

Para determinação das larguras efetivas a partir das flechas experimentais foi desenvolvida, no softaware MAXIMA a rotina apresentada a seguir, considerando a viga no Estádio I (não-fissurada). Na sequencia, é apresentada a a rotina para cálculo da viga no estádio II.

```
    kill(all)$
ratsimp(false)$

print("Equação para o Estádio 1:")$;
print(I_estadio1=((bf−bw)·hf^3)/12+(bw·h^3)/12+(bf−bw)·hf·(yh−hf/2)^2+bw·h(yh−h/2)^2+As·(α−1
)·(yh−d)^2)$;
/·Inercia da seção no Estádio 1·/
I:1.8·10^5$print("Inercia da seção Estádio 1: ",I,"cm^4")$;
/·Posição da linha neutra·/
yh:18.3$print("Posição da linha neutra: ",yh,"cm")$;
/·Largura da alma·/
bw:12$print("Largura da alma: ",bw,"cm")$;
/·Altura da mesa·/
hf:6$print("Altura da mesa: ",hf,"cm")$;
/·Relação entre Es/Ec·/
α:6.43$print("Relação entre Es/Ec: ",n,"adm")$;
/·Área de aço inferior·/
As:4.92$print("Área de aço da armadura inferior: ",As,"cm²")$;
/·Área de aço na parte superior·/
Asb:1.0$print("Área de aço da armadura superior: ",Asb,"cm²")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do As·/
d:46$print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura superior: ",d,"cm")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do Asb·/
t:2$print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura inferior: ",t,"cm")$;
/·Altura total da peça·/
h:48$print("Altura total da peça: ",h,"cm")$;
print("")$;
parametros:ev(matrix([I,yh,bw,hf,α,As,Asb,d,t,h]));

subst(
   [
I=parametros[1,1],
yh=parametros[1,2],bw=parametros[1,3],hf=parametros[1,4],α=parametros[1,5],As=parametros[1,6],
d=parametros[1,8],h=parametros[1,10]],

((bf−bw)·hf^3)/12+(bw·h^3)/12+(bf−bw)·hf·(yh−hf/2)^2+bw·h·(yh−(h)/2)^2+As·(α−1)·(yh−d)^2−I=
0)$;
bf:rhs(float(solve(%,bf))[1]);

print("")$
print("Largura efetiva da mesa: ", bf,"cm")$;
```

Equação para o Estádio 1: $I_{estadio1}$

$$= As\cdot(yh-d)^2\cdot(\alpha-1)+bw\cdot h\left(yh-\frac{h}{2}\right)^2+(bf-bw)\cdot hf\cdot\left(yh-\frac{hf}{2}\right)^2+\frac{(bf-bw)\cdot hf^3}{12}$$

$$+\frac{bw\cdot h^3}{12}$$ 180000.0cm^418.3cm12cm6cmnadm4.92cm^21.0cm^246cm2cm48cm

(parametros)

(180000.0 18.3 12 6 6.43 4.92 1.0 46 2 48)rat: replaced 1422.54 by 71127/50 = 1422.54

(bf).....cm

```
kill(all)$ratsimp:false$

print("Equação de Ghali, Frave e Sussekind:")$;
print(I=(bf·hf^3)/12+bf·hf·((x−hf/2)^2)+(bw·((x−hf)^3))/3+n·((As·(d−x)^2)+Asb·(x−t)^2))$;
/·Inercia da seção fissurada·/
I:516$ print("Inercia da seção fissurada : ",I,"cm^4")$;
/·Posição da linha neutra·/
x:4.5$ print("Posição da linha neutra: ",x,"cm")$;
/·Largura da alma·/
bw:7$ print("Largura da alma: ",bw,"cm")$;
/·Altura da mesa·/
hf:5$ print("Altura da mesa: ",hf,"cm")$;
/·Relação entre Es/Ec·/
n:6.43$ print("Relação entre Es/Ec: ",n,"adm")$;
/·Área de aço inferior·/
As:0.32$ print("Área de aço da armadura inferior: ",As,"cm²")$;
/·Área de aço na parte superior·/
Asb:0.32$ print("Área de aço da armadura superior: ",Asb,"cm²")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do As·/
d:15$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura superior: ",d,"cm")$;
/·Distância da fibra mais tracionada para CG do Asb·/
t:2$ print("Distancia da fibra mais tracionada ao CG da armadura inferior: ",t,"cm")$;
print("")$;
parametros:ev(matrix([I,x,bw,hf,n,As,Asb,d,t]))$;

subst([I=parametros[1,1], x=parametros[1,2],bw=parametros[1,3],hf=parametros[1,4],n=parametros[1,5],As=parametros[1,6],Asb=parametros[1,7],d=parametros[1,8],t=
    (bf·hf^3)/12+bf·hf·((x−hf/2)^2)+(bw·((x−hf)^3))/3+n·((As·(d−x)^2)+Asb·(x−t)^2)=I);
bf:rhs(float(solve(%,bf))[1])$;
print("")$
print("Largura efetiva da mesa: ", bf,"cm")$;
```

ANEXO D– DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES EXPERIMENTAIS

As tabelas apresentadas a seguir (numeradas da Tabela D1 até D21) apresentam os valores das tensões calculadas a partir das deformações experimentais, obtidas através de strain gages localizados na superfície da mesa das vigas.

O cálculo dessas tensões foi realizado com a expressão proposta pela NBR-6118/2014, sendo apresentada no item 3.1 desse texto.

Tabela D1-Tensões na viga MI-VI no lado direito

Carga (kN)	Tensões calculadas pela NBR-6118[1]-Lado Direito[1]				
	Tensões S-1 = s1 (MPa)	Tensões S-2 = s2 (MPa)	Tensões S-3 = s3 (MPa)	Tensões S-4 = s4 (MPa)	Tensões S-5 = s5 (MPa)
0	0	0	0	0	0
1,10	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	0,01
5,59	-0,16	-0,21	-0,15	-0,17	-0,15
10,34	-0,55	-0,51	-0,42	-0,42	-0,37
20,38	-1,28	-1,38	-1,46	-0,94	-0,89
40,25	-2,90	-2,91	-2,80	-2,09	-1,80
60,33	-4,27	-5,21	-4,32	-3,46	-3,11
80,95	-6,77	-7,71	-6,79	-5,82	-4,69
100,49	-9,21	-10,45	-9,06	-8,99	-6,71
120,11	-12,29	-13,72	-12,11	-10,57	-8,58
140,17	-17,54	-19,04	-17,03	-10,57	-11,76
160,88	-22,11	-23,70	-19,76	-10,57	-14,28
180,82	-27,22	-28,58	-24,75	-10,57	-17,37
200,50	-31,14	-32,70	-28,00	-10,57	-20,03
220,03	-36,10	-37,38	-31,68	-10,57	-23,08
230,37	-38,52	-39,84	-33,69	-10,57	-24,34

Tabela D2-Tensões na viga MI-VI no lado esquerdo

Carga (kN)	Tensões calculadas pela NBR-6118[1]-Lado Esquerdo[1]				
	Tensões S-8 = s8 (MPa)	Tensões S-9 = s9 (MPa)	Tensões S-10 = s10 (MPa)	Tensões S-11 = s11 (MPa)	Tensões S-12= s12 (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,34	-0,45	-0,52	-0,53	-0,29	-0,13
20,38	-1,00	-1,18	-1,22	-0,70	-0,17
30,34	-1,55	-1,92	-1,95	-1,10	-0,31
40,25	-2,08	-2,71	-2,75	-1,51	-0,40
50,25	-3,49	-3,51	-3,84	-1,97	-0,44
60,33	-6,78	-4,51	-4,00	-2,32	-0,53
70,43	-7,57	-5,65	-4,94	-2,59	-0,51
80,00	-8,40	-6,84	-6,11	-2,60	-0,56
90,38	-9,42	-8,25	-7,58	-2,42	-0,60
100,49	-10,36	-9,51	-8,72	-2,51	-0,39
110,39	-11,27	-10,72	-9,81	-2,98	-0,33
120,11	-12,72	-12,76	-11,99	-3,43	-0,24
130,14	-14,25	-14,87	-14,02	-3,70	-0,24
140,17	-16,36	-17,77	-16,83	-4,21	-0,24
150,91	-17,73	-19,64	-18,82	-4,59	-0,36
160,88	-19,57	-22,41	-21,54	-4,95	-1,54
170,82	-23,37	-24,37	-26,47	-5,15	-4,36
180,82	-25,10	-27,52	-29,56	-5,53	-4,07
190,62	-26,63	-29,51	-31,56	-6,01	-4,07
200,50	-28,27	-31,82	-34,14	-6,73	-4,59
210,69	-29,93	-33,98	-36,32	-7,11	-4,66
219,83	-32,00	-36,41	-38,58	-7,94	-4,63
230,37	-33,84	-38,62	-40,69	-8,54	-4,71

Tabela D3-Tensões na viga MII-V2 no lado direito

Carga (kN)	Tensões calculadas pela curva da NBR-6118				
	Tensão S-1 = σ1(MPa)	Tensão S-2 = σ2(MPa)	Tensão S-3 = σ3(MPa)	Tensão S-4 = σ4(MPa)	Tensão S-5 = σ5(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	-0,78	0,37	-0,51	-0,14	-0,13
40,00	-1,53	-1,44	-1,15	-0,50	-0,56
60,00	-2,44	-2,39	-1,94	-0,95	-1,05
80,00	-3,91	-3,76	-3,15	-1,65	-1,28
100,00	-5,32	-5,03	-4,34	-2,36	-1,97
120,00	-6,76	-6,38	-5,62	-2,38	-3,11
140,00	-9,13	-9,04	-7,70	-3,03	-4,81
160,00	-11,89	-11,66	-9,85	-3,28	-3,85
180,00	-15,10	-14,32	-12,25	-3,48	-3,06
200,00	-17,70	-16,39	-14,08	-4,05	-2,50
220,00	-20,24	-18,66	-15,74	-4,69	-3,22
240,00	-22,65	-20,52	-17,23	-4,96	-2,76
260,00	-25,35	-22,64	-19,02	-4,83	-2,24
280,00	-27,95	-24,70	-20,69	-4,99	-1,60
300,00	-31,09	-27,08	-22,57	-5,20	-0,76
320,00	-34,17	-29,48	-24,47	-5,46	0,07
340,00	-37,91	-32,30	-26,55	-5,30	1,23
350,00	-39,74	-33,58	-27,40	-5,05	1,83

Tabela D4- Tensões na viga MI-V3 no lado direito

Cargas (kN)	Tensões lado Direito				
	Tensão S-1	Tensão S-2	Tensão S-3	Tensão S-4	Tensão S-5
0	0	0	0	0	0
20	-0,75	-0,71	-1,15	-0,36	-0,14
40	-1,46	-1,38	-0,52	-0,81	-0,64
60	-2,71	-2,66	-2,73	-1,44	-1,16
80	-4,19	-4,07	-3,98	-1,49	-1,7
100	-5,47	-4,97	-6,02	-2	-2,46
120	-7,58	-6,65	-8,5	-4,16	-2,52
140	-10,19	-9,34	-11,63	-3,24	-1,94
160	-12,63	-11,51	-12,15	-2,97	-1,26
180	-17,05	-16,02	-13,86	-2,84	-0,79
200	-19,8	-18,22	-15,81	-2,45	-0,58
220	-22,03	-19,8	-16,92	-2,58	0,08
240	-25,23	-22,03	-18,95	-5	0,3
260	-26,34	-22,85	-19,54	-5,69	0,25
280	-28,97	-24,51	-20,49	-4,6	-0,07
300	-31,66	-26,14	-20,97	-1,61	-0,77
320	-34,38	-27,76	-21,72	0,62	-1,88
340	-37,78	-30,39	-23,43	2,34	-3,96
360	-42,91	-34,16	-25,93	4,66	-7,8

Tabela D5 –Tensões na viga MI-V3 no lado esquerdo

Tensões Lado Esquerdo			
Carga (kN)	Tensão S-8= σ-8	Tensão S-9= σ-9	Tensão S-12=σ-12
0	0	0	0
20	-0,4	-0,53	-0,31
40	-1,02	-1,09	-0,77
60	-1,99	-1,91	-0,31
80	-3,2	-2,99	-1,08
100	-4,4	-4,03	-1,32
120	-6,06	-5,57	-1,71
140	-8,36	-7,74	-1,7
160	-10,41	-9,56	-1,64
180	-13,5	-12,4	-1,81
200	-15,83	-14,52	-1,83
220	-17,67	-16,12	-1,85
240	-20,36	-18,66	-1,9
260	-23,33	-21,47	-1,93
280	-26,19	-23,96	-1,99
300	-29,07	-26,22	-2,05
320	-31,83	-28,3	-2,09
330	-33,44	-29,44	-2,14
340	-34,81	-30,3	-2,15
360	-38,9	-32,92	-2,25

Tabela D6- Tensões nos extensômetros S-7 a S10

Tensões de Acordo com a Curva da NBR-6118[1]				
Carga (kN)	Tensões S-7 = σ7 (Mpa)	Tensões S-8 = σ8 (Mpa)	Tensões S-9 = σ9 (Mpa)	Tensões S-10 = σ10 (Mpa)
0	0	0	0	0
20	-0,46	-0,57	-0,46	-0,4
40	-0,99	-1,16	-0,93	-0,99
60	-1,41	-1,62	-1,36	-1,92
80	-1,8	-1,98	-1,58	-2,39
100	-2,18	-2,57	-2,15	-3,66
120	-2,87	-3,73	-3,54	-3,2
140	-3,6	-4,5	-4,32	-3,34
160	-4,26	-5,25	-5	-3,61
180	-4,97	-6,07	-5,79	-3,91
200	-5,67	-6,96	-6,63	-4,12
220	-6,3	-7,52	-7,21	-3,87
240	-6,88	-8,27	-7,93	-3,86
260	-8,91	-10,61	-10,08	-3,05
280	-9,67	-11,6	-11,06	-2,57
300	-9,91	-12,25	-11,6	-2,47
320	-10,31	-13,3	-12,39	-2,06
340	-10,65	-13,79	-12,93	-1,85
360	-10,88	-14,25	-13,41	-1,85
380	-11,18	-14,78	-13,98	1,49
400	-11,47	-15,3	-14,57	4,98
420	-10,67	-15,62	-15,51	8,72
440	-10,84	-16,51	-16,72	10,06
460	-11,03	-16,97	-17,23	9,86

Tabela D7- Tensões na viga MII-V-1, nos extensômetros S-11 a S14

Tensões de Acordo com a Curva da NBR-6118[1]				
Carga (kN)	Tensões S-11= σ11 (MPa)	Tensões S-12 = σ12 (MPa)	Tensões S-13 = σ13 (MPa)	Tensões S-14 = σ14 (MPa)
0	0	0	0	0
20	-0,35	-0,24	-0,81	-0,34
40	-0,76	-0,5	-1,25	-0,78
60	-1,27	-1,21	-2,43	-0,75
80	-1,69	-1,6	-2,72	-1,18
100	-1,87	-1,41	-2,76	-1,33
120	-1,81	-1,48	-3,41	-0,79
140	-2,11	-0,75	-4,05	-0,61
160	-2,5	-1,13	-4,77	-0,57
180	-2,89	-1,76	-5,44	-0,39
200	-3,26	-2,31	-6,03	-0,1
220	-3,69	-2,93	-21,21	-0,05
240	-3,83	-3,21	-21,51	-0,45
260	-3,74	-3,26	-21,81	-5,78
280	-3,74	-3,31	-21,87	-6,83
300	-3,76	-3,37	-21,75	-7,79
320	-3,92	-3,74	-21,72	-8,85
340	-4,12	-4,1	-22,12	-9,6
360	-4,35	-4,45	-22,49	-10,73
380	-4,59	-4,84	-22,94	-12,2
400	-4,92	-5,45	-23,53	-14,14
420	-5,25	-6,06	-24,2	-16,3
440	-6,56	-7,83	-25,7	-17,61
460	-7,19	-8,64	-26,39	-18,54

Tabela D8 – Tensões na viga MII-V2 nos extensômetros S-7 a S-10

Carga(kN)	Tensões S-7 = σ7 (MPa)	Tensões S-8 = σ8 (MPa)	Tensões S-9 = σ9 (MPa)	Tensões S-10= σ10 (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	-0,32	-0,32	-0,32	-0,15
40,00	-0,76	-0,75	-0,75	-0,39
60,00	-1,13	-1,12	-1,12	-0,63
80,00	-1,58	-1,54	-1,55	-0,89
100,00	-2,12	-2,08	-2,10	-1,27
120,00	-2,71	-2,72	-2,73	-1,69
140,00	-3,12	-3,16	-3,17	-2,07
160,00	-3,75	-3,78	-3,77	-2,56
180,00	-4,32	-4,39	-4,40	-3,07
200,00	-4,53	-4,66	-4,68	-3,46
220,00	-4,25	-4,34	-4,27	-3,67
240,00	-4,02	-4,13	-4,08	-3,31
260,00	-4,00	-4,12	-4,04	-2,90
280,00	-3,95	-4,10	-4,04	-2,57
300,00	-3,95	-4,12	-4,03	-2,46
320,00	-3,98	-4,22	-4,14	-2,57
340,00	-3,99	-4,23	-4,16	-2,82
360,00	-3,88	-4,20	-4,14	-3,03
380,00	-3,78	-4,17	-4,11	-3,14
400,00	-3,25	-3,67	-3,71	-3,31
420,00	-3,15	-3,59	-3,62	-3,57
440,00	-3,33	-3,90	-3,95	-5,57
460,00	-3,34	-3,92	-4,02	-5,69

Tabela D9- Tensões na viga M-II-V-2 nos extensômetros S-11 a S-14

Carga (kN)	Tensões S-11 = σ11 (MPa)	Tensões S-12 = σ12 (MPa)	Tensões S-13 = σ13 (MPa)	Tensões S-14 = σ14 (MPa)
0,00	0	0	0	0
20,00	-0,27	-0,15	-0,23	-0,18
40,00	-0,57	-0,45	-0,49	-0,39
60,00	-0,84	-0,68	-0,80	-0,62
80,00	-1,12	-0,96	-1,09	-0,85
100,00	-1,53	-1,35	-1,54	-1,20
120,00	-2,02	-1,82	-2,02	-1,58
140,00	-2,46	-2,22	-2,49	-1,94
160,00	-3,02	-2,74	-3,05	-2,38
180,00	-3,65	-3,32	-3,72	-2,90
200,00	-4,09	-3,71	-4,19	-3,27
220,00	-4,34	-3,97	-4,47	-3,49
240,00	-4,21	-3,94	-4,61	-3,59
260,00	-3,91	-3,73	-4,51	-3,52
280,00	-3,62	-3,49	-4,31	-3,36
300,00	-3,53	-3,38	-4,27	-3,33
320,00	-3,73	-3,52	-4,47	-3,49
340,00	-3,97	-3,78	-4,82	-3,76
360,00	-4,21	-4,02	-5,12	-3,99
380,00	-4,38	-4,23	-5,41	-4,22
400,00	-4,64	-4,49	-5,75	-4,49
420,00	-4,98	-4,82	-6,17	-4,81
440,00	-6,84	-6,35	-7,89	-6,16
460,00	-7,25	-6,85	-8,62	-6,73
480,00	-7,47	-7,10	-8,96	-6,99

Tabela D10 – Tensões na viga M-II-V-3 nos extensômetros S-7 a S-10

CargaP/2 (kN)	Tensões S-7 = $\sigma 7$	Tensões S-8 = $\sigma 8$	Tensões S-9 = $\sigma 9$	Tensões S-10 = $\sigma 10$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	-0,64	-0,65	-0,65	-0,56
60,00	-2,16	-2,18	-2,19	-1,95
80,00	-3,06	-3,09	-3,13	-2,76
100,00	-4,05	-4,01	-4,10	-3,58
120,00	-5,01	-4,93	-5,03	-4,40
140,00	-6,24	-6,20	-6,34	-5,52
160,00	-7,16	-7,16	-7,32	-6,33
180,00	-8,30	-8,33	-8,51	-7,28
200,00	-8,95	-9,21	-9,49	-8,06
220,00	-9,29	-9,81	-10,24	-8,70
240,00	-10,07	-10,78	-11,28	-9,54
260,00	-10,97	-11,72	-12,20	-10,29
280,00	-11,92	-12,67	-13,12	-10,99
300,00	-13,03	-13,66	-14,00	-11,62
320,00	-14,36	-14,81	-14,91	-12,23
340,00	-15,66	-15,95	-15,83	-12,81
360,00	-17,06	-17,22	-16,96	-13,66

Tabela D11 – Tensões na viga M-II-V-3 nos extensômetros S-11 a S-12

Carga P/2 (kN)	Tensões S-11 = $\sigma 11$	Tensões S-12 =$\sigma 12$	Tensões S-13 = $\sigma 13$	Tensões S-14 = $\sigma 14$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	-1,02	-0,90	-0,67	-0,69
40,00	-2,00	-1,78	-1,39	-1,38
60,00	-3,15	-2,82	-2,25	-2,17
80,00	-4,42	-3,97	-3,15	-3,03
100,00	-5,58	-5,10	-4,11	-3,93
120,00	-6,71	-6,19	-5,00	-4,82
140,00	-8,17	-7,65	-6,22	-6,01
160,00	-10,14	-9,61	-7,85	-7,68
180,00	-12,30	-11,37	-9,15	-8,85
200,00	-13,84	-12,82	-10,33	-10,00
220,00	-15,24	-14,16	-11,42	-11,05
240,00	-17,03	-15,90	-12,79	-12,37
260,00	-18,30	-17,10	-13,81	-13,37
280,00	-19,64	-18,52	-14,99	-14,51
300,00	-21,55	-20,52	-16,69	-16,13
320,00	-23,30	-22,29	-18,17	-17,55
340,00	-26,60	-24,62	-19,54	-18,46
350,00	-27,34	-25,29	-20,09	-18,94
360,00	-28,10	-25,96	-20,61	-19,43
380,00	-30,15	-27,83	-22,19	-20,91
400,00	-31,51	-29,09	-23,17	-21,83

Tabela D-12- Tensões na viga MIII-V1 nos extensômetros S-1 a S-4

Carga (kN	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-4 = σ4(MPa)	Tensões S3 =σ3 (MPa)	Tensões S-2 = σ2(MPa)	Tensões S-1 = σ1(MPa)
0,00	0	0	0	0
2,00	-0,81	-0,78	-0,77	-0,27
4,00	-1,62	-1,58	-1,54	-0,75
6,00	-2,24	-2,41	-1,18	-0,97
8,00	-4,66	-5,01	-3,59	-3,18
10,00	-6,02	-6,47	-5,03	-4,46
12,00	-7,60	-8,18	-6,77	-7,20
14,00	-9,20	-9,90	-8,38	-9,06
16,00	-11,10	-11,93	-10,29	-11,20
18,00	-12,97	-13,94	-11,92	-14,60
19,17	-13,92	-14,97	-12,97	-15,12

Tabela D13 – Tensões nos na viga MIII-V1 nos extensômetros S-5 a S-8

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-8 = σ8(MPa)	Tensões S-7 =σ7(MPa)	Tensões S-6 = σ6(MPa)	Tensões S-5 = σ5(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-1,90	-2,03	-2,01	-1,88
4,00	-7,17	-7,29	-6,97	-6,34
6,00	-13,87	-14,60	-14,26	-17,16
8,00	-17,90	-19,19	-18,83	-20,95
10,00	-23,00	-24,90	-24,77	-25,77
12,00	-30,93	-33,71	-33,63	-33,36
14,00	-38,76	-42,18	-42,00	-40,82
16,00	-58,66	-63,21	-61,70	-57,63
18,00	-87,52	-94,31	-89,08	-80,55
19,16	-138,25	-151,52	-138,87	-123,74

Tabela D14 – Tensões na viga MIII – V1 nos extensômetros S-9 a S-12

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-12 =σ9(MPa)	Tensões S-11 =σ10(MPa)	Tensões S-10 = σ11(MPa)	Tensões S-9 = σ12(Mpa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,71	-0,76	-0,75	-0,79
4,00	-1,46	-1,51	-1,52	-1,47
6,00	-2,39	-2,48	-2,41	-2,32
8,00	-3,16	-3,33	-3,24	-3,05
10,00	-6,30	-6,55	-6,61	-3,79
12,00	-8,28	-8,59	-8,70	-5,60
14,00	-9,94	-10,36	-10,59	-7,31
16,00	-11,80	-12,43	-12,84	-9,25
18,00	-13,27	-14,03	-14,66	-10,87
19,16	-14,05	-14,85	-15,56	-11,65

Tabela D15-Tensões na Viga MIII-V2 nos Extensômetros S-1 a S-4.

Carga (kN)	Tensões S-4 = σ4(MPa)	Tensões S-3= σ3 (MPa)	Tensões S-2 = σ2(MPa)	Tensões S-1 =σ1(MPa)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,01	-0,26	-0,32	-0,26
4	-0,01	-0,68	-0,75	-0,62
6	-0,01	-0,96	-1,03	-0,86
8	-0,01	-1,32	-1,44	-1,19
10	-0,01	-2,46	-2,53	-2,21
12	-0,64	-3,25	-3,30	-2,85
14	-1,30	-3,92	-3,91	-3,35
16	-1,83	-4,37	-4,36	-3,70
18	-2,25	-4,84	-4,77	-4,09
20	-2,93	-5,63	-5,45	-4,67
22	-3,34	-6,06	-5,87	-5,03
24	-3,92	-6,73	-6,51	-5,55
26	-3,88	-7,27	-6,99	-5,97
28	-6,29	-10,02	-9,20	-7,82
30	-25,91	-11,85	-10,81	-9,08
32	-27,05	-12,98	-11,81	-9,98
34	-27,89	-13,77	-12,48	-10,61
36	-26,28	-15,37	-15,35	-11,85
38	-27,39	-16,36	-16,27	-12,64
40	-28,68	-17,59	-17,38	-13,60
42	-34,39	-22,84	-22,04	-17,44
44	-35,35	-23,61	-22,74	-18,03
46	-38,40	-26,39	-25,29	-20,08

Tabela D16 – Tensões na viga MIII-V2 nos extensômetros S-5 a S-8

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-8 = σ8(MPa)	Tensões S-7 = σ7(MPa)	Tensões S-6 = σ6(MPa)	Tensões S-5 = σ5 (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,12	0,05	0,03	0,53
4,00	0,06	0,02	0,01	0,73
6,00	0,07	0,14	0,10	0,85
8,00	0,25	0,35	0,34	1,20
10,00	0,91	0,98	0,93	1,86
12,00	1,41	1,43	1,33	2,35
14,00	2,05	2,10	1,94	3,05
16,00	2,88	2,96	2,75	3,97
18,00	3,44	3,52	3,23	4,50
20,00	4,38	4,59	4,01	5,41
22,00	4,97	7,76	4,43	5,99
24,00	5,82	8,69	5,32	6,98
26,00	6,77	9,58	6,16	8,13

Tabela D17 – Tensões na viga MIII-V2 nos extensômetros S-9 a S-12

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-9 = σ9 (MPa)	Tensões S-10 = σ10(MPa)	Tensões S-11 = σ11(MPa)	Tensões S-12 = σ12(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,53	-0,41	-0,48	-0,41
4,00	-1,29	-1,16	-1,20	-1,14
6,00	-1,86	-1,62	-1,68	-1,64
8,00	-2,59	-2,25	-2,32	-2,14
10,00	-3,62	-3,17	-3,15	-3,10
12,00	-4,53	-3,97	-3,92	-3,94
14,00	-5,28	-4,67	-4,59	-4,67
16,00	-7,64	-6,91	-6,64	-6,98
18,00	-8,52	-7,71	-7,38	-7,79
20,00	-9,98	-9,03	-8,61	-9,33
22,00	-10,90	-9,83	-9,31	-10,08
24,00	-12,31	-11,03	-10,46	-11,20
26,00	-13,28	-11,90	-11,24	-11,97
28,00	-18,13	-16,34	-15,16	-15,69
30,00	-20,27	-18,13	-16,93	-17,63
32,00	-22,04	-19,72	-17,89	-19,20
34,00	-23,15	-20,66	-18,85	-20,61
36,00	-25,88	-22,56	-20,44	-22,04
38,00	-27,26	-23,75	-21,50	-23,13
40,00	-28,64	-24,92	-22,51	-24,38
42,00	-33,01	-28,22	-25,55	-28,31
44,00	-33,91	-29,02	-26,27	-28,69
46,00	-35,99	-30,65	-27,68	-30,35
48,00	-39,12	-32,93	-29,79	-33,24

Tabela D18 – Tensões na viga MIII-V3 nos extensômetros S-1 a S-4

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-4 = σ4(MPa)	Tensões S-3 = σ3(MPa)	Tensões S-2 = σ2(MPa)	Tensões S-1 = σ1(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,02	-0,33	-0,21	-0,23
4,00	0,98	-1,12	-0,83	-0,83
6,00	-0,14	-1,91	-1,49	-1,49
8,00	-1,02	-2,35	-1,80	-1,81
10,00	-2,85	-3,57	-2,72	-2,79
12,00	-9,27	-9,79	-7,48	-7,71
14,00	-12,66	-13,02	-9,87	-10,18
16,00	-15,65	-16,39	-12,52	-13,07
18,00	-16,44	-19,46	-14,94	-15,70
20,00	-21,69	-22,81	-17,44	-18,50
22,00	-25,40	-27,00	-21,04	-22,22
24,00	-27,33	-29,27	-22,95	-24,27
26,00	-31,46	-34,51	-27,34	-29,11

Tabela D19 – Tensões na viga MIII-V3 nos extensômetros S-6 a S-9.

Carga (kN)	Tensões S-9 = σ9(MPa)	Tensões S-8 = σ8(MPa)	Tensões S-7 = σ7(MPa)	Tensões S-6 = σ6(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,35	-0,35	-0,33	-0,23
4,00	-1,10	-1,22	-1,21	-1,08
6,00	-1,86	-2,34	-2,34	-2,22
8,00	-2,37	-5,05	-5,30	-5,16
10,00	-6,20	-6,76	-7,35	-7,37
12,00	-8,41	-8,43	-9,14	-9,17
14,00	-10,95	-10,43	-11,32	-11,32
16,00	-13,09	-12,09	-13,24	-13,34
18,00	-15,25	-13,87	-15,16	-15,34
20,00	-17,02	-15,64	-17,20	-17,45
22,00	-19,79	-18,78	-20,47	-20,78
24,00	-21,91	-20,59	-22,33	-22,65
26,00	-25,94	-25,30	-27,25	-27,86
28,86	-34,48	-37,37	-40,68	-41,71

Tabela D20 – Tensões na viga MIII-V4 nos extensômetros S-1 a S-4

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118		
	Tensões S-4 = σ4(MPa)	Tensões S-3= σ3(MPa)	Tensões S-1 =σ1(MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,06	-0,15	-0,07
4,00	-0,36	-0,39	-0,28
6,00	-1,24	-0,78	-0,58
8,00	-1,64	-0,99	-0,77
10,00	-2,29	-1,93	-3,07
12,00	-2,85	-1,92	-3,33
14,00	-3,00	-1,79	-0,30
16,00	-3,15	-1,93	-0,39
18,00	-3,30	-1,93	-0,49
20,00	-3,91	0,08	-0,79
22,00	-4,05	1,15	-0,85
24,00	-4,27	0,54	-0,98
26,00	-4,84	-1,68	-1,48
28,00	-6,14	-4,40	-2,31
30,00	-7,64	-5,16	-3,28
32,00	-8,27	-5,32	-3,74
34,00	-9,14	-6,16	-4,60
36,00	-9,70	-6,69	-5,21
38,00	-10,11	-6,87	-5,57
40,00	-10,89	-7,35	-6,25
42,00	-11,70	-7,78	-6,80
44,00	-12,27	-8,21	-7,24
46,00	-13,19	-8,87	-8,02
48,00	-13,45	-9,11	-8,26
50,00	-14,25	-9,73	-8,95
52,00	-15,65	-10,91	-10,18
54,00	-15,88	-11,12	-10,46
56,00	-16,14	-11,36	-10,70
58,10	-16,55	-11,73	-11,05

Tabela D21 – Tensões na viga MIII-V4 extensômetros S-5 a S-8

Carga (kN)	Tensões Calculadas pela curva da NBR-6118[1]			
	Tensões S-8 = σ8(MPa)	Tensões S-7 = σ7(MPa)	Tensões S-6 = σ6 (MPa)	Tensões S-5 = σ5 (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-0,15	-0,14	-0,16	0,06
4,00	-0,49	-0,51	-0,54	-0,04
6,00	-1,04	-1,03	-1,09	-0,48
8,00	-1,40	-1,02	-1,45	-0,84
10,00	-1,77	-4,77	-1,85	0,92
12,00	-1,85	-4,79	-1,96	0,84
14,00	-3,17	-9,39	-3,52	0,61
16,00	-3,62	-9,40	-4,00	0,07
18,00	-4,02	-5,71	-4,49	-0,49
20,00	-4,42	-5,72	-4,82	-0,76
22,00	-4,58	-8,10	-4,77	-1,60
24,00	-4,77	-7,69	-4,97	-1,78
26,00	-5,46	-7,14	-5,36	-1,24
28,00	-5,80	-7,65	-5,71	-6,19
30,00	-6,39	-8,26	-6,29	1,03
32,00	-6,84	-8,82	-6,76	-0,07
34,00	-7,27	-9,20	-7,18	-0,15
36,00	-7,70	-9,63	-7,59	-0,47
38,00	-8,01	-9,98	-7,94	-0,75
40,00	-8,91	-10,90	-8,86	-2,10
42,00	-9,95	-11,95	-9,91	-3,13
44,00	-10,45	-12,48	-10,41	-3,43
46,00	-11,22	-16,35	-11,19	-3,76
48,00	-11,48	-16,52	-11,45	-3,92
50,00	-12,18	-17,20	-12,23	-4,24
52,00	-13,51	-17,41	-13,57	-5,37
54,00	-13,90	-17,73	-13,94	-5,74
56,00	-14,22	-18,07	-14,26	-6,05
56,80	-14,69	-18,54	-14,74	-6,40