

# ESTRUTURAS LAMELARES DE MADEIRA PARA COBERTURAS

**Núbia dos Santos Saad Ferreira**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: **Prof. Dr. Carlito Calil Junior**

São Carlos

1999

*“O Senhor colocou-nos neste mundo para os outros.”*

*São João Bosco*

*A Deus, aos meus pais e ao Rodrigo,  
com muito amor!*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo que sou, que tenho, que posso e que realizo.

Ao mais que orientador, ao amigo Carlito Calil Junior, que não poupou atenção, consideração, incentivo e apoio, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao grande amigo Francisco Antonio Romero Gesualdo, pelo constante e considerável apoio oferecido, sem mensura, no decorrer desta pesquisa.

Ao prezado Dener Gonçalves Prata, pela amizade e contribuição, e à amiga Priscila Maria Penalva Partel, companheira de sala, pelo carinho e pela convivência durante esses dois anos.

Aos colegas, professores e funcionários do LaMEM, pelo convívio nesse período, e especialmente àqueles que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento desta pesquisa.

Aos meus amados pais, Antônio e Marilda, e irmãos, Rosânia e Sarkis, por sua importante e especial participação em minha formação.

Ao Rodrigo, com muito amor e admiração, pela força, compreensão e incentivo em todos os momentos, e aos meus queridos sogro e sogra, Paulo e Aparecida, pelo grande apoio e pelo carinho.

## SUMÁRIO

---

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>5</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA</b>	<b>6</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
<b>4.1 HISTÓRICO</b>	<b>8</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA</b>	<b>28</b>
<b>4.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA ABÓBADA LAMELAR</b>	<b>30</b>
<b>4.3.1 Tipos de Ligações Interlamelares</b>	<b>30</b>
<i>4.3.1.1 Ligações Encaixadas</i>	<b>30</b>
<i>4.3.1.2 Ligações Parafusadas</i>	<b>31</b>
<i>4.3.1.3 Outros Tipos</i>	<b>32</b>
<b>4.3.2 Tipos de Nós da Malha Lamelar</b>	<b>33</b>
<b>4.3.3 Detalhes Geométricos das Lamelas</b>	<b>34</b>
<i>4.3.3.1 Bordas</i>	<b>35</b>
<i>4.3.3.2 Chanfros de Extremidade</i>	<b>36</b>
<b>4.3.4 Montagem da Estrutura</b>	<b>37</b>
<b>4.3.5 Recomendações Geométricas</b>	<b>38</b>
<b>4.4 CÁLCULO DAS ESTRUTURAS LAMELARES</b>	<b>40</b>
<b>4.4.1 Cálculo Simplificado</b>	<b>40</b>

4.4.2	Cálculo Automatizado	42
5	CARREGAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS LAMELARES	43
5.1	ÁREA DE INFLUÊNCIA DE UM NÓ	43
5.2	AÇÕES	44
5.3	COMBINAÇÕES DAS AÇÕES	44
5.3.1	Combinações em Estados Limites Últimos	45
5.3.2	Combinações em Estados Limites de Utilização	45
5.4	VERIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	46
5.4.1	Resistência	46
5.4.2	Estabilidade	47
5.5	VERIFICAÇÃO GLOBAL DA ESTRUTURA	49
5.6	DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS	49
6	MATERIAIS E MÉTODOS	54
6.1	UTILIZAÇÃO DO SAP90	55
6.2	PROTÓTIPO	61
6.2.1	Malha Lamelar	61
6.2.1.1	<i>Madeira Utilizada</i>	61
6.2.1.2	<i>Características Geométricas</i>	69
6.2.1.3	<i>Carregamento</i>	73
6.2.1.4	<i>Cálculo do Protótipo</i>	74
6.2.1.5	<i>Verificações</i>	79
6.2.1.6	<i>Dimensionamento das Ligações</i>	86
6.2.1.7	<i>Confecção das Lamelas</i>	97
6.2.1.8	<i>Montagem da Malha Lamelar</i>	106
6.2.2	Arcos de Extremidade	108
6.2.2.1	<i>Dimensionamento</i>	108
6.2.2.2	<i>Fixação das Lamelas nos Arcos</i>	116
6.2.2.3	<i>Montagem dos Arcos</i>	117
6.2.3	Vigas de Apoio Lateral	121
6.2.3.1	<i>Dimensionamento</i>	121

6.2.3.2	<i>Fixação das Lamelas nas Vigas</i>	124
6.2.3.3	<i>Fixação dos Arcos nas Vigas</i>	131
6.2.3.4	<i>Dimensionamento dos Tirantes</i>	133
6.2.4	<b>Ensaio do Protótipo</b>	135
6.3	<b>DIRETRIZES PARA PROJETO DE ESTRUTURAS LAMELARES</b>	143
7	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	150
8	<b>CONCLUSÕES</b>	154
<b>ANEXOS</b>		
A	<b>RESULTADOS DO CÁLCULO DE UMA ESTRUTURA LAMELAR, OBTIDOS A PARTIR DOS SOFTWARES PORT-TRI E SAP90</b>	157
A.1	<b>Software PORT-TRI</b>	157
A.1.1	<b>Tela do pré-processador de entrada de dados da estrutura</b>	157
A.1.2	<b>Arquivo de dados elásticos-geométricos gerado pelo pré-processador</b>	157
A.1.3	<b>Resultados do cálculo</b>	159
A.2	<b>Software SAP-90</b>	162
A.2.1	<b>Arquivo de entrada de dados</b>	162
A.2.2	<b>Resultados do cálculo</b>	162
B	<b>RESULTADOS DO CÁLCULO DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE PORT-TRI</b>	168
B.1	<b>Carregamento em estados limites últimos</b>	168
B.2	<b>Carregamento em estados limites de utilização</b>	175
C	<b>RESULTADOS DO CÁLCULO DO ARCO DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE SAPP</b>	184
D	<b>RESULTADOS DO CÁLCULO DA VIGA DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE SAPP</b>	187
E	<b>RESULTADOS DO CÁLCULO DO PROTÓTIPO, PARA AS TRÊS ETAPAS DO ENSAIO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE PORT-TRI</b>	192

<b>E.1 1ª Etapa de carregamento</b>	<b>192</b>
<b>E.2 2ª Etapa de carregamento</b>	<b>195</b>
<b>E.3 3ª Etapa de carregamento</b>	<b>198</b>
<b>F - RESULTADOS DO CÁLCULO DO ARCO DO PROTÓTIPO, PARA AS TRÊS ETAPAS DO ENSAIO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE SAPP</b>	<b>202</b>
<b>G - RESULTADOS DO CÁLCULO PARA MAPEAMENTO DE ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS</b>	<b>206</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>214</b>
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR</b>	<b>215</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>1</b>
<b>I – Utilização do Protótipo</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Preparo da Estrutura</b>	<b>2</b>
<b>I.2 Fixação das Telhas</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Içamento e Fixação</b>	<b>9</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>FIGURA 1</b>	Estrutura lamelar de madeira construída na cidade do Rio de Janeiro na década de 50 deste século pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA.	<b>1</b>
<b>FIGURA 2</b>	Protótipo lamelar montado no LaMEM para o desenvolvimento da pesquisa experimental deste trabalho. Dimensões em planta: 5,18 m x 4,00 m.	<b>2</b>
<b>FIGURA 3</b>	Estrutura lamelar de madeira construída em Curitiba – PR em 1927 pela empresa HAUFF.	<b>2</b>
<b>FIGURA 4</b>	Cúpula lamelar de madeira do centro de recreação <i>Pine Hills</i> nos Estados Unidos. Diâmetro: 42,6 m.	<b>3</b>
<b>FIGURA 5</b>	Estrutura lamelar de madeira construída em São Paulo em 1950 pela empresa A. SPILBORGHES & CIA LTDA.	<b>9</b>
<b>FIGURA 6</b>	Estrutura lamelar de madeira construída em São Paulo em 1951 pela empresa A. SPILBORGHES & CIA LTDA.	<b>9</b>
<b>FIGURA 7</b>	Estrutura lamelar de madeira em quatro águas construída no Brasil.	<b>10</b>
<b>FIGURA 8</b>	Estrutura lamelar de madeira construída pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA em sua sede, na cidade de São Paulo, em 1950. Dimensões em planta: 25 m x 40 m.	<b>12</b>
<b>FIGURA 9</b>	Abóbada lamelar de madeira construída na década de 50 pela empresa CALLIA & CALLIA LTDA para cobrir o edifício da Refinadora Paulista S/A em Piracicaba – S.P. Dimensões em planta $\cong$ 37 m x 75 m.	<b>13</b>
<b>FIGURA 10</b>	Estrutura lamelar de madeira do ginásio de <i>esportes Sports Arena</i> , nos Estados Unidos.	<b>14</b>
<b>FIGURA 11</b>	Abóbada lamelar de madeira construída em Moscou para cobertura de um ginásio de esportes.	<b>14</b>
<b>FIGURA 12</b>	Diagramação da cobertura de uma quadra de hóquei construída no Canadá em 1928. Largura da abóbada lamelar: 43 m.	<b>15</b>
<b>FIGURA 13</b>	Estrutura lamelar de madeira construída em Berlim, em 1930.	<b>15</b>
<b>FIGURA 14</b>	Abóbada lamelar cilíndrica em madeira construída para um hangar em Heston, Middlesex, E.U.A.	<b>16</b>
<b>FIGURA 15</b>	Vista externa da <i>Arena Saint Louis</i> , nos E.U.A., coberta por uma abóbada lamelar em madeira, construída em 1929. Dimensões da abóbada em planta: 84 m x 145 m.	<b>16</b>
<b>FIGURA 16</b>	Abóbada lamelar em madeira, apoiada sobre contrafortes.	<b>16</b>
<b>FIGURA 17</b>	Estrutura lamelar de madeira apoiada sobre contrafortes.	<b>17</b>

<b>FIGURA 18</b>	Abóbada lamelar de madeira construída nos Estados Unidos, cujas dimensões em planta são: 50 m x 99 m.	<b>17</b>
<b>FIGURA 19</b>	Estrutura lamelar de madeira, em quatro águas, de um ginásio de esportes construído em Saint Edmund, nos E.U.A. em 1968. Área coberta: 669 m <sup>2</sup> .	<b>18</b>
<b>FIGURA 20</b>	Vista interna de uma igreja construída com o sistema lamelar em madeira.	<b>19</b>
<b>FIGURA 21</b>	Vista interna de uma estrutura lamelar de madeira construída em Saint Edmund - E.U.A., para cobrir uma quadra de tênis de dimensões: 18,3 m x 36,6 m.	<b>19</b>
<b>FIGURA 22</b>	Vista interna de uma cúpula lamelar de madeira do colégio <i>Frederick</i> , em Oklahoma, E.U.A. Diâmetro da cúpula: 30,5 m.	<b>19</b>
<b>FIGURA 23</b>	Vista interna global da Igreja de Saint Albert, construída em 1957, em Leverkusen, Alemanha.	<b>20</b>
<b>FIGURA 24</b>	Vista interna da cobertura da Igreja Christ Transfiguration construída em 1967, em Cologne, Alemanha.	<b>20</b>
<b>FIGURA 25</b>	Cobertura em arcos múltiplos lamelares com madeira laminada colada, construída em Dusseldorf, Alemanha, em 1996. Vão das abóbadas: 42 m.	<b>21</b>
<b>FIGURA 26</b>	Abóbada lamelar em aço, utilizada como cobertura de uma quadra de tênis, construída em cima de um prédio, em Paris.	<b>22</b>
<b>FIGURA 27</b>	Estrutura lamelar em aço para cobertura de uma estação rodoviária em Belfast, Irlanda. Largura: 24 m.	<b>22</b>
<b>FIGURA 28</b>	Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço.	<b>23</b>
<b>FIGURA 29</b>	Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço, para cobertura de um hangar construído em 1935 em Cecchignola, próximo à Roma. Dimensões em planta: 36,6 m x 102,5 m.	<b>23</b>
<b>FIGURA 30</b>	Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço, apoiada sobre contrafortes.	<b>23</b>
<b>FIGURA 31</b>	Vista interna de uma abóbada lamelar construída com elementos treliçados de aço, para cobertura de uma pista de hóquei em Berlim.	<b>24</b>
<b>FIGURA 32</b>	Estrutura lamelar com elementos treliçados de aço, construída na Rússia. Largura da abóbada em planta: 45 m.	<b>24</b>
<b>FIGURA 33</b>	Cúpula lamelar com elementos treliçados de aço, construída em Arkansas, E.U.A.	<b>24</b>
<b>FIGURA 34</b>	Abóbada lamelar com elementos treliçados de aço, construída em 1976 para cobertura do centro esportivo Ujiie, no Japão. Dimensões em planta: 51 m x 54 m.	<b>25</b>
<b>FIGURA 35</b>	Vista interna de um salão coberto por uma cúpula lamelar decorada, em aço.	<b>25</b>

<b>FIGURA 36</b>	Ginásio de esportes coberto por uma cúpula lamelar em aço, construído em Louisiana, E.U.A., em 1971. Dimensões: 207 m de diâmetro e 30,5 m de altura.	<b>26</b>
<b>FIGURA 37</b>	Maquete de uma estrutura lamelar constituída por elementos pré-fabricados de concreto armado, construída nos E.U.A. em 1961.	<b>26</b>
<b>FIGURA 38</b>	Palacete dos Esportes construído em Roma, em 1957, coberto por uma cúpula lamelar composta por elementos pré-moldados de concreto armado. Diâmetro da cúpula: 80 m.	<b>27</b>
<b>FIGURA 39</b>	Estrutura lamelar de concreto armado pré-moldado apoiada sobre contrafortes, de um hangar construído em Orvieto, Itália.	<b>27</b>
<b>FIGURA 40</b>	Representação da malha da abóbada lamelar cilíndrica.	<b>28</b>
<b>FIGURA 41</b>	Elementos geométricos do arco da abóbada cilíndrica.	<b>29</b>
<b>FIGURA 42</b>	Unidade da malha lamelar.	<b>29</b>
<b>FIGURA 43</b>	Representação da ligação interlamelar encaixada.	<b>31</b>
<b>FIGURA 44</b>	Representação da ligação interlamelar realizada com um parafuso.	<b>32</b>
<b>FIGURA 45</b>	Representação das ligações interlamelares com a utilização de chapas.	<b>32</b>
<b>FIGURA 46</b>	Ligações interlamelares com chapas embutidas na madeira, que correspondem a articulações.	<b>33</b>
<b>FIGURA 47</b>	Tipos de nós da malha lamelar.	<b>34</b>
<b>FIGURA 48</b>	Borda superior curvilínea.	<b>35</b>
<b>FIGURA 49</b>	Borda superior com chanfros.	<b>36</b>
<b>FIGURA 50</b>	Chanfros de extremidade da lamela.	<b>36</b>
<b>FIGURA 51</b>	Esquema de montagem da estrutura lamelar.	<b>37</b>
<b>FIGURA 52</b>	Desenho de um andaime utilizado para a montagem das estruturas lamelares.	<b>38</b>
<b>FIGURA 53</b>	Elementos da geometria da lamela.	<b>39</b>
<b>FIGURA 54</b>	Seção transversal da lamela composta por madeira compensada e maciça.	<b>40</b>
<b>FIGURA 55</b>	Seções transversais consideradas para o arco lamelar.	<b>41</b>
<b>FIGURA 56</b>	Decomposição do momento fletor na lamela.	<b>41</b>
<b>FIGURA 57</b>	Decomposição do esforço normal nas lamelas.	<b>42</b>
<b>FIGURA 58</b>	Área de influência de um nó da malha lamelar.	<b>43</b>
<b>FIGURA 59</b>	Condições de extremidade das barras.	<b>46</b>
<b>FIGURA 60</b>	Representação do eixo de menor inércia.	<b>47</b>
<b>FIGURA 61</b>	Espessuras de penetração do pino.	<b>50</b>

<b>FIGURA 62</b>	Esforços atuantes nas extremidades da lamela, utilizados para o dimensionamento da ligação.	<b>51</b>
<b>FIGURA 63</b>	Representação das direções dos esforços que produzem momentos devidos à excentricidade da ligação, onde “X” indica o vetor de $V_{1,y}$ ou $V_{2,y}$ normal ao plano.	<b>52</b>
<b>FIGURA 64</b>	Malha planificada, com os nós e barras numerados	<b>55</b>
<b>FIGURA 65</b>	Situação de simetria da estrutura.	<b>56</b>
<b>FIGURA 66</b>	Eixos das extremidades das barras referenciados pelo identificador LR.	<b>58</b>
<b>FIGURA 67</b>	Sentidos positivos para os esforços atuantes nas extremidades das barras.	<b>58</b>
<b>FIGURA 68</b>	Lote de madeira serrada da espécie taeda, do gênero Pinus.	<b>63</b>
<b>FIGURA 69</b>	Representação da malha da abóbada, considerada aberta em um plano horizontal, e do arco da abóbada.	<b>70</b>
<b>FIGURA 70</b>	Elementos da geometria do arco lamelar do protótipo.	<b>71</b>
<b>FIGURA 71</b>	Arco relativo a uma unidade de malha lamelar, em plano transversal à abóbada.	<b>71</b>
<b>FIGURA 72</b>	Geometria da lamela. Desenhos sem escala. [Unidade: cm].	<b>72</b>
<b>FIGURA 73</b>	Coordenadas locais referentes às extremidades das barras da estrutura.	<b>74</b>
<b>FIGURA 74</b>	Vista global do protótipo apoiado sobre dois arcos de madeira laminada colada e duas vigas de madeira maciça.	<b>75</b>
<b>FIGURA 75</b>	Situação em que os arcos ficam encostados em pilares, impedidos de saírem de seus planos.	<b>76</b>
<b>FIGURA 76</b>	Numeração dos nós e das barras da malha lamelar.	<b>77</b>
<b>FIGURA 77</b>	Representação de uma lamela projetada em um plano transversal à abóbada, para visualização do eixo considerado para as barras.	<b>78</b>
<b>FIGURA 78</b>	Excentricidade referente à seção transversal mediana da lamela, formada entre seu centro de gravidade e o eixo adotado para a barra.	<b>79</b>
<b>FIGURA 79</b>	Representação de uma barra com extremidades contínua/articulada, e dos esforços atuantes neste caso.	<b>80</b>
<b>FIGURA 80</b>	Esforços atuantes na barra de número 2 do protótipo, extraídos do Anexo B.1. [Unidades: kN e cm].	<b>81</b>
<b>FIGURA 81</b>	Representação das coordenadas globais da estrutura.	<b>86</b>
<b>FIGURA 82</b>	Representação da ligação interlamelar do protótipo.	<b>87</b>
<b>FIGURA 83</b>	Representação dos eixos adotados para as barras, projetados no plano transversal da abóbada e em suas posições reais.	<b>88</b>

<b>FIGURA 84</b>	Valores para $\beta/2$ considerados no cálculo do ângulo formado entre os eixos adotados para as barras em suas posições efetivas.	<b>89</b>
<b>FIGURA 85</b>	Representação dos esforços atuantes nas extremidades das barras, utilizados para o cálculo da ligação.	<b>90</b>
<b>FIGURA 86</b>	Exemplo para verificação da ligação interlamelar.	<b>90</b>
<b>FIGURA 87</b>	Representação de esforços gerados pela excentricidade da ligação.	<b>91</b>
<b>FIGURA 88</b>	Esforços das barras 1 e 24 que produzem momentos na barra 2.	<b>92</b>
<b>FIGURA 89</b>	Esforços totais atuantes na barra de número 2. [Unidades: kN e cm].	<b>93</b>
<b>FIGURA 90</b>	Posicionamento dos furos nas lamelas.	<b>97</b>
<b>FIGURA 91</b>	Tipos de lamelas confeccionados.	<b>97</b>
<b>FIGURA 92</b>	Comprimento teórico e efetivo de meia lamela.	<b>98</b>
<b>FIGURA 93</b>	Geometria das lamelas do tipo 1.	<b>99</b>
<b>FIGURA 94</b>	Geometria das lamelas do tipo 2.	<b>99</b>
<b>FIGURA 95</b>	Geometria das lamelas do tipo 3.	<b>100</b>
<b>FIGURA 96</b>	Representação do nó relativo à junção da extremidade das lamelas do tipo 3, com a viga de apoio lateral e o arco de extremidade.	<b>101</b>
<b>FIGURA 97</b>	Representação da ligação parafusada e da redução do comprimento das lamelas do tipo 3.	<b>101</b>
<b>FIGURA 98</b>	Geometria das lamelas do tipo 4.	<b>102</b>
<b>FIGURA 99</b>	Geometria das lamelas do tipo 5.	<b>102</b>
<b>FIGURA 100</b>	Geometria das lamelas do tipo 6.	<b>103</b>
<b>FIGURA 101</b>	Representação do nó relativo à junção da extremidade da lamela do tipo 6, com a viga de apoio lateral e o arco de extremidade.	<b>103</b>
<b>FIGURA 102</b>	Esboço em vista superior do gabarito elaborado para a confecção do chanfro da borda superior da lamela.	<b>104</b>
<b>FIGURA 103</b>	Execução dos chanfros de extremidade responsáveis pela curvatura da estrutura.	<b>104</b>
<b>FIGURA 104</b>	Execução dos chanfros de extremidade responsáveis pela modulação losangular da malha.	<b>105</b>
<b>FIGURA 105</b>	Execução dos furos das lamelas.	<b>105</b>
<b>FIGURA 106</b>	Tratamento preservativo nas lamelas.	<b>106</b>
<b>FIGURA 107</b>	Detalhe da ligação parafusada entre três lamelas.	<b>107</b>
<b>FIGURA 108</b>	Montagem da malha lamelar.	<b>107</b>
<b>FIGURA 109</b>	Vista superior de um trecho da malha montada.	<b>108</b>
<b>FIGURA 110</b>	Arcos de madeira laminada colada que são apoios de extremidade da malha.	<b>108</b>

<b>FIGURA 111</b>	Elementos da geometria do arco de apoio de extremidade do protótipo.	<b>109</b>
<b>FIGURA 112</b>	Vigas utilizadas para a confecção das lâminas dos arcos.	<b>109</b>
<b>FIGURA 113</b>	Lâminas utilizadas para a construção dos arcos.	<b>110</b>
<b>FIGURA 114</b>	Ações atuantes nos arcos devidos à malha lamelar. [Unidade: $10^{-3}$ kN].	<b>116</b>
<b>FIGURA 115</b>	Representação da ligação entre as lamelas e o arco.	<b>117</b>
<b>FIGURA 116</b>	Vista das extremidades das lamelas fixadas no arco.	<b>118</b>
<b>FIGURA 117</b>	Pesagem dos componentes do adesivo: polioliol (à base de mamona) e pré-polímero (isocianato).	<b>118</b>
<b>FIGURA 118</b>	Gabarito para a montagem dos arcos.	<b>118</b>
<b>FIGURA 119</b>	Aplicação do adesivo por pincelamento, na face da lâmina que será fixada no gabarito.	<b>119</b>
<b>FIGURA 120</b>	Fixação das laminas com prensas móveis.	<b>119</b>
<b>FIGURA 121</b>	Prensas móveis utilizadas para a prensagem das lâminas do arco.	<b>116</b>
<b>FIGURA 122</b>	Vigas laterais em madeira maciça como apoios laterais do protótipo.	<b>121</b>
<b>FIGURA 123</b>	Esforços atuantes nas vigas devidos à malha lamelar e ao arco. [Unidades: $10^{-3}$ kN e cm].	<b>123</b>
<b>FIGURA 124</b>	Ligação entre as extremidades das lamelas e as vigas.	<b>125</b>
<b>FIGURA 125</b>	Representação do entalhe feito na viga para a fixação das lamelas.	<b>126</b>
<b>FIGURA 126</b>	Visualização do ângulo formado entre um plano horizontal e a borda superior de uma lamela projetada no plano transversal da abóbada.	<b>126</b>
<b>FIGURA 127</b>	Representação de uma vista superior da viga, com os três tipos de entalhes executados.	<b>127</b>
<b>FIGURA 128</b>	Representação dos tipos de cunhas confeccionados.	<b>128</b>
<b>FIGURA 129</b>	Posicionamento das vigas através de sarrafos.	<b>129</b>
<b>FIGURA 130</b>	Representação de uma vista superior da viga, com os esforços horizontais para estados limites últimos. [Unidades: $10^{-3}$ kN e cm].	<b>130</b>
<b>FIGURA 131</b>	Representação da seção transversal da viga na região de apoio do arco.	<b>131</b>
<b>FIGURA 132</b>	Vista de um canto da estrutura, onde se fixa a lamela do tipo 3.	<b>132</b>
<b>FIGURA 133</b>	Vista superior da viga, em regiões interceptadas pelos tirantes.	<b>133</b>
<b>FIGURA 134</b>	Instrumentação dos tirantes com extensômetros.	<b>135</b>
<b>FIGURA 135</b>	Instrumentação de alguns nós para a medida de deslocamento vertical.	<b>135</b>

<b>FIGURA 136</b>	Carregamento dos nós do protótipo.	<b>136</b>
<b>FIGURA 137</b>	Aparelho de leitura utilizado no ensaio, composto pela caixa de balanceamento e pelo indicador de deformações.	<b>136</b>
<b>FIGURA 138</b>	Cargas aplicadas nos arcos, devidas à malha lamelar, para as três etapas de carregamento realizadas no ensaio. [Unidade: kN].	<b>138</b>
<b>FIGURA 139</b>	Forças horizontais devidas à malha lamelar e aos arcos de extremidade, absorvidas pelos tirantes. [Unidade: kN].	<b>139</b>
<b>FIGURA 140</b>	Esboço da malha feito pelo pré-processador.	<b>146</b>
<b>FIGURA 141</b>	Plotagem dos esforços normais atuantes nas barras de metade da estrutura.	<b>146</b>
<b>FIGURA 142</b>	Plotagem dos momentos fletores atuantes nas extremidades das barras, em relação ao eixo z.	<b>146</b>
<b>FIGURA 143</b>	Plotagem tridimensional dos deslocamentos verticais dos nós de metade da malha.	<b>146</b>

## LISTA DE TABELAS

---

<b>TABELA 1</b>	Algumas estruturas lamelares de madeira para cobertura construídas pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA.	<b>11</b>
<b>TABELA 2</b>	Diferenças percentuais dos valores dos esforços normais e dos momentos fletores em relação ao eixo de maior inércia, determinados através do PORT-TRI em relação aos determinados pelo SAP90.	<b>59</b>
<b>TABELA 3</b>	Critérios de rejeição ou aceitação da madeira para uso estrutural.	<b>60</b>
<b>TABELA 4</b>	Diferenças percentuais entre os valores dos deslocamentos verticais dos nós determinados através do PORT-TRI e os determinados pelo SAP90.	<b>60</b>
<b>TABELA 5</b>	Critérios de rejeição ou aceitação da madeira para uso estrutural.	<b>62</b>
<b>TABELA 6</b>	Valores de umidade e densidade dos corpos-de-prova e do lote.	<b>65</b>
<b>TABELA 7</b>	Valores de resistência à compressão paralela e módulo de elasticidade longitudinal dos corpos-de-prova ensaiados e do lote.	<b>67</b>
<b>TABELA 8</b>	Carregamentos dos nós da malha da estrutura lamelar.	<b>76</b>
<b>TABELA 9</b>	Valores teóricos e de ensaio das deformações nas barras.	<b>140</b>
<b>TABELA 10</b>	Valores teóricos e de ensaio das deformações nas barras.	<b>141</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

<b>ABNT</b>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>LaMEM</b>	- Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
<b>LTDA.</b>	- Limitada
<b>MLC</b>	- Madeira Laminada Colada
<b>NBR</b>	- Norma Brasileira Registrada
<b>Pf Pr</b>	- Parafuso Passante
<b>PORT-TRI</b>	- Programa para Análise de Pórticos Tridimensionais
<b>S/A</b>	- Sociedade Anônima
<b>SAP</b>	- Structural Analysis Programs
<b>SAPP</b>	- Sistema para Análise de Pórticos Planos

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

### Letras romanas maiúsculas

---

- A** - área de influência, área da seção transversal
- E** - módulo de elasticidade
- E<sub>12%</sub>** - módulo de elasticidade à umidade padrão de 12%
- E<sub>c0,ef</sub>** - valor efetivo do módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira
- F<sub>d</sub>** - valor de cálculo das ações para estados limites últimos
- F<sub>d,uti</sub>** - valor de cálculo das ações para estados limites de utilização
- F<sub>E</sub>** - carga crítica de Euler
- F<sub>Gi,k</sub>** - valor característico de ações permanentes
- F<sub>Qi,k</sub>** - valor característico de ações variáveis
- G** - módulo de elasticidade transversal
- I** - momento de inércia
- K<sub>M</sub>** - coeficiente de correção
- L** - vão
- L<sub>0</sub>** - comprimento teórico de referência
- L<sub>1</sub>** - distância entre elementos de contraventamento
- M** - momento fletor
- M<sub>0</sub>** - momento fletor atuante no arco
- M<sub>1</sub>** - momento fletor atuante na lamela
- M<sub>1,d</sub>** - momento de cálculo na situação de projeto
- M<sub>2</sub>** - momento de torção atuante na lamela
- N<sub>0</sub>** - esforço normal atuante no arco
- N<sub>1</sub>** - esforço normal atuante na lamela
- N<sub>d</sub>** - esforço normal de cálculo
- N<sub>g,k</sub>** - esforço normal característico devido às ações permanentes
- N<sub>q,k</sub>** - esforço normal característico devido às ações variáveis
- P** - carga concentrada
- R** - raio do arco

$R_{N,d}$	- resultante dos esforços normais
$R_{V,d}$	- resultante dos esforços cortantes
$R_{vd}$	- resistência de um pino
$S$	- momento estático
$S_d$	- valor de cálculo das solicitações
$T$	- momento de torção
$U$	- umidade
$V_{12}$	- volume de madeira a 12% de umidade
$V_d$	- esforço cortante de cálculo
$V_{sat}$	- volume de madeira saturada
$W_t$	- módulo de resistência à torção

### **Letras romanas minúsculas**

---

$b$	- espessura
$c_{un}$	- comprimento de uma unidade de malha lamelar
$d$	- diâmetro do pino
$d_0...d_8$	- elementos utilizados para a definição da geometria das lamelas
$d_9...d_{14}$	- elementos utilizados para a definição dos entalhes feitos nas vigas
$d_R$	- valor a ser subtraído do raio teórico para o cálculo da abóbada lamelar
$e$	- espessura da lamela
$e_{1,ef}$	- excentricidade efetiva de primeira ordem
$e_a$	- excentricidade acidental
$e_c$	- excentricidade suplementar de primeira ordem
$e_i$	- excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto
$f_{12}$	- resistência à umidade padrão de 12%
$f_{c0,d}$	- resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira
$f_{c0,k}$	- valor característico da resistência à compressão paralela às fibras da madeira
$f_{c0,m}$	- valor médio da resistência à compressão paralela às fibras da madeira
$f_{c90}$	- resistência à compressão normal às fibras da madeira
$f_{c\alpha}$	- resistência ao embutimento inclinado às fibras da madeira

$f_{e0}$	- resistência da madeira ao embutimento paralelo às fibras
$f_{e90}$	- resistência da madeira ao embutimento normal às fibras
$f_{un}$	- flecha relativa ao arco de uma unidade de malha lamelar
$f_{v0,d}$	- resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira
$f_{y,d}$	- resistência de cálculo do pino metálico ao escoamento
$f_{y,k}$	- resistência característica do pino metálico ao escoamento
$h$	- flecha do arco, altura da peça
$h_e$	- altura da extremidade da lamela
$h_m$	- altura do meio da lamela
$i$	- raio de giração
$k_{mod}$	- coeficiente de modificação
$l_{arco\ un}$	- comprimento do arco relativo a uma unidade de malha lamelar
$l_{lamela}$	- comprimento teórico da lamela
$l_{un}$	- largura de uma unidade de malha lamelar
$m_i$	- massa inicial
$m_s$	- massa seca
$n$	- Número de corpos-de-prova
$p$	- carga distribuída
$r$	- menor raio de curvatura das lâminas da MLC
$t$	- espessura convencional, espessura das lâminas da MLC
$t_1$	- espessura de penetração do pino
$t_2$	- espessura de penetração do pino
$u_{ef}$	- flecha efetiva
$v$	- volume
$x$	- coordenada, corda do arco referente a uma unidade de malha lamelar
$y$	- coordenada
$z$	- coordenada, excentricidade

### Letras gregas

---

$\alpha$	- coeficiente para o cálculo do momento de resistência à torção
----------	---

$\alpha_0$	-	ângulo de abertura de meio arco
$\beta$	-	ângulo interlamelar, razão
$\gamma$	-	peso específica, coeficiente de segurança
$\gamma_Q$	-	coeficiente de ponderação das ações variáveis
$\gamma_s$	-	coeficiente de minoração da resistência do aço
$\varepsilon$	-	deformação específica
$\phi$	-	coeficiente de fluência
$\phi_{par}$	-	diâmetro do parafuso
$\theta_1$	-	ângulo de abertura do arco relativo a uma unidade de malha lamelar
$\theta_e$	-	ângulo referente à excentricidade da ligação
$\pi$	-	constante = 3,14159
$\rho_{ap}$	-	densidade aparente
$\rho_{bas}$	-	densidade básica
$\sigma_{M,d}$	-	valor de cálculo da tensão normal devida ao momento fletor
$\sigma_{Nc0,d}$	-	valor de cálculo da tensão normal devida a esforço compressão axial
$\tau$	-	tensão de torção
$\psi_0$	-	fator de combinação
$\psi_1$	-	fator de utilização
$\psi_2$	-	fator de utilização

## Índices

---

<b>bas</b>	-	básica
<b>c</b>	-	compressão
<b>d</b>	-	de cálculo
<b>e</b>	-	embutimento, extremidade
<b>ef</b>	-	efetivo
<b>G</b>	-	Valores decorrentes de ações permanentes
<b>i</b>	-	inicial
<b>k</b>	-	característico
<b>m</b>	-	médio, meio
<b>mod</b>	-	modificação

- par** - parafuso
- q** - Valores decorrentes de ações variáveis
- s** - aço
- t** - tração
- un** - unidade
- uti** - utilização
- v** - cisalhamento
- y** - escoamento do aço

## RESUMO

---

FERREIRA, N.S.S. (1999). **Estruturas lamelares de madeira para coberturas**. São Carlos, 1999. 217p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

As estruturas lamelares de madeira foram introduzidas na Europa em 1908, no Brasil em 1922 e nos Estados Unidos em 1925. Foram muito empregadas entre as décadas de 20 e 60 para cobrirem ambientes que abrangessem grandes áreas como galpões industriais, ginásios, auditórios, pavilhões de exposição, garagens, depósitos, igrejas, salões de clube e outros. Estas estruturas são constituídas por elementos de barras denominados lamelas, que compõem uma malha losangular tridimensional em formato de abóbada. Este trabalho tem por finalidade a apresentação das recomendações de dimensionamento destas estruturas a partir da determinação dos esforços atuantes nas barras e deslocamentos dos nós, com base na atual norma brasileira NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira. Para esta finalidade foi desenvolvido um abrangente estudo teórico e experimental a respeito do sistema estrutural e construtivo destas estruturas. Os resultados obtidos mostram a viabilidade técnica e econômica (racionalização do uso de materiais) na utilização destas estruturas para coberturas de médios a grandes vãos.

**Palavras-chave:** estrutura de madeira – cobertura; malha segmentada de madeira; abóbada lamelar.

## ABSTRACT

---

FERREIRA, N.S.S. (1999). **Wood segmental-lattice vaults structures for roofs.** São Carlos, 1999. 217p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The wood segmental-lattice vaults were introduced in Europe in 1908, in Brazil in 1922 and in the United States in 1925. They were very used between the twenties and sixties for covering big areas as industrial sheds, gymnasiums, auditoriums, exposition pavilions, garages, storaged structures, churches, club salons and others. These structures are constituted by bar elements that are parts of a three dimensional quadrangular net, forming a vault. The purpose of this work is to present the design recommendations of these structures from the determination of the active efforts on the bars and nodal displacements, with basis on the Brazilian standard NBR 7190:1997 – Timber structures project and, for this purpose, was developed a broad theoretical and an experimental studies about the structural and constructive systems of these structures. The results show the technical and economic viabilities (rationalization in the use of materials) in using these structures for covering medium and long roof spans.

**Key words:** wood structure - roof; wood segmental-lattice; segmental-lattice vault.

## 1 INTRODUÇÃO

---

As estruturas lamelares de madeira são compostas por elementos denominados lamelas que se interligam compondo uma malha losangular tridimensional. As lamelas são peças relativamente longas e de pequena espessura. Esse tipo de estrutura é denominado na língua inglesa por “segmental lattice-vaults” ou por “lamella roof”, e constituem-se de barras interceptadas que formam um conjunto de “X”, compondo uma malha curva denominada abóbada lamelar.

A abóbada lamelar pode ser dos seguintes tipos:

- ▲ cilíndrica, ou seja, com eixo transversal em forma de arco circular, **Figuras 1 e 2**;
- ▲ parabólica, com eixo transversal em forma de arco parabólico;
- ▲ em quatro águas, como apresentado na **Figura 3**; ou
- ▲ em formato de cúpula, **Figura 4**.



**FIGURA 1** – Estrutura lamelar de madeira construída na cidade do Rio de Janeiro na década de 50 deste século pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA.  
**Fonte:** CESAR (1991).



**FIGURA 2** – Protótipo lamelar montado no LaMEM para o desenvolvimento da pesquisa experimental deste trabalho. Dimensões em planta: 5,18 m x 4,00 m.



a) Aspecto geral externo.



b) Aspecto geral interno.

**FIGURA 3** – Estrutura lamelar de madeira construída em Curitiba – PR em 1927 pela empresa HAUFF. Fonte: CESAR (1991).



**FIGURA 4** – Cúpula lamelar de madeira do centro de recreação *Pine Hills* nos Estados Unidos. Diâmetro: 42,6 m. **Fonte:** HUNTINGTON (1975).

Para os casos de abóbada parabólica e de cúpula, as peças não são padronizadas. A maioria das estruturas lamelares construídas é cilíndrica, o que se deve à facilidade de sua execução, principalmente, por seus elementos serem padronizados, PERILLO (1997).

Segundo LOTHERS (1971), o sistema estrutural lamelar foi introduzido na Europa em 1908 e nos Estados Unidos em 1925. No Brasil, isso ocorreu em 1922, PERILLO (1997).

As estruturas lamelares de madeira foram largamente empregadas entre as décadas de 20 e 60 deste século para cobrirem ambientes que abrangessem grandes áreas como galpões industriais, ginásios, auditórios, pavilhões de exposição, garagens, depósitos, igrejas, salões de clube e outros (LOTHERS, 1971).

De acordo com CESAR (1991), um dos exemplos mais antigos de utilização de estruturas lamelares no Brasil é a estrutura de cobertura do edifício da Malharia Curitibana, em Curitiba, Paraná, construída pela empresa HAUFF em 1927, **Figura 3**.

---

PERILLO, E. (1997). (Sede da empresa TEKNO S.A., São Paulo). **Comunicação Pessoal.**

A **Figura 1** representa uma estrutura executada pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA. na cidade do Rio de Janeiro, na década de 50 para servir de depósito, CESAR (1991).

Este tipo de estrutura foi inicialmente estudado em nível de graduação, com o desenvolvimento do projeto de iniciação científica intitulado “Avaliação e Automatização do Cálculo de Estruturas Lamelares”, SAAD (1996). Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo.

## **2 OBJETIVOS**

---

Este trabalho tem como objetivos a investigação de obras construídas com a utilização de estruturas lamelares de madeira para coberturas, e o desenvolvimento de um estudo teórico, numérico e experimental deste tipo estrutural, propondo as recomendações para seu dimensionamento com base na atual norma brasileira para projeto de estruturas de madeira, a NBR 7190:1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### 3 JUSTIFICATIVA

---

O sistema estrutural do tipo lamelar gera uma forma tridimensional leve e visualmente agradável, conjugada ao eficiente comportamento estático (abóbada), com a vantagem de uma composição harmônica de distribuição de elementos, e conseqüentemente de esforços, descaracterizando planos específicos de rigidez.

Podem ser ponderadas outras vantagens quanto ao uso deste tipo de estrutura:

- ▲ a principal vantagem se refere ao aspecto da industrialização das construções, já que as lamelas são padronizadas e podem ser confeccionadas em ambiente industrial;
- ▲ há a possibilidade de utilização de peças de comprimento reduzido, que se adapta ao caso de madeiras de florestamento;
- ▲ há possibilidade de se fixarem os elementos de vedação diretamente sobre a estrutura, dispensando-se o uso de peças intermediárias, como as terças;
- ▲ o sistema lamelar é de fácil e rápida montagem, e sua construção requer mão-de-obra de fácil treinamento;
- ▲ a abóbada lamelar apresenta bela superfície interna, conferida pela modulação losangular deste sistema tridimensional.

A partir do estudo destas estruturas em nível de iniciação científica (SAAD, 1996), obteve-se uma visão mais abrangente sobre o tema e novos horizontes foram abertos, havendo necessidade de um maior tempo para o desenvolvimento de outros estudos, principalmente com relação ao dimensionamento das estruturas lamelares com base na atual norma brasileira para projeto de estruturas de madeira, ABNT (1997).

Com o exposto, constatou-se que a continuidade deste trabalho, realizado em nível de mestrado, é de grande importância ao prosseguimento da investigação das estruturas lamelares de madeira.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 4.1 HISTÓRICO

---

O período compreendido entre o final dos anos vinte e meados dos anos cinquenta do século XX é denominado por GRANDI (1985) como sendo o terceiro período da indústria da construção civil no Brasil, no qual o subsetor de edificações apresentou uma intensa produção, a qual pode ser considerada ímpar na história da construção civil brasileira. Este fenômeno se deu em função da mudança na economia brasileira que antes era agro-exportadora, passando para uma economia industrial, o que ocasionou o crescimento acelerado principalmente das grandes cidades da região centro-sul do país.

Com a evidência do desenvolvimento das cidades, o subsetor de edificações da construção civil expandiu-se grandemente e, em conseqüência, também o ramo das empresas que tinham sua produção voltada para a construção de estruturas de madeira. Muitas destas empresas foram fundadas por engenheiros e/ou carpinteiros de origem européia, sendo a HAUFF um exemplo delas.

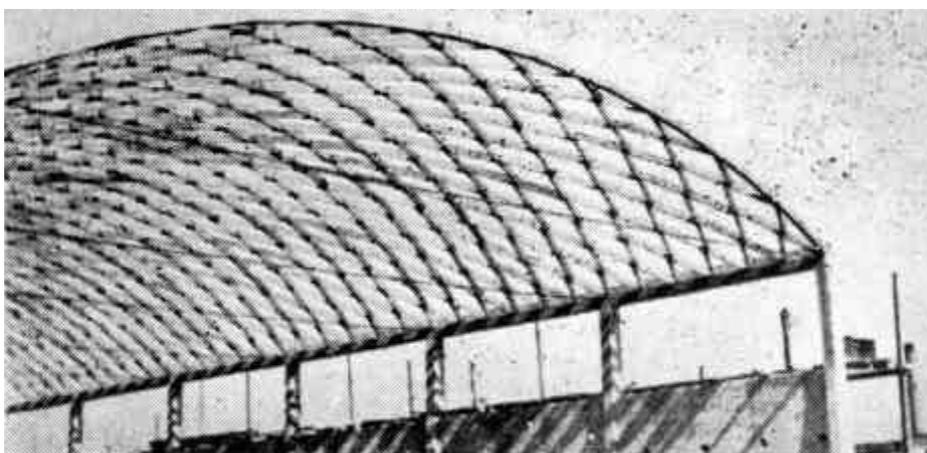
CESAR (1991) relata que, no início deste período de expansão da construção civil verificou-se uma grande mudança na arte de projetar e executar estruturas de madeira. Isto decorreu da vinda de muitos engenheiros europeus, que foram responsáveis pela introdução de novos sistemas construtivos no Brasil, os quais foram possíveis de serem executados graças a uma mão-de-obra também imigrante que transferiu este novo processo de construir em madeira a carpinteiros brasileiros.

Neste período, a partir do exemplo da HAUFF, foram surgindo várias empresas que adotaram o sistema estrutural lamelar de madeira na construção de edificações que abrangessem grandes áreas. Como exemplo, podem ser citadas as empresas: SOCIEDADE TEKNO LTDA., CALLIA & CALLIA, A.SPILBORGHS & CIA LTDA., dentre outras, CALLIA (1951).

As **Figuras 5 e 6** mostram duas estruturas lamelares de madeira construídas em São Paulo na década de cinquenta pela empresa A.SPILBORGHS & CIA LTDA. Na **Figura 7** está representada uma estrutura lamelar de madeira em quatro águas construída no Brasil.



**FIGURA 5** – Estrutura lamelar de madeira construída em São Paulo em 1950 pela empresa A. SPILBORGHS & CIA LTDA. Fonte: ESTRUTURA (1951).



**FIGURA 6** – Estrutura lamelar de madeira construída em São Paulo em 1951 pela empresa A. SPILBORGHS & CIA LTDA. Fonte: OBRA (1952).



**FIGURA 7** – Estrutura lamelar de madeira em quatro águas construída no Brasil.  
**Fonte:** MOLITERNO (1981).

A empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA. construiu, em 1950, uma estrutura lamelar de madeira em sua sede, na cidade de São Paulo, cujas dimensões de sua projeção horizontal são de 25 m x 40 m. Alguns aspectos desta estrutura estão apresentados na **Figura 8**.

Cabe acrescentar que a SOCIEDADE TEKNO LTDA. construiu estruturas lamelares de madeira apenas de 1950 a 1955. Desde então, a empresa mudou sua razão social para TEKNO S.A., passando a construir estruturas em aço. Algumas estruturas lamelares de madeira projetadas e construídas pela SOCIEDADE TEKNO LTDA. estão listadas na **Tabela 1**. Tal empresa construiu quase duzentas abóbadas lamelares cilíndricas, sendo sua grande maioria executada no estado de São Paulo, PERILLO\* (1997).

A empresa CALLIA & CALLIA LTDA executou uma estrutura lamelar de madeira em Piracicaba – S.P., na década de cinquenta, para cobrir um armazém de açúcar (Refinadora Paulista S/A). As dimensões em projeção horizontal desta estrutura são de aproximadamente 37 m x 75 m, CALLIA (1951). Constatou-se que esta estrutura lamelar ainda existe em boas condições, quando da visita realizada à mesma em agosto de 1997, mas o edifício se encontra desocupado, **Figura 9**.

---

\* PERILLO, E. (1997). (Sede da empresa TEKNO S.A., São Paulo). **Comunicação Pessoal**.

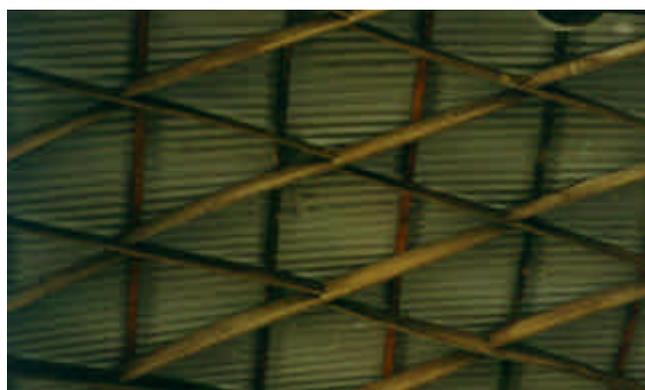
**TABELA 1** – Algumas estruturas lamelares de madeira para cobertura construídas pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA. **Fonte:** PERILLO\* (1997).

ANO	NOME E LOCAL DA EDIFICAÇÃO
1950	AERO CLUB DE CATANDUVA - Catanduva - S.P. BELARDI E VILABOIM - Interlagos - R.J. CERÂMICA MARTINI - Mogi Guaçu - S.P. CERÂMICA PORTO FERREIRA - Porto Ferreira - S.P. CIA. BANDEIRANTES DE ARMAZÉNS GERAIS - Santos - S.P. CIA. REFRIGERANTES CRUSH - São Paulo - S.P. C. I. SOUZA NOSCHESSE - São Paulo - S.P. DIANDA E CIA - Ribeirão Pires - S.P. ESPORTE CLUBE SÃO JORGE - São Paulo - S.P. FULVIO NANNI - São Paulo - S.P. MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA - Guaratinguetá - S.P. SOCIEDADE ANÔNIMA MOINHO SANTISTA - Ourinhos - S.P. TÉCNICA DE ENG. CIVIL E SANITÁRIA - São Paulo - S.P.
1951	CIA. PAULISTA DE AUTOMÓVEIS - São Paulo - S.P. FÁBRICA DE CALÇADOS PLUK - Campinas - S.P. H. S. CALOI - São Paulo - S.P. SANBRA - Ribeirão Preto - S.P.
1952	AUTO PEÇAS PRUDENTINA - Presidente Prudente - S.P. CLUBE ATLÉTICO RHODIA - Santo André - S.P.
1953	ANTONIO A. AZEVEDO - Botucatu - S.P. CIA. BANDEIRANTES DE ARMAZÉNS GERAIS - Santos - S.P. FÁBRICA ELCLOR - Rio Grande - S.P. IND. PIANOS SCHWARTZMANN - Mogi das Cruzes - S.P. JESUS S/A - Presidente Prudente - S.P. SPORT CLUBE BRILHANTE - Pelotas - R.S. TÊNIS CLUBE DE BOTUCATU - Botucatu - S.P.
1954	CASA ANGLO BRASILEIRA - São Paulo - S.P. INDÚSTRIAS QUÍMICAS ELETRO CLORO - Rio Grande - S.P.
1955	CERÂMICA ASSAD - Piraporinha - S.P. ESTRADA DE FERRO SOROCABANA - Sorocaba - S.P. NUNES JULIANE - São Paulo - S.P. RODIACETA - Santo André - S.P. SANBRA - Adamantina - S.P.

\* PERILLO, E. (1997). (Sede da empresa TEKNO S.A., São Paulo). **Comunicação Pessoal.**



a) Vista interna global da estrutura.



b) Vista interna de um trecho da malha lamelar.



c) Detalhe da malha lamelar.

**FIGURA 8** - Estrutura lamelar de madeira construída pela empresa SOCIEDADE TEKNO LTDA em sua sede, na cidade de São Paulo, em 1950. Dimensões em planta 25 m x 40 m. **Fonte: PERILLO\*** (1997).

---

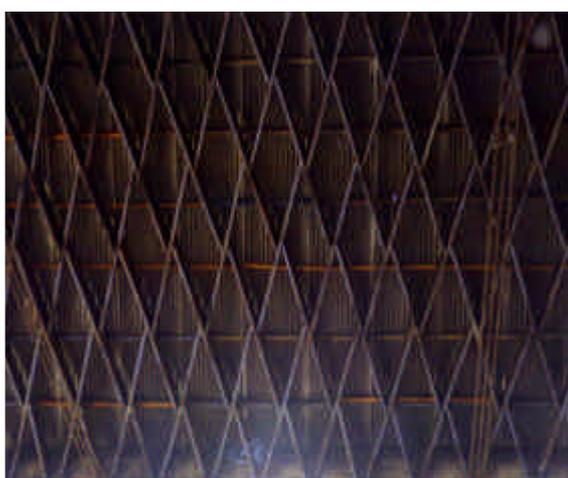
\* PERILLO, E. (1997). (Sede da empresa TEKNO S.A., São Paulo). **Comunicação Pessoal.**



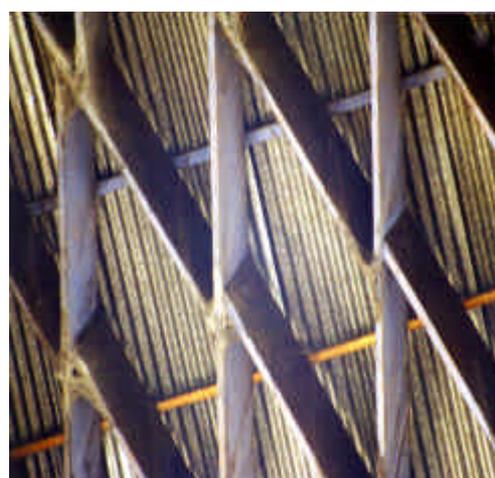
a) Vista frontal interna da edificação.



b) Aspecto geral interno da estrutura lamelar.



c) Vista da malha lamelar.



d) Detalhe da ligação interlamelar.

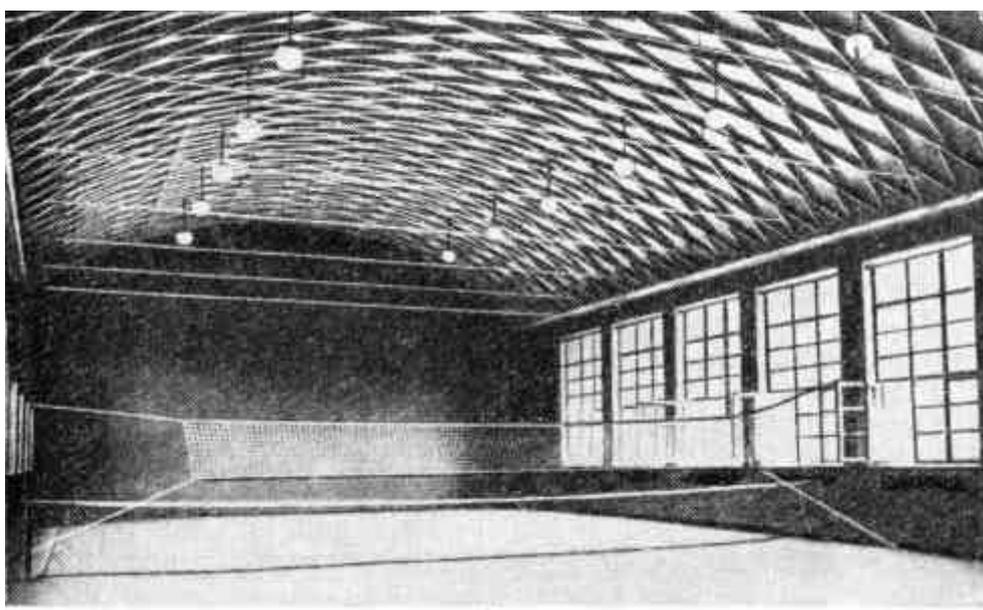
**FIGURA 9\***– Abóbada lamelar de madeira construída na década de 50 pela empresa CALLIA & CALLIA LTDA para cobrir o edifício da Refinadora Paulista S/A em Piracicaba – S.P. Dimensões em planta  $\cong$  37 m x 75 m.

\* Fotos tiradas da estrutura lamelar da edificação desocupada – Piracicaba – S.P., em agosto de 1997.

Neste trabalho são apresentadas, também, algumas estruturas lamelares de madeira construídas em outros países, **Figuras 4 e de 10 a 25**.



**FIGURA 10** – Estrutura lamelar de madeira do ginásio de esportes *Sports Arena*, nos Estados Unidos. **Fonte: LOTHERS (1971)**.



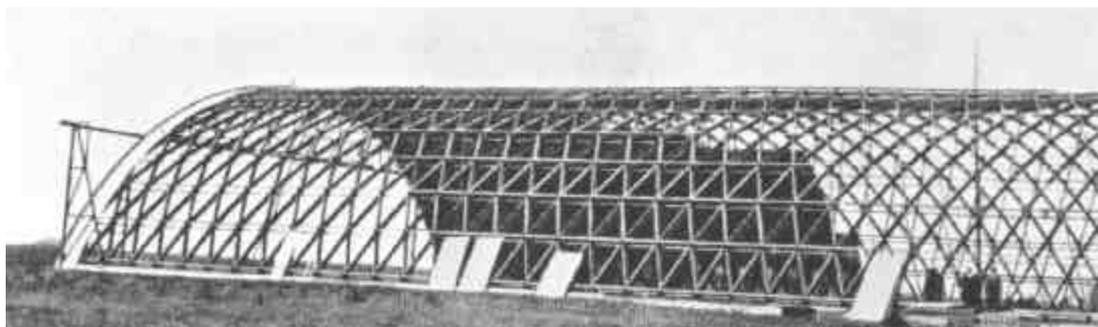
**FIGURA 11** - Abóbada lamelar de madeira construída em Moscou para cobertura de um ginásio de esportes. **Fonte: KARLSEN et al. (1976)**.



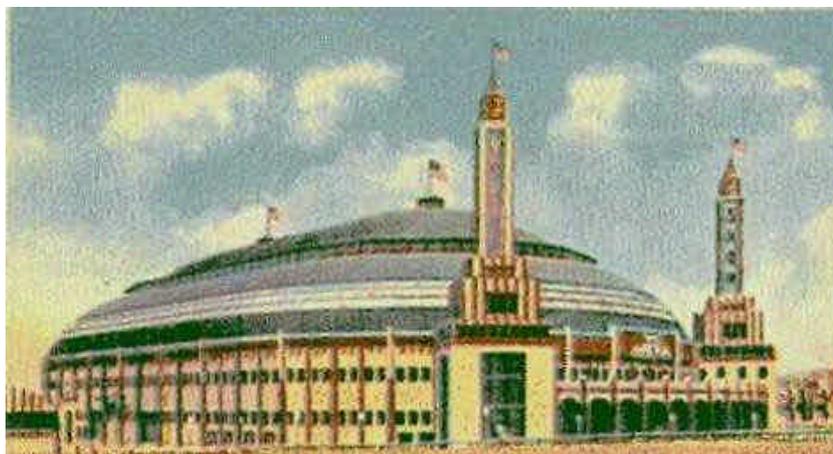
**FIGURA 12** – Diagramação da cobertura de uma quadra de hóquei construída no Canadá em 1928. Largura da abóbada lamelar: 43 m. Fonte: **BUFFALO** bison: peace bridge arena (1928).



**FIGURA 13** - Estrutura lamelar de madeira construída em Berlim, em 1930. Fonte: **VON BÜREN** (1985).



**FIGURA 14** – Abóbada lamelar cilíndrica em madeira construída para um hangar em Heston, Middlesex, E.U.A. Fonte: CASSIE & NAPPER (1958).



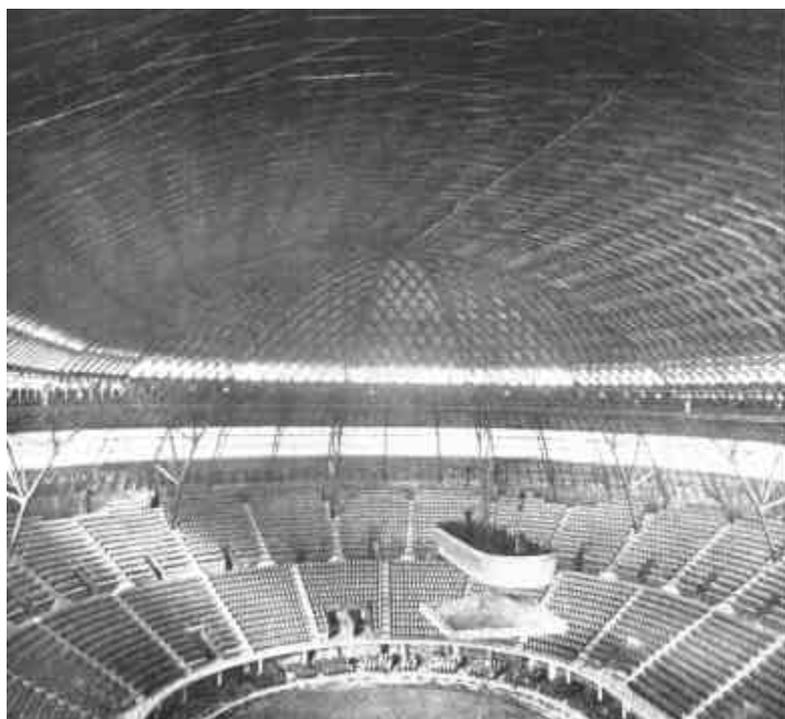
**FIGURA 15** – Vista externa da *Arena Saint Louis*, nos E.U.A., coberta por uma abóbada lamelar em madeira, construída em 1929. Dimensões da abóbada em planta: 84 m x 145 m. Fonte: KIEWITT (1929).



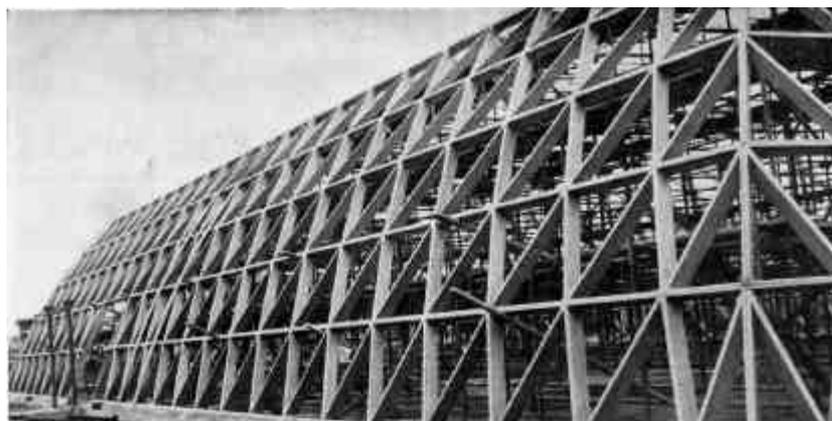
**FIGURA 16** – Abóbada lamelar em madeira, apoiada sobre contrafortes. Fonte: CASSIE & NAPPER (1958).



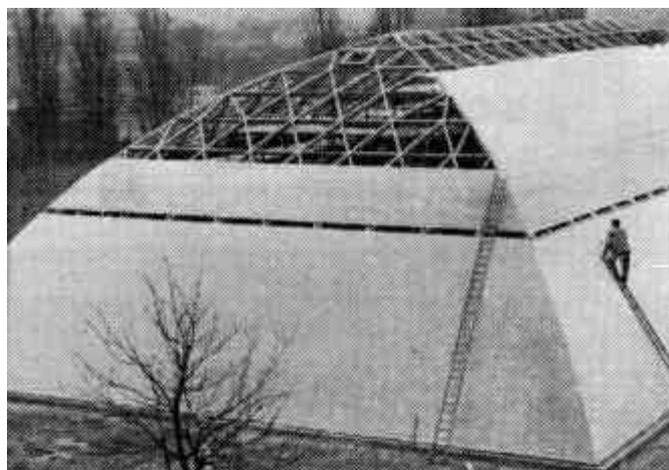
**FIGURA 17** – Estrutura lamelar de madeira apoiada sobre contrafortes.  
Fonte: SCHEER & PURNOMO (1985).



**FIGURA 18** – Abóbada lamelar de madeira construída nos Estados Unidos, cujas dimensões em planta são de 50 m x 99 m. Fonte: CASSIE & NAPPER (1958).



a) Vista externa lateral.



b) Vista externa global.



c) Vista interna.

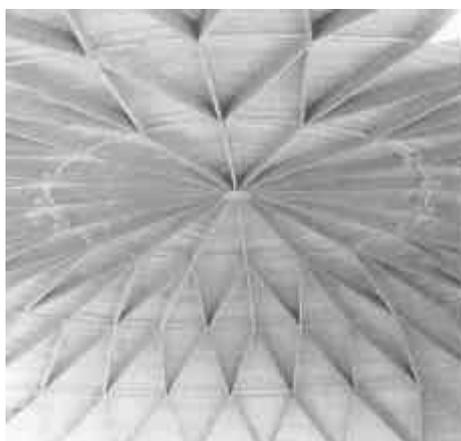
**FIGURA 19** – Estrutura lamelar de madeira, em quatro águas, de um ginásio de esportes construído em Saint Edmund, nos E.U.A. em 1968. Área coberta: 669 m<sup>2</sup>.  
Fonte: HUNTINGTON (1975).



**FIGURA 20** – Vista interna de uma igreja construída com o sistema lamelar em madeira.  
**Fonte: CRANE (1955).**



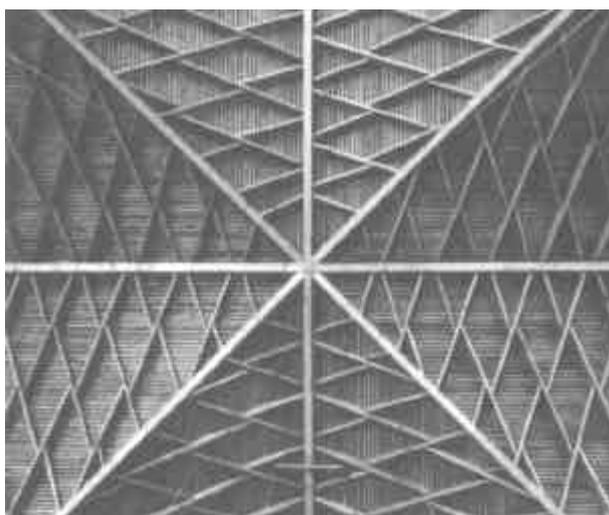
**FIGURA 21** – Vista interna de uma estrutura lamelar de madeira construída em Saint Edmund, E.U.A., para cobrir uma quadra de tênis de dimensões 18,3 m x 36,6 m. **Fonte: MAKOWSKI (1985).**



**FIGURA 22** – Vista interna de uma cúpula lamelar de madeira do colégio *Frederick*, em Oklahoma, E.U.A. Diâmetro da cúpula: 30,5 m. **Fonte: MAKOWSKI (1984).**



**FIGURA 23** – Vista interna global da Igreja de *Saint Albert*, construída em 1957, em Leverkusen, Alemanha. Fonte: NATTERER et al. (1994).



**FIGURA 24** – Vista interna da cobertura da Igreja *Christ Transfiguration*, construída em 1967, em Cologne, Alemanha. Fonte: NATTERER et al. (1994).

A partir da investigação de estruturas lamelares de madeira construídas, descobriu-se que existe uma empresa dinamarquesa KERTO *Furnierschichtholz* que, atualmente, constrói estruturas lamelares com a utilização de elementos confeccionados com madeira laminada colada (MLC), **Figura 25**. A utilização de MLC para a construção do tipo estrutural lamelar consiste em ótima alternativa, principalmente para se vencerem grandes vãos, pois consegue-se confeccionar peças de quaisquer tamanhos.



a) Vista externa global.



b) Vigas com chapas metálicas para a fixação das extremidades das lamelas.



c) Encaixes interlamelares.



d) Detalhe da fixação das lamelas na viga.



e) Vista interna da malha lamelar.



f) Vista interna da estrutura montada.

**FIGURA 25** - Cobertura em arcos múltiplos lamelares com madeira laminada colada, construída em Dusseldorf, Alemanha, em 1996. Vão das abóbadas: 42 m. Fonte: **HOLTZBAUTEN in Nordrhein-Westfalen (1997)**.

A partir da pesquisa bibliográfica realizada, constatou-se a existência de estruturas lamelares executadas com elementos confeccionados em aço ou em concreto armado pré-moldado, **Figuras 26 a 39**.



**FIGURA 26** – Abóbada lamelar em aço utilizada como cobertura de uma quadra de tênis, construída em cima de um prédio, em Paris. **Fonte: MAKOWSKI (1985)**.



**FIGURA 27** – Estrutura lamelar em aço para cobertura de uma estação rodoviária em Belfast, Irlanda. Largura: 24 m. **Fonte: CASSIE & NAPPER (1958)**.



**FIGURA 28** – Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço.  
**Fonte:** KARLSEN (1976).



**FIGURA 29** – Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço, para cobertura de um hangar construído em 1935, em Cecchignola, próximo à Roma. Dimensões em planta: 36,6 m x 102,5 m. **Fonte:** MAKOWSKI (1985).



**FIGURA 30** – Abóbada lamelar constituída por elementos treliçados de aço, apoiada sobre contrafortes. **Fonte:** MAKOWSKI (1985).



**FIGURA 31** – Vista interna de uma abóbada lamelar construída com elementos treliçados de aço, para cobertura de uma pista de hóquei em Berlim. **Fonte:** ZEMAM (1985).



**FIGURA 32** – Estrutura lamelar com elementos treliçados de aço construída na Rússia. Largura da abóbada em planta: 45 m. **Fonte:** ZEMAN (1985).



**FIGURA 33** – Cúpula lamelar com elementos treliçados de aço, construída em Arkansas, E.U.A. **Fonte:** MAKOWSKI (1984).



a) Vista interna.



b) Vista externa.

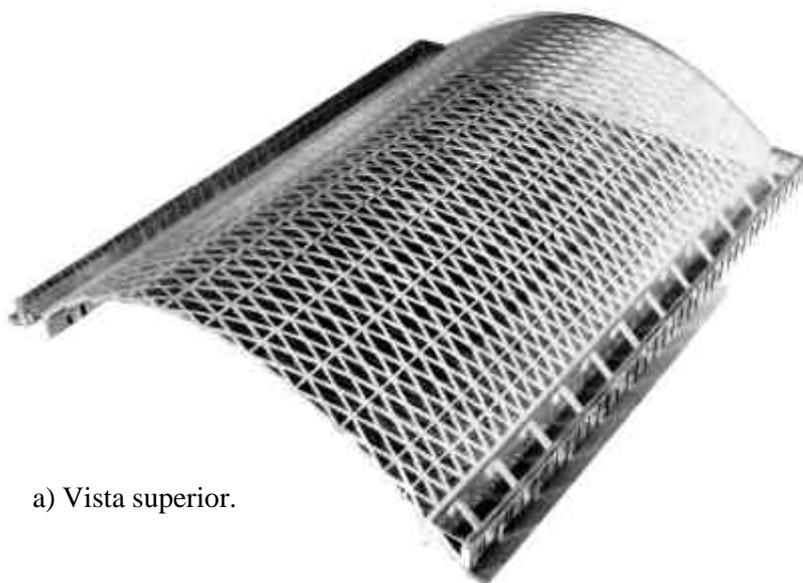
**FIGURA 34** – Abóbada lamelar com elementos treliçados de aço construída em 1976 para cobertura do centro esportivo *Ujii*, no Japão. Dimensões em planta: 51 m x 54 m. **Fonte: MATSUSHITA (1984).**



**FIGURA 35** – Vista interna de um salão coberto por uma cúpula lamelar decorada, em aço. **Fonte: CRANE (1955).**



**FIGURA 36** – Ginásio de esportes coberto por uma cúpula lamelar em aço, construído em Louisiana, E.U.A., em 1971. Dimensões: 207 m de diâmetro e 30,5 m de altura. Fonte: CORPORATION OF MONTGOMERY (1975).



a) Vista superior.



b) Vista frontal.

**FIGURA 37** – Maquete de uma estrutura lamelar constituída por elementos pré-fabricados de concreto armado, construída nos E.U.A. em 1961. Fonte: NERVI (1963).



a) Vista interna da estrutura.



b) Detalhe da malha lamelar.

**FIGURA 38** – Palacete dos Esportes construído em Roma, em 1957, coberto por uma cúpula lamelar composta por elementos pré-moldados de concreto armado. Diâmetro da cúpula: 80 m. **Fonte: NERVI (1963).**

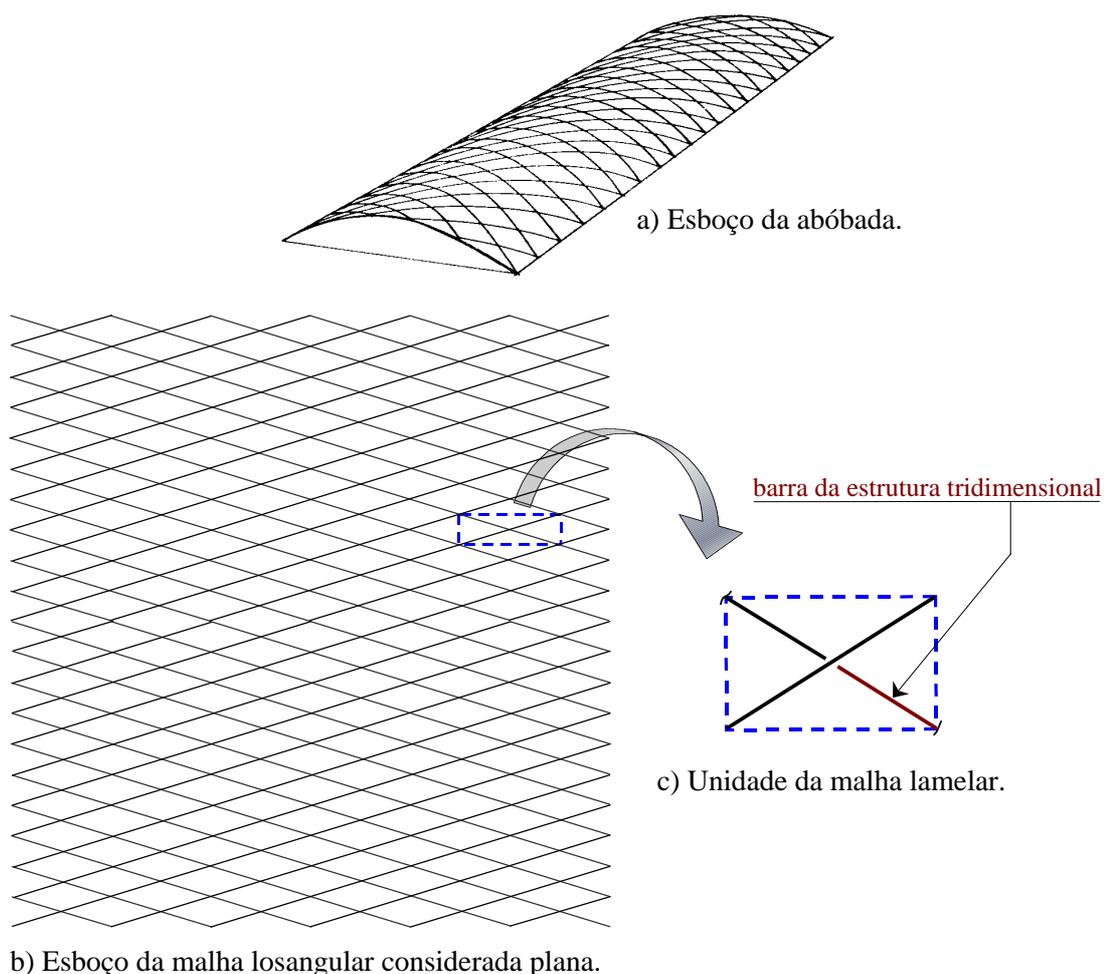


**FIGURA 39** – Estrutura lamelar de concreto armado pré-moldado apoiada sobre contrafortes, de um hangar construído em Orvieto, Itália. **Fonte: CASSIE & NAPPER (1958).**

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA

O sistema em abóbada cilíndrica foi o mais utilizado dentre os quatro tipos de estruturas lamelares de madeira, devido à sua facilidade construtiva. A literatura consultada aborda as características, os aspectos construtivos e os procedimentos para o cálculo apenas deste tipo estrutural. Os demais tipos de abóbadas lamelares, apresentados neste trabalho, foram apenas citados pelas obras consultadas. Por isso, neste trabalho será analisada especificamente a abóbada lamelar cilíndrica.

A estrutura lamelar cilíndrica é composta por uma malha losangular curva, onde cada nó reúne o meio de uma lamela (contínua) e as extremidades de duas outras lamelas, **Figura 40**. Cada lamela corresponde a duas barras na estrutura tridimensional.

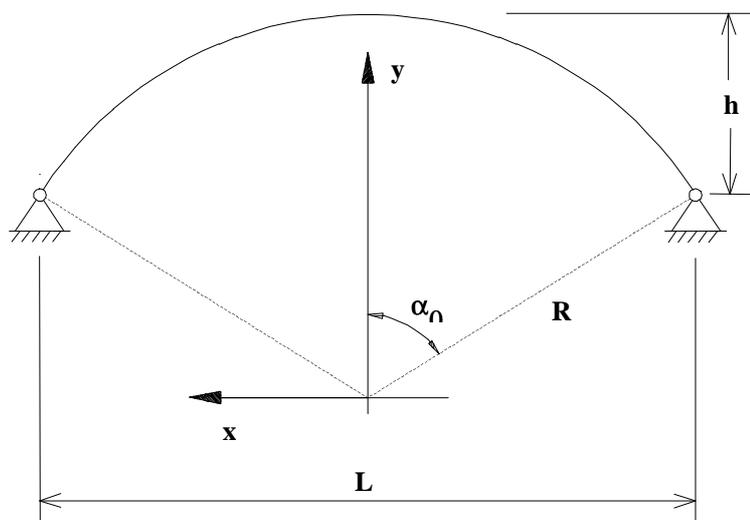


**FIGURA 40** - Representação da malha da abóbada lamelar cilíndrica.

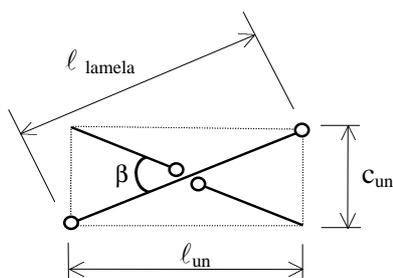
Caso a estrutura esteja apoiada sobre paredes ou vigas, que são as situações mais usuais, os esforços horizontais que o sistema lamelar exerce nestes apoios serão absorvidos por tirantes, como exemplificado pela **Figura 11**. Se a estrutura se apoiar sobre contrafortes, a fundação é responsável por absorver tais esforços, **Figura 10**.

Normalmente, os nós posicionados no contorno da estrutura são considerados articulações em apoios fixos (**Figura 41**), e as extremidades das barras são consideradas como contínua/articulada ou vice-versa (**Figura 42**). Logicamente, tais considerações deverão ser feitas em função do tipo de ligação que se deseja executar entre os elementos da estrutura, para cada caso que se esteja analisando.

Os elementos geométricos do arco circular (correspondente à seção transversal da abóbada cilíndrica) e da unidade da malha lamelar estão representados pelas **Figuras 41 e 42**, respectivamente, e suas relações estão expressas nas **eq.(1) a eq.(6)**.



**FIGURA 41** - Elementos geométricos do arco da abóbada cilíndrica.



**FIGURA 42** - Unidade da malha lamelar.

$$R = \frac{4h^2 + L^2}{8 \cdot h} \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \arcsen\left(\frac{L}{2R}\right) \quad (2)$$

$$\ell_{\text{arco}} = \frac{\pi \cdot \alpha_0 \cdot R}{90} \quad (3)$$

$$h = R \cdot (1 - \cos \alpha_0) \quad (4)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{c_{\text{un}}}{\ell_{\text{un}}}\right) \quad (5)$$

$$\ell_{\text{lamela}} = \frac{c_{\text{un}}}{\text{sen} \frac{\beta}{2}} \quad (6)$$

### **4.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA ABÓBADA LAMELAR**

---

#### **4.3.1 Tipos de Ligações Interlamelares**

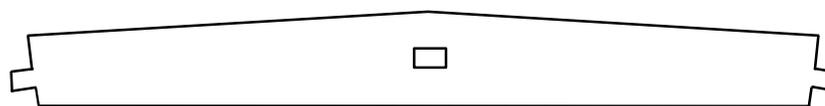
Segundo KARLSEN et al. (1976), existem dois tipos de sistemas construtivos da malha lamelar, em função dos tipos de ligações interlamelares:

- ▲ Sistema *Peselnik* com ligações encaixadas;
- ▲ Sistema *Zollbau* com ligações parafusadas.

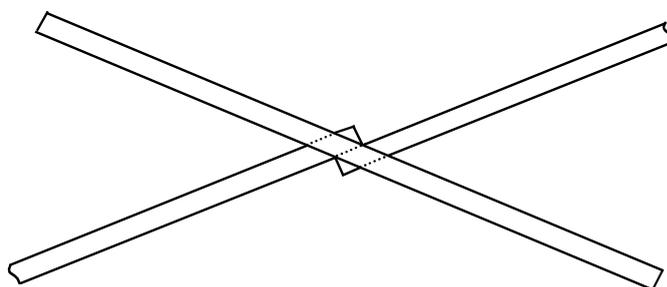
##### **4.3.1.1 Ligações Encaixadas**

As lamelas possuem pontas de encaixe em suas extremidades e uma abertura no meio de seu comprimento (**Figura 43**). Três lamelas se encontram em cada nó, sendo

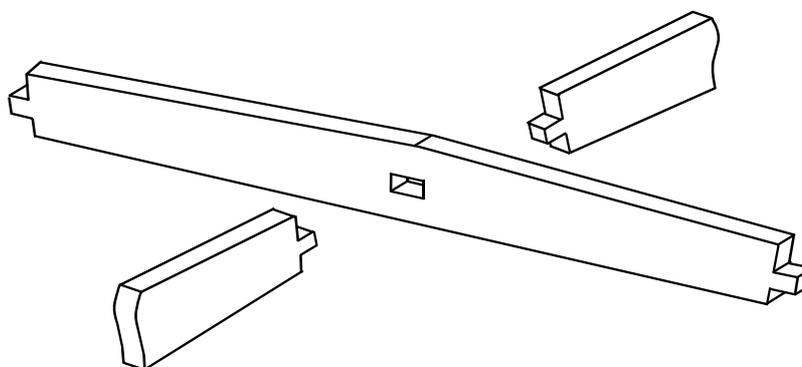
que duas lamelas têm suas extremidades encaixadas na abertura de uma terceira lamela, formando com esta um ângulo agudo.



a) Vista lateral da lamela.



b) Vista superior do encaixe entre três lamelas.



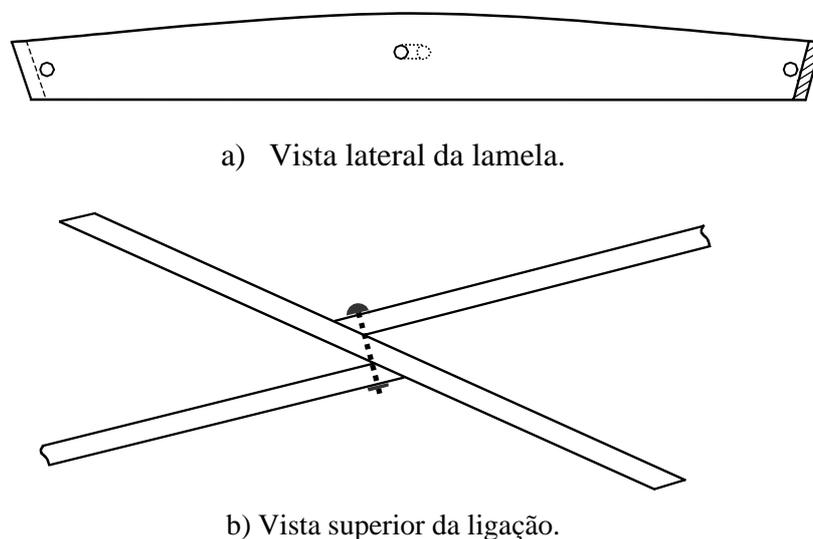
c) Vista global do encaixe entre três lamelas.

**FIGURA 43** – Representação da ligação interlamelar encaixada.

#### **4.3.1.2** *Ligações Parafusadas*

Cada lamela contém orifícios em suas extremidades e no meio de seu comprimento. As extremidades de duas lamelas são fixadas a uma terceira lamela através de

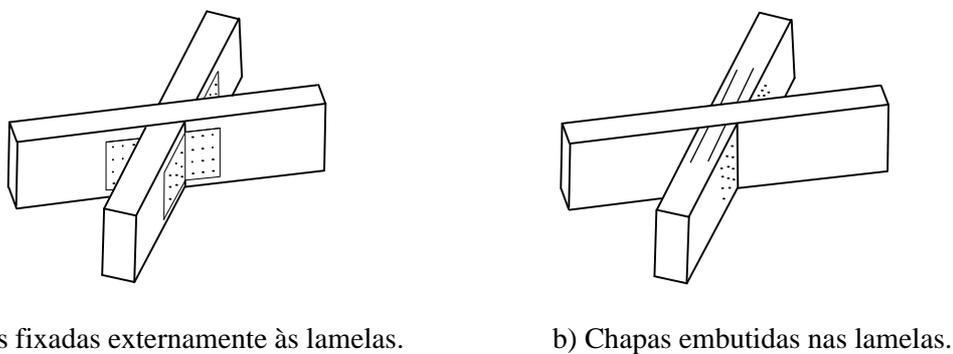
parafusos, **Figura 44**. O ângulo formado entre duas lamelas adjacentes normalmente é de 45°, KARLSEN et al. (1976).



**FIGURA 44** – Representação da ligação interlamelar realizada com um parafuso.

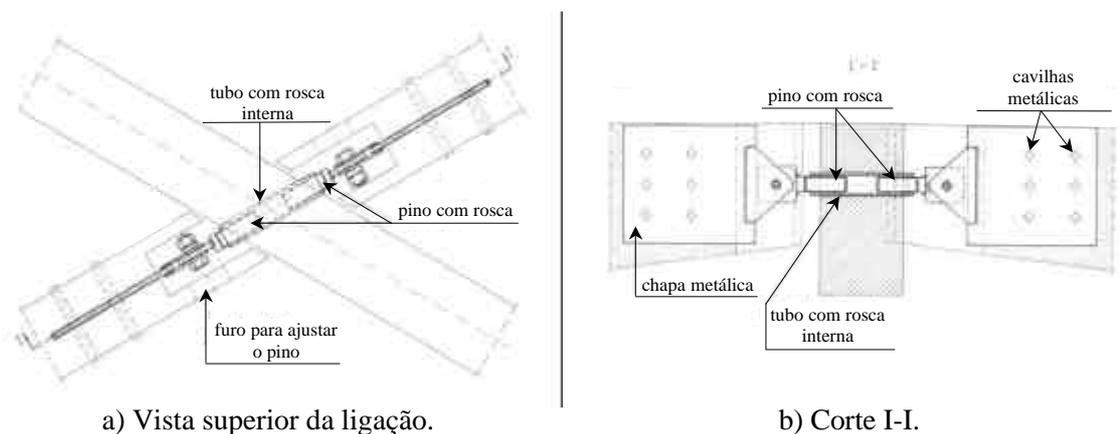
#### 4.3.1.3 Outros Tipos

Existem outros tipos de ligações possíveis de serem utilizados para a conexão interlamelar. Como sugerido por NATTERER et al. (1994), podem ser utilizadas chapas metálicas pregadas, ou com dentes estampados, ou, ainda, chapas metálicas embutidas na madeira, **Figura 45**.



**FIGURA 45** – Representação das ligações interlamelares com a utilização de chapas.

Como variação do sistema de ligação interlamelar, realizado através de chapas embutidas nas peças, SHEER & PURNOMO (1985) sugerem um tipo de ligação que representa uma articulação para as extremidades das lamelas que se unem à lamela contínua, **Figura 46**.

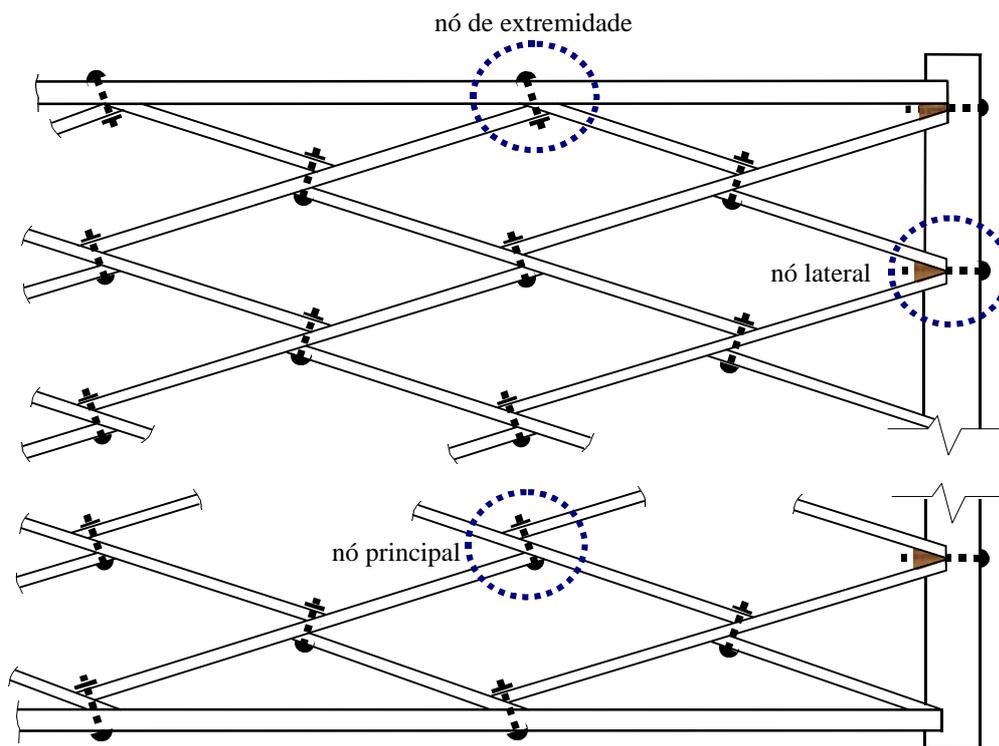


**FIGURA 46** – Ligações interlamelares com chapas embutidas na madeira, que correspondem a articulações. **Fonte: SHEER & PURNOMO (1985).**

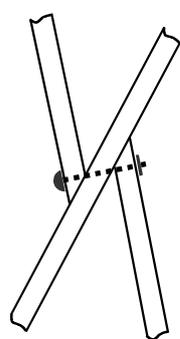
#### **4.3.2 Tipos de Nós da Malha Lamelar**

Distinguem-se três tipos de nós na malha lamelar (**Figura 47**), em função da posição que ocupam na estrutura, KARLSEN et al. (1976):

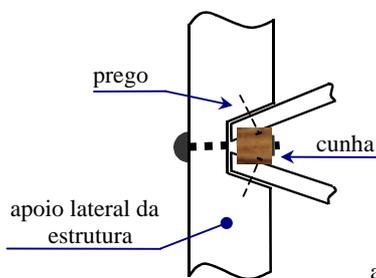
- a) **Nós principais** – são internos à malha lamelar, ou seja, não se situam no contorno da estrutura.
- b) **Nós laterais** – posicionam-se no contorno lateral da estrutura, correspondentes aos pontos de encontro entre a malha e a estrutura de apoio lateral (vigas, contrafortes, paredes e outros).
- c) **Nós de extremidade** – situam-se nos arcos de extremidade da estrutura.



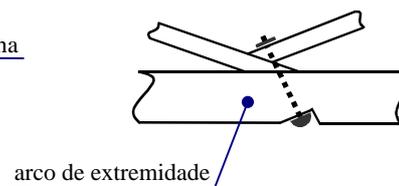
a) Vista global do posicionamento dos nós na malha lamelar.



b) Nó principal.



c) Nó lateral.



d) Nó de extremidade.

**FIGURA 47** – Tipos de nós da malha lamelar.

### 4.3.3 Detalhes Geométricos das Lamelas

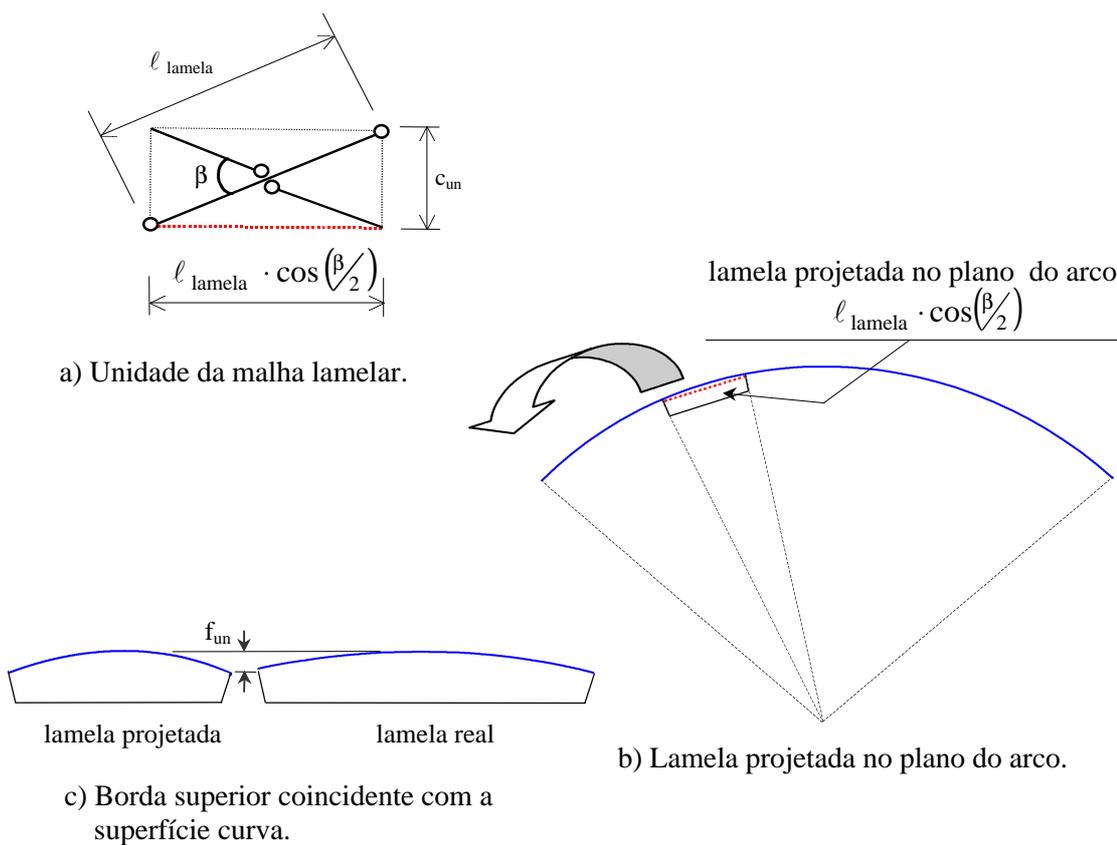
As lamelas são projetadas de acordo com as dimensões da estrutura que se pretende obter, sendo seu formato estabelecido pela curvatura da estrutura e pelo ângulo interlamelar.

A seguir são apresentados os contornos que as lamelas devem ter para comporem as estruturas lamelares tridimensionais.

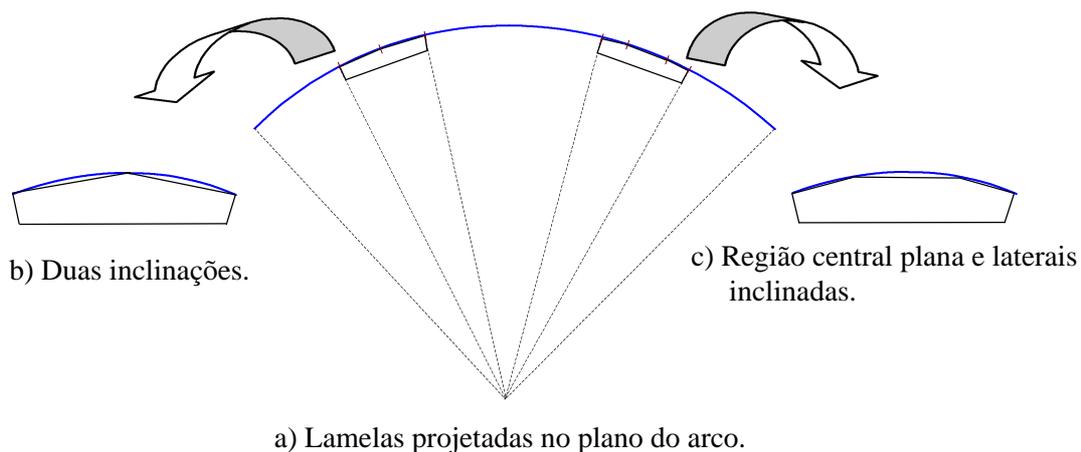
#### 4.3.3.1 Bordas

A borda inferior da lamela é horizontal plana e a borda superior pode ser curva, **Figura 48**, ou inclinada com as variantes da **Figura 49**.

Quando as lamelas possuem a borda superior curvilínea, acompanhando o formato do arco circular, a superfície da abóbada fica perfeitamente curva. Nos demais casos, a superfície da estrutura é poligonal.



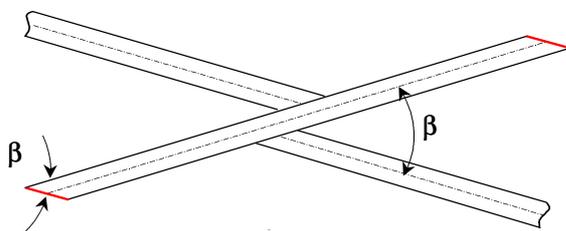
**FIGURA 48** - Borda superior curvilínea.



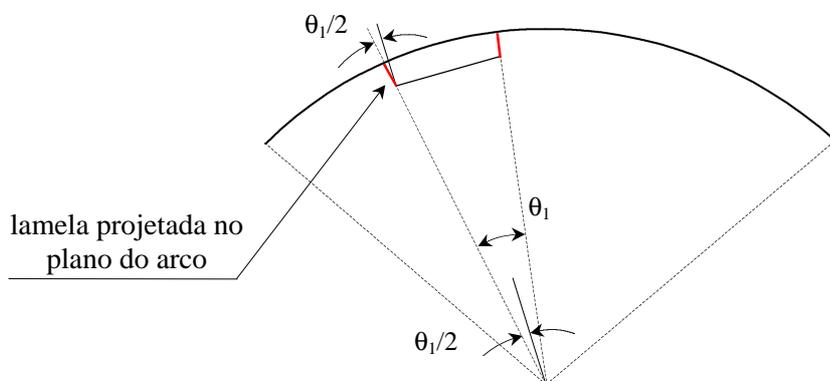
**FIGURA 49** - Borda superior com chanfros.

#### 4.3.3.2 Chanfros de Extremidade

Cada lamela possui dois tipos de chanfros de extremidade, sendo um para possibilitar a modulação losangular da malha, ou seja, a formação do ângulo interlamelar ( $\beta$ ), e o outro responsável pela curvatura do arco lamelar, **Figura 50**.



a) Chanfro responsável pelo ângulo interlamelar.

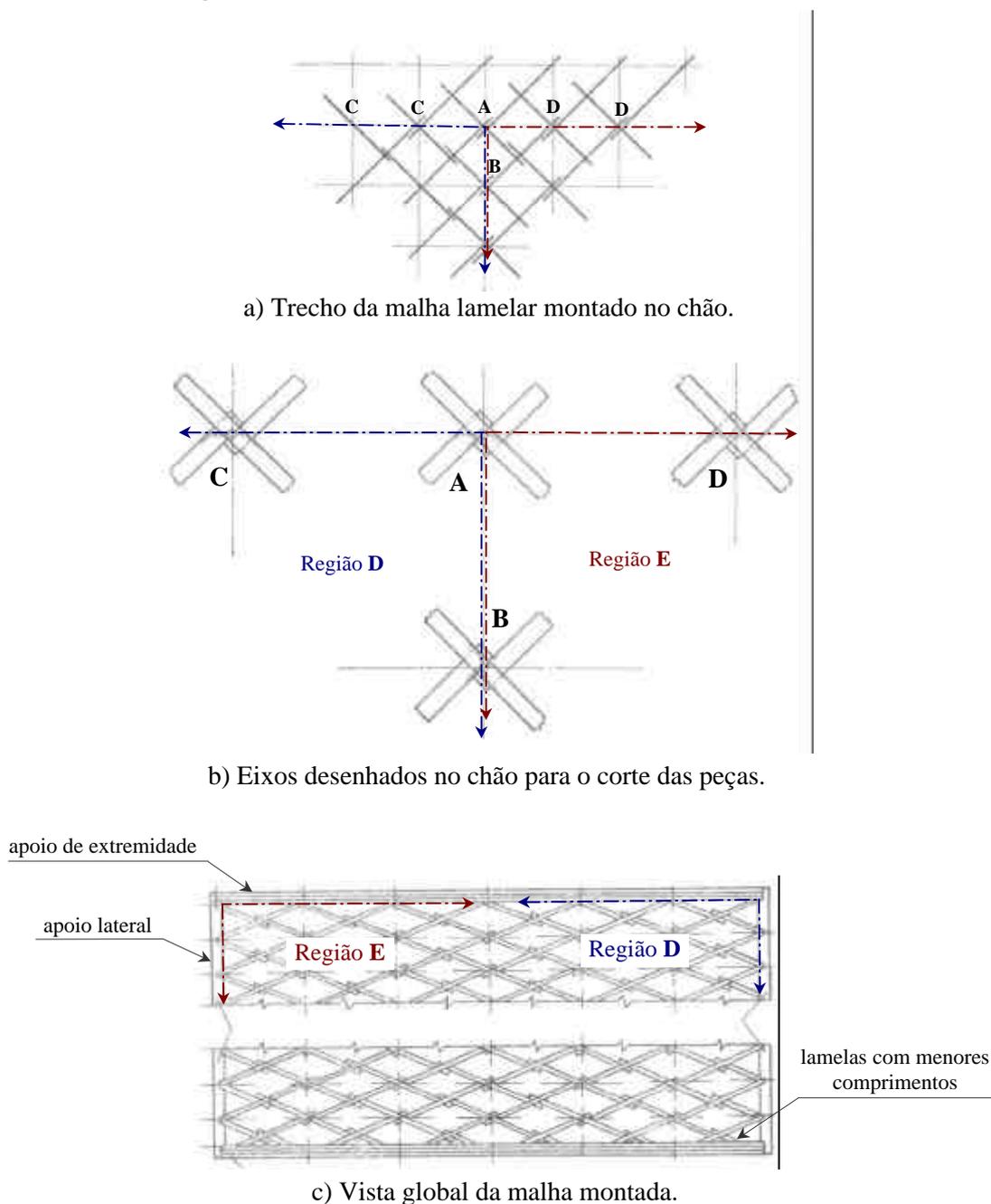


b) Chanfro responsável pela curvatura do arco lamelar.

**FIGURA 50** – Chanfros de extremidade da lamela.

#### 4.3.4 Montagem da Estrutura

Segundo KARLSEN et al. (1976), para se montar a malha lamelar, primeiramente, algumas unidades lamelares são montadas no chão, **Figura 51-a**. São marcados, no chão, os pontos referentes aos centros das ligações destas unidades: A, B, C e D, e são traçados dois eixos unindo tais pontos. Em seguida, as peças de madeira são serradas nas direções destes eixos.

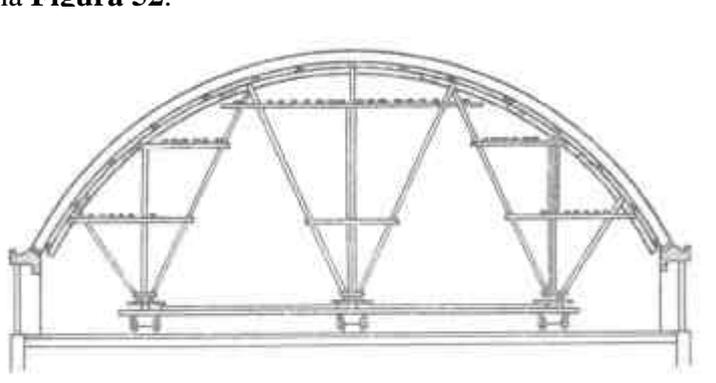


**FIGURA 51** – Esquema de montagem da estrutura lamelar. Fonte: KARLSEN et al. (1976).

Depois de se serrarem as peças, o trecho da malha correspondente à região E (**Figura 51-b**) é fixado nos apoios lateral e de extremidade da estrutura, referentes à região E (**Figura 51-c**). Da mesma forma, é fixado o trecho referente à região D. Tais trechos servirão de guia para a montagem do restante da malha.

As peças vão sendo unidas entre si e fixadas nos apoios laterais da estrutura, até que a malha lamelar atinja o outro apoio de extremidade. Não é necessário que as extremidades das barras coincidam com a posição deste apoio de extremidade, ou seja, as lamelas nesta extremidade da estrutura podem ter comprimentos menores, **Figura 51-c**.

A montagem da estrutura é feita com a utilização de andaimes, com vários níveis, como ilustrado na **Figura 52**.



**FIGURA 52** – Desenho de um andaime utilizado para a montagem das estruturas lamelares. Fonte: KARLSEN et al. (1976).

Considerando-se o exposto, entende-se que a montagem da malha realizada de acordo com KARLSEN et al. (1976) é bastante simplificada. Seria mais conveniente se definirem os detalhes geométricos das extremidades das lamelas, como apresentado no item 6.1.1.7 deste trabalho.

#### **4.3.5 Recomendações Geométricas**

Neste item estão apresentadas as recomendações geométricas citadas em algumas obras consultadas.

Segundo KARLSEN et al. (1976), as dimensões da abóbada lamelar são definidas de acordo com a finalidade da estrutura a ser coberta, sob o ponto de vista funcional e

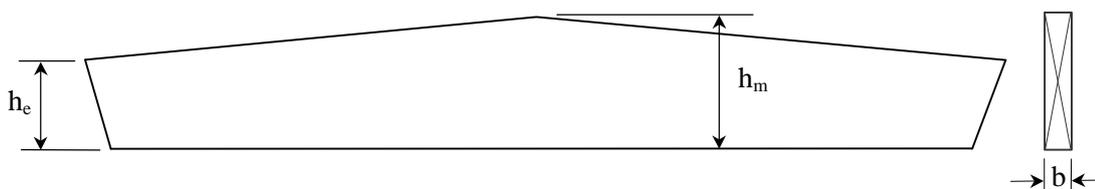
arquitetônico. Para o dimensionamento das lamelas, deve-se minimizar o desperdício de madeira e, ao mesmo tempo, utilizar os máximos comprimentos possíveis para as peças.

Com relação ao ângulo interlamelar, KARLSEN et al. (1976) afirmam que o mais utilizado é de 45°, mas pode variar de 35° a 90°. Por outro lado, LOTHERS (1971) recomenda que as lamelas estejam dispostas de forma que o ângulo formado entre elas esteja próximo de 40°.

No que se refere às proporções dimensionais da área a ser coberta, KARLSEN et al. (1976) recomendam que a malha lamelar tenha comprimento no máximo igual a duas e meia vezes a largura. Caso esta razão seja maior, devem ser dispostos elementos intermediários, transversalmente à estrutura, além dos apoios de extremidade. Segundo SCHEER & PURNOMO (1985), esta razão pode ser no máximo igual ao dobro.

A seguir estão listadas as recomendações geométricas para as lamelas, de acordo com KARLSEN et al. (1976). Os elementos da geometria lamelar estão esboçados na **Figura 53**, onde:

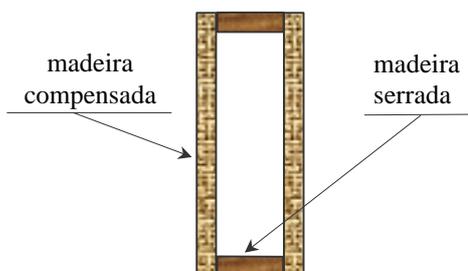
- ▲  $b \geq 2,5 \text{ cm}$  (  $b$  – espessura da lamela )
- ▲  $h_e \geq \begin{cases} \frac{h_m}{2} \\ 10 \text{ cm} \end{cases}$  (  $h_e$  e  $h_m$  – alturas da extremidade e do meio da lamela, respectivamente )
- ▲  $\frac{h_m}{b} \leq 4,5$



**FIGURA 53** – Elementos da geometria da lamela.

De acordo com o item 10.2.1 da NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), a mínima espessura das peças é de 2,5 cm e a mínima área, de 35 cm<sup>2</sup>.

Segundo KARLSEN et al. (1976), é possível vencer vãos superiores a 80 metros, com a utilização de lamelas de seção transversal do tipo caixão, com almas em madeira compensada e mesas em madeira maciça, **Figura 54**. Neste caso, tem-se considerável redução do peso próprio da estrutura lamelar.



**FIGURA 54** – Seção transversal da lamela composta por madeira compensada e maciça.

## **4.4 CÁLCULO DAS ESTRUTURAS LAMELARES**

---

### **4.4.1 Cálculo Simplificado**

Os métodos de cálculo utilizados para o dimensionamento de estruturas lamelares, antes do advento da informática, eram bastante simplificados, pois não se considerava a estrutura globalmente, devido à complexidade da malha lamelar. A seguir, estão descritas as considerações para o cálculo simplificado, de acordo com KARLSEN et al. (1976).

Os esforços são determinados para um arco circular biarticulado, referente à seção transversal da estrutura. Tais esforços são decompostos nas direções paralela e perpendicular aos eixos definidos pelas lamelas, em função da posição que estas ocupam ao longo do arco.

Considera-se que o arco lamelar tenha seção transversal igual à do meio da lamela, para a determinação dos momentos de inércia, e se considera o dobro desta seção transversal para a determinação da área, como mostrado na **Figura 55**.



a) Para a determinação dos momentos de inércia.

b) Para a determinação da área.

**FIGURA 55** – Seções transversais consideradas para o arco lamelar.

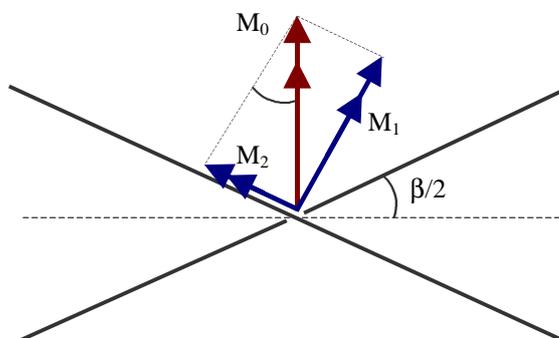
Para a determinação dos esforços solicitantes nas lamela deve-se calcular os esforços atuantes ao longo do arco considerado.

Os momentos fletores solicitantes nas lamelas ( $M_1$ ) são determinados a partir da decomposição dos momentos fletores solicitantes no arco ( $M_0$ ), eq.(7) e **Figura 56**.

Segundo KARLSEN et al. (1976), a outra parcela desta decomposição ( $M_2$ ), determinada através da eq.(8), é inteiramente absorvida pelas telhas, **Figura 56**.

$$M_1 = M_0 \cdot \cos \frac{\beta}{2} \quad (7)$$

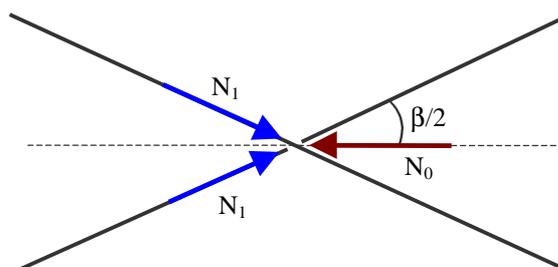
$$M_2 = M_0 \cdot \sen \frac{\beta}{2} \quad (8)$$



**FIGURA 56** - Decomposição do momento fletor na lamela.

O esforço normal atuante em cada lamela ( $N_1$ ) é obtido através da decomposição deste esforço calculado ao longo do arco lamelar ( $N_0$ ), **Figura 57** e eq.(9).

$$N_1 = N_0/2 \cdot \cos(\beta/2) \quad (9)$$



**FIGURA 57** - Decomposição do esforço normal nas lamelas.

O esforço cortante atuante na lamela é o próprio esforço cortante que atua no arco na posição correspondente à lamela.

#### **4.4.2 Cálculo Automatizado**

Atualmente, é possível o cálculo exato das estruturas lamelares tridimensionais, consideradas globalmente, devido à existência de recursos computacionais cada vez mais avançados. A preocupação que se deve ter quando da utilização dos pacotes computacionais para se calcularem tais estruturas, se refere à sua correta modelagem.

Foi desenvolvido um software de entrada e de geração de dados, que facilitasse a modelagem do sistema estrutural em questão, SAAD (1996). Além disso, este pré-processador esboça a malha lamelar. Os arquivos gerados por este programa são lidos pelo software PORT-TRI que determina os esforços solicitantes nas barras, os deslocamentos dos nós e as reações de apoio da estrutura.

---

Programa computacional para o cálculo de estruturas tridimensionais, desenvolvido pelo Prof. Titular Francisco Antonio Romero Gesualdo do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

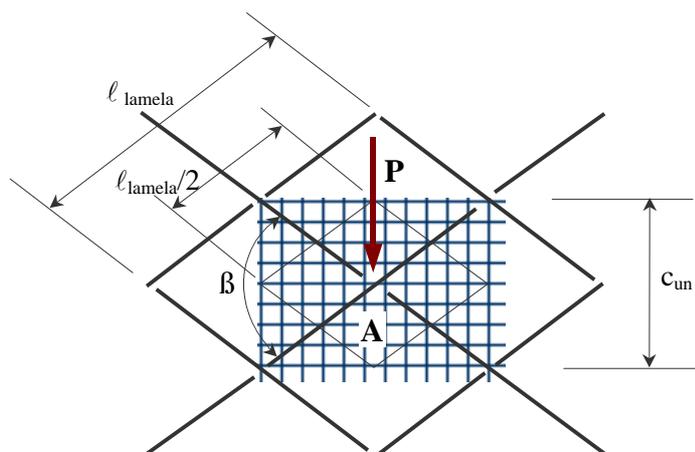
## 5 CARREGAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS LAMELARES

---

### 5.1 ÁREA DE INFLUÊNCIA DE UM NÓ

---

Para as estruturas em estudo, consideram-se as cargas concentradas sobre os nós da malha lamelar, determinadas a partir da área de influência de cada nó (**Figura 58**).



**FIGURA 58** - Área de influência de um nó da malha lamelar.

A área de influência dos nós da estrutura é calculada através da **eq.(10)**, onde:

- ▲  $c_{un}$  – comprimento da unidade de malha lamelar;
- ▲  $l_{lamela}$  – comprimento da lamela;
- ▲  $\beta$  - ângulo interlamelar.

$$A = \frac{c_{un} \cdot l_{lamela}}{2} \cos(\beta/2) \quad (10)$$

## 5.2 AÇÕES

---

Para a estrutura em questão, devem ser consideradas as ações permanentes (peso próprio, das telhas, dos elementos de fixação e outros) e a ação variável (vento).

A carga permanente **P** atuante em cada nó da malha lamelar é calculada a partir do peso específico  $\gamma$  da madeira e da carga **p** proveniente de telhas e de outros elementos que forem fixados na estrutura (como terças) eq.(11), sendo:

- ▲  $v$  - volume de madeira de uma lamela;
- ▲  $A$  - área de influência do nó;
- ▲ (1,03) – fator que representa o peso próprio da madeira e das peças metálicas de união que, de acordo com o item 5.5.2 da NBR 7190:1997, deve ser estimado como sendo 3% do peso próprio da madeira.

$$P = (1,03) \cdot \gamma \cdot v + p \cdot A \quad (11)$$

A ação do vento deve ser considerada segundo as prescrições contidas no Anexo E da NBR 6123:1988 (ABNT, 1988).

## 5.3 COMBINAÇÕES DAS AÇÕES

---

De acordo com o item 5 da NBR 7190:1997, as ações atuantes nas estruturas devem ser combinadas, constituindo os carregamentos. Para o tipo estrutural em questão, o carregamento é do tipo normal, pois inclui apenas as ações decorrentes do uso previsto para a construção.

Segundo o item 5.2.1 da norma supracitada, o carregamento normal corresponde à classe de carregamento de longa duração, podendo ter duração igual ao período de referência da estrutura. Tal carregamento deve ser considerado na verificação da segurança, tanto em relação aos estados limites últimos como aos de utilização.

### 5.3.1 Combinações em Estados Limites Últimos

#### Combinações Últimas Normais

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_Q \cdot 0,75 \cdot F_{Qk} \quad (12)$$

onde:

- ▲  $F_{Gi,k}$  - valor característico das ações permanentes;
- ▲  $F_{Qk}$  - valor característico da ação variável: vento;
- ▲  $\gamma_G$  e  $\gamma_Q$  - coeficientes de ponderação relativos às ações permanentes e variáveis, respectivamente. Seus valores são obtidos através das Tabelas 3, 4 e 6 da referida norma.

De acordo com o item 5.5.1 da norma brasileira em questão, o fator 0,75 é utilizado para se levar em conta a maior resistência da madeira sob a ação de cargas de curta duração.

### 5.3.2 Combinações em Estados Limites de Utilização

#### Combinações de Longa Duração

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_2 \cdot F_{Q,k} \quad (13)$$

onde:

- ▲  $F_{Gi,k}$  - definidos no item anterior;
- ▲  $\psi_2 \cdot F_{Q,k}$  - expressão que representa o valor de longa duração para a ação variável.

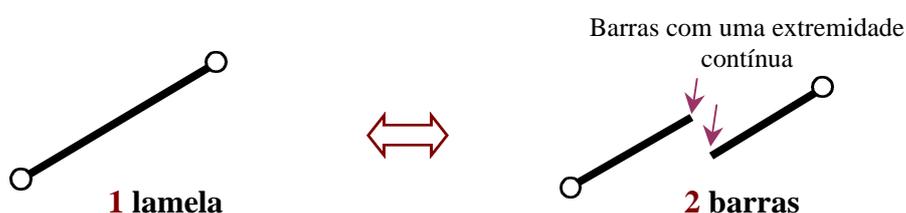
Para o cálculo das estruturas lamelares, a ação variável é o vento e, de acordo com a Tabela 2 da NBR 7190:1997, o fator  $\psi_2$  é nulo para a ação de vento. Dessa forma, a combinação das ações referente ao estado limite de utilização é expressa pela eq.(14).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} \quad (14)$$

## 5.4 VERIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

### 5.4.1 Resistência

O esforço predominante nas barras da abóbada lamelar cilíndrica é o de compressão axial. As barras são flexo-comprimadas pois apresentam continuidade em uma de suas extremidades, já que cada lamela é considerada como sendo duas barras para o cálculo da estrutura, **Figura 59**.



**FIGURA 59** – Condições de extremidade das barras.

De acordo com o item 7.3.6 da NBR 7190:1997, a condição de segurança relativa à resistência das seções transversais submetidas à flexo-compressão, é expressa pela mais rigorosa das expressões definidas em **eq.(15)** e **eq.(16)**, aplicada ao ponto mais solicitado da borda mais comprimida da seção transversal da peça, onde:

- ▲  $\sigma_{Nc0,d}$  - valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante devida apenas à força normal de compressão;
- ▲  $\sigma_{My,d}$  e  $\sigma_{Mx,d}$  - tensões máximas devidas às componentes de flexão atuantes segundo as direções principais;
- ▲  $f_{c0,d}$  - resistência de cálculo da madeira à compressão paralela às fibras;
- ▲  $k_M$  - coeficiente de correção que vale 0,5 para seção retangular.

$$\left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (16)$$

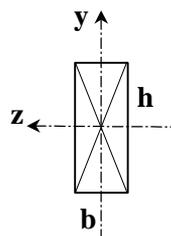
Caso ocorra inversão de esforços, devido à ação do vento, as barras flexo-tracionadas serão verificadas através do item 7.3.5 da NBR 7190:1997.

### 5.4.2 Estabilidade

Deve ser verificada para os dois eixos da seção transversal das barras (**Figura 60**). O valor de  $\lambda$  é determinado através da eq.(17), onde:

- ▲  $L_0$  – comprimento teórico de referência, que é metade do comprimento da lamela para a verificação da estabilidade com relação ao eixo  $y$ , e igual ao comprimento da lamela para a verificação da estabilidade com relação ao eixo  $z$ ;
- ▲  $i$  – raio de giração da seção transversal da peça, com relação ao eixo em que se esteja verificando a estabilidade.

$$\lambda = \frac{L_0}{i} \quad (17)$$



**FIGURA 60** – Representação dos eixos centrais de inércia da seção transversal da barra.

Portanto, os índices de esbeltez referentes aos dois eixos  $y$  e  $z$  são determinados por:

$$\lambda_y = \frac{L_0}{i_y} = \frac{\ell_{\text{lamela}}/2}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{\ell_{\text{lamela}}/2}{\sqrt{\frac{h \cdot b^3/12}{h \cdot b}}} = \frac{\ell_{\text{lamela}} \cdot \sqrt{12}}{2 \cdot b}$$

$$\lambda_z = \frac{L_0}{i_z} = \frac{\ell_{\text{lamela}}}{\sqrt{\frac{I_z}{A}}} = \frac{\ell_{\text{lamela}}}{\sqrt{\frac{h^3 \cdot b/12}{h \cdot b}}} = \frac{\ell_{\text{lamela}} \cdot \sqrt{12}}{h}$$

Normalmente as peças são esbeltas ( $80 < \lambda \leq 140$ ) e o item 7.5.5 da NBR 7190:1997 prescreve que para peças esbeltas submetidas, na situação de projeto, à flexo-

compressão, com os esforços de cálculo  $N_d$  e  $M_{1d}$ , deve ser verificada a segurança em relação ao estado limite último de instabilidade, por meio de teoria de validade experimentalmente comprovada.

Ainda, segundo esse item normativo, considera-se atendida a condição de segurança relativa ao estado limite último de instabilidade se, no ponto mais comprimido da seção transversal da peça, for respeitada a condição expressa pela **eq.(18)**, onde:

- ▲  $\sigma_{Nc0,d}$  – valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão;
- ▲  $f_{c0,d}$  - resistência de cálculo da madeira à compressão paralela às fibras;
- ▲  $\sigma_{M,d}$  - valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor  $M_d$  calculado através da **eq.(19)**.

$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (18)$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right) \quad (19)$$

As variáveis contidas na **eq.(19)** são determinadas como apresentado a seguir.

- ▲ *Carga crítica de Euler ( $F_E$ ):*

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I}{L_0^2} \left\{ \begin{array}{l} E_{c0,ef} - \text{valor efetivo do módulo de elasticidade paralelo às fibras da} \\ \text{madeira, de acordo com o item 6.4.9 da NBR 7190:1997;} \\ I - \text{momento de inércia da seção transversal da peça relativo ao plano de} \\ \text{flexão em que se está verificando a condição de segurança.} \end{array} \right.$$

- ▲ *Excentricidade efetiva de primeira ordem ( $e_{1,ef}$ ):*

$$e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c \left\{ \begin{array}{l} e_i - \text{excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto;} \\ e_a - \text{excentricidade acidental devida às imperfeições geométricas das peças;} \\ e_c - \text{excentricidade suplementar de primeira ordem que representa a fluência} \\ \text{da madeira.} \end{array} \right.$$

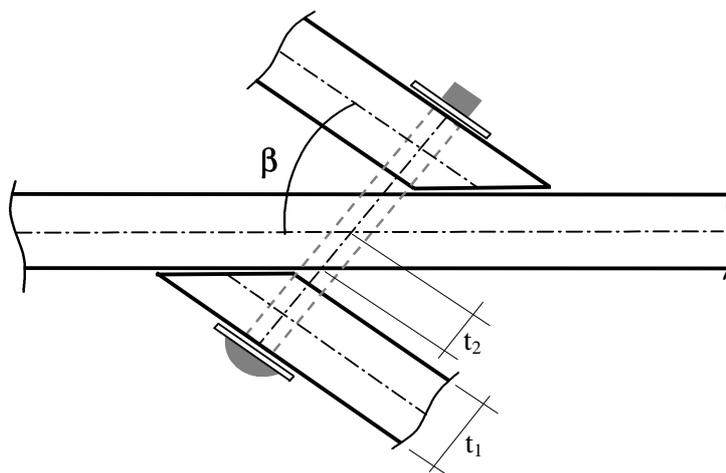


O valor de cálculo da resistência de um pino metálico correspondente a uma única seção de corte é determinado através do parâmetro  $\beta$ , **eq. (20)**, onde:

- ▲  $t$  - menor das espessuras de penetração do pino;
- ▲  $d$  - diâmetro do pino.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (20)$$

Para a ligação interlamelar, ocorrem duas seções de corte e, nessas condições, o valor de  $t$  deve ser considerado como o menor dos valores  $t_1$  e  $t_2$  apresentados na **Figura 61**.



**FIGURA 61** – Espessuras de penetração do pino.

O valor de  $t_1$  é a própria espessura da lamela, e o valor de  $t_2$  é determinado através da **eq.(21)**, sendo  $\beta$  o ângulo interlamelar.

$$t_2 = \frac{t_1}{2 \cos \beta} \quad (21)$$

O valor limite para o coeficiente  $\beta$  é determinado pela **eq.(22)**, onde:

- ▲  $f_{y,d}$  – resistência de cálculo do pino metálico ao escoamento, calculada a partir de  $f_{y,k}$  com  $\gamma_s = 1,1$ ;

- ▲  $f_{e\alpha,d}$  – resistência de cálculo da madeira ao embutimento inclinado de  $\alpha$  em relação às suas fibras.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\alpha,d}}} \quad (22)$$

A partir do valor de  $\beta_{lim}$ , que leva em conta as resistências da madeira e do aço, eq.(22), determina-se a resistência de um pino ( $R_{vd,1}$ ) para uma seção de corte entre as peças de madeira conectadas por ele.

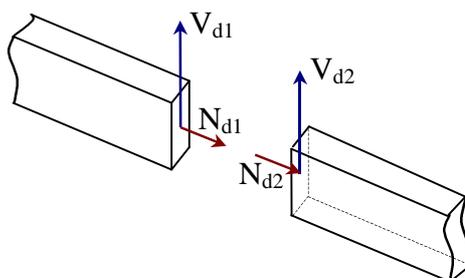
Se  $\beta \leq \beta_{lim}$ , ocorre o embutimento do pino na madeira, e o valor da resistência do pino é calculado através da eq.(23). Caso contrário, ocorre a flexão do pino e o valor de sua resistência é calculado através da eq.(24).

$$R_{vd,1} = 0,40.(t^2/\beta).f_{e\alpha,d} \quad (23)$$

$$R_{vd,1} = 0,625.(d^2/\beta_{lim}).f_{y,d} \quad (24)$$

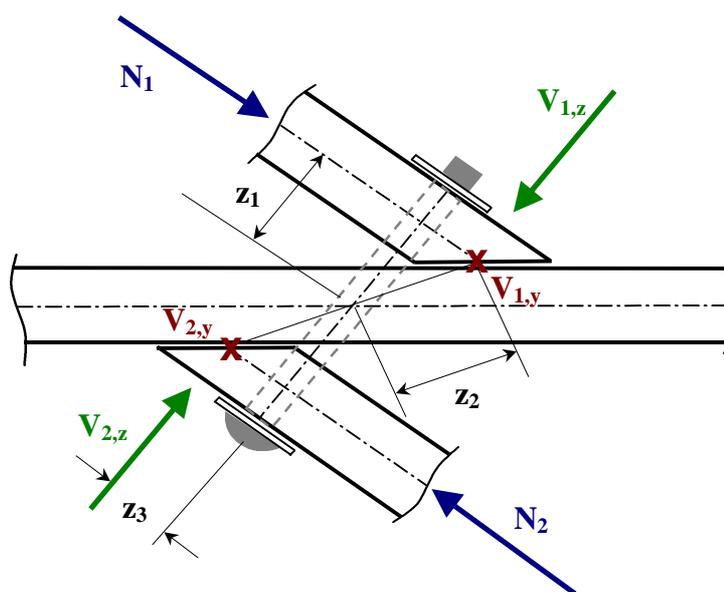
Para as ligações interlamelares, têm-se duas seções de corte, o que implica que a resistência do pino tem seu valor dobrado.

A resistência do pino deve ser comparada com os esforços atuantes nas extremidades de duas lamelas que se encontram em cada nó, de forma que o módulo da soma vetorial dos esforços normais e dos esforços cortantes deve ser menor ou igual à resistência do pino  $R_{v,d}$ , **Figura 62**.



**FIGURA 62** – Esforços atuantes nas extremidades da lamela, utilizados para o dimensionamento da ligação.

A ligação parafusada interlamelar é excêntrica, **Figura 63** e, segundo o item 8.1.2 da NBR 7190:1997, “quando não for possível impedir a presença de binários atuando no plano da união, além das tensões primárias decorrentes dos esforços atuantes nas peças interligadas, também devem ser consideradas as tensões secundárias devidas às excentricidades existentes entre os eixos mecânicos das peças interligadas e o centro de rotação da união em seu plano de atuação”.



**FIGURA 63** – Representação das direções dos esforços que produzem momentos devidos à excentricidade da ligação, onde “X” indica o vetor de  $V_{1,y}$  ou  $V_{2,y}$  normal ao plano.

Portanto, analisam-se os vetores resultantes destas ligações e se verificam as barras com estas tensões adicionais. Estas tensões devem ser incluídas nas expressões de verificação das barras apresentadas no item 5.4 deste trabalho.

Os valores das excentricidades são determinados através das eq.(25) a eq.(27), sendo:

- ▲  $e$  = espessura da lamela;
- ▲  $d$  = diâmetro do pino;
- ▲  $\beta$  = ângulo interlamelar.

$$z_1 = \frac{e}{2} + \frac{e}{2 \cdot \cos\beta} + \frac{d \cdot \operatorname{tg}\beta}{2} \quad (25)$$

$$z_3 = \frac{d}{2} + \frac{e}{2 \cdot \operatorname{tg}\beta} \quad (26)$$

$$z_2 = \sqrt{(z_1)^2 + (z_3)^2} \quad (27)$$

A partir das recomendações apresentadas neste item consegue-se, sem dificuldades, realizar o carregamento e dimensionamento das estruturas lamelares de madeira.

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

---

A metodologia utilizada neste trabalho foi de se realizar uma análise numérica e outra experimental. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

A análise numérica correspondeu à comparação entre os resultados de cálculo de uma estrutura lamelar, obtidos através do software PORT-TRI e os resultados obtidos através da utilização do programa computacional SAP90–*Structural Analysis Programs* (WILSON, 1992).

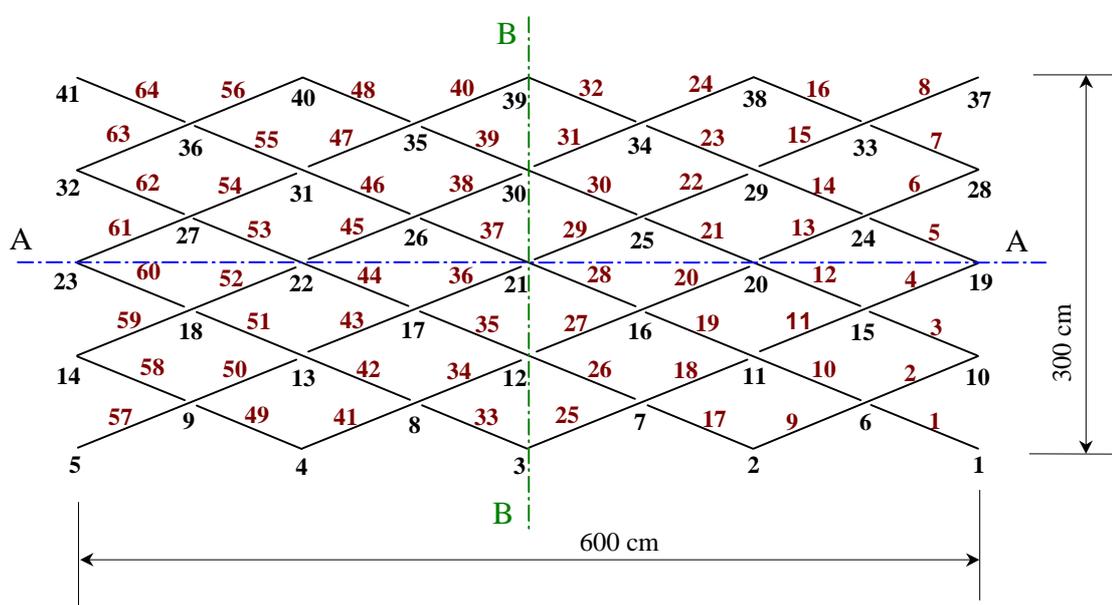
Para a análise experimental, foi montado e ensaiado um protótipo, com a finalidade de se avaliarem o sistema construtivo, as ligações e o comportamento geral da estrutura, para comparação com o estudo teórico desenvolvido.

A análise dos resultados do protótipo foi baseada na comparação dos resultados teóricos obtidos através do programa computacional PORT-TRI, com os resultados experimentais obtidos através do ensaio do protótipo.

Foram apresentadas as diretrizes para se tentar realizar projetos bem elaborados de estruturas lamelares de madeira em abóbada cilíndrica.

## 6.1 UTILIZAÇÃO DO SAP90

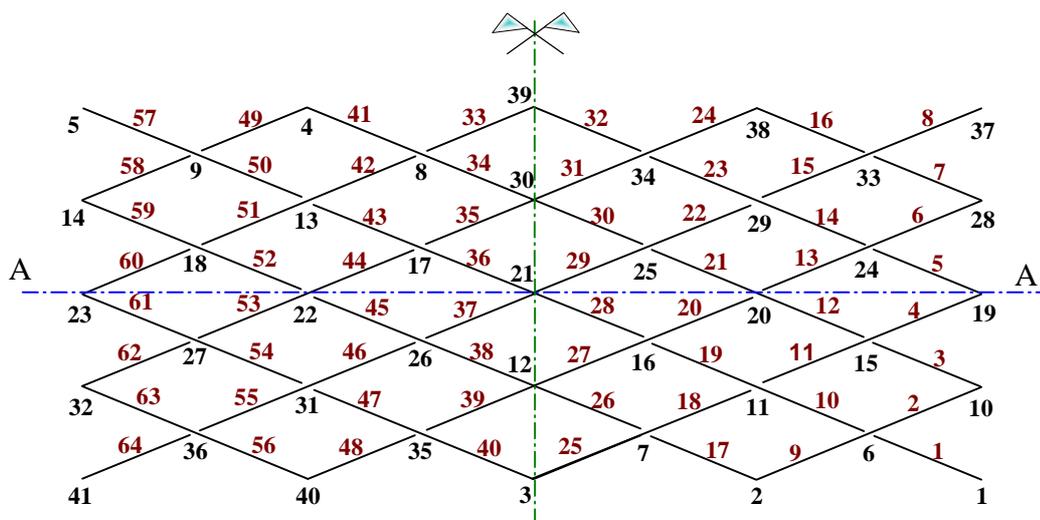
Foi feita uma comparação entre os resultados de cálculo de estruturas lamelares em abóbada cilíndrica, determinados através do software PORT-TRI e do software SAP90 (WILSON, 1992). Para isso, foi considerada uma malha lamelar cujas barras possuem extremidades contínua/articulada e vice-versa, como esquematizado pela **Figura 64**.



**FIGURA 64** – Malha planificada, com os nós e barras numerados.

A malha lamelar possui a seguinte simetria: uma metade da malha posicionada à direita ou à esquerda em relação ao eixo **B** da **Figura 64**, quando girada de  $180^\circ$  em torno do eixo **A**, é simétrica com a outra metade da malha em relação ao eixo **B**. Ou, por outro lado, uma metade da malha posicionada acima ou abaixo do eixo **A**, quando girada de  $180^\circ$  em torno do eixo **B**, é simétrica com a outra metade da malha em relação ao eixo **A**.

Na **Figura 65** está representada a malha com sua metade esquerda girada de  $180^\circ$  em torno do eixo **A**.



**FIGURA 65** – Situação de simetria da estrutura.

Dessa forma, a estrutura foi calculada como um todo, mas serão apresentados os resultados obtidos através dos programas computacionais PORT-TRI e SAP90, referentes às barras e nós da metade da estrutura, posicionada à direita do eixo de simetria.

As coordenadas dos nós da malha foram determinadas através do pré-processador (SAAD,1996) de entrada e geração de dados para o cálculo da estrutura no PORT-TRI. Para este pré-processador, foram fornecidos:

- a dimensão da estrutura em planta: 600 cm x 300 cm;
- raio do arco da abóbada: 800 cm;
- a quantidade de unidades de malha lamelar que compõem a malha, ao longo de sua largura (“divisões em x”) e comprimento (“divisões em z”): 4 em x e 4 em z;
- a seção transversal das lamelas: 3,0 cm x 15,0 cm;
- módulos de elasticidade transversal e longitudinal:  $E = 1950 \text{ kN/cm}^2$  e  $G = 100 \text{ kN/cm}^2$ .

Além disso, escolheu-se o tipo de malha a ser gerada: com extremidades das barras articulada/contínua e vice-versa, e foram determinados pelo pré-processador (**Anexo A.1.1**):

- momentos de inércia:  $I_x = 117,9923 \text{ cm}^4$ ;  $I_y = 33,7500 \text{ cm}^4$ ;  $I_z = 843,7500 \text{ cm}^4$ ;
- comprimento das lamelas: 170,9 cm;
- ângulo interlamelar: 52,07°;
- flecha central do arco da abóbada: 58,4 cm.

Esse programa gerou um arquivo, **Anexo A.1.2**, que contém os dados elástico-geométricos da estrutura, as coordenadas dos nós da malha, as incidências das barras, e as condições de extremidade das barras (o algarismo **1** representa extremidade contínua, e o algarismo **0**, extremidade articulada).

Com o arquivo gerado pelo pré-processador, calculou-se a estrutura em questão através do software PORT-TRI, considerando-se todos os nós internos à malha com carga vertical para baixo de 100 kN, e os nós do contorno da malha impedidos de transladarem.

Os resultados deste cálculo estão apresentados no **Anexo A.1.3**: esforços atuantes nas barras, deslocamentos dos nós e reações de apoio, referentes à metade da estrutura.

Para o cálculo do exemplo em questão através do SAP90, foi criado um arquivo de dados, **Anexo A.2.1**, contendo:

- as coordenadas dos nós da malha, geradas pelo pré-processador do PORT-TRI;
- as restrições dos nós da malha (o algarismo **1** representa deslocamento restringido e o algarismo **0**, livre);
- características elástico-geométricas das barras, e suas incidências;
- carregamentos dos nós internos à malha.

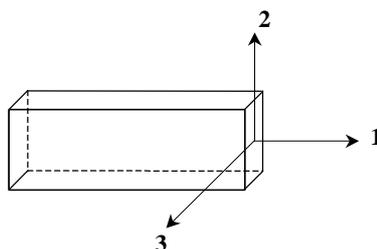
Além disso, as condições de extremidades das barras foram definidas através do identificador LR:

- articulada/contínua LR = 1,0,0,1,0,0;
- contínua/articulada LR = 0,1,0,0,1,0,

onde o algarismo **1** significa esforço liberado, e o algarismo **0**, esforço não-liberado.

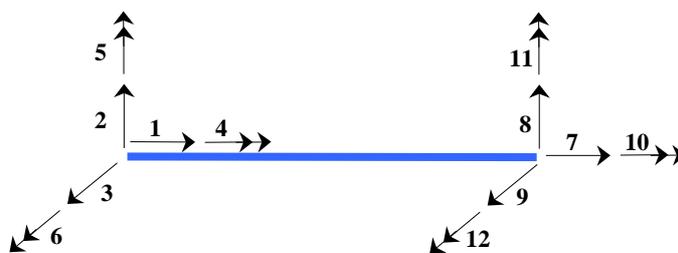
A ordem dos esforços para este identificador é:  $M_{3i}$ ,  $M_{3f}$ ,  $N$ ,  $M_{2i}$ ,  $M_{2f}$ ,  $T$ , sendo:

- $M_{3i}$  - momento da extremidade inicial da barra, em relação ao eixo **3**, **Figura 66**;
- $M_{3f}$  - momento da extremidade final da barra, em relação ao eixo **3**;
- $N$  - esforço axial ao longo da barra;
- $M_{2i}$  - momento da extremidade inicial da barra, em relação ao eixo **2**;
- $M_{2f}$  - momento da extremidade final da barra, em relação ao eixo **2**;
- $T$  - momento de torção ao longo da barra.

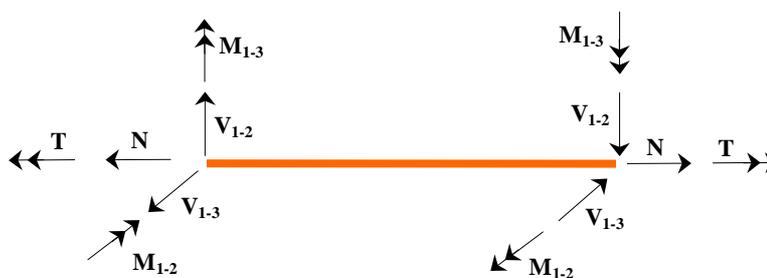


**FIGURA 66** – Eixos das extremidades das barras referenciados pelo identificador LR.

No **Anexo A.2.2** estão apresentados os resultados referentes à metade da malha lamelar: esforços atuantes nas barras, deslocamentos dos nós e reações de apoio. Na **Figura 67** estão representados os sentidos das coordenadas locais para ambos os softwares em questão.



a) Referentes ao software PORT-TRI.



b) Referentes ao software SAP90.

**FIGURA 67** – Sentidos positivos para os esforços atuantes nas extremidades das barras.

Na **Tabela 2** estão apresentadas as diferenças percentuais entre os valores dos esforços normais atuantes nas barras obtidos através do PORT-TRI, com relação aos valores obtidos pelo SAP90.

Nesta mesma tabela estão apresentadas essas diferenças percentuais com relação ao maior momento fletor que atua nas extremidades das barras, ou seja, referente ao eixo de maior inércia: correspondente à coordenada **6** para o PORT-TRI, e ao esforço  $M_{1-2}$  para o SAP90, **Figura 67**.

Essa comparação foi feita também para as reações de apoio, como apresentado pela **Tabela 3**, e em relação ao deslocamento vertical dos nós da malha, **Tabela 4**.

**Tabela 2** – Diferenças percentuais dos valores dos esforços normais e dos momentos fletores em relação ao eixo de maior inércia, determinados através do PORT-TRI em relação aos determinados pelo SAP90.

Barra	Diferença Percentual		Barra	Diferença Percentual	
	Esforço Normal	Momento Fletor		Esforço Normal	Momento Fletor
<b>1</b>	- 1,6	0,0	<b>17</b>	- 0,4	+ 4,4
<b>2</b>	- 2,1	+ 3,8	<b>18</b>	- 1,6	+ 4,7
<b>3</b>	- 0,3	+ 5,9	<b>19</b>	- 0,9	+ 5,1
<b>4</b>	- 1,9	+ 4,8	<b>20</b>	+ 0,2	+ 5,2
<b>5</b>	- 1,7	+ 5,3	<b>21</b>	- 0,3	+ 4,8
<b>6</b>	+ 0,3	+ 5,1	<b>22</b>	- 0,04	+ 4,7
<b>7</b>	- 3,7	+ 5,2	<b>23</b>	- 1,8	+ 5,3
<b>8</b>	- 0,3	+ 2,0	<b>24</b>	+ 0,2	+ 3,5
<b>9</b>	- 3,2	+ 3,1	<b>25</b>	- 1,8	+ 4,8
<b>10</b>	- 0,3	+ 5,4	<b>26</b>	- 0,2	+ 5,1
<b>11</b>	- 2,5	+ 4,9	<b>27</b>	- 0,1	+ 3,7
<b>12</b>	+ 0,1	- 3,9	<b>28</b>	- 0,6	+ 2,9
<b>13</b>	- 0,2	+ 5,1	<b>29</b>	- 0,2	+ 3,5
<b>14</b>	- 0,9	+ 5,4	<b>30</b>	- 0,2	+ 3,2
<b>15</b>	- 0,6	+ 2,1	<b>31</b>	- 0,2	+ 3,3
<b>16</b>	- 2,5	+ 4,7	<b>32</b>	- 1,3	+ 4,6

**Tabela 3** – Diferenças percentuais dos valores das reações de apoio determinados através do PORT-TRI em relação aos determinados pelo SAP90.

Nó	Diferença dos valores do PORT-TRI com relação ao SAP90 (%)		
	Reação 1	Reação 2	Reação 3
1	- 1,6	- 1,6	- 1,6
2	+ 3,3	+ 5,8	- 1,8
3	- 5,8	+ 1,9	- 1,5
10	- 1,5	- 0,6	+ 3,2
19	- 1,8	- 1,3	- 5,7
28	- 0,8	- 0,4	+ 2,2
37	- 0,3	- 0,04	- 0,7
38	+ 1,9	+ 6,2	- 0,7

**Tabela 4** – Diferenças percentuais entre os valores dos deslocamentos verticais dos nós determinados através do PORT-TRI e os determinados pelo SAP90.

Nó	Diferença percentual	Nó	Diferença percentual
6	- 2,5	21	+ 2,3
7	- 3,5	24	+ 0,8
11	- 1,7	25	+ 1,1
12	- 0,8	29	- 2,1
15	- 0,5	33	- 3,1
16	+ 0,9	34	- 2,5
20	+ 1,2		

Analisando-se as diferenças percentuais, verifica-se que estas são aceitáveis, o que comprova a consistência do software PORT-TRI.

## **6.2 PROTÓTIPO**

---

O estudo do protótipo está dividido em quatro etapas: malha lamelar, arcos de extremidade, vigas de apoio lateral e ensaio.

### **6.2.1 Malha Lamelar**

#### ***6.2.1.1 Madeira Utilizada***

A madeira para uso estrutural requer um bom controle de qualidade das peças, pois há necessidade de se garantir sua rigidez e resistência mecânica. Este controle de qualidade pode ser realizado por métodos mecânicos, métodos visuais, ou preferencialmente, pela combinação de ambos.

Para a montagem do protótipo lamelar foram feitas as caracterizações visual e mecânica do lote de peças de madeira serrada. Para a confecção da malha lamelar, utilizou-se a espécie de conífera *taeda* do gênero *Pinus*.

Para se fazer a classificação visual do lote, foi consultado o Catálogo de Normas de Madeira Serrada, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRAS (1990). Foram selecionadas as peças de madeira destinadas ao uso estrutural, classificadas como madeira de Primeira Classe. Os critérios normativos utilizados para esta seleção estão apresentados na **Tabela 5**.

Do lote de madeira com 323 peças, 260 foram selecionadas para o uso estrutural, o que equivale a 19,5% de perda das peças, **Figura 68**.

Foi feita a caracterização simplificada da resistência da madeira. Segundo o item 6.3.3 da NBR 7190:1997, isto é permitido para espécies usuais, sendo feito a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras. Desta forma, foram realizados os ensaios para a determinação da umidade, densidade, resistência e rigidez paralelas às fibras da madeira.

**TABELA 5** – Critérios de rejeição ou aceitação da madeira para uso estrutural. **Fonte:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRAS (1990).

<b>Presença de medula e casca, podridão, rachaduras no cerne</b>	Não são permitidos.
<b>Faixas de parênquima</b>	Não são permitidas em peças submetidas a esforços de Compressão.
<b>Fibras ou grã inclinada</b>	Se permite inclinação de até 12,5% em qualquer parte da peça.
<b>Nós</b>	São permitidos, desde que a soma de seus diâmetros máximos, medidos em relação à largura da face na qual eles aparecem, não exceda a 1/3 da largura desta face e que estejam localizados fora dos cortes limpos. Para nós ocos, se permite um diâmetro máximo de 2 cm ou 1/8 da altura da face da peça e que a face apresente no máximo 1 nó por metro linear.
<b>Perfurações</b>	Perfurações ativas (presença de insetos vivos) ou perfurações grandes não são permitidas. Perfurações inativas (vazios ou presença de insetos mortos) são permitidas mas devem ser consideradas como defeitos, e excluídas dos cortes limpos.
<b>Manchas por fungos</b>	São permitidas desde que sejam apenas troca de cor.
<b>Encanoamento</b>	É permitido no caso em que o aplainamento da peça não reduza sua espessura em mais de 4 mm abaixo de sua espessura nominal.
<b>Arqueamento</b>	É permitido até uma flecha máxima de 5 mm por metro, medida em relação ao comprimento total da peça.
<b>Encurvamento</b>	É permitido em peças maiores que 3 m de comprimento até uma flecha máxima de 5 mm por metro, medida em relação a todo o comprimento da peça.
<b>Torcimento</b>	Não é permitido.
<b>Ocorrência de Escamas</b>	Não é permitida em corte radial. Em corte tangencial é permitida desde que sua profundidade não exceda 1/10 da espessura e seu comprimento seja menor que 1/4 do comprimento total da peça.
<b>Rachadura</b>	Não é permitida nas bordas. É permitida nas extremidades da face, desde que o comprimento cumulativo delas não ultrapasse 10% do comprimento da peça; entretanto, não é permitida nos cortes limpos.
<b>Presença de Alburno</b>	É permitida em uma borda e em uma face e na condição de que não exceda 10% da largura desta face; entretanto, não é permitida nos cortes limpos.



**FIGURA 68** – Lote de madeira serrada da espécie *taeda*, do gênero *Pinus*.

Segundo o item 2 do Anexo B da NBR 7190:1997, para a investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos, cada lote não deve ter volume superior a  $12 \text{ m}^3$ . Deve-se extrair desse lote uma amostra de corpos-de-prova distribuídos aleatoriamente ao longo do lote, devendo ser representativa da totalidade deste. Para isso, não se deve retirar mais de um corpo-de-prova de uma mesma peça.

Os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão da seção transversal da peça considerada, mas nunca menor que 30 cm. O número mínimo de corpos-de-prova para a caracterização simplificada é seis.

Seguindo estas especificações, foram extraídos seis corpos-de-prova para a determinação da umidade e da densidade do lote considerado, e seis para o ensaio de compressão paralela às fibras.

#### a) UMIDADE

De acordo com o item 5 do Anexo B da NBR 7190:1997, determina-se o teor de umidade da madeira através da eq.(28), onde:

- ▲  $m_i$  = massa inicial da madeira em gramas;
- ▲  $m_s$  = massa da madeira seca em gramas.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (28)$$

Os corpos-de-prova têm seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm. Na confecção dos corpos-de-prova devem ser utilizadas ferramentas afiadas para se evitar a chamada “queima” de suas faces, que pode provocar uma perda de água imediata, prejudicial à determinação da real umidade da amostra.

Considerando-se os procedimentos de ensaio descritos no item 5.4 do Anexo B da NBR 7190:1997, foram determinados os teores de umidade dos seis corpos-de-prova, sendo que a média destes valores representa o teor de umidade do lote considerado. Estes valores estão apresentados na **Tabela 6**.

#### b) DENSIDADE

De acordo com o item 6 do Anexo B da NBR 7190:1997, a densidade básica é uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, **eq.(29)**, onde:

- ▲  $m_s$  - massa da madeira seca em quilogramas;
- ▲  $V_{sat}$  - volume da madeira saturada em metros cúbicos.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (29)$$

A densidade aparente é uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, **eq.(30)**, onde:

- ▲  $m_{12}$  - massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas;
- ▲  $V_{12}$  - volume da madeira a 12% de umidade em metros cúbicos.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (30)$$

Os corpos-de-prova devem ter forma prismática com seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e 5,0 cm de comprimento ao longo das fibras. Se a distância radial entre os anéis de crescimento for maior que 4 mm, a seção transversal do corpo-de-prova deve ser aumentada para abranger pelo menos cinco anéis de crescimento.

Os corpos-de-prova utilizados para a determinação da densidade foram os mesmos utilizados para a determinação da umidade.

Considerando-se os procedimentos de ensaio descritos no item 6.4 do Anexo B da NBR 7190:1997, foram determinados os valores das densidades dos seis corpos-de-prova, sendo que a média destes valores representa a densidade do lote considerado. Estes valores estão apresentados na **Tabela 6**.

**TABELA 6** – Valores de umidade e densidade dos corpos-de-prova e do lote.

<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b><math>\rho_{bas}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	14	460	510
<b>2</b>	14	430	480
<b>3</b>	13	380	430
<b>4</b>	14	390	440
<b>5</b>	13	440	500
<b>6</b>	14	420	470
<b>Média (Lote)</b>	<b>13,7</b>	<b>420</b>	<b>472</b>

### c) RESISTÊNCIA E RIGIDEZ PARALELAS ÀS FIBRAS

O objetivo deste ensaio é a determinação da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo.

De acordo com o item 8 do Anexo B da NBR 7190:1997, a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em

um corpo-de-prova com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento. Tal resistência é determinada através da eq.(31), onde:

- ▲  $F_{c0,max}$  - máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio;
- ▲  $A$  - área inicial da seção transversal comprimida;
- ▲  $f_{c0}$  - resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (31)$$

Como o lote em questão contém peças de espessura nominal de 2,5 cm, não foi possível se extraírem corpos-de-prova com as dimensões estabelecidas acima. Mas, de acordo com o item 8.3 do Anexo B da referida norma, permite-se empregar corpos-de-prova com seção transversal quadrada, de lado igual à espessura do elemento delgado, de pelo menos 1,8 cm, e comprimento igual a três vezes o lado da seção transversal. Dessa forma, as dimensões dos corpos-de-prova foram de 2,5 cm x 2,5 cm x 7,5 cm.

Tendo-se os valores de resistência  $f_{c0,i}$  dos  $n$  corpos-de-prova ensaiados, determinou-se o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, de acordo com a eq.(32).

$$f_{c0,k} = \left( 2 \cdot \frac{f_{c0,1} + f_{c0,2} + \dots + f_{c0,\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{c0,\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,1 \quad (32)$$

Os resultados devem ser colocados em ordem crescente  $f_{c0,1} \leq f_{c0,2} \leq \dots \leq f_{c0,n}$ , desprezando-se os valor mais alto se o número de corpos-de-prova for ímpar, e não se tomando para  $f_{c0,k}$  valor inferior a  $f_{c0,1}$  nem a 0,7 do valor médio ( $f_{c0,m}$ ).

A rigidez da madeira na direção paralela às suas fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama *tensão x deformação específica*. O módulo de elasticidade é determinado através da eq.(33), onde:

- ▲  $\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$  são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência  $f_{c0}$ ;
- ▲  $\epsilon_{10\%}$  e  $\epsilon_{50\%}$  são as deformações específicas medidas no corpo-de-prova, correspondentes às tensões de  $\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$ .

$$E_{c,0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (33)$$

O módulo de elasticidade considerado para o lote é a média dos valores dos módulos de elasticidade determinados para os corpos-de-prova ensaiados ( $E_{c0,m}$ ).

Considerando-se os procedimentos de ensaio descritos no item 8.4 do Anexo B da NBR 7190:1997, foram determinadas as propriedades de resistência e de rigidez dos seis corpos-de-prova a partir do ensaio à compressão paralela às fibras na máquina universal de ensaios do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. Estes valores estão apresentados na **Tabela 7**.

**TABELA 7** – Valores de resistência à compressão paralela e módulo de elasticidade longitudinal dos corpos-de-prova ensaiados e do lote.

Corpo-de-prova	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)
1	44,4	8196
2	53,5	9478
3	58,6	10351
4	51,6	8224
5	61,1	10255
6	61,7	10948
<b>Lote</b>	<b>46,7 (<math>f_{c0,k}</math>)</b>	<b>9575 (<math>E_{c0,m}</math>)</b>

De acordo com o item 6.2.1 da NBR 7190:1997, na caracterização usual das propriedades de resistência e de rigidez de um dado lote de madeira, os resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo de 10% a 20%, devem ser apresentados com os valores corrigidos para a umidade padrão de 12%, através das expressões apresentadas em **eq.(34)** e **eq.(35)**.

$$f_{12\%} = f_{U\%} \left[ 1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (34)$$

$$E_{12\%} = E_{U\%} \left[ 1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (35)$$

Desta forma, foram corrigidos os valores de resistência e de rigidez apresentados na **Tabela 7**, considerando-se a umidade média do lote de 13,7%, como apresentado na **Tabela 6**:

$$f_{12\%} = 46,7 \cdot \left[ 1 + \frac{3 \cdot (13,7 - 12)}{100} \right] = 49,1 \text{ MPa}$$

$$E_{12\%} = 9575 \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot (13,7 - 12)}{100} \right] = 9900 \text{ MPa}$$

Pelo exposto, concluiu-se que o lote de madeira classificado se enquadra na classe de resistência C-30 das Coníferas, especificada na Tabela 8 da NBR 7190:1997.

Segundo o item 6.4.3 da NBR 7190:1997, o valor de cálculo de uma determinada propriedade da madeira é obtido a partir do valor característico, através da **eq.(36)**, onde:

- ▲  $\gamma_w$  é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira;
- ▲  $k_{mod}$  é o coeficiente de modificação, que leva em conta as influências não consideradas por  $\gamma_w$ .

O coeficiente de modificação  $k_{mod}$  é dado pelo produto  $k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3}$ , estando tais fatores contidos nas Tabelas 10 e 11 do item normativo citado.

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (36)$$

Dessa forma, determinou-se a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras do lote madeira em questão:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{carregamento permanente e madeira serrada : } k_{\text{mod},1} = 0,60 \\ \text{classe de umidade 1 e madeira serrada : } k_{\text{mod},2} = 1,0 \\ \text{coníferas na forma de peças estruturais maciças de madeira serrada : } k_{\text{mod},3} = 0,8 \\ \gamma_{\text{wc}} = 1,4 \end{array} \right.$$

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} = 0,60 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,48$$

$$f_{\text{c}0,\text{d}} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{\text{c}0,\text{k}}}{\gamma_c} = 0,48 \cdot \frac{4,91}{1,4} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \text{ (16,83 MPa)}$$

Segundo o item 6.4.9 da norma em questão, o módulo de elasticidade paralelamente às fibras, deve ser tomado com o valor efetivo, **eq.(37)**.

$$E_{\text{c}0,\text{ef}} = k_{\text{mod}} \cdot E_{\text{c}0,\text{m}} \quad (37)$$

Dessa forma, calculou-se o módulo de elasticidade efetivo:

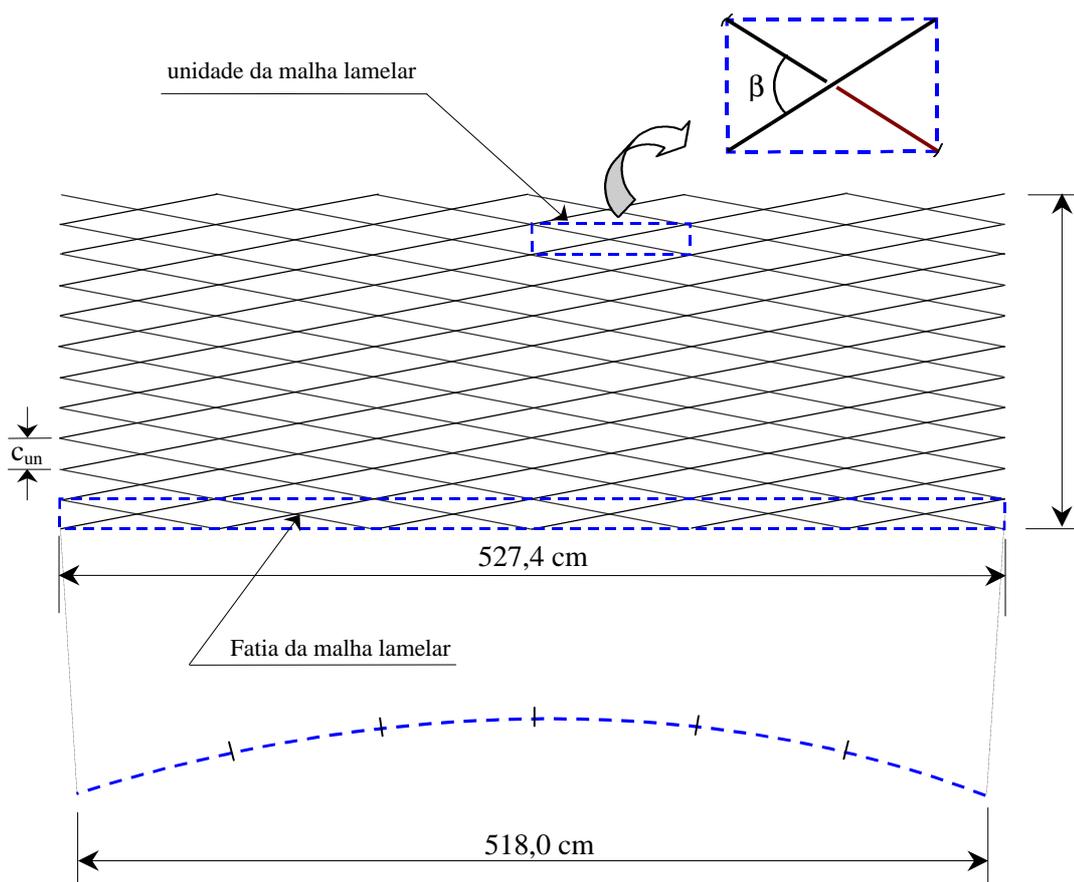
$$E_{\text{c}0,\text{ef}} = k_{\text{mod}} \cdot E_{\text{c}0,\text{m}} = 0,48 \cdot 990 = 475,200 \text{ kN/cm}^2 \text{ (4752,00 MPa)}$$

### 6.2.1.2 Características Geométricas

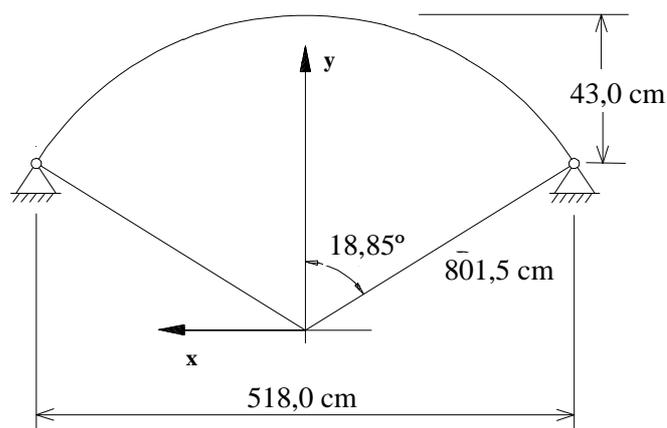
As dimensões horizontais em planta da abóbada lamelar são de 518,0 cm x 400,0 cm, **Figura 69**. Tais dimensões foram definidas em função da área que foi coberta com o protótipo, pois este foi utilizado para cobrir a ligação entre o prédio principal do LaMEM e a oficina de processamento da madeira, como está apresentado no **Apêndice I**.

### Arco da Abóbada

- ▲ flecha:  $h = 43,0$  cm, **Figura 70**;
- ▲ máxima corda:  $L = 518,0$  cm;
- ▲ raio:  $R = \left( \frac{4 \cdot h^2 + L^2}{8 \cdot h} \right) = 801,5$  cm ;
- ▲ ângulo de abertura de meio arco:  $\alpha_0 = \arcsen\left(\frac{L/2}{R}\right) = 18,85^\circ$ ;
- ▲ comprimento do arco:  $\ell_{\text{arco}} = \frac{\pi \cdot \alpha_0 \cdot R}{90} = 527,4$  cm .



**FIGURA 69** – Representação da malha da abóbada planificada e do arco da abóbada.

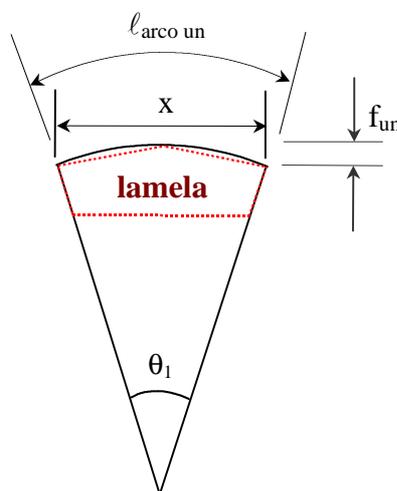


**FIGURA 70** - Elementos da geometria do arco lamelar do protótipo.

Considerando-se a malha da abóbada apresentada na **Figura 69**, cuja fatia transversal corresponde a seis unidades da malha lamelar, tem-se o arco relativo a uma unidade rebatida no plano da seção transversal da abóbada representado pela **Figura 71**.

#### Arco de uma Unidade da Malha Lamelar

- ▲ ângulo de abertura (**Figuras 70 e 71**):  $\theta_1 = \frac{18,85}{3} = 6,28^\circ$ ;
- ▲ comprimento (**Figuras 69 e 71**):  $l_{\text{arco un}} = \frac{527,4}{6} = 87,9 \text{ cm}$ ;
- ▲ flecha:  $f_{\text{un}} = R \cdot (1 - \cos \theta_1/2) = 1,3 \text{ cm}$ ;
- ▲ máxima corda:  $x = 2 \cdot R \cdot (\sin \theta_1/2) = 87,8 \text{ cm}$ .

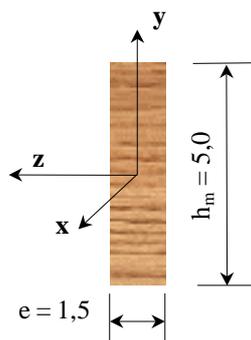


**FIGURA 71** – Arco relativo a uma unidade de malha lamelar, em plano transversal à abóbada.

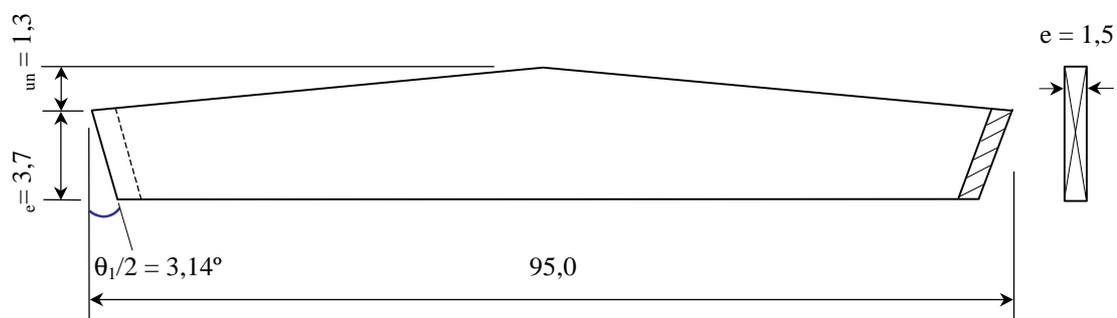
## Lamela

- ▲ ângulo interlamelar (**Figura 69**):  $\beta = 45^\circ$ ;
- ▲ comprimento:  $\ell_{\text{lamela}} = \frac{x}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} = 95,0 \text{ cm}$ ;
- ▲ seção transversal do meio da lamela:  $1,5 \text{ cm} \times 5,0 \text{ cm} \Rightarrow A_{\text{lamela}} = 7,5 \text{ cm}^2$ ;
- ▲ momentos de inércia da seção transversal:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_x = 0 \text{ (foi desprezada a resistência das barras à torção)} \\ I_y = \frac{5,0 \cdot 1,5^3}{12} = 1,4063 \text{ cm}^4 \\ I_z = \frac{1,5 \cdot 5,0^3}{12} = 15,6250 \text{ cm}^4 \end{array} \right.$$



a) Seção transversal mediana com eixos centrais de inércia.



b) Seção longitudinal vertical.

**FIGURA 72** – Geometria da lamela. Desenhos sem escala. [Unidade: cm].

### ⇒ Abóbada

- ▲ espaçamento entre os nós da malha lamelar tridimensional ao longo de seu comprimento:  $c_{un} = \ell_{lamela} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = 36,4 \text{ cm}$  (**Figura 69**);
- ▲ quantidade de unidades de malha lamelar:  $6 \times 11 = 66$  unidades;
- ▲ quantidade de nós e de barras: 150 nós e 264 barras.

#### 6.2.1.3 Carregamento

A partir do peso específico  $\mathbf{g}$  da madeira e da carga  $\mathbf{p}$  proveniente das telhas (foram utilizadas telhas de policarbonato para o fechamento do protótipo), determinou-se a carga concentrada permanente  $\mathbf{P}$  atuante em cada nó, através da **eq.(11)**:

$$P = (1,03) \cdot \gamma \cdot v + p \cdot A$$

Para o protótipo, tem-se:

$$\text{▲ } v = \left( \frac{h_m + h_e}{2} \cdot l_{lamela} \right) \cdot e = \frac{5,0 + 3,7}{2} \cdot 95,0 \cdot 1,5 = 619,875 \text{ cm}^3;$$

( \ volume total de madeira referente à malha do protótipo: 264 barras de 309,938  $\text{cm}^3$  **P** 0,0818  $\text{m}^3$  de madeira **P** 0,004  $\text{m}^3$  de madeira /  $\text{m}^2$  de cobertura )

$$\text{▲ } A = \frac{36,4 \cdot 95,0}{2} \cdot \cos\left(\frac{45}{2}\right) = 1597,39 \text{ cm}^2, \text{ eq.(10);}$$

$$\text{▲ } \rho_{ap} = 472 \text{ kg/m}^3 \text{ (ver Tabela 6)} \rightarrow \gamma = 472 \text{ kgf/m}^3 \cong 4,720 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3;$$

$$\text{▲ } p = 0,0167 \text{ kN/m}^2 = 1,670 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^2 \text{ (telha de policarbonato alveolar de 8 mm de espessura);}$$

$$\therefore P = 1,03 \cdot 4,720 \times 10^{-6} \cdot 619,875 + 1,670 \times 10^{-6} \cdot 1597,39 = 0,0057 \text{ kN / nó}$$

Para se fazerem as combinações das ações, como apresentado no item 5.3 deste trabalho, é necessário saber se as ações permanentes são de pequena ou de grande variabilidade.

De acordo com o item 5.6.4 da NBR 7190:1997, as ações permanentes são de grande variabilidade, “quando o peso próprio da estrutura não supera 75% da totalidade dos pesos permanentes”. Caso contrário, as ações permanentes são de pequena variabilidade. Para o protótipo, tem-se:

$$\frac{\text{peso próprio da estrutura}}{\text{totalidade dos pesos permanentes}} = \frac{4,72 \times 10^{-6} \cdot 619,875 \text{ kN/nó}}{0,0057 \text{ kN/nó}} \cong 51 \%$$

Desta forma, as ações permanentes atuantes no protótipo são de grande variabilidade, estando seus coeficientes de ponderação contidos na Tabela 4 da NBR 7190:1997.

Com os valores destes coeficientes, foram determinados os carregamentos para o protótipo, de acordo com as equações **eq.(12)** e **eq.(13)**, considerando-se apenas as ações permanentes:

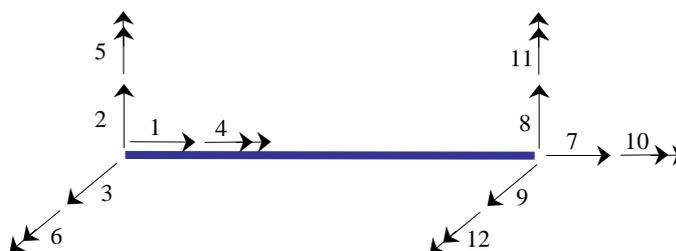
$$\blacktriangle F_d = 1,4 \cdot 0,0057 = 0,0080 \text{ kN/nó}$$

$$\blacktriangle F_{d,uti} = 0,0057 \text{ kN/nó}$$

#### 6.2.1.4 Cálculo do protótipo

Calculou-se o protótipo através do software PORT-TRI, a partir do qual, foram determinados os esforços solicitantes nas barras, os deslocamentos dos nós e as reações de apoio da estrutura.

Cada lamela corresponde a duas barras na estrutura tridimensional. As coordenadas locais referentes às extremidades das barras estão representadas na **Figura 73**.



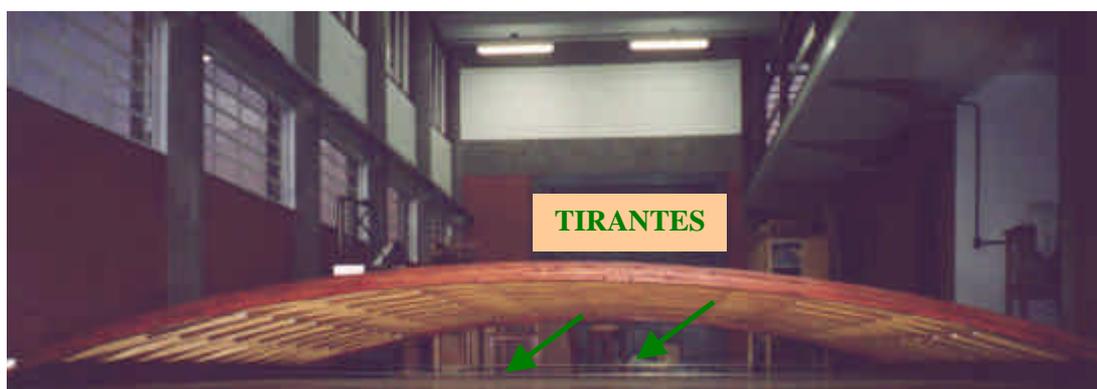
**FIGURA 73** - Coordenadas locais referentes às extremidades das barras da estrutura.

De acordo com o programa computacional em questão, para cada nó da estrutura, consideram-se seis coordenadas globais, referentes a três translações e a três rotações.

A malha lamelar foi apoiada lateralmente em duas vigas de madeira e nas extremidades, em dois arcos de madeira laminada colada, **Figura 74-a**. Foram utilizados três tirantes para absorverem os esforços horizontais que a malha lamelar e os arcos aplicam sobre as vigas laterais, sendo dois tirantes posicionados nas extremidades das vigas, e um terceiro, no meio destas, **Figura 74-b**.



a) Vista superior global do protótipo.



b) Vista frontal do protótipo.

**FIGURA 74** - Vista global do protótipo apoiado sobre dois arcos de madeira laminada colada e duas vigas de madeira maciça.

Os nós posicionados no contorno da estrutura foram considerados como articulações em pontos impedidos de transladarem. O vínculo de translação paralelo à geratriz, dos nós posicionados no arco, ocorre devido à posição final do protótipo, **Figura 75**.



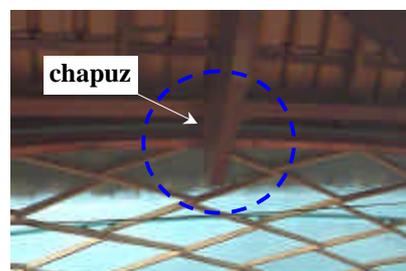
a) Arco encostado no pilar de concreto.



b) Região de contato entre o arco e o pilar.



c) Arco encostado no chapuz que apoia a terça.



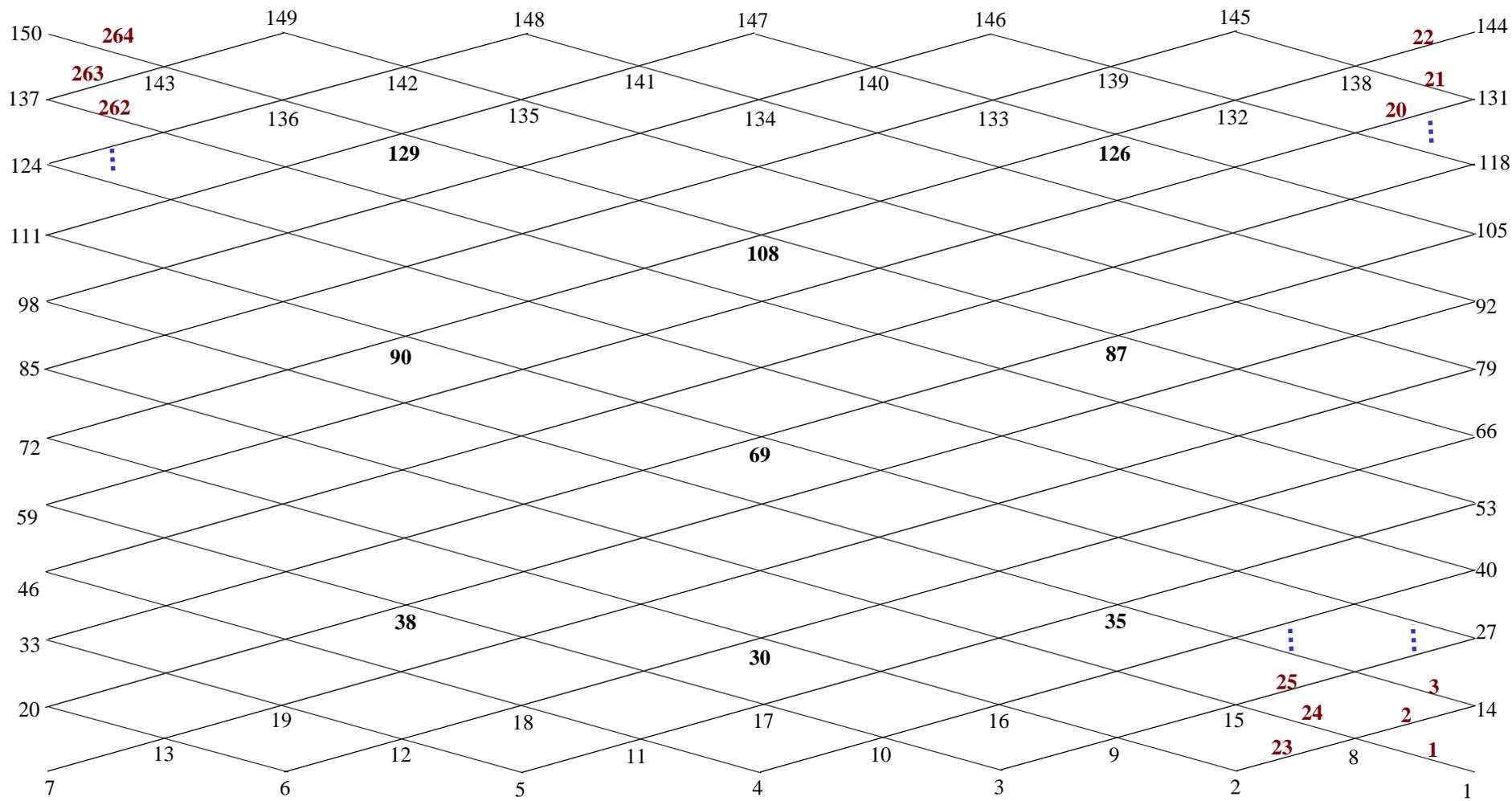
d) Contato entre o arco e o chapuz.

**FIGURA 75** – Situação em que os arcos ficam encostados em pilares, impedidos de saírem de seus planos.

As barras da estrutura foram consideradas com extremidades contínua/articulada ou vice-versa. A **Figura 76** apresenta a numeração dos nós e das barras da malha tridimensional. Os nós foram numerados da direita para a esquerda e de baixo para cima e as barras, de baixo para cima, da direita para a esquerda. A estrutura foi calculada aplicando-se os carregamentos nodais determinados no item 6.2.1.3, **Tabela 8**.

**TABELA 8** – Carregamentos dos nós da estrutura lamelar.

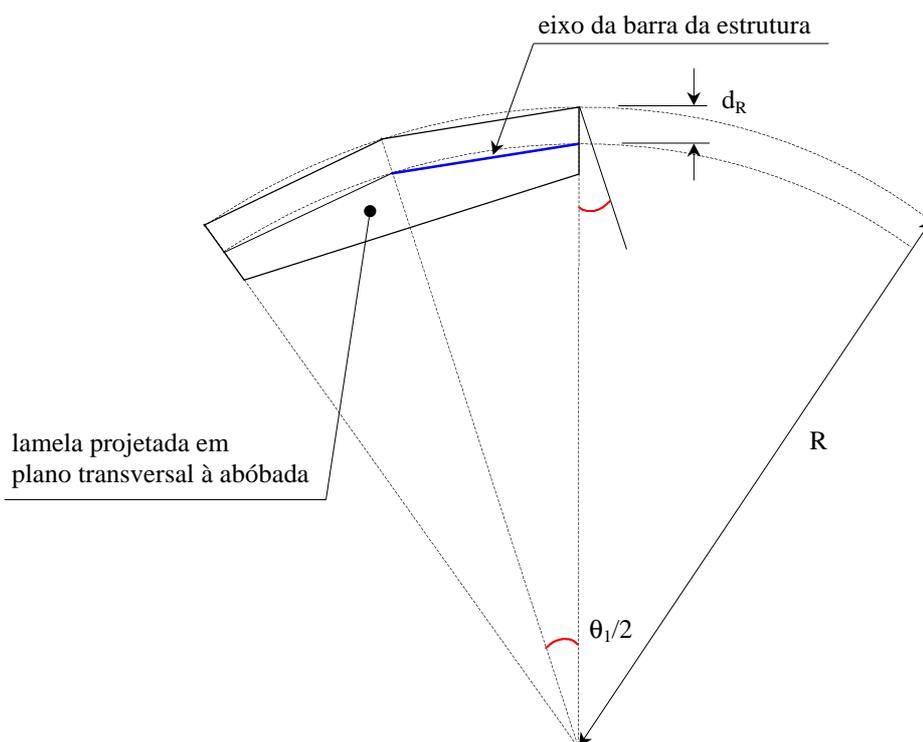
Posição do nó	Carregamento ( kN )	
	$F_d$ E.L.Último	$F_{d, uti}$ E.L.Utilização
internos à malha	0,0080	0,0057
do contorno da malha	0,0040	0,0029
dos cantos da malha	0,0020	0,0014



**FIGURA 76** - Numeração dos nós e das barras da malha lamelar.

■ nós  
 ■ barras

Um detalhe importante se refere ao posicionamento dos nós da malha lamelar em relação à geometria da lamela. Sabendo-se que a altura da lamela varia ao longo de seu comprimento, foi considerado que o eixo circular, relativo à seção transversal da abóbada, unisse os nós da malha, ou seja, passasse pelos pontos médios das alturas das extremidades das lamelas, **Figura 77**.



**FIGURA 77** – Representação de uma lamela projetada em um plano transversal à abóbada, para visualização do eixo considerado para as barras.

Desta forma, calculou-se o protótipo considerando-se para o raio do arco circular de sua seção transversal, o valor do raio ( $R$ ) determinado no item 6.2.1.2, subtraído da distância  $d_R$ , definida pela eq.(38), onde:

- ▲  $h_e$  - altura da extremidade da lamela, **Figura 72**;
- ▲  $\theta_1$  - ângulo de abertura do arco relativo a uma unidade da malha lamelar, **Figura 71**.

$$d_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_e}{\cos(\theta_1/2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3,7}{\cos(6,28/2)} \cong 1,9 \text{ cm} \quad (38)$$

Portanto, determinou-se o valor desse raio:  $R - d_R = 801,5 - 1,9 = 799,6 \text{ cm}$ .

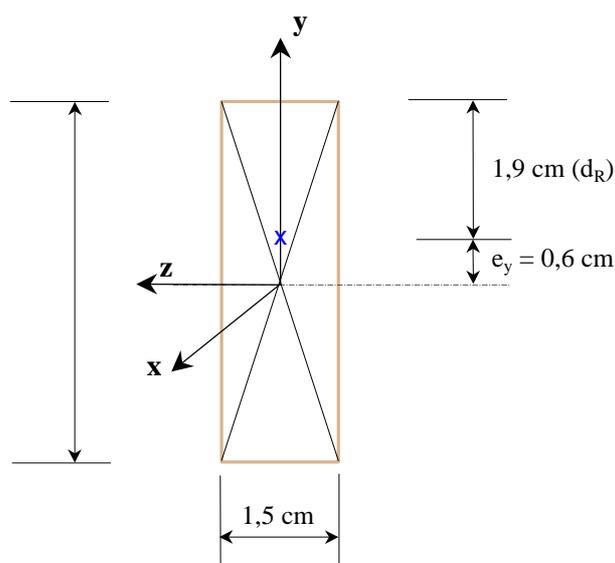
Os valores dos esforços atuantes nas barras, dos deslocamentos dos nós da malha e as reações de apoio calculados pelo software citado, estão apresentados no **Anexo B**. Devido à simetria da estrutura, como comentado no item 6.1, foram apresentados os resultados do cálculo referentes à metade da estrutura.

### 6.2.1.5 Verificações

A partir dos esforços calculados para as barras da estrutura, em estados limites últimos (**Anexo B.1**), foram feitas as verificações em relação à segurança para a ocorrência de flexo-compressão das barras mais solicitadas.

Cabe salientar que os eixos principais de inércia da seção transversal foram designados por **y** e **z**, ao invés de **x** e **y**, como considerado pela NBR 7190:1997, eq.(15) e eq.(16). Isso implica que as tensões máximas devidas às componentes de flexão atuantes nessa seção são indicadas por  $\sigma_{Mz,d}$  e  $\sigma_{My,d}$ .

Através da **Figura 77**, percebe-se que o eixo adotado para a barra não intercepta o centro de gravidade da seção transversal mediana da lamela. O valor da distância entre eles está apresentado na **Figura 78**.



**FIGURA 78** – Excentricidade referente à seção transversal mediana da lamela, formada entre seu centro de gravidade e o eixo adotado para a barra.

Portanto, essa excentricidade faz com que os esforços relativos às coordenadas locais **1** e **3** das barras (considerando-se uma barra com extremidades contínua/articulada), produzam momentos, **Figura 79**. O momento produzido pelo esforço referente à coordenada **1**, soma-se vetorialmente com o momento referente à coordenada **6**.

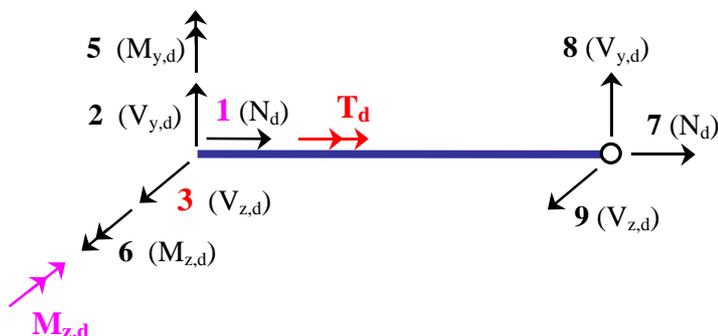
Por outro lado, o esforço relativo à coordenada local **3**, produz momento de torção  $T_d$  cuja tensão máxima é verificada de acordo com o item 7.4.4 da NBR 7190:1997, como expresso pela **eq.(39)**, sendo:

- ▲  $f_{v0,d}$  – resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira considerado como 12% do valor de  $f_{c0,d}$  para as coníferas (Tabela 12, NBR 7190:1997);
- ▲  $\tau_{T,d}$  - tensão de torção, cujo valor máximo é dado por:  $T_d/W_t$ , sendo  $T_d$  o valor de cálculo do momento de torção, e  $W_t$ , o momento de resistência à torção, PISSARENKO et al. (1985).

$$\tau_{T,d} \leq f_{v0,d} \quad (39)$$

Para o protótipo, tem-se:

- ▲  $f_{v0,d} = 0,12 \cdot f_{c0,d} = 0,12 \cdot 1,683 = 0,202 \text{ kN/cm}^2$ ;
- ▲  $W_t = \alpha \cdot h \cdot b^2 = 0,272 \cdot 5,0 \cdot 1,5^3 = 4,59 \text{ cm}^3$ , o valor de  $\alpha$  foi determinado através da relação  $h/b$ , PISSARENKO et al. (1985).



**FIGURA 79** – Representação de uma barra com extremidades contínua/articulada, e dos esforços atuantes neste caso.

As verificações com relação aos esforços cortantes foram feitas para as seções transversais de menor altura, ou seja, correspondentes às articulações. Para o caso da **Figura 79**, tais esforços se referem às coordenadas locais **8** e **9**. De acordo com o item 7.4.1 da NBR 7190:1997, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais é expressa através da eq.(40), sendo:

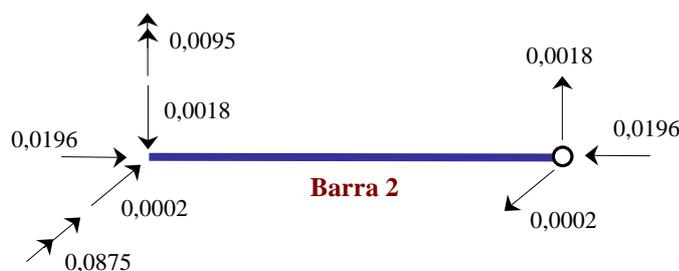
- ▲  $f_{v0,d}$  – resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira considerado como 12% do valor de  $f_{c0,d}$  para as coníferas (Tabela 12, NBR 7190:1997);
- ▲  $\tau_d$  - máxima tensão de cisalhamento, calculado para seção retangular de largura **b** e altura **h**, por:  $\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$  sendo  $V_d$  o valor de cálculo do esforço cortante.

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad (40)$$

Para o protótipo, tem-se:

- ▲  $f_{v0,d} = 0,12 \cdot f_{c0,d} = 0,12 \cdot 1,683 = 0,202 \text{ kN/cm}^2$ ;
- ▲ seção transversal da extremidade de menor altura: 1,5 cm x 3,8 cm.

De acordo com o exposto, foram verificadas as barras mais solicitadas do protótipo lamelar. Como exemplo, será apresentada a verificação realizada para a barra de número **2**, cujos esforços extraídos do **Anexo B.1** estão representados pela **Figura 80**. Foram consideradas quatro casas decimais para facilitar a visualização dos valores dos esforços.



**FIGURA 80** – Esforços atuantes na barra de número **2** do protótipo, extraídos do Anexo B.1. [Unidades: kN e cm].

Os esforços atuantes considerados em valor absoluto (módulo) são:

$$\begin{cases} N_{c0,d} = 0,0196 \text{ kN} \\ M_{y,d} = 0,0095 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ M_{z,d} = 0,0875 + N_{c0,d} \cdot e_y = 0,0993 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ T_d = V_{z,d} \cdot e_y = 0,0002 \cdot 0,6 = 0,0001 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ V_{y,d} = 0,0018 \text{ kN} \\ V_{z,d} = 0,0002 \text{ kN} \end{cases}$$

A área e os momentos de inércia referentes à seção transversal na posição mediana da lamela, como determinados no item 6.2.1.2 são:

$$\{ A = 7,50 \text{ cm}^2 \quad I_y = 1,4063 \text{ cm}^4 \quad I_z = 15,6250 \text{ cm}^4$$

**Verificação à flexo-compressão** [de acordo com eq.(15) e eq.(16)]:

$$\begin{cases} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,0196}{7,5} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{My,d} = \frac{M_{y,d}}{I_y} \cdot \frac{b}{2} = \frac{0,0095}{1,4063} \cdot \frac{1,5}{2} = 0,005 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h}{2} = \frac{0,0993}{15,6250} \cdot \frac{5,0}{2} = 0,016 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,003}{1,683} \right)^2 + 0,5 \cdot \frac{0,005}{1,683} + \frac{0,016}{1,683} = 0,01 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{cases}$$

**Verificação à torção** [de acordo com eq.(39)]:

$$\begin{cases} \tau_{T,d} = \frac{T_d}{W_t} = \frac{0,0001}{4,59} = 0,00002 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,202 \text{ kN/cm}^2 \end{cases} \quad \therefore \tau_{T,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

**Verificação ao cisalhamento** [de acordo com eq.(38)]:

$$\begin{cases} \tau_{y,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{y,d}}{b \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0018}{1,5 \cdot 3,8} = 0,0005 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,202 \text{ kN/cm}^2 \end{cases} \quad \therefore \tau_{y,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

$$\begin{cases} \tau_{z,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{z,d}}{b \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0002}{3,8 \cdot 1,5} = 0,0005 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,202 \text{ kN/cm}^2 \end{cases} \quad \therefore \tau_{z,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

Pelo fato das barras da estruturas serem solicitadas à flexo-compressão, foi necessário fazer a verificação de sua estabilidade. Determinou-se o índice de esbeltez das barras:

$$\lambda_y = \frac{\ell_{\text{lamela}} \cdot \sqrt{12}}{2 \cdot b} = 110 \Rightarrow \text{Esbelta}$$

$$\lambda_z = \frac{\ell_{\text{lamela}} \cdot \sqrt{12}}{h} = 65 \Rightarrow \text{Medianamente Esbelta}$$

A verificação da estabilidade foi feita de acordo com o item 5.4.2 deste trabalho, através da **eq.(18)**:

$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

Esta verificação foi feita para as barras mais solicitadas. Como exemplo, é apresentada a verificação realizada para a barra de número **2**.

**Com relação ao eixo de menor inércia (y):**

$$\begin{cases} \sigma_{Nc0,d} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{M,d} = \frac{M_d}{1,4063} \cdot \frac{1,5}{2} \text{ (o valor de } M_d \text{ será determinado a seguir)} \\ f_{c0,d} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \end{cases}$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right)$$

$$\blacktriangleright F_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{co,ef} \cdot I_y}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 475,200 \cdot 1,4063}{(95,0/2)^2} = 2,923 \text{ kN}$$

$$\blacktriangleright e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c$$

$$e_i \begin{cases} \frac{M_{1d}}{N_{c0,d}} = \frac{0,0095}{0,0196} = 0,48 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 1,5/30 = 0,05 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_i = 0,48 \text{ cm}$$

$$e_a \begin{cases} \frac{L_0}{300} = \frac{95,0/2}{300} = 0,15 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 1,5/30 = 0,05 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_a = 0,15 \text{ cm}$$

$$e_c \begin{cases} = (e_{i,g} + e_a) \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\phi \cdot [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]}{F_E - [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]} \right] - 1 \right\} \\ e_{i,g} = 0,48 \text{ cm} \\ e_a = 0,15 \text{ cm} \\ N_{g,k} = 0,0140 \text{ kN (Anexo B.2)} \\ N_{q,k} = 0 \text{ kN (n\~{a}o foram consideradas a\~{c}o\~{e}s vari\~{a}veis) \\ F_E = 2,923 \text{ kN} \\ \phi = 0,8 \text{ (Tabela 15 NBR 7190:1997)} \end{cases} \quad \therefore e_c = 0,02 \text{ cm}$$

$$\therefore e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c = 0,48 + 0,15 + 0,02 \cong 0,7 \text{ cm}$$

Ressalta-se que  $N_{g,k}$  é o valor característico do esforço normal devido à carga permanente, que foi extraído do **Anexo B.2**, que contém os esforços devidos ao carregamento da estrutura para estados limites de utilização, pois este carregamento foi definido como o somatório dos valores característicos das ações permanentes, **eq.(14)**. Dessa forma, calculou-se:

$$M_d = 0,0196 \cdot 0,7 \cdot \left( \frac{2,923}{2,923 - 0,0196} \right) = 0,014 \text{ kN} \cdot \text{cm} \Rightarrow \sigma_{M_d} = 0,007 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto: 
$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} = 0,01 < 1 \Rightarrow \text{ok.}$$

Com relação ao eixo de maior inércia (z):

$$\begin{cases} \sigma_{Nc0,d} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{M,d} = \frac{M_d}{15,6250} \cdot \frac{5,0}{2} \text{ (o valor de } M_d \text{ será determinado a seguir)} \\ f_{c0,d} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \end{cases}$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right)$$

$$\blacktriangle F_E = \frac{\pi^2 E_{co,ef} I_z}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 475,200 \cdot 15,6250}{(95,0/2)^2} = 32,479 \text{ kN}$$

$$\blacktriangle e_{1,ef} = e_i + e_a$$

$$e_i \begin{cases} \frac{M_{1d}}{N_{c0,d}} = \frac{0,0993}{0,0196} = 5,06 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 5,0/30 = 0,17 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_i = 5,06 \text{ cm}$$

$$e_a \begin{cases} \frac{L_0}{300} = \frac{95,0/2}{300} = 0,15 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 5,0/30 = 0,17 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_a = 0,17 \text{ cm}$$

$$\therefore e_{1,ef} = e_i + e_a = 5,06 + 0,17 \cong 5,2 \text{ cm}$$

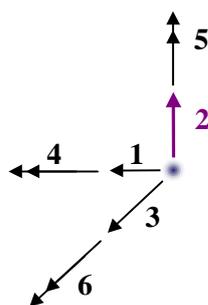
$$M_d = 0,0196 \cdot 5,2 \cdot \left( \frac{32,479}{32,479 - 0,0196} \right) = 0,102 \text{ kN} \cdot \text{cm} \Rightarrow \sigma_{M_d} = 0,016 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto: 
$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} = 0,01 < 1 \Rightarrow \text{ok.}$$

Dessa forma, as peças foram verificadas com esforços atuantes em estados limites últimos. A verificação da estrutura global, com relação aos estados limites de utilização, foi feita como descrito no item 5.5. Para o protótipo, tem-se como valor de flecha limite:  $L/200 = 518/200 = 2,59$  cm.

No **Anexo B.2**, estão apresentados os deslocamentos dos nós da malha lamelar, determinados com as ações combinadas em estados limites de utilização. Para cada nó foram calculados seis deslocamentos, **Figura 81**, sendo que o referente à coordenada global **2** é relativo às flechas.

Os maiores valores para estes deslocamentos foram de 0,3 cm. Dessa forma, teve-se atendida a segurança em relação ao estado limite de deformações excessivas.



**FIGURA 81** – Representação das coordenadas globais da estrutura.

#### 6.2.1.6 Dimensionamento das Ligações

Embora a recomendação mínima normativa seja de dois parafusos de 10 mm de diâmetro, item 8.3.4 da NBR 7190:1997, foi utilizado um parafuso com diâmetro de 6mm, para cada nó, tendo em vista o estudo experimental da ligação, **Figura 82**.

O dimensionamento dessas ligações foi feito como descrito no item 5.6 deste trabalho. Para o protótipo, tem-se:

$$\blacktriangle t_1 = 1,5 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle t_2 = 0,75 / \cos 45^\circ = 1,1 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad t = 1,1 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle \beta = \frac{1,1}{0,6} = 1,83$$

$$\blacktriangle \beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\alpha,d}}} \quad \text{onde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 24/1,1 = 21,818 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{e45,d} = \frac{f_{e0,d} \cdot f_{e90,d}}{f_{e0,d} \sin^2 45^\circ + f_{e90,d} \cos^2 45^\circ} = 1,295 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{onde:} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} - f_{e0,d} = f_{c0,d} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \\ - f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_e = 0,25 \cdot 1,683 \cdot 2,5 = 1,052 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right.$$

( $\alpha_e$  – Tabela 14 NBR 7190:1997).

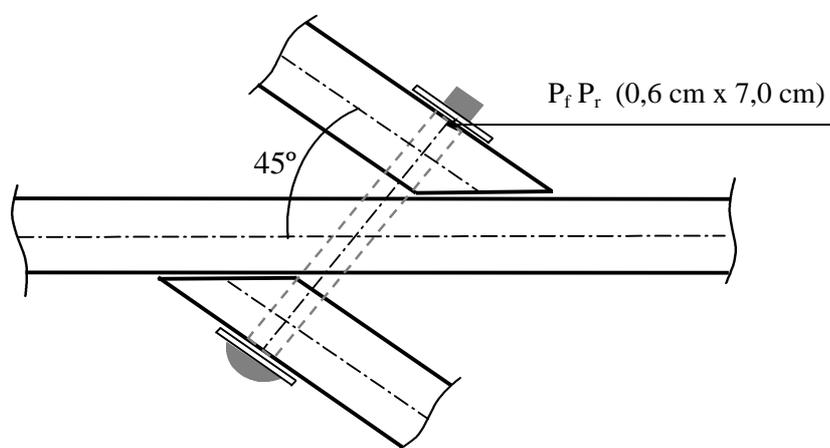
Então,

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e45,d}}} = 1,25 \sqrt{\frac{21,818}{1,295}} = 5,13 \quad (\text{para esforços cortantes}) \\ \beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e0,d}}} = 1,25 \sqrt{\frac{21,818}{1,683}} = 4,50 \quad (\text{para esforços normais}) \end{array} \right.$$

Sendo  $\beta < \beta_{\text{lim}}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{vd,1} = 0,40 \cdot (t^2/\beta) \cdot f_{e45,d} = 0,342 \text{ kN} \quad (\text{para verificação dos esforços cortantes}) \\ R_{vd,1} = 0,40 \cdot (t^2/\beta) \cdot f_{e0,d} = 0,445 \text{ kN} \quad (\text{para verificação dos esforços normais}) \end{array} \right.$$

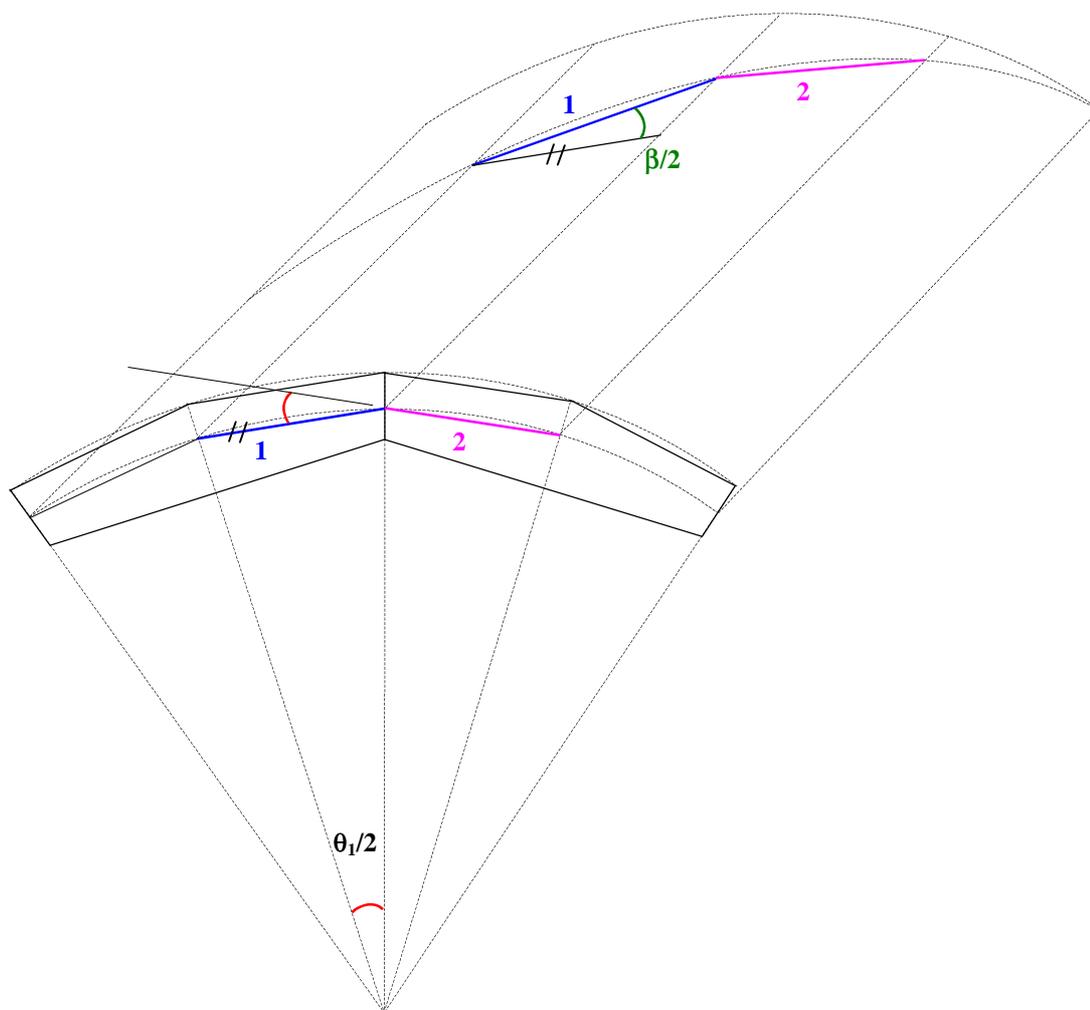
Como há duas seções de corte, a resistência de um parafuso tem seu valor dobrado:  $R_{vd} = 0,685 \text{ kN}$  e  $0,890 \text{ kN}$ , referentes ao embutimento do pino na madeira mediante os esforços cortantes e normais, respectivamente.



**FIGURA 82** – Representação da ligação interlamelar do protótipo.

A verificação das ligações foi feita como apresentado no item 5.6, comparando-se o módulo da soma vetorial dos esforços normais e cortantes - atuantes nas extremidades das lamelas que se encontram em cada nó, com a resistência de um parafuso, **Figura 62**.

Observando a **Figura 83**, percebe-se que os eixos das barras 1 e 2, como exemplo, não são paralelos entre si. Nesta figura, as lamelas estão projetadas em um plano transversal à abóbada. Neste caso, os pontos correspondentes às interseções das extremidades das barras com seus eixos, estão contidos em um arco circular. Sabe-se que na posição real ocupada pelas barras, tais pontos estão contidos em um arco elíptico.



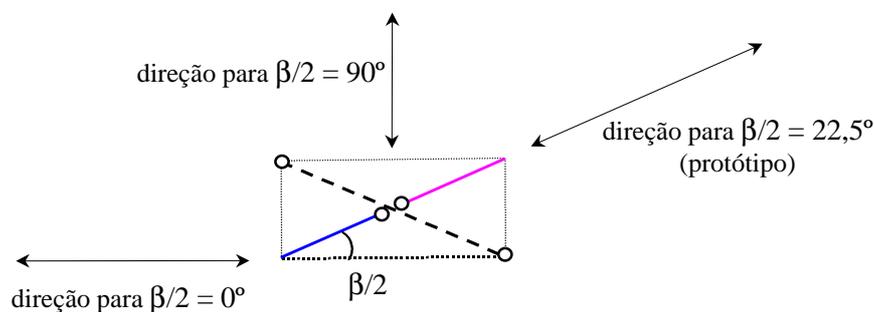
**FIGURA 83** – Representação dos eixos adotados para as barras, projetados no plano transversal da abóbada e em suas posições reais.

O ângulo formado entre os eixos das barras **1** e **2** ( $\theta_1/2$ ) como apresentado na **Figura 83**, foi utilizado para se determinar o efetivo ângulo formado entre estes, em suas posições reais.

O cálculo deste ângulo efetivo foi feito proporcionalmente, a partir do ângulo que se teria entre os eixos das barras, caso estas estivessem dispostas como na **Figura 83**, (para  $\beta/2 = 0^\circ$ ) e se estivessem dispostas paralelamente à geratriz da abóbada (para  $\beta/2 = 90^\circ$ ), **Figura 84**. Utilizou-se a seguinte proporção:

$$\begin{array}{rcl} 0^\circ & - & \theta_1/2 \\ \beta/2 & - & x \\ 90^\circ & - & 0^\circ \end{array}$$

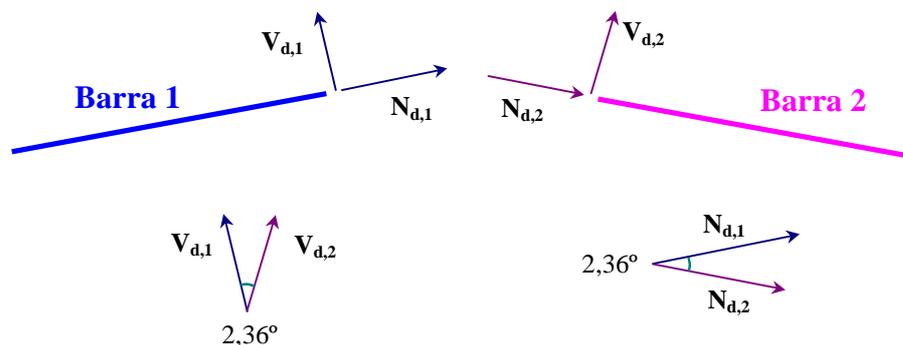
Sendo para o protótipo:  $\beta = 45^\circ$  e  $\theta_1/2 = 3,14^\circ$ , determinou-se que o ângulo formado entre as barras em suas posições reais vale  $2,36^\circ$ .



**FIGURA 84** – Valores para  $\beta/2$  considerados no cálculo do ângulo formado entre os eixos adotados para as barras, em suas posições efetivas.

Dessa forma, foram feitas as somas vetoriais dos esforços normais e cortantes atuantes nas extremidades das lamelas que se interceptam, segundo o ângulo de  $2,36^\circ$ , **Figura 85**, através da eq.(41).

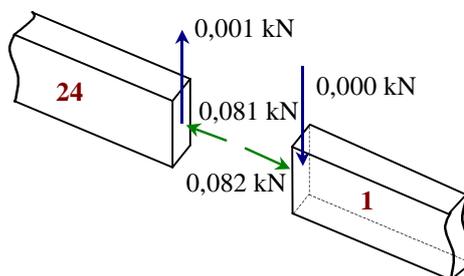
$$\left\{ \begin{array}{l} |\vec{R}_{V,d}| = |\vec{V}_{d,1}| + |\vec{V}_{d,2}| < R_{v,d} = 0,685 \text{ kN} \\ |\vec{R}_{N,d}| = |\vec{N}_{d,1}| + |\vec{N}_{d,2}| < R_{v,d} = 0,890 \text{ kN} \end{array} \right. \quad (41)$$



**FIGURA 85** – Representação dos esforços atuantes nas extremidades das barras, utilizados para o cálculo da ligação.

Para exemplificar, são apresentadas na **Figura 86** as barras **1** e **24**, onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\vec{R}_{V,d}| = 0,001 \text{ kN} < 0,685 \text{ kN ok.} \\ |\vec{R}_{N,d}| = \sqrt{0,082^2 + 0,081^2 + 2 \cdot 0,082 \cdot 0,081 \cdot \cos(180 - 2,36)} \cong 0 \text{ kN} < 0,890 \text{ kN ok.} \end{array} \right.$$



**FIGURA 86** – Exemplo para verificação da ligação interlamelar.

Devido à excentricidade da ligação parafusada, como apresentado no item 5.6, foram consideradas as tensões atuantes no meio da lamela contínua de cada ligação interlamelar, devidas aos binários produzidos pelos esforços normais e cortantes atuantes nas extremidades das lamelas que se unem a esta lamela contínua, **Figura 87**.

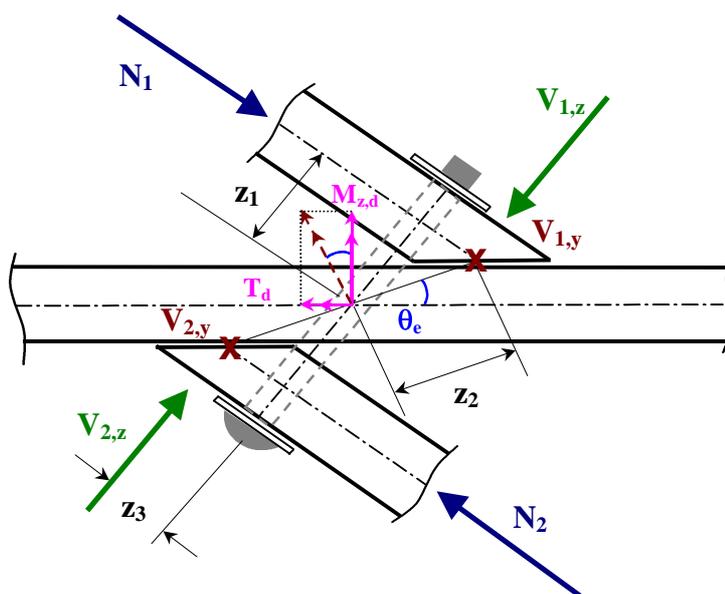
Dessa forma, os esforços totais atuantes nas seções medianas das lamelas são devidos ao cálculo da estrutura através do programa computacional, combinados com os momentos devidos às excentricidades produzidas pelos eixos das barras (como apresentado no item 6.2.1.5) e com os momentos provenientes das excentricidades

das ligações. Dessa forma, os esforços totais atuantes em uma extremidade contínua de barra são:

- ▲  $N_{c0,d}$  { - determinado pelo software;
- ▲  $V_{y,d}$  { - determinado pelo software;
- ▲  $V_{z,d}$  { - determinado pelo software;
- ▲  $M_{y,d}$  {
  - determinado pelo software;
  - proveniente da excentricidade da ligação:  $M_{y,d} = (N_1 + N_2) \cdot z_1$
  - proveniente da excentricidade da ligação:  $M_{y,d} = \left| \overrightarrow{V_{1,z}} + \overrightarrow{V_{2,z}} \right| \cdot z_3$

A soma de  $N_1$  e  $N_2$  é feita porque os esforços axiais nas barras do protótipo são todos de compressão, assumindo sentidos indicados na **Figura 87**.

- ▲  $M_{z,d}$  {
  - determinado pelo software;
  - proveniente da excentricidade  $e_y$  (**Figura 78**):  $M_{z,d} = N_{c0,d} \cdot e_y$
  - proveniente da excentricidade da ligação:  $M_{z,d} = \left| \overrightarrow{V_{1,y}} + \overrightarrow{V_{2,y}} \right| \cdot z_2 \cdot \cos \theta_e$
- ▲  $T_d$  {
  - proveniente da excentricidade  $e_y$  (**Figura 78**):  $T_d = V_{z,d} \cdot e_y$
  - proveniente da excentricidade da ligação:  $T_d = \left| \overrightarrow{V_{1,y}} + \overrightarrow{V_{2,y}} \right| \cdot z_2 \cdot \sin \theta_e$



**FIGURA 87** – Representação de esforços gerados pela excentricidade da ligação.

Os valores das excentricidades foram determinados a partir das eq.(25) a eq.(27), onde:  $e = 1,5 \text{ cm}$  e  $d = 0,6 \text{ cm}$ .

$$z_1 = \frac{e}{2} + \frac{e}{2 \cos 45^\circ} + \frac{d \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{2} = 2,1 \text{ cm}$$

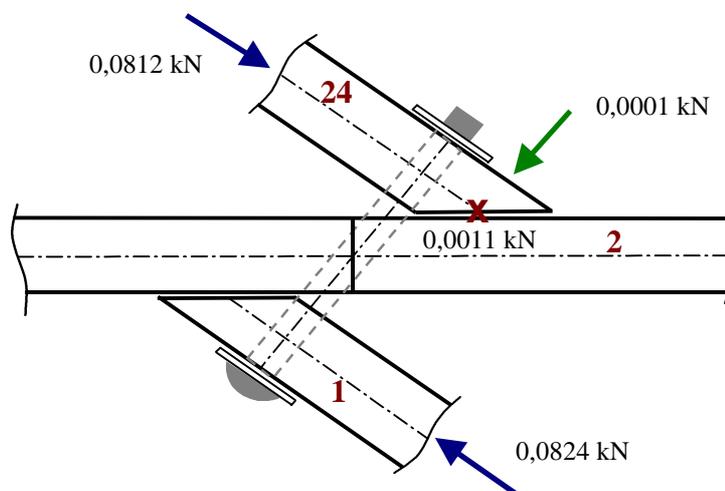
$$z_3 = \frac{d}{2} + \frac{e}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta} = 1,1 \text{ cm}$$

$$z_2 = \sqrt{(z_1)^2 + (z_3)^2} = 2,3 \text{ cm}$$

O valor do ângulo  $\theta_e$  é determinado por:  $90 - \beta - \operatorname{arctg}(z_3/z_1) = 17,4^\circ$ .

Além desses esforços, atuam momentos provenientes da inclinação existente entre as barras, que se unem à lamela contínua, como apresentado na **Figura 85**. Porém, estes esforços são desprezíveis, já que o ângulo formado entre as barras é muito pequeno ( $2,36^\circ \rightarrow \cos 2,36^\circ \cong 1,0$  e  $\operatorname{sen} 2,36^\circ \cong 0$ ).

As verificações das barras mais solicitadas foram feitas, e concluiu-se que estas resistem aos esforços. Como exemplo, será apresentada a verificação realizada para a barra de número **2**, cuja verificação inicial, sem considerar a excentricidade da ligação, foi realizada no item 6.2.1.5. Portanto, serão acrescidos aos esforços considerados naquele item, os momentos provenientes dos esforços normais e cortantes atuantes nas extremidades das barras **1** e **24** (que são conectadas à extremidade da barra **2**).



**FIGURA 88** – Esforços das barras **1** e **24** que produzem momentos na barra **2**.

Portanto, os esforços atuantes na extremidade contínua da barra **2**, provenientes da excentricidade da ligação são:

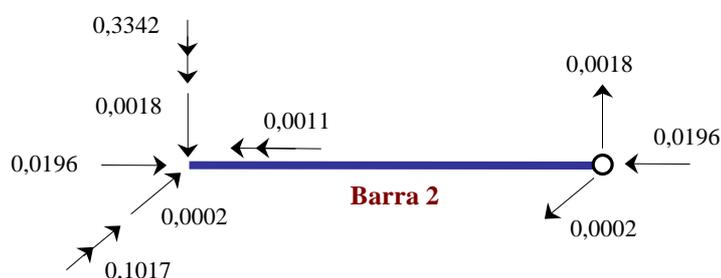
$$\left\{ \begin{array}{l} -M_{y,d} = (N_1 + N_{24}) \cdot z_1 = (0,0824 + 0,0812) \cdot 2,1 = 0,3436 \text{ kN.cm} \\ -M_{y,d} = |\overrightarrow{V_{1,z}} + \overrightarrow{V_{24,z}}| \cdot z_3 = (0 + 0,0001) \cdot 1,1 = 0,0001 \text{ kN.cm} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -M_{z,d} = |\overrightarrow{V_{1,y}} + \overrightarrow{V_{24,y}}| \cdot z_2 \cdot \cos \theta_e = (0 + 0,0011) \cdot 2,3 \cdot \cos 17,4^\circ = 0,0024 \text{ kN.cm} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -T_d = |\overrightarrow{V_{1,y}} + \overrightarrow{V_{24,y}}| \cdot z_2 \cdot \sin \theta_e = (0 + 0,0011) \cdot 2,3 \cdot \sin 17,4^\circ = 0,0010 \text{ kN.cm} \end{array} \right.$$

Portanto, os valores absolutos dos esforços totais atuantes na barra em questão, **Figura 89**, são:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{c0,d} = 0,0196 \text{ kN} \\ M_{y,d} = |0,0095 - 0,3436 - 0,0001| = 0,3342 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ M_{z,d} = 0,0993 + 0,0024 = 0,1017 \text{ kN.cm} \\ T_d = 0,0001 + 0,0010 = 0,0011 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ V_{y,d} = 0,0018 \text{ kN} \\ V_{z,d} = 0,0002 \text{ kN} \end{array} \right.$$



**FIGURA 89** – Esforços totais atuantes na barra de número **2**. [Unidades: kN e cm]

A partir desses esforços, foram feitas as verificações de resistência e de estabilidade.

Com relação ao cisalhamento, nova verificação é dispensável pois os esforços cortantes não tiveram valores alterados.

**Verificação à flexo-compressão** [de acordo com eq.(15) e eq.(16)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,0196}{7,5} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{My,d} = \frac{M_{y,d}}{I_y} \cdot \frac{b}{2} = \frac{0,3342}{1,4063} \cdot \frac{1,5}{2} = 0,178 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h}{2} = \frac{0,1017}{15,6250} \cdot \frac{5,0}{2} = 0,016 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,003}{1,683} \right)^2 + 0,5 \cdot \frac{0,016}{1,683} + \frac{0,178}{1,683} = 0,11 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{array} \right.$$

**Verificação à torção** [de acordo com eq.(39)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{T,d} = \frac{T_d}{W_t} = \frac{0,0011}{4,59} = 0,0002 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,202 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right. \quad \therefore \tau_{T,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

**Verificação da estabilidade com relação ao eixo de menor inércia (y)** [de acordo com eq.(18)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{M,d} = \frac{M_d}{1,4063} \cdot \frac{1,5}{2} \text{ (o valor de } M_d \text{ será determinado a seguir)} \\ f_{c0,d} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right.$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right)$$

$$\blacktriangle F_E = \frac{\pi^2 E_{co,ef} I_y}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 475,200 \cdot 1,4063}{(95,0/2)^2} = 2,923 \text{ kN}$$

$$\blacktriangle e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c$$

$$e_i \begin{cases} \frac{M_{1d}}{N_{c0,d}} = \frac{0,3342}{0,0196} = 17,05 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 1,5/30 = 0,05 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_i = 17,05 \text{ cm}$$

$$e_a \begin{cases} \frac{L_0}{300} = \frac{95,0/2}{300} = 0,15 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 1,5/30 = 0,05 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_a = 0,15 \text{ cm}$$

$$e_c \begin{cases} = (e_{ig} + e_a) \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\phi \cdot [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]}{F_E - [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]} \right] - 1 \right\} \\ e_{ig} = 17,05 \text{ cm} \\ e_a = 0,15 \text{ cm} \\ N_{g,k} = 0,0140 \text{ kN (Anexo B.2)} \\ N_{q,k} = 0 \text{ kN (não foram consideradas ações variáveis)} \\ F_E = 2,923 \text{ kN} \\ \phi = 0,8 \text{ (Tabela 15 NBR 7190:1997)} \end{cases} \quad \therefore e_c = 0,07 \text{ cm}$$

$$\therefore e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c = 17,05 + 0,15 + 0,07 \cong 17,3 \text{ cm}$$

$$M_d = 0,0196 \cdot 17,3 \cdot \left( \frac{2,923}{2,923 - 0,0196} \right) = 0,341 \text{ kN} \cdot \text{cm} \Rightarrow \sigma_{M_d} = 0,182 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto:

$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} = 0,11 < 1 \Rightarrow \text{ok.}$$

**Verificação da estabilidade com relação ao eixo de maior inércia (z)** [de acordo com eq.(18)]:

$$\begin{cases} \sigma_{Nc0,d} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{M,d} = \frac{M_d}{15,6250} \cdot \frac{5,0}{2} \text{ (o valor de } M_d \text{ será determinado a seguir)} \\ f_{c0,d} = 1,683 \text{ kN/cm}^2 \end{cases}$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right)$$

$$\blacktriangle F_E = \frac{\pi^2 E_{co,ef} I_z}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 475,200 \cdot 15,6250}{(95,0/2)^2} = 32,479 \text{ kN}$$

$$\blacktriangle e_{1,ef} = e_i + e_a$$

$$e_i \begin{cases} \frac{M_{1d}}{N_{c0,d}} = \frac{0,1017}{0,0196} = 5,18 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 5,0/30 = 0,17 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_i = 5,18 \text{ cm}$$

$$e_a \begin{cases} \frac{L_0}{300} = \frac{95,0/2}{300} = 0,15 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 5,0/30 = 0,17 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_a = 0,17 \text{ cm}$$

$$\therefore e_{1,ef} = e_i + e_a = 5,18 + 0,17 \cong 5,4 \text{ cm}$$

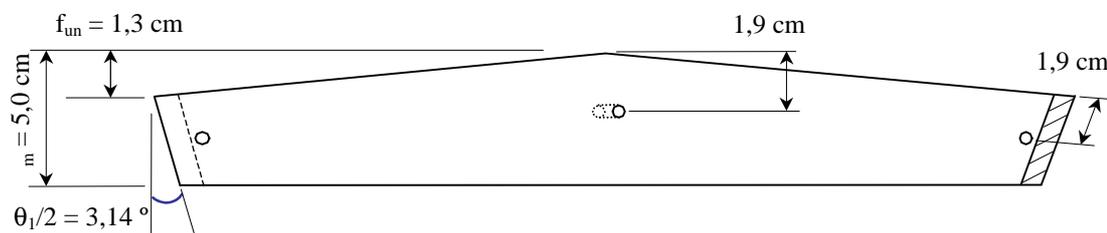
$$M_d = 0,0196 \cdot 5,4 \cdot \left( \frac{32,479}{32,479 - 0,0196} \right) = 0,106 \text{ kN} \cdot \text{cm} \Rightarrow \sigma_{M_d} = 0,018 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto: 
$$\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} = 0,03 < 1 \Rightarrow \text{ok.}$$

### 6.2.1.7 Confeção das Lamelas

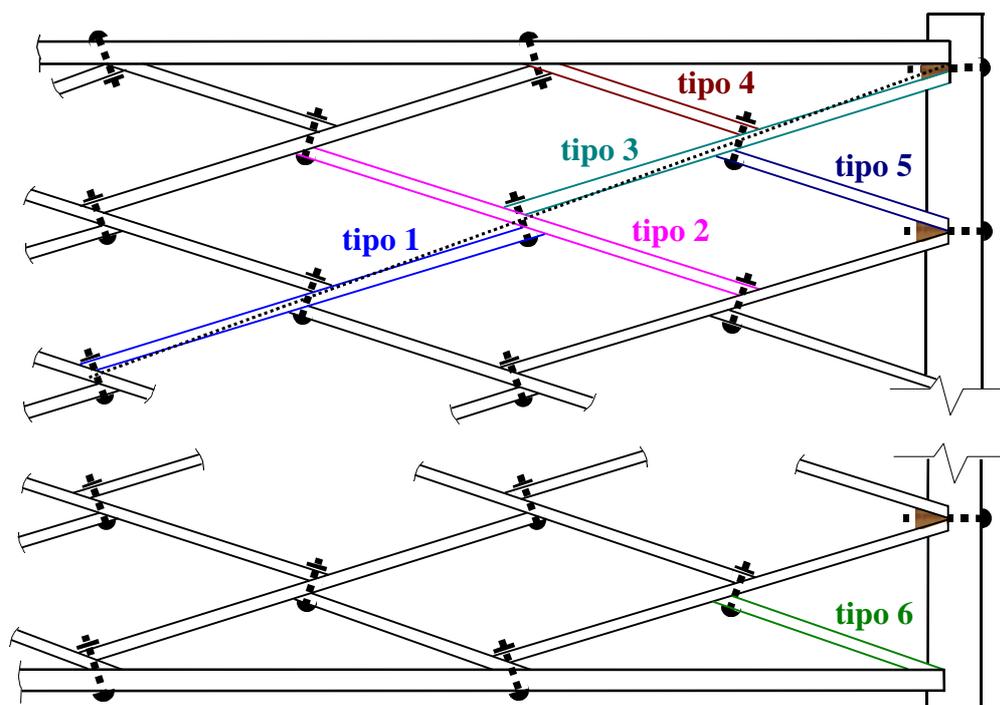
As características geométricas das lamelas foram apresentadas no item 6.2.1.2. Porém, estas foram implementadas em função do tipo de ligação utilizado para a montagem dos protótipo através de um parafuso de 6 mm de diâmetro por nó.

Na **Figura 90** está esquematizado o posicionamento dos furos feitos nas lamelas para a execução da ligação parafusada, como calculado pela eq.(38). Os demais elementos geométricos desta figura foram definidos no item 6.2.1.2.



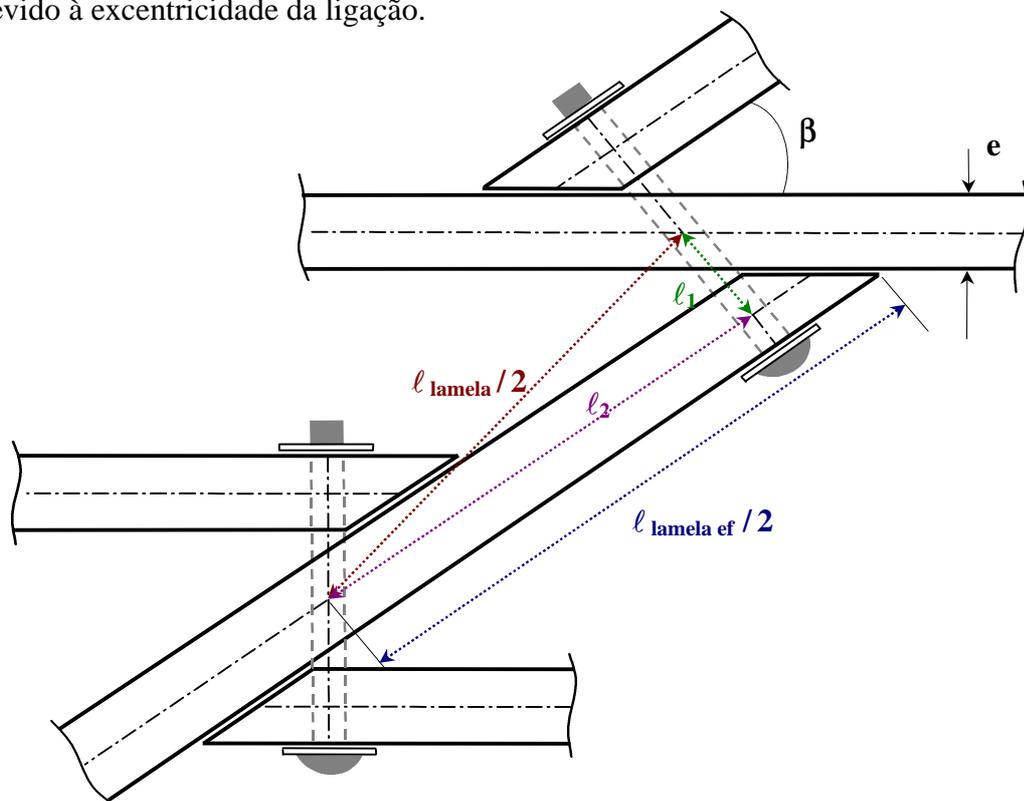
**FIGURA 90** – Posicionamento dos furos nas lamelas.

Devido à excentricidade existente nas ligações interlamelares parafusadas, os comprimentos efetivos das lamelas são um pouco maiores do que os determinados no item 6.2.1.2, **Figura 91**.



**FIGURA 91** – Tipos de lamelas confeccionados.

A linha pontilhada da **Figura 91**, que une alguns nós da malha, representa a posição teórica das barras da malha lamelar. Na **Figura 92** está representado um trecho desta malha para se visualizar o quanto se tem de acréscimo no comprimento da lamela devido à excentricidade da ligação.



**FIGURA 92** – Comprimento teórico e efetivo de meia lamela.

O comprimento real da lamela é dado pela eq.(42), sendo:

- ▲  $e$  - espessura da lamela = 1,5 cm;
- ▲  $\beta$  - ângulo interlamelar = 45°;
- ▲  $\phi_{\text{par}}$  - diâmetro do parafuso = 6 mm;
- ▲  $l_{\text{lamela}}$  - comprimento teórico da lamela = 95,0 cm;
- ▲  $l_1 = \frac{e}{2} + \frac{\phi_{\text{par}} \cdot \text{tg}(\beta)}{2} + \frac{e}{2 \cdot \cos \beta}$

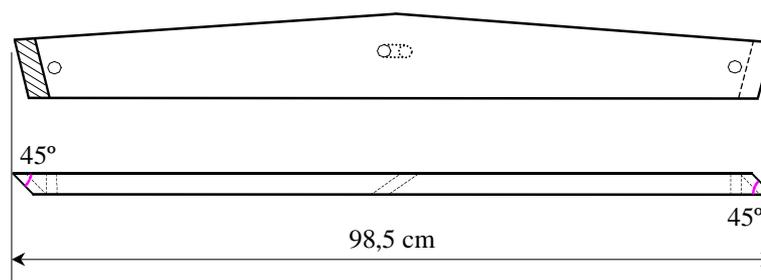
$$l_{\text{lamela ef}} = 2 \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{l_{\text{lamela}}}{2} \right)^2 - (\ell_1)^2} + \frac{\phi_{\text{par}}}{2} + \frac{e}{\text{tg}(\beta)} \right) \quad (42)$$

Portanto, para o protótipo, obteve-se  $l_{\text{lamela ef}} = 98,5$  cm, o que representa um aumento em 3,7% do comprimento teórico da lamela e, conseqüentemente, do peso

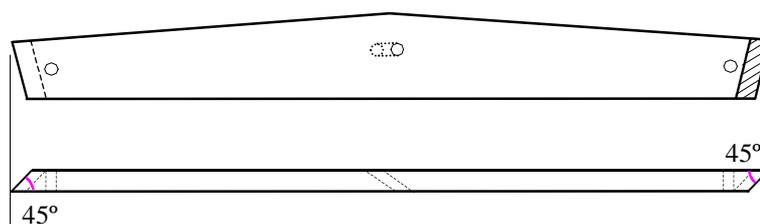
próprio da estrutura. Dessa forma foi atendido o prescrito no item 5.5.2 da NBR 7190:1997: “o peso próprio real, avaliado depois do dimensionamento final da estrutura, não deve diferir de mais de 10 % do peso próprio inicialmente admitido no cálculo”.

Foram confeccionados seis tipos de lamelas para a montagem da malha do protótipo, em função da posição que estas ocupam na estrutura, **Figura 91**. É importante salientar que todas as lamelas possuem mesma espessura de 1,5 cm, como apresentado no item 6.2.1.2.

A malha lamelar losangular é constituída por, basicamente, dois tipos de lamelas: tipo **1** e tipo **2**, que são os principais, sendo que a diferença entre esses tipos é apenas a direção dos chanfros de extremidade a 45°, **Figuras 93 e 94**.



**FIGURA 93** - Geometria das lamelas do tipo 1.



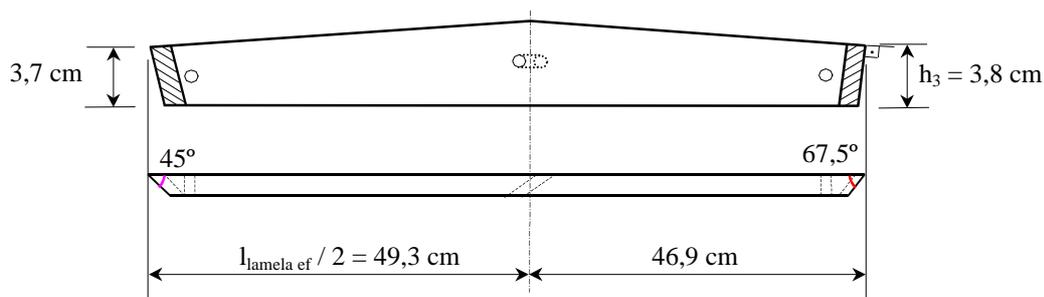
**FIGURA 94** - Geometria das lamelas do tipo 2.

Cabe acrescentar que, para o caso de malha lamelar quadrada, ou seja, com o ângulo interlamelar de 90°, ter-se-á apenas um tipo de lamela principal.

Em função do tipo de fixação da malha lamelar nos apoios, é que se definem os demais tipos de lamelas. No caso do protótipo em análise, foram necessários quatro

tipos de lamelas além dos principais, cuja geometria está apresentada a seguir.

As lamelas do tipo **3** são semelhantes às do tipo **1**, porém, com comprimento reduzido e ângulo de  $67,5^\circ$  na extremidade que é fixada na viga de apoio lateral da malha lamelar, **Figura 95**.



**FIGURA 95** - Geometria das lamelas do tipo **3**.

A redução do comprimento das lamelas do tipo **3** pode ser entendida através das **Figuras 96 e 97**. A redução do comprimento da lamela, denominada  $d_3$ , foi calculada de acordo com a eq.(43), sendo:

$$\blacktriangle d_0 = \frac{e}{\operatorname{tg}(\beta)} = \frac{1,5}{\operatorname{tg}(45)} = 1,5 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle d_1 = \phi_{\text{par}} = 0,6 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle d_2 = [\phi_{\text{par}} \cdot \operatorname{tg}(\beta)] \cdot (\operatorname{tg} \beta / 2) = 0,3 \text{ cm}$$

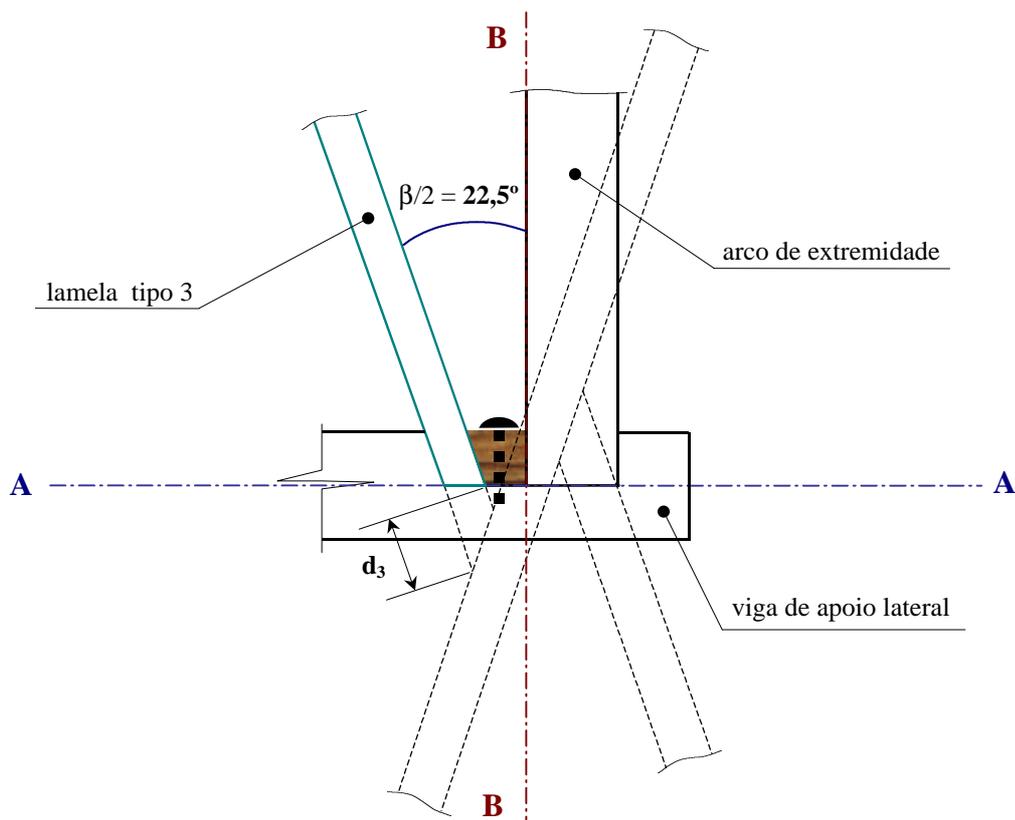
$$d_3 = d_0 + d_1 + d_2 \quad (43)$$

$$\therefore d_3 = 1,5 + 0,6 + 0,3 = 2,4 \text{ cm}$$

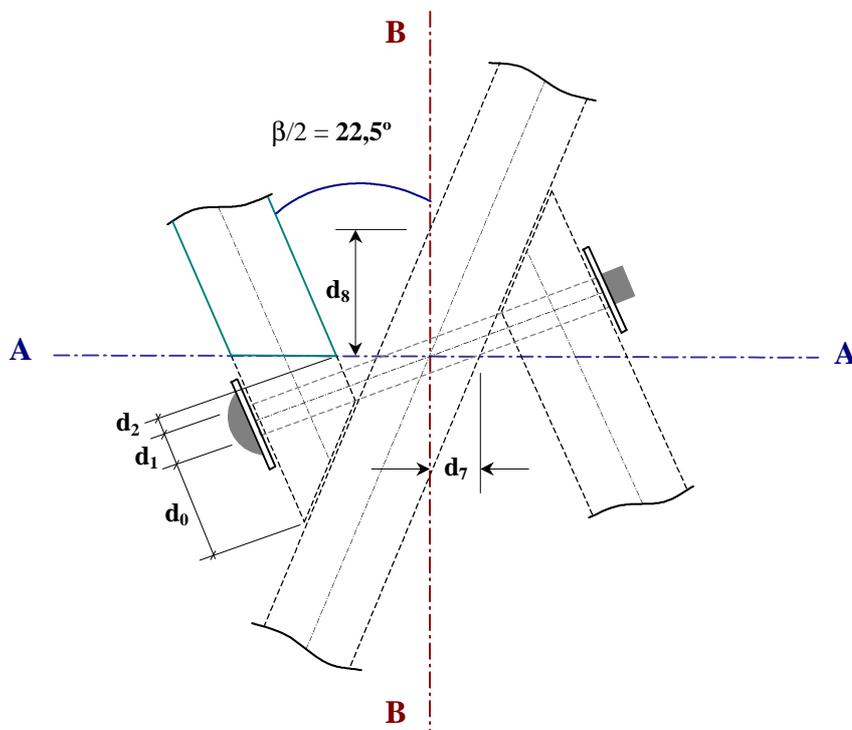
Portanto, a distância entre o furo central da lamela e sua extremidade que se fixa à viga, **Figura 95**, reduziu-se a:

$$l_{\text{lamela ef}} / 2 - 2,4 = 46,9 \text{ cm}$$

Proporcionalmente à essa redução de comprimento, foi determinada a altura de 3,8 cm para a extremidade em questão, **Figura 95**.

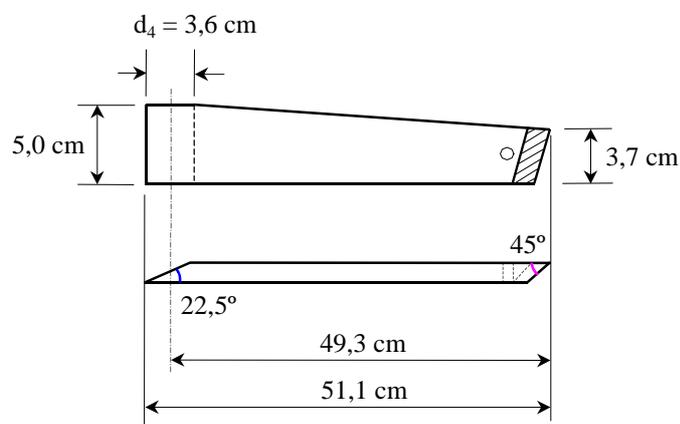


**FIGURA 96** – Representação do nó relativo à junção da extremidade das lamelas do tipo 3, com a viga de apoio lateral e o arco de extremidade.

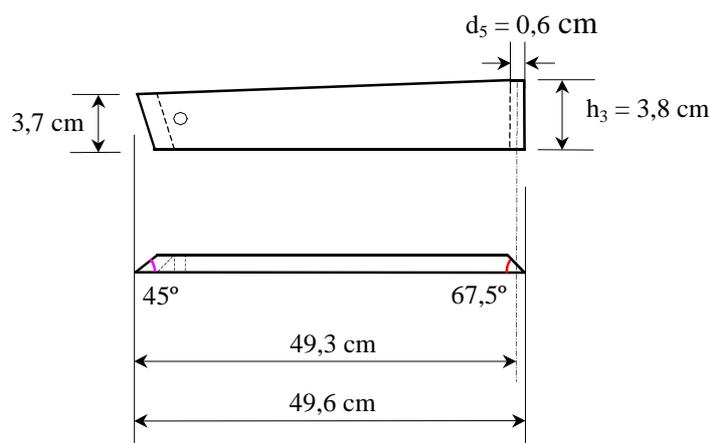


**FIGURA 97** – Representação da ligação parafusada e da redução do comprimento das lamelas do tipo 3.

As lamelas dos tipos **4** e **5** apresentam chanfro em uma das extremidades diferente de  $45^\circ$ , que são definidos em função dos ângulos que a lamela forma com o arco de extremidade ou com a viga lateral, respectivamente. **Figuras 98 e 99.**



**FIGURA 98** - Geometria das lamelas do tipo **4**.

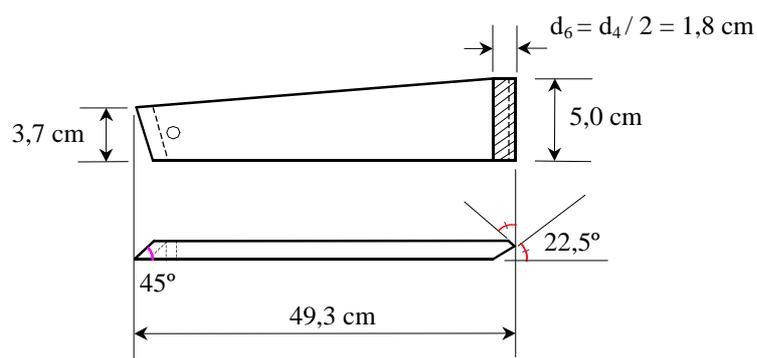


**FIGURA 99** - Geometria das lamelas do tipo **5**.

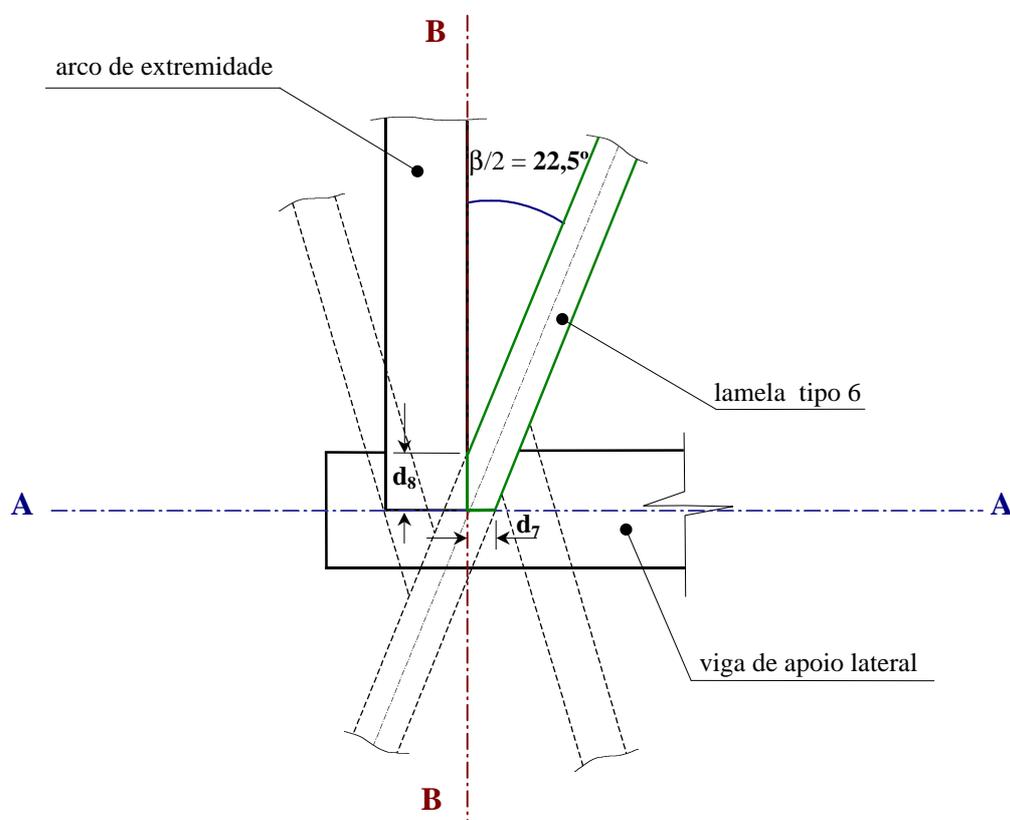
Observa-se que, para as lamelas do tipo **5**, a extremidade que se fixa à viga possui mesma altura ( $h_3$ ) que a do tipo **3**, que também se fixa à viga, **Figuras 99 e 95**.

As lamelas do tipo **6** possuem, como característica principal, variações nos chanfros de uma extremidade, que são definidas pelo encontro da lamela com a viga e com o arco de extremidade, **Figuras 100 e 101**. As distâncias  $d_7$  e  $d_8$  foram calculadas:

$$d_7 = \frac{\phi_{\text{par}}}{2 \cdot \text{sen} \frac{\beta}{2}} = 0,8 \text{ cm} \quad d_8 = \frac{e}{2 \cdot \text{sen} \frac{\beta}{2}} = 2,0 \text{ cm}$$



**FIGURA 100** - Geometria das lamelas do tipo 6.

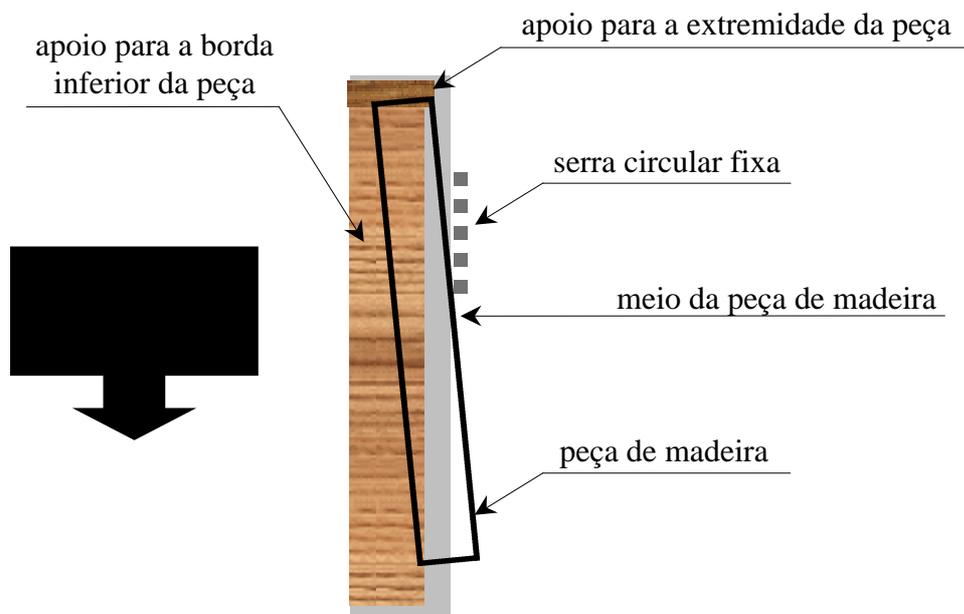


**FIGURA 101** – Representação do nó relativo à junção da extremidade da lamela do tipo 6, com a viga de apoio lateral e o arco de extremidade.

As lamelas foram confeccionadas na oficina de processamento de madeira do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM).

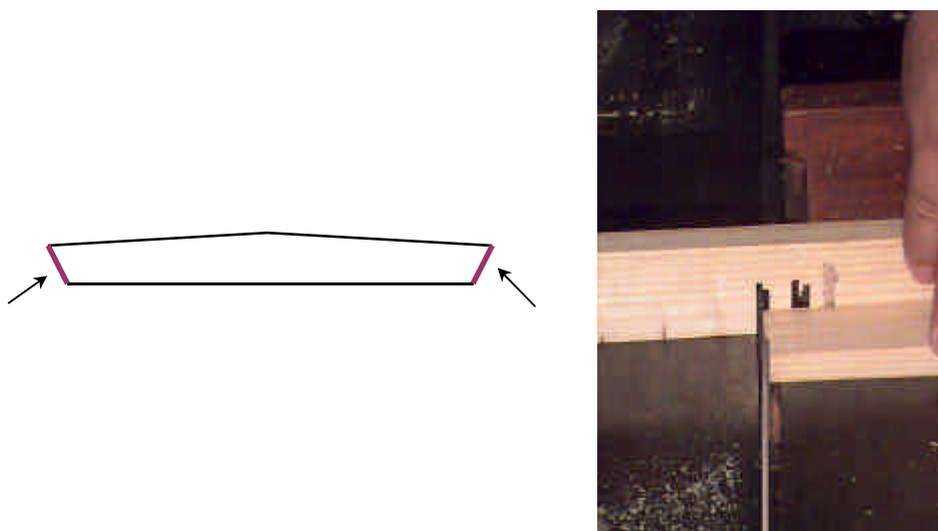
Para se fazerem os chanfros da borda superior e das extremidades das lamelas, foi utilizada uma serra circular.

Os chanfros da borda superior das lamelas foram feitos com o auxílio de um gabarito elaborado para facilitar sua execução, **Figura 102**. A peça de madeira era apoiada no gabarito e o conjunto se deslocava, produzindo o corte inclinado a partir de seu meio. Depois a peça era virada e se executava o chanfro em sua outra metade.

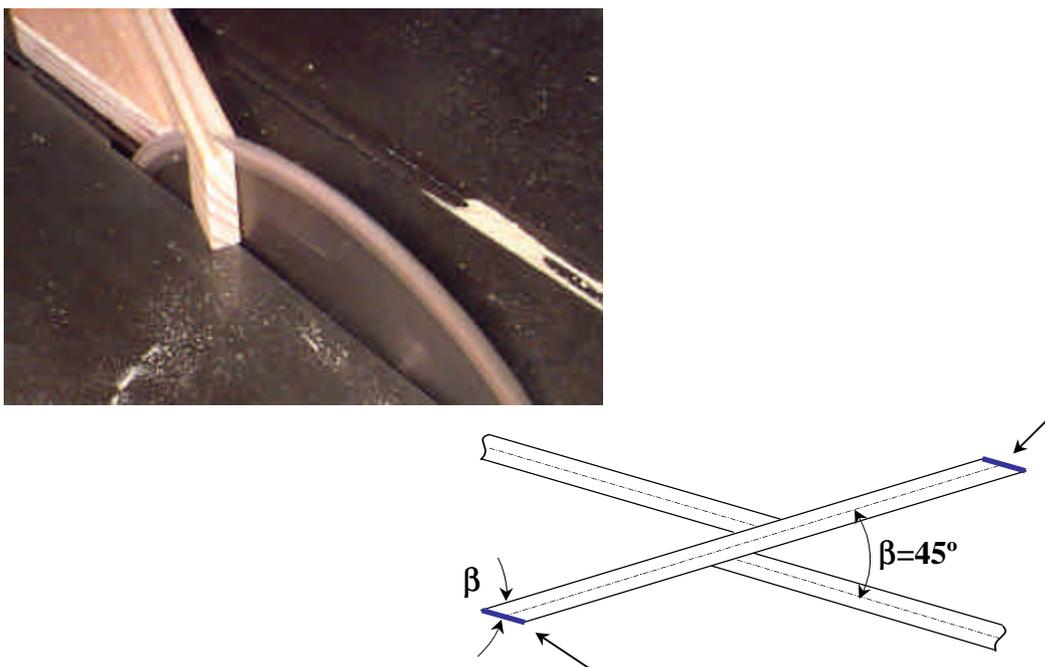


**FIGURA 102** – Esboço em vista superior do gabarito elaborado para a confecção do chanfro da borda superior da lamela.

As **Figuras 103 e 104** apresentam a execução dos chanfros de extremidade da lamela.



**FIGURA 103** – Execução dos chanfros de extremidade responsáveis pela curvatura da estrutura.

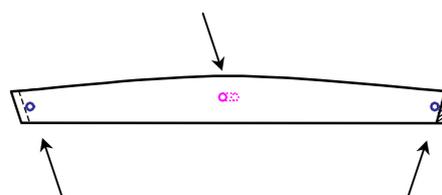


**FIGURA 104** – Execução dos chanfros de extremidade responsáveis pela modulação losangular da malha.

Depois de executados os chanfros, foram feitos os furos nas lamelas, com furadeiras elétricas do tipo vertical e horizontal, **Figura 105**.



a) Furos nas extremidades das lamelas.



b) Furos inclinados a  $45^\circ$  no meio da lamela.

**FIGURA 105** – Execução dos furos das lamelas.

Depois de prontas, as lamelas foram tratadas por pincelamento com um preservativo *stain* que é fungicida e inseticida, **Figura 106**.



a) Aplicação do preservativo nas lamelas, por pincelamento.



b) Secagem das lamelas após aplicação do preservativo.

**FIGURA 106** – Tratamento preservativo das lamelas.

#### **6.2.1.8 Montagem da Malha Lamelar**

A montagem da malha lamelar do protótipo foi simples e rápida. À medida em que se conectavam as lamelas, a estrutura ia assumindo formato curvo. A curvatura da abóbada surgiu naturalmente, o que já era esperado, pois a geometria das lamelas é

responsável pela geometria global da estrutura. Cabe ressaltar que a montagem deste sistema estrutural dispensa a utilização de gabaritos, **Figura 107 a 109**.



a) Vista global das três lamelas.



b) Vista superior da ligação.

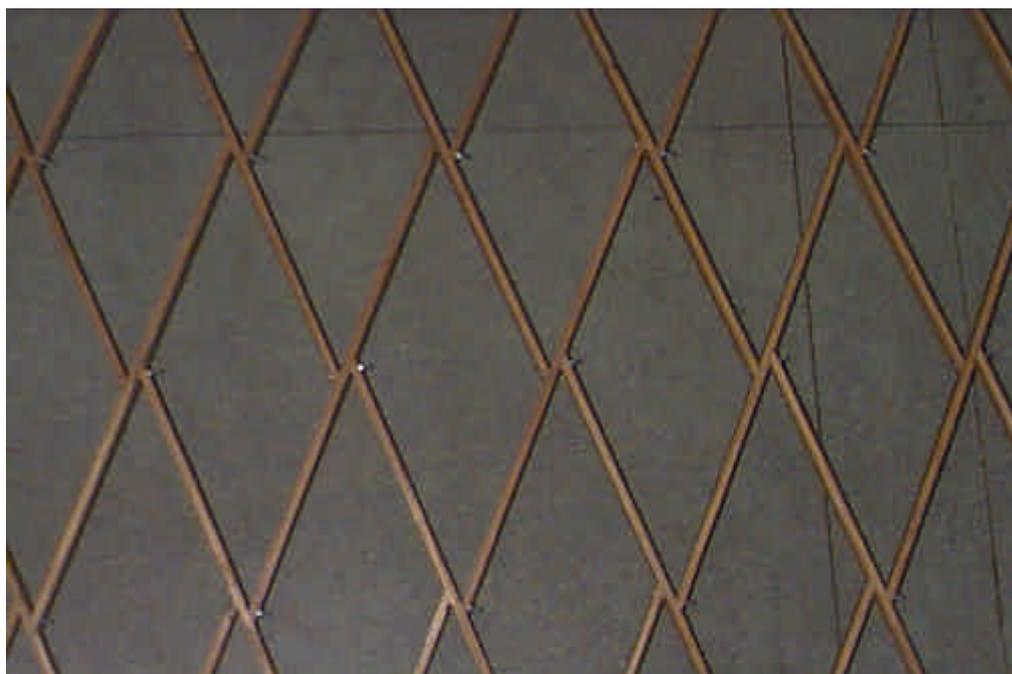


c) Vista inferior da ligação.

**FIGURA 107** – Detalhe da ligação parafusada entre três lamelas.



**FIGURA 108** – Montagem da malha lamelar.



**FIGURA 109** – Vista superior de um trecho da malha montada.

## **6.2.2 Arcos de Extremidade**

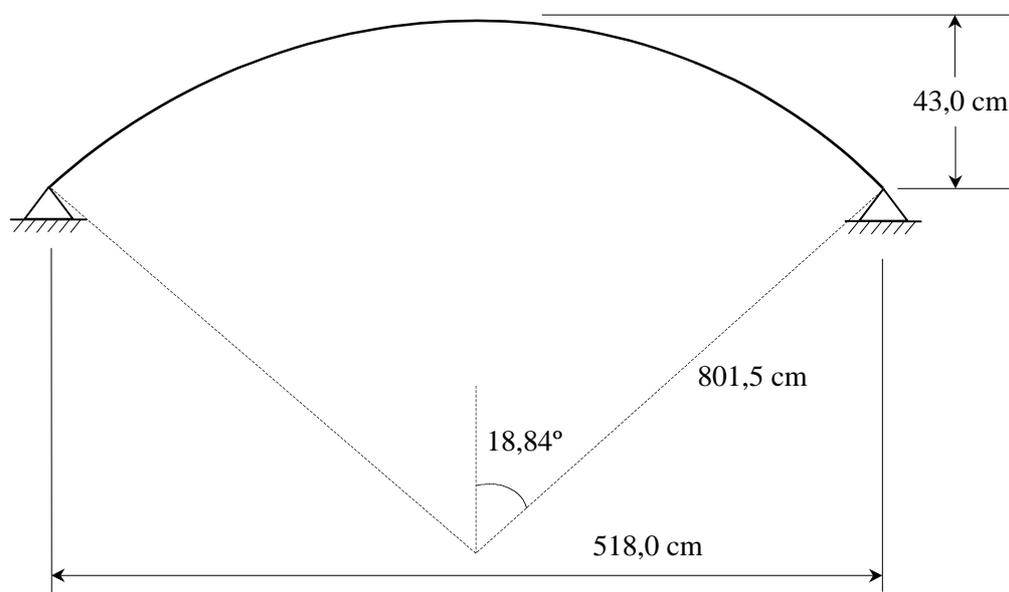
### ***6.2.2.1 Dimensionamento***

Como apoio para os nós de extremidade da malha do protótipo lamelar, optou-se pela utilização de um arco circular feito com madeira laminada colada, com lâminas horizontais, **Figura 110**.



**FIGURA 110** – Arcos de madeira laminada colada que são apoios de extremidade da malha.

A linha que representa a borda superior deste arco possui as mesmas características geométricas da seção transversal da abóbada lamelar, **Figura 111**.



**FIGURA 111** - Elementos da geometria do arco de apoio de extremidade do protótipo.

Para a confecção das lâminas dos arcos, foram reutilizadas vigas de madeira que serviram como embalagem de um equipamento que o LaMEM importou do Canadá, **Figura 112**.



**FIGURA 112** – Vigas utilizadas para a confecção das lâminas dos arcos.

Fez-se a caracterização mecânica dessa madeira e determinou-se o valor característico de sua resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k} = 28,4$  MPa). Desta forma, a madeira foi enquadrada na Classe C-25 das Coníferas.

Utilizou-se como parâmetro para a estimativa da seção transversal do arco, seu índice de esbeltez. Considerando-se a flambagem do arco em seu plano, determinou-se seu comprimento de flambagem através da eq.(44), BLASS (1995).

$$\ell_0 = 1,25 \cdot (\ell_{\text{arco}} / 2) = 1,25 \cdot (527,4 / 2) = 329,6 \text{ cm} \quad (44)$$

Limitando-se o índice de esbeltez do arco em 140, determinou-se a mínima altura do arco, para esta condição:

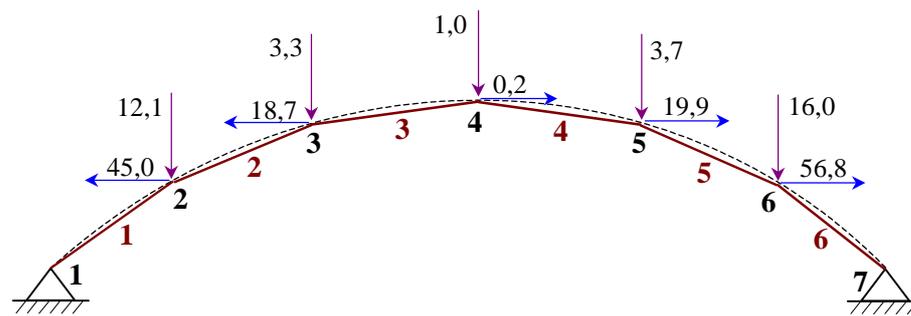
$$\lambda = \frac{\ell_0}{i} = \frac{329,6}{\sqrt{\frac{bh^3/12}{bh}}} \leq 140 \Rightarrow h \geq 8,0 \text{ cm}$$

Considerou-se a seção transversal de 5,0 cm x 8,0 cm, composta por cinco lâminas, com espessura de 1,6 cm e comprimento de 600,0 cm, **Figura 113**. A largura inicial das lâminas foi de 6,0 cm, prevendo-se perdas devido ao aparelhamento do arco, após a colagem destas.

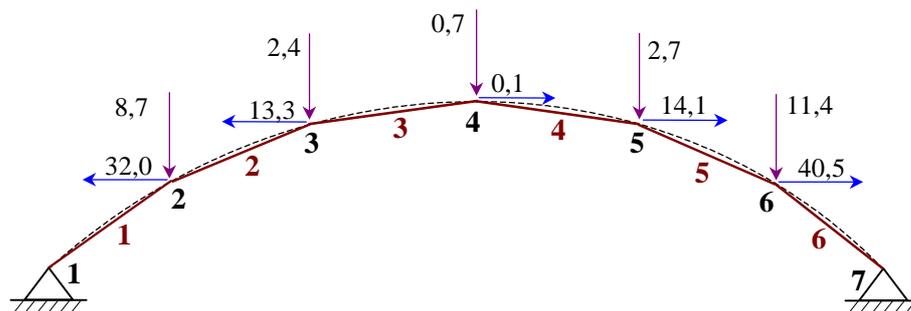


**FIGURA 113** – Lâminas utilizadas para a construção dos arcos.

Além do peso próprio, as ações atuantes nos arcos são devidas à malha lamelar, correspondentes às reações de apoio dos nós da malha que foram fixados nestes arcos. Estas reações de apoio estão apresentadas no **Anexo B, Figura 114**.



a) Estados limites últimos.



b) Estados limites de utilização.

**FIGURA 114** – Ações atuantes nos arcos devidas à malha lamelar. [Unidade:  $10^{-3}$  kN].

Características e propriedades do arco:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\text{arco}} = 5,0 \cdot 8,0 = 40,00 \text{ cm}^2 \\ I_z = \frac{5,0 \cdot 8,0^3}{12} = 213,3333 \text{ cm}^4 \\ E_{c0,m} = 8500 \text{ MPa} \cong 850,0 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{c0,k} = 28,4 \text{ MPa} \cong 2,84 \text{ kN/cm}^2 \\ \rho_{\text{ap}} = 550 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \gamma = 5,50 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3 \end{array} \right.$$

Através da eq.(36) foi calculada a resistência de cálculo  $f_{c0,d}$ :

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_w} \left\{ \begin{array}{l} k_{\text{mod}} = k_{\text{mod}1} \cdot k_{\text{mod}2} \cdot k_{\text{mod}3} \text{ (item 6.4.4 da NBR 7190:1997)} \\ \gamma_{wc} = 1,4 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{carregamento permanente e madeira laminada colada : } k_{\text{mod},1} = 0,60 \\ \text{classe de umidade 1 e madeira laminada colada : } k_{\text{mod},2} = 1,0 \\ \text{madeira laminada colada : } k_{\text{mod},3} = 1 - 2000 \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^2 = 0,99 \\ \left\{ \begin{array}{l} t - \text{espessura das lâminas} = 1,6 \text{ cm} \\ r - \text{menor raio de curvatura das lâminas} = R - h_{\text{arco}} = 801,5 - 8,0 = 793,5 \text{ cm} \end{array} \right. \\ \therefore k_{\text{mod}} = 0,59 \end{array} \right.$$

$$\therefore \left\{ \begin{array}{l} f_{c0,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_{\text{wc}}} = 0,59 \cdot \frac{2,84}{1,4} = 1,197 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,12 \cdot f_{c0,d} = 0,144 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{Tabela 12 da NBR 7190 : 1997}) \end{array} \right.$$

Foi calculado o valor efetivo para o módulo de elasticidade paralelamente às fibras, através da eq.(37):

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod}} \cdot E_{c0,m} = 0,59 \cdot 850,0 = 501,500 \text{ kN/cm}^2$$

Para o cálculo dos arcos, estes foram divididos em seis barras, e seu peso próprio foi considerado concentrado em cada nó:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma \cdot v_{\text{arco}}}{6} = \frac{\gamma \cdot A_{\text{arco}} \cdot \ell_{\text{arco}}}{6} = \frac{5,50 \times 10^{-6} \cdot 40,00 \cdot 527,4}{6} = 19,3 \times 10^{-3} \text{ kN/nó} \\ \text{para estados limites últimos: } 1,4 \cdot 19,3 \times 10^{-3} = 27,0 \times 10^{-3} \text{ kN/nó} \\ \text{para estados limites de utilização: } 19,3 \times 10^{-3} \text{ kN/nó} \end{array} \right.$$

Os arcos foram calculados através do software SAPP\* para cálculo de pórticos planos. Os resultados do cálculo estão contidos no **Anexo C**. Foram feitas as verificações com relação à resistência, à estabilidade e à deformação do arco, como descrito a seguir.

\* Este programa computacional foi desenvolvido por Rogério Giglio Ferreira em nível de Iniciação Científica pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP.

**Verificação à flexo-compressão da barra 6** [de acordo com eq.(15) e eq.(16)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,3257}{40,00} = 0,008 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h_{\text{arco}}}{2} = \frac{0,0581}{213,3333} \cdot \frac{8,0}{2} = 0,001 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,008}{1,197} \right)^2 + \frac{0,001}{1,197} = 0,001 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{array} \right.$$

**Verificação à flexo-compressão da barra 4** [de acordo com eq.(15) e eq.(16)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,2375}{40,00} = 0,006 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h_{\text{arco}}}{2} = \frac{0,1603}{213,3333} \cdot \frac{8,0}{2} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,006}{1,197} \right)^2 + \frac{0,003}{1,197} = 0,003 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{array} \right.$$

**Verificação ao cisalhamento da barra 2** [de acordo com eq.(40)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{d,y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{y,d}}{b_{\text{arco}} \cdot h_{\text{arco}}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0017}{5,0 \cdot 8,0} = 0,001 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,144 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right. \quad \therefore \tau_{y,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

Conforme apresentado, a altura do arco foi definida através de seu índice de esbeltez, considerado como 140. Portanto, foi feita a verificação da estabilidade para peças esbeltas, de acordo com o item 7.5.5 da NBR 7190:1997.

**Verificação da estabilidade com relação aos esforços atuantes na barra 4** [de acordo com a eq.(18)]:

$$\begin{cases} \sigma_{N_{c0,d}} = 0,006 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{M,d} = \frac{M_d}{213,3333} \cdot \frac{8,0}{2} \text{ (o valor de } M_d \text{ será determinado a seguir)} \\ f_{c0,d} = 1,197 \text{ kN/cm}^2 \end{cases}$$

$$M_d = N_{c0,d} \cdot e_{1,ef} \cdot \left( \frac{F_E}{F_E - N_{c0,d}} \right)$$

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{co,ef} I_z}{L_0^2} = \frac{\pi^2 \cdot 501,500 \cdot 213,3333}{(329,6)^2} = 9,720 \text{ kN}$$

$$e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c$$

$$e_i \begin{cases} \frac{M_{1d}}{N_{c0,d}} = \frac{0,1603}{0,2375} = 0,67 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 8,0/30 = 0,27 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_i = 0,67 \text{ cm}$$

$$e_a \begin{cases} \frac{L_0}{300} = \frac{329,6}{300} = 1,10 \text{ cm} \\ \geq h/30 = 8,0/30 = 0,27 \text{ cm} \end{cases} \quad \therefore e_a = 1,10 \text{ cm}$$

$$e_c \begin{cases} = (e_{ig} + e_a) \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\phi \cdot [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]}{F_E - [N_{g,k} + (\psi_1 + \psi_2) \cdot N_{q,k}]} \right] - 1 \right\} \\ e_{i,g} = 0,67 \text{ cm} \\ e_a = 1,10 \text{ cm} \\ N_{g,k} = 0,1690 \text{ kN (Anexo C)} \\ N_{q,k} = 0 \text{ kN (não foram consideradas ações variáveis)} \\ F_E = 9,720 \text{ kN} \\ \phi = 0,8 \text{ (Tabela 15 NBR 7190:1997)} \end{cases} \quad \therefore e_c = 0,03 \text{ cm}$$

$$\therefore e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c = 0,67 + 1,10 + 0,03 = 1,8 \text{ cm}$$

$$M_d = 0,2375 \cdot 1,8 \cdot \left( \frac{9,720}{9,720 - 0,2375} \right) = 0,438 \text{ kN} \cdot \text{cm} \Rightarrow \sigma_{M,d} = 0,008 \text{ kN/cm}^2$$

Portanto: 
$$\frac{\sigma_{N_{c0,d}}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} = 0,01 < 1 \Rightarrow \text{ok.}$$

Foi feita a verificação do arco com relação ao estado limite de deformações excessivas, de acordo com o item 9.2.1 da NBR 7190:1997. A flecha efetiva determinada para o carregamento em estado limite de utilização, não pode superar  $\frac{\ell_0}{200}$ . Para o arco, este limite vale:  $\frac{329,6}{200} = 1,6$  cm, e o deslocamento máximo obtido foi de 0,01 cm, referente ao nó de número quatro, **Anexo C**.

### 6.2.2.2 *Fixação das Lamelas nos Arcos*

As lamelas foram fixadas nos arcos através de parafusos auto-atarraxantes de 0,6 cm de diâmetro, e 6,0 cm de comprimento, **Figuras 115 e 116**. A resistência do pino foi determinada de acordo com o item 8.3.4 da NBR 7190:1997. O procedimento utilizado para o cálculo está descrito a seguir.

#### **Ligação entre as lamelas:**

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{1,06 \text{ cm}}{0,6 \text{ cm}} = 1,77 \quad \text{onde:}$$

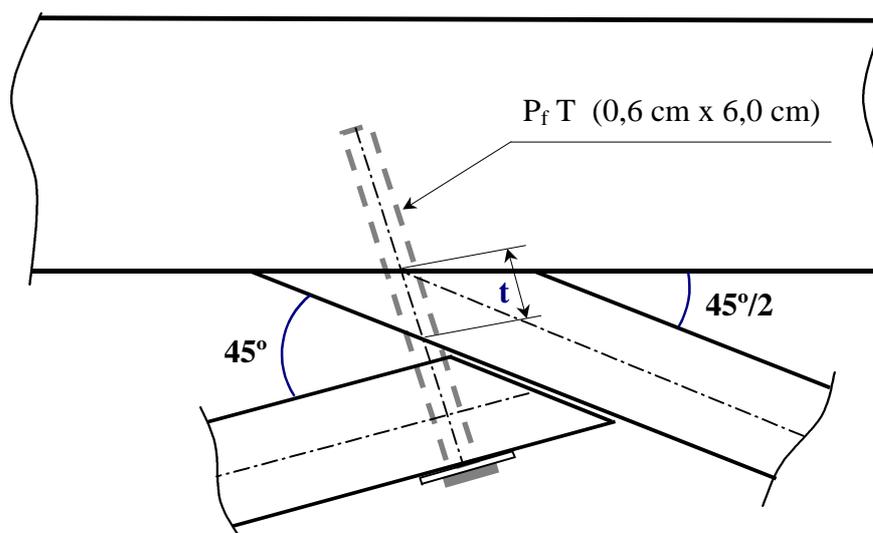
- t é a menor espessura de penetração do pino dada por  $\frac{e}{2 \cos 45^\circ}$  (e = espessura da lamela) – **Figura 115**;
- d é o diâmetro do pino = 0,6 cm.

$$\beta_{\text{lim}} = 5,13 - \text{determinado no item 6.2.1.6 deste trabalho.}$$

Sendo  $\beta < \beta_{\text{lim}}$ , determina-se o valor de cálculo  $R_{\text{vd},1}$  da resistência do pino, correspondente a uma seção de corte, através da **eq.(23)**:

$$R_{\text{vd},1} = 0,40 \cdot (t^2/\beta) \cdot f_{e45,d} = 0,329 \text{ kN.}$$

A resistência ao embutimento a  $45^\circ$  ( $f_{e45,d}$ ) foi determinada no item 6.2.1.6.



**FIGURA 115** – Representação da ligação entre as lamelas e o arco.

**Ligação entre lamela e arco:**

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{1,06 \text{ cm}}{0,6 \text{ cm}} = 1,77 \quad \text{onde:}$$

- t é a menor espessura de penetração do pino dada por  $\frac{e}{2 \cos 45^\circ}$  (e = espessura da lamela) – **Figura 115**;

- d é o diâmetro do pino = 0,6 cm.

$$\beta_{\text{lim}} = 5,13 - \text{determinado no item 6.2.1.6.}$$

Sendo  $\beta < \beta_{\text{lim}}$ , determinou-se o valor de cálculo  $R_{\text{vd},1}$ , correspondente a uma seção de corte, através da **eq.(23)**:

$$R_{\text{vd},1} = 0,40 \cdot (t^2/\beta) \cdot f_{e22.5,d} = 0,393 \text{ kN.}$$

As verificações com relação a estas ligações foram feitas de modo semelhante ao exposto no item 6.2.1.6, chegando-se à conclusão que o pino resiste aos esforços solicitantes.



a) Vista das extremidades das lamelas parafusadas no arco.



b) Vista superior da ligação.

**FIGURA 116** – Vista das extremidades das lamelas fixadas no arco.

### **6.2.2.3** *Montagem dos Arcos*

Para a colagem das lâminas, foi utilizado um adesivo à base de mamona, que consiste em uma alternativa para o uso em madeira laminada colada. Trata-se de um adesivo de resina poliuretana derivada do óleo de mamona, com importância destacada por ser a matéria-prima derivada de recurso natural renovável, além de apresentar baixo custo de obtenção, DE JESUS (1999).

Para cada arco, foram utilizados 350 ml de cada um dos componentes do adesivo (poliol e pré-polímero) totalizando 700 ml de adesivo, **Figura 117**. Estes componentes foram misturados a frio em um frasco plástico, com o auxílio de uma barra metálica, de forma a impedir a introdução de bolhas de ar na mistura.



**FIGURA 117** – Pesagem dos componentes do adesivo: polioli (à base de mamona) e pré-polímero (isocianato).

Foi montado um gabarito para a construção dos arcos. Neste gabarito, foi fixada uma lâmina, apenas para servir de base para as demais, **Figura 118**.



**FIGURA 118** – Gabarito para a montagem dos arcos.

As lâminas foram limpas com o auxílio de um compressor para impedir que o pó contido em suas superfícies prejudicasse a colagem.

O adesivo foi espalhado rapidamente nas duas superfícies de cada lâmina, e as lâminas foram posicionadas no gabarito inicialmente por pequenos pregos que as aderiam duas a duas, **Figura 119**.



**FIGURA 119** – Aplicação do adesivo por pincelamento, na face da lâmina já fixada no gabarito.

Depois de se posicionarem todas as lâminas no gabarito, fez-se a prensagem das mesmas em vários pontos ao longo do arco, com o auxílio de prensas móveis montadas com pedaços de madeira e barras de ferro, **Figura 120**.



**FIGURA 120** – Fixação das lâminas com prensas móveis.

Aguardou-se uma semana para a secagem do adesivo e desforma dos arcos, **Figura 121**. Os arcos foram passados na desgrossadeira para que fossem eliminados os resíduos de adesivo existentes em suas faces laterais, e depois disto, receberam um tratamento preservativo por pincelamento com o produto *stain* na cor mogno, que é fungicida e inseticida.



a) Arco com as lâminas coladas e prensadas ao longo do gabarito.



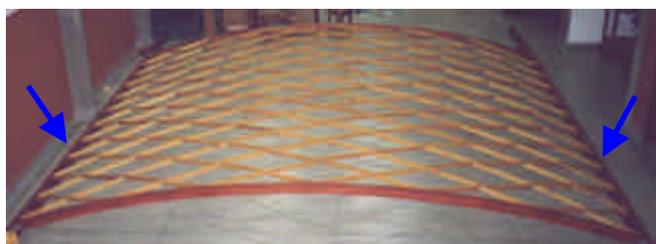
b) Arcos desformados e com preservativo aplicado em suas superfícies.

**FIGURA 121** – Vista global dos arcos do protótipo.

### 6.2.3 Vigas de Apoio Lateral

#### 6.2.3.1 Dimensionamento

Para o apoio dos nós laterais da estrutura, foram utilizadas vigas de madeira maciça, de seção 5,2 cm x 14,9 cm, **Figura 122**. A madeira utilizada foi a Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e a partir da caracterização mecânica, foi determinado o valor característico de sua resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k} = 43,5$  MPa). A partir disto, a madeira foi enquadrada na Classe C40 das Dicotiledôneas.



**FIGURA 122** – Vigas em madeira maciça como apoios laterais do protótipo.

Com o exposto, tem-se as seguintes características e propriedades para a viga:

$$\left\{ \begin{array}{ll} A_{\text{viga}} = 5,2 \cdot 14,9 = 77,48 \text{ cm}^2 & I_z = \frac{5,2 \cdot 14,9^3}{12} = 1433,4446 \text{ cm}^4 \\ E_{c0,m} = 19500 \text{ MPa} \cong 1950,0 \text{ kN/cm}^2 & f_{c0,k} = 43,5 \text{ MPa} \cong 4,35 \text{ kN/cm}^2 \\ \rho_{\text{ap}} = 950 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \gamma = 9,50 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3 & \end{array} \right.$$

Através da **eq.(36)** foram calculadas as resistências de cálculo à compressão paralela às fibras,  $f_{c0,d}$ :

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_w} \left\{ \begin{array}{l} k_{\text{mod}} = k_{\text{mod}1} \cdot k_{\text{mod}2} \cdot k_{\text{mod}3} \text{ (item 6.4.4 da NBR 7190 : 1997)} \\ \gamma_{wc} = 1,4 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{carregamento permanente e madeira serrada : } k_{\text{mod},1} = 0,60 \\ \text{classe de umidade 1 e madeira serrada : } k_{\text{mod},2} = 1,0 \\ \text{madeira de 1ª categoria : } k_{\text{mod},3} = 1,0 \\ \therefore k_{\text{mod}} = 0,60 \end{array} \right.$$

$$\therefore \left\{ \begin{array}{l} f_{c0,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_{\text{wc}}} = 0,60 \cdot \frac{4,35}{1,4} = 1,864 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,10 \cdot f_{c0,d} \quad (\text{Tabela 12 NBR 7190 : 1997}) \Rightarrow f_{v0,d} = 0,186 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right.$$

Foi calculado o valor efetivo para o módulo de elasticidade paralelamente às fibras, através da **eq.(35)**:

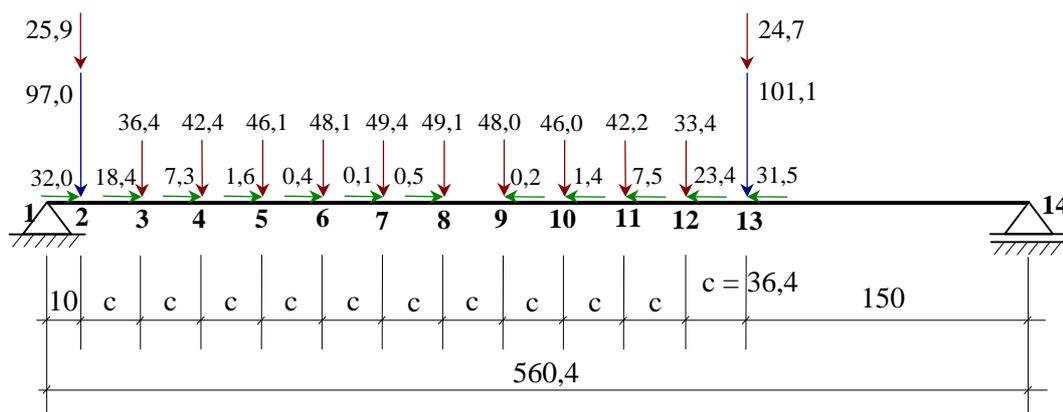
$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod}} \cdot E_{c0,m} = 0,60 \cdot 1950,0 = 1170,000 \text{ kN/cm}^2$$

Para o cálculo das vigas, além de seu peso próprio, foram consideradas as ações devidas à malha lamelar, correspondentes às reações de apoio dos nós da malha fixados nestas vigas, **Anexo B**. Os arcos das extremidades do protótipo também se apoiam nas vigas, e as reações de apoio determinadas no cálculo destes arcos (**Anexo C**) foram consideradas como ações atuantes nas vigas.

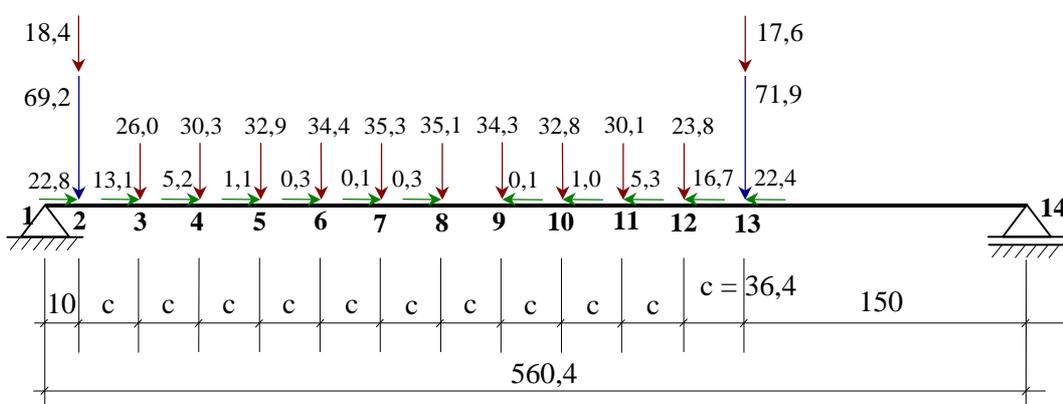
Na **Figura 123** está esquematizada a viga, com os carregamentos nodais em estados limites últimos e de utilização, devidos aos arcos (verticais aplicados nos nós **2** e **13**), e devidos às lamelas (verticais e horizontais aplicados nos nós: **2** a **13**). A viga foi apoiada a uma distância de 150 cm de um dos arcos de extremidade.

Calculou-se o peso próprio da viga para os estados limites últimos e de utilização:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma \cdot A_{\text{viga}} = 9,5 \times 10^{-6} \cdot 5,2 \cdot 14,9 = 0,73 \times 10^{-3} \text{ kN/m} \\ \text{para estados limites últimos: } 1,4 \cdot 0,73 \times 10^{-3} = 1,03 \times 10^{-3} \text{ kN/m} \\ \text{para estados limites de utilização: } 0,73 \times 10^{-3} \text{ kN/m} \end{array} \right.$$



a) Estados limites últimos.



b) Estados limites de utilização.

**FIGURA 123** – Esforços atuantes nos vigas devidos à malha lamelar e ao arco. [Unidades:  $10^{-3}$  kN e cm].

As vigas foram calculadas através do software SAPP para cálculo de pórticos planos. Os resultados do cálculo estão contidos no **Anexo D**. Foram feitas as verificações com relação à resistência e à deformação das vigas, como descrito a seguir.

**Verificação à flexo-compressão da barra 8** [de acordo com o item 7.3.6 da NBR 7190:1997]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,064}{77,48} = 0,001 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h_{\text{viga}}}{2} = \frac{90,1068}{1433,4446} \cdot \frac{14,9}{2} = 0,468 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,001}{1,864} \right)^2 + \frac{0,468}{1,864} = 0,25 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{array} \right.$$

**Verificação ao cisalhamento da barra 1** [de acordo com eq.(40)]:

$$\begin{cases} \tau_{d,y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{y,d}}{b_{\text{viga}} \cdot h_{\text{viga}}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,7196}{5,2 \cdot 14,9} = 0,01 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,186 \text{ kN/cm}^2 \end{cases} \quad \therefore \tau_{y,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

**Verificação da estabilidade lateral** [de acordo com o item 7.5.6 da NBR 7190:1997]

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}} \rightarrow \begin{cases} \frac{L_1}{b} = \frac{36,4}{5,2} = 7,0 \\ \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}} = \frac{1170,000}{11,95 \cdot 1,864} = 52,5 \end{cases} \Rightarrow \text{ok.}$$

O valor de  $\beta_M$  é determinado em função da seção transversal da viga, a partir da Tabela 16 da NBR 7190:1997.

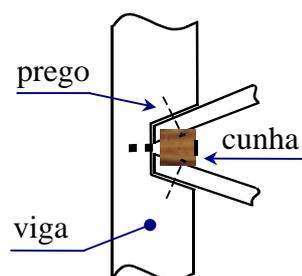
Foi feita a verificação das vigas com relação ao estado limite de deformações excessivas, de acordo com o item 9.2.1 da NBR 7190:1997. A flecha efetiva determinada para o carregamento em estado limite de utilização, não pode superar

$\frac{\ell_0}{200}$ . Para as vigas, este limite vale:  $\frac{560,4}{200} = 2,8 \text{ cm}$ , e o deslocamento máximo

obtido foi de 1,2 cm, referente ao nó de número nove, **Anexo D**.

### 6.2.3.2 Fixação das Lamelas nas Vigas

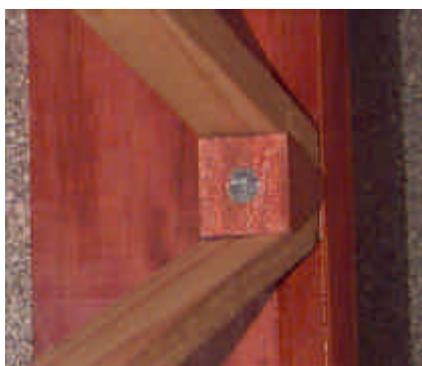
As vigas foram entalhadas e as extremidades das lamelas foram fixadas nestas, através de pregos e de cunhas, **Figura 124**.



a) Representação da fixação das lamelas na viga.



b) Extremidades das lamelas fixadas na viga.



c) Cunha parafusada na viga.



d) Cunhas de madeira maciça.

**FIGURA 124** – Ligação entre as extremidades das lamelas e as vigas.

Os entalhes na viga foram determinados em função do ângulo formado entre a borda superior da lamela que se fixa à viga com a horizontal. Este ângulo corresponde a  $11/12$  do ângulo de abertura de meio arco da abóbada lamelar, **Figuras 125 e 126**.

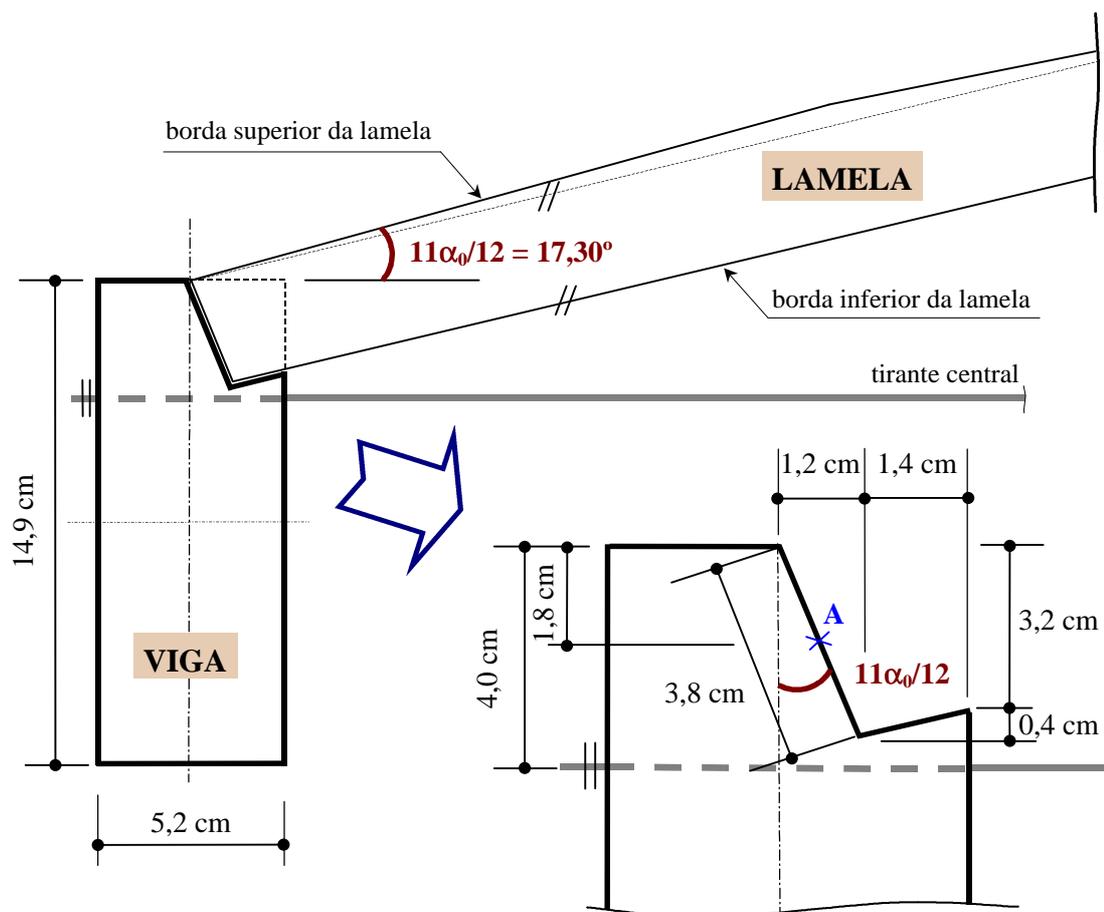


FIGURA 125 – Representação do entalhe feito na viga para a fixação das lamelas.

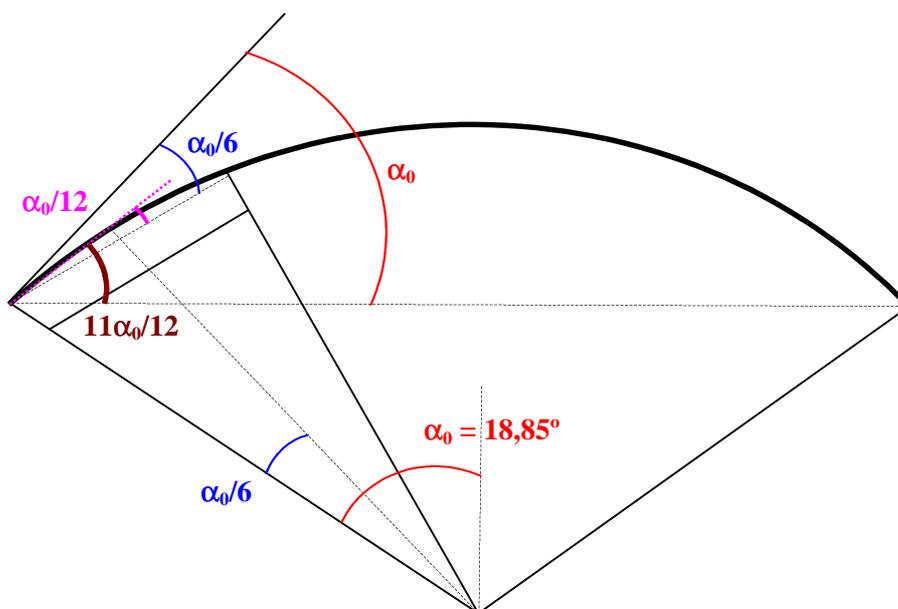
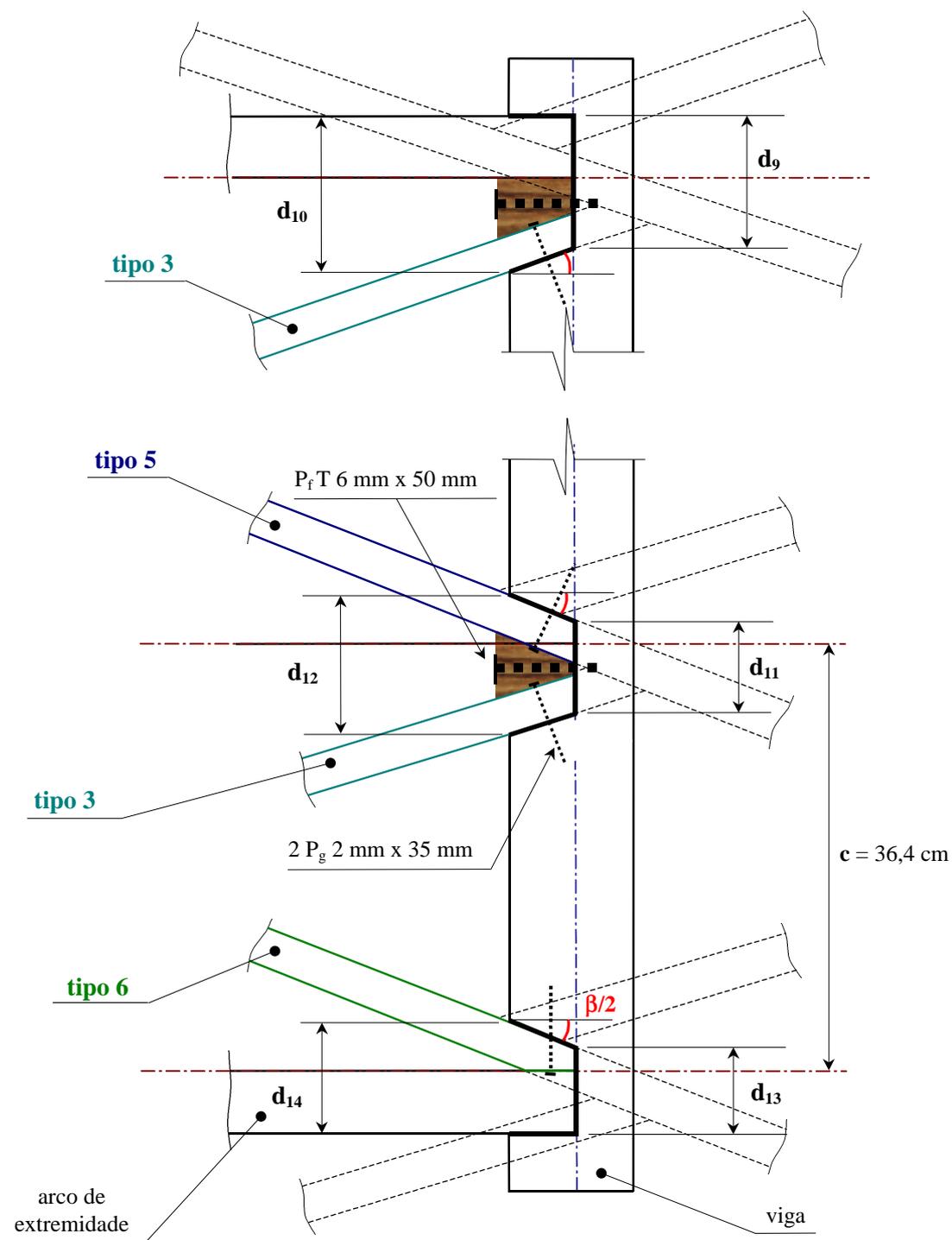


FIGURA 126 – Visualização do ângulo formado entre um plano horizontal e a borda superior de uma lamela projetada no plano transversal da abóbada.

Na **Figura 127** está representada uma vista superior da viga entalhada, com os detalhes dos três tipos de entalhes que foram executados, sendo dois tipos em suas extremidades onde se fixam os arcos, e um terceiro tipo de entalhe que se repete a cada 36,4 cm, ao longo do comprimento da viga.



**FIGURA 127** – Representação de uma vista superior da viga, com os três tipos de entalhes executados.

As dimensões dos entalhes apresentadas na **Figura 127** foram determinadas a partir das dimensões dos tipos de lamelas definidos no item 6.2.1.7:

$$\blacktriangle d_{11} = 2 \cdot \left( \frac{e}{\cos \beta/2} + (d_1 + d_2) \cdot \sin \beta/2 \right) = 3,9 \text{ cm} \quad (\text{ver Figura 97})$$

$$\blacktriangle d_{12} = d_{11} + 2 \cdot \left( \frac{b_{\text{viga}}}{2} \cdot \tan \beta/2 \right) = 6,1 \text{ cm} \quad (b_{\text{viga}} = 5,2 \text{ cm})$$

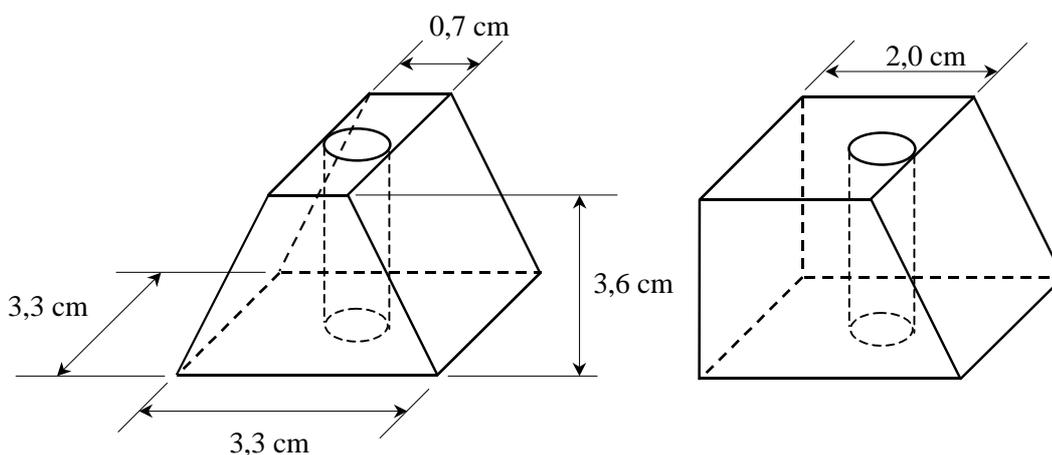
$$\blacktriangle d_9 = b_{\text{arco}} + d_{11} - d_7 = 8,1 \text{ cm} \quad (\text{ver Figura 97}; b_{\text{arco}} = 5,0 \text{ cm})$$

$$\blacktriangle d_{10} = d_9 + \left( \frac{b_{\text{viga}}}{2} \cdot \tan \beta/2 \right) = 9,2 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle d_{13} = d_7 + b_{\text{arco}} = 5,8 \text{ cm}$$

$$\blacktriangle d_{14} = d_{13} + \left( \frac{b_{\text{viga}}}{2} \cdot \tan \beta/2 \right) = 6,8 \text{ cm}$$

As cunhas foram feitas de Eucalipto Citriodora, e suas dimensões foram definidas em função das dimensões dos entalhes, sendo estas de dois tipos, **Figuras 127 e 128**. Os furos executados nas cunhas foram de 0,7 cm de diâmetro.



**FIGURA 128** – Representação dos tipos de cunhas confeccionados.

A função das cunhas é de posicionamento das extremidades das lamelas nos entalhes. Como as barras da estrutura são solicitadas à compressão axial, o entalhe transmite tal esforço para a viga. Por outro lado, atuam também, nas extremidades das lamelas que se fixam nas vigas, cortantes ortogonais ao eixo da viga. Portanto, foram

dimensionadas ligações pregadas para a fixação dessas extremidades. Foram utilizados dois pregos com diâmetro de 2 mm e comprimento de 35 mm em cada extremidade de lamela fixada na viga.

As cunhas foram fixadas com parafusos auto-atarraxantes de diâmetro 0,6 cm e comprimento de 5,0 cm.

Para se fixarem as lamelas nas vigas, estas foram espaçadas entre si através de quatro sarrafos, **Figura 129**. Após isso, as extremidades das lamelas foram pregadas nos entalhes e, depois, foram feitos os furos na viga para a fixação das cunhas.



**FIGURA 129** - Posicionamento das vigas através de sarrafos.

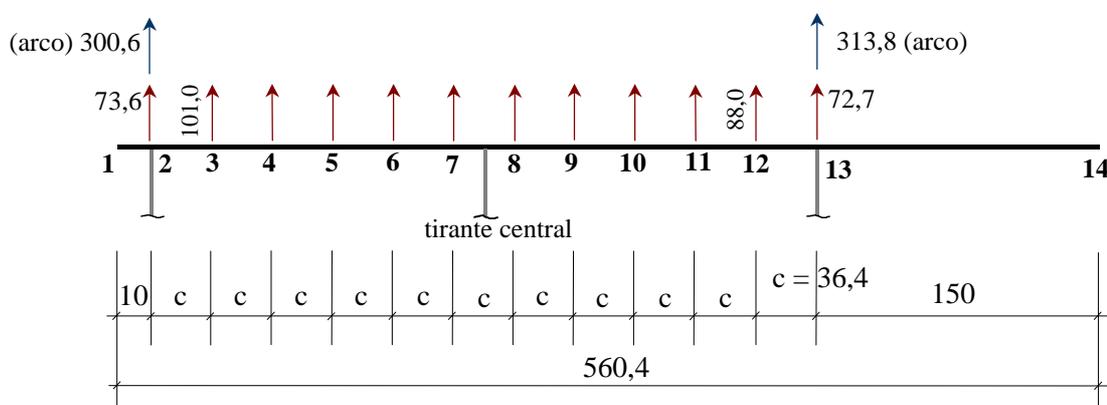
Como pode ser observado na **Figura 125**, há uma excentricidade entre o ponto de aplicação das cargas horizontais devidas às extremidades das lamelas fixadas na viga (ponto A) e o centro de gravidade da viga. Desta forma, foi refeita a verificação em relação à flexo-compressão considerando-se esta excentricidade que vale 5,7 cm:

**Verificação à flexo-compressão da barra 8** [de acordo com o item 7.3.6 da NBR 7190:1997]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Nc0,d} = \frac{0,064}{77,48} = 0,001 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{Mz,d} = \frac{M_{z,d}}{I_z} \cdot \frac{h_{\text{viga}}}{2} = \frac{90,1068 + 0,064 \cdot 5,7}{1433,4446} \cdot \frac{14,9}{2} = 0,470 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore \left( \frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{c0,d}} = \left( \frac{0,001}{1,864} \right)^2 + \frac{0,470}{1,864} = 0,25 < 1 \Rightarrow \text{ok.} \end{array} \right.$$

Por outro lado, os esforços horizontais decorrentes da malha lamelar, que são absorvidos pelos tirantes, produzem momentos de torção na viga. Isso ocorre devido à excentricidade de 2,2 cm existente entre o eixo do tirante central e o ponto de interseção entre o eixo de meia lamela e o entalhe da viga, representado pelo ponto **A** na **Figura 125**.

Na **Figura 130**, estão esquematizados estes esforços para o cálculo do momento de torção na viga.



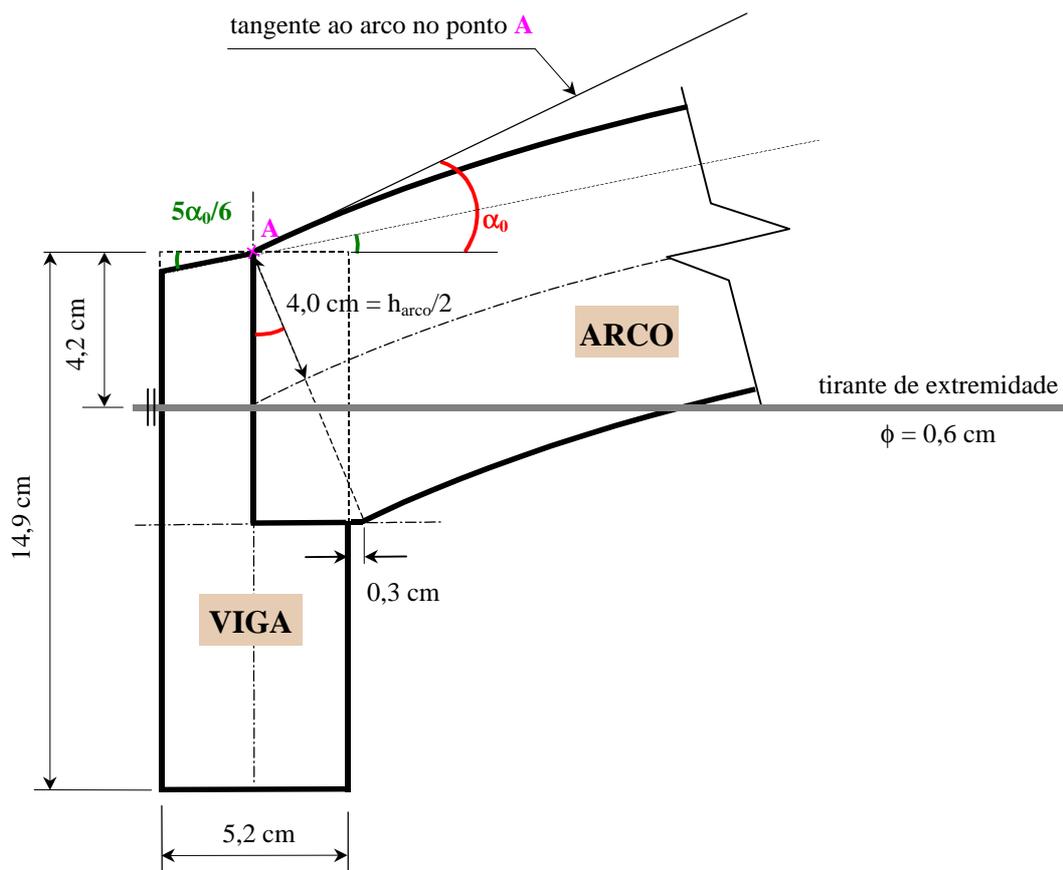
**FIGURA 130** – Representação de uma vista superior da viga, com os esforços horizontais para estados limites últimos. [Unidades:  $10^{-3}$  kN e cm].

Foi feita a verificação da viga à torção, de acordo com a **eq.(39)**:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{T,d} = \frac{T_d}{W_t} = \frac{T_d}{\alpha \cdot h \cdot b^2} = \frac{3,142}{0,265 \cdot 14,9 \cdot 5,2^2} = 0,029 \text{ kN/cm}^2 \\ T_d = \sum H_i, \text{ lamela} \cdot 2,2 = 3,142 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ \alpha = 0,265 \text{ - função de } b \text{ e } h, \text{ PISSARENKO et al. (1985)} \\ f_{v0,d} = 0,186 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right. \quad \therefore \tau_{T,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

### 6.2.3.3 Fixação dos Arcos nas Vigas

De acordo com o apresentado pela **Figura 127**, as vigas foram entalhadas para o posicionamento dos arcos. Este entalhe foi executado a uma profundidade correspondente à metade da altura da viga, **Figura 131**.



**FIGURA 131** – Representação da seção transversal da viga na região de apoio do arco.

Foi executado um entalhe na borda superior das vigas, ao longo de todo o seu comprimento, **Figura 131**, para acompanhar a inclinação da abóbada, para a fixação da telha de policarbonato.

Após a fixação da malha lamelar nas vigas, como descrito no item 6.2.3.2, os arcos foram posicionados, com o auxílio de chapas metálicas parafusadas na viga e no arco, **Figura 132-a**.

Estando os arcos em suas posições, fixaram-se as lamelas nestes, de acordo com o exposto no item 6.2.2.2; e, finalmente, foram feitos os furos nos arcos e nas vigas, para a passagem dos tirantes.



a) Vista da chapa metálica parafusada na viga e no arco.



b) Vista superior.



c) Vista inferior.

**FIGURA 132** – Vista de um canto da estrutura, onde se fixa a lamela do tipo 3.

Devido aos entalhes feitos na viga para a fixação dos arcos, foi refeita a verificação da viga, nesta posição, com relação ao cisalhamento. O centro de gravidade da seção entalhada fica 1,25 cm abaixo do centro de gravidade da seção retangular.

**Verificação ao cisalhamento da barra 1** [de acordo com eq.(40)]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{d,y} = \frac{V_{y,d} \cdot S}{b \cdot I} = \frac{0,7196 \cdot 96,366}{\frac{5,2}{2} \cdot 864,4347} = 0,03 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{v0,d} = 0,186 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right. \quad \therefore \tau_{y,d} < f_{v0,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

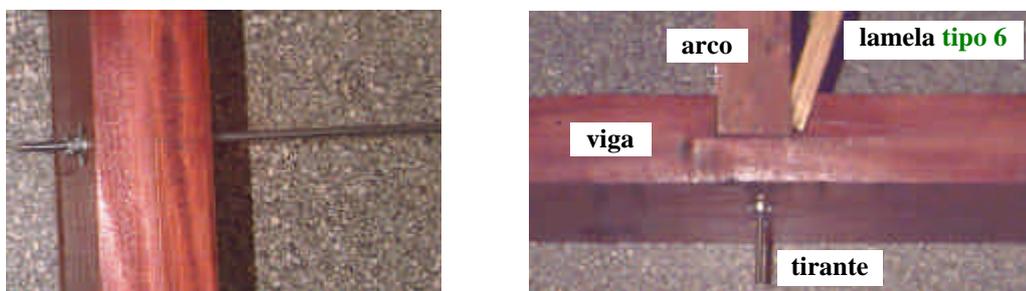
onde:

- ▲ I – momento de inércia da seção transversal entalhada;
- ▲ S – momento estático da área acima do centro de gravidade da seção maciça, em relação ao centro de gravidade da seção entalhada calculado por:  
 $(2,6 \cdot 14,9/2) \cdot (14,9/4 + 1,25) = 96,366 \text{ cm}^3$ .

#### 6.2.3.4 Dimensionamento dos Tirantes

Para absorverem os esforços horizontais que a malha lamelar e os arcos aplicam sobre as vigas laterais, foram dispostos nas vigas três tirantes de 0,6 cm de diâmetro, sendo dois posicionados nas extremidades, e o terceiro, no meio da estrutura, **Figura 133**.

O posicionamento dos tirantes, em relação à altura da seção transversal das vigas, está representado nas **Figura 125 e 131**.



a) Tirante central.

b) Tirante de extremidade.

**FIGURA 133** – Vista superior da viga, em regiões interceptadas pelos tirantes.

Para o cálculo dos esforços atuantes em cada tirante, foi feito o equilíbrio da situação apresentada pela **Figura 130** e concluiu-se que os esforços de tração atuantes nos tirantes são:

- ▲ tirantes de extremidade: 0,649 kN e 0,649 kN
- ▲ tirante central: 0,745 kN

A resistência do tirante foi determinada de acordo com a NBR 8800:1986, ABNT (1986). Considerando-se o aço comum de construção metálica (MR 250), tem-se as seguintes características quanto aos estados limites de resistência:

- ▲ limite de escoamento do aço:  $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$ ;
- ▲ limite de resistência à tração do aço:  $f_u = 400 \text{ MPa} = 40 \text{ kN/cm}^2$ .

A resistência de cálculo do tirante foi determinada para:

- ▲ estado limite de escoamento da seção:  $R_d = 0,90 \cdot (A \cdot f_y)$ ;
- ▲ estado limite de ruptura da seção:  $R_d = 0,75 \cdot (A \cdot f_u)$ .

A condição de segurança é dada por  $R_d \geq S_d$ . Para o protótipo, o tirante central é o mais solicitado, tendo-se  $S_d = 0,745 \text{ kN}$ . Foi adotado o diâmetro de 6 mm para os tirantes e foram feitas as verificações:

$$\left. \begin{array}{l} 0,90 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 25 \right) = 6,36 \text{ kN} \\ 0,75 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 40 \right) = 8,48 \text{ kN} \end{array} \right\} > 0,745 \text{ kN} \quad \therefore \text{ok.}$$

Foram utilizadas arruelas de diâmetro 20 mm para a fixação dos tirantes nas vigas, e foi feita a verificação à compressão normal às fibras da madeira da viga, para esta área de contato com a arruela.

De acordo com o item 7.3.2 da NBR 7190:1997, a condição de segurança para peças submetidas à compressão normal às fibras é expressa por:

$$\sigma_{c90,d} \leq f_{c90,d}$$

sendo:

$$- f_{c90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n \quad (\alpha_n \text{ é obtido através da Tabela 13 da norma em questão})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{c90,d} = \frac{0,745}{A_{\text{arruela}}} = \frac{0,745}{3,1416} = 0,237 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{c90,d} = 0,25 \cdot 1,864 \cdot 1,7 = 0,792 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right. \quad \therefore \sigma_{c90,d} \leq f_{c90,d} \Rightarrow \text{ok.}$$

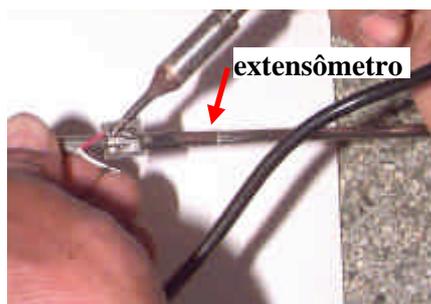
### **6.2.4 Ensaio do Protótipo**

Foi realizado um ensaio no protótipo lamelar, que fez parte de uma aula prática de experimentação em estruturas de madeira, ministrada aos instrutores do SENAI, no curso de atualização: “Técnicas Construtivas de Estruturas de Madeira”, promovido pelo LaMEM.

O ensaio consistiu na aplicação de cargas em alguns nós do protótipo, e na determinação dos deslocamentos de alguns nós e das deformações nos três tirantes. Primeiramente, foram instalados extensômetros elétricos de resistência nos tirantes para a medida de suas deformações, **Figura 134**.



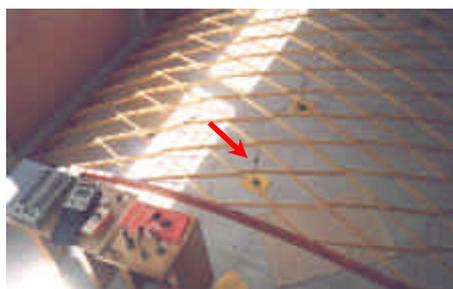
a) Instrumentação do tirante central.



b) Soldagem de fios no extensômetro.

**FIGURA 134** – Instrumentação dos tirantes com extensômetros.

Foram adaptados transdutores indutivos em alguns nós da malha, para a determinação de seus deslocamentos, **Figura 135**.



a) Vista superior.

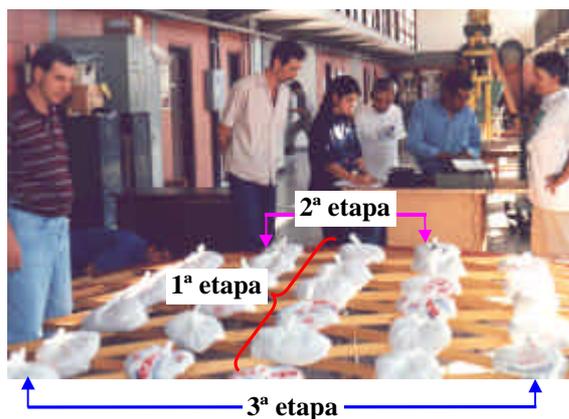


b) Vista frontal.

**FIGURA 135** – Instrumentação de alguns nós para medida de deslocamento vertical.

Os nós instrumentados para a leitura de deslocamentos verticais foram os de números: 30,69,108,35,87,126,38,90 e 129, representados na malha lamelar esboçada na **Figura 76**.

O carregamento do protótipo foi realizado em três etapas e foram utilizados sacos plásticos contendo 4 kg de areia cada, **Figura 136**.



**FIGURA 136** – Carregamento dos nós do protótipo.

Na primeira etapa de carregamento foram aplicadas cargas nos nós correspondentes à geratriz da abóbada lamelar. Foram lidos os valores de deformação e deslocamento através do indicador de deformação, **Figura 137**. Em seguida, realizaram-se os carregamentos da segunda e terceira etapas, bem como as leituras dos deslocamentos e deformações.



**FIGURA 137** – Aparelho de leitura utilizado no ensaio, composto pela caixa de balanceamento e pelo indicador de deformações.

Foram considerados que os nós da malha posicionados ao longo do arco, possuem movimento de translação livre em direção paralela à geratriz da abóbada, pois na situação de ensaio, o arco não impedia deslocamento paralelo à geratriz da abóbada.

Além das cargas aplicadas nos nós, através de sacos de areia, que equivalem a 0,04 kN, atuam em cada nó, as cargas devidas ao peso próprio da malha e aos elementos de ligação. O cálculo das cargas permanentes que atuam no protótipo foi realizado no item 6.2.1.3. Portanto, desconsiderando-se a carga devida às telhas do cálculo apresentado naquele item, e considerando-se o comprimento efetivo das lamelas de 98,5 cm, obteve-se:

$$P = (1,03) \cdot \gamma \cdot v$$

sendo

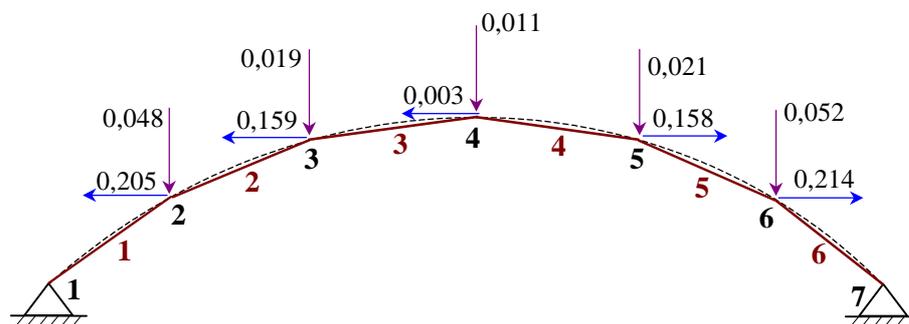
$$\blacktriangle v = \left( \frac{h_m + h_e}{2} \cdot \ell_{\text{lamela ef}} \right) \cdot e = \frac{5,0 + 3,7}{2} \cdot 98,5 \cdot 1,5 = 642,713 \text{ cm}^3$$

$$\therefore P = (1,03) \cdot \gamma \cdot v = (1,03) \cdot 4,720 \times 10^{-6} \cdot 642,713 = 0,003 \text{ kN/nó}$$

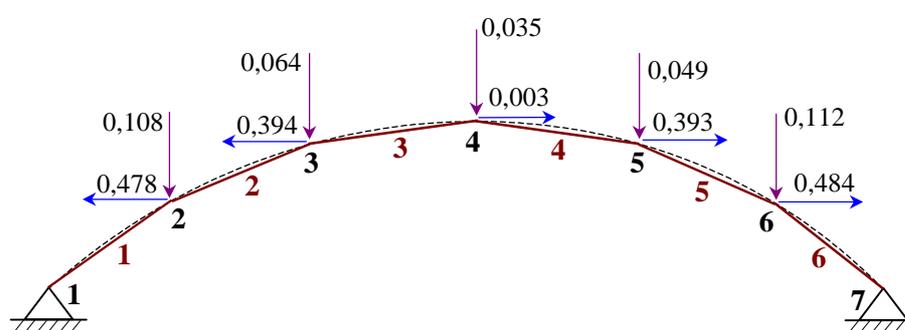
Foram inseridas arruelas com diâmetro de 3,0 cm entre a arruela de 2,0 cm e a viga, e calculou-se o maior esforço que poderia atuar nos tirantes, comprimindo perpendicularmente as fibras da madeira das vigas (ver item 6.2.3.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{c90,d} = 0,25 \cdot 1,954 \cdot 1,55 = 0,757 \text{ kN/cm}^2 \\ \therefore N_{c90,max} = f_{c90,d} \cdot A_{\text{arruela}} = 0,757 \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{arruela}}^2}{4} = 5,4 \text{ kN} \end{array} \right.$$

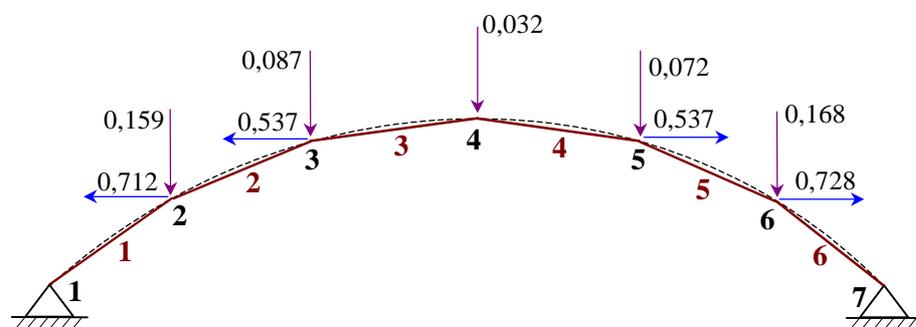
De acordo com as considerações apresentadas, o protótipo foi calculado, através do software PORT-TRI, para as três etapas de carregamento. Os deslocamentos dos nós da malha e as reações de apoio estão apresentados no **Anexo E**. Porém, para se determinarem as deformações ocorridas nos tirantes, foi feito o cálculo dos arcos de extremidade, carregando-os com seu peso próprio e com as reações de apoio obtidas através do PORT-TRI, **Figura 138**.



a) Primeira etapa de carregamento.



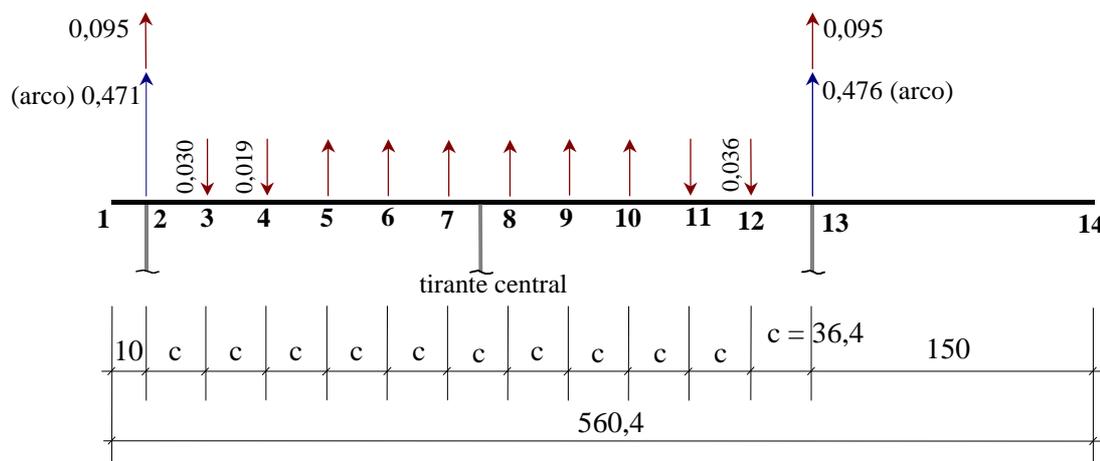
b) Segunda etapa de carregamento.



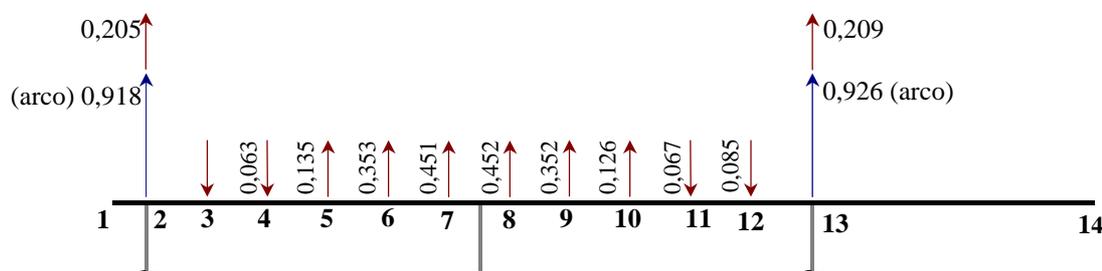
c) Terceira etapa de carregamento.

**FIGURA 138** – Cargas aplicadas nos arcos, devidas à malha lamelar, para as três etapas de carregamento realizadas no ensaio. [Unidade: kN].

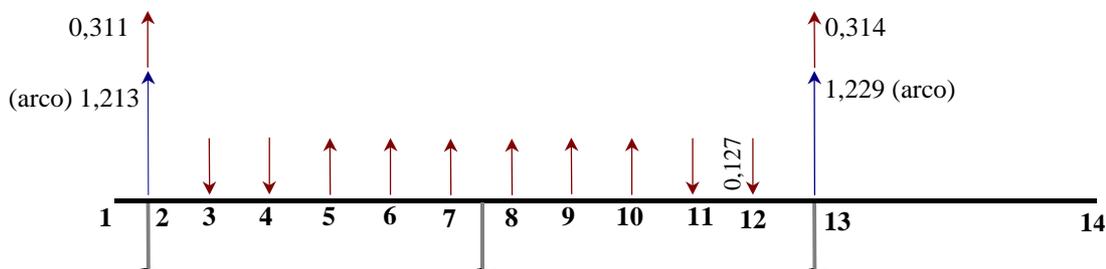
Considerando-se o peso próprio dos arcos determinado no item 6.2.2.1, estes foram calculados com o auxílio do software SAPP, para cálculo de pórticos planos, e, a partir das cargas horizontais que os arcos e a malha lamelar aplicam nos tirantes, **Figura 139**, foram determinados os esforços que solicitam os tirantes, e as deformações ocorridas nestes. Os resultados do cálculo se encontram no **Anexo F**.



a) Primeira etapa de carregamento.



b) Segunda etapa de carregamento.



c) Terceira etapa de carregamento.

**FIGURA 139** – Forças horizontais devidas à malha lamelar e aos arcos de extremidade, absorvidas pelos tirantes. [Unidade: kN].

Foram feitos os equilíbrios das situações apresentadas pela **Figura 139**, obtendo-se os esforços de tração atuantes nos tirantes e a partir destes valores, foram calculadas as deformações através da Lei de Hooke:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , sendo:

$$\sigma = \frac{N_{\text{tirante}}}{A_{\text{tirante}}}$$

$$E_{\text{aço}} = 2,05 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

Os valores teóricos dos deslocamentos dos nós instrumentados, e das deformações ocorridas nos tirantes, estão apresentados nas **Tabelas 9 e 10**, juntamente com os valores obtidos através de cinco ensaios realizados.

**TABELA 9** – Valores teóricos e de ensaio dos deslocamentos dos nós.

Nó	Etapas de Carregamento	Deslocamentos (mm)					
		Teórico	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
30	1ª etapa	3,1	3,9	3,5	3,9	3,9	3,5
	2ª etapa	6,9	11,3	10,2	10,2	10,8	9,9
	3ª etapa	7,8	14,5	14,8	14,8	15,2	13,8
69	1ª etapa	4,2	5,6	5,3	5,4	5,6	5,6
	2ª etapa	9,9	17,7	15,6	17,0	16,7	16,0
	3ª etapa	11,1	26,5	25,7	25,4	25,4	22,9
108	1ª etapa	3,0	5,2	5,0	5,2	5,5	5,2
	2ª etapa	6,8	15,5	14,1	13,5	15,5	13,9
	3ª etapa	7,2	25,4	21,1	21,4	22,2	19,7
35	1ª etapa	0,8	3,8	3,3	3,7	3,7	3,3
	2ª etapa	2,3	14,0	9,6	10,0	10,0	8,4
	3ª etapa	1,7	17,7	16,0	16,7	17,1	14,7
87	1ª etapa	1,3	5,1	3,8	4,8	4,8	4,8
	2ª etapa	3,1	15,4	13,7	14,1	13,4	12,0
	3ª etapa	3,3	26,5	23,8	23,9	23,7	20,6
126	1ª etapa	0,4	2,0	1,2	1,7	1,9	1,4
	2ª etapa	0,5	6,1	4,4	4,7	4,9	3,9
	3ª etapa	1,9	12,6	9,8	10,9	11,3	9,2
38	1ª etapa	0,6	1,2	1,2	1,2	0,9	0,7
	2ª etapa	1,8	5,5	5,1	4,8	4,7	4,1
	3ª etapa	1,2	11,7	11,0	10,0	10,7	9,7
90	1ª etapa	1,4	1,9	1,9	1,7	2,3	2,6
	2ª etapa	3,5	9,7	9,3	8,5	9,2	9,0
	3ª etapa	3,9	18,7	18,0	15,1	18,6	14,9
129	1ª etapa	0,2	2,0	1,6	1,8	2,0	1,8
	2ª etapa	0,2	7,1	6,1	6,4	7,0	6,1
	3ª etapa	1,5	14,9	12,5	12,8	13,2	11,9

TABELA 10 – Valores teóricos e de ensaio das deformações nas barras.

Tirante	Etapas de Carregamento	Deformações (x 10 <sup>-6</sup> )					
		Teórico	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio	Ensaio
Extremidade (nó 2)	1ª etapa	106	55	45	45	40	45
	2ª etapa	210	160	140	140	150	150
	3ª etapa	289	240	220	235	235	230
Central	1ª etapa	107	60	50	55	55	50
	2ª etapa	243	180	185	180	165	165
	3ª etapa	360	250	245	250	255	250
Extremidade (nó 13)	1ª etapa	106	60	45	50	50	50
	2ª etapa	208	170	170	170	175	160
	3ª etapa	289	265	265	265	265	245

O carregamento foi levado até que o nó mais deformado (69 – central à malha) atingisse a flecha limite de 25,9 mm (0,5% do vão). Com a terceira etapa de carregamento, atingiu-se tal limite para este nó (26,5 mm), **Tabela 9**.

O protótipo não foi levado ao estado limite último, pois foi utilizado como cobertura, após o ensaio.

A última coluna das **Tabelas 9 e 10** se refere a um pré-tensão dada nos tirantes, antes do quinto ensaio, equivalente a uma deformação de  $200 \times 10^{-6}$ . Tal deformação corresponde a uma pré-tensão de  $4,1 \text{ kN/cm}^2$  e a uma força de 1,159 kN.

Com os valores apresentados na **Tabela 9** verifica-se que os deslocamentos dos nós da malha obtidos através do ensaio foram maiores que os determinados pelo programa computacional. Isto se deve à ocorrência de deformações nas ligações que não são levadas em consideração no cálculo da estrutura, pela acomodação da estrutura ao carregamento, pois as ligações não são rígidas.

Pela **Tabela 10** percebe-se que os valores das deformações nas barras obtidos pelo ensaio foram menores que os esperados com o cálculo.

Com a pré-tensão aplicada nos tirantes, pode-se perceber que os deslocamentos dos nós diminuíram e as deformações nos tirantes diminuíram pouco ou se mantiveram. Ou seja, o ajuste de tensão nos tirantes provocou redução dos deslocamentos dos nós.

O protótipo mostrou um bom comportamento estrutural, conforme pode ser observado pelos valores das deformações nos tirantes e dos deslocamentos, apresentando uma distribuição uniforme de esforços.

### **6.3 DIRETRIZES PARA PROJETO DE ESTRUTURAS LAMELARES**

Pode-se perceber ao longo deste trabalho, que as variáveis envolvidas em uma estrutura lamelar são bem diversas, tanto do ponto de vista geométrico, como do relacionado com os materiais a serem utilizados.

Geometricamente, têm-se as variáveis inerentes às lamelas que, como apresentado no trabalho, são definidas em função da abóbada que se esteja projetando, dos apoios e do tipo de ligação que será executado. Por outro lado, as lamelas podem ser confeccionadas com madeira serrada simples ou composta, com madeira laminada colada e inclusive pode ser utilizada a madeira compensada. Além disso, as lamelas são projetadas de acordo com o tipo de ligação interlamelar a ser executado, através de pinos, conectores (como chapas metálicas) ou mesmo por encaixe.

Dependendo do tipo de lamela que se esteja utilizando, considerando-se as variações dos parâmetros apontados acima, consegue-se executar abóbadas para vencer de médios a grandes vãos. Para cada situação, consegue-se chegar a um bom projeto, equilibrando a economia de madeira com a de elementos de ligação.

Apesar da diversidade das variáveis, é possível se encontrar uma boa solução para o tipo de estrutura lamelar que se deseja construir. Para isto, são apresentadas a seguir as diretrizes para o projeto de estruturas lamelares de madeira.

Um primeiro passo está relacionado com a esbeltez das barras da estrutura. Através do índice de esbeltez máximo permitido pela norma ( $\lambda = 140$ ), se define o comprimento máximo que se pode confeccionar a lamela, em função de sua espessura.

Procede-se à escolha do ângulo interlamelar. Para se obter o mínimo gasto de madeira, o ângulo deve ser de  $90^\circ$ , mas neste caso a ligação deverá ser encaixada, ou realizada através de conectores, como as chapas metálicas. Dependendo do tipo de ligação, a redução do custo da madeira será superada pelo aumento do custo com as

ligações. Além disso, quanto maior o ângulo interlamelar, maiores são os esforços atuantes nas lamelas (SAAD, 1996).

Por outro extremo, pensando em um ângulo em torno de 30°, por exemplo, os esforços atuantes nas barras seriam menores, e as ligações que fossem excêntricas teriam menores excentricidades, pois as extremidades das lamelas que se fixam à lamela contínua estariam mais próximas entre si. Mas, por outro lado, o volume de madeira e a quantidade de elementos de ligação aumentaria significativamente, porque é necessário maior número de barras e nós para comporem a estrutura.

Portanto, conclui-se que o ângulo interlamelar deve estar em torno de 40° a 50° para se buscar um equilíbrio entre o volume de madeira utilizado, os esforços atuantes nas barras e o custo da ligação interlamelar a ser utilizada.

A partir destas análises iniciais, será procurada uma flecha mínima do arco da abóbada, para se vencer determinado vão. Segundo SAAD (1996), a flecha deverá estar em torno de 10 % a 30 % do vão e além disso, está relacionada com o tipo de telha que será utilizada como fechamento da estrutura.

O procedimento para definir a melhor curvatura da estrutura é iterativo, sendo possível de ser feito através do pré-processador de entrada e geração de dados, elaborado pela autora em nível de iniciação científica. Este programa permite, com facilidade, a modelagem de estruturas lamelares. No **Anexo A.1.1** é apresentada uma tela gerada pelo pré-processador.

Para este programa são fornecidas as dimensões da área a ser coberta, a seção transversal das peças, os módulos de elasticidade longitudinal e transversal da madeira, o raio do arco da abóbada, e a quantidade de unidades de malha lamelar ao longo da largura (em **x**) e comprimento da estrutura (em **z**).

Com estes dados, aparecem na tela: o comprimento da lamela, o ângulo interlamelar, e a flecha do arco da abóbada, sendo possível também se visualizar a malha gerada.

Portanto, é fácil de se alterar qualquer dado da estrutura e analisar como esta alteração influencia nos demais parâmetros. Além disso, podem ser geradas malhas com todas as extremidades das barras contínuas.

O arquivo gerado pelo pré-processador é lido pelo software PORT-TRI, que calcula a estrutura. Para isto, são fornecidas as condições de apoio da estrutura e os carregamentos, podendo ser alterados os dados elástico-geométricos da malha, bem como as condições de extremidade de suas barras.

É bastante fácil e rápida a geração e cálculo do tipo de estrutura em questão, através destes programas. Portanto, é simples de se fazer uma iteração da geometria da estrutura, para se chegar em uma situação considerada boa pelo projetista, em termos da racionalização do uso de material, para cada caso que se esteja analisando.

Uma primeira avaliação dos resultados seria com relação ao maior deslocamento dos nós (flecha máxima permitida pela NBR 7190:1997: 0,5 % do vão) e à verificação da estabilidade de peças esbeltas.

Se o comprimento da estrutura for maior que o dobro de sua largura, deve-se ficar atento à ocorrência das deformações e esforços atuantes na região central da estrutura. Dessa forma, não se teria homogeneização de esforços, e deveria ser avaliada a viabilidade econômica de se adaptar um elemento de apoio, perpendicular à geratriz da abóbada, para os nós centrais à malha. Neste caso, a malha estaria sendo “dividida” em duas, aumentando a eficiência de seu comportamento, pois haveria maior uniformização de esforços.

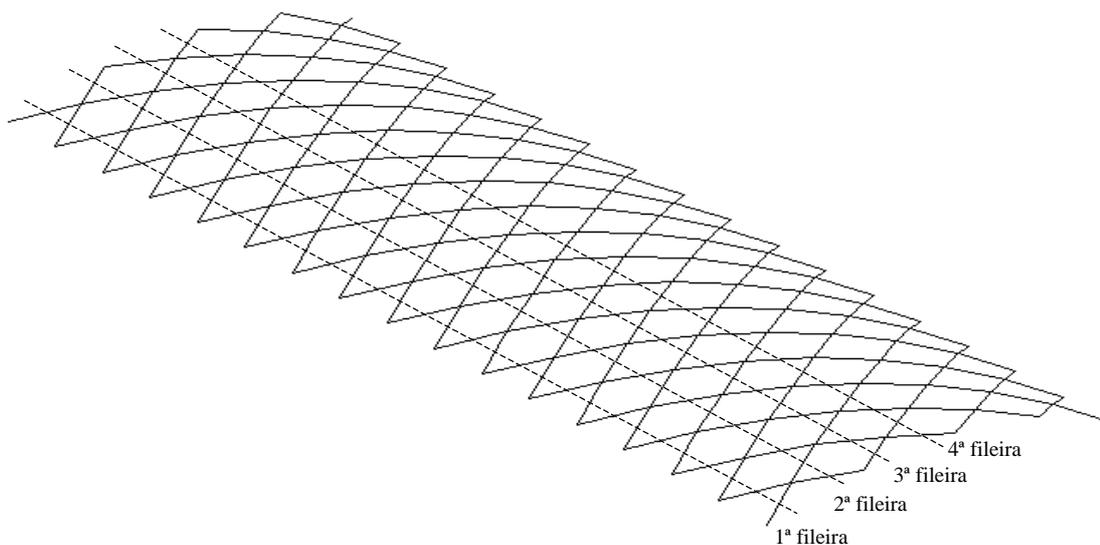
Para cada caso, ter-se-á uma relação ideal entre os elementos geométricos das lamelas e da abóbada lamelar. E para facilitar a busca de uma alternativa considerada boa para um projeto deste sistema estrutural, o projetista deve saber se os esforços e deslocamentos aumentam ou diminuem, ao se alterar determinado elemento geométrico da estrutura: ângulo interlamelar, flecha, vão e comprimento.

Com o aumento do ângulo interlamelar, aumentam os esforços atuantes nas barras e os deslocamentos dos nós da estrutura. Quando se reduz a flecha do arco da abóbada, ou se aumenta seu vão, aumentam os esforços normais atuantes nas barras e os deslocamentos dos nós. Ao se aumentar o comprimento da malha, os esforços atuantes nas barras e dos deslocamentos dos nós aumentam, SAAD (1996).

Foi feito um mapeamento de esforços e deslocamentos para um exemplo de estrutura lamelar, para se visualizar sua variação qualitativa ao longo da malha. Fez-se o mapeamento dos esforços normais atuantes nas barras, dos momentos fletores atuantes nas extremidades contínuas das barras, relativos ao eixo de maior inércia da seção transversal das peças, e dos deslocamentos verticais (flecha) dos nós.

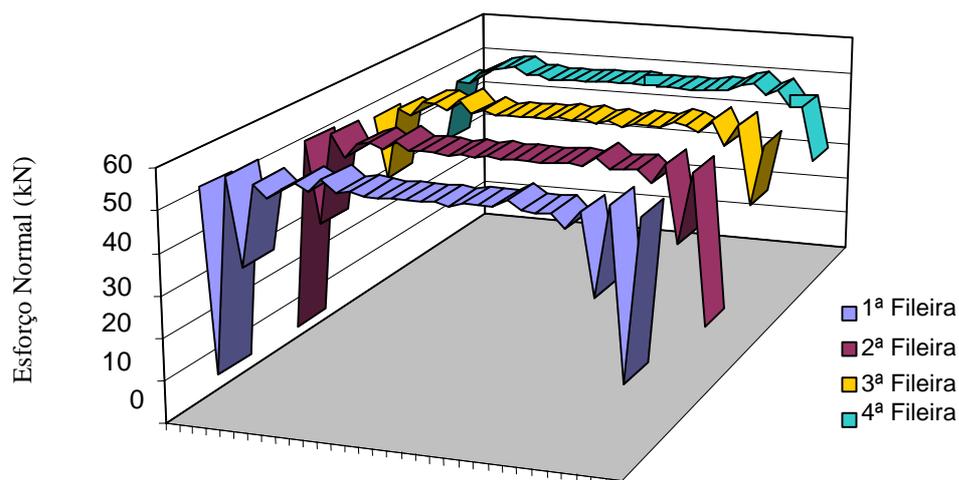
#### Dados do exemplo:

- 4 divisões em **x** e 16 divisões em **z**;
- Vão = 400 cm
- Comprimento = 700 cm
- Raio = 800 cm
- Seção transversal da peça: 2,5 cm x 20,0 cm
- Módulos de elasticidade:  $E = 1000 \text{ kN/cm}^2$  e  $G = 50 \text{ kN/cm}^2$
- Apoios fixos no contorno da estrutura e carregamento de 10 kN em todos os nós.



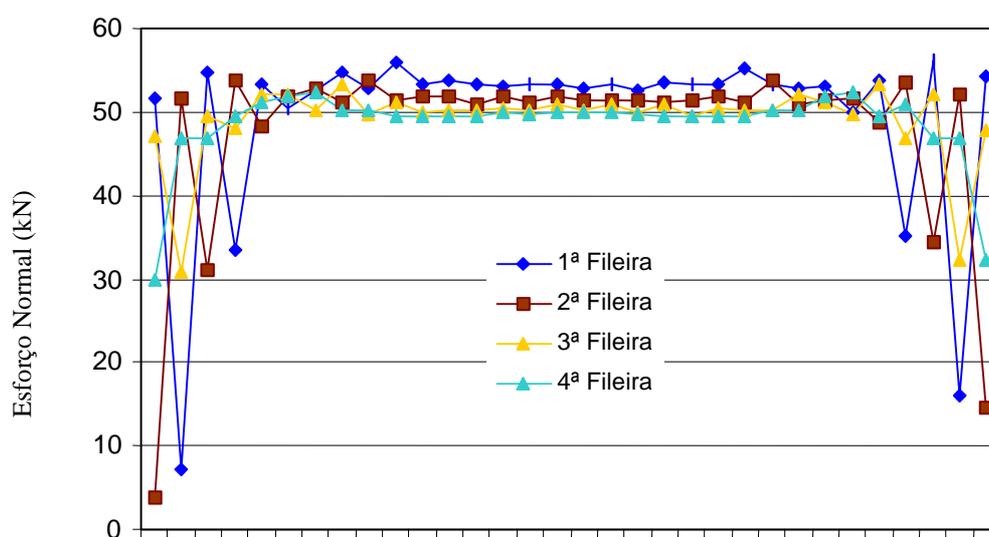
**FIGURA 140** – Esboço da malha feito pelo pré-processador.

Os resultados do cálculo estão apresentados no **Anexo G**. Na **Figura 141** está representado um mapeamento dos esforços normais atuantes nas barras da estrutura, para se visualizar a sua homogeneização ao longo da malha. Foi considerada para a plotagem dos esforços, apenas metade da estrutura, devido à simetria. As fileiras de barras foram consideradas a partir do apoio lateral da estrutura até a geratriz da abóbada, **Figura 140**.



Barras ao longo do comprimento da abóbada.

a) Mapeamento tridimensional.



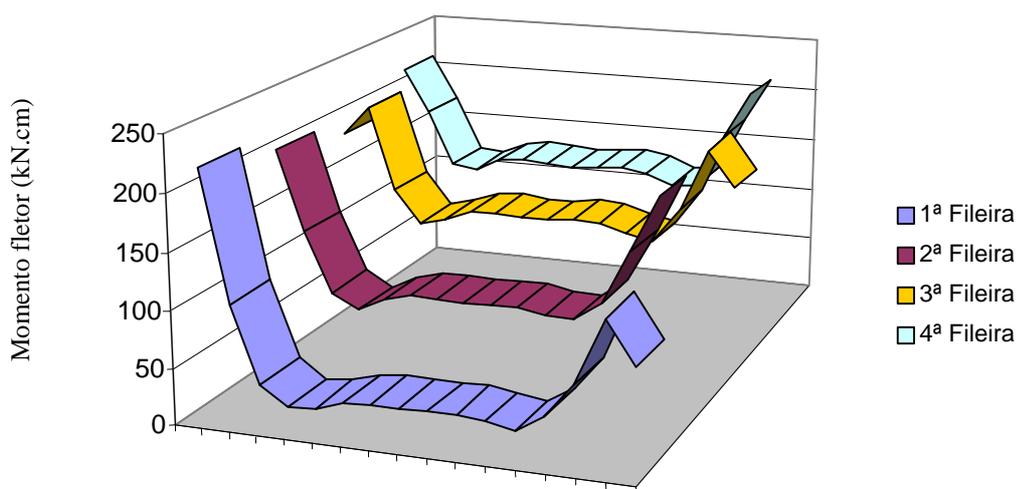
Barras ao longo do comprimento da abóbada.

b) Mapeamento no plano.

**FIGURA 141** – Plotagem dos esforços normais atuantes nas barras de metade da estrutura.

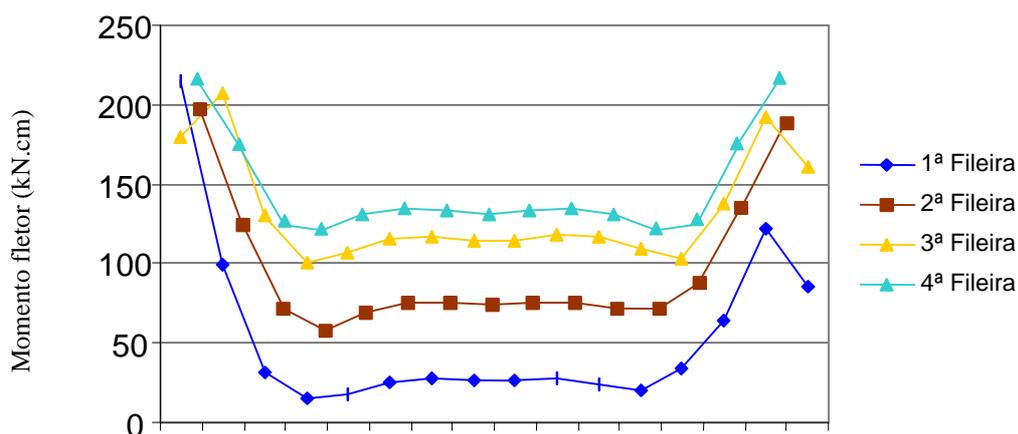
Através destes gráficos percebe-se que os valores dos esforços normais são praticamente constantes para as barras ao longo da malha lamelar, tendo seus valores reduzidos para barras próximas aos apoios de extremidades.

Também foi feito o mapeamento dos momentos fletores que ocorrem com relação ao eixo  $z$  das barras (eixo de maior inércia).



Barras ao longo do comprimento da abóbada.

a) Mapeamento tridimensional.



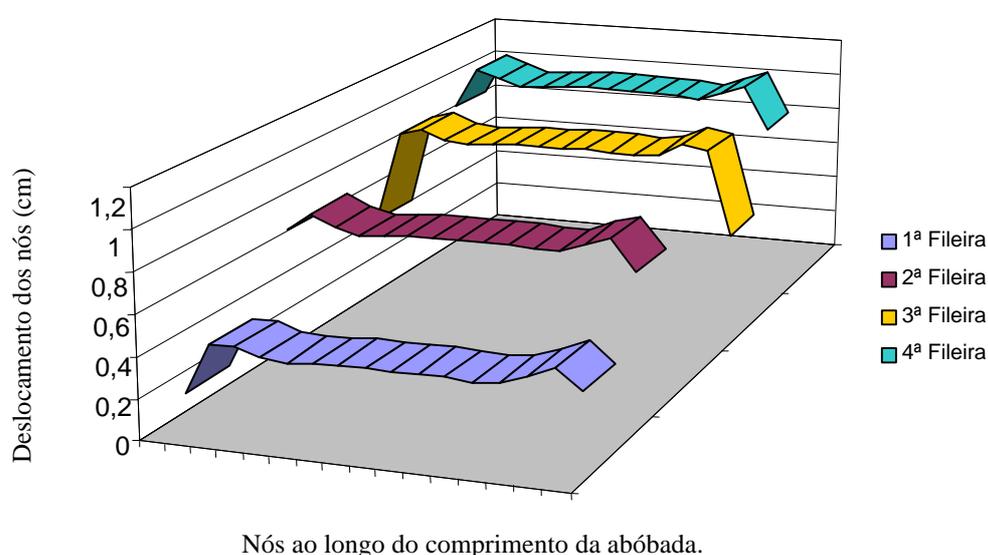
Barras ao longo do comprimento da abóbada.

b) Mapeamento no plano.

**FIGURA 142** – Plotagem dos momentos fletores atuantes nas extremidades das barras, em relação ao eixo  $z$ .

Através da **Figura 142**, percebe-se que os valores dos momentos fletores atuando paralelamente à geratriz, aumentam do meio da estrutura para os apoios de extremidade e, perpendicularmente à geratriz, os valores destes esforços reduzem do meio da estrutura para os apoios laterais.

Foi feito, para o exemplo em questão, o mapeamento dos deslocamentos verticais (flechas) dos nós de metade da malha, **Figura 143**.



**FIGURA 143** – Plotagem tridimensional dos deslocamentos verticais dos nós de metade da malha.

A partir da **Figura 143**, verifica-se que os deslocamentos são praticamente constantes para nós alinhados ao longo do comprimento da estrutura, paralelamente à geratriz da abóbada. Considerando-se alinhamentos perpendiculares à geratriz, tem-se um aumento nos deslocamentos a partir dos apoios laterais até a geratriz da abóbada.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

Da revisão bibliográfica realizada, foram descobertas várias estruturas construídas utilizando o sistema lamelar tridimensional, em formato de abóbada cilíndrica, de cúpula, em quatro águas, ou com variações destes tipos, como a seção transversal da abóbada, em arco gótico, e outros.

Verificou-se que havia uma tendência em se utilizar ligações parafusadas e abóbadas cilíndricas. Isso se justifica pela padronização dos elementos, pela simplicidade de se executarem as ligações e de se montar a estrutura.

A literatura é unânime em afirmar que este tipo estrutural é extremamente fácil e rápido de ser montado. Além disso, é notória sua viabilidade técnica e econômica, pois se trata de um sistema tridimensional eficiente, que propicia a racionalização do uso de materiais. Soma-se a isto, a possibilidade do uso de madeiras de reflorestamento.

Constatou-se que tal sistema estrutural não foi mais construído por empresas brasileiras, a partir da década de 50. Nota-se que, no exterior, o sistema lamelar continua sendo utilizado como pode ser observado pela **Figura 25**, por exemplo.

O que se pode concluir é que, nos dias atuais, com a disponibilidade de eficientes recursos computacionais, consegue-se calcular este sistema estrutural com resultados mais próximos da realidade, o que não era possível há algumas décadas. Isto permite que se evitem problemas da estrutura com relação às deformações, à flambagem das peças e, enfim, consegue-se projetar de maneira mais confiável e segura.

Como apresentado por KARLSEN et al. (1976), a montagem da malha lamelar era feita de uma extremidade a outra, fixando-se um trecho da malha nos apoios laterais da estrutura e em um apoio de extremidade, sendo as demais peças fixadas a estas iniciais e aos apoios, até se atingir a outra extremidade da estrutura. Este procedimento é prático, mas também se poderia pensar em içar trechos pré-montados da estrutura que é uma alternativa rápida e possível para a construção da estrutura.

Com relação à montagem da estrutura apresentada por KARLSEN et al. (1976), questiona-se, no que diz respeito à serragem das peças que são montadas no chão, para serem fixadas nos apoios da estrutura. Seria mais conveniente se definirem os detalhes geométricos das extremidades das lamelas como apresentado no item 6.2.1.7 deste trabalho, em função dos tipos de apoios que serão utilizados no contorno da malha lamelar. Isto é possível e fácil de ser feito.

As recomendações geométricas para as lamelas, de acordo com KARLSEN et al. (1976) suscitam dúvidas no que concerne ao limite apresentado para a altura na posição mediana da lamela ( $h_m$ ), sendo de no máximo quatro e meia vezes maior que a espessura da peça. Ao se utilizar uma tábua de 2,5 cm de espessura, de acordo com esta recomendação, sua altura poderia ser no máximo de 11,3 cm o que parece inadequado.

Os resultados obtidos para o cálculo de um exemplo de abóbada lamelar cilíndrica através do software PORT-TRI foram considerados satisfatórios, ao serem comparados com os resultados obtidos através do software SAP90. As diferenças percentuais máximas para os esforços normais foram de - 3,7 %, para os momentos fletores, de + 5,9 %, e para os deslocamentos verticais dos nós, de - 3,5 %. Tais diferenças são consideradas aceitáveis, e indicam que o programa PORT-TRI é consistente.

Ao se realizar o dimensionamento da malha lamelar do protótipo, o fator limitante foi o índice de esbeltez das peças ( $\lambda = 110$ ). Com relação às verificações de resistência e de estabilidade das peças, constatou-se que se tinha bastante folga,

atingindo-se, nas situações mais críticas de verificação, no máximo 11% dos valores de cálculo referentes a tais verificações.

O volume de madeira necessário para a confecção das lamelas foi de  $0,082 \text{ m}^3$  correspondente a  $0,004 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . Percebe-se a economia que se tem em consumo de material para a construção da malha lamelar.

Através da montagem do protótipo, pode-se verificar vários aspectos do sistema construtivo da abóbada lamelar, sendo que para a confecção das lamelas foram utilizados gabaritos para se controlar a precisão das dimensões das peças.

Comprovou-se na montagem da estrutura que, à medida em que se conectava uma lamela com outra, a curvatura da malha ia sendo naturalmente definida.

A desmontagem da malha, apresentada no **Apêndice I**, através da desconexão das lamelas ao longo da geratriz, comprovou uma vantagem muito importante desta estrutura que é a possibilidade de transportá-la, por trechos pré-montados. Não se teve nenhum problema com a remontagem da estrutura.

Ao se realizar o ensaio do protótipo, previa-se para a terceira etapa, de acordo com o cálculo através do software PORT-TRI, uma flecha máxima em torno de 11 mm para o nó mais deslocado (de número 69). Porém, com o carregamento relativo a esta etapa, tal nó deslocou 26,5 mm, maior em 2,3 % que a flecha admissível para a estrutura, limitada a 0,5 % do vão, de acordo com a NBR 7190:1997, cujo valor é de 25,9 mm. Este deslocamento é devido às deformações ocorridas nas ligações que não são levadas em consideração no cálculo da estrutura. Tais deformações ocorrem devido à acomodação da estrutura, com o carregamento, pois as ligações não são rígidas.

As deformações ocorridas nos tirantes foram menores que as determinadas através do cálculo realizado a partir do PORT-TRI. Foi aplicada uma pré-tensão nos tirantes, e ensaiada novamente a estrutura, obtendo-se valores menores para os deslocamentos dos nós.

Utilizou-se apenas um parafuso de 6 mm de diâmetro, para cada ligação interlamelar, contrariamente às recomendações normativas de nunca se executarem ligações com apenas um pino, e que o mínimo valor de diâmetro permitido para parafusos estruturais é de 10 mm. Isto se deve ao enfoque experimental das ligações realizadas no protótipo.

A partir dos resultados obtidos através do ensaio do protótipo, recomenda-se utilizar dois parafusos por ligação interlamelar. Obviamente, as ligações serão menos deformáveis do que as realizadas com apenas um parafuso. Vale acrescentar que, a partir da revisão bibliográfica realizada, constatou-se que se construíam estruturas lamelares apenas com um parafuso por ligação.

As diretrizes apresentadas no item 6.3 são fundamentais para se elaborar um bom projeto de estruturas lamelares de madeira.

## 8 CONCLUSÕES

---

Dos estudos teórico, numérico e experimental realizados, conclui-se que as estruturas lamelares de madeira são viáveis técnica, construtiva e economicamente. A utilização de espécies de madeira de reflorestamento, como o Pinus e o Eucalipto, é também adequada para o seu sistema construtivo e estrutural.

O pré-processador elaborado para a modelagem de estruturas lamelares, juntamente com o software PORT-TRI, permitem um cálculo fácil, rápido e preciso do sistema estrutural lamelar.

Como recomendações para se elaborar um bom projeto deste tipo estrutural, são apresentadas no item 6.3 as diretrizes para esta finalidade. Os detalhes geométricos, de construção e de montagem de um protótipo, bem como de seu dimensionamento com base na nova norma brasileira para projeto de estruturas de madeira, NBR 7190:1997 são também apresentados no item 6.2.

Com o ensaio do protótipo, pode-se concluir que as deformações ocorridas nas ligações, que não foram levadas em consideração no cálculo das estruturas, merecem uma análise mais aprofundada. Para isto, está sendo proposto um trabalho em nível de doutorado intitulado: “Ligações em Estruturas Lamelares de Madeira”, para a continuidade do estudo deste sistema estrutural, no qual são sugeridos os seguintes tópicos:

- análise do comportamento das ligações interlamelares, mediante carregamento cíclico;

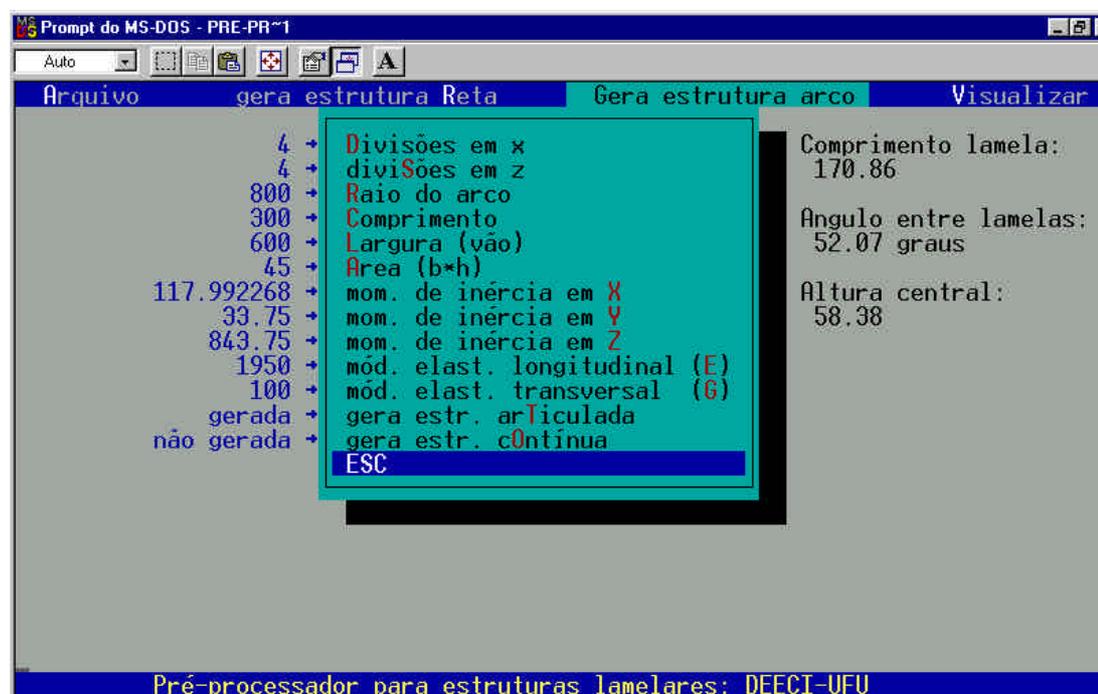
- estudo do comportamento da malha, mediante pré-tensões aplicadas nos tirantes;
- quantificação da segurança oferecida por este sistema estrutural;
- análise da instabilidade global das estruturas lamelares tridimensionais.

# **ANEXO A**

## ANEXO A – RESULTADOS DO CÁLCULO DE UMA ESTRUTURA LAMELAR OBTIDOS A PARTIR DOS SOFTWARES PORT-TRI E SAP90

### A.1 SOFTWARE PORT-TRI

#### A.1.1 Tela do pré-processador de entrada de dados da estrutura



#### A.1.2 Arquivo de dados elástico-geométricos gerado pelo pré-processador

UNIDADES: kN e cm

Divisões em x: 4  
 Divisões em z: 4  
 Raio: 800.00 cm  
 Comprimento: 300.00 cm  
 Vão: 600.00 cm  
 Módulo de elasticidade longitudinal (E): 1.95000000E+03 kN/cm<sup>2</sup>  
 Módulo de elasticidade transversal (G): 1.00000000E+02 kN/cm<sup>2</sup>  
 Comprimento da lamela: 170.86 cm  
 Ângulo de inclinação entre lamelas: 52.07°  
 Altura do ponto central: 58.38 cm

Nó	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Nó	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z
1	-300.00	741.62	0.00	21	0.00	800.00	150.00
2	-152.81	785.27	0.00	22	152.81	785.27	150.00
3	0.00	800.00	0.00	23	300.00	741.62	150.00
4	152.81	785.27	0.00	24	-227.46	766.98	187.50
5	300.00	741.62	0.00	25	-76.76	796.31	187.50
6	-227.46	766.98	37.50	26	76.76	796.31	187.50
7	-76.76	796.31	37.50	27	227.46	766.98	187.50
8	76.76	796.31	37.50	28	-300.00	741.62	225.00
9	227.46	766.98	37.50	29	-152.81	785.27	225.00
10	-300.00	741.62	75.00	30	0.00	800.00	225.00
11	-152.81	785.27	75.00	31	152.81	785.27	225.00
12	0.00	800.00	75.00	32	300.00	741.62	225.00
13	152.81	785.27	75.00	33	-227.46	766.98	262.50
14	300.00	741.62	75.00	34	-76.76	796.31	262.50
15	-227.46	766.98	112.50	35	76.76	796.31	262.50
16	-76.76	796.31	112.50	36	227.46	766.98	262.50
17	76.76	796.31	112.50	37	-300.00	741.62	300.00
18	227.46	766.98	112.50	38	-152.81	785.27	300.00
19	-300.00	741.62	150.00	39	0.00	800.00	300.00
20	-152.81	785.27	150.00	40	152.81	785.27	300.00
				41	300.00	741.62	300.00

Barra	Inic./vinc.	Final/vinc	Área	Ix	Iy	Iz
1	6/0	1/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
2	6/1	10/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
3	15/0	10/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
4	15/1	19/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
5	24/0	19/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
6	24/1	28/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
7	33/0	28/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
8	33/1	37/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
9	2/0	6/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
10	11/1	6/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
11	11/0	15/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
12	20/1	15/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
13	20/0	24/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
14	29/1	24/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
15	29/0	33/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
16	38/1	33/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
17	7/0	2/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
18	7/1	11/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
19	16/0	11/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
20	16/1	20/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
21	25/0	20/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
22	25/1	29/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
23	34/0	29/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
24	34/1	38/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
25	3/0	7/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
26	12/1	7/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
27	12/0	16/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
28	21/1	16/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
29	21/0	25/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
30	30/1	25/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
31	30/0	34/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
32	39/1	34/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
33	8/0	3/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
34	8/1	12/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
35	17/0	12/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
36	17/1	21/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
37	26/0	21/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
38	26/1	30/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
39	35/0	30/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75

40	35/1	39/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
41	4/0	8/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
42	13/1	8/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
43	13/0	17/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
44	22/1	17/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
45	22/0	26/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
46	31/1	26/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
47	31/0	35/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
48	40/1	35/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
49	9/0	4/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
50	9/1	13/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
51	18/0	13/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
52	18/1	22/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
53	27/0	22/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
54	27/1	31/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
55	36/0	31/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
56	36/1	40/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
57	5/1	9/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
58	14/1	9/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
59	14/0	18/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
60	23/1	18/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
61	23/0	27/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
62	32/1	27/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75
63	32/0	36/1	45	1.1799E+02	33.75	843.75
64	41/1	36/0	45	1.1799E+02	33.75	843.75

### A.1.3 Resultados do Cálculo

---

#### ESFORÇOS ATUANTES NAS BARRAS

Esforços na barra 1 ( 6 --> 1) (L = 85.511) :						
613.015	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-613.015	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
Esforços na barra 2 ( 6 --> 10) (L = 85.511) :						
142.037	-23.504	-0.026	6.902	2.207	-2009.867	
-142.037	23.504	0.026	-6.902	0.000	0.000	
Esforços na barra 3 ( 15 --> 10) (L = 85.511) :						
600.753	-0.063	0.010	-4.247	0.000	0.000	
-600.753	0.063	-0.010	4.247	-0.824	-5.377	
Esforços na barra 4 ( 15 --> 19) (L = 85.511) :						
448.635	-7.088	-0.123	2.054	10.489	-606.099	
-448.635	7.088	0.123	-2.054	0.000	0.000	
Esforços na barra 5 ( 24 --> 19) (L = 85.511) :						
447.113	-0.019	0.003	-1.264	0.000	0.000	
-447.113	0.019	-0.003	1.264	-0.245	-1.601	
Esforços na barra 6 ( 24 --> 28) (L = 85.511) :						
616.674	-9.087	-0.191	2.600	16.315	-777.002	
-616.674	9.087	0.191	-2.600	0.000	0.000	
Esforços na barra 7 ( 33 --> 28) (L = 85.511) :						
236.098	-0.024	0.004	-1.600	0.000	0.000	
-236.098	0.024	-0.004	1.600	-0.311	-2.026	
Esforços na barra 8 ( 33 --> 37) (L = 85.511) :						
646.932	-10.517	-0.266	0.000	22.736	-899.332	
-646.932	10.517	0.266	-0.000	-0.000	-0.000	
Esforços na barra 9 ( 2 --> 6) (L = 85.511) :						
119.270	23.467	-0.043	-13.165	0.000	0.000	
-119.270	-23.467	0.043	13.165	3.683	2006.729	

Esforços na barra	10	( 11 --> 6)	(L =	85.511)	:	
605.614	-14.656	0.155	-3.940	-13.221	-1253.281	
-605.614	14.656	-0.155	3.940	0.000	0.000	
Esforços na barra	11	( 11 --> 15)	(L =	85.511)	:	
430.361	7.109	0.109	-5.327	0.000	0.000	
-430.361	-7.109	-0.109	5.327	-9.342	607.924	
Esforços na barra	12	( 20 --> 15)	(L =	85.511)	:	
587.354	-7.579	0.035	-1.882	-2.975	-648.104	
-587.354	7.579	-0.035	1.882	0.000	0.000	
Esforços na barra	13	( 20 --> 24)	(L =	85.511)	:	
597.150	9.089	0.167	-4.935	0.000	0.000	
-597.150	-9.089	-0.167	4.935	-14.246	777.234	
Esforços na barra	14	( 29 --> 24)	(L =	85.511)	:	
434.570	-12.776	-0.049	-0.992	4.153	-1092.527	
-434.570	12.776	0.049	0.992	0.000	0.000	
Esforços na barra	15	( 29 --> 33)	(L =	85.511)	:	
629.373	10.505	0.239	-7.392	0.000	0.000	
-629.373	-10.505	-0.239	7.392	-20.462	898.320	
Esforços na barra	16	( 38 --> 33)	(L =	85.511)	:	
223.070	0.044	0.000	-2.892	-0.008	3.740	
-223.070	-0.044	-0.000	2.892	0.000	0.000	
Esforços na barra	17	( 7 --> 2)	(L =	85.511)	:	
573.865	-0.120	0.021	-8.052	0.000	0.000	
-573.865	0.120	-0.021	8.052	-1.791	-10.261	
Esforços na barra	18	( 7 --> 11)	(L =	85.511)	:	
423.598	-12.476	0.112	2.271	-9.537	-1066.838	
-423.598	12.476	-0.112	-2.271	0.000	0.000	
Esforços na barra	19	( 16 --> 11)	(L =	85.511)	:	
591.131	14.587	-0.126	-0.439	0.000	0.000	
-591.131	-14.587	0.126	0.439	10.787	1247.357	
Esforços na barra	20	( 16 --> 20)	(L =	85.511)	:	
589.169	-9.216	0.012	-0.647	-1.040	-788.038	
-589.169	9.216	-0.012	0.647	0.000	0.000	
Esforços na barra	21	( 25 --> 20)	(L =	85.511)	:	
573.966	7.540	-0.018	0.047	0.000	0.000	
-573.966	-7.540	0.018	-0.047	1.539	644.767	
Esforços na barra	22	( 25 --> 29)	(L =	85.511)	:	
622.746	-7.721	-0.057	-0.806	4.891	-660.223	
-622.746	7.721	0.057	0.806	0.000	0.000	
Esforços na barra	23	( 34 --> 29)	(L =	85.511)	:	
420.542	12.716	0.073	3.432	0.000	0.000	
-420.542	-12.716	-0.073	-3.432	-6.241	1087.370	
Esforços na barra	24	( 34 --> 38)	(L =	85.511)	:	
588.735	-12.780	-0.210	-4.728	17.961	-1092.871	
-588.735	12.780	0.210	4.728	0.000	0.000	
Esforços na barra	25	( 3 --> 7)	(L =	85.511)	:	
416.731	12.572	-0.105	-8.868	0.000	0.000	
-416.731	-12.572	0.105	8.868	8.998	1075.041	
Esforços na barra	26	( 12 --> 7)	(L =	85.511)	:	
569.976	-11.242	0.071	2.398	-6.085	-961.273	
-569.976	11.242	-0.071	-2.398	0.000	0.000	
Esforços na barra	27	( 12 --> 16)	(L =	85.511)	:	
582.265	9.223	-0.012	-4.122	0.000	0.000	
-582.265	-9.223	0.012	4.122	1.053	788.672	
Esforços na barra	28	( 21 --> 16)	(L =	85.511)	:	
587.762	-5.765	0.001	0.377	-0.114	-492.934	
-587.762	5.765	-0.001	-0.377	0.000	0.000	
Esforços na barra	29	( 21 --> 25)	(L =	85.511)	:	
615.909	7.724	0.057	-3.023	0.000	0.000	
-615.909	-7.724	-0.057	3.023	-4.840	660.502	
Esforços na barra	30	( 30 --> 25)	(L =	85.511)	:	
569.807	-11.219	-0.070	0.407	5.953	-959.388	
-569.807	11.219	0.070	-0.407	0.000	0.000	

Esforços na barra 31 ( 30 --> 34) (L = 85.511) :  
 582.107 12.699 0.207 -1.729 0.000 0.000  
 -582.107 -12.699 -0.207 1.729 -17.685 1085.889  
 Esforços na barra 32 ( 39 --> 34) (L = 85.511) :  
 417.059 0.082 0.007 -5.424 -0.618 6.989  
 -417.059 -0.082 -0.007 5.424 0.000 0.000

**DESLOCAMENTOS DE NÓS**

nó	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.012	-0.000	-0.044
2	0.000	0.000	0.000	0.021	0.006	-0.065
3	0.000	0.000	0.000	0.065	0.001	-0.051
6	0.582	-2.904	-0.523	-0.041	-0.011	0.021
7	0.473	-5.791	-0.529	0.037	0.001	0.037
10	0.000	0.000	0.000	-0.036	-0.014	-0.086
11	1.278	-8.361	-0.594	0.019	-0.001	-0.038
12	-0.012	-9.433	-0.445	0.040	-0.005	-0.009
15	1.154	-5.026	-0.169	-0.027	-0.002	-0.041
16	0.738	-10.174	-0.278	0.007	0.006	-0.008
19	0.000	0.000	0.000	-0.029	-0.015	-0.087
20	1.280	-8.546	-0.008	-0.012	-0.008	-0.039
21	-0.000	-10.928	-0.000	0.000	-0.007	0.000
24	1.270	-5.379	0.188	-0.048	-0.011	-0.032
25	0.759	-10.185	0.257	-0.029	0.004	-0.008
28	0.000	0.000	0.000	-0.054	-0.027	-0.096
29	1.149	-7.448	0.471	-0.042	-0.013	-0.026
33	1.253	-5.034	0.456	-0.089	-0.026	-0.003
34	0.517	-6.338	0.492	-0.071	-0.007	-0.026
37	0.000	0.000	0.000	-0.096	-0.040	-0.026
38	0.000	0.000	0.000	-0.082	-0.015	0.027

**REAÇÕES DE APOIO**

nó	Reação 1	Reação 2	Reação 3	Reação 4	Reação 5	Reação 6
1	520.053	181.827	268.831	0.000	0.000	0.000
2	401.791	71.624	306.271	0.000	0.000	0.000
3	-0.147	-23.350	365.991	0.000	0.000	0.000
37	545.934	201.932	-282.509	0.000	0.000	0.000
38	327.317	41.020	-355.472	0.000	0.000	0.000
10	623.923	242.827	204.344	0.000	0.000	0.000
19	757.981	272.476	0.189	0.000	0.000	0.000
28	720.963	261.643	-165.830	0.000	0.000	0.000

## A.2 SOFTWARE SAP90

---

### A.2.1 Arquivo de Entrada de Dados

---

ARQUIVO DE ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL LAMELAR : lamart (articulada)  
 SYSTEM  
 L=1

#### JOINTS

C Obs.: As unidades utilizadas neste exemplo estão em [kN] e em [cm]  
 C Coordenadas dos nós da malha

1	x=300.00	y=741.62	z=.00	21	x=.00	y=800.00	z=150.00
2	x=152.81	y=785.27	z=.00	22	x=-152.81	y=785.27	z=150.00
3	x=.00	y=800.00	z=.00	23	x=-300.00	y=741.62	z=150.00
4	x=-152.81	y=785.27	z=.00	24	x=227.46	y=766.98	z=187.50
5	x=-300.00	y=741.62	z=.00	25	x=76.76	y=796.31	z=187.50
6	x=227.46	y=766.98	z=37.50	26	x=-76.76	y=796.31	z=187.50
7	x=76.76	y=796.31	z=37.50	27	x=-227.46	y=766.98	z=187.50
8	x=-76.76	y=796.31	z=37.50	28	x=300.00	y=741.62	z=225.00
9	x=-227.46	y=766.98	z=37.50	29	x=152.81	y=785.27	z=225.00
10	x=300.00	y=741.62	z=75.00	30	x=.00	y=800.00	z=225.00
11	x=152.81	y=785.27	z=75.00	31	x=-152.81	y=785.27	z=225.00
12	x=.00	y=800.00	z=75.00	32	x=-300.00	y=741.62	z=225.00
13	x=-152.81	y=785.27	z=75.00	33	x=227.46	y=766.98	z=262.50
14	x=-300.00	y=741.62	z=75.00	34	x=76.76	y=796.31	z=262.50
15	x=227.46	y=766.98	z=112.50	35	x=-76.76	y=796.31	z=262.50
16	x=76.76	y=796.31	z=112.50	36	x=-227.46	y=766.98	z=262.50
17	x=-76.76	y=796.31	z=112.50	37	x=300.00	y=741.62	z=300.00
18	x=-227.46	y=766.98	z=112.50	38	x=152.81	y=785.27	z=300.00
19	x=300.00	y=741.62	z=150.00	39	x=.00	y=800.00	z=300.00
20	x=152.81	y=785.27	z=150.00	40	x=-152.81	y=785.27	z=300.00
				41	x=-300.00	y=741.62	z=300.00

#### RESTRAINTS

C Restrições dos nós da malha

1	41	1	R=0,0,0,0,0,0
5	41	9	R=1,1,1,0,0,0
1	37	9	R=1,1,1,0,0,0
2	4	1	R=1,1,1,0,0,0
38	40	1	R=1,1,1,0,0,0

#### FRAME

NM=1

C Características elástico-geométricas das barras

1	SH=R	T=15,3	E=1950.	G=100.
---	------	--------	---------	--------

1,6,1	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
3,15,10	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
5,24,19	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
7,33,28	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
2,6,10	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
4,15,19	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
6,24,28	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
8,33,37	M=1	LR=0,0,0,0,0,0
9,2,6	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
11,11,15	M=1	LR=1,0,0,1,0,0

13,20,24	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	36,17,21	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
15,29,33	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	38,26,30	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
10,11,6	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	40,35,39	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
12,20,15	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	41,4,8	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
14,29,24	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	43,13,17	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
16,38,33	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	45,22,26	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
17,7,2	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	47,31,35	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
19,16,11	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	42,13,8	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
21,25,20	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	44,22,17	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
23,34,29	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	46,31,26	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
18,7,11	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	48,40,35	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
20,16,20	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	49,9,4	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
22,25,29	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	51,18,13	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
24,34,38	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	53,27,22	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
25,3,7	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	55,36,31	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
27,12,16	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	57,5,9	M=1	LR=0,0,0,0,0,0
29,21,25	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	59,14,18	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
31,30,34	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	50,9,13	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
26,12,7	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	52,18,22	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
28,21,16	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	54,27,31	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
30,30,25	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	56,36,40	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
32,39,34	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	58,14,9	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
33,8,3	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	61,23,27	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
35,17,12	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	63,32,36	M=1	LR=1,0,0,1,0,0
37,26,21	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	60,23,18	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
39,35,30	M=1	LR=1,0,0,1,0,0	62,32,27	M=1	LR=0,1,0,0,1,0
34,8,12	M=1	LR=0,1,0,0,1,0	64,41,36	M=1	LR=0,1,0,0,1,0

## LOADS

C Carregamento dos nós da malha

6,33,9	L=1	F=0.,-100.
7,34,9		F=0.,-100.
8,35,9		F=0.,-100.
9,36,9		F=0.,-100.
11,29,9		F=0.,-100.
12,30,9		F=0.,-100.
13,31,9		F=0.,-100.

**A.2.2 Resultados do cálculo****ESFORÇOS ATUANTES NAS BARRAS**

ELT LOAD	AXIAL DIST	1-2 PLANE		1-3 PLANE	
AXIAL					
ID COND	FORCE ENDI	SHEAR	MOMENT	SHEAR	MOMENT
TORQ					
1 -----					
1	-623.09				.00
	.0	.00	.00	.00	.00
	85.5	.00	.00	.00	.00
3 -----					
1	-602.68				3.89
	.0	-.06	.00	.01	.00
	85.5	-.06	-5.08	.01	.906
5 -----					
1	-454.79				1.19
	.0	-.01	.00	.00	.00
	85.5	-.01	-1.52	.00	.22
7 -----					
1	-245.10				1.48
	.0	-.01	.00	.00	.00
	85.5	-.01	-1.92	.00	.28

2	-----					
1	-145.08					-6.36
		.0	-22.64	1936.11	-.03	2.38
		85.5	-22.64	.00	-.03	.00
4	-----					
1	-457.67					-1.93
		.0	-6.76	578.39	-.12	10.25
		85.5	-6.76	.00	-.12	.00
6	-----					
1	-615.02					-2.42
		.0	-8.65	739.29	-.18	8.64
		85.5	-8.65	.00	-.18	.00
8	-----					
1	-649.14					.00
		.0	-10.30	881.70	-.24	20.80
		85.5	-10.30	.00	-.24	.00
9	-----					
1	-123.21					12.28
		.0	22.76	.00	-.05	.00
		85.5	22.76	1946.39	-.05	-3.92
11	-----					
1	-441.54					4.85
		.0	6.78	.00	.11	.00
		85.5	6.78	579.5	.11	9.65
13	-----					
1	-598.58					4.54
		.0	8.65	.00	.16	.00
		85.5	8.65	739.52	.16	13.79
15	-----					
1	-633.49					6.88
		.0	10.23	.00	.25	.00
		85.5	10.23	879.84	.25	21.05
10	-----					
1	-607.68					3.74
		.0	-13.91	1189.07	.17	-14.38
		85.5	-13.91	.00	.17	.00
12	-----					
1	-586.71					1.72
		.0	-7.88	674.4	.04	-3.16
		85.5	-7.88	.00	.04	.00
14	-----					
1	-438.70					1.02
		.0	-12.12	1036.55	-0.05	4.43
		85.5	-12.12	.00	-0.05	.00
16	-----					
1	-228.95					2.69
		.0	.04	-3.57	.00	-0.01
		85.5	.04	.00	.00	.00
17	-----					
1	-576.28					7.51
		.0	-.11	.00	.01	.00
		85.5	-.11	-9.83	.01	1.63
19	-----					
1	-596.73					.42
		.0	13.88	.00	-0.12	.00
		85.5	13.88	1187.00	-0.12	-10.22
21	-----					
1	-576.19					-0.04
		.0	7.19	.00	-0.02	.00
		85.5	7.19	615.2	-0.02	-1.44
23	-----					
1	-428.34					-3.64
		.0	12.07	.00	.08	.00
		85.5	12.07	1032.64	.08	6.57



15	-1.157029	-5.051486	-.161093	.024507	-.003866	-.053211
16	-.729663	-10.074271	-.238664	-.009888	.005147	-.005858
19	.000000	.000000	.000000	.003062	-.001815	-.079600
20	-1.253488	-8.443633	-.002616	.001227	-.000764	-.035007
21	.000000	-10.678197	.000000	.000000	-.000675	.000000
24	-1.251200	-5.336389	.178005	.004189	-.002024	-.043057
25	-.748050	-10.065420	.219569	.026949	.003014	-.010939
28	.000000	.000000	.000000	.006426	-.003139	-.083788
29	-1.184687	-7.609168	.443904	.040104	-.001241	-.024081
33	-1.303756	-5.198298	.448870	.009197	-.003228	-.003451
34	-.536991	-6.503457	.480138	.068335	-.008528	-.027619
37	.000000	.000000	.000000	.080361	-.051846	-.027903
38	.000000	.000000	.000000	.073561	-.016132	.028299

**REAÇÕES DE APOIO**

FORCES "F" AND MOMENTS "M"

JOINT	F(X)	F(Y)	F(Z)	M(X)	M(Y)	M(Z)
1	-528.5988	184.7983	273.2624	.0000	.0000	.0000
2	-388.6983	67.6975	312.1176	.0000	.0000	.0000
3	0.1560	-22.0491	371.5690	.0000	.0000	.0000
10	-633.9820	244.4802	197.9808	.0000	.0000	.0000
19	-772.1944	276.1813	0.2004	.0000	.0000	.0000
28	-727.0477	262.7627	-162.1400	.0000	.0000	.0000
37	-547.4281	202.0191	-284.5926	.0000	.0000	.0000
38	-321.1308	38.5892	-358.0327	.0000	.0000	.0000

# **ANEXO B**

## ANEXO B - RESULTADOS DO CÁLCULO DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE PORT-TRI

### B.1 Carregamento em estados limites últimos

#### Esforços nas Barras

( x 10 <sup>-3</sup> kN )			( x 10 <sup>-4</sup> kN.cm )		
<div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <span style="font-size: 2em;">}</span> <span style="font-size: 2em;">}</span> </div>					
Esforços na barra	1 ( 8 --> 1):				
	82.401	0.000	0.000	0.000	0.000
	-82.401	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra	2 ( 8 --> 14):				
	19.601	-1.840	-0.200	0.000	95.014 -874.979
	-19.601	1.840	0.200	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	3 ( 21 --> 14):				
	80.811	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-80.811	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	4 ( 21 --> 27):				
	58.741	-0.551	-0.060	0.000	28.435 -261.856
	-58.741	0.551	0.060	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	5 ( 34 --> 27):				
	78.224	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-78.224	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	6 ( 34 --> 40):				
	74.564	0.058	0.006	0.000	-3.000 27.625
	-74.564	-0.058	-0.006	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	7 ( 47 --> 40):				
	78.238	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-78.238	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	8 ( 47 --> 53):				
	80.373	0.365	0.040	0.000	-18.834 173.441
	-80.373	-0.365	-0.040	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	9 ( 60 --> 53):				
	80.826	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-80.826	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	10 ( 60 --> 66):				
	83.626	0.563	0.061	0.000	-29.067 267.680
	-83.626	-0.563	-0.061	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	11 ( 73 --> 66):				
	82.411	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-82.411	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	12 ( 73 --> 79):				
	83.701	0.573	0.062	0.000	-29.571 272.320
	-83.701	-0.573	-0.062	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	13 ( 86 --> 79):				
	83.412	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-83.412	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	14 ( 86 --> 92):				
	81.511	0.454	0.049	0.000	-23.440 215.862
	-81.511	-0.454	-0.049	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	15 ( 99 --> 92):				
	80.503	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-80.503	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	16 ( 99 --> 105):				
	78.906	0.169	0.018	0.000	-8.749 80.568
	-78.906	-0.169	-0.018	0.000	0.000 0.000
Esforços na barra	17 ( 112 --> 105):				
	74.729	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000
	-74.729	0.000	0.000	0.000	0.000 0.000

Esforços na barra	18 ( 112 --> 118):					
78.899	-0.248	-0.027	0.000	12.835	-118.198	
-78.899	0.248	0.027	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	19 ( 125 --> 118):					
59.908	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-59.908	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	20 ( 125 --> 131):					
81.511	-0.874	-0.095	0.000	45.133	-415.624	
-81.511	0.874	0.095	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	21 ( 138 --> 131):					
33.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-33.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	22 ( 138 --> 144):					
83.693	-0.904	-0.098	0.000	46.710	-430.147	
-83.693	0.904	0.098	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	23 ( 2 --> 8):					
18.393	1.840	0.197	0.000	0.000	0.000	
-18.393	-1.840	-0.197	0.000	-93.779	875.113	
Esforços na barra	24 ( 15 --> 8):					
81.221	-1.117	0.096	0.000	-45.660	-531.265	
-81.221	1.117	-0.096	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	25 ( 15 --> 21):					
57.553	0.551	0.059	0.000	0.000	0.000	
-57.553	-0.551	-0.059	0.000	-28.065	261.896	
Esforços na barra	26 ( 28 --> 21):					
79.634	-0.435	0.037	0.000	-17.771	-206.765	
-79.634	0.435	-0.037	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	27 ( 28 --> 34):					
73.392	-0.058	-0.006	0.000	0.000	0.000	
-73.392	0.058	0.006	0.000	2.961	-27.629	
Esforços na barra	28 ( 41 --> 34):					
77.049	0.115	-0.010	0.000	4.691	54.580	
-77.049	-0.115	0.010	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	29 ( 41 --> 47):					
79.210	-0.365	-0.039	0.000	0.000	0.000	
-79.210	0.365	0.039	0.000	18.589	-173.468	
Esforços na barra	30 ( 54 --> 47):					
77.065	0.434	-0.037	0.000	17.750	206.520	
-77.065	-0.434	0.037	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	31 ( 54 --> 60):					
82.467	-0.563	-0.060	0.000	0.000	0.000	
-82.467	0.563	0.060	0.000	28.689	-267.721	
Esforços na barra	32 ( 67 --> 60):					
79.653	0.536	-0.046	0.000	21.892	254.720	
-79.653	-0.536	0.046	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	33 ( 67 --> 73):					
82.540	-0.573	-0.061	0.000	0.000	0.000	
-82.540	0.573	0.061	0.000	29.187	-272.361	
Esforços na barra	34 ( 80 --> 73):					
81.238	0.471	-0.040	0.000	19.257	224.058	
-81.238	-0.471	0.040	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	35 ( 80 --> 86):					
80.345	-0.454	-0.049	0.000	0.000	0.000	
-80.345	0.454	0.049	0.000	23.136	-215.895	
Esforços na barra	36 ( 93 --> 86):					
82.238	0.293	-0.025	0.000	11.997	139.592	
-82.238	-0.293	0.025	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	37 ( 93 --> 99):					
77.731	-0.169	-0.018	0.000	0.000	0.000	
-77.731	0.169	0.018	0.000	8.635	-80.580	
Esforços na barra	38 ( 106 --> 99):					
79.328	0.003	0.000	0.000	0.110	1.277	
-79.328	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	39 ( 106 --> 112):					
77.708	0.249	0.027	0.000	0.000	0.000	
-77.708	-0.249	-0.027	0.000	-12.668	118.216	
Esforços na barra	40 ( 119 --> 112):					
73.552	-0.542	0.047	0.000	-22.152	-257.747	
-73.552	0.542	-0.047	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	41 ( 119 --> 125):					
80.301	0.874	0.094	0.000	0.000	0.000	
-80.301	-0.874	-0.094	0.000	-44.546	415.688	

Esforços na barra	42 ( 132 --> 125):					
58.728	-1.177	0.101	0.000	-48.105	-559.715	
-58.728	1.177	-0.101	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	43 ( 132 --> 138):					
82.518	0.904	0.097	0.000	0.000	0.000	
-82.518	-0.904	-0.097	0.000	-46.102	430.212	
Esforços na barra	44 ( 145 --> 138):					
32.084	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-32.084	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	45 ( 9 --> 2):					
81.293	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-81.293	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	46 ( 9 --> 15):					
56.607	-0.880	-0.056	0.000	26.754	-418.602	
-56.607	0.880	0.056	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	47 ( 22 --> 15):					
80.267	1.117	-0.095	0.000	0.000	0.000	
-80.267	-1.117	0.095	0.000	45.187	531.305	
Esforços na barra	48 ( 22 --> 28):					
72.443	-0.846	-0.054	0.000	25.730	-402.584	
-72.443	0.846	0.054	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	49 ( 35 --> 28):					
78.662	0.435	-0.037	0.000	0.000	0.000	
-78.662	-0.435	0.037	0.000	17.586	206.781	
Esforços na barra	50 ( 35 --> 41):					
78.263	-0.217	-0.014	0.000	6.611	-103.436	
-78.263	0.217	0.014	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	51 ( 48 --> 41):					
76.087	-0.115	0.010	0.000	0.000	0.000	
-76.087	0.115	-0.010	0.000	-4.642	-54.584	
Esforços na barra	52 ( 48 --> 54):					
81.520	0.058	0.004	0.000	-1.754	27.440	
-81.520	-0.058	-0.004	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	53 ( 61 --> 54):					
76.105	-0.434	0.037	0.000	0.000	0.000	
-76.105	0.434	-0.037	0.000	-17.566	-206.536	
Esforços na barra	54 ( 61 --> 67):					
81.593	0.116	0.007	0.000	-3.523	55.127	
-81.593	-0.116	-0.007	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	55 ( 74 --> 67):					
78.695	-0.536	0.046	0.000	0.000	0.000	
-78.695	0.536	-0.046	0.000	-21.665	-254.739	
Esforços na barra	56 ( 74 --> 80):					
79.399	0.137	0.009	0.000	-4.157	65.037	
-79.399	-0.137	-0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	57 ( 87 --> 80):					
80.284	-0.471	0.040	0.000	0.000	0.000	
-80.284	0.471	-0.040	0.000	-19.057	-224.075	
Esforços na barra	58 ( 87 --> 93):					
76.786	0.148	0.009	0.000	-4.500	70.410	
-76.786	-0.148	-0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	59 ( 100 --> 93):					
81.292	-0.293	0.025	0.000	0.000	0.000	
-81.292	0.293	-0.025	0.000	-11.873	-139.602	
Esforços na barra	60 ( 100 --> 106):					
76.765	0.133	0.009	0.000	-4.052	63.402	
-76.765	-0.133	-0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	61 ( 113 --> 106):					
78.394	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	
-78.394	0.003	0.000	0.000	-0.109	-1.277	
Esforços na barra	62 ( 113 --> 119):					
79.359	-0.169	-0.011	0.000	5.138	-80.397	
-79.359	0.169	0.011	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	63 ( 126 --> 119):					
72.628	0.542	-0.046	0.000	0.000	0.000	
-72.628	-0.542	0.046	0.000	21.923	257.767	
Esforços na barra	64 ( 126 --> 132):					
81.574	-0.770	-0.049	0.000	23.424	-366.496	
-81.574	0.770	0.049	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	65 ( 139 --> 132):					
57.787	1.177	-0.100	0.000	0.000	0.000	
-57.787	-1.177	0.100	0.000	47.607	559.758	

Esforços na barra	66 ( 139 --> 145):					
81.491	-1.014	-0.065	0.000	30.837	-482.493	
-81.491	1.014	0.065	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	67 ( 3 --> 9):					
55.871	0.880	0.056	0.000	0.000	0.000	
-55.871	-0.880	-0.056	0.000	-26.546	418.616	
Esforços na barra	68 ( 16 --> 9):					
80.578	-0.839	0.036	0.000	-16.900	-399.192	
-80.578	0.839	-0.036	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	69 ( 16 --> 22):					
71.754	0.846	0.054	0.000	0.000	0.000	
-71.754	-0.846	-0.054	0.000	-25.531	402.596	
Esforços na barra	70 ( 29 --> 22):					
79.559	-0.405	0.017	0.000	-8.159	-192.720	
-79.559	0.405	-0.017	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	71 ( 29 --> 35):					
77.564	0.217	0.014	0.000	0.000	0.000	
-77.564	-0.217	-0.014	0.000	-6.560	103.439	
Esforços na barra	72 ( 42 --> 35):					
77.953	-0.044	0.002	0.000	-0.876	-20.703	
-77.953	0.044	-0.002	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	73 ( 42 --> 48):					
80.803	-0.058	-0.004	0.000	0.000	0.000	
-80.803	0.058	0.004	0.000	1.740	-27.441	
Esforços na barra	74 ( 55 --> 48):					
75.375	-0.078	0.003	0.000	-1.561	-36.876	
-75.375	0.078	-0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	75 ( 55 --> 61):					
80.861	-0.116	-0.007	0.000	0.000	0.000	
-80.861	0.116	0.007	0.000	3.496	-55.129	
Esforços na barra	76 ( 68 --> 61):					
75.391	-0.285	0.012	0.000	-5.749	-135.785	
-75.391	0.285	-0.012	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	77 ( 68 --> 74):					
78.661	-0.137	-0.009	0.000	0.000	0.000	
-78.661	0.137	0.009	0.000	4.124	-65.039	
Esforços na barra	78 ( 81 --> 74):					
77.980	-0.365	0.015	0.000	-7.355	-173.738	
-77.980	0.365	-0.015	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	79 ( 81 --> 87):					
76.055	-0.148	-0.009	0.000	0.000	0.000	
-76.055	0.148	0.009	0.000	4.465	-70.413	
Esforços na barra	80 ( 94 --> 87):					
79.570	-0.226	0.010	0.000	-4.555	-107.599	
-79.570	0.226	-0.010	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	81 ( 94 --> 100):					
76.041	-0.133	-0.008	0.000	0.000	0.000	
-76.041	0.133	0.008	0.000	4.021	-63.404	
Esforços na barra	82 ( 107 --> 100):					
80.580	-0.128	0.005	0.000	-2.578	-60.883	
-80.580	0.128	-0.005	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	83 ( 107 --> 113):					
78.636	0.169	0.011	0.000	0.000	0.000	
-78.636	-0.169	-0.011	0.000	-5.099	80.399	
Esforços na barra	84 ( 120 --> 113):					
77.682	-0.426	0.018	0.000	-8.588	-202.844	
-77.682	0.426	-0.018	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	85 ( 120 --> 126):					
80.852	0.771	0.049	0.000	0.000	0.000	
-80.852	-0.771	-0.049	0.000	-23.242	366.507	
Esforços na barra	86 ( 133 --> 126):					
71.915	-0.905	0.038	0.000	-18.218	-430.309	
-71.915	0.905	-0.038	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	87 ( 133 --> 139):					
80.815	1.014	0.064	0.000	0.000	0.000	
-80.815	-1.014	-0.064	0.000	-30.598	482.508	
Esforços na barra	88 ( 146 --> 139):					
57.082	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-57.082	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	89 ( 10 --> 3):					
77.229	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-77.229	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Esforços na barra	90 ( 10 --> 16):					
71.280	-0.594	-0.013	0.000	5.957	-282.632	
-71.280	0.594	0.013	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	91 ( 23 --> 16):					
80.111	0.839	-0.035	0.000	0.000	0.000	
-80.111	-0.839	0.035	0.000	16.813	399.196	
Esforços na barra	92 ( 23 --> 29):					
77.087	-0.598	-0.013	0.000	5.997	-284.541	
-77.087	0.598	0.013	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	93 ( 36 --> 29):					
79.072	0.405	-0.017	0.000	0.000	0.000	
-79.072	-0.405	0.017	0.000	8.117	192.722	
Esforços na barra	94 ( 36 --> 42):					
80.327	-0.233	-0.005	0.000	2.336	-110.832	
-80.327	0.233	0.005	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	95 ( 49 --> 42):					
77.469	0.044	-0.002	0.000	0.000	0.000	
-77.469	-0.044	0.002	0.000	0.872	20.703	
Esforços na barra	96 ( 49 --> 55):					
80.384	-0.231	-0.005	0.000	2.319	-110.008	
-80.384	0.231	0.005	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	97 ( 62 --> 55):					
74.890	0.078	-0.003	0.000	0.000	0.000	
-74.890	-0.078	0.003	0.000	1.553	36.877	
Esforços na barra	98 ( 62 --> 68):					
78.183	-0.557	-0.012	0.000	5.585	-264.992	
-78.183	0.557	0.012	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	99 ( 75 --> 68):					
74.895	0.285	-0.012	0.000	0.000	0.000	
-74.895	-0.285	0.012	0.000	5.719	135.786	
Esforços na barra	100 ( 75 --> 81):					
75.576	-0.727	-0.015	0.000	7.289	-345.858	
-75.576	0.727	0.015	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	101 ( 88 --> 81):					
77.479	0.365	-0.015	0.000	0.000	0.000	
-77.479	-0.365	0.015	0.000	7.317	173.739	
Esforços na barra	102 ( 88 --> 94):					
75.563	-0.514	-0.011	0.000	5.156	-244.632	
-75.563	0.514	0.011	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	103 ( 101 --> 94):					
79.075	0.226	-0.010	0.000	0.000	0.000	
-79.075	-0.226	0.010	0.000	4.532	107.600	
Esforços na barra	104 ( 101 --> 107):					
78.160	-0.199	-0.004	0.000	1.990	-94.429	
-78.160	0.199	0.004	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	105 ( 114 --> 107):					
80.104	0.128	-0.005	0.000	0.000	0.000	
-80.104	-0.128	0.005	0.000	2.564	60.883	
Esforços na barra	106 ( 114 --> 120):					
80.379	-0.159	-0.003	0.000	1.597	-75.768	
-80.379	0.159	0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	107 ( 127 --> 120):					
77.225	0.426	-0.018	0.000	0.000	0.000	
-77.225	-0.426	0.018	0.000	8.543	202.846	
Esforços na barra	108 ( 127 --> 133):					
80.342	-0.577	-0.012	0.000	5.787	-274.575	
-80.342	0.577	0.012	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	109 ( 140 --> 133):					
71.453	0.905	-0.038	0.000	0.000	0.000	
-71.453	-0.905	0.038	0.000	18.124	430.313	
Esforços na barra	110 ( 140 --> 146):					
77.075	-0.680	-0.014	0.000	6.816	-323.389	
-77.075	0.680	0.014	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	111 ( 4 --> 10):					
71.020	0.594	0.012	0.000	0.000	0.000	
-71.020	-0.594	-0.012	0.000	-5.942	282.633	
Esforços na barra	112 ( 17 --> 10):					
76.988	-0.732	0.000	0.000	0.000	-347.995	
-76.988	0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	113 ( 17 --> 23):					
76.864	0.598	0.013	0.000	0.000	0.000	
-76.864	-0.598	-0.013	0.000	-5.982	284.541	

Esforços na barra 114 ( 30 --> 23):						
79.875	-0.342	0.000	0.000	0.000	0.000	-162.837
-79.875	0.342	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 115 ( 30 --> 36):						
80.096	0.233	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
-80.096	-0.233	-0.005	0.000	-2.330	110.832	
Esforços na barra 116 ( 43 --> 36):						
78.835	-0.158	0.000	0.000	0.000	0.000	-75.032
-78.835	0.158	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 117 ( 43 --> 49):						
80.135	0.231	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
-80.135	-0.231	-0.005	0.000	-2.313	110.008	
Esforços na barra 118 ( 56 --> 49):						
77.230	-0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	-207.930
-77.230	0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 119 ( 56 --> 62):						
77.923	0.557	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000
-77.923	-0.557	-0.012	0.000	-5.571	264.992	
Esforços na barra 120 ( 69 --> 62):						
74.648	-0.812	0.000	0.000	0.000	0.000	-386.117
-74.648	0.812	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 121 ( 69 --> 75):						
75.322	0.727	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000
-75.322	-0.727	-0.015	0.000	-7.271	345.858	
Esforços na barra 122 ( 82 --> 75):						
74.655	-0.812	0.000	0.000	0.000	0.000	-386.117
-74.655	0.812	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 123 ( 82 --> 88):						
75.323	0.514	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000
-75.323	-0.514	-0.011	0.000	-5.143	244.632	
Esforços na barra 124 ( 95 --> 88):						
77.240	-0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	-207.930
-77.240	0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 125 ( 95 --> 101):						
77.924	0.199	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
-77.924	-0.199	-0.004	0.000	-1.985	94.429	
Esforços na barra 126 ( 108 --> 101):						
78.838	-0.158	0.000	0.000	0.000	0.000	-75.032
-78.838	0.158	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 127 ( 108 --> 114):						
80.135	0.159	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
-80.135	-0.159	-0.003	0.000	-1.593	75.768	
Esforços na barra 128 ( 121 --> 114):						
79.865	-0.342	0.000	0.000	0.000	0.000	-162.837
-79.865	0.342	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 129 ( 121 --> 127):						
80.095	0.577	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000
-80.095	-0.577	-0.012	0.000	-5.772	274.575	
Esforços na barra 130 ( 134 --> 127):						
76.985	-0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	-347.995
-76.985	0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 131 ( 134 --> 140):						
76.864	0.680	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000
-76.864	-0.680	-0.014	0.000	-6.798	323.389	
Esforços na barra 132 ( 147 --> 140):						
71.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-71.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

### Deslocamentos dos Nós:

nó	( x 10 <sup>-1</sup> cm)			Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3			
1	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.002	-0.003
2	0.000	0.000	0.000	-0.007	-0.001	-0.003
3	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
4	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001

8	0.023	-0.097	-0.011	-0.008	-0.002	0.003
9	0.027	-0.174	-0.012	-0.003	0.000	0.001
10	0.010	-0.182	-0.014	-0.001	0.000	0.001
14	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.002	-0.003
15	0.052	-0.258	-0.012	0.003	0.001	0.001
16	0.032	-0.305	-0.009	0.001	0.000	0.000
17	0.000	-0.308	-0.009	0.000	0.000	0.000
21	0.038	-0.157	-0.004	-0.002	-0.001	0.001
22	0.046	-0.308	-0.003	-0.002	0.000	0.001
23	0.018	-0.355	0.006	0.000	0.000	0.000
27	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
28	0.042	-0.226	0.001	0.001	0.000	0.000
29	0.032	-0.343	0.014	0.001	0.000	0.000
30	-0.001	-0.367	0.025	0.000	0.000	0.000
34	0.023	-0.110	-0.001	0.000	0.000	0.000
35	0.030	-0.252	0.013	0.000	0.000	0.000
36	0.013	-0.338	0.032	0.000	0.000	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
41	0.016	-0.140	0.005	0.000	0.000	0.000
42	0.018	-0.287	0.027	0.000	0.000	0.000
43	-0.001	-0.342	0.038	0.001	0.000	0.000
47	0.004	-0.051	0.000	0.001	0.000	-0.001
48	0.010	-0.182	0.014	0.000	0.000	0.000
49	0.007	-0.317	0.032	0.000	0.000	0.000
53	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
54	-0.001	-0.083	0.005	-0.001	0.000	-0.001
55	0.009	-0.269	0.018	0.000	0.000	0.000
56	-0.001	-0.359	0.026	0.000	0.000	0.000
60	-0.009	-0.013	0.000	0.002	0.001	-0.001
61	0.001	-0.160	0.008	0.000	0.000	0.000
62	0.006	-0.348	0.015	-0.001	0.000	0.000
66	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
67	-0.008	-0.063	0.002	-0.002	0.000	-0.001
68	0.008	-0.282	0.006	0.001	0.000	0.000
69	0.000	-0.402	0.007	0.000	0.000	0.000
73	-0.012	-0.002	0.000	0.002	0.001	-0.001
74	0.001	-0.167	0.000	0.000	0.000	0.000
75	0.007	-0.377	0.000	-0.001	0.000	0.000
79	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
80	-0.007	-0.066	-0.001	-0.001	0.000	-0.001
81	0.008	-0.281	-0.006	0.001	0.000	0.000
82	0.000	-0.402	-0.007	0.000	0.000	0.000
86	-0.010	-0.009	0.000	0.002	0.001	-0.001
87	0.005	-0.178	-0.006	0.000	0.000	0.000
88	0.007	-0.358	-0.014	-0.001	0.000	0.000
92	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
93	0.000	-0.090	-0.003	-0.001	0.000	-0.001
94	0.009	-0.265	-0.016	0.001	0.000	0.000
95	0.001	-0.359	-0.026	0.000	0.000	0.000
99	-0.001	-0.036	0.000	0.001	0.000	0.000
100	0.013	-0.201	-0.012	0.000	0.000	0.000
101	0.009	-0.329	-0.031	-0.001	0.000	0.000
105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
106	0.018	-0.150	-0.004	0.000	0.000	0.000
107	0.018	-0.280	-0.026	0.000	0.000	0.000
108	0.001	-0.342	-0.038	-0.001	0.000	0.000
112	0.016	-0.088	0.001	-0.001	0.000	0.000
113	0.033	-0.265	-0.014	0.000	0.000	0.000
114	0.015	-0.346	-0.033	-0.001	0.000	0.000
118	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.001
119	0.043	-0.233	-0.003	0.001	0.000	0.000
120	0.032	-0.334	-0.017	0.000	0.000	0.000
121	0.001	-0.367	-0.025	0.000	0.000	0.000
125	0.040	-0.161	0.004	-0.003	-0.001	0.001
126	0.050	-0.325	-0.001	-0.002	0.000	0.001
127	0.020	-0.362	-0.007	0.000	0.000	0.000
131	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.001	-0.002
132	0.049	-0.240	0.008	0.004	0.001	0.002
133	0.032	-0.301	0.007	0.002	0.000	0.001
134	0.000	-0.308	0.009	0.000	0.000	0.000
138	0.043	-0.166	0.009	-0.003	-0.001	0.001
139	0.031	-0.200	0.011	-0.002	0.000	0.000
140	0.010	-0.187	0.013	0.000	0.000	0.000
144	0.000	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.003



Esforços na barra	8 ( 47 --> 53):					
57.266	0.260	0.028	0.000	-13.419	123.577	
-57.266	-0.260	-0.028	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	9 ( 60 --> 53):					
57.589	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-57.589	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	10 ( 60 --> 66):					
59.584	0.401	0.044	0.000	-20.711	190.722	
-59.584	-0.401	-0.044	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	11 ( 73 --> 66):					
58.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-58.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	12 ( 73 --> 79):					
59.637	0.408	0.044	0.000	-21.070	194.028	
-59.637	-0.408	-0.044	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	13 ( 86 --> 79):					
59.431	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-59.431	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	14 ( 86 --> 92):					
58.077	0.323	0.035	0.000	-16.701	153.802	
-58.077	-0.323	-0.035	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	15 ( 99 --> 92):					
57.358	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-57.358	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	16 ( 99 --> 105):					
56.221	0.121	0.013	0.000	-6.234	57.405	
-56.221	-0.121	-0.013	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	17 ( 112 --> 105):					
53.245	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-53.245	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	18 ( 112 --> 118):					
56.216	-0.177	-0.019	0.000	9.145	-84.216	
-56.216	0.177	0.019	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	19 ( 125 --> 118):					
42.685	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-42.685	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	20 ( 125 --> 131):					
58.077	-0.623	-0.068	0.000	32.157	-296.132	
-58.077	0.623	0.068	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	21 ( 138 --> 131):					
23.697	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-23.697	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	22 ( 138 --> 144):					
59.631	-0.644	-0.070	0.000	33.281	-306.480	
-59.631	0.644	0.070	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	23 ( 2 --> 8):					
13.105	1.311	0.140	0.000	0.000	0.000	
-13.105	-1.311	-0.140	0.000	-66.817	623.518	
Esforços na barra	24 ( 15 --> 8):					
57.870	-0.796	0.068	0.000	-32.533	-378.526	
-57.870	0.796	-0.068	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	25 ( 15 --> 21):					
41.006	0.392	0.042	0.000	0.000	0.000	
-41.006	-0.392	-0.042	0.000	-19.996	186.601	
Esforços na barra	26 ( 28 --> 21):					
56.739	-0.310	0.027	0.000	-12.662	-147.320	
-56.739	0.310	-0.027	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	27 ( 28 --> 34):					
52.292	-0.041	-0.004	0.000	0.000	0.000	
-52.292	0.041	0.004	0.000	2.110	-19.686	
Esforços na barra	28 ( 41 --> 34):					
54.897	0.082	-0.007	0.000	3.342	38.888	
-54.897	-0.082	0.007	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	29 ( 41 --> 47):					
56.437	-0.260	-0.028	0.000	0.000	0.000	
-56.437	0.260	0.028	0.000	13.245	-123.596	
Esforços na barra	30 ( 54 --> 47):					
54.909	0.309	-0.027	0.000	12.647	147.146	
-54.909	-0.309	0.027	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	31 ( 54 --> 60):					
58.758	-0.401	-0.043	0.000	0.000	0.000	
-58.758	0.401	0.043	0.000	20.441	-190.751	

Esforços na barra	32 ( 67 --> 60):					
56.753	0.382	-0.033	0.000	15.598	181.488	
-56.753	-0.382	0.033	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	33 ( 67 --> 73):					
58.810	-0.408	-0.044	0.000	0.000	0.000	
-58.810	0.408	0.044	0.000	20.796	-194.058	
Esforços na barra	34 ( 80 --> 73):					
57.882	0.336	-0.029	0.000	13.721	159.642	
-57.882	-0.336	0.029	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	35 ( 80 --> 86):					
57.246	-0.323	-0.035	0.000	0.000	0.000	
-57.246	0.323	0.035	0.000	16.484	-153.825	
Esforços na barra	36 ( 93 --> 86):					
58.594	0.209	-0.018	0.000	8.548	99.459	
-58.594	-0.209	0.018	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	37 ( 93 --> 99):					
55.383	-0.121	-0.013	0.000	0.000	0.000	
-55.383	0.121	0.013	0.000	6.153	-57.413	
Esforços na barra	38 ( 106 --> 99):					
56.521	0.002	0.000	0.000	0.078	0.910	
-56.521	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	39 ( 106 --> 112):					
55.367	0.177	0.019	0.000	0.000	0.000	
-55.367	-0.177	-0.019	0.000	-9.026	84.229	
Esforços na barra	40 ( 119 --> 112):					
52.405	-0.386	0.033	0.000	-15.784	-183.645	
-52.405	0.386	-0.033	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	41 ( 119 --> 125):					
57.214	0.623	0.067	0.000	0.000	0.000	
-57.214	-0.623	-0.067	0.000	-31.739	296.177	
Esforços na barra	42 ( 132 --> 125):					
41.844	-0.838	0.072	0.000	-34.275	-398.797	
-41.844	0.838	-0.072	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	43 ( 132 --> 138):					
58.794	0.644	0.069	0.000	0.000	0.000	
-58.794	-0.644	-0.069	0.000	-32.848	306.526	
Esforços na barra	44 ( 145 --> 138):					
22.860	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-22.860	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	45 ( 9 --> 2):					
57.921	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-57.921	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	46 ( 9 --> 15):					
40.332	-0.627	-0.040	0.000	19.062	-298.254	
-40.332	0.627	0.040	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	47 ( 22 --> 15):					
57.190	0.796	-0.068	0.000	0.000	0.000	
-57.190	-0.796	0.068	0.000	32.196	378.555	
Esforços na barra	48 ( 22 --> 28):					
51.616	-0.603	-0.039	0.000	18.333	-286.841	
-51.616	0.603	0.039	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	49 ( 35 --> 28):					
56.047	0.310	-0.026	0.000	0.000	0.000	
-56.047	-0.310	0.026	0.000	12.530	147.331	
Esforços na barra	50 ( 35 --> 41):					
55.763	-0.155	-0.010	0.000	4.710	-73.698	
-55.763	0.155	0.010	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	51 ( 48 --> 41):					
54.212	-0.082	0.007	0.000	0.000	0.000	
-54.212	0.082	-0.007	0.000	-3.308	-38.891	
Esforços na barra	52 ( 48 --> 54):					
58.083	0.041	0.003	0.000	-1.250	19.551	
-58.083	-0.041	-0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	53 ( 61 --> 54):					
54.225	-0.309	0.026	0.000	0.000	0.000	
-54.225	0.309	-0.026	0.000	-12.516	-147.157	
Esforços na barra	54 ( 61 --> 67):					
58.135	0.083	0.005	0.000	-2.510	39.278	
-58.135	-0.083	-0.005	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	55 ( 74 --> 67):					
56.070	-0.382	0.032	0.000	0.000	0.000	
-56.070	0.382	-0.032	0.000	-15.436	-181.501	

Esforços na barra	56 ( 74 --> 80):					
56.572	0.097	0.006	0.000	-2.962	46.339	
-56.572	-0.097	-0.006	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	57 ( 87 --> 80):					
57.202	-0.336	0.029	0.000	0.000	0.000	
-57.202	0.336	-0.029	0.000	-13.578	-159.654	
Esforços na barra	58 ( 87 --> 93):					
54.710	0.105	0.007	0.000	-3.206	50.167	
-54.710	-0.105	-0.007	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	59 ( 100 --> 93):					
57.921	-0.209	0.018	0.000	0.000	0.000	
-57.921	0.209	-0.018	0.000	-8.460	-99.467	
Esforços na barra	60 ( 100 --> 106):					
54.695	0.095	0.006	0.000	-2.887	45.174	
-54.695	-0.095	-0.006	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	61 ( 113 --> 106):					
55.856	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	
-55.856	0.002	0.000	0.000	-0.077	-0.910	
Esforços na barra	62 ( 113 --> 119):					
56.544	-0.120	-0.008	0.000	3.661	-57.283	
-56.544	0.120	0.008	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	63 ( 126 --> 119):					
51.747	0.386	-0.033	0.000	0.000	0.000	
-51.747	-0.386	0.033	0.000	15.620	183.659	
Esforços na barra	64 ( 126 --> 132):					
58.121	-0.549	-0.035	0.000	16.689	-261.128	
-58.121	0.549	0.035	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	65 ( 139 --> 132):					
41.173	0.838	-0.071	0.000	0.000	0.000	
-41.173	-0.838	0.071	0.000	33.920	398.828	
Esforços na barra	66 ( 139 --> 145):					
58.062	-0.723	-0.046	0.000	21.972	-343.776	
-58.062	0.723	0.046	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	67 ( 3 --> 9):					
39.808	0.627	0.040	0.000	0.000	0.000	
-39.808	-0.627	-0.040	0.000	-18.914	298.264	
Esforços na barra	68 ( 16 --> 9):					
57.412	-0.598	0.025	0.000	-12.041	-284.424	
-57.412	0.598	-0.025	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	69 ( 16 --> 22):					
51.124	0.603	0.038	0.000	0.000	0.000	
-51.124	-0.603	-0.038	0.000	-18.191	286.850	
Esforços na barra	70 ( 29 --> 22):					
56.686	-0.289	0.012	0.000	-5.813	-137.313	
-56.686	0.289	-0.012	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	71 ( 29 --> 35):					
55.264	0.155	0.010	0.000	0.000	0.000	
-55.264	-0.155	-0.010	0.000	-4.674	73.700	
Esforços na barra	72 ( 42 --> 35):					
55.542	-0.031	0.001	0.000	-0.624	-14.751	
-55.542	0.031	-0.001	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	73 ( 42 --> 48):					
57.572	-0.041	-0.003	0.000	0.000	0.000	
-57.572	0.041	0.003	0.000	1.240	-19.552	
Esforços na barra	74 ( 55 --> 48):					
53.705	-0.055	0.002	0.000	-1.112	-26.274	
-53.705	0.055	-0.002	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	75 ( 55 --> 61):					
57.613	-0.083	-0.005	0.000	0.000	0.000	
-57.613	0.083	0.005	0.000	2.491	-39.279	
Esforços na barra	76 ( 68 --> 61):					
53.716	-0.203	0.009	0.000	-4.096	-96.747	
-53.716	0.203	-0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	77 ( 68 --> 74):					
56.046	-0.097	-0.006	0.000	0.000	0.000	
-56.046	0.097	0.006	0.000	2.939	-46.341	
Esforços na barra	78 ( 81 --> 74):					
55.561	-0.260	0.011	0.000	-5.241	-123.788	
-55.561	0.260	-0.011	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	79 ( 81 --> 87):					
54.189	-0.105	-0.007	0.000	0.000	0.000	
-54.189	0.105	0.007	0.000	3.181	-50.169	

Esforços na barra	80 ( 94 --> 87):					
56.693	-0.161	0.007	0.000	-3.246	-76.664	
-56.693	0.161	-0.007	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	81 ( 94 --> 100):					
54.179	-0.095	-0.006	0.000	0.000	0.000	
-54.179	0.095	0.006	0.000	2.865	-45.175	
Esforços na barra	82 ( 107 --> 100):					
57.413	-0.091	0.004	0.000	-1.837	-43.379	
-57.413	0.091	-0.004	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	83 ( 107 --> 113):					
56.028	0.120	0.008	0.000	0.000	0.000	
-56.028	-0.120	-0.008	0.000	-3.633	57.285	
Esforços na barra	84 ( 120 --> 113):					
55.348	-0.304	0.013	0.000	-6.119	-144.526	
-55.348	0.304	-0.013	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	85 ( 120 --> 126):					
57.607	0.549	0.035	0.000	0.000	0.000	
-57.607	-0.549	-0.035	0.000	-16.560	261.137	
Esforços na barra	86 ( 133 --> 126):					
51.240	-0.645	0.027	0.000	-12.980	-306.595	
-51.240	0.645	-0.027	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	87 ( 133 --> 139):					
57.581	0.723	0.046	0.000	0.000	0.000	
-57.581	-0.723	-0.046	0.000	-21.801	343.787	
Esforços na barra	88 ( 146 --> 139):					
40.671	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-40.671	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	89 ( 10 --> 3):					
55.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
-55.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	90 ( 10 --> 16):					
50.787	-0.423	-0.009	0.000	4.244	-201.376	
-50.787	0.423	0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	91 ( 23 --> 16):					
57.079	0.598	-0.025	0.000	0.000	0.000	
-57.079	-0.598	0.025	0.000	11.979	284.427	
Esforços na barra	92 ( 23 --> 29):					
54.925	-0.426	-0.009	0.000	4.273	-202.735	
-54.925	0.426	0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	93 ( 36 --> 29):					
56.339	0.289	-0.012	0.000	0.000	0.000	
-56.339	-0.289	0.012	0.000	5.783	137.314	
Esforços na barra	94 ( 36 --> 42):					
57.233	-0.166	-0.003	0.000	1.664	-78.968	
-57.233	0.166	0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	95 ( 49 --> 42):					
55.197	0.031	-0.001	0.000	0.000	0.000	
-55.197	-0.031	0.001	0.000	0.621	14.751	
Esforços na barra	96 ( 49 --> 55):					
57.274	-0.165	-0.003	0.000	1.652	-78.381	
-57.274	0.165	0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	97 ( 62 --> 55):					
53.359	0.055	-0.002	0.000	0.000	0.000	
-53.359	-0.055	0.002	0.000	1.107	26.275	
Esforços na barra	98 ( 62 --> 68):					
55.705	-0.397	-0.008	0.000	3.979	-188.807	
-55.705	0.397	0.008	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	99 ( 75 --> 68):					
53.363	0.203	-0.009	0.000	0.000	0.000	
-53.363	-0.203	0.009	0.000	4.075	96.748	
Esforços na barra	100 ( 75 --> 81):					
53.848	-0.518	-0.011	0.000	5.194	-246.424	
-53.848	0.518	0.011	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	101 ( 88 --> 81):					
55.204	0.260	-0.011	0.000	0.000	0.000	
-55.204	-0.260	0.011	0.000	5.214	123.789	
Esforços na barra	102 ( 88 --> 94):					
53.839	-0.366	-0.008	0.000	3.674	-174.300	
-53.839	0.366	0.008	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	103 ( 101 --> 94):					
56.341	0.161	-0.007	0.000	0.000	0.000	
-56.341	-0.161	0.007	0.000	3.229	76.665	

Esforços na barra 104 ( 101 --> 107):						
55.689	-0.141	-0.003	0.000	1.418	-67.280	
-55.689	0.141	0.003	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 105 ( 114 --> 107):						
57.074	0.091	-0.004	0.000	0.000	0.000	
-57.074	-0.091	0.004	0.000	1.827	43.379	
Esforços na barra 106 ( 114 --> 120):						
57.270	-0.113	-0.002	0.000	1.138	-53.984	
-57.270	0.113	0.002	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 107 ( 127 --> 120):						
55.023	0.304	-0.013	0.000	0.000	0.000	
-55.023	-0.304	0.013	0.000	6.087	144.527	
Esforços na barra 108 ( 127 --> 133):						
57.243	-0.411	-0.009	0.000	4.123	-195.635	
-57.243	0.411	0.009	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 109 ( 140 --> 133):						
50.911	0.645	-0.027	0.000	0.000	0.000	
-50.911	-0.645	0.027	0.000	12.913	306.598	
Esforços na barra 110 ( 140 --> 146):						
54.916	-0.484	-0.010	0.000	4.856	-230.415	
-54.916	0.484	0.010	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 111 ( 4 --> 10):						
50.602	0.423	0.009	0.000	0.000	0.000	
-50.602	-0.423	-0.009	0.000	-4.233	201.376	
Esforços na barra 112 ( 17 --> 10):						
54.854	-0.521	0.000	0.000	0.000	-247.946	
-54.854	0.521	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 113 ( 17 --> 23):						
54.766	0.426	0.009	0.000	0.000	0.000	
-54.766	-0.426	-0.009	0.000	-4.262	202.736	
Esforços na barra 114 ( 30 --> 23):						
56.911	-0.244	0.000	0.000	0.000	-116.021	
-56.911	0.244	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 115 ( 30 --> 36):						
57.069	0.166	0.003	0.000	0.000	0.000	
-57.069	-0.166	-0.003	0.000	-1.660	78.968	
Esforços na barra 116 ( 43 --> 36):						
56.170	-0.112	0.000	0.000	0.000	-53.460	
-56.170	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 117 ( 43 --> 49):						
57.096	0.165	0.003	0.000	0.000	0.000	
-57.096	-0.165	-0.003	0.000	-1.648	78.381	
Esforços na barra 118 ( 56 --> 49):						
55.026	-0.311	0.000	0.000	0.000	-148.150	
-55.026	0.311	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 119 ( 56 --> 62):						
55.520	0.397	0.008	0.000	0.000	0.000	
-55.520	-0.397	-0.008	0.000	-3.969	188.807	
Esforços na barra 120 ( 69 --> 62):						
53.187	-0.578	0.000	0.000	0.000	-275.109	
-53.187	0.578	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 121 ( 69 --> 75):						
53.667	0.518	0.011	0.000	0.000	0.000	
-53.667	-0.518	-0.011	0.000	-5.180	246.424	
Esforços na barra 122 ( 82 --> 75):						
53.192	-0.578	0.000	0.000	0.000	-275.109	
-53.192	0.578	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 123 ( 82 --> 88):						
53.668	0.366	0.008	0.000	0.000	0.000	
-53.668	-0.366	-0.008	0.000	-3.664	174.300	
Esforços na barra 124 ( 95 --> 88):						
55.034	-0.311	0.000	0.000	0.000	-148.150	
-55.034	0.311	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 125 ( 95 --> 101):						
55.521	0.141	0.003	0.000	0.000	0.000	
-55.521	-0.141	-0.003	0.000	-1.414	67.280	
Esforços na barra 126 ( 108 --> 101):						
56.172	-0.112	0.000	0.000	0.000	-53.460	
-56.172	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra 127 ( 108 --> 114):						
57.096	0.113	0.002	0.000	0.000	0.000	
-57.096	-0.113	-0.002	0.000	-1.135	53.984	

Esforços na barra 128 ( 121 --> 114):						
56.904	-0.244	0.000	0.000	0.000	0.000	-116.021
-56.904	0.244	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 129 ( 121 --> 127):						
57.067	0.411	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
-57.067	-0.411	-0.009	0.000	0.000	-4.113	195.635
Esforços na barra 130 ( 134 --> 127):						
54.852	-0.521	0.000	0.000	0.000	0.000	-247.946
-54.852	0.521	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Esforços na barra 131 ( 134 --> 140):						
54.765	0.484	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
-54.765	-0.484	-0.010	0.000	0.000	-4.844	230.415
Esforços na barra 132 ( 147 --> 140):						
50.744	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-50.744	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

### Deslocamentos dos Nós:

---

( x 10<sup>-1</sup> cm)

nó	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.001	-0.002
2	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.001	-0.002
3	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
8	0.016	-0.069	-0.008	-0.006	-0.002	0.002
9	0.019	-0.124	-0.009	-0.002	0.000	0.001
10	0.007	-0.130	-0.010	-0.001	0.000	0.001
14	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.001	-0.002
15	0.037	-0.184	-0.009	0.002	0.000	0.001
16	0.023	-0.217	-0.006	0.001	0.000	0.000
17	0.000	-0.219	-0.006	0.000	0.000	0.000
21	0.027	-0.112	-0.003	-0.001	0.000	0.000
22	0.032	-0.219	-0.002	-0.001	0.000	0.001
23	0.013	-0.253	0.004	0.000	0.000	0.000
27	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
28	0.030	-0.161	0.001	0.001	0.000	0.000
29	0.023	-0.244	0.010	0.000	0.000	0.000
30	-0.001	-0.262	0.018	0.000	0.000	0.000
34	0.016	-0.078	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.022	-0.179	0.009	0.000	0.000	0.000
36	0.009	-0.241	0.023	0.000	0.000	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
41	0.012	-0.100	0.003	0.000	0.000	0.000
42	0.013	-0.204	0.019	0.000	0.000	0.000
43	-0.001	-0.243	0.027	0.000	0.000	0.000
47	0.003	-0.036	0.000	0.001	0.000	0.000
48	0.007	-0.130	0.010	0.000	0.000	0.000
49	0.005	-0.226	0.023	0.000	0.000	0.000
53	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
54	-0.001	-0.059	0.003	-0.001	0.000	0.000
55	0.006	-0.192	0.013	0.000	0.000	0.000
56	0.000	-0.256	0.019	0.000	0.000	0.000
60	-0.006	-0.009	0.000	0.001	0.000	-0.001
61	0.001	-0.114	0.006	0.000	0.000	0.000
62	0.004	-0.248	0.011	0.000	0.000	0.000
66	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
67	-0.006	-0.045	0.001	-0.001	0.000	-0.001
68	0.006	-0.201	0.004	0.000	0.000	0.000
69	0.000	-0.286	0.005	0.000	0.000	0.000
73	-0.009	-0.001	0.000	0.002	0.000	-0.001
74	0.001	-0.119	0.000	0.000	0.000	0.000
75	0.005	-0.268	0.000	0.000	0.000	0.000
79	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
80	-0.005	-0.047	-0.001	-0.001	0.000	-0.001
81	0.006	-0.200	-0.004	0.000	0.000	0.000
82	0.000	-0.286	-0.005	0.000	0.000	0.000

86	-0.007	-0.007	0.000	0.001	0.000	-0.001
87	0.003	-0.127	-0.004	0.000	0.000	0.000
88	0.005	-0.255	-0.010	0.000	0.000	0.000
92	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
93	0.000	-0.064	-0.002	0.000	0.000	0.000
94	0.007	-0.189	-0.011	0.000	0.000	0.000
95	0.000	-0.256	-0.019	0.000	0.000	0.000
99	-0.001	-0.026	0.000	0.001	0.000	0.000
100	0.009	-0.143	-0.009	0.000	0.000	0.000
101	0.007	-0.235	-0.022	0.000	0.000	0.000
105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
106	0.013	-0.107	-0.003	0.000	0.000	0.000
107	0.013	-0.199	-0.019	0.000	0.000	0.000
108	0.001	-0.243	-0.027	0.000	0.000	0.000
112	0.011	-0.062	0.001	-0.001	0.000	0.000
113	0.023	-0.189	-0.010	0.000	0.000	0.000
114	0.011	-0.247	-0.024	0.000	0.000	0.000
118	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
119	0.031	-0.166	-0.002	0.001	0.000	0.000
120	0.023	-0.238	-0.012	0.000	0.000	0.000
121	0.001	-0.262	-0.018	0.000	0.000	0.000
125	0.028	-0.115	0.003	-0.002	-0.001	0.001
126	0.035	-0.232	-0.001	-0.001	0.000	0.000
127	0.014	-0.258	-0.005	0.000	0.000	0.000
131	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.001
132	0.035	-0.171	0.006	0.003	0.001	0.001
133	0.023	-0.214	0.005	0.001	0.000	0.001
134	0.000	-0.219	0.006	0.000	0.000	0.000
138	0.031	-0.118	0.006	-0.002	-0.001	0.001
139	0.022	-0.142	0.008	-0.001	0.000	0.000
140	0.007	-0.133	0.010	0.000	0.000	0.000
144	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.002	0.002
145	0.000	0.000	0.000	-0.002	0.000	-0.001
146	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
147	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001

### Reações de Apoio:

nó	( x 10 <sup>-3</sup> kN )			( x 10 <sup>-4</sup> kN.cm )		
	Reação 1	Reação 2	Reação 3	Reação 4	Reação 5	Reação 6
1	51.791	17.556	22.442	0.000	0.000	0.000
2	40.466	11.447	27.136	0.000	0.000	0.000
3	14.148	2.670	36.243	0.000	0.000	0.000
4	0.118	0.749	38.734	0.000	0.000	0.000
144	52.413	18.428	-22.787	0.000	0.000	0.000
145	32.046	8.699	-30.925	0.000	0.000	0.000
146	13.307	2.414	-36.533	0.000	0.000	0.000
147	-0.118	0.749	-38.734	0.000	0.000	0.000
14	62.724	23.847	16.683	0.000	0.000	0.000
27	85.970	30.131	5.310	0.000	0.000	0.000
40	96.052	32.819	1.000	0.000	0.000	0.000
53	101.394	34.255	0.121	0.000	0.000	0.000
66	104.477	35.068	-0.335	0.000	0.000	0.000
79	105.155	35.272	-0.083	0.000	0.000	0.000
92	101.926	34.354	-0.278	0.000	0.000	0.000
105	96.600	32.906	-1.139	0.000	0.000	0.000
118	87.192	30.285	-5.170	0.000	0.000	0.000
131	71.952	26.001	-13.135	0.000	0.000	0.000

# **ANEXO C**

## ANEXO C - RESULTADOS DO CÁLCULO DO ARCO DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE SAPP

---

SISTEMA PARA ANÁLISE DE PÓRTICOS PLANOS

VERSÃO 3.0 setembro/1989

autor: Rogério Giglio Ferreira

---

**UNIDADES: kN e cm.**

Carregamentos:

- 1 - Estados Limites Últimos
- 2 - Estados Limites de Utilização

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 1

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000180	-0.004855	-0.000074
3	0.000504	-0.012547	-0.000083
4	-0.000115	-0.017129	-0.000008
5	-0.000802	-0.013789	0.000074
6	-0.000493	-0.006153	0.000082
7	0.000000	0.000000	0.000000

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 2

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000281	-0.004001	-0.000056
3	0.000502	-0.009421	-0.000055
4	0.000030	-0.012096	0.000001
5	-0.000434	-0.009269	0.000055
6	-0.000239	-0.003983	0.000055
7	0.000000	0.000000	0.000000

REAÇÕES - CARREGAMENTO : 1

no	reação x	reação y	momento z
1	0.3006	0.0970	0.0000
7	-0.3138	0.1011	0.0000
TOTAL	-0.0132	0.1981	0.0000

REAÇÕES - CARREGAMENTO : 2

no	reação x	reação y	momento z
1	0.2139	0.0692	0.0000
7	-0.2233	0.0719	0.0000
TOTAL	-0.0094	0.1411	0.0000

## ESFORÇOS NAS BARRAS

barra carr.	Fx	Fy	Mz
1 -----			
1	0.3119	-0.0010	0.0000
	-0.3119	0.0010	-0.0872
2	0.2221	-0.0006	0.0000
	-0.2221	0.0006	-0.0493
2 -----			
1	0.2594	0.0017	0.0872
	-0.2594	-0.0017	0.0587
2	0.1846	0.0012	0.0493
	-0.1846	-0.0012	0.0525
3 -----			
1	0.2373	0.0012	-0.0587
	-0.2373	-0.0012	0.1603
2	0.1689	0.0007	-0.0525
	-0.1689	-0.0007	0.1113
4 -----			
1	0.2375	-0.0009	-0.1603
	-0.2375	0.0009	0.0810
2	0.1690	-0.0008	-0.1113
	-0.1690	0.0008	0.0442
5 -----			
1	0.2608	-0.0016	-0.0810
	-0.2608	0.0016	-0.0581
2	0.1855	-0.0010	-0.0442
	-0.1855	0.0010	-0.0446
6 -----			
1	0.3257	0.0007	0.0581
	-0.3257	-0.0007	0.0000
2	0.2319	0.0005	0.0446
	-0.2319	-0.0005	0.0000

# **ANEXO D**

## ANEXO D - RESULTADOS DO CÁLCULO DA VIGA DO PROTÓTIPO, OBTIDOS ATRAVÉS DO SOFTWARE SAPP

---

SISTEMA PARA ANÁLISE DE PÓRTICOS PLANOS

VERSÃO 3.0 setembro/1989

autor: Rogério Giglio Ferreira

---

**UNIDADES: kN e cm.**

Carregamentos:

- 1 - Estados Limites Últimos
- 2 - Estados Limites de Utilização

DESLOCAMENTOS DE NOS - CARREGAMENTO : 1

---

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.000000	-0.100346	-0.010020
3	-0.000015	-0.459502	-0.009639
4	-0.000036	-0.796953	-0.008838
5	-0.000061	-1.098532	-0.007678
6	-0.000086	-1.352353	-0.006225
7	-0.000112	-1.548930	-0.004544
8	-0.000137	-1.681232	-0.002705
9	-0.000163	-1.744721	-0.000775
10	-0.000189	-1.737344	0.001178
11	-0.000214	-1.659503	0.003086
12	-0.000236	-1.513991	0.004886
13	-0.000248	-1.305870	0.006517
14	-0.000248	0.000000	0.000000

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 2

---

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.000000	-0.071390	-0.007129
3	-0.000010	-0.326905	-0.006857
4	-0.000026	-0.566977	-0.006287
5	-0.000043	-0.781521	-0.005462
6	-0.000061	-0.962083	-0.004428
7	-0.000080	-1.101911	-0.003232
8	-0.000098	-1.196006	-0.001923
9	-0.000116	-1.241141	-0.000550
10	-0.000134	-1.235860	0.000839
11	-0.000152	-1.180454	0.002196
12	-0.000168	-1.076917	0.003476
13	-0.000177	-0.928855	0.004636

## REAÇÕES - CARREGAMENTO : 1

no	reacao x	reacao y	momento z
1	0.0037	0.7196	0.0000
14	0.0000	0.5474	0.0000
TOTAL	0.0037	1.2670	0.0000

## REAÇÕES - CARREGAMENTO : 2

no	reacao x	reacao y	momento z
1	0.0026	0.5121	0.0000
14	0.0000	0.3891	0.0000
TOTAL	0.0026	0.9012	0.0000

## ESFORÇOS NAS BARRAS

barra carr.	Fx	Fy	Mz
1	0.0037	0.7196	0.0000
	-0.0037	-0.7093	7.1444
2	0.0026	0.5121	0.0000
	-0.0026	-0.5048	5.0846
2	0.0357	0.5864	-7.1444
	-0.0357	-0.5489	27.8067
2	0.0254	0.4172	-5.0846
	-0.0254	-0.3906	19.7873
3	0.0541	0.5125	-27.8067
	-0.0541	-0.4750	45.7793
2	0.0385	0.3646	-19.7873
	-0.0385	-0.3381	32.5764
4	0.0614	0.4326	-45.7793
	-0.0614	-0.3951	60.8439
2	0.0437	0.3078	-32.5764
	-0.0437	-0.2812	43.2953
5	0.0630	0.3490	-60.8439
	-0.0630	-0.3115	72.8657
2	0.0448	0.2483	-43.2953
	-0.0448	-0.2217	51.8495
6			

1	0.0634	0.2634	-72.8657
	-0.0634	-0.2259	81.7720
2	0.0451	0.1873	-51.8495
	-0.0451	-0.1607	58.1843
7	-----		
1	0.0635	0.1765	-81.7720
	-0.0635	-0.1390	87.5154
2	0.0452	0.1254	-58.1843
	-0.0452	-0.0989	62.2670
8	-----		
1	0.0640	0.0899	-87.5154
	-0.0640	-0.0524	90.1068
2	0.0455	0.0638	-62.2670
	-0.0455	-0.0372	64.1048
9	-----		
1	0.0638	0.0044	-90.1068
	-0.0638	0.0330	89.5863
2	0.0454	0.0029	-64.1048
	-0.0454	0.0237	63.7268
10	-----		
1	0.0624	-0.0790	-89.5863
	-0.0624	0.1165	86.0268
2	0.0444	-0.0565	-63.7268
	-0.0444	0.0830	61.1877
11	-----		
1	0.0549	-0.1587	-86.0268
	-0.0549	0.1962	79.5664
2	0.0391	-0.1131	-61.1877
	-0.0391	0.1397	56.5858
12	-----		
1	0.0315	-0.2296	-79.5664
	-0.0315	0.2671	70.5256
2	0.0224	-0.1635	-56.5858
	-0.0224	0.1901	50.1503
13	-----		
1	-0.0000	-0.3929	-70.5256
	0.0000	0.5474	0.0000
2	-0.0000	-0.2796	-50.1503
	0.0000	0.3891	0.0000
	-0.0000	0.3891	0.0000

# **ANEXO E**

**ANEXO E - RESULTADOS DO CÁLCULO DO PROTÓTIPO, PARA AS  
TRÊS ETAPAS DO ENSAIO, OBTIDOS ATRAVÉS DO  
SOFTWARE PORT-TRI**

---

**E.1 1ª Etapa de carregamento**

---

**Deslocamentos dos Nós:**

---

nó	( cm )					
	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.002	-0.003
2	0.000	0.000	-0.010	-0.006	-0.001	-0.003
3	0.000	0.000	-0.019	-0.007	-0.001	-0.005
4	0.000	0.000	-0.018	-0.006	0.000	-0.006
5	0.000	0.000	-0.020	-0.004	0.000	-0.003
6	0.000	0.000	-0.011	0.001	-0.000	-0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.005	-0.002	-0.002
8	0.004	-0.012	-0.004	-0.009	-0.002	0.004
9	0.004	-0.020	-0.014	-0.005	-0.001	0.002
10	0.005	-0.112	-0.013	-0.010	-0.000	0.006
11	-0.006	-0.138	-0.012	-0.005	0.001	0.005
12	-0.009	-0.053	-0.012	-0.004	0.001	0.003
13	-0.006	-0.019	-0.004	0.005	-0.001	-0.002
14	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.001	-0.001
15	0.006	-0.024	-0.006	-0.001	-0.000	-0.001
16	0.012	-0.128	-0.001	-0.002	-0.001	-0.003
17	-0.000	-0.273	0.009	0.002	-0.000	-0.000
18	-0.008	-0.096	0.001	-0.000	-0.000	0.001
19	-0.006	-0.023	-0.005	0.001	-0.000	0.001
20	0.000	0.000	0.000	0.004	-0.001	0.002
21	0.002	-0.008	-0.003	0.003	0.001	-0.002
22	-0.001	-0.022	0.005	0.010	0.002	-0.006
23	0.006	-0.217	0.026	0.000	0.000	-0.002
24	-0.007	-0.230	0.025	0.007	0.000	-0.000
25	-0.002	-0.035	0.006	-0.010	0.002	0.005
26	0.004	0.013	-0.003	0.004	-0.001	-0.002
27	0.000	0.000	0.000	0.011	0.003	0.006
28	-0.018	0.059	0.002	-0.018	-0.004	-0.007
29	-0.002	-0.087	0.028	-0.003	-0.001	-0.003
30	-0.000	-0.310	0.044	0.007	-0.000	0.003
31	0.004	-0.071	0.028	0.010	-0.001	0.007
32	0.015	0.045	0.002	0.012	-0.003	0.007
33	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.001	-0.002
34	-0.019	0.059	-0.001	0.020	0.006	-0.008
35	-0.028	0.077	0.017	0.020	0.003	-0.011
36	-0.002	-0.190	0.044	0.003	-0.000	-0.004
37	0.001	-0.203	0.044	0.009	-0.000	-0.001
38	0.025	0.059	0.016	-0.020	0.004	0.009
39	0.027	0.084	-0.001	-0.011	0.003	0.003
40	0.000	0.000	0.000	0.025	0.008	0.014
41	-0.047	0.157	0.006	-0.035	-0.008	-0.014
42	-0.020	-0.027	0.029	-0.006	-0.001	-0.006
43	-0.000	-0.301	0.043	0.006	0.000	0.002
44	0.021	-0.014	0.028	0.009	-0.001	0.007
45	0.046	0.146	0.005	0.026	-0.006	0.012
46	0.000	0.000	0.000	-0.018	0.006	-0.010
47	-0.040	0.126	0.000	0.034	0.009	-0.013
48	-0.049	0.144	0.013	0.023	0.004	-0.012

49	-0.008	-0.196	0.029	-0.004	-0.001	-0.001
50	0.007	-0.210	0.029	0.008	-0.001	0.000
51	0.045	0.122	0.012	-0.026	0.004	0.013
52	0.044	0.137	0.000	-0.028	0.008	0.010
53	0.000	0.000	0.000	0.034	0.011	0.018
54	-0.063	0.204	0.004	-0.042	-0.009	-0.017
55	-0.026	-0.032	0.014	-0.005	-0.001	-0.007
56	-0.000	-0.353	0.019	0.000	0.000	-0.001
57	0.027	-0.021	0.014	0.004	-0.000	0.005
58	0.063	0.202	0.003	0.036	-0.008	0.016
59	0.000	0.000	0.000	-0.031	0.010	-0.017
60	-0.050	0.156	0.001	0.039	0.011	-0.014
61	-0.052	0.144	0.005	0.023	0.004	-0.013
62	-0.006	-0.258	0.009	-0.010	-0.001	0.001
63	0.005	-0.266	0.009	0.008	-0.001	0.001
64	0.050	0.129	0.005	-0.026	0.004	0.014
65	0.050	0.157	0.001	-0.038	0.011	0.014
66	0.000	0.000	0.000	0.037	0.012	0.020
67	-0.066	0.212	0.001	-0.043	-0.010	-0.018
68	-0.023	-0.065	0.003	-0.003	-0.000	-0.006
69	-0.000	-0.418	0.003	-0.001	0.000	-0.001
70	0.024	-0.060	0.003	0.002	-0.000	0.005
71	0.066	0.213	0.001	0.041	-0.009	0.018
72	0.000	0.000	0.000	-0.037	0.011	-0.020
73	-0.052	0.161	-0.000	0.041	0.011	-0.015
74	-0.050	0.127	0.000	0.024	0.004	-0.013
75	-0.004	-0.297	0.000	-0.009	-0.001	-0.000
76	0.004	-0.297	-0.000	0.009	-0.001	0.000
77	0.050	0.127	-0.000	-0.024	0.004	0.013
78	0.052	0.161	0.000	-0.041	0.011	0.015
79	0.000	0.000	0.000	0.037	0.011	0.020
80	-0.066	0.213	-0.001	-0.041	-0.009	-0.018
81	-0.024	-0.060	-0.003	-0.002	-0.000	-0.005
82	0.000	-0.418	-0.003	0.001	0.000	0.001
83	0.023	-0.065	-0.003	0.003	-0.000	0.006
84	0.066	0.212	-0.001	0.043	-0.010	0.018
85	0.000	0.000	0.000	-0.037	0.012	-0.020
86	-0.050	0.157	-0.001	0.038	0.011	-0.014
87	-0.050	0.129	-0.005	0.026	0.004	-0.014
88	-0.005	-0.266	-0.009	-0.008	-0.001	-0.001
89	0.006	-0.258	-0.009	0.010	-0.001	-0.001
90	0.052	0.144	-0.005	-0.023	0.004	0.013
91	0.050	0.156	-0.001	-0.039	0.011	0.014
92	0.000	0.000	0.000	0.031	0.010	0.017
93	-0.063	0.202	-0.003	-0.036	-0.008	-0.016
94	-0.027	-0.021	-0.014	-0.004	-0.000	-0.005
95	0.000	-0.353	-0.019	-0.000	0.000	0.001
96	0.026	-0.032	-0.014	0.005	-0.001	0.007
97	0.063	0.204	-0.004	0.042	-0.009	0.017
98	0.000	0.000	0.000	-0.034	0.011	-0.018
99	-0.044	0.137	-0.000	0.028	0.008	-0.010
100	-0.045	0.122	-0.012	0.026	0.004	-0.013
101	-0.007	-0.210	-0.029	-0.008	-0.001	-0.000
102	0.008	-0.196	-0.029	0.004	-0.001	0.001
103	0.049	0.144	-0.013	-0.023	0.004	0.012
104	0.040	0.126	-0.000	-0.034	0.009	0.013
105	0.000	0.000	0.000	0.018	0.006	0.010
106	-0.046	0.146	-0.005	-0.026	-0.006	-0.012
107	-0.021	-0.014	-0.028	-0.009	-0.001	-0.007
108	0.000	-0.301	-0.043	-0.006	0.000	-0.002
109	0.020	-0.027	-0.029	0.006	-0.001	0.006
110	0.047	0.157	-0.006	0.035	-0.008	0.014
111	0.000	0.000	0.000	-0.025	0.008	-0.014
112	-0.027	0.084	0.001	0.011	0.003	-0.003
113	-0.025	0.059	-0.016	0.020	0.004	-0.009
114	-0.001	-0.203	-0.044	-0.009	-0.000	0.001
115	0.002	-0.190	-0.044	-0.003	-0.000	0.004
116	0.028	0.077	-0.017	-0.020	0.003	0.011
117	0.019	0.059	0.001	-0.020	0.006	0.008
118	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.002
119	-0.015	0.045	-0.002	-0.012	-0.003	-0.007
120	-0.004	-0.071	-0.028	-0.010	-0.001	-0.007
121	0.000	-0.310	-0.044	-0.007	-0.000	-0.003
122	0.002	-0.087	-0.028	0.003	-0.001	0.003

123	0.018	0.059	-0.002	0.018	-0.004	0.007
124	0.000	0.000	0.000	-0.011	0.003	-0.006
125	-0.004	0.013	0.003	-0.004	-0.001	0.002
126	0.002	-0.035	-0.006	0.010	0.002	-0.005
127	0.007	-0.230	-0.025	-0.007	0.000	0.000
128	-0.006	-0.217	-0.026	-0.000	0.000	0.002
129	0.001	-0.022	-0.005	-0.010	0.002	0.006
130	-0.002	-0.008	0.003	-0.003	0.001	0.002
131	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.001	-0.002
132	0.006	-0.023	0.005	-0.001	-0.000	-0.001
133	0.008	-0.096	-0.001	0.000	-0.000	-0.001
134	0.000	-0.273	-0.009	-0.002	-0.000	0.000
135	-0.012	-0.128	0.001	0.002	-0.001	0.003
136	-0.006	-0.024	0.006	0.001	-0.000	0.001
137	0.000	0.000	0.000	0.003	-0.001	0.001
138	0.006	-0.019	0.004	-0.005	-0.001	0.002
139	0.009	-0.053	0.012	0.004	0.001	-0.003
140	0.006	-0.138	0.012	0.005	0.001	-0.005
141	-0.005	-0.112	0.013	0.010	-0.000	-0.006
142	-0.004	-0.020	0.014	0.005	-0.001	-0.002
143	-0.004	-0.012	0.004	0.009	-0.002	-0.004
144	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.002	0.002
145	0.000	0.000	0.011	-0.001	-0.000	0.000
146	0.000	0.000	0.020	0.004	0.000	0.003
147	0.000	0.000	0.018	0.006	0.000	0.006
148	0.000	0.000	0.019	0.007	-0.001	0.005
149	0.000	0.000	0.010	0.006	-0.001	0.003
150	0.000	0.000	0.000	0.006	-0.002	0.003

### Reações de Apoio:

nó	( kN )			( kN.cm )		
	Reação 1	Reação 2	Reação 3	Reação 4	Reação 5	Reação 6
2	0.214	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.158	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
4	-0.003	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000
5	-0.159	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000
6	-0.205	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000
145	0.205	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000
146	0.159	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000
147	0.003	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000
148	-0.158	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
149	-0.214	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.095	0.030	0.041	0.000	0.000	0.000
14	-0.036	-0.007	0.075	0.000	0.000	0.000
27	-0.021	-0.006	0.056	0.000	0.000	0.000
40	0.059	0.014	0.022	0.000	0.000	0.000
53	0.150	0.039	-0.004	0.000	0.000	0.000
66	0.199	0.053	-0.003	0.000	0.000	0.000
79	0.204	0.054	0.004	0.000	0.000	0.000
92	0.151	0.038	0.003	0.000	0.000	0.000
105	0.058	0.012	-0.024	0.000	0.000	0.000
118	-0.019	-0.007	-0.057	0.000	0.000	0.000
131	-0.030	-0.006	-0.074	0.000	0.000	0.000
144	0.095	0.032	-0.041	0.000	0.000	0.000
7	-0.095	0.032	0.041	0.000	0.000	0.000
20	0.030	-0.006	0.074	0.000	0.000	0.000
33	0.019	-0.007	0.057	0.000	0.000	0.000
46	-0.058	0.012	0.024	0.000	0.000	0.000
59	-0.151	0.038	-0.003	0.000	0.000	0.000
72	-0.204	0.054	-0.004	0.000	0.000	0.000
85	-0.199	0.053	0.003	0.000	0.000	0.000
98	-0.150	0.039	0.004	0.000	0.000	0.000
111	-0.059	0.014	-0.022	0.000	0.000	0.000
124	0.021	-0.006	-0.056	0.000	0.000	0.000
137	0.036	-0.007	-0.075	0.000	0.000	0.000
150	-0.095	0.030	-0.041	0.000	0.000	0.000
Total	-0.000	0.796	-0.000	0.000	0.000	0.000

## E.2 2ª Etapa de carregamento

---

### Deslocamentos dos Nós:

---

nó	( cm )					
	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.001	-0.003
2	0.000	0.000	-0.020	-0.009	-0.002	-0.004
3	0.000	0.000	-0.032	-0.017	-0.002	-0.014
4	0.000	0.000	-0.032	-0.010	-0.000	-0.013
5	0.000	0.000	-0.036	-0.007	0.001	-0.006
6	0.000	0.000	-0.021	-0.006	0.001	-0.003
7	0.000	0.000	0.000	0.005	-0.002	-0.002
8	0.004	-0.011	-0.009	-0.008	-0.002	0.003
9	0.003	-0.025	-0.025	-0.011	-0.002	0.005
10	0.016	-0.324	-0.014	-0.028	-0.001	0.015
11	-0.020	-0.404	-0.011	0.004	0.001	0.006
12	-0.020	-0.122	-0.021	-0.017	0.003	0.010
13	-0.005	-0.015	-0.009	0.005	-0.002	-0.002
14	0.000	0.000	0.000	0.006	0.002	0.003
15	0.002	-0.012	-0.013	-0.014	-0.003	-0.006
16	0.026	-0.325	0.009	-0.002	-0.001	-0.007
17	-0.001	-0.624	0.041	0.008	-0.001	0.000
18	-0.019	-0.257	0.016	-0.000	-0.000	0.004
19	0.000	-0.007	-0.009	0.011	-0.003	0.007
20	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.001
21	-0.007	0.023	-0.007	0.021	0.006	-0.009
22	-0.013	-0.016	0.017	0.027	0.004	-0.017
23	0.014	-0.558	0.075	-0.007	-0.000	-0.002
24	-0.018	-0.592	0.076	0.029	-0.000	-0.007
25	0.008	-0.050	0.020	-0.029	0.006	0.014
26	0.026	0.083	-0.007	-0.003	0.001	-0.001
27	0.000	0.000	0.000	0.040	0.013	0.022
28	-0.061	0.207	0.006	-0.059	-0.014	-0.023
29	-0.012	-0.218	0.073	-0.002	-0.001	-0.006
30	-0.002	-0.692	0.113	0.020	-0.000	0.008
31	0.015	-0.181	0.072	0.018	-0.002	0.017
32	0.058	0.180	0.006	0.043	-0.009	0.022
33	0.000	0.000	0.000	-0.021	0.006	-0.011
34	-0.062	0.196	-0.002	0.065	0.018	-0.025
35	-0.083	0.229	0.042	0.053	0.008	-0.030
36	-0.007	-0.491	0.106	-0.003	-0.001	-0.005
37	0.003	-0.526	0.104	0.031	-0.001	-0.007
38	0.075	0.184	0.039	-0.053	0.010	0.025
39	0.082	0.259	-0.002	-0.043	0.012	0.013
40	0.000	0.000	0.000	0.075	0.023	0.041
41	-0.134	0.445	0.014	-0.098	-0.022	-0.040
42	-0.053	-0.084	0.067	-0.009	-0.001	-0.012
43	-0.001	-0.683	0.097	0.012	0.001	0.004
44	0.055	-0.056	0.063	0.014	-0.001	0.016
45	0.130	0.421	0.011	0.078	-0.017	0.035
46	0.000	0.000	0.000	-0.059	0.018	-0.032
47	-0.114	0.356	0.001	0.096	0.027	-0.036
48	-0.128	0.372	0.028	0.060	0.009	-0.032
49	-0.017	-0.527	0.062	-0.021	-0.002	0.002
50	0.014	-0.559	0.060	0.028	-0.002	-0.003
51	0.118	0.317	0.025	-0.066	0.011	0.034
52	0.120	0.377	0.001	-0.084	0.024	0.030
53	0.000	0.000	0.000	0.094	0.029	0.051
54	-0.165	0.539	0.009	-0.112	-0.025	-0.048
55	-0.062	-0.117	0.027	-0.008	-0.001	-0.016
56	-0.000	-0.825	0.036	-0.001	0.001	-0.003
57	0.064	-0.093	0.026	0.003	0.000	0.011
58	0.165	0.535	0.007	0.100	-0.022	0.044
59	0.000	0.000	0.000	-0.087	0.027	-0.047
60	-0.132	0.412	0.002	0.105	0.030	-0.039

61	-0.130	0.347	0.009	0.059	0.010	-0.032
62	-0.011	-0.690	0.014	-0.033	-0.002	0.007
63	0.010	-0.709	0.013	0.026	-0.002	-0.001
64	0.124	0.312	0.008	-0.065	0.011	0.036
65	0.131	0.409	0.002	-0.103	0.029	0.038
66	0.000	0.000	0.000	0.099	0.031	0.053
67	-0.167	0.540	0.002	-0.112	-0.025	-0.049
68	-0.052	-0.211	0.003	-0.004	-0.000	-0.014
69	-0.000	-0.990	0.003	-0.003	0.000	-0.002
70	0.053	-0.200	0.004	-0.001	0.000	0.011
71	0.168	0.542	0.003	0.109	-0.024	0.047
72	0.000	0.000	0.000	-0.098	0.031	-0.052
73	-0.133	0.414	-0.000	0.107	0.030	-0.040
74	-0.121	0.297	0.000	0.061	0.010	-0.034
75	-0.005	-0.788	-0.000	-0.031	-0.002	0.004
76	0.005	-0.788	0.000	0.031	-0.002	-0.004
77	0.121	0.297	-0.000	-0.061	0.010	0.034
78	0.133	0.414	0.000	-0.107	0.030	0.040
79	0.000	0.000	0.000	0.098	0.031	0.052
80	-0.168	0.542	-0.003	-0.109	-0.024	-0.047
81	-0.053	-0.200	-0.004	0.001	0.000	-0.011
82	0.000	-0.990	-0.003	0.003	0.000	0.002
83	0.052	-0.211	-0.003	0.004	-0.000	0.014
84	0.167	0.540	-0.002	0.112	-0.025	0.049
85	0.000	0.000	0.000	-0.099	0.031	-0.053
86	-0.131	0.409	-0.002	0.103	0.029	-0.038
87	-0.124	0.312	-0.008	0.065	0.011	-0.036
88	-0.010	-0.709	-0.013	-0.026	-0.002	0.001
89	0.011	-0.690	-0.014	0.033	-0.002	-0.007
90	0.130	0.347	-0.009	-0.059	0.010	0.032
91	0.132	0.412	-0.002	-0.105	0.030	0.039
92	0.000	0.000	0.000	0.087	0.027	0.047
93	-0.165	0.535	-0.007	-0.100	-0.022	-0.044
94	-0.064	-0.093	-0.026	-0.003	0.000	-0.011
95	0.000	-0.825	-0.036	0.001	0.001	0.003
96	0.062	-0.117	-0.027	0.008	-0.001	0.016
97	0.165	0.539	-0.009	0.112	-0.025	0.048
98	0.000	0.000	0.000	-0.094	0.029	-0.051
99	-0.120	0.377	-0.001	0.084	0.024	-0.030
100	-0.118	0.317	-0.025	0.066	0.011	-0.034
101	-0.014	-0.559	-0.060	-0.028	-0.002	0.003
102	0.017	-0.527	-0.062	0.021	-0.002	-0.002
103	0.128	0.372	-0.028	-0.060	0.009	0.032
104	0.114	0.356	-0.001	-0.096	0.027	0.036
105	0.000	0.000	0.000	0.059	0.018	0.032
106	-0.130	0.421	-0.011	-0.078	-0.017	-0.035
107	-0.055	-0.056	-0.063	-0.014	-0.001	-0.016
108	0.001	-0.683	-0.097	-0.012	0.001	-0.004
109	0.053	-0.084	-0.067	0.009	-0.001	0.012
110	0.134	0.445	-0.014	0.098	-0.022	0.040
111	0.000	0.000	0.000	-0.075	0.023	-0.041
112	-0.082	0.259	0.002	0.043	0.012	-0.013
113	-0.075	0.184	-0.039	0.053	0.010	-0.025
114	-0.003	-0.526	-0.104	-0.031	-0.001	0.007
115	0.007	-0.491	-0.106	0.003	-0.001	0.005
116	0.083	0.229	-0.042	-0.053	0.008	0.030
117	0.062	0.196	0.002	-0.065	0.018	0.025
118	0.000	0.000	0.000	0.021	0.006	0.011
119	-0.058	0.180	-0.006	-0.043	-0.009	-0.022
120	-0.015	-0.181	-0.072	-0.018	-0.002	-0.017
121	0.002	-0.692	-0.113	-0.020	-0.000	-0.008
122	0.012	-0.218	-0.073	0.002	-0.001	0.006
123	0.061	0.207	-0.006	0.059	-0.014	0.023
124	0.000	0.000	0.000	-0.040	0.013	-0.022
125	-0.026	0.083	0.007	0.003	0.001	0.001
126	-0.008	-0.050	-0.020	0.029	0.006	-0.014
127	0.018	-0.592	-0.076	-0.029	-0.000	0.007
128	-0.014	-0.558	-0.075	0.007	-0.000	0.002
129	0.013	-0.016	-0.017	-0.027	0.004	0.017
130	0.007	0.023	0.007	-0.021	0.006	0.009
131	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
132	-0.000	-0.007	0.009	-0.011	-0.003	-0.007
133	0.019	-0.257	-0.016	0.000	-0.000	-0.004
134	0.001	-0.624	-0.041	-0.008	-0.001	-0.000

135	-0.026	-0.325	-0.009	0.002	-0.001	0.007
136	-0.002	-0.012	0.013	0.014	-0.003	0.006
137	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.002	-0.003
138	0.005	-0.015	0.009	-0.005	-0.002	0.002
139	0.020	-0.122	0.021	0.017	0.003	-0.010
140	0.020	-0.404	0.011	-0.004	0.001	-0.006
141	-0.016	-0.324	0.014	0.028	-0.001	-0.015
142	-0.003	-0.025	0.025	0.011	-0.002	-0.005
143	-0.004	-0.011	0.009	0.008	-0.002	-0.003
144	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.002	0.002
145	0.000	0.000	0.021	0.006	0.001	0.003
146	0.000	0.000	0.036	0.007	0.001	0.006
147	0.000	0.000	0.032	0.010	-0.000	0.013
148	0.000	0.000	0.032	0.017	-0.002	0.014
149	0.000	0.000	0.020	0.009	-0.002	0.004
150	0.000	0.000	0.000	0.005	-0.001	0.003

### Reações de Apoio:

nó	( kN )			( kN.cm )		
	Reação 1	Reação 2	Reação 3	Reação 4	Reação 5	Reação 6
2	0.484	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.393	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.003	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000
5	-0.394	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000
6	-0.478	0.108	0.000	0.000	0.000	0.000
145	0.478	0.108	0.000	0.000	0.000	0.000
146	0.394	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000
147	-0.003	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000
148	-0.393	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000
149	-0.484	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.209	0.066	0.090	0.000	0.000	0.000
14	-0.085	-0.023	0.169	0.000	0.000	0.000
27	-0.067	-0.025	0.133	0.000	0.000	0.000
40	0.126	0.022	0.051	0.000	0.000	0.000
53	0.352	0.084	-0.017	0.000	0.000	0.000
66	0.452	0.113	-0.011	0.000	0.000	0.000
79	0.451	0.113	0.014	0.000	0.000	0.000
92	0.353	0.084	0.015	0.000	0.000	0.000
105	0.135	0.021	-0.052	0.000	0.000	0.000
118	-0.063	-0.028	-0.136	0.000	0.000	0.000
131	-0.080	-0.022	-0.168	0.000	0.000	0.000
144	0.205	0.067	-0.089	0.000	0.000	0.000
7	-0.205	0.067	0.089	0.000	0.000	0.000
20	0.080	-0.022	0.168	0.000	0.000	0.000
33	0.063	-0.028	0.136	0.000	0.000	0.000
46	-0.135	0.021	0.052	0.000	0.000	0.000
59	-0.353	0.084	-0.015	0.000	0.000	0.000
72	-0.451	0.113	-0.014	0.000	0.000	0.000
85	-0.452	0.113	0.011	0.000	0.000	0.000
98	-0.352	0.084	0.017	0.000	0.000	0.000
111	-0.126	0.022	-0.051	0.000	0.000	0.000
124	0.067	-0.025	-0.133	0.000	0.000	0.000
137	0.085	-0.023	-0.169	0.000	0.000	0.000
150	-0.209	0.066	-0.090	0.000	0.000	0.000
Total	-0.000	1.676	-0.000	0.000	0.000	0.000

### E.3 3ª Etapa de carregamento

#### Deslocamentos dos Nós:

nó	( cm )					
	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.008	-0.002	-0.004
2	0.000	0.000	-0.031	-0.017	-0.003	-0.010
3	0.000	0.000	-0.068	-0.025	-0.002	-0.020
4	0.000	0.000	-0.090	-0.014	-0.000	-0.017
5	0.000	0.000	-0.071	-0.012	0.001	-0.010
6	0.000	0.000	-0.034	-0.009	0.002	-0.005
7	0.000	0.000	0.000	0.005	-0.002	-0.001
8	0.006	-0.018	-0.013	-0.012	-0.003	0.005
9	0.020	-0.101	-0.045	-0.026	-0.004	0.012
10	0.025	-0.412	-0.057	-0.032	-0.001	0.019
11	-0.029	-0.494	-0.053	-0.002	0.001	0.009
12	-0.039	-0.218	-0.040	-0.023	0.004	0.015
13	-0.015	-0.047	-0.013	0.005	-0.002	-0.001
14	0.000	0.000	0.000	0.008	0.003	0.003
15	0.023	-0.093	-0.022	-0.013	-0.003	-0.007
16	0.056	-0.523	-0.005	0.019	0.001	0.001
17	-0.002	-0.740	0.019	0.004	-0.002	-0.002
18	-0.049	-0.458	0.003	-0.022	0.002	-0.006
19	-0.016	-0.070	-0.015	0.011	-0.003	0.008
20	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.000	0.001
21	0.003	-0.008	-0.010	0.029	0.008	-0.014
22	0.014	-0.154	0.017	0.020	0.003	-0.017
23	0.028	-0.705	0.083	0.001	0.001	-0.004
24	-0.033	-0.744	0.084	0.028	0.000	-0.008
25	-0.020	-0.194	0.021	-0.024	0.005	0.014
26	0.020	0.064	-0.010	-0.004	0.001	0.000
27	0.000	0.000	0.000	0.055	0.017	0.029
28	-0.055	0.180	0.007	-0.072	-0.017	-0.028
29	0.011	-0.400	0.092	0.021	0.001	0.004
30	-0.002	-0.776	0.147	0.027	-0.001	0.012
31	-0.009	-0.364	0.092	0.002	0.000	0.011
32	0.051	0.143	0.008	0.052	-0.011	0.028
33	0.000	0.000	0.000	-0.028	0.009	-0.014
34	-0.069	0.215	-0.003	0.088	0.025	-0.036
35	-0.079	0.173	0.056	0.055	0.008	-0.034
36	-0.002	-0.573	0.146	0.006	-0.000	-0.009
37	-0.003	-0.617	0.145	0.036	-0.001	-0.011
38	0.069	0.116	0.054	-0.056	0.010	0.027
39	0.096	0.303	-0.004	-0.057	0.016	0.019
40	0.000	0.000	0.000	0.104	0.032	0.055
41	-0.156	0.512	0.019	-0.127	-0.029	-0.052
42	-0.049	-0.195	0.097	0.014	0.001	-0.003
43	-0.002	-0.716	0.142	0.019	0.001	0.007
44	0.051	-0.160	0.093	-0.004	0.002	0.009
45	0.151	0.476	0.015	0.100	-0.022	0.046
46	0.000	0.000	0.000	-0.080	0.025	-0.042
47	-0.141	0.441	0.002	0.133	0.037	-0.051
48	-0.147	0.396	0.043	0.066	0.010	-0.037
49	-0.020	-0.585	0.095	-0.018	-0.002	0.002
50	0.016	-0.630	0.093	0.030	-0.002	-0.004
51	0.134	0.321	0.039	-0.074	0.013	0.039
52	0.153	0.478	0.002	-0.115	0.033	0.042
53	0.000	0.000	0.000	0.132	0.041	0.070
54	-0.206	0.666	0.013	-0.151	-0.034	-0.065
55	-0.066	-0.219	0.045	0.015	0.002	-0.008
56	-0.001	-0.889	0.061	0.000	0.001	-0.003
57	0.069	-0.185	0.043	-0.021	0.003	0.002
58	0.206	0.658	0.011	0.132	-0.029	0.059
59	0.000	0.000	0.000	-0.122	0.038	-0.064
60	-0.173	0.538	0.002	0.151	0.042	-0.057
61	-0.156	0.385	0.017	0.065	0.010	-0.038

62	-0.013	-0.795	0.027	-0.035	-0.003	0.008
63	0.012	-0.824	0.026	0.029	-0.002	-0.001
64	0.147	0.334	0.014	-0.073	0.012	0.042
65	0.173	0.538	0.002	-0.146	0.041	0.055
66	0.000	0.000	0.000	0.142	0.044	0.075
67	-0.214	0.682	0.004	-0.152	-0.034	-0.067
68	-0.055	-0.337	0.008	0.021	0.003	-0.006
69	-0.000	-1.111	0.009	-0.003	0.000	-0.003
70	0.057	-0.323	0.009	-0.027	0.003	0.002
71	0.215	0.685	0.004	0.146	-0.033	0.064
72	0.000	0.000	0.000	-0.140	0.044	-0.074
73	-0.177	0.549	-0.000	0.154	0.044	-0.058
74	-0.146	0.321	0.000	0.067	0.011	-0.040
75	-0.006	-0.929	0.000	-0.035	-0.002	0.005
76	0.006	-0.929	-0.000	0.035	-0.002	-0.005
77	0.146	0.321	-0.000	-0.067	0.011	0.040
78	0.177	0.549	0.000	-0.154	0.044	0.058
79	0.000	0.000	0.000	0.140	0.044	0.074
80	-0.215	0.685	-0.004	-0.146	-0.033	-0.064
81	-0.057	-0.323	-0.009	0.027	0.003	-0.002
82	0.000	-1.111	-0.009	0.003	0.000	0.003
83	0.055	-0.337	-0.008	-0.021	0.003	0.006
84	0.214	0.682	-0.004	0.152	-0.034	0.067
85	0.000	0.000	0.000	-0.142	0.044	-0.075
86	-0.173	0.538	-0.002	0.146	0.041	-0.055
87	-0.147	0.334	-0.014	0.073	0.012	-0.042
88	-0.012	-0.824	-0.026	-0.029	-0.002	0.001
89	0.013	-0.795	-0.027	0.035	-0.003	-0.008
90	0.156	0.385	-0.017	-0.065	0.010	0.038
91	0.173	0.538	-0.002	-0.151	0.042	0.057
92	0.000	0.000	0.000	0.122	0.038	0.064
93	-0.206	0.658	-0.011	-0.132	-0.029	-0.059
94	-0.069	-0.185	-0.043	0.021	0.003	-0.002
95	0.001	-0.889	-0.061	-0.000	0.001	0.003
96	0.066	-0.219	-0.045	-0.015	0.002	0.008
97	0.206	0.666	-0.013	0.151	-0.034	0.065
98	0.000	0.000	0.000	-0.132	0.041	-0.070
99	-0.153	0.478	-0.002	0.115	0.033	-0.042
100	-0.134	0.321	-0.039	0.074	0.013	-0.039
101	-0.016	-0.630	-0.093	-0.030	-0.002	0.004
102	0.020	-0.585	-0.095	0.018	-0.002	-0.002
103	0.147	0.396	-0.043	-0.066	0.010	0.037
104	0.141	0.441	-0.002	-0.133	0.037	0.051
105	0.000	0.000	0.000	0.080	0.025	0.042
106	-0.151	0.476	-0.015	-0.100	-0.022	-0.046
107	-0.051	-0.160	-0.093	0.004	0.002	-0.009
108	0.002	-0.716	-0.142	-0.019	0.001	-0.007
109	0.049	-0.195	-0.097	-0.014	0.001	0.003
110	0.156	0.512	-0.019	0.127	-0.029	0.052
111	0.000	0.000	0.000	-0.104	0.032	-0.055
112	-0.096	0.303	0.004	0.057	0.016	-0.019
113	-0.069	0.116	-0.054	0.056	0.010	-0.027
114	0.003	-0.617	-0.145	-0.036	-0.001	0.011
115	0.002	-0.573	-0.146	-0.006	-0.000	0.009
116	0.079	0.173	-0.056	-0.055	0.008	0.034
117	0.069	0.215	0.003	-0.088	0.025	0.036
118	0.000	0.000	0.000	0.028	0.009	0.014
119	-0.051	0.143	-0.008	-0.052	-0.011	-0.028
120	0.009	-0.364	-0.092	-0.002	0.000	-0.011
121	0.002	-0.776	-0.147	-0.027	-0.001	-0.012
122	-0.011	-0.400	-0.092	-0.021	0.001	-0.004
123	0.055	0.180	-0.007	0.072	-0.017	0.028
124	0.000	0.000	0.000	-0.055	0.017	-0.029
125	-0.020	0.064	0.010	0.004	0.001	-0.000
126	0.020	-0.194	-0.021	0.024	0.005	-0.014
127	0.033	-0.744	-0.084	-0.028	0.000	0.008
128	-0.028	-0.705	-0.083	-0.001	0.001	0.004
129	-0.014	-0.154	-0.017	-0.020	0.003	0.017
130	-0.003	-0.008	0.010	-0.029	0.008	0.014
131	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.000	-0.001
132	0.016	-0.070	0.015	-0.011	-0.003	-0.008
133	0.049	-0.458	-0.003	0.022	0.002	0.006
134	0.002	-0.740	-0.019	-0.004	-0.002	0.002
135	-0.056	-0.523	0.005	-0.019	0.001	-0.001

136	-0.023	-0.093	0.022	0.013	-0.003	0.007
137	0.000	0.000	0.000	-0.008	0.003	-0.003
138	0.015	-0.047	0.013	-0.005	-0.002	0.001
139	0.039	-0.218	0.040	0.023	0.004	-0.015
140	0.029	-0.494	0.053	0.002	0.001	-0.009
141	-0.025	-0.412	0.057	0.032	-0.001	-0.019
142	-0.020	-0.101	0.045	0.026	-0.004	-0.012
143	-0.006	-0.018	0.013	0.012	-0.003	-0.005
144	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.002	0.001
145	0.000	0.000	0.034	0.009	0.002	0.005
146	0.000	0.000	0.071	0.012	0.001	0.010
147	0.000	0.000	0.090	0.014	-0.000	0.017
148	0.000	0.000	0.068	0.025	-0.002	0.020
149	0.000	0.000	0.031	0.017	-0.003	0.010
150	0.000	0.000	0.000	0.008	-0.002	0.004

### Reações de Apoio:

nó	( kN )			( kN.cm )		
	Reação 1	Reação 2	Reação 3	Reação 4	Reação 5	Reação 6
2	0.728	0.168	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.537	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000
5	-0.537	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000
6	-0.712	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000
145	0.712	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000
146	0.537	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000
147	-0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000
148	-0.537	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000
149	-0.728	0.168	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.314	0.099	0.136	0.000	0.000	0.000
14	-0.127	-0.034	0.254	0.000	0.000	0.000
27	-0.076	-0.030	0.189	0.000	0.000	0.000
40	0.191	0.036	0.076	0.000	0.000	0.000
53	0.504	0.121	-0.014	0.000	0.000	0.000
66	0.675	0.170	-0.015	0.000	0.000	0.000
79	0.682	0.172	0.019	0.000	0.000	0.000
92	0.507	0.120	0.012	0.000	0.000	0.000
105	0.199	0.033	-0.078	0.000	0.000	0.000
118	-0.069	-0.033	-0.192	0.000	0.000	0.000
131	-0.114	-0.032	-0.252	0.000	0.000	0.000
144	0.311	0.101	-0.135	0.000	0.000	0.000
7	-0.311	0.101	0.135	0.000	0.000	0.000
20	0.114	-0.032	0.252	0.000	0.000	0.000
33	0.069	-0.033	0.192	0.000	0.000	0.000
46	-0.199	0.033	0.078	0.000	0.000	0.000
59	-0.507	0.120	-0.012	0.000	0.000	0.000
72	-0.682	0.172	-0.019	0.000	0.000	0.000
85	-0.675	0.170	0.015	0.000	0.000	0.000
98	-0.504	0.121	0.014	0.000	0.000	0.000
111	-0.191	0.036	-0.076	0.000	0.000	0.000
124	0.076	-0.030	-0.189	0.000	0.000	0.000
137	0.127	-0.034	-0.254	0.000	0.000	0.000
150	-0.314	0.099	-0.136	0.000	0.000	0.000
Total	-0.000	2.476	-0.000	0.000	0.000	0.000

# **ANEXO F**

**ANEXO F - RESULTADOS DO CÁLCULO DO ARCO DO PROTÓTIPO  
PARA AS TRÊS ETAPAS DO ENSAIO, OBTIDOS ATRAVÉS  
DO SOFTWARE SAPP**

---

SISTEMA PARA ANÁLISE DE PÓRTICOS PLANOS

VERSÃO 3.0 setembro/1989

autor: Rogério Giglio Ferreira

---

**UNIDADES: kN e cm.**

Carregamentos:

- 1 - 1ª ETAPA DE CARREGAMENTO
- 2 - 2ª ETAPA DE CARREGAMENTO
- 3 - 3ª ETAPA DE CARREGAMENTO

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 1

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.004959	0.011055	-0.000068
3	-0.001989	-0.012730	-0.000376
4	-0.001068	-0.036770	-0.000066
5	-0.000659	-0.022287	0.000313
6	0.002377	0.001796	0.000135
7	0.000000	0.000000	0.000000

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 2

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.007478	0.013788	-0.000314
3	0.001446	-0.049584	-0.000823
4	0.003195	-0.084689	0.000222
5	0.006610	-0.018901	0.000985
6	0.014639	0.039144	0.000087
7	0.000000	0.000000	0.000000

DESLOCAMENTOS DE NÓS - CARREGAMENTO : 3

no	desl.x	desl.y	rot.z
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.012081	0.026046	-0.000358
3	-0.000275	-0.055975	-0.001091
4	0.002584	-0.105860	0.000188
5	0.006837	-0.030464	0.001212
6	0.017661	0.045665	0.000165
7	0.000000	0.000000	0.000000

## REAÇÕES - CARREGAMENTO : 1

no	reação x	reação y	momento z
1	0.4710	0.1316	0.0000
7	-0.4760	0.1351	0.0000
TOTAL	-0.0050	0.2667	0.0000

## REAÇÕES - CARREGAMENTO : 2

no	reação x	reação y	momento z
1	0.9179	0.2426	0.0000
7	-0.9259	0.2411	0.0000
TOTAL	-0.0080	0.4837	0.0000

## REAÇÕES - CARREGAMENTO : 3

no	reação x	reação y	momento z
1	1.2128	0.3156	0.0000
7	-1.2288	0.3181	0.0000
TOTAL	-0.0160	0.6337	0.0000

## ESFORÇOS NAS BARRAS

barra carr.	Fx	Fy	Mz
1	0.4865	-0.0101	0.0000
	-0.4865	0.0101	-0.8914
2	0.9467	-0.0243	0.0000
	-0.9467	0.0243	-2.1340
3	1.2503	-0.0338	0.0000
	-1.2503	0.0338	-2.9743
2	0.2714	0.0100	0.8914
	-0.2714	-0.0100	-0.0085
	0.4513	0.0317	2.1340
	-0.4513	-0.0317	0.6515
	0.5150	0.0434	2.9743
	-0.5150	-0.0434	0.8382
3	0.1078	0.0105	0.0085
	-0.1078	-0.0105	0.9138
	0.0470	0.0199	-0.6515
	-0.0470	-0.0199	2.3951
	-0.0350	0.0234	-0.8382
	0.0350	-0.0234	2.8910

4	-----		
1	0.1046	-0.0082	-0.9138
	-0.1046	0.0082	0.1919
2	0.0505	-0.0292	-2.3951
	-0.0505	0.0292	-0.1688
3	-0.0345	-0.0318	-2.8910
	0.0345	0.0318	0.0970
5	-----		
1	0.2674	-0.0103	-0.1919
	-0.2674	0.0103	-0.7100
2	0.4523	-0.0259	0.1688
	-0.4523	0.0259	-2.4499
3	0.5139	-0.0369	-0.0970
	-0.5139	0.0369	-3.1477
6	-----		
1	0.4922	0.0081	0.7100
	-0.4922	-0.0081	0.0000
2	0.9540	0.0279	2.4499
	-0.9540	-0.0279	0.0000
3	1.2664	0.0358	3.1477
	-1.2664	-0.0358	0.0000

# **ANEXO G**

## ANEXO G - RESULTADOS DE CÁLCULO PARA MAPEAMENTO DE ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS.

### Esforços nas barras [Unidade: kN e cm]

Esforços na barra	1 (	6 -->	1) (L =	55.877) :		
51.775	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	
-51.775	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	
Esforços na barra	2 (	6 -->	10) (L =	55.877) :		
7.140	-3.853	0.001	0.811	-0.040	-215.271	
-7.140	3.853	-0.001	-0.811	0.000	0.000	
Esforços na barra	3 (	15 -->	10) (L =	55.877) :		
54.899	-0.010	0.002	-0.562	0.000	0.000	
-54.899	0.010	-0.002	0.562	-0.085	-0.578	
Esforços na barra	4 (	15 -->	19) (L =	55.877) :		
33.433	-1.783	-0.020	0.370	1.128	-99.603	
-33.433	1.783	0.020	-0.370	0.000	0.000	
Esforços na barra	5 (	24 -->	19) (L =	55.877) :		
53.341	-0.005	0.001	-0.257	0.000	0.000	
-53.341	0.005	-0.001	0.257	-0.039	-0.264	
Esforços na barra	6 (	24 -->	28) (L =	55.877) :		
50.482	-0.567	-0.006	0.104	0.333	-31.658	
-50.482	0.567	0.006	-0.104	0.000	0.000	
Esforços na barra	7 (	33 -->	28) (L =	55.877) :		
52.716	-0.001	0.000	-0.072	0.000	0.000	
-52.716	0.001	-0.000	0.072	-0.011	-0.074	
Esforços na barra	8 (	33 -->	37) (L =	55.877) :		
54.700	-0.275	-0.001	0.030	0.061	-15.364	
-54.700	0.275	0.001	-0.030	0.000	0.000	
Esforços na barra	9 (	42 -->	37) (L =	55.877) :		
52.957	-0.000	0.000	-0.021	0.000	0.000	
-52.957	0.000	-0.000	0.021	-0.003	-0.021	
Esforços na barra	10 (	42 -->	46) (L =	55.877) :		
55.921	-0.314	-0.001	0.021	0.063	-17.558	
-55.921	0.314	0.001	-0.021	0.000	0.000	
Esforços na barra	11 (	51 -->	46) (L =	55.877) :		
53.226	-0.000	0.000	-0.015	0.000	0.000	
-53.226	0.000	-0.000	0.015	-0.002	-0.015	
Esforços na barra	12 (	51 -->	55) (L =	55.877) :		
53.811	-0.460	-0.003	0.037	0.158	-25.675	
-53.811	0.460	0.003	-0.037	0.000	0.000	
Esforços na barra	13 (	60 -->	55) (L =	55.877) :		
53.298	-0.000	0.000	-0.026	0.000	0.000	
-53.298	0.000	-0.000	0.026	-0.004	-0.027	
Esforços na barra	14 (	60 -->	64) (L =	55.877) :		
53.069	-0.485	-0.003	0.044	0.181	-27.107	
-53.069	0.485	0.003	-0.044	0.000	0.000	
Esforços na barra	15 (	69 -->	64) (L =	55.877) :		
53.221	-0.001	0.000	-0.030	0.000	0.000	
-53.221	0.001	-0.000	0.030	-0.005	-0.031	
Esforços na barra	16 (	69 -->	73) (L =	55.877) :		
53.244	-0.471	-0.003	0.044	0.177	-26.299	
-53.244	0.471	0.003	-0.044	0.000	0.000	
Esforços na barra	17 (	78 -->	73) (L =	55.877) :		
52.921	-0.001	0.000	-0.031	0.000	0.000	
-52.921	0.001	-0.000	0.031	-0.005	-0.032	
Esforços na barra	18 (	78 -->	82) (L =	55.877) :		
53.497	-0.483	-0.003	0.048	0.192	-26.981	
-53.497	0.483	0.003	-0.048	0.000	0.000	

Esforços na barra	19 ( 87 --> 82)	(L =	55.877)	:		
52.677	-0.001	0.000	-0.033	0.000	0.000	
-52.677	0.001	-0.000	0.033	-0.005	-0.034	
Esforços na barra	20 ( 87 --> 91)	(L =	55.877)	:		
53.557	-0.495	-0.004	0.052	0.198	-27.661	
-53.557	0.495	0.004	-0.052	0.000	0.000	
Esforços na barra	21 ( 96 --> 91)	(L =	55.877)	:		
53.361	-0.001	0.000	-0.036	0.000	0.000	
-53.361	0.001	-0.000	0.036	-0.005	-0.037	
Esforços na barra	22 ( 96 --> 100)	(L =	55.877)	:		
53.484	-0.434	-0.002	0.040	0.133	-24.230	
-53.484	0.434	0.002	-0.040	0.000	0.000	
Esforços na barra	23 ( 105 --> 100)	(L =	55.877)	:		
55.148	-0.001	0.000	-0.027	0.000	0.000	
-55.148	0.001	-0.000	0.027	-0.004	-0.028	
Esforços na barra	24 ( 105 --> 109)	(L =	55.877)	:		
53.234	-0.351	-0.001	0.012	0.069	-19.601	
-53.234	0.351	0.001	-0.012	0.000	0.000	
Esforços na barra	25 ( 114 --> 109)	(L =	55.877)	:		
52.883	-0.000	0.000	-0.008	0.000	0.000	
-52.883	0.000	-0.000	0.008	-0.001	-0.008	
Esforços na barra	26 ( 114 --> 118)	(L =	55.877)	:		
53.116	-0.611	-0.007	0.034	0.418	-34.137	
-53.116	0.611	0.007	-0.034	0.000	0.000	
Esforços na barra	27 ( 123 --> 118)	(L =	55.877)	:		
49.922	-0.000	0.000	-0.024	0.000	0.000	
-49.922	0.000	-0.000	0.024	-0.004	-0.024	
Esforços na barra	28 ( 123 --> 127)	(L =	55.877)	:		
53.974	-1.144	-0.015	0.108	0.829	-63.913	
-53.974	1.144	0.015	-0.108	0.000	0.000	
Esforços na barra	29 ( 132 --> 127)	(L =	55.877)	:		
35.185	-0.001	0.000	-0.075	0.000	0.000	
-35.185	0.001	-0.000	0.075	-0.011	-0.077	
Esforços na barra	30 ( 132 --> 136)	(L =	55.877)	:		
56.278	-2.192	-0.034	0.259	1.899	-122.460	
-56.278	2.192	0.034	-0.259	0.000	0.000	
Esforços na barra	31 ( 141 --> 136)	(L =	55.877)	:		
15.973	-0.003	0.000	-0.180	0.000	0.000	
-15.973	0.003	-0.000	0.180	-0.027	-0.185	
Esforços na barra	32 ( 141 --> 145)	(L =	55.877)	:		
54.215	-1.524	-0.034	-0.000	1.878	-85.152	
-54.215	1.524	0.034	0.000	0.000	0.000	
Esforços na barra	33 ( 2 --> 6)	(L =	55.877)	:		
3.983	3.844	-0.014	-1.275	0.000	0.000	
-3.983	-3.844	0.014	1.275	0.784	214.766	
Esforços na barra	34 ( 11 --> 6)	(L =	55.877)	:		
51.697	-3.548	0.024	-0.695	-1.332	-198.266	
-51.697	3.548	-0.024	0.695	0.000	0.000	
Esforços na barra	35 ( 11 --> 15)	(L =	55.877)	:		
31.019	1.783	0.015	-0.721	0.000	0.000	
-31.019	-1.783	-0.015	0.721	-0.857	99.611	
Esforços na barra	36 ( 20 --> 15)	(L =	55.877)	:		
53.962	-2.239	0.008	-0.544	-0.461	-125.133	
-53.962	2.239	-0.008	0.544	0.000	0.000	
Esforços na barra	37 ( 20 --> 24)	(L =	55.877)	:		
48.493	0.566	0.004	-0.207	0.000	0.000	
-48.493	-0.566	-0.004	0.207	-0.251	31.621	
Esforços na barra	38 ( 29 --> 24)	(L =	55.877)	:		
51.956	-1.276	0.004	-0.305	-0.232	-71.314	
-51.956	1.276	-0.004	0.305	0.000	0.000	
Esforços na barra	39 ( 29 --> 33)	(L =	55.877)	:		
52.808	0.273	0.000	-0.064	0.000	0.000	
-52.808	-0.273	-0.000	0.064	-0.012	15.276	

Esforços na barra	40 ( 38 --> 33)	(L = 55.877) :			
51.228	-1.031	-0.000	-0.193	0.001	-57.602
-51.228	1.031	0.000	0.193	0.000	0.000
Esforços na barra	41 ( 38 --> 42)	(L = 55.877) :			
53.989	0.312	0.000	-0.072	0.000	0.000
-53.989	-0.312	-0.000	0.072	-0.001	17.443
Esforços na barra	42 ( 47 --> 42)	(L = 55.877) :			
51.495	-1.246	0.004	-0.179	-0.226	-69.639
-51.495	1.246	-0.004	0.179	0.000	0.000
Esforços na barra	43 ( 47 --> 51)	(L = 55.877) :			
51.829	0.457	0.001	-0.124	0.000	0.000
-51.829	-0.457	-0.001	0.124	-0.068	25.541
Esforços na barra	44 ( 56 --> 51)	(L = 55.877) :			
51.817	-1.361	0.005	-0.201	-0.291	-76.046
-51.817	1.361	-0.005	0.201	0.000	0.000
Esforços na barra	45 ( 56 --> 60)	(L = 55.877) :			
51.083	0.483	0.002	-0.135	0.000	0.000
-51.083	-0.483	-0.002	0.135	-0.087	26.974
Esforços na barra	46 ( 65 --> 60)	(L = 55.877) :			
51.897	-1.349	0.005	-0.209	-0.264	-75.367
-51.897	1.349	-0.005	0.209	0.000	0.000
Esforços na barra	47 ( 65 --> 69)	(L = 55.877) :			
51.263	0.468	0.002	-0.129	0.000	0.000
-51.263	-0.468	-0.002	0.129	-0.086	26.171
Esforços na barra	48 ( 74 --> 69)	(L = 55.877) :			
51.814	-1.329	0.004	-0.207	-0.239	-74.282
-51.814	1.329	-0.004	0.207	0.000	0.000
Esforços na barra	49 ( 74 --> 78)	(L = 55.877) :			
51.511	0.481	0.002	-0.132	0.000	0.000
-51.511	-0.481	-0.002	0.132	-0.099	26.852
Esforços na barra	50 ( 83 --> 78)	(L = 55.877) :			
51.518	-1.349	0.004	-0.208	-0.251	-75.395
-51.518	1.349	-0.004	0.208	0.000	0.000
Esforços na barra	51 ( 83 --> 87)	(L = 55.877) :			
51.567	0.493	0.002	-0.134	0.000	0.000
-51.567	-0.493	-0.002	0.134	-0.103	27.531
Esforços na barra	52 ( 92 --> 87)	(L = 55.877) :			
51.278	-1.356	0.005	-0.213	-0.253	-75.775
-51.278	1.356	-0.005	0.213	0.000	0.000
Esforços na barra	53 ( 92 --> 96)	(L = 55.877) :			
51.516	0.432	0.001	-0.122	0.000	0.000
-51.516	-0.432	-0.001	0.122	-0.051	24.111
Esforços na barra	54 ( 101 --> 96)	(L = 55.877) :			
51.941	-1.292	0.003	-0.201	-0.186	-72.188
-51.941	1.292	-0.003	0.201	0.000	0.000
Esforços na barra	55 ( 101 --> 105)	(L = 55.877) :			
51.285	0.349	0.000	-0.124	0.000	0.000
-51.285	-0.349	-0.000	0.124	-0.005	19.506
Esforços na barra	56 ( 110 --> 105)	(L = 55.877) :			
53.702	-1.273	0.002	-0.158	-0.121	-71.118
-53.702	1.273	-0.002	0.158	0.000	0.000
Esforços na barra	57 ( 110 --> 114)	(L = 55.877) :			
51.068	0.609	0.005	-0.240	0.000	0.000
-51.068	-0.609	-0.005	0.240	-0.306	34.040
Esforços na barra	58 ( 119 --> 114)	(L = 55.877) :			
51.530	-1.566	0.003	-0.142	-0.192	-87.505
-51.530	1.566	-0.003	0.142	0.000	0.000
Esforços na barra	59 ( 119 --> 123)	(L = 55.877) :			
51.674	1.142	0.011	-0.460	0.000	0.000
-51.674	-1.142	-0.011	0.460	-0.622	63.793
Esforços na barra	60 ( 128 --> 123)	(L = 55.877) :			
48.790	-2.430	0.010	-0.190	-0.556	-135.784
-48.790	2.430	-0.010	0.190	0.000	0.000

Esforços na barra	61 ( 128 --> 132)	(L =	55.877)	:		
53.578	2.187	0.027	-0.753	0.000	0.000	
-53.578	-2.187	-0.027	0.753	-1.494	122.184	
Esforços na barra	62 ( 137 --> 132)	(L =	55.877)	:		
34.450	-3.343	-0.011	-0.461	0.587	-186.817	
-34.450	3.343	0.011	0.461	0.000	0.000	
Esforços na barra	63 ( 137 --> 141)	(L =	55.877)	:		
52.260	1.523	0.029	-0.785	0.000	0.000	
-52.260	-1.523	-0.029	0.785	-1.637	85.098	
Esforços na barra	64 ( 146 --> 141)	(L =	55.877)	:		
14.759	0.005	0.000	-0.254	-0.008	0.267	
-14.759	-0.005	-0.000	0.254	0.000	0.000	
Esforços na barra	65 ( 7 --> 2)	(L =	55.877)	:		
47.065	-0.016	0.003	-0.878	0.000	0.000	
-47.065	0.016	-0.003	0.878	-0.176	-0.907	
Esforços na barra	66 ( 7 --> 11)	(L =	55.877)	:		
30.970	-3.224	0.006	0.459	-0.339	-180.168	
-30.970	3.224	-0.006	-0.459	0.000	0.000	
Esforços na barra	67 ( 16 --> 11)	(L =	55.877)	:		
49.514	3.533	-0.016	-0.089	0.000	0.000	
-49.514	-3.533	0.016	0.089	0.921	197.424	
Esforços na barra	68 ( 16 --> 20)	(L =	55.877)	:		
48.057	-3.701	0.006	0.257	-0.321	-206.790	
-48.057	3.701	-0.006	-0.257	0.000	0.000	
Esforços na barra	69 ( 25 --> 20)	(L =	55.877)	:		
52.029	2.234	-0.004	0.068	0.000	0.000	
-52.029	-2.234	0.004	-0.068	0.229	124.802	
Esforços na barra	70 ( 25 --> 29)	(L =	55.877)	:		
52.071	-2.291	-0.011	0.144	0.618	-127.999	
-52.071	2.291	0.011	-0.144	0.000	0.000	
Esforços na barra	71 ( 34 --> 29)	(L =	55.877)	:		
50.377	1.274	-0.002	0.086	0.000	0.000	
-50.377	-1.274	0.002	-0.086	0.108	71.166	
Esforços na barra	72 ( 34 --> 38)	(L =	55.877)	:		
53.204	-1.805	-0.003	0.187	0.195	-100.841	
-53.204	1.805	0.003	-0.187	0.000	0.000	
Esforços na barra	73 ( 43 --> 38)	(L =	55.877)	:		
49.720	1.028	0.002	0.078	0.000	0.000	
-49.720	-1.028	-0.002	-0.078	-0.101	57.416	
Esforços na barra	74 ( 43 --> 47)	(L =	55.877)	:		
51.104	-1.910	-0.002	0.239	0.091	-106.739	
-51.104	1.910	0.002	-0.239	0.000	0.000	
Esforços na barra	75 ( 52 --> 47)	(L =	55.877)	:		
49.931	1.242	-0.002	0.092	0.000	0.000	
-49.931	-1.242	0.002	-0.092	0.103	69.378	
Esforços na barra	76 ( 52 --> 56)	(L =	55.877)	:		
50.388	-2.073	-0.003	0.250	0.143	-115.840	
-50.388	2.073	0.003	-0.250	0.000	0.000	
Esforços na barra	77 ( 61 --> 56)	(L =	55.877)	:		
50.217	1.356	-0.003	0.098	0.000	0.000	
-50.217	-1.356	0.003	-0.098	0.157	75.770	
Esforços na barra	78 ( 61 --> 65)	(L =	55.877)	:		
50.565	-2.088	-0.003	0.244	0.195	-116.663	
-50.565	2.088	0.003	-0.244	0.000	0.000	
Esforços na barra	79 ( 70 --> 65)	(L =	55.877)	:		
50.299	1.344	-0.002	0.095	0.000	0.000	
-50.299	-1.344	0.002	-0.095	0.131	75.099	
Esforços na barra	80 ( 70 --> 74)	(L =	55.877)	:		
50.810	-2.053	-0.003	0.242	0.189	-114.688	
-50.810	2.053	0.003	-0.242	0.000	0.000	
Esforços na barra	81 ( 79 --> 74)	(L =	55.877)	:		
50.221	1.325	-0.002	0.091	0.000	0.000	
-50.221	-1.325	0.002	-0.091	0.107	74.014	

Esforços na barra	82 ( 79 --> 83)	(L = 55.877) :			
50.872	-2.057	-0.003	0.246	0.181	-114.962
-50.872	2.057	0.003	-0.246	0.000	0.000
Esforços na barra	83 ( 88 --> 83)	(L = 55.877) :			
49.921	1.344	-0.002	0.093	0.000	0.000
-49.921	-1.344	0.002	-0.093	0.117	75.122
Esforços na barra	84 ( 88 --> 92)	(L = 55.877) :			
50.817	-2.105	-0.004	0.248	0.215	-117.597
-50.817	2.105	0.004	-0.248	0.000	0.000
Esforços na barra	85 ( 97 --> 92)	(L = 55.877) :			
49.681	1.351	-0.002	0.098	0.000	0.000
-49.681	-1.351	0.002	-0.098	0.120	75.510
Esforços na barra	86 ( 97 --> 101)	(L = 55.877) :			
50.564	-2.099	-0.005	0.242	0.252	-117.305
-50.564	2.099	0.005	-0.242	0.000	0.000
Esforços na barra	87 ( 106 --> 101)	(L = 55.877) :			
50.362	1.287	-0.001	0.091	0.000	0.000
-50.362	-1.287	0.001	-0.091	0.058	71.925
Esforços na barra	88 ( 106 --> 110)	(L = 55.877) :			
50.370	-1.947	-0.003	0.234	0.180	-108.769
-50.370	1.947	0.003	-0.234	0.000	0.000
Esforços na barra	89 ( 115 --> 110)	(L = 55.877) :			
52.117	1.267	0.000	0.057	0.000	0.000
-52.117	-1.267	-0.000	-0.057	-0.017	70.778
Esforços na barra	90 ( 115 --> 119)	(L = 55.877) :			
51.103	-1.851	0.001	0.244	-0.082	-103.401
-51.103	1.851	-0.001	-0.244	0.000	0.000
Esforços na barra	91 ( 124 --> 119)	(L = 55.877) :			
49.851	1.557	-0.000	0.036	0.000	0.000
-49.851	-1.557	0.000	-0.036	0.007	87.002
Esforços na barra	92 ( 124 --> 128)	(L = 55.877) :			
53.313	-2.451	-0.008	0.226	0.465	-136.944
-53.313	2.451	0.008	-0.226	0.000	0.000
Esforços na barra	93 ( 133 --> 128)	(L = 55.877) :			
46.834	2.418	-0.005	0.140	0.000	0.000
-46.834	-2.418	0.005	-0.140	0.271	135.084
Esforços na barra	94 ( 133 --> 137)	(L = 55.877) :			
52.203	-3.449	-0.010	0.132	0.536	-192.745
-52.203	3.449	0.010	-0.132	0.000	0.000
Esforços na barra	95 ( 142 --> 137)	(L = 55.877) :			
32.280	3.332	0.017	0.419	0.000	0.000
-32.280	-3.332	-0.017	-0.419	-0.950	186.160
Esforços na barra	96 ( 142 --> 146)	(L = 55.877) :			
47.843	-2.873	-0.027	-0.368	1.487	-160.525
-47.843	2.873	0.027	0.368	0.000	0.000
Esforços na barra	97 ( 3 --> 7)	(L = 55.877) :			
29.941	3.236	-0.006	-0.879	0.000	0.000
-29.941	-3.236	0.006	0.879	0.318	180.805
Esforços na barra	98 ( 12 --> 7)	(L = 55.877) :			
46.846	-3.849	0.008	0.010	-0.465	-215.046
-46.846	3.849	-0.008	-0.010	0.000	0.000
Esforços na barra	99 ( 12 --> 16)	(L = 55.877) :			
46.853	3.699	-0.007	-0.477	0.000	0.000
-46.853	-3.699	0.007	0.477	0.375	206.694
Esforços na barra	100 ( 21 --> 16)	(L = 55.877) :			
49.648	-3.099	0.003	-0.221	-0.181	-173.159
-49.648	3.099	-0.003	0.221	0.000	0.000
Esforços na barra	101 ( 21 --> 25)	(L = 55.877) :			
51.103	2.287	0.010	-0.075	0.000	0.000
-51.103	-2.287	-0.010	0.075	-0.567	127.776
Esforços na barra	102 ( 30 --> 25)	(L = 55.877) :			
51.874	-2.195	-0.006	-0.242	0.322	-122.644
-51.874	2.195	0.006	0.242	0.000	0.000

Esforços na barra 103 ( 30 --> 34) (L = 55.877) :						
52.323	1.801	0.003	0.006	0.000	0.000	
-52.323	-1.801	-0.003	-0.006	-0.146		100.644
Esforços na barra 104 ( 39 --> 34) (L = 55.877) :						
50.102	-2.132	0.000	-0.188	-0.025		-119.108
-50.102	2.132	-0.000	0.188	0.000		0.000
Esforços na barra 105 ( 39 --> 43) (L = 55.877) :						
50.211	1.907	0.001	0.001	0.000		0.000
-50.211	-1.907	-0.001	-0.001	-0.038		106.568
Esforços na barra 106 ( 48 --> 43) (L = 55.877) :						
49.441	-2.327	0.002	-0.161	-0.096		-130.030
-49.441	2.327	-0.002	0.161	0.000		0.000
Esforços na barra 107 ( 48 --> 52) (L = 55.877) :						
49.472	2.070	0.002	-0.007	0.000		0.000
-49.472	-2.070	-0.002	0.007	-0.085		115.657
Esforços na barra 108 ( 57 --> 52) (L = 55.877) :						
49.683	-2.391	0.001	-0.163	-0.045		-133.602
-49.683	2.391	-0.001	0.163	0.000		0.000
Esforços na barra 109 ( 57 --> 61) (L = 55.877) :						
49.645	2.084	0.002	-0.003	0.000		0.000
-49.645	-2.084	-0.002	0.003	-0.136		116.471
Esforços na barra 110 ( 66 --> 61) (L = 55.877) :						
49.979	-2.350	-0.000	-0.169	0.000		-131.321
-49.979	2.350	0.000	0.169	0.000		0.000
Esforços na barra 111 ( 66 --> 70) (L = 55.877) :						
49.894	2.049	0.002	-0.000	0.000		0.000
-49.894	-2.049	-0.002	0.000	-0.132		114.499
Esforços na barra 112 ( 75 --> 70) (L = 55.877) :						
50.057	-2.323	0.000	-0.167	-0.008		-129.777
-50.057	2.323	-0.000	0.167	0.000		0.000
Esforços na barra 113 ( 75 --> 79) (L = 55.877) :						
49.955	2.054	0.002	-0.003	0.000		0.000
-49.955	-2.054	-0.002	0.003	-0.123		114.778
Esforços na barra 114 ( 84 --> 79) (L = 55.877) :						
49.978	-2.350	0.000	-0.165	-0.016		-131.324
-49.978	2.350	-0.000	0.165	0.000		0.000
Esforços na barra 115 ( 84 --> 88) (L = 55.877) :						
49.893	2.101	0.003	-0.004	0.000		0.000
-49.893	-2.101	-0.003	0.004	-0.156		117.409
Esforços na barra 116 ( 93 --> 88) (L = 55.877) :						
49.683	-2.391	-0.001	-0.169	0.029		-133.600
-49.683	2.391	0.001	0.169	0.000		0.000
Esforços na barra 117 ( 93 --> 97) (L = 55.877) :						
49.644	2.096	0.003	0.001	0.000		0.000
-49.644	-2.096	-0.003	-0.001	-0.193		117.111
Esforços na barra 118 ( 102 --> 97) (L = 55.877) :						
49.443	-2.327	-0.001	-0.172	0.079		-130.027
-49.443	2.327	0.001	0.172	0.000		0.000
Esforços na barra 119 ( 102 --> 106) (L = 55.877) :						
49.474	1.944	0.002	-0.003	0.000		0.000
-49.474	-1.944	-0.002	0.003	-0.125		108.597
Esforços na barra 120 ( 111 --> 106) (L = 55.877) :						
50.106	-2.132	-0.000	-0.148	0.006		-119.151
-50.106	2.132	0.000	0.148	0.000		0.000
Esforços na barra 121 ( 111 --> 115) (L = 55.877) :						
50.210	1.849	-0.002	-0.059	0.000		0.000
-50.210	-1.849	0.002	0.059	0.131		103.293
Esforços na barra 122 ( 120 --> 115) (L = 55.877) :						
51.856	-2.197	0.006	-0.092	-0.345		-122.767
-51.856	2.197	-0.006	0.092	0.000		0.000
Esforços na barra 123 ( 120 --> 124) (L = 55.877) :						
52.313	2.449	0.007	-0.164	0.000		0.000
-52.313	-2.449	-0.007	0.164	-0.411		136.847

Esforços na barra 124 ( 129 --> 124) (L =	55.877) :					
49.657	-3.102	-0.003	-0.099	0.149	-173.303	
-49.657	3.102	0.003	0.099	0.000	0.000	
Esforços na barra 125 ( 129 --> 133) (L =	55.877) :					
51.038	3.444	0.008	-0.275	0.000	0.000	
-51.038	-3.444	-0.008	0.275	-0.467	192.450	
Esforços na barra 126 ( 138 --> 133) (L =	55.877) :					
46.817	-3.844	-0.008	-0.270	0.423	-214.799	
-46.817	3.844	0.008	0.270	0.000	0.000	
Esforços na barra 127 ( 138 --> 142) (L =	55.877) :					
46.901	2.860	0.026	-0.134	0.000	0.000	
-46.901	-2.860	-0.026	0.134	-1.431	159.787	
Esforços na barra 128 ( 147 --> 142) (L =	55.877) :					
32.274	0.011	0.001	-0.606	-0.070	0.633	
-32.274	-0.011	-0.001	0.606	0.000	0.000	

### Deslocamentos dos nós

Nó	Desloc.1	Desloc.2	Desloc.3	Desloc.4	Desloc.5	Desloc.6
1	0.000	0.000	0.000	-0.008	-0.002	-0.006
2	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.000	-0.010
3	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	-0.007
6	0.012	-0.134	-0.064	-0.012	-0.004	0.006
7	0.035	-0.438	-0.057	0.001	-0.001	0.006
10	0.000	0.000	0.000	-0.009	-0.003	-0.012
11	0.092	-0.646	-0.087	0.001	-0.000	-0.007
12	-0.004	-0.830	-0.053	0.005	-0.001	-0.003
15	0.086	-0.382	-0.031	-0.006	-0.001	-0.004
16	0.059	-0.917	-0.052	-0.000	0.001	-0.001
19	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.002	-0.009
20	0.107	-0.743	-0.015	0.001	-0.001	-0.005
21	-0.007	-1.054	-0.024	0.002	-0.001	0.000
24	0.079	-0.388	-0.004	-0.002	-0.000	-0.006
25	0.064	-0.951	0.010	-0.001	0.001	-0.003
28	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
29	0.086	-0.686	0.008	0.001	-0.001	-0.004
30	-0.004	-1.009	0.029	0.001	-0.001	0.001
33	0.062	-0.350	0.003	-0.001	0.000	-0.006
34	0.051	-0.895	0.022	-0.001	0.000	-0.003
37	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.001	-0.007
38	0.074	-0.652	0.011	0.001	-0.000	-0.005
39	-0.002	-0.970	0.013	0.000	-0.000	0.000
42	0.055	-0.335	0.004	-0.001	0.000	-0.006
43	0.051	-0.883	0.004	-0.001	0.000	-0.003
46	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.001	-0.007
47	0.077	-0.659	0.001	0.001	-0.000	-0.005
48	-0.001	-0.976	-0.003	0.000	-0.000	-0.000
51	0.060	-0.343	0.001	-0.001	0.000	-0.006
52	0.055	-0.897	-0.003	-0.001	0.000	-0.002
55	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
56	0.082	-0.670	-0.002	0.001	-0.000	-0.005
57	-0.001	-0.988	-0.004	0.000	-0.000	-0.000
60	0.063	-0.350	-0.000	-0.001	0.000	-0.006
61	0.057	-0.905	-0.002	-0.001	0.000	-0.003
64	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
65	0.083	-0.673	-0.001	0.001	-0.000	-0.005
66	-0.000	-0.989	-0.001	0.000	-0.000	0.000
69	0.063	-0.350	0.000	-0.001	0.000	-0.006
70	0.056	-0.904	0.000	-0.001	0.000	-0.003
73	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
74	0.083	-0.673	-0.000	0.001	-0.000	-0.005

75	0.000	-0.988	0.000	0.000	-0.000	0.000
78	0.063	-0.351	0.001	-0.001	0.000	-0.006
79	0.057	-0.905	0.001	-0.001	0.000	-0.002
82	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
83	0.084	-0.675	0.001	0.001	-0.000	-0.005
84	0.000	-0.989	0.001	-0.000	-0.000	-0.000
87	0.064	-0.352	0.001	-0.001	0.000	-0.006
88	0.057	-0.906	0.003	-0.001	0.000	-0.002
91	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
92	0.083	-0.673	0.002	0.001	-0.000	-0.005
93	0.001	-0.988	0.004	-0.000	-0.000	0.000
96	0.062	-0.349	0.000	-0.001	0.000	-0.006
97	0.057	-0.901	0.004	-0.001	0.000	-0.003
100	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.007
101	0.080	-0.665	-0.000	0.001	-0.000	-0.005
102	0.001	-0.976	0.003	-0.000	-0.000	0.000
105	0.059	-0.342	-0.003	-0.001	0.000	-0.006
106	0.055	-0.892	-0.003	-0.001	0.000	-0.002
109	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.008
110	0.079	-0.669	-0.008	0.001	-0.000	-0.005
111	0.002	-0.970	-0.013	-0.000	-0.000	-0.000
114	0.064	-0.354	0.000	-0.003	-0.000	-0.005
115	0.057	-0.909	-0.019	-0.002	0.000	-0.002
118	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.002	-0.009
119	0.096	-0.714	-0.004	-0.000	-0.001	-0.006
120	0.004	-1.009	-0.029	-0.001	-0.001	-0.001
123	0.081	-0.395	0.006	-0.006	-0.001	-0.005
124	0.075	-0.969	-0.005	-0.003	0.000	-0.001
127	0.000	0.000	0.000	-0.007	-0.003	-0.012
128	0.113	-0.754	0.008	-0.002	-0.001	-0.006
129	0.007	-1.054	0.024	-0.002	-0.001	-0.000
132	0.110	-0.451	0.030	-0.010	-0.003	-0.003
133	0.071	-0.948	0.042	-0.006	0.000	-0.002
136	0.000	0.000	0.000	-0.010	-0.005	-0.012
137	0.091	-0.598	0.065	-0.005	-0.002	-0.003
138	0.004	-0.830	0.053	-0.005	-0.001	0.003
141	0.087	-0.353	0.055	-0.013	-0.004	0.000
142	0.044	-0.516	0.052	-0.009	-0.001	-0.004
145	0.000	0.000	0.000	-0.013	-0.006	-0.002
146	0.000	0.000	0.000	-0.011	-0.002	0.002
147	0.000	0.000	0.000	-0.007	0.000	0.007

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). **NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, ABNT. 110p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7190 – Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, ABNT. 22p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, ABNT. 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios**. Rio de Janeiro, ABNT. 200p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRAS (1990). **Catálogo de normas de madeira serrada de Pinus**. Caxias do Sul, Spectrum Comunicação Ltda. 35p.
- BLASS H.J. et al. (1995). **Structural timber engineering practice STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints**. The Netherlands, Almere, Centrum Hout. Parte B, v.1, Cap.7, p.1-8: Buckling lengths.
- BUFFALO bisons: peace bridge arena. (1928). <http://www.bhw.buffnet.net/bison/hockey/Pbarena.htm>. (10 Nov. 1998).
- CALLIA, E. (1951). Estruturas lamelares. **Revista Politécnica**. São Paulo, v.47, n.162, p.83-91, jul/ago.
- CASSIE, W.F.; NAPPER, J.H. (1958). **Structures in building**. London, The Architectural Press. p.218-257.
- CESAR, S.F. (1991). **As estruturas Hauff de madeira no Brasil**. São Carlos. 203p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CORPORATION OF MONTGOMERY. (1975). **Louisiana superdome**. <http://neworleansonline.com/arc-cbd.htm>. (10 Nov. 1998).

- CRANE, T. (1955). **Architectural construction**. New York, John Wiley & Sons. Cap.6, p.192-245: Wide-span designs.
- DE JESUS, J.M.H. (1999). **O estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada**. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /no prelo/
- ESTRUTURA lamelar (1951). **Revista Politécnica**. São Paulo, v.47, n.160, p.11, mar/abr.
- GRANDI, S.L. (1985). **Desenvolvimento da indústria da construção no Brasil**. São Paulo. 298p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- HOLTZBAUTEN in Nordrhein – Westfalen (1997). **Informationsdienst HOLZ**. Düsseldorf, Deutschland.
- HUNTINGTON, W.C.; MICKADEIT, R.E. (1975). **Building construction**. 4.ed. John Wiley & Sons, New York. p.304-306: Lamella arches.
- KARLSEN, G.G. et al. (1976). **Wooden structures**. Moscow, Mir Publ. Parte VIII, Cap.2, p.372-393: Segmental-lattice vaults.
- KIEWITT, G.R.; SOHRMANN, H.M. (1929). **In danger: the Arena**. <http://www.stlouis.missouri.org/501c/landmarks/arena.html>. (10 Nov. 1998).
- LOTHERS, J.E. (1971). **Cálculo superior de estructuras de acero**. 3.ed. México, Compañía Editorial Continental. p.254-283: El techo lamella.
- MAKOWSKI, Z.S. (1984). **Analysis, design and construction of braced domes**. New York, Nichols Publishing Company. Cap.1, p.29-32: A history of the development of domes and a review of recent achievements world-wide.
- MAKOWSKI, Z.S. (1985). **Analysis, design and construction of braced barrel vaults**. New York, Elsevier Applied Science Publishers. Cap.1, p.1-35: History of development of various types of braces barrel vaults and review of recent achievements all over the world.
- MATSUSHITA, F. (1984). Diamond dome systems. In: MAKOWSKI, Z.S. **Analysis, design and construction of braced domes**. New York, Nichols Publishing Company. Cap.17, p.487-520.
- MOLITERNO, A. (1981). **Caderno de projetos e telhados em estruturas de madeira**. São Paulo, Edgard Blücher. p.222-223: Abóbadas lamelares.
- NATTERER, J.; HERZOG, T.; VOLZ, M. (1994). **Construire en bois 2**. Lausanne, Suisse, Presses polytechniques et universitaires romandes. Cap.4, p.140-278: Exemples construits structures.

- NERVI, P.L. (1963). **Nuevas estructuras**. Barcelona, Gustavo Gili. 168p.
- OBRA Ultragás (1952). **Revista Politécnica**. São Paulo, v.48, n.165, p.70, mar/abr.
- PISSARENKO, G.S.; LAKOVLEV, A.P.; MATVEIEV, V.V. (1985). **Prontuário de resistência de materiais**. Traduzido por Anatóli Kutchúmov, U.R.S.S., Editora Mir, 682p.
- SAAD, N.S. (1996). **Avaliação e automatização do cálculo de estruturas lamelares**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia. 120p. [Relatório de Iniciação Científica - Universidade Federal de Uberlândia].
- SCHEER, C; PURNOMO, J. (1985). Recent research on timber lamella barrel vaults. In: MAKOWSKI, Z.S. **Analysis, design and construction of braced barrel vaults**. New York, Elsevier Applied Science Publishers. Cap.21, p.340-353.
- VON BÜREN, C. (1985). **Funktion & form**. Alemanha, Birk Häuser Verlag Basel, p.46;47: Architekt und ingenieur: ingenieur – architektur.
- WILSON, E.L. (1992). **Structural analysis programs**. California, Computers & Structures Inc. /Software version 5.04/.
- ZEMAN, J. (1985). Design and construction of steel barrel vaults for buildings of medium and large spans. In: MAKOWSKI, Z.S. **Analysis, design and construction of braced barrel vaults**. New York, Elsevier Applied Science Publishers. Cap.17, p.259-281.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

---

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 6120 – Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro, ABNT. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7196 – Telhas de Fibrocimento – Execução de coberturas e fechamentos laterais – Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT. [Projeto de Norma (em votação)].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas**. Rio de Janeiro, ABNT. 22p.
- CALIL JUNIOR, C. (1994). **Treliças de madeira para coberturas**. São Carlos, serviço gráfico – EESC. 79p.
- DARKOV, A. (1979). **Structural mechanics**. 3.ed. Moscow, Mir Publ. 286p.
- PÁRRAGA, A.M.S. (1984). **Manual de clasificación visual para madera estructural**. 2.ed. Lima, Junta Del Acuerdo de Cartagena. 74p.
- PRZEMIENIECKI, J.S. (1968). **Theory of matrix structural analysis**. New York, McGraw-Hill. 468p.
- RUBINSTEIN, M.F. (1966). **Matrix computer analysis structures**. New Jersey, Prentice-Hall. 402p.
- WEAVER, W.; GERE, J.M. (1980). **Matrix analysis of framed structures**. 2.ed. New York, Van Nostrand Reinhold Co. 492p.

# APÊNDICE I

## APÊNDICE I - UTILIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

### I.1 PREPARO DA ESTRUTURA

O protótipo lamelar foi utilizado como cobertura entre o prédio do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira e a oficina de processamento da madeira, **Figura 1**.

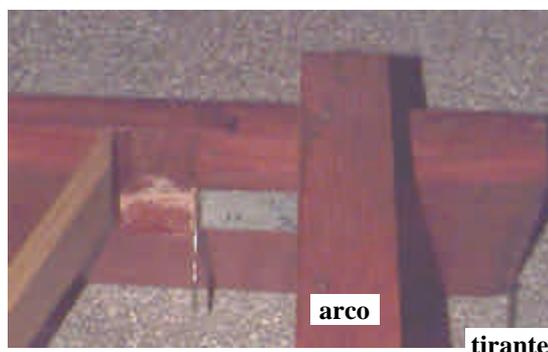


**FIGURA 1** – Vista global do protótipo utilizado como cobertura entre o prédio principal do LaMEM e a oficina de processamento da madeira do LaMEM.

Como o protótipo havia sido montado dentro do LaMEM e não era possível transportá-lo para fora montado, foi necessário desmontá-lo, e isso foi feito dividindo-o em duas partes, ao longo da geratriz da abóbada. Primeiramente, as lamelas foram desparafusadas dos arcos; depois, foram tirados os tirantes e em seguida, os arcos, **Figura 2**.



a) Desconexão das lamelas nos arcos.



b) Retirada dos tirantes e dos arcos.

**FIGURA 2** – Etapas iniciais para a desmontagem da malha.

Antes de se desparafusarem as lamelas ao longo da geratriz da abóbada, foram utilizados sarrafos para manterem a posição dos nós da malha, para que não fossem prejudicadas as ligações das lamelas com as vigas ao se desmontar a malha. Estes sarrafos foram amarrados com arames em duas fileiras paralelas à geratriz, **Figura 3**.



a) Sarrafos fixados em duas fileiras da malha.



b) Detalhe da fixação dos sarrafos.



c) Vista global do protótipo desmontado.



d) Transporte de meia estrutura.

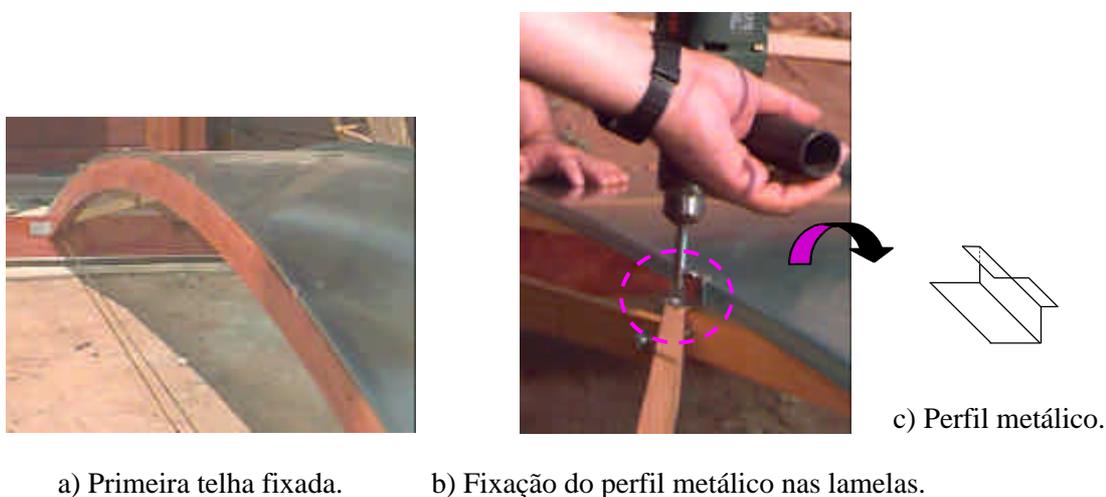
**FIGURA 3** – Desmontagem da malha e transporte para a área externa ao LaMEM.

Estando dividido em duas partes, o protótipo foi transportado através de um carrinho para a área externa ao LaMEM, **Figura 3**, e em seguida foi remontado sobre apoios nivelados.

## I.2 FIXAÇÃO DAS TELHAS

Após remontado o protótipo, procedeu-se à fixação das telhas. Foram utilizadas chapas de policarbonato do sistema DANPALON<sup>®</sup>, pois este valoriza a estética estrutura lamelar de madeira, principalmente por sua simplicidade de fixação a esta, dispensando o uso de perfis metálicos, necessários quando se utilizam chapas de policarbonato comuns.

Foram utilizadas sete chapas alveolares de 8 mm de espessura e dimensões nominais de 60 cm x 600 cm, e obteve-se um beiral de 28 cm de cada lado. A fixação destas chapas no protótipo foi feita através de perfis metálicos aproximadamente “Z”, parafusados nas lamelas, arcos e vigas. Estes contêm dobras nas extremidades para encaixe com as bordas das chapas de policarbonato, **Figura 4-c**. Os parafusos utilizados para esta fixação foram de diâmetro 4,8 mm e comprimento de 16 mm.



**FIGURA 4** – Fixação das bordas das chapas de policarbonato através de chapas metálicas.

Primeiramente, foi posicionada a telha referente a uma extremidade da estrutura, **Figura 4-a**. Esta foi fixada no arco, através de sete perfis metálicos, **Figura 4-c**, e foi fixada nas vigas com um perfil em cada viga.

<sup>®</sup> DANPALON é marca registrada da DAYBRASIL e da GE Plásticos.

Após se fixar uma borda dessa chapa de policarbonato, fixou-se a outra borda nas lamelas, como apresentado na **Figura 4-b**. Foram utilizados dois perfis metálicos para cada região de interseção das chapas com a malha, e em cada interseção das chapas com as vigas foi utilizado um perfil.

Posicionou-se a segunda telha, e ajustou-se as bordas dos perfis metálicos através de um martelo, **Figura 5-a**. Depois foram encaixados os conectores DANPALON<sup>®</sup> “U” em policarbonato na interseção das chapas de policarbonato. O encaixe procedeu-se a partir de uma extremidade do conector, com o auxílio de um calço de madeira e um martelo de carpinteiro, pois não estava disponível um martelo de borracha, **Figura 5-c**.



a) Ajuste das bordas dos perfis metálicos.



b) Posicionamento dos conectores.



c) Encaixe dos conectores.

**FIGURA 5** – Encaixe entre as bordas adjacentes das chapas de policarbonato.

Dessa forma, foram fixadas todas as chapas de policarbonato no protótipo. Cabe acrescentar que as chapas são bastante flexíveis, como pode ser percebido através da **Figura 6-a**.

Outro detalhe se refere à sua posição em relação ao sol, ou seja, uma de suas faces é definida para ficar exposta ao sol, pois possui tratamento contra os raios UV (ultravioleta) e esta face contém um plástico que foi retirado depois do posicionamento da chapa na estrutura, **Figura 6-b**.



a) Posicionamento da chapa na estrutura.



b) Retirada do plástico da chapa.

**FIGURA 6** – Vista da chapa de policarbonato sendo carregada e posicionada na estrutura.

Na extremidade referente à posição da última telha, como não se tem a borda desta sobre o arco, como aconteceu com a primeira chapa fixada sobre a estrutura, foram utilizados parafusos auto-atarrachantes com diâmetro de 4,8 mm e comprimento de 25 mm, com uma arruela de borracha entre a telha e a arruela metálica. Foram utilizados sete parafusos ao longo do comprimento do arco e um em cada viga, **Figura 7-a**.



a) Fixação da última telha no arco.



b) Fixação das telhas nas vigas.

**FIGURA 7** – Fixação das telhas no arco e nas vigas.

Esse mesmo parafuso foi utilizado para a fixação das chapas ao longo do comprimento das vigas, sendo posicionados em cada chapa, na metade de sua largura, **Figura 7-b**.

As chapas alveolares apresentam aberturas em suas extremidades que devem ser fechadas de modo a impedir que sujeira e água penetrem no interior das chapas. Dessa forma, foi aplicado silicone nestas aberturas, que, depois, foram tampadas com uma fita adesiva aluminizada, **Figura 8**.



a) Aplicação de silicone nas aberturas.



b) Aplicação da fita adesiva aluminizada.



c) Borda após aplicação da fita.



d) Tampa do conector das chapas.



e) Encaixe do perfil com pingadeira.



f) Vista do estado final.

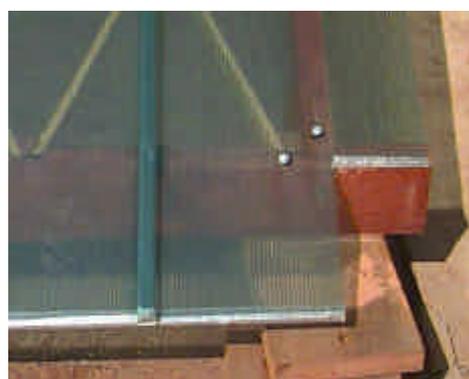
**FIGURA 8** – Preparo das laterais da cobertura, correspondentes às extremidades das chapas de policarbonato.

Na seqüência, foram encaixadas as tampas nas extremidades dos conectores (que foram apresentados pela **Figura 5-b**), **Figura 8-d**. Finalmente, foi utilizado um perfil DANPALON® “U”, em policarbonato, com pingadeira, para direcionar a água pluvial, **Figura 8-e**.

Finalmente, a última chapa de policarbonato fixada na estrutura foi recortada para contornar os pilares de concreto do prédio do LaMEM, **Figura 1**. Nos recortes paralelos à largura da chapa, foi aplicado silicone e fita adesiva aluminizada, **Figura 9**. Na **Figura 10** está apresentada a estrutura com a cobertura pronta.



a) Recorte no meio do comprimento da chapa.



b) Recorte na extremidade da chapa.

**FIGURA 9** – Recortes na chapa de policarbonato para contornar os pilares de concreto.



**FIGURA 10** – Vista global da estrutura com a cobertura pronta.

### I.3 IÇAMENTO E FIXAÇÃO

---

Primeiramente, foram determinados os pontos de fixação das vigas do protótipo nos pilares de concreto (LaMEM) e de madeira (oficina), que foram nivelados com uma mangueira contendo água, **Figura 11**.



**FIGURA 11** – Determinação dos níveis para a fixação das vigas do protótipo.

Procedeu-se ao içamento da estrutura. Esta foi inclinada e transportada até o local que foi coberto por ela. As extremidades das vigas que se fixaram nos pilares do prédio da oficina foram içadas com o auxílio de cordas presas nos pórticos do telhado deste prédio. À medida em que se içava esta extremidade da estrutura, a outra ia sendo levantada com o auxílio de vigotas de madeira.



**Figura 12** a) Estrutura inclinada para o transporte.



b) Extremidades das vigas penduradas com cordas no pórtico do telhado da oficina.



c) Levantamento da outra extremidade da estrutura com vigotas de madeira.

**FIGURA 12** – Etapas para o içamento do protótipo.

As extremidades das vigas do protótipo foram fixadas nos pilares de madeira através de duas barras metálicas de 10 mm de diâmetro, e foram fixadas nos pilares de concreto, com dois parafusos do tipo parabolt, de 12 mm de diâmetro e comprimento de 100 mm, **Figura 13**.



a) Extremidade fixada no pilar de concreto.



b) Extremidade fixada no pilar de madeira.

**FIGURA 13** – Vista das fixações das extremidades das vigas do protótipo nos pilares do prédio do LaMEM e da oficina.

Para o dimensionamento dessas ligações, foi feita a consideração da ação do vento atuando no protótipo, de acordo com o Anexo E da NBR 6123, ABNT (1988).

É importante deixar registrado que, um dia após a fixação da estrutura, atuou um considerável vento de 108 km/h\* naquele local, e a estrutura suportou bem esta situação dinâmica sem sofrer qualquer tipo de dano, provando, portanto, seu bom desempenho.

---

\* Dado fornecido pelo telejornal EPTV no dia 10 de outubro de 1998.