



MESTRADO EM CONSTRUÇÃO METÁLICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
ESCOLA DE MINAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

*Kepler Cavalcante Silva*

# **Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

*Orientadores: Profª. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas  
Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues*

**Ouro Preto, fevereiro de 1999**

À memória de meus inesquecíveis pais,  
à Solange, Augusto, Kepler e Patrícia.

## ***AGRADECIMENTOS***

Aos Professores Arlene Sarmanho Freitas e Francisco Carlos Rodrigues pela dedicação na orientação deste trabalho.

Aos funcionários do DECIV em especial aos técnicos João, Geraldo e Carlos do Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias, da Escola de Minas pela dedicação no desenvolvimento deste estudo.

À PREAÇO– Engenharia pelo interesse aberto e contínuo no desenvolvimento de pesquisas em estruturas metálicas, especialmente em Estruturas Espaciais.

Ao Engenheiro e amigo Erivelto pela participação neste trabalho.

Aos colegas do DECIV em especial aos Professores Luiz Fernando Loureiro Ribeiro e Ernani Carlos de Araújo que viabilizaram o meu afastamento total das atividades do Departamento.

## ***RESUMO***

A utilização de estruturas espaciais treliçadas tem se intensificado em todo o mundo, em obras como coberturas de ginásios de esportes, hangares, estações, e muitas outras. Esta utilização tem ampliado o interesse em pesquisas nesta área.

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico-experimental de treliça espacial formada por malhas piramidais. Foram realizados nove ensaios com intuito de avaliar a carga crítica das barras comprimidas, seu comprimento de flambagem, e o efeito das extremidades amassadas no coeficiente K de flambagem. A estrutura ensaiada foi projetada de modo a propiciar que a flambagem de uma das barras ocorresse antes de qualquer mecanismo de colapso.

Foi realizada uma avaliação da resistência à compressão, obtida experimentalmente, comparada com a resistência teórica, calculada por meio de diversas normas de projeto.

## ***ABSTRACT***

The use of space trusses structures has been intensified over the world, in buildings like roof of gyms, hangars, stations, and many others. This use has expanded the research interest in the area.

In this work a theoretical-experimental study of space truss formed by pyramidal meshes is presented. The experimental program comprised nine tests to evaluate the critical load of the compressed members, the buckling length, and the effect of the bar ends in the K coefficient. The test of the designed structure caused the buckling of one the bar before any failure mechanism had developed.

An evaluation of the experimental critical load was performed with and compered with the theoretical resistance results by several codes.

# ***ÍNDICE***

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FOTOS</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>vii</b>
<b>I INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
I.1 Generalidades	1
I.2 Escopo	5
I.3 Objetivos	7
<b>II SISTEMAS ESTRUTURAIS .</b>	<b>8</b>
II.1 Considerações Gerais	8
II.2 Alguns tipos de nós utilizados em Estruturas Espaciais	12
II.3 Aspectos importantes das Estruturas Espaciais	15
II.4 Sistemas de apoios mais comuns	16
II.5 Alguns tipos e detalhes característicos de estruturas treliçadas espaciais	17
<b>III CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS</b>	<b>25</b>
III.1 Introdução	25
III.2 Estabilidade de barras	25
III.3 Comprimento efetivo de flambagem	28
III.3.1 Correção do coeficiente de flambagem K	30
III.4 Prescrições de normas	34
III.4.1 Cálculo da resistência à compressão segundo a AISC	34
III.4.2 Cálculo da resistência à compressão segundo o EUROCODE	34
III.4.3 Cálculo da resistência à compressão segundo a AISI	35

III.4.4 Cálculo da resistência à compressão segundo a NBR-8800	36
<b>IV PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>37</b>
IV.1 Descrição dos Modelos	37
IV.2 Ensaios realizados	43
IV.2.1 Características da Barra Fragilizada para cada ensaio	44
IV.2.2 Características das barras dos Modelos	46
IV.2.3 Processo de fabricação das barras tubulares	52
IV.3 Sistema de ensaio	53
IV.3.1 Sistema de aplicação de cargas e apoios	53
IV.3.2 Sistema de apoio	54
IV.3.3 Sistema de instrumentação e sistema de aquisição de dados	57
IV.4 Características mecânicas do aço utilizado	67
IV.5 Descrição dos ensaios realizados	68
<b>V APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>70</b>
V.1 Introdução	70
V.2 Deslocamentos dos apoios nos ensaios realizados	72
V.3 Resultados dos ensaios realizados	73
V.3.1 Ensaio 912	75
V.3.2 Ensaio 912A	76
V.3.3 Ensaio 912B	79
V.3.4 Ensaio 912C	84
V.3.5 Ensaio 912D	89
V.3.6 Ensaio 912E	92
V.3.7 Ensaio 912F	96
V.3.8 Ensaio 912G	101
V.3.9 Ensaio 912H	103
<b>VI COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>110</b>
VI.1 Apresentação dos valores teóricos	110

VI.1.1 Características geométricas das barras utilizadas nos ensaios(barra 9–1.2)	110
VI.1.2 Cálculo da resistência à compressão	113
VI.1.3 Cálculo da carga última em função do deslocamento lateral medido na barra( $\delta$ )	118
<b>VII CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>127</b>



## ***LISTA DE FIGURAS***

Figura I.1	Visualização da malha espacial	2
Figura I.2	Modelo de uma treliça espacial	2
Figura II.1	Elementos básicos que formam uma malha espacial	9
Figura II.2	Aspectos geométricos de algumas malhas espaciais	11
Figura II.3	Tipos de nós utilizados em treliças espaciais	14
Figura II.4	Alguns tipos de apoios mais comuns	16
Figura III.1	Barra bi-rotulada sob carga axial centrada	26
Figura III.2	Equilíbrio de uma seção genérica	26
Figura III.3	Deformada senoidais de uma coluna bi-rotulada sob carga axial	27
Figura III.4	Valores do fator K de flambagem	30
Figura III.5	Viga-Coluna	31
Figura III.6	Valores de n relativos a seção transversal com variação de inércia	32
Figura IV.1	Módulo idealizado para os ensaios	38
Figura IV.2	Detalhe dos nós dos apoios AP1	39
Figura IV.3	Detalhe dos nós entre barras	40
Figura IV.4	Vista geral do módulo ensaiado coma numeração de nós adotada	43
Figura IV.5	Detalhe da seção transversal das barras duplas	45
Figura IV.6	Barras e nós do modelo 912	47
Figura IV.7	Detalhamento dos banzos B1 e diagonais D2	48
Figura IV.8	Detalhamento da diagonal fragilizada D1	48
Figura IV.9	Barras e nós dos modelos 912A a 912H	49
Figura IV.10	Barras B1 e D2	50
Figura IV.11	Barras B2 e D3	50
Figura IV.12	Diagonal D1	51
Figura IV.13	Diagonais D4( fragilizada)	51
Figura IV.15	Placa metálica de apoio do sistema de carga no nó 9	54
Figura IV.16	Detalhes dos sistemas de apoios	56
Figura IV.17	Posicionamento dos instrumentos de medição	60
Figura IV.18	Corpo de prova do ensaio de caracterização do aços utilizados	67

Figura V.1	Resultados dos deslocamentos vertical do nó 9, medidos no ensaio 912A	77
Figura V.2	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912B	79
Figura V.3	Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912B	80
Figura V.4	Deformações medidas nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912B	81
Figura V.5	Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares a seu eixo, no ensaio 912B	82
Figura V.6	Deslocamentos verticais do nó 9, medidos no ensaio 912C	84
Figura V.7	Deslocamentos verticais do nó 12, medidos no ensaio 912C	85
Figura V.8	Deformações nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912C	86
Figura V.9	Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares ao seu eixo, no ensaio 912C	87
Figura V.10	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912D	89
Figura V.11	Deformações nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912D	90
Figura V.12	Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares ao seu eixo, no ensaio 912D	91
Figura V.13	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912E	92
Figura V.14	Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912E	93
Figura V.15	Deformações nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912E	94
Figura V.16	Deslocamentos da barra 9-12 segundo a direção perpendicular a seu eixo, no ensaio 912E	95
Figura V.17	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912F	96
Figura V.18	Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912F	97
Figura V.19	Deformações nas barras 9-6,9-7 e 9-11 no ensaio 912F	98
Figura V.20	Deslocamentos da barra 9-12 segundo a direção perpendicular ao seu eixo, no ensaio 912F	99
Figura V.21	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912F	101
Figura V.22	Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912G	102
Figura V.23	Deformações nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912G	103
Figura V.24	Deslocamentos da barra 9-12 segundo a direção perpendicular ao seu eixo, no ensaio 912G	103
Figura V.25	Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912H	105

Figura V.26	Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912H	106
Figura V.27	Deformações nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, no ensaio 912H	107
Figura V.28	Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares ao seu eixo, no ensaio 912H	108
Figura VI.1	Detalhe da seção transversal das barras duplas	111
Figura VI.2	Detalhe dos comprimentos $L_1$ , $L_2$ e $L_3$	113
Figura VI.3	Meia onda de uma senóide	119

## ***LISTA DE TABELAS***

Tabela III.1	Valores do coeficiente K para seções com inércia variável	33
Tabela IV.1	Características das barras 9-12 de cada ensaio	46
Tabela IV.2	Posicionamento dos instrumentos de medição	59
Tabela V.1	Deslocamentos dos nós 2 e 17 dos ensaios realizados	73
Tabela V.2	Resultados experimentais dos ensaios realizados para carga última e deslocamentos verticais nos nós 9, 11 e 12	74
Tabela VI.1	Parâmetros de cálculo e resistência à compressão ( $F_{cr}$ ) segundo a AISC	114
Tabela VI.2	Parâmetros de cálculo e resistência à compressão ( $F_{cr}$ ) segundo a NBR-8800	115
Tabela VI.3	Parâmetros de cálculo e resistência à compressão ( $F_{cr}$ ) segundo a AISI	116
Tabela VI.4	Parâmetros de cálculo e resistência à compressão ( $F_{cr}$ ) segundo a EUROCODE	117
Tabela VI.5	Valores das cargas últimas experimentais das barras 9-12	121
Tabela VI.6	Resumo dos valores das cargas últimas da barra 9-12	122
Tabela VI.7	Relação entre a carga última teórica e a carga experimental das barras 9-12 nos ensaios 912B e 912H	123
Tabela VI.8	Resumo dos valores das cargas últimas dos ensaios 912D e 912G	124

## ***LISTA DE FOTOS***

Foto II.1	Apoio da estrutura do Pavilhão da Gameleira/BH/MG	17
Foto II.2	Base da estrutura do Pavilhão da Gameleira	17
Foto II.3	Extremidades das barras/Fábrica Preaço/BH/MG	18
Foto II.4	Vista do armazenamento de barras prontas no pátio da fábrica Preaço/BH/MG	18
Foto II.5	Detalhe da prensa de amassamento utilizada na confecção de barras –Preaço/BH/MG	19
Foto II.6	Detalhe das extremidades das barras – Pavilhão da Gameleira/BH/MG	19
Foto II.7	Expansão Fábrica Preaço–BH/MG	20
Foto II.8	Pilar do Pavilhão da Gameleira–BH/MG	20
Foto II.9	Vista interna do Pavilhão da Gameleira–BH/MG	21
Foto II.10	Vista externa do Pavilhão da Gameleira–BH/MG	21
Foto II.11	Ginásio de esportes–São Gabriel da Palha/ES	22
Foto II.12	Ginásio de esportes–São Gabriel da Palha/ES	22
Foto II.13	Centro Esportivo– Itaperuna/RJ	23
Foto II.14	Madecaus–BH/MG	23
Foto II.15	Ginásio Venâncio– Brasília/DF	24
Foto IV.1	Vista geral do módulo	41
Foto IV.2	Detalhe do nó fora dos apoios	42
Foto IV.3	Detalhe do nó de apoio AP1	42
Foto IV.4	Vista geral do módulo ensaiado	43
Foto IV.5	Sistema de aplicação de cargas para o ensaio 912	53
Foto IV.6	Sistema de aplicação de cargas para os ensaios 912A a 912H	55
Foto IV.7	Detalhe do sistema de apoio do módulo	57
Foto IV.8	Vista geral dos pontos instrumentados	62
Foto IV.9	Detalhe da instrumentação da barra fragilizada 912G	62
Foto IV.10	Detalhes do sistema de leitura dos extensômetros elétricos	62
Foto IV.11	Detalhes do sistema de aquisição de dados	63

Foto IV.12	Detalhe da extensometria	63
Foto IV.13	Vista do módulo de ensaio montado, antes do içamento	64
Foto IV.14	Vista do módulo de ensaio montado, antes do içamento	64
Foto IV.15	Montagem do sistema de carga	64
Foto IV.16	Montagem do sistema de carga e vista do nivelamento do eixo do pistão com o centro no nó 9	65
Foto IV.17	Vista geral do sistema de carga	66
Foto IV.18	Vista geral do módulo posicionado sobre os apoios e sistema de carga instalado	66
Foto IV.19	Vista geral da máquina universal de tração, durante os ensaios	67
Foto V.1	Detalhe da barra do banzo superior do ensaio 912 apresentando deformações no início do rasgamento	75
Foto V.2	Detalhe da deformação do furo no início do rasgamento da extremidade da barra no ensaio 912	76
Foto V.3	Detalhe da medição dos deslocamentos verticais no nó 9 por meio de LVDT'S devido a flambagem no ensaio 912A	77
Foto V.4	Detalhe da curvatura da barra 9-12 devido a flambagem da mesma, no ensaio 912A	78
Foto V.5	Instrumentação da barra 9-12 no ensaio 912B	82
Foto V.6	Instrumentação da barra 9-12 no ensaio 912B	83
Foto V.7	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912B	83
Foto V.8	Modo de flambagem da barra 9-12 segundo a direção vertical, no ensaio 912C	87
Foto V.9	Modo de flambagem da barra 9-12 segundo a direção horizontal, no ensaio 912C	88
Foto V.10	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912E	95
Foto V.11	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912F	99
Foto V.12	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912F	100
Foto V.13	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912G	104
Foto V.14	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912H	108
Foto V.15	Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912H	109

## ***LISTA DE SÍMBOLOS***

### **Romanos Maiúsculos**

A	Área da seção transversal de uma barra
A <sub>e</sub>	Área líquida efetiva
A <sub>g</sub>	Área bruta
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
F <sub>cr</sub>	Carga crítica de flambagem
F	Carga concentrada
I	Momento de inércia
I <sub>int</sub>	Momento de inércia do tubo interno
I <sub>ext</sub>	Momento de inércia do tubo externo
K	Parâmetro utilizado no cálculo do comprimento de flambagem
L	Comprimento em geral
N	Força normal de tração
P	Carga concentrada
P <sub>u</sub>	Carga última
Q	Fator de flambagem local

### **Romanos Minúsculos**

f <sub>y</sub>	Tensão limite de escoamento do aço
f <sub>u</sub>	Tensão limite de ruptura do aço
f <sub>cr</sub>	Tensão crítica de flambagem
k	Comprimento de flambagem
l	Comprimento em geral
r	Raio de giração
r <sub>int</sub>	Raio de giração do tubo interno

$r_{\text{ext}}$	Raio de giração do tubo externo
$t$	Espessura da parede do tubo

### **Gregos**

$\delta$	Deslocamento de um ponto da barra
$\lambda$	Parâmetro de esbeltez
$\lambda$	Parâmetro de esbeltez relativa para barras comprimidas
$\lambda_c$	Esbeltez relativa
$\sigma_{\text{cr, fer}}$	Tensão crítica de flambagem
$\rho$	Fator de flambagem global
$\alpha$	Coeficiente que define a curva de flambagem ; coeficiente para verificar o rasgamento nas barras tracionadas
$\beta$	Coeficiente usado para o cálculo de $\rho$



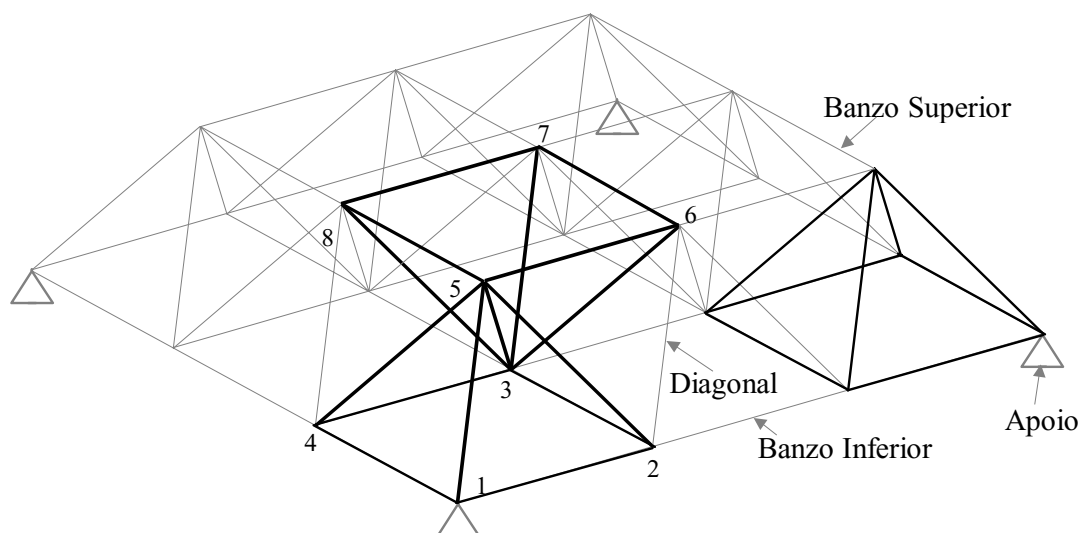
# ***CAPÍTULO I***

## **I - INTRODUÇÃO**

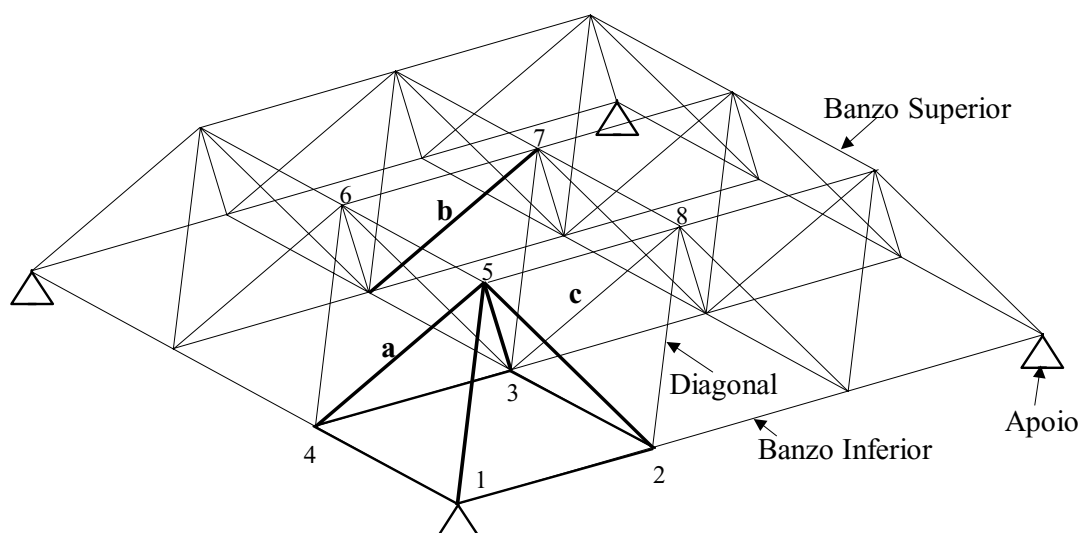
### **I.1 GENERALIDADES**

As estruturas espaciais são aquelas compostas de malhas planas ou curvas, tridimensionais, interligadas por elementos estruturais chamados barras ou membros, conectados entre si por intermédio de peças ou dispositivos especiais, chamados juntas ou nós. Na maioria dos casos, são formadas por duas malhas, uma inferior chamada também **banzo inferior**, outra superior, denominada **banzo superior**, malhas estas que geralmente são interligadas em suas juntas por diagonais que formam assim um conjunto de tetraedros ou pirâmides, regulares ou não, resultando o que é chamado de **MALHA ESPACIAL**.

A Figura I.1 ilustra um modelo de treliça tridimensional onde as barras contidas no plano horizontal que contém os nós 1, 2, 3 e 4 formam o banzo inferior e as contidas no plano que contém os nós 5, 6, 7 e 8, o banzo superior. As barras que não se encontram nestes planos, são chamadas diagonais, sendo representadas simbolicamente pelas barras **a**, **b** e **c** conforme indica a figura I.2. Observe-se que existe um elemento básico na estrutura, de forma piramidal definido pelos nós 1, 2, 3, 4 e 5, o qual se repete várias vezes para sua formação final.



**Figura I.1** - Visualização da Malha Espacial.



**Figura I.2** - Modelo de uma Treliça Espacial.

Entre os séculos V e XV, iniciaram-se os primeiros estudos sobre a utilização das estruturas espaciais, na época construídas de madeira. Tem-se como registro Bellange e

Brunett (1811)] [22], como os primeiros a construírem uma estrutura tridimensional metálica, com a forma de uma cúpula.

Alexandre Graham Bell, o conhecido inventor do telefone, construiu em 1906 alguns modelos deste tipo de estrutura [23]. Tem-se notícia que foi ele provavelmente o primeiro engenheiro a idealizar e mostrar como podem ser construídas estruturas simples, leves e de baixo custo, considerando-se a padronização dos elementos de composição e dos sistemas de fabricação e montagem.

Por questões de ordem estética de nossa época, muito valorizadas pelos arquitetos, a otimização de custos e tempo de execução das obras têm forçado a busca de novas alternativas de projetos estruturais, principalmente no que se refere às estruturas de coberturas, desta forma avançando nos conceitos sobre modernos sistemas estruturais.

As estruturas metálicas convencionais, aquelas compostas pela união de diversas subestruturas, são caracterizadas como se cada elemento componente trabalhasse isoladamente. O contrário ocorre com as estruturas espaciais em que os elementos que as compõem trabalham como um conjunto, com uma grande hiperestaticidade interna. A distribuição espacial dos esforços faz com que todas as barras trabalhem como se formassem uma estrutura cristalina de um corpo maciço.

Para que possamos entender melhor como trabalham estes tipos de estruturas, imaginemos uma placa composta por três malhas, uma superior, outra inferior e as diagonais. Esta composição irá gerar elementos geométricos das mais variadas formas. Nestas estruturas podemos observar elementos que irão se repetir várias vezes, que por analogia, podemos chamá-los de CRISTAL [9], e que podem ter a forma de um tetraedro, uma pirâmide, um paralelepípedo, etc. A figura I.1 ilustra este conceito em maiores detalhes, uma vez que os elementos piramidais 12345 e 35678 e analogamente todos os outros que compõem a estrutura, são os cristais da malha em questão.

As estruturas treliçadas mostradas nas figuras I.1 e I.2 possuem dois banzos, um superior e outro inferior, formando as malhas piramidais, porém caso tivéssemos um terceiro banzo de mesma distância entre os outros dois, a malha que se formaria seria um octógono regular. Queremos com isto chamar atenção para o fato de que a formação cristalina pode se estender indefinidamente nas três direções, sendo óbvio que nos casos de

natureza de ordem prática isto fica limitado ao projeto básico, que na maioria das vezes considera a estrutura formada apenas por dois banzos, um inferior e outro superior.

A utilização das estruturas espaciais em engenharia não é recente, sendo utilizadas em cúpulas de concreto armado, navios, aviões, reservatórios, pontes etc. No entanto, tipos de estruturas espaciais eram pouco utilizadas devido a dificuldades nas soluções, com custo relacionado ao elevado tempo para os cálculos, obrigando os calculistas a simplificações.

A utilização mais freqüente veio ocorrer nos últimos trinta anos com o aparecimento dos computadores de grande capacidade de processamento e análises numéricas que avaliam o comportamento deste tipo de estrutura [30, 40].

Para que uma estrutura espacial seja considerada exeqüível, são necessárias algumas considerações: a) análise minuciosa do projeto arquitetônico; b) definição da geometria da malha, levando-se em consideração o vão a ser vencido; c) elaboração do orçamento (mão de obra, material, fabricação, pré-montagem, transporte e montagem). Um fator importante para evitar custos adicionais em uma estrutura metálica, mais especificamente a espacial, é a utilização de elementos padronizados, como as juntas ou nós e as barras.

Com base nestas considerações podemos afirmar, de acordo com Alvarez [9], que a utilização das estruturas espaciais apresenta diversas vantagens. A principal delas é baseada no sistema de padronização, que conduz às seguintes conclusões: o trabalho de fabricação é simplificado, a produção se torna mecanizada, há um aumento do rendimento no processo de produção, possibilita a formação de estoque com maior facilidade; montagem rápida e economia de custo de mão de obra.

Uma outra vantagem importante consiste na simplificação das instalações de forro, sistema de proteção contra incêndio, instalações elétricas e hidráulicas, ar condicionado etc.

Há de se ressaltar ainda a vantagem na utilização deste tipo de estrutura em função do seu custo final que pode variar com o tipo de estrutura e de material empregado. Em geral estes preços são pouco superiores aos das estruturas convencionais, contudo a diminuição de peso da estrutura espacial pode conduzir a uma sensível economia relativa

ao conjunto. Esta redução de custo pode crescer tanto quanto maiores forem os vãos a serem vencidos.

Os materiais mais utilizados nas estruturas espaciais são os metálicos, em especial os aços. As barras e os nós que as compõem podem ser de várias formas, sendo normalmente de seções transversais circulares (tubos). Estas seções apresentam diversas vantagens, como por exemplo a simetria rotacional uma vez que seus momentos centrais de inércia são invariantes, sendo também invariante o seu raio de giração. Com relação aos nós, devem os mesmos ser escolhidos em função do tipo de estrutura a ser executada, evidentemente de baixo custo e que seja passível de ser padronizado.

De acordo com Mukanov [28], as estruturas espaciais compostas por barras de seções circulares, podem gerar uma economia no final do processo de até 20%. Conforme mencionado anteriormente, a economia é definida preponderantemente pelo valor do vão a ser vencido ou seja, para maiores vãos menores custos.

Costuma-se afirmar portanto que as estruturas espaciais são de maior utilização nos casos em que é necessário se vencer grandes vãos utilizando-se uma estrutura de baixo peso. Por isto o peso próprio das estruturas é decisivo nas grandes coberturas, como em supermercados, hangares, prédios de aeroportos, pavilhões, terminais rodoviários e ferroviários etc.

No capítulo seguinte faremos referências mais detalhadas relativamente aos sistemas estruturais, em especial aos tipos de barras utilizadas, nós, malhas, apoios e também uma ilustração com algumas obras executadas em Estruturas Metálicas Espaciais

## **I.2 ESCOPO**

É apresentado neste trabalho um estudo teórico-experimental do comportamento estrutural de um módulo de uma treliça espacial muito utilizada em coberturas no Brasil. O módulo tem malha piramidal de igual comprimento das barras de extremidades amassadas e nós com chapas cruzadas, com capacidade de se conectar até doze barras. A carga na estrutura foi aplicada em um nó central, ponto de simetria do modelo.

Este trabalho foi dividido em sete capítulos. No capítulo I é apresentado uma introdução onde descreve-se as generalidades sobre estruturas espaciais, o conteúdo e os objetivos do estudo do módulo espacial estudado.

No Capítulo II são descritos os sistemas estruturais mais usuais encontrados na literatura, com os tipos de barras utilizado e nós. São apresentadas também figuras e fotos de obras realizadas com o tipo de modelo em estudo e outros modelos espaciais de treliças.

No Capítulo, III são apresentados os aspectos teóricos do trabalho quanto às formulações, às prescrições de normas pertinentes, softwares utilizados, etc. São também apresentadas considerações quanto ao coeficiente de flambagem das barras e a variação de inércia das seções transversais dos tubos em suas extremidades.

No Capítulo IV apresenta-se o programa experimental, onde são definidos os modelos ensaiados no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. São apresentados os tipos de materiais utilizados e os valores teóricos obtidos pelas prescrições das normas AISC [7], NBR-8800 [2], AISI [5] e EUROCODE [16].

Ainda neste capítulo são descritos o sistema de aplicação de cargas, os sistemas de apoios, o sistema de aquisição de dados, a montagem e a metodologia de ensaio. São apresentados também os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do material utilizado.

No Capítulo V são apresentados os resultados dos ensaios e as análises dos resultados obtidos.

No Capítulo VI são analisados os resultados experimentais obtidos em cada ensaio e por meio destes calculados os valores da carga última da estrutura. É também calculada a carga última da estrutura através das normas utilizadas. Ainda neste capítulo são realizadas as comparações entre estes resultados

Finalmente, no Capítulo VII são apresentadas as conclusões e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Neste trabalho o termo *fragilizada*, utilizado para a barra 9-12 significa que a mesma apresenta sua rigidez muito inferior as rigidezes das outras barras.

Ainda foram considerados como deslocamentos horizontal e vertical da barra 9-12, aqueles que ocorreram nos planos horizontal e no vertical que contém a referida barra, respectivamente. No plano vertical, o deslocamento da barra 9-12 foi medido segundo a direção perpendicular a esta barra.

### **I.3 OBJETIVOS**

Este trabalho consiste no estudo da estabilidade de barras comprimidas de uma treliça espacial com malha básica de forma piramidal, com base quadrada e barras de mesmo comprimento, de altura igual a 0,707 do comprimento das barras.

Foram realizados 09 (nove) ensaios. No primeiro ensaio todas as barras foram diferentes das dos demais ensaios. Nos oito ensaios remanescentes, com exceção de uma barra, todas as demais foram mantidas ao longo dos ensaios. O estudo foi desenvolvido utilizando uma barra com inércia bem menor que as demais (aqui denominada barra fragilizada), comprimida, sendo observados os valores das cargas de flambagem relativos a cada ensaio.

Neste estudo são avaliados os comprimentos de flambagem bem como as cargas críticas de flambagem da barra fragilizada de cada modelo ensaiado, sendo calculados segundo normas de projetos e comparadas com os resultados obtidos experimentalmente. Para estas avaliações foram considerados os coeficientes de flambagem iguais a 1,0 (barras bi-rotuladas) e valores diferentes, considerando-se a variação de inércia das extremidades amassadas para a barra fragilizada.

Assim este estudo concentra-se na pesquisa do valor do comprimento de flambagem de uma barra comprimida de uma treliça espacial, na determinação do valor do coeficiente de flambagem  $K$ , e na comparação entre os valores utilizados pelas normas, para a resistência à compressão de uma barra comprimida, com os valores das cargas experimentais.

# ***CAPÍTULO II***

## **SISTEMAS ESTRUTURAIS**

### **II.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A escolha de um sistema estrutural treliçado segue duas fases: Na primeira tem-se a idealização e a concepção da estrutura, que compreende a escolha do sistema estrutural e o procedimento construtivo a ser adotado, o cálculo deste e a elaboração dos projetos para fabricação. A segunda fase, corresponde à execução da estrutura e inclui o ajuste do projeto aos meios escolhidos, como o estudo do sistema de fabricação e montagem, o transporte e a colocação no local da obra.

Em resumo, estas duas fases não se excluem mas complementam-se. O engenheiro tem um papel fundamental nestes aspectos, pois deve criar os sistemas através de idéias de modo a encontrar soluções simples e econômicas. Infelizmente por várias razões estas considerações não são observadas, levando em muitos casos a sensíveis elevações de custos das obras assim como surpresas indesejáveis nas fases de execução das mesmas.

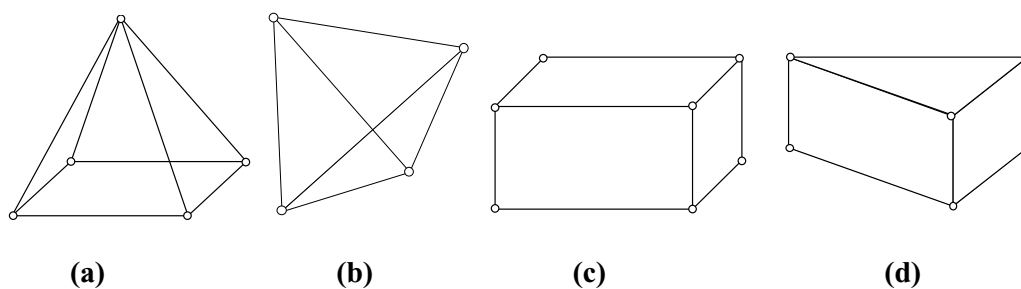
Atualmente existem vários tipos de estruturas espaciais [24, 31] que se distinguem tanto pelo método de fabricação como pelo sistema em que se baseiam.

Com relação à geometria dos sistemas estas estruturas podem ser classificadas como de **malhas planas** e **malhas curvas**. Este segundo tipo ainda pode subdividir-se em curvaturas simples ou duplas.



Em função do tipo de estrutura a ser utilizado, as malhas planas podem ser substituídas por outro tipo de malhas. A geometria destas malhas planas pode apresentar a forma ortogonal com prisma retangular ou triangular, ou seja, uma pirâmide de base retangular ou triangular. Os prismas de base triangular ou retangular normalmente têm sido utilizados para formarem malhas em dois banzos, sem diagonais esconsas, porém as malhas piramidais de base quadrada ou triangular, são utilizadas para formação de malhas com diagonais esconsas, ou seja, fora dos planos dos banzos e a eles perpendiculares.

Estes elementos básicos que formam as malhas espaciais são mostrados nas figuras II.1a, II.1b, II.1c e II.1d.. A figura II.1.a representa uma malha piramidal de base quadrada ou retangular, a figura II.1.b representa uma malha piramidal de base triangular, que pode ser um tetraedro, a figura II.1. c representa um prisma retangular, que pode ser um cubo, e finalmente a figura II.1. d um prisma triangular.



**Figura II.1** – Elementos Básicos que formam uma malha espacial.

A partir destes elementos básicos podemos agora descrever os tipos de estruturas espaciais, relativamente à formação das malhas descritas anteriormente.

Na figura II.2.a apresenta-se uma malha quadrada sobre outra quadrada, com diagonais fora dos planos verticais que contêm as barras dos banzos, malha esta com o banzo inferior na extremidade da estrutura.

Na figura II.2.b vê-se uma estrutura espacial de malha quadrada sobre quadrada, porém sem diagonais fora dos planos verticais que contêm os banzos, estando o banzo superior na extremidade.

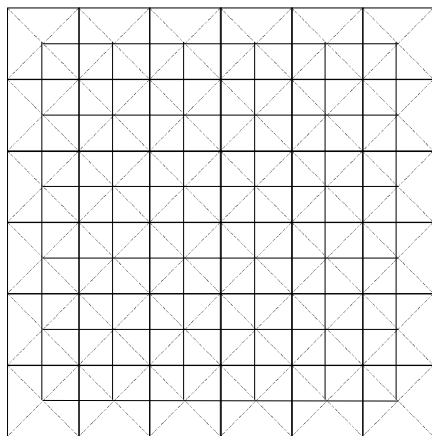
Na figura II.2.c uma quadrada diagonal sobre outra quadrada diagonal.

Na figura II.2.d uma malha quadrada sobre outra quadrada com aberturas internas.

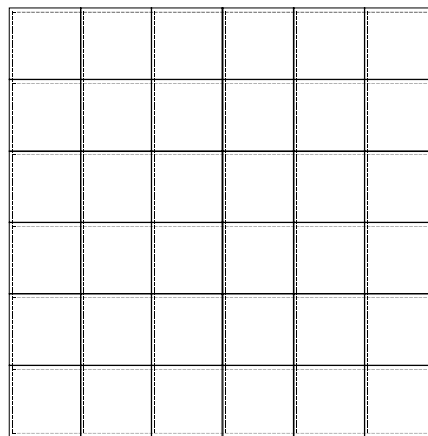
Na figura II.2.e uma retangular sobre outra retangular.

Na figura II.2.f uma malha quadrada sobre quadrada com diagonais esconsas e banzos superior na extremidade.

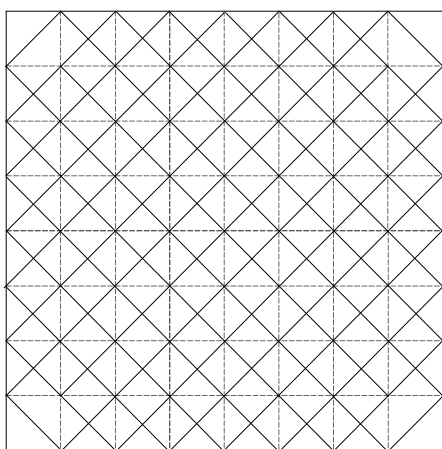
E na figura II.2.g uma malha hexagonal- triangular.



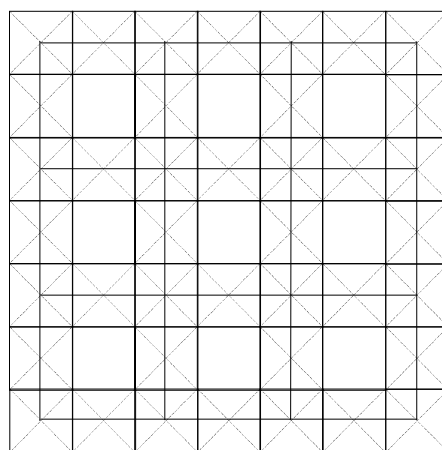
(a)



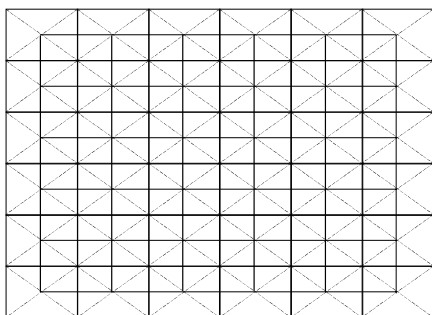
(b)



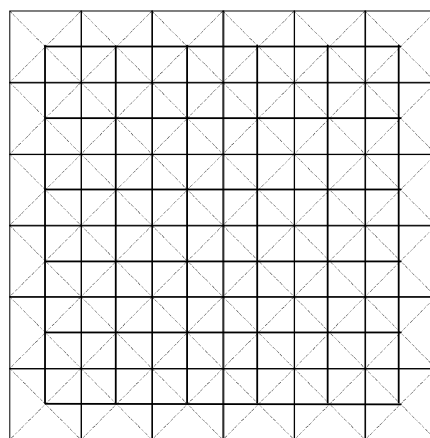
(c)



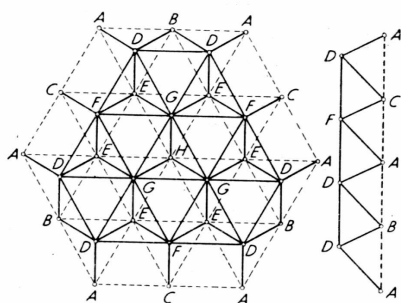
(d)



(e)



(f)



(g)

— barras inferiores  
 — barras superiores  
 - - - barras diagonais

**Figura II.2** – Aspectos geométricos de algumas malhas espaciais.

## II.2 ALGUNS TIPOS DE NÓS UTILIZADOS EM ESTRUTURAS ESPACIAIS

O nó ou junta, elemento que faz a ligação entre as barras, é de grande importância para o equilíbrio do sistema, pois deve apresentar resistência suficiente para permitir a transmissão dos esforços de uma barra a outra, sofrer pequenas deformações, ser de uso simples, de maneira a permitir uma rápida montagem, e não apresentar custo de fabricação elevado.

Existem vários tipos de nós utilizados em estruturas espaciais que serão descritos a seguir:

Na figura II.3.a é mostrado o nó tipo Oktaplatte, que consiste de um sistema espacial constituído por octaedros cujas arestas são tubos soldados a esferas de aço perfuradas, resultando num sistema de boa decoração.

Na figura II.3.b observamos um nó chamado Triodetic, que faz a ligação das barras sem uso de solda, parafusos etc. As barras de seção tubular tem seus extremos amassados em um ângulo adequado, que são prensados através das ranhuras existentes no nó.

Na figura II.3.c vê-se o nó Wuppermann, muito usado em abóbadas modulares em que todas as barras são de mesmo comprimento. Concorrem seis barras em cada um deles, as quais são unidas através de parafusos e porcas.

Na figura II.3.d temos o nó Sarton, que se caracteriza pelo amassamento de todas as barras em suas extremidades gerando uma superfície plana, onde se atravessa um parafuso com porca. Este tipo de nó tem sido muito utilizado no Brasil, especialmente em estruturas com pequenos vãos.

É interessante observar que este tipo de nó é baseado na resistência de um único parafuso e que em caso de colapso deste, a estrutura facilmente entrará também em colapso, levando desta maneira a responsabilidade da ligação apenas para este parafuso.

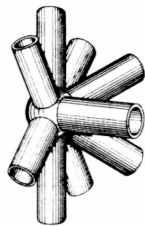
Na figura II.3.e, é mostrado o nó tipo Mero desenvolvido pelo engenheiro Mengerlinghausen, em 1942, na Alemanha. Trata-se de um poliedro fundido inscrito numa superfície esférica [28], em que abrem-se orifícios rosqueados nestas facetas com o objetivo de fixação das barras através de suas extremidades, conforme indicado na figura.

Este tipo de nó Mero foi a primeira idéia do sistema, por isto chamaremos de nó antigo. O desenvolvimento do processo fez com que a forma do nó se transformasse em uma esfera, em que são inscritos dezoito octógonos com os mesmos orifícios rosqueados para ligações com as barras, conforme mostra a figura II.3.f. Este sistema chamamos de Mero novo.

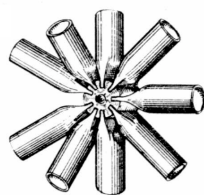
Na figura II.3.g, apresenta-se o nó Unistrut, que se caracteriza por uma chapa dobrada que faz a união das barras através de parafusos. Neste sistema todas as barras têm o mesmo comprimento e seção transversal.

Na figura II.3.h, representa-se um nó caracterizado por chapas cruzadas que pode realizar a ligação de até doze barras. Por tratar-se de um nó muito simples, tem-se uma maior economia em todas as fases da obra. Este tipo de nó é o mais utilizado em obras no Brasil.

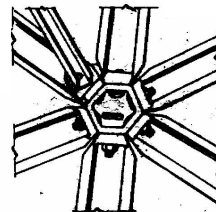
Finalmente, na figura II.3.i tem-se um nó de cúpula de uma treliça espacial com malha plana de um ou mais banzos curvos. Este tipo de nó leva o nome de seu idealizador, Makowski.



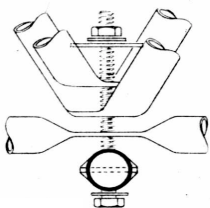
(a)



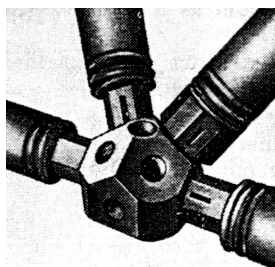
(b)



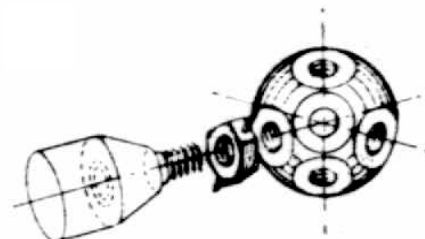
(c)



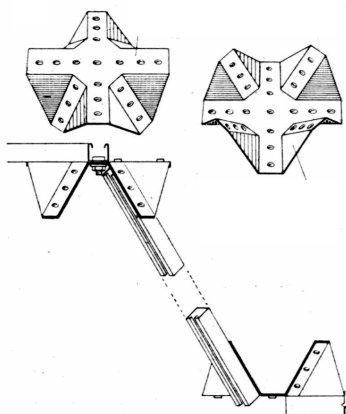
(d)



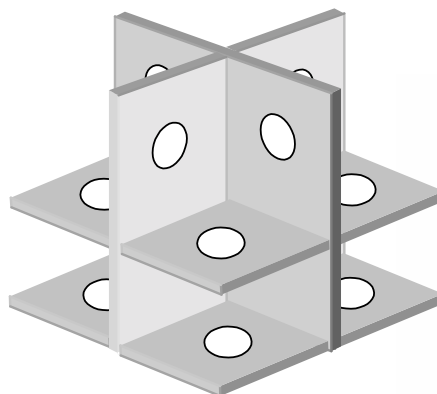
(e)



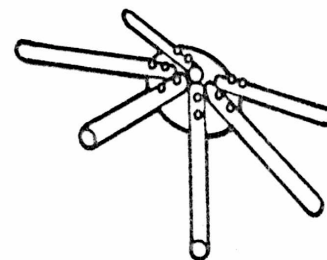
(f)



(g)



(h)



(i)

**Figura II.3** – Tipos de nós utilizados em treliças espaciais.

### II.3 ASPECTOS IMPORTANTES DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS

A seguir serão enumerados e descritos alguns aspectos importantes na utilização das estruturas espaciais.

a) Diminuição do número de colunas, consequentemente com redução nos custos das fundações e um real ganho da área útil a ser utilizada, como mencionado anteriormente. As estruturas espaciais tem como maior vantagem a facilidade de vencer grandes vãos, eliminando-se, desta forma, um grande número de pontos de apoio.

b) Grandes reservas de segurança, pois apresentam um alto grau de hiperstaticidade interno, em relação as estruturas convencionais, ou seja, aquelas que apresentam sub-sistemas.

c) Por serem formadas de elementos leves, apresentam baixo custo de fabricação, transporte e montagem.

d) Devido à modulação definida em projeto, a produção dos elementos é realizada em série, gerando melhor controle de qualidade, permitindo tolerâncias mínimas e boa estética no acabamento.

e) A facilidade em sua modulação simplifica muito as instalações de forros, sistemas de ar condicionado, instalações elétricas, etc.

Alguns autores recomendam, para a altura das treliças espaciais, alguns intervalos relacionados com o vão de trabalho para o cálculo das deformações. Sendo portanto  $L$  o vão a ser considerado, temos as faixas de recomendações de altura a seguir.

IFLLAND [20] ----- $L/20$  a  $L/60$

AGERSKOV [4] -----  $L/15$  a  $L/20$

MORINI [27]-----  $L/30$  a  $L/40$

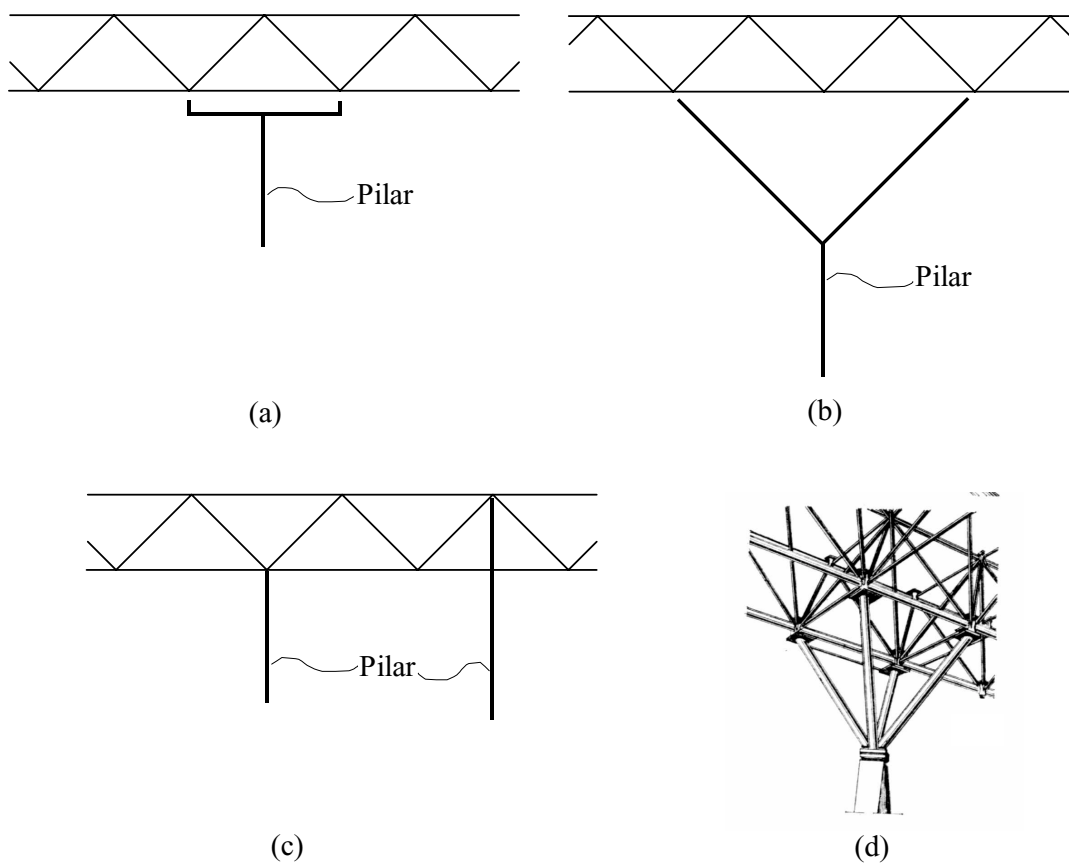
MAKOWSKI [24]----- $L/20$  a  $L/40$

Observa-se no Brasil que em alguns projetos e obras em estruturas espaciais, os valores adotados para a altura da treliça têm sido mais conservadores que as recomendações dos autores acima, sendo adotados valores entre  $L/10$  a  $L/15$ . É importante salientar que estes valores sofrem influência do tipo de malha, do tipo de perfis adotados, assim como da rigidez do sistema utilizado, ou seja, como trabalha o conjunto barra-nó.

## II.4 SISTEMAS DE APOIOS MAIS COMUNS

Considerando que estes tipos de estruturas quase sempre apresentam grandes vãos, em seus pontos de apoios surgem grandes esforços reativos. Par evitar-se que estes valores fiquem concentrados em um único nó da treliça, podendo gerar um problema localizado, em alguns casos adotam-se soluções como as indicadas nas figuras II.4.a, II.4.b, II.4.c.

A figura II.4.d mostra, em perspectiva, a solução adotada na figura II.4.b. Estas formas de apoios também podem ser justificados por questões puramente estéticas idealizadas pelo arquiteto, pois as estruturas espaciais apresentam uma grande versatilidade de concepções arquitetônicas.



**Figura II.4** – Alguns tipos de apoios mais comuns [9].



## II.5 ALGUNS TIPOS E DETALHES CARACTERÍSTICOS DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS ESPACIAIS



**Foto II.1-** Apoio da Estrutura do Pavilhão da Gameleira –BH/MG.



**Foto II.2** – Base da Estrutura do Pavilhão da Gameleira



**Foto II.3** – Extremidades das barras/ Fabrica Preaço/BH/MG.



**Foto II.4-** Vista do armazenamento de barras prontas no pátio da fábrica da Preaço - BH/MG.



**Foto II.5** – Detalhe da prensa de amassamento, utilizada na confecção das barras- Preaço- BH/MG.



**Foto II.6** – Detalhe das Extremidades das Barras – Pavilhão da Gameleira – BH/MG.



**Foto II.7** – Expansão da Fábrica da Preaço - BH/MG.



**Foto II.8** – Pilar do Pavilhão da Gameleira - BH/MG.





**Foto II.9** – Vista interna do Pavilhão da Gameleira – BH/MG.



**Foto II.10** – Vista Externa do Pavilhão da Gameleira – BH/MG.



**Foto II.11** – Ginásio de Esportes – São Gabriel da Palha/ES.



**Foto II.12** – Ginásio de Esportes – São Gabriel da Palha/ES.



**Foto II.13** – Centro Esportivo – Itaperuna/RJ.



**Foto II.14** – Madecaus – BH/MG.



**Foto II.15** – Ginásio Venâncio 2000 – Brasília/DF.



# ***CAPÍTULO III***

## **III - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS**

### **III.1 – INTRODUÇÃO**

A influência da extremidade amassada no comportamento da estrutura tem sido objeto de vários estudos atualmente [11, 12, 14, 34, 35]. Neste capítulo são apresentadas as considerações teóricas utilizadas para avaliação da influência das extremidades na estabilidade de barras comprimidas, e as prescrições de normativas quanto a resistência à compressão de barras tubulares.

### **III.2 - Estabilidade de Barras.**

Sempre que uma barra é solicitada por uma carga de compressão gradualmente crescente, em um certo instante ela se rompe por esmagamento da seção. A tensão durante o processo, vale  $F/A$  sendo  $F$  a carga axial e  $A$ , a área da seção transversal.

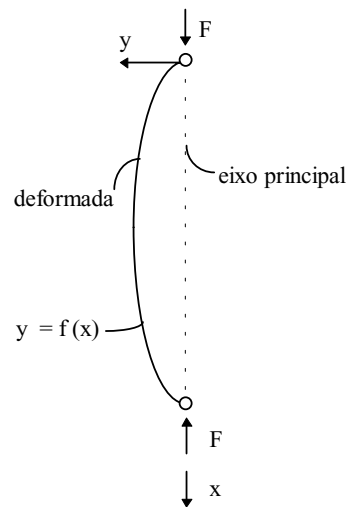
Se esta barra for esbelta, poderá atingir uma instabilidade longitudinal sem início do processo de ruptura da seção. Este fenômeno de instabilidade, é conhecido como ***Flambagem***.

Esta deformação lateral portanto tende a crescer muito enquanto a carga permanece praticamente constante, rompendo a barra por esforço de flexão.

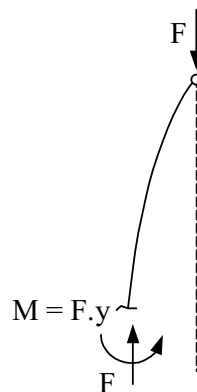
Leonhard Euler criou uma teoria para este fenômeno, conhecida como Teoria de Euler. Para uma coluna bi-rotulada em seus extremos, de comprimento  $L$ , submetida a um par de cargas axiais de compressão aplicadas em suas extremidades, estando inicialmente com eixo reto, após a aplicação de  $F$ , deforma-se segundo uma curva senoidal representada na Figura III.1.

A partir da deformada da estrutura mostrada na Figura III.2 tem-se a carga crítica de flambagem da coluna dada por:

$$F_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{III.1})$$



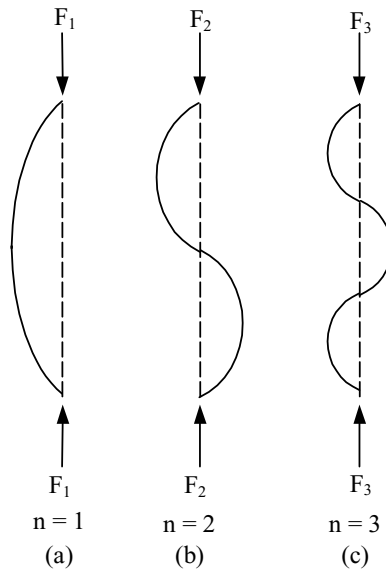
**Figura III.1** – Barra bi-rotulada sob carga axial centrada.



**Figura III.2** – Equilíbrio em uma seção genérica.

O mais importante desses valores é obtido para  $n = 1$ , com a forma de uma meia onda senoidal, com mostrado na Figura III.3.a.

Na Figura III.3.b tem-se  $F_{cr} = F_2 = 4F_1$  e na Figura III.3.c;  $F_3 = 9F_1$ .



**Figura III.3 – Deformadas Senoidais**

Assim, o significado da equação (III.1) é que o equilíbrio da barra em qualquer das posições deformadas da Figura III.3 somente é alcançado no caso em que a carga máxima assume um destes valores críticos. Assim para  $n=1$  tem-se:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{III.2})$$

Esta expressão representa a carga crítica de Euler para uma barra prismática de comprimento  $L$ , módulo de elasticidade longitudinal  $E$ , e momento de inércia  $I$  em relação ao eixo de menor inércia.

Para outras condições de extremidades e usando o mesmo procedimento anterior, teremos:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (\text{III.3})$$

$$F_{cr} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{III.4})$$

$$F_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{III.5})$$

A equação III.3 define o valor da carga crítica de flambagem para uma barra solicitada por uma carga  $F$  axial, com rigidez flexional ( $EI$ ) constante, com uma das extremidades rotulada e outra livre. Já a equação III.4 com uma das extremidades rotulada e outra engastada e a equação III.5 com as duas extremidades engastadas.

### III.3 - Comprimento efetivo de flambagem

A tensão média nas barras comprimidas é calculada dividindo-se o valor  $F$  axial, pela área da seção transversal. Esta tensão para o caso em que  $F = F_{cr}$  é chamada Tensão Crítica de Flambagem  $\sigma_{cr}$ . Desta maneira considerando o caso da equação III.2, teremos:

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} = \frac{\pi^2 E}{A \frac{L^2}{I}} \quad (\text{III.6})$$

Sabendo-se que o raio de giração de uma seção transversal de uma barra vale a raiz quadrada da relação entre o seu momento de inércia e a área da seção transversal, teremos:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\frac{A}{I} L^2} = \frac{\pi^2 E}{\frac{L^2}{r^2}} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (\text{III.7})$$

onde  $r$  é o raio de giração da seção transversal.

Comparando-se agora a carga crítica de uma barra engastada e livre em suas extremidades (equação III.4), com a carga crítica de uma barra bi-rotulada (equação III.2), vê-se que a fórmula para o último caso também pode ser usada para o primeiro, desde que

troquemos o valor “L” por um comprimento efetivo “2L”, ou seja, duas vezes o comprimento da barra engastada e livre. Desta maneira podemos generalizar a equação III.7, escrevendo-a sob a forma:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(K \frac{L}{r}\right)^2} \quad (\text{III.8})$$

Sendo KL o comprimento efetivo de flambagem. O valor de “K” conhecido como fator de comprimento efetivo terá portanto os seguintes valores apresentados na Figura III.4, de acordo com as recomendações da NBR-8800/86[2]:

K = 1	Barras bi-rotuladas
K = 2	Barras engastadas e livres nas extremidades
K = 0,5	Barras bi-engastadas
K = 0,707	Barras engastadas em uma extremidade e rotulada na outra





Podemos também agora definir o índice de esbeltez  $\lambda$  de uma barra. Sendo L o seu comprimento, r o raio de giração e K o fator de comprimento efetivo de flambagem, teremos:

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (\text{III.9})$$

Portanto a expressão da tensão crítica de Euler terá a seguinte forma:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (\text{III.10})$$

Pode-se escrever a tensão crítica de flambagem em função da esbeltez “ $\lambda$ ”, isto é quanto maior for este valor, menor será  $\sigma_{cr}$ , ou seja, para valores altos de  $\lambda$  a barra flambará com valores pequenos de  $\sigma_{cr}$ .

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0
	Valores recomendados para o dimensionamento	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10
Código para a condição de Apoio	 rotação e translação impedidas  rotação livre e translação impedida  rotação impedida, translação livre  rotação e translação livres					

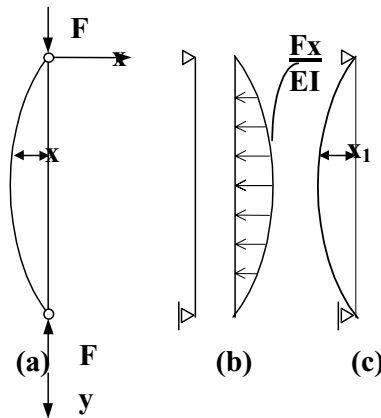
**Figura III.4** – Valores do fator “K” de flambagem [2].

### III.3.1 – Correção do coeficiente de flambagem K

Para o caso de barras de estruturas treliçadas espaciais com barras tubulares de extremidades amassadas, podemos considerar no cálculo do índice de esbeltez global, a variação de inércia da seção transversal do tubo em função da mudança de inércia devido ao amassamento [13, 39].

A determinação da carga crítica de flambagem de uma barra de inércia variável carregada com uma força F, pode ser determinada utilizando-se a teoria da viga- coluna.

Seja a barra bi-rotulada indicada na Figura III.5.a, solicitada lateralmente por carregamento  $\frac{Fx}{EI}$ , como mostrado na Figura III.5.b.



**Figura III.5 – Viga-Coluna.**

São considerados os valores numéricos das deformações  $x$  e calculadas as ordenadas da carga  $\frac{Fx}{EI}$ . Esta carga produz na viga análoga, deformações  $x_1$  conforme III.5.c. Variam-se os valores numéricos  $x$  até que  $x_1/x$  seja uniforme ao longo do vão. Quando isso acontecer, as abcissas  $x$  irão representar a elástica de equilíbrio da barra sob a ação da força  $F$ . Igualando-se então  $x_1$  a  $x$ , determinamos a carga crítica  $F_{cr}$ . Este processo iterativo de cálculo é conhecido como de Stodolla-Vianello [13].

As barras tubulares da treliça espacial utilizadas no programa experimental deste trabalho, a ser apresentado no capítulo IV, apresentam uma redução de inércia nas suas extremidade devido ao amassamento quando da sua confecção.

Esta redução influi no comprimento de flambagem e pode ser considerada por meio do comprimento efetivo de flambagem. Assim se considerarmos uma barra bi-rotulada com inércia variando em suas extremidades como ilustrado na figura III.6, o valor deste comprimento é alterado por um novo coeficiente de flambagem  $K$ . O valor de  $K$  é determinado em função das características geométricas da barra e segue a seguinte metodologia:

- A partir da seção da barra a ser analisada, tem-se o valor de  $n$ , conforme figura III.6.
- Em seguida determina-se o valor da relação  $I_0/I$ , sendo  $I_0$  a inércia da extremidade do trecho amassado, e  $I$  a inércia da seção transversal não amassada da barra.

- Com o valor da relação  $a/L$ , figura III.6, obtêm-se os valores de  $K$  por meio da tabela III.1.
- Com este valor de  $K$ , determina-se o comprimento de flambagem,  $L_E$ , a partir das expressões:

$$\frac{KEI}{L^2} = \frac{\pi^2 EI}{L_E^2} \quad \text{assim,} \quad L_E = \frac{\pi}{\sqrt{K}} L$$

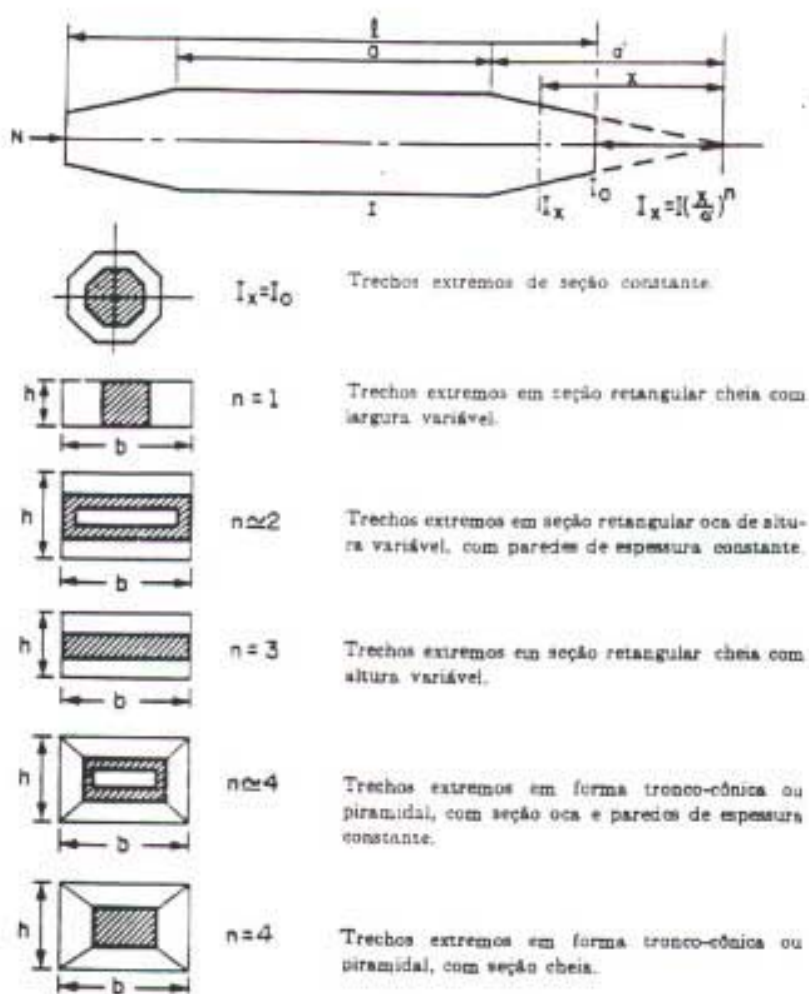


Figura III.6 – Valores de  $n$  relativo a seção transversal com variação de inércia [39].



		Valores de K para Extremos Rotulados				Valores de K para Extremos Enxastados Indefinidos					
a/l	I <sub>2</sub> /I	I <sub>x</sub> = I <sub>y</sub>	n = 1	2	3	4	I <sub>x</sub> = I <sub>y</sub>	n = 1	2	3	4
0	0		5,78	1,00							
	0,01		5,87		3,45	2,55	2,15				
	0,10		6,48		5,40	5,01	4,81				
	0,20		7,01		6,37	6,14	6,02	20,36	18,94	18,48	18,23
	0,40		7,87		7,61	7,52	7,48	26,16	25,54	25,32	25,23
	0,60		8,61		8,51	8,50	8,47	31,04	30,79	30,72	30,68
	0,80		9,27		9,24	9,23	9,23	35,40	35,35	35,32	35,33
0,2	0		7,04	1,56							
	0,01	0,15	7,11	4,73	3,65	3,13	0,61				
	0,10	1,47	7,58	6,67	6,32	6,11	5,87				
	0,20	2,80	7,99	7,49	7,31	7,20	11,13	22,36	21,25	20,88	20,71
	0,40	5,09	8,59	8,42	8,38	8,33	20,24	27,50	27,35	27,20	27,13
	0,60	6,98	9,12	9,04	9,02	9,01	27,71	32,20	32,02	31,96	31,94
	0,80	8,55	9,53	9,50	9,50	9,49	34,02	36,00	35,97	35,96	35,96
0,4	0		8,35	2,78							
	0,01	0,27	8,40	6,58	5,42	4,84	1,08				
	0,10	2,40	8,63	8,08	7,84	7,58	9,48				
	0,20	4,22	8,90	8,61	8,49	8,42	16,26	23,42	22,91	22,64	22,49
	0,40	6,68	9,19	9,15	9,10	9,10	24,88	28,96	28,52	28,40	28,33
	0,60	8,19	9,55	9,48	9,46	9,45	30,62	32,92	32,77	32,72	32,69
	0,80	9,18	9,68	9,70	9,69	9,69	35,31	36,36	36,34	36,32	36,32
0,6	0		9,36	6,25							
	0,01	0,60	9,40	8,82	7,96	7,53	2,39				
	0,10	4,50	9,46	9,25	9,14	9,08	15,47				
	0,20	6,69	9,73	9,44	9,39	9,38	20,46	25,44	24,29	23,96	23,80
	0,40	8,51	9,75	9,63	9,62	9,62	26,31	30,20	29,69	29,52	29,46
	0,60	9,24	9,76	9,74	9,74	9,74	31,09	33,80	33,63	33,56	33,54
	0,80	9,63	9,82	9,82	9,81	9,81	35,44	36,84	36,80	36,80	36,78
0,8	0		9,80	9,57							
	0,01	2,26	9,80	9,71	9,63	9,56	8,48				
	0,10	8,59	9,82	9,79	9,77	9,77	17,13				
	0,20	9,33	9,82	9,81	9,81	9,80	21,06	29,00	27,67	27,24	27,03
	0,40	9,67	9,83	9,84	9,84	9,84	27,47	33,08	32,59	32,44	32,35
	0,60	9,78	9,85	9,85	9,85	9,85	32,46	35,80	35,64	35,60	35,56
	0,80	9,84	9,86	9,86	9,86	9,86	36,74	37,84	37,81	37,80	37,80
1,0		9,87	9,87	9,87	9,87	9,87	39,48	39,48	39,48	39,48	39,48

Tabela III.1 – Valores do coeficiente  $K$  para seções com inércia variável [15].

### III.4-PRESCRIÇÕES DE NORMAS

Geralmente as barras utilizadas nas estruturas espaciais treliçadas têm a forma tubular, conformada a frio. A NB-143/67 [1] regulamenta o dimensionamento destas barras, porém como a mesma não sofreu atualização, não é utilizada pelos projetistas.

Assim é usual em projetos a utilização de normas internacionais como, as americanas, baseadas nos critérios dos estados limites, AISC-LRFD [7], AISI-LRFD [5] e a européia EUROCODE [16], entre outras

A possibilidade da utilização da norma brasileira também existe, pois em sua última versão, NBR-8800/86 [2], faz-se referência a barras de seções tubulares conformadas a frio. Neste trabalho serão consideradas estas normas, para o desenvolvimento de um estudo comparativo entre estes e os valores experimentais das resistências à compressão do modelo a ser apresentado no Capítulo IV.

#### III.4.1 Cálculo da resistência à compressão segundo a AISC

##### • AISC – LRFD

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (III.11)$$

Sendo,

$$\lambda_c \leq 1,5 \Rightarrow f_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2}\right) f_y \quad (III.12)$$

$$\lambda_c > 1,5 \Rightarrow f_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) \cdot f_y \quad (III.13)$$

$$F_{cr} = f_{cr} \cdot A_g \quad (III.14)$$

Sendo:

$f_y$ : tensão de escoamento do aço

E: módulo de Elasticidade longitudinal

$\lambda_c$ : esbeltez relativa ou parâmetro de esbeltez

$f_{cr}$ : tensão crítica da flambagem

$F_{cr}$ : carga crítica de flambagem

$A_g$ : área bruta da seção transversal da barra

#### III.4.2 – Cálculo da resistência à compressão segundo o EUROCODE

$$f_{cr} = \rho f_y \quad (\text{III.15})$$

$$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}}; \quad (\rho = 1; \text{ para } \bar{\lambda} \leq 0,20) \quad (\text{III.16})$$

Sendo:

$$\beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (\text{III.17})$$

$$F_{cr} = f_{cr} \cdot A_g$$

De acordo com recentes recomendações deste comitê os tubos conformados a frio executados com soldas por eletrofusão, deverão ser dimensionados de acordo com a curva de flambagem “b”, podendo ser adotado neste caso  $\alpha = 0,281$ .

#### III.4.3 – Cálculo da resistência à compressão segundo a AISI

$$f_{cr} = f_y - \frac{f_y^2}{4f_{cre}}, \text{ para } f_{cre} > \frac{f_y}{2}$$

(III.18)

$$f_{cr} = f_{cre}; \text{ para } f_{cre} \leq \frac{f_y}{2} \quad (\text{III.19})$$

Sendo:

$$f_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \text{ (fórmula de Euler)} \quad (\text{III.20})$$

$$F_{cr} = f_{cr} \cdot A_g \quad (\text{III.21})$$

#### III.4.4- Cálculo da resistência à compressão segundo a NBR - 8800

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{E}}; \text{ sendo} \quad (III.22)$$

$$0 < \bar{\lambda} \leq 0,20 \Rightarrow \rho = 1$$

$$\bar{\lambda} > 0,20 \Rightarrow \rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (III.23)$$

Sendo Q o fator de flambagem local e  $\rho$  o de flambagem global, tem-se as expressões III.24 e III.25, e considerando que barras de seções tubulares são compactas, sem flambagem local, adotaremos  $Q = 1$ .

Então:

$$f_{cr} = Q \cdot \rho \cdot f_y = \rho \cdot f_y \quad (III.24)$$

$$F_{cr} = f_{cr} \cdot A_g \quad (III.25)$$

O valor do fator de flambagem global pode ser obtido através da tabela 3, página 32 [NBR - 8800/86], que para perfil tubular, tem-se curva “a” e o valor de  $\rho$

$$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (\rho = 1 \text{ para } \bar{\lambda} \leq 0,20) \quad (III.26)$$

$$\beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[ 1 + \alpha \sqrt{\bar{\lambda} - 0,04 + \bar{\lambda}^2} \right]; \alpha = 0,158, \text{ curva “a”} \quad (III.27)$$

# ***CAPÍTULO IV***

## **IV - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

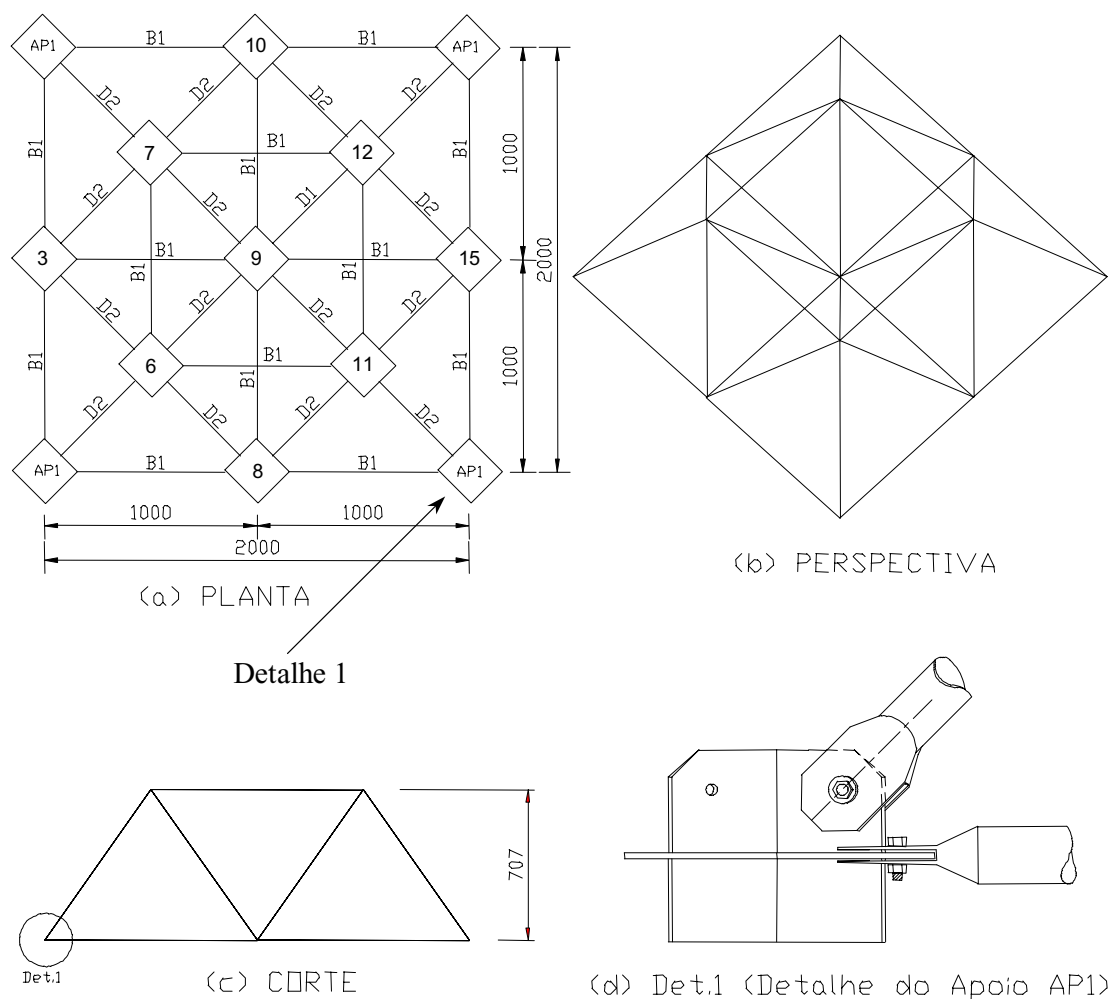
### **IV.1 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS**

Foi ensaiado um módulo de treliça espacial com dois banzos, um inferior de 2000 x 2000 mm e outro superior de 1000 x 1000 mm, com altura igual a 707 mm e diagonais a 45°, portanto com todas as barras de igual comprimento, como mostra a Figura IV.1. Trata-se então de um sistema espacial de banzos paralelos e diagonais, de forma tal que a malha formada é uma pirâmide regular de base quadrada de lado igual a 1000 mm, com o formato apresentado na Figura II.1.a. Isto reafirma a questão colocada no capítulo II, ou seja, dentro dos limites de altura de uma treliça espacial, devemos sempre procurar adotar todas as barras com igual comprimento, facilitando a análise e dimensionamento das mesmas. e o processo de fabricação e montagem.

Na Figura IV.1.b. tem-se a vista em perspectiva do módulo, onde a parte hachurada representa o plano do banzo superior. A Figura IV.1.c mostra uma elevação do módulo onde está indicada a sua altura.

Este módulo se apoia em quatro pontos, que de acordo com a Figura IV.1.a, são chamados AP1, e cujo sistema será apresentado neste capítulo. As distâncias entre pontos das malhas referem-se às distâncias de centro a centro dos nós ou de PT a PT (ponto de trabalho).

Observa-se na Figura IV.1.a as barras do banzo inferior e as diagonais saindo do nó AP1 de apoio. Barras estas de ponta amassada que serão analisadas em detalhe a posteriori.



**Figura IV.1** - Módulo idealizado para os ensaios (dimensões em mm).

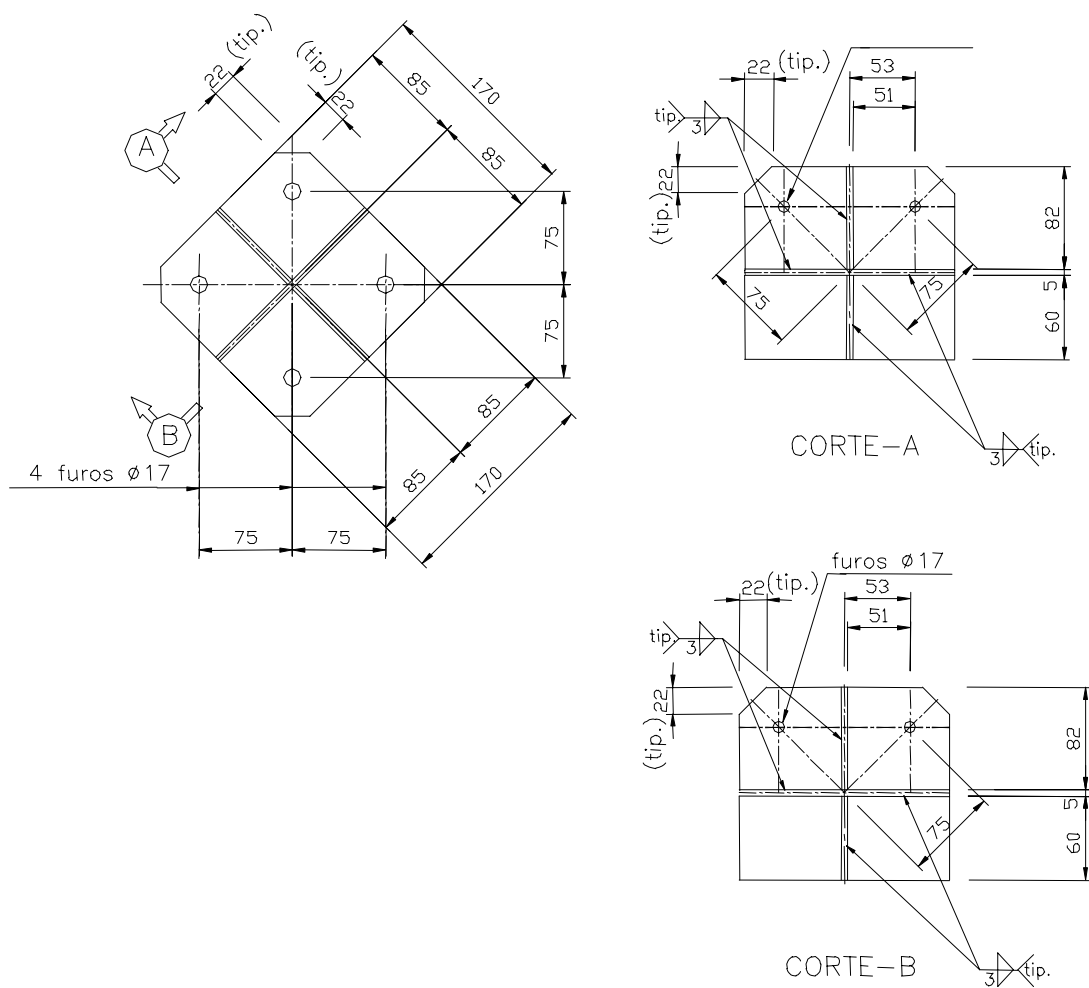
O módulo é formado por 32 barras e 13 nós, incluindo os dos apoios AP1 como na Figura IV.1.a, tendo sido utilizada a seguinte nomenclatura no decorrer deste trabalho para identificação dos elementos estudados.

Banzos inferiores e superiores - B1.

Diagonais - D1 e D2.

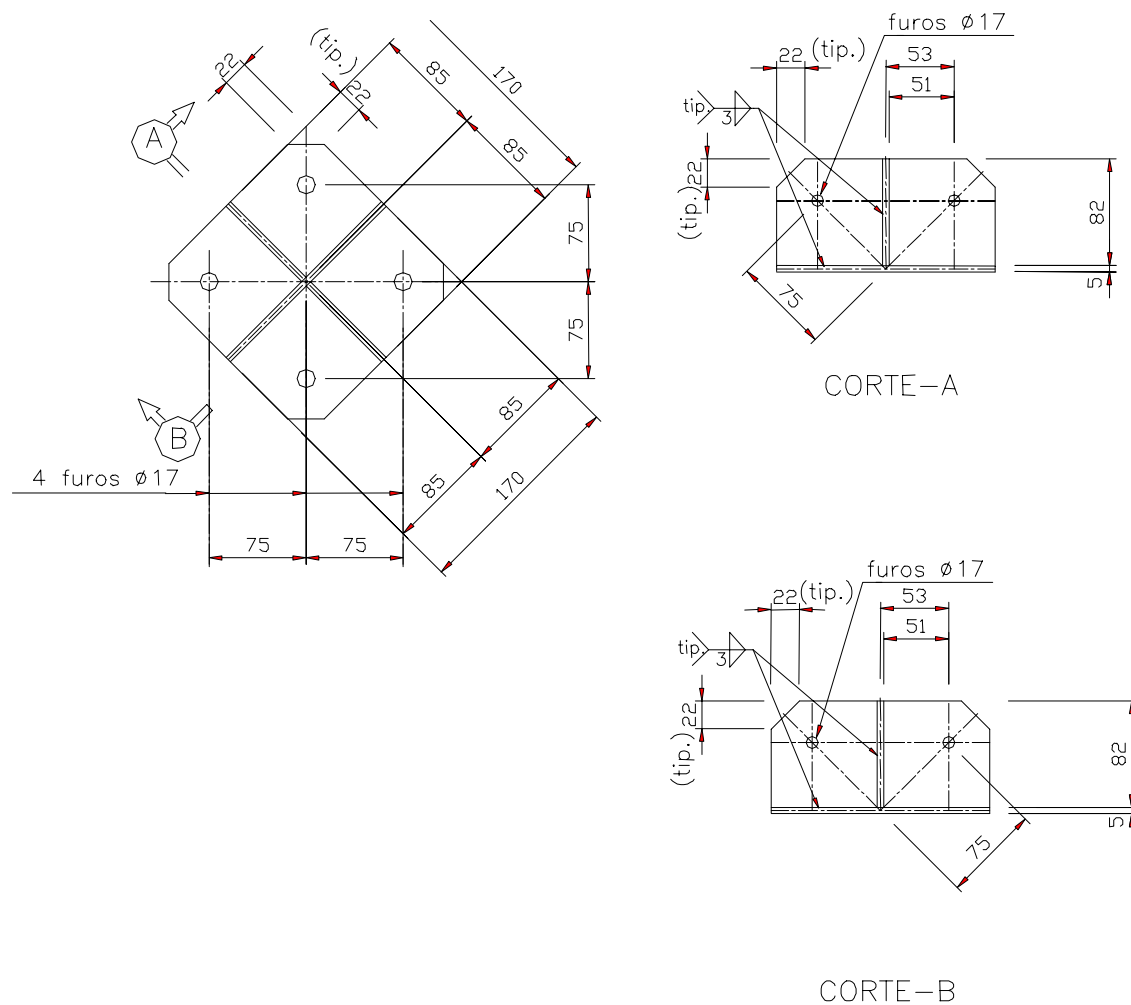
Os elementos de ligação nos apoios AP1 são formados por três chapas soldadas ortogonais entre si, com espessura de 5mm, conforme Figura IV.1.d. Este tipo de elemento de ligação também foi utilizado no nó central do modelo.

Para maiores detalhes dos elementos de ligação nos apoios AP1, observa-se na Figura IV.2 a geometria do sistema utilizado.



**Figura IV.2 - Detalhe dos nós dos apoios AP1.**

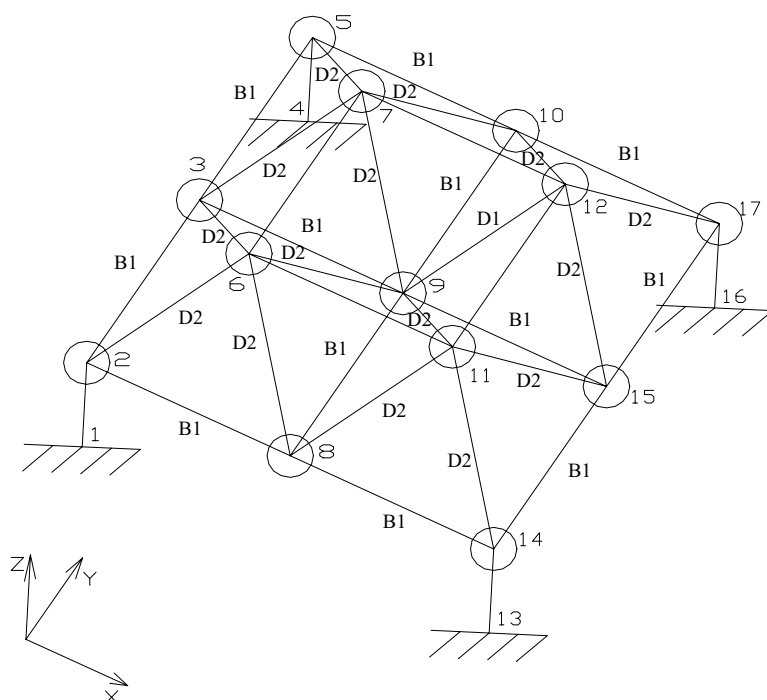
Na Figura IV.3 é apresentado o detalhamento dos nós de ligações entre as barras que compõem o módulo, exceto os localizados nos apoios AP1 e no nó central.



**Figura IV.3 - Detalhes dos nós entre barras.**

A Figura IV.4 apresenta a numeração utilizada para os nós que compõem o módulo. É importante ressaltar que as barras dos apoios definidos pelos nós 1 e 2, 4 e 5, 16 e 17, 13 e 14, são consideradas como pilares do sistema estrutural. Portanto, foi considerado para efeito de cálculo os nós 1, 4, 13, e 16 parcialmente rígidos [29]. Observa-se que as barras 2-3, 3-5, 5-10, 10-17, 17-15, 15-14, 14-8 e 8-2, 3-9, 9-15, 9-10, e 9-8 formam o banzo inferior, as barras 6-7, 7-12, 12-11 e 11-6, formam o banzo superior e as outras barras, exceto as que correspondem aos pilares citados anteriormente, são as diagonais da treliça.





**Figura IV.4** – Vista geral do módulo ensaiado com a numeração de nós adotada.

Na Foto IV.1 tem-se uma vista geral do módulo de ensaiado. A Foto IV.2 apresenta um dos nós das ligações entre as barras fora do apoio. Na Foto IV.3 tem-se o detalhe do nó utilizado nos apoios AP1. O nó central da treliça, nó 9, apresenta o mesmo detalhe dos nós dos apoios, já ilustrado na Foto IV.3.



**Foto IV.1** – Vista geral do módulo.



**Foto IV.2** – Detalhe do nó fora dos apoios.



**Foto IV.3** – Detalhe do nó de apoio AP1.



**Foto IV.4** – Vista geral do módulo ensaiado.

A montagem do módulo ensaiado, bem como os sistemas de ensaio, serão apresentados nos itens seguintes. A Foto IV.4 ilustra o módulo ensaiado, durante a montagem dos sistemas de ensaio.

## **IV.2 - ENSAIOS REALIZADOS**

Foram realizados 9 ensaios com o modelo apresentado. O primeiro ensaio foi realizado com todas as barras tendo a mesma seção transversal. Nos demais ensaios os modelos tinham uma das barras diferentes das demais, que eram iguais entre si. A partir do segundo ensaio, considerou-se o sistema de forma que a barra 9-12 (barra que é definida pelos nós 9 e 12) tivesse características mecânicas e geométricas de modo a tornar-se fragilizada na presença das demais. Desta forma, apenas a barra 9-12 de cada ensaio foi levada ao colapso por flambagem elástica ou inelástica.

Os ensaios foram identificados pela numeração da barra fragilizada, seguida por letras de modo a diferencia-los entre si, ou seja, ensaios 9-12, 9-12A, 9-12B, 9-12C, 9-12D, 9-12E, 9-12F, 9-12G e 9-12H.

A seguir serão apresentadas as diferenças entre as seções transversais das barras dos ensaios. Vale ressaltar que à partir do segundo ensaio, as barras que não sofreram deformações permanentes foram utilizadas nos ensaios seguintes. Assim ocorreu a substituição apenas da barra 9-12, tendo sido concentrada a pesquisa nesta barra.

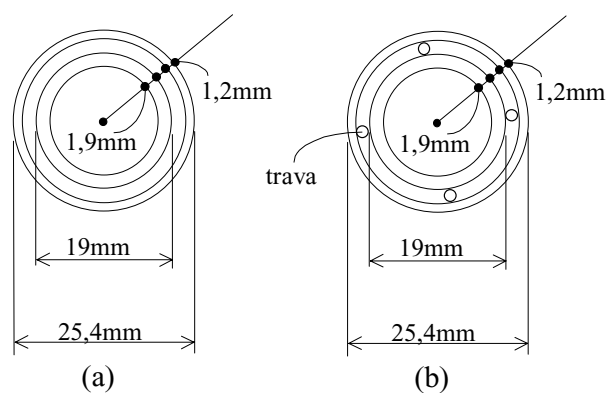
#### **IV.2.1 - Características da barra fragilizada para cada ensaio realizado**

Como especificado anteriormente, os ensaios foram identificados de acordo com a diferenciação entre as barras e os tipos de aços empregados. As características das barras fragilizadas, relativamente a cada ensaio realizado são:

- **912:** Tubo redondo USI-SAC41 com diâmetro externo de 33,5 mm e espessura da parede igual a 2,25 mm, com 1,73 kg/m.
- **912A, 912B e 912C:** Tubo redondo SAE-1010, com diâmetro externo de 25,4 mm e espessura da parede igual a 1,2 mm, com 0,88 kg/m.
- **912D e 912G:** Dois tubos, um exterior de 25,4 mm de diâmetro externo com parede de 1,2 mm e outro interior com 19 mm de diâmetro externo, e parede de 1,9 mm, sem nenhum travamento entre os dois.
- **912E e 912H:** Dois tubos com as mesmas características dos modelos 912D e 912G, porém neste caso com peças de travamento entre os dois.
- **912F:** Tubo redondo SAE-1010 com diâmetro externo de 19 mm e espessura de parede igual a 1,9 mm.

Na Figura IV.5 pode-se observar as seções transversais das barras dos ensaios 912D, 912G, 912E, e 912H. As demais barras têm a seção transversal circular, conforme descrito anteriormente.

As peças de travamento mostradas na Figura IV.5.b barras redondas e lisas que têm os seus diâmetros em função do espaçamento entre as paredes externas dos tubos. Este procedimento é utilizado na prática de projetos, quando não se dispõe de tubos com diâmetro necessário para o emprego de apenas um. A indisponibilidade dos tubos desejados pode ser ocasionada pelos fornecedores dos mesmos e/ou estoque da empresa fabricante.



**Figura IV.5** – Detalhe da seção transversal das barras duplas.

**(a)** ensaios 912D e 912G, **(b)** ensaios 912E e 912H

Pesquisas com empresas de projeto e fabricação de estruturas metálicas tubulares mostraram que este procedimento alternativo de um tubo interno a outro tem sido amplamente utilizado, porém sem uma avaliação mais precisa de sua eficiência e influência na estrutura. Por este motivo foi introduzido nesta pesquisa o estudo dos modelos que utilizam estes tipos de seções transversais.

As diferentes barras fragilizadas descritas anteriormente definem os modelos ensaiado.

A tabela IV.1 apresenta as características das barras 9–12 relativas a cada ensaio.

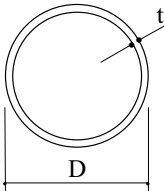
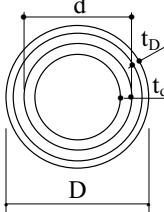
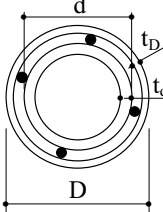
SEÇÃO				CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
	ENSAIO			A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	r (cm)
<b>912</b> (SAC-41)	D = 33,35 mm t = 2,25 mm	—	—	2,21	2,71	1,11
<b>912A</b> (SAE-1010)	D = 25,4 mm t = 1,2 mm	—	—	0,91	0,67	0,86
<b>912B</b> (SAE-1010)	D = 25,4 mm t = 1,2 mm	—	—	0,91	0,67	0,86
<b>912C</b> (SAE-1010)	D = 25,4 mm t = 1,2 mm	—	—	0,91	0,67	0,86
<b>912D</b> (SAE-1010)	—	D = 25,4 mm t <sub>D</sub> = 1,2 mm d = 19 mm t <sub>d</sub> = 1,9 mm	—	1,02	0,38	0,61
<b>912E</b> (SAE-1010)	—	—	D = 25,4 mm t <sub>D</sub> = 1,2 mm d = 19 mm t <sub>d</sub> = 1,9 mm	1,93	1,05	0,74
<b>912F</b> (SAE-1010)	D = 19 mm t = 1,9 mm	—	—	1,02	0,38	0,61
<b>912G</b> (SAE-1010)	—	D = 25,4 mm t <sub>D</sub> = 1,2 mm d = 19 mm t <sub>d</sub> = 1,9 mm	—	1,02	0,38	0,61
<b>912H</b> (SAE-1010)	—	—	D = 25,4 mm t <sub>D</sub> = 1,2 mm d = 19 mm t <sub>d</sub> = 1,9 mm	1,93	1,05	0,74

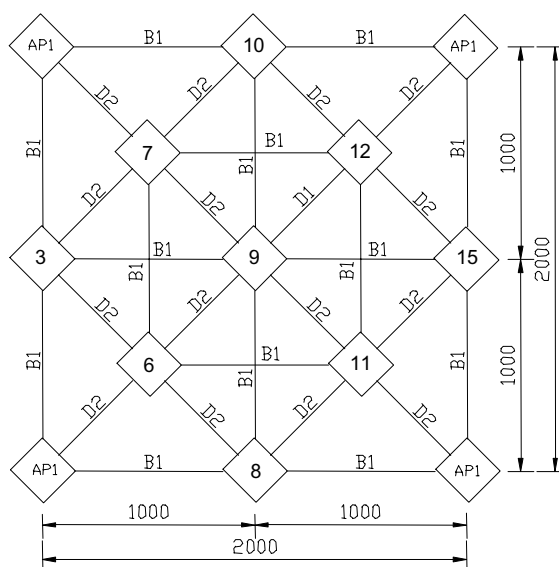
Tabela IV.1 – Características das barras 9–12 de cada ensaio.

#### IV.2.2 - Características das Barras dos Modelos

##### Modelo 912

Neste primeiro ensaio foram empregadas as barras indicadas na Figura IV.6, onde vemos dezesseis barras do tipo B<sub>1</sub>, que são as dos banzos inferior e superior, quinze barras do tipo D<sub>2</sub>, que são diagonais tracionadas e comprimidas e a barra fragilizada D<sub>1</sub> submetida a

esforço axial de compressão. Deve-se observar ainda que todos nós, exceto os dos apoios, são do tipo ilustrado na Figura IV.3.



**Figura IV.6 - Barras e nós do modelo 912.**

As Figuras IV.7 e IV.8 mostram o detalhamento das trinta e duas barras utilizadas neste ensaio. São indicadas as distâncias de centro a centro de furos, do centro de furo à extremidade do tubo, do centro do tubo ao final do trecho da ponta amassada e distância de centro do furo ao PT (Ponto de Trabalho) ou centro da ligação. As barras dos banzos  $B_1$  e diagonais  $D_2$  têm diâmetros externos de 60,32 mm e 2,65 mm de espessura de parede, tendo 3,77kg/m.. A barra da diagonal fragilizada  $D_1$  tem diâmetro externo igual a 33,5 mm, 1,73 kg/m, e espessura da parede igual a 2,25 mm.

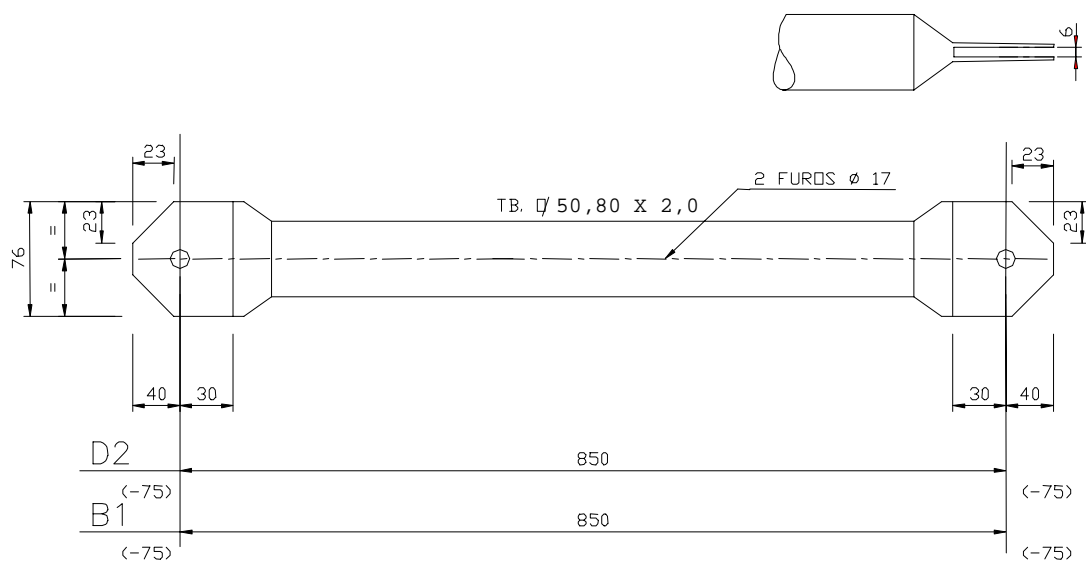
Geralmente os sistemas mostrados nas Figuras IV.7 e IV.8, isto é, barras com amassamento nas extremidades, somente são utilizados com barras de diâmetro externo menor ou igual a 88,9 mm. Acima deste valor são empregadas chapas soldadas nas extremidades das barras ou ponteiros, conforme ilustra a Foto II.6.



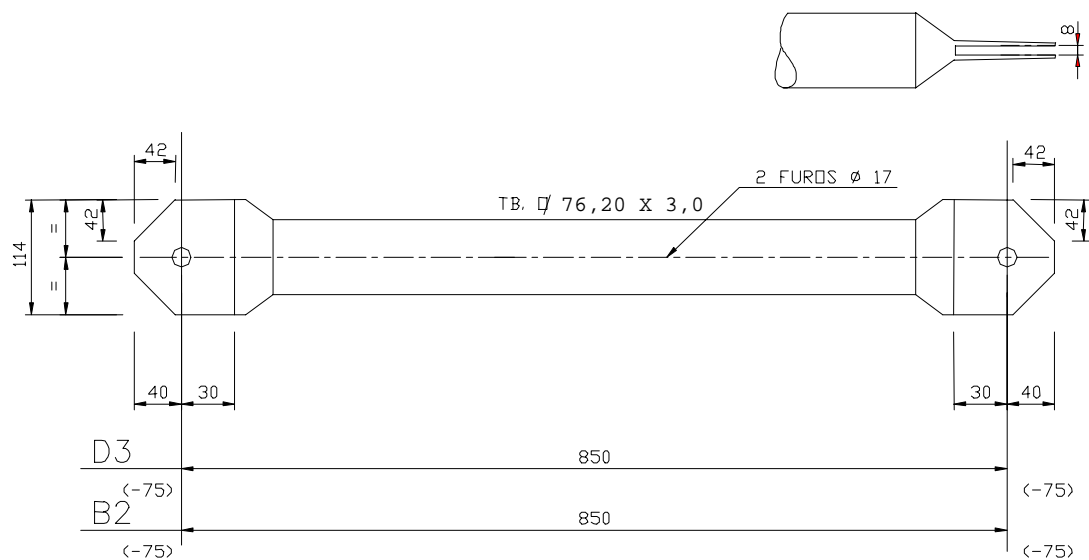




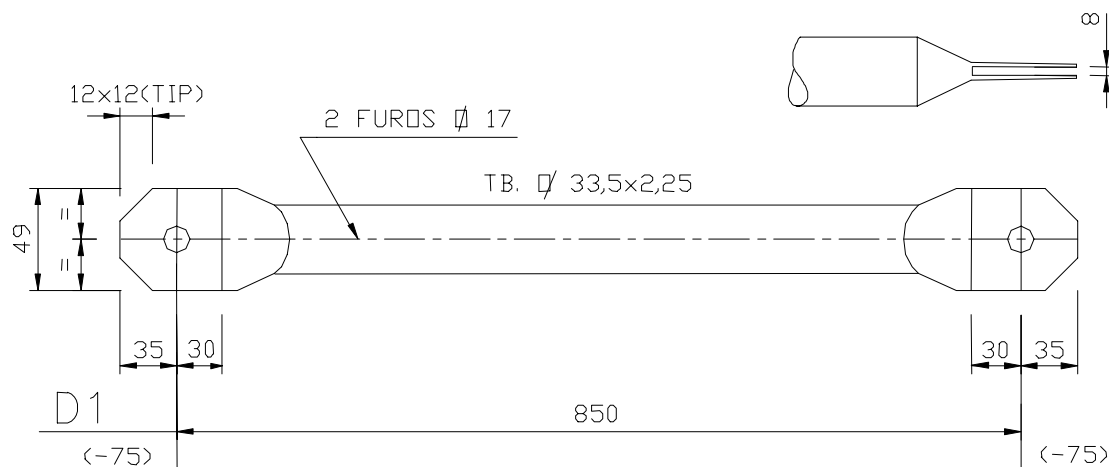
Para as diagonais  $D_3$  (Figura IV.11) tracionadas, são utilizadas 4 (quatro) barras com diâmetro externo de 76,20 mm e espessura de parede igual a 3,0 mm. As diagonais  $D_2$  (Figura IV.10) são compostas por 8 (oito) barras com diâmetro externo de 50,8 mm e espessura de parede igual a 2,0 mm.



**Figura IV.10 - Barras  $B_1$  e  $D_2$ .**

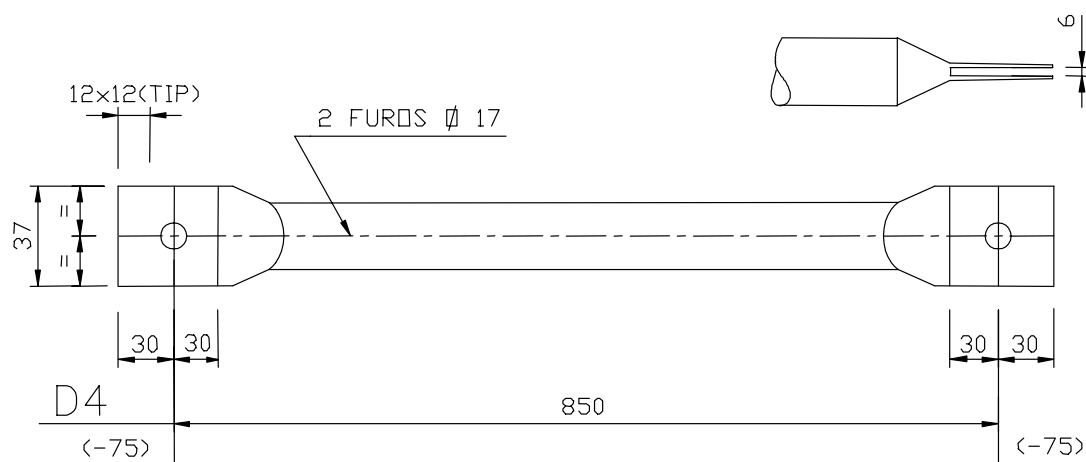


**Figura IV.11 - Barras  $B_2$  e  $D_3$ .**



**Figura IV.12 - Diagonal D<sub>1</sub>.**

Na Figura IV.13 não estão caracterizados o diâmetro, espessura nem o tipo de material, a ser empregado, por tratar-se de barra a ser estudada em cada ensaio, com as variações apresentadas na tabela IV.1. No entanto para os ensaios E, F, G e H o diâmetro dos dois furos das extremidades das barras foram de 13mm, sendo utilizados parafusos de ½". Outra observação a ser feita quanto a Figura IV.13 é a inexistência do bisotamento nas extremidades das barras para os ensaios 912A a 912H, pois para barras com diâmetros pequenos, este bisotamento não interfere com as outras barras concorrentes no nó.



**Figura IV.13 - Diagonais D<sub>4</sub> (fragilizada).**

### IV.2.3 - Processo de fabricação das barras tubulares

É importante ressaltar alguns comentários relativos ao processo de fabricação das barras de ponta amassada que são as utilizadas neste trabalho.

Com o projeto de detalhamento mostrado nas Figuras IV.7 e IV.8 inicia-se o processo de fabricação, construindo-se na bancada de corte um gabarito do comprimento da barra e do início de amassamento de suas extremidades. Antes do amassamento, as barras devem ser cortadas longitudinalmente em seus extremos como indicado anteriormente através de Figuras. Observa-se que este corte deve ter uma espessura em função da espessura da chapa de ligação que em nosso caso é de 5 mm. Assim deve ser executado um rasgo com abertura de 8mm, um pouco superior à espessura da chapa de nó. Isto é necessário para que haja uma folga entre o rasgo e a chapa, facilitando desta forma a montagem do sistema. Após este procedimento, retorna-se à bancada onde é introduzido no rasgo existente uma chapa de espessura superior à do nó, de maneira que após o amassamento as extremidades das barras apresentam a forma mostrada nas Figuras IV.7 e IV.8.

Concluídas estas fases, realizam-se os furos de acordo com o projeto e realiza-se o bisotamento das extremidades dos tubos, com o objetivo de se evitar a interferência das mesmas nas ligações entre barras..

Em seguida, as barras tubulares redondas passam por um processo de proteção anticorrosiva que pode ser por tratamento superficial à base de zincagem (galvanização) a quente ou pinturas adequadas, do tipo automotiva. O processo de zincagem consiste na sobreposição de uma camada de zinco sobre as superfícies dos tubos (internas e externas), pela imersão em zinco líquido.

Terminado este processo de fabricação, ainda na fábrica os tubos são armazenados de acordo com o ilustrado na Foto II.4.

### IV.3 - SISTEMA DE ENSAIO

#### IV.3.1 - Sistema de aplicação de cargas e apoios

O carregamento foi aplicado ao módulo por meio de um sistema de carga , localizado no nó central nove conforme Figura IV.4, e foto IV.5.

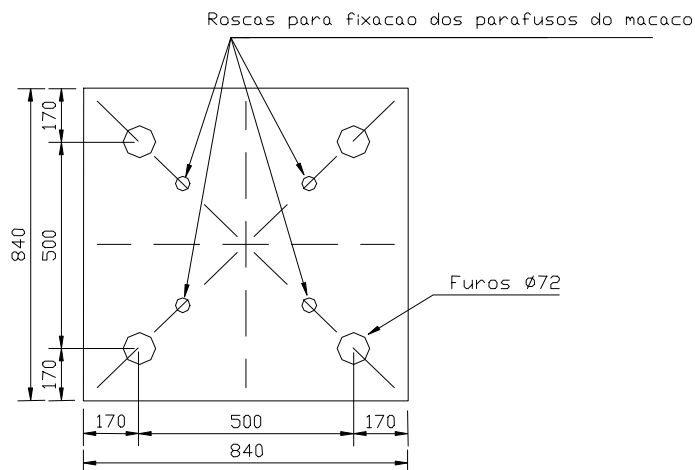
O módulo foi montado sobre a placa de reação do laboratório. Sob o nó central foi fixada uma placa de aço, mostrada na Figura IV.15, ligada à placa de reação por meio de 4 (quatro) parafusos de 25 mm de diâmetro, com o objetivo conectar todo o sistema de cargas à placa de reação.

No ensaio 912 foi utilizado para medição do carregamento aplicado, um transdutor de pressão, fabricação Sodmex, modelo HMI-2300, com sensibilidade 2008mV/V, conectado ao sistema de aquisição de dados, que será descrito a seguir. Entre o pistão do atuador hidráulico e o nó central da estrutura foi posicionada uma rótula universal de modo a garantir a verticalidade do carregamento aplicado, e possibilitar o deslocamento vertical do nó central e sua rotação no espaço. A Foto IV.5 ilustra este sistema de carregamento.

Foi utilizado um atuador hidráulico, com cilindro de dupla ação e curso de pistão de 8 ¼," \fabricado pela Enerpac, com 300kN de capacidade



**Foto IV.5** – Sistema de aplicação de cargas para o ensaio 912.



**Figura IV.15** - Placa metálica de apoio do sistema de aplicação de carga no nó 9.

Para os ensaios 912A a 192H utilizou-se o sistema de aplicação de cargas conforme ilustra a Foto IV.6. Para estes ensaios utilizou-se atuador hidráulico Enerpac de simples ação com curso de 8", com capacidade para 100kN. Nestes ensaios foi substituído o transdutor de pressão utilizado no ensaio 912 por uma célula de carga com capacidade de 100kN, tipo N-400 da SODMEX, com sensibilidade à compressão igual a 1,981 mV/V. A célula de carga foi posicionada entre a extremidade do pistão e a rótula universal.

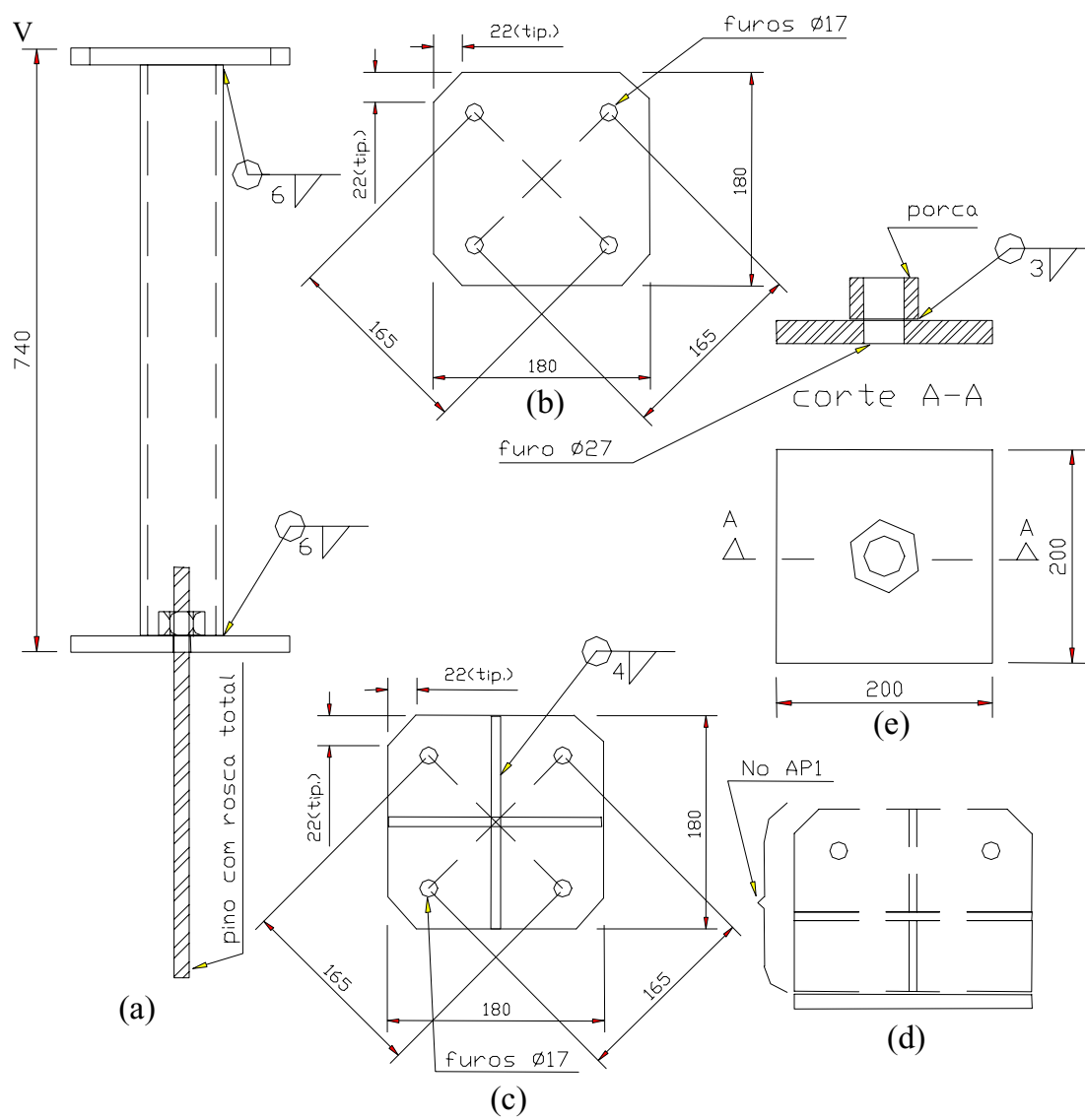
#### IV.3.2 – Sistema de apoio

O sistema de apoios foi idealizado por meio dos quatro nós tipo AP1, onde são conectadas as barras 1-2, 4-5, 16-17 e 13-14 observado na Figura IV.4. Estas barras são formadas por tubos redondos de 127 mm de diâmetro, 4,75 mm de espessura e 11,45 kg/m, soldados na extremidade superior a uma chapa de 180 x 180 mm e 12,7 mm de espessura, com furação correspondente aos nós AP1 do módulo. Na parte inferior dos tubos foi soldada outra chapa de 200 mm x 200 mm e 2,7 mm de espessura, com uma porca fixa em seu centro para a conexão de uma barra rosqueada de 25,4 mm de diâmetro. O objetivo desta é fixar o apoio na placa de reação.



**Foto IV.6** - Sistema de Aplicação de carga para os Ensaios 912A a 912H.

A Figura IV.16 ilustra em detalhes o sistema de apoios. Na Figura IV.16.a vê-se o tubo usado como apoio, com as chapas inferior e superior e barra rosqueada passante na placa de reação. Na Figura IV.16.b tem-se a placa superior, com o detalhe de furação para receber o nó AP1, nas figuras IV.16.c e IV.16.d é apresentado o nó AP1, e na Figura IV.16e tem-se o detalhe da chapa inferior com a porca de fixação do parafuso da Figura (a).



**Figura IV.16 - Detalhes do sistema de apoios .**





**Foto IV.7** - Detalhe do sistema de apoio do módulo.

A foto IV.17 apresenta um dos tubos dos apoios e a correspondente barra rosqueada e placa de reação

#### **IV.3.3 - Instrumentação e sistema de aquisição de dados**

A instrumentação utilizada na aquisição de dados é descrita a seguir:

- Defletômetros marca Mitutoyo, de leitura analógica, precisão 0,01 mm e campo de medida de 10 mm.
- Extensômetros elétricos de resistência uniaxiais tipo KFC-5-C1-11, resistência  $119,8\Omega \pm 0,2$ , fator de resistência  $2,15 \pm 1\%$ , da KYOWA - Electronic Instruments Co.
- Linear Variable Differential Transducer (LVDT), fabricado pela Sensotec tendo sido utilizados os seguintes tipos: MVL7-2000, com alcance de  $\pm 2''$  e MVL7-5000, com alcance de  $\pm \frac{1}{2}''$ .

- Célula de carga com capacidade de 100kN.
- Atuador hidráulico com as características descritas no item IV.3.1

O sistema de aquisição de dados era composto dos seguintes equipamentos.

- Indicadores de deformações P-3500 da Instruments Measurements Group, Inc. e caixa comutadora de canal tipo SB2, com capacidade para 10 canais, para medição das deformações nos extensômetros .
- Sistema de aquisição automática de dados dos LVDT's, célula de carga e transdutor de pressão via computador, constituído de programa AQDADOS 4 da Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda e placa conversora analógica digital.
- Amplificador de sinal, marca Vishay 2100 Systems, com capacidade de 8 (oito) canais.

A seguir será apresentada a instrumentação de cada ensaio, incluindo o posicionamento dos equipamentos

- **Ensaio 912A**

Neste ensaio, foram posicionados LVDT's nos nós 9, 12 e 11 para observação dos deslocamentos verticais no sentido da aplicação da carga, conforme Figura IV.17. Nos apoios AP1 nós 2 e 17 foram posicionados defletômetros para a medição de seus possíveis deslocamentos verticais.

- **Ensaio 912B a 912H**

Nestes ensaios, além das medições citadas anteriormente, foram posicionados dois LVDT's à meia altura da barra fragilizada 9-12, ficando dispostos perpendicularmente um em relação ao outro. Os deslocamentos assim medidos são chamados de deslocamentos horizontal ou vertical conforme o caso. Com a instrumentação dos nós, observou-se os deslocamentos verticais do nó 9, e com a instrumentação da barra 9-12 foram medidos os deslocamentos perpendiculares ao eixo da barra, possibilitando detectar o instante em que ocorreu a sua flambagem.

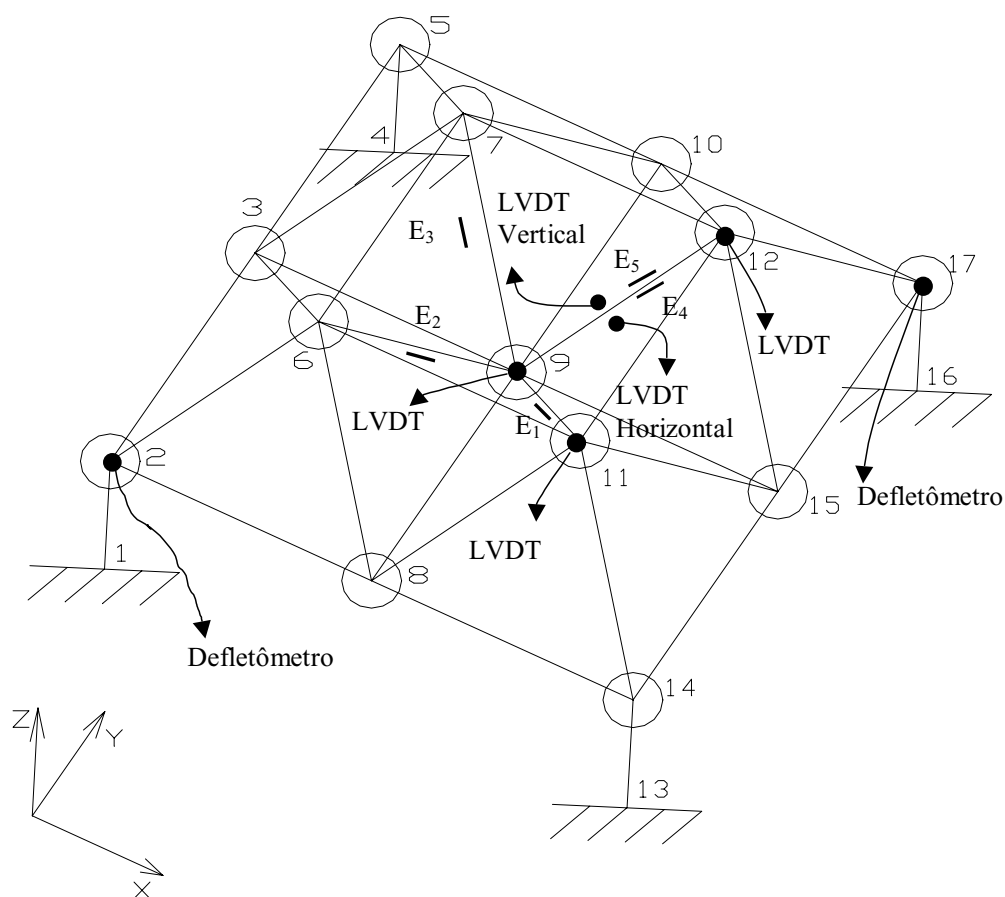
Nos ensaios 912B a 912F foram também utilizados extensômetros elétricos de resistência à meia altura nas barras 9-6, 9-7 e 9-11. Estes extensômetros serviram para medir as deformações nas barras diagonais D1. Nos ensaios 912G e 912H, além dos extensômetros empregados nestas diagonais, foram colados dois extensômetros à meia altura da barra fragilizada D4(barra 9-12), ficando um extensômetro oposto diametralmente ao outro.

A Figura IV.17 apresenta o posicionamento dos diversos equipamentos utilizados na instrumentação dos ensaios.

A relação dos instrumentos de medição de acordo com os ensaios realizados, é resumidamente apresentada na Tabela IV.2:

Nó	Barra	LVDT N <sup>o</sup>	Ensaio
11	-	1377	921A
12	-	1376	912A a 912H
9	-	2041	912A a 912H
-	912 (Desl. Hor.)	2038	912B a 912H
-	912 (Desl. Ver.)	1377	912B a 912H
Célula de Carga	-	-	912A a 912H
Transdutor de Pressão		-	912
Extensômetros E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> e E <sub>3</sub>	911, 96 e 97	-	912B a 912H
Extensômetros E <sub>1</sub> a E <sub>5</sub>	912, 911, 96 e 97	-	912G e 912H

**Tabela IV.2** – Posicionamento dos instrumentos de medição.



**Figura IV.17 - Posicionamento dos instrumentos de medição.**

A Foto IV.8 apresenta uma vista geral dos pontos da estrutura que foram instrumentados. Observa-se o defletômetro no nó 17 e os LVDT's nos nós 9, 12 e 11 e bem como na barra 912, à meia altura. Na barra 912 se encontra instalado um LVDT um na horizontal e outro inclinado, aqui denominados de LVDT horizontal e vertical, respectivamente.

A Foto IV.9 mostra em detalhe estes dois LVDT's para a medição dos deslocamentos transversais da barra fragilizada 912, do ensaio G.

A Foto IV.10 ilustra o sistema de medição de deformações composto pelo indicador e caixa comutadora para leitura por meio dos extensômetros uniaxiais colocados nas barras 9-12, 9-11, 9-6, e 9-7. Na Foto IV.11 é apresentado o sistema de aquisição automática de

dados, composto de uma placa de digitalização de sinais instalada no computador, e o amplificador de sinais marca Vishay.

Finalmente, a Foto IV.12 mostra em detalhe o extensômetro instalado na barra 6-9.



**Foto IV.8** - Vista geral dos pontos instrumentados.



**Foto IV.9** - Detalhe da instrumentação da barra fragilizada 912G.



**Foto IV.10** - Detalhes do sistema de leitura dos extensômetros elétricos.



**Foto IV.11** - Detalhe do sistema de aquisição de dados .



**Foto IV.12** - Detalhe da extensometria.





**Foto IV.13** – Vista do módulo de ensaio montado antes do içamento.



**Foto IV.14** – Vista do módulo de ensaio montado, antes do içamento.



**Foto IV.15** – Montagem do sistema de carga.





**Foto IV.16** – Montagem do sistema de carga e vista do alinhamento do eixo do pistão com o centro do nó 9.



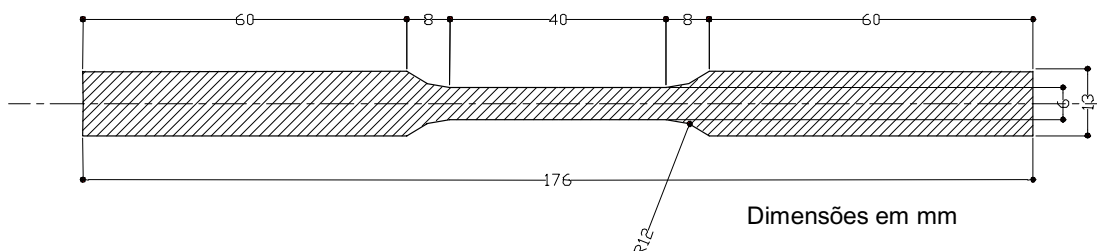
**Foto IV.17** – Vista geral do sistema de carga.



**Foto IV.18**– Vista geral do módulo posicionado sobre os apoios e sistema de carga instalado.

#### IV.4 – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO AÇO UTILIZADO

Realizou-se os ensaios de caracterização mecânica do aço em dezoito corpos de provas ilustrados na Figura IV.18, de acordo com as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR6152.



**Figura IV.18** – Corpo de prova do ensaio de caracterização dos aços utilizados.

Estes corpos de prova foram confeccionados a partir da retirada de chapas em tubos conformados a frio, utilizados nos módulos ensaiados, ao longo de suas geratrizes, doze em aço USI-SAC41 e seis em aço SAE-1010.

No ensaio 912, primeiro ensaio, todas as barras foram fabricadas com aço USI-SAC-41. Nos demais ensaios, apenas as barras 9-12 foram fabricadas com aço SAE-1010 mantendo-se o aço USI-SAC-41 para as demais



**Foto IV.19** – Vista geral da máquina universal de tração durante os ensaios.

Todos estes ensaios de tração foram realizado em Máquina Universal marca Kratos, com capacidade de 100kN , conforme ilustra a Foto IV.20.

Para os corpos de prova confeccionados com aço tipo USI-SAC41 foi adotada uma escala de plotagem de 1:1000, enquanto que para o aço SAE-1010 adotou-se 1:500. Considerou-se também para todos os ensaios a velocidade da máquina de ensaio igual a 20mm/min e do papel registrador igual a 20cm/min.

Os valores dos limites das tensões de escoamento médios encontrados, a partir dos ensaios são:

Aço USI-SAC41..... $f_y = 347,6\text{MPa}$

Aço SAE-1010..... $f_y = 277,3\text{MPa}$

Pode-se observar as diferenças relativas aos valores nominais de  $f_y$  fornecidos pelo fabricante. Para o USI-SAC41, tem-se  $f_y = 300\text{MPa}$  e para o SAE-1010,  $f_y = 183\text{MPa}$  como valores nominais.

#### **IV.5 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS**

O programa experimental é composto de nove ensaios, realizados de acordo com a montagem descrita nos itens anteriores. A seguir será descrita a metodologia utilizada nestes ensaios e as observações constatadas durante a realização dos mesmos

##### **ENSAIO 912**

Este ensaio foi realizado com a finalidade de se obter uma avaliação qualitativa do modelo de estrutura treliçada espacial a ser estudado .

Foi utilizado um transdutor de pressão para aquisição da carga aplicada e LVDT para medição do deslocamento no nó 9.

A aquisição foi feita utilizando-se transdutor de deslocamento para medição do carregamento aplicado no nó 9. Os resultados serão apresentados no Capítulo V.

Neste ensaio as barras que compõem a estrutura são todas de mesmo comprimento, e seção transversal conforme apresentado no item IV.1.

Inicialmente foi realizada uma pré-carga de 38 kN. Em seguida o carregamento foi aplicado sucessivamente até a carga de 129,5 kN. Neste nível de carga o ensaio foi interrompido em função do início de rasgamento das extremidades das barras tracionadas B1 e D2 conforme ilustrado nas Fotos V.1 e V.2. comentado no capítulo V.

Através deste ensaio obteve-se um parâmetro para avaliação do comportamento deste tipo de estrutura, bem como informações que possibilitaram o projeto e a confecção dos módulos utilizados nos ensaios posteriores.

### **ENSAIO 912A**

Neste ensaio a estrutura foi idealizada de modo a propiciar a fragilização da barra 9-12, tendo-se como consequência o surgimento do modo de flambagem da mesma. As características geométricas das seções transversais da barra 9-12 fragilizada e das demais barras que compõem a estrutura foram descritas nos itens anteriores. A aquisição do carregamento foi realizada com célula de carga, utilizando também LVDT's para medição dos deslocamentos.

Inicialmente foi realizado um pré-ensaio para uma carga de 21,6 kN, com o objetivo de confirmar o funcionamento do sistema de aquisição e a resposta da estrutura. Em seguida foi aplicado o carregamento em passos de carga de 5 kN.

Observou-se ao final dos ensaios a necessidade de instrumentar com LVDT's a barra 9-12 fragilizada para possibilitar o acompanhamento do fenômeno de flambagem na mesma. A instrumentação utilizada, nos outros ensaios posteriores, possibilitou a medição dos deslocamentos perpendiculares ao eixo da barra e o instante em que ocorreu a flambagem.

### **ENSAIO 912B**

Este ensaio foi realizado utilizando-se a mesma estrutura do ensaio anterior sendo substituída a barra 9-12 por outra com as mesmas características geométricas e mecânicas.

Considerando a possibilidade de ser atingida a tensão limite de escoamento do aço nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, a partir deste ensaio foram utilizados, nestas barras, extensômetros elétricos de resistência. Este procedimento foi adotado com a finalidade de, nos ensaios subsequentes, serem substituídas apenas a barra 9-12, já que todas as outras barras do modelo se comportariam dentro do limite elástico do material.

Neste ensaio a barra fragilizada foi instrumentada com LVDT's, com o objetivo de detectar o instante da flambagem da mesma. Foi realizado um pré-ensaio com carga máxima de 10 kN para avaliação do sistema de ensaio utilizado e a resposta da estrutura. Em seguida o ensaio foi realizado com incrementos de carga de 1,25 kN. Em seguida foram aplicados carregamentos sucessivos até que a carga de colapso por flambagem da barra 9-12 fosse atingida.

### **ENSAIO 912C**

Este ensaio foi realizado utilizando-se a mesma estrutura do ensaio anterior sendo substituída a barra 9-12 por outra com as mesmas características da seção transversal. Esta barra foi substituída em função do colapso da mesma no ensaio 912B, não tendo sido ultrapassado o limite elástico das barras 9-6, 9-7 e 9-11, que, portanto não foram substituídas.

Neste ensaio foi utilizada a instrumentação na barra fragilizada, com o objetivo de detectar o instante da flambagem da mesma. Foi realizado um pré-ensaio com carga máxima de 10 kN para avaliação do sistema de ensaio utilizado e a resposta da estrutura.

Em seguida o ensaio foi realizado com incremento de carga de 1,25 kN

Finalmente, foram aplicados carregamentos sucessivos até que fosse atingida a carga de colapso por flambagem da barra 9-12.

### **ENSAIOS 912D a 912H**

Estes ensaios foram realizados seguindo a mesma metodologia do ensaio 912C sendo que nos ensaios 912G e 912H foram também utilizados extensômetros elétricos de resistência nas barras fragilizadas 9-12.

Em todos estes ensaios foi aplicada uma carga máxima de 10kN para o pré-ensaio, e os valores das cargas máximas obtidas em cada ensaio serão apresentados no capítulo V.

# ***CAPÍTULO V***

## **V - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **V.1 - INTRODUÇÃO**

Foram realizados 9 ensaios de treliça espacial, sendo identificados como ensaios 912, 912A, 912B, 912C, 912D, 912E, 912F, 912G e 912H. Os ensaios se diferenciam pela geometria da seção transversal da barra fragilizada 9-12 e pelo aço empregado, conforme mostrado na tabela IV.1.

A instrumentação utilizada foi descrita no capítulo IV.

O carregamento foi aplicado em etapas sucessivas com valores aproximadamente iguais a 1/40 da carga última prevista de cada modelo.

### **V.2 – DESLOCAMENTOS DOS APOIOS DOS ENSAIOS REALIZADOS**

Os deslocamentos dos apoios foram medidos em cada intervalo de carga, sendo que os valores obtidos podem ser considerados desprezíveis. Na Tabela V.1 observa-se as leituras finais e iniciais para cada ensaio, nos nós 2 e 17, sendo que o deslocamento máximo obtido é de 0,023 mm, sendo portanto desprezível.



ENSAIO	NÓ	LEITURA		DESLOC. x 10 <sup>-3</sup> (mm)
		INICIAL	FINAL	
912	2	744	752	8
	17	752	772	20
912A	2	529	532	3
	17	370	374	4
912B	2	237	248	11
	17	617	632	15
912C	2	368	369	1
	17	469	471	2
912D	2	723	732	9
	17	472	478	6
912E	2	274	282	8
	17	280	289	9
912F	2	274	281	7
	17	392	396	4
912G	2	759	765	6
	17	625	634	9
912H	2	758	764	6
	17	622	645	23

**Tabela V.1** – Deslocamentos dos nós 2 e 17, apoios dos ensaios realizados.

### V.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados.

A tabela V.2 apresenta o resumo dos resultados de carga última e os correspondentes deslocamentos dos nós instrumentados, nós 9(central), 11 e 12, estes últimos situados no banzo superior.

Nos itens seguintes são apresentados os gráficos carga versus deformações e deslocamentos dos ensaios realizados.

MODELO	DESLOCAMENTO NÓ (mm)			CARGA ÚLTIMA (kN)
	9	11	12	
<b>912</b>	-	-	-	129,50
<b>912A</b>	2,53	0,96	-	48,06
<b>912B</b>	6,00	-	2,32	56,66
<b>912C</b>	4,01	-	2,16	60,98
<b>912D</b>	5,73	-	-	64,34
<b>912E</b>	5,18	-	2,32	66,74
<b>912F</b>	3,41	-	0,87	35,53
<b>912G</b>	5,86	-	2,03	71,06
<b>912H</b>	6,14	-	2,47	77,78

**Tabela V.2** – Resultados experimentais dos ensaios realizados para a carga última e deslocamentos verticais nos nós 9, 11 e 12.

### V.3.1- ENSAIO 912

O carregamento foi aplicado, incrementalmente até a carga de 129,5 kN. Nesta carga o ensaio foi interrompido em função do início do rasgamento das extremidades das barras superiores, 5-10 e 2-8 tracionadas, o que se deu a partir de 116,5 kN.

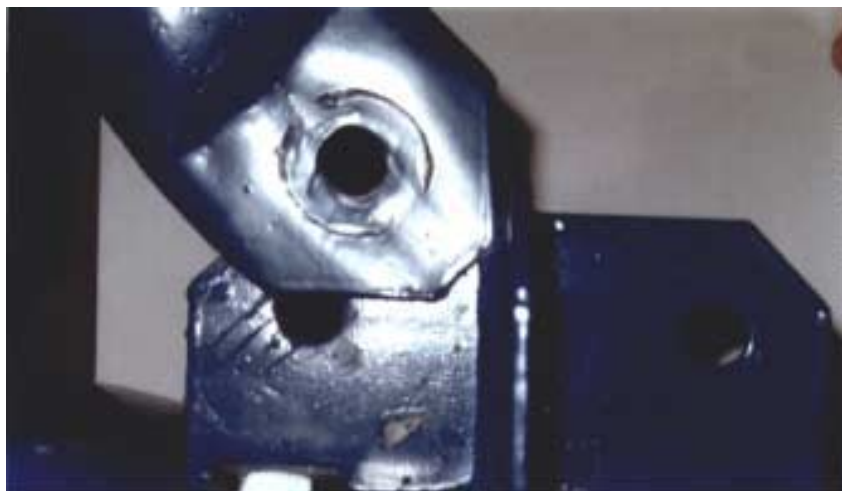
O objetivo deste trabalho é a determinação da carga de flambagem e da carga última experimental das barras comprimidas da estrutura, o que não ocorreu neste ensaio pois o rasgamento das chapas precedeu qualquer modo de instabilidade que viesse a acontecer. No entanto, foram obtidos diversos parâmetros para a avaliação do comportamento deste tipo de estrutura, auxiliando no projeto e confecção dos módulos utilizados nos ensaios posteriores.

A foto V.1 ilustra a barra tracionada superior do módulo com a extremidade deformada, caracterizando o início de rasgamento da mesma.



**Foto V.1** – Detalhe da barra do banzo superior do ensaio 912, apresentando deformações no início do rasgamento.

Na foto V.2. tem-se em detalhe a deformada dos furos dos apoios, inicialmente na forma circular.



**Foto V.2** – Detalhe da deformação do furo no início do rasgamento da extremidade da barra do ensaio 912.

### **V.3.2 - ENSAIO 912A**

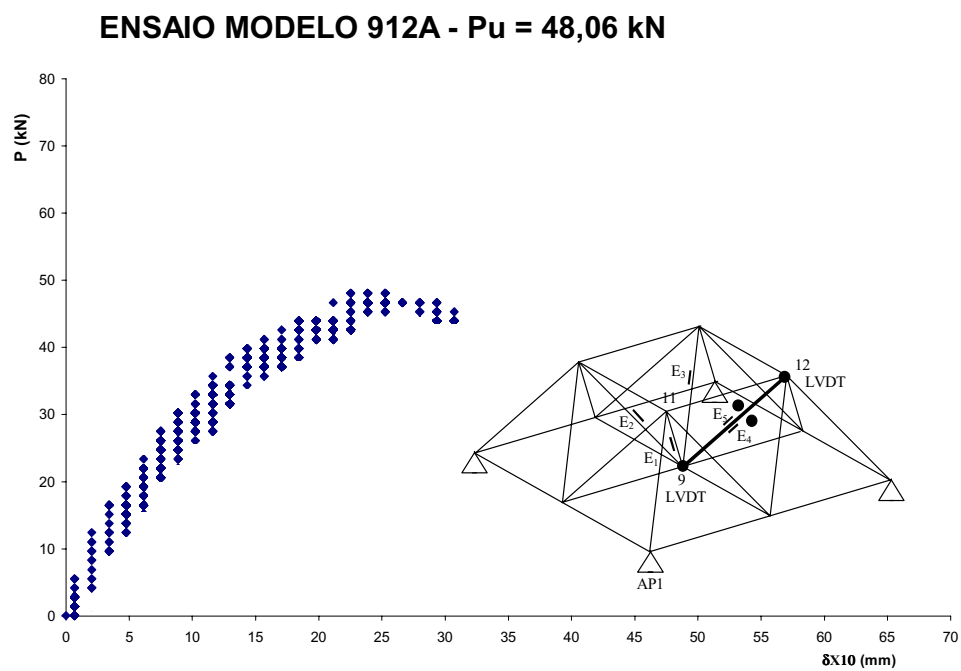
Neste ensaio a carga aplicada no nó 9 da barra 9-12 atingiu o valor de 48,06kN no momento do colapso, sendo o deslocamento deste nó 9, para esta carga última, de 2,53mm

A figura V.1 apresenta o gráfico da carga aplicada no nó 9 versus o deslocamento no mesmo.

Os valores medidos nos nós 11 e 12 indicaram um deslocamento vertical máximo de 25,3mm.

A carga de flambagem da barra 9-12 não foi detectada neste ensaio, tendo-se apenas a carga última da estrutura uma vez que não foi utilizada uma instrumentação capaz de detectar o instante da perda de estabilidade da referida barra.

As fotos V.3 e V.4 ilustram a instrumentação do nó 9 e a barra fragilizada deformada quando do desenvolvimento do modo de flambagem.



**Figura V.1** - Resultado do deslocamento vertical do nó 9 medidos no ensaio 912A.

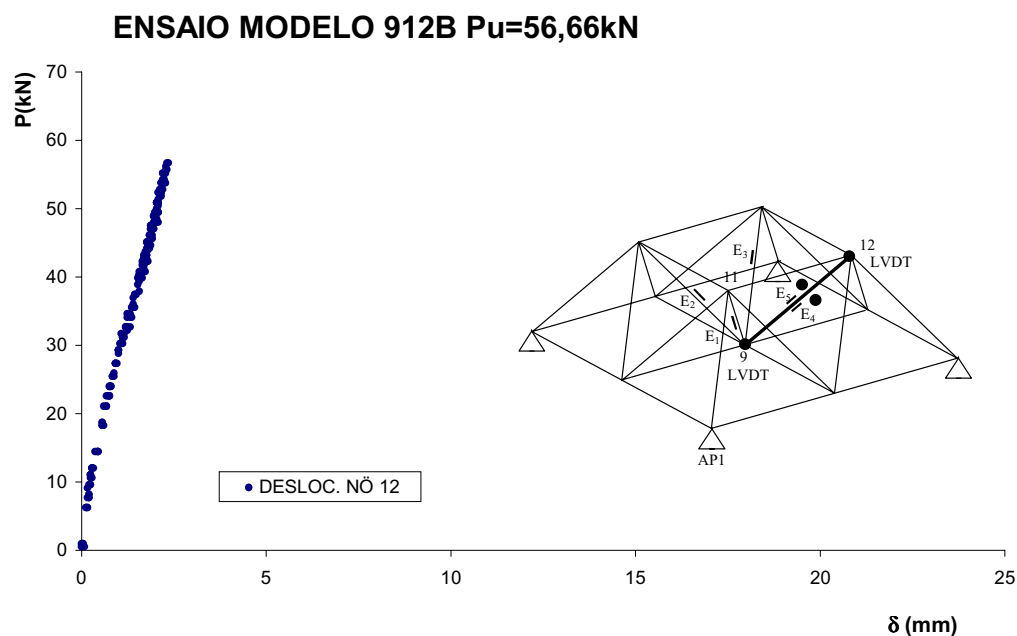


**Foto V.3** - Detalhe da medição dos deslocamentos verticais no nó 9 por meio de LVDT e detalhe da barra 9-12 com curvatura devido a flambagem no ensaio 912A.



**Foto V.4** - Detalhe da curvatura da barra 9-12 devido à flambagem da mesma.  
Ensaio 912A.



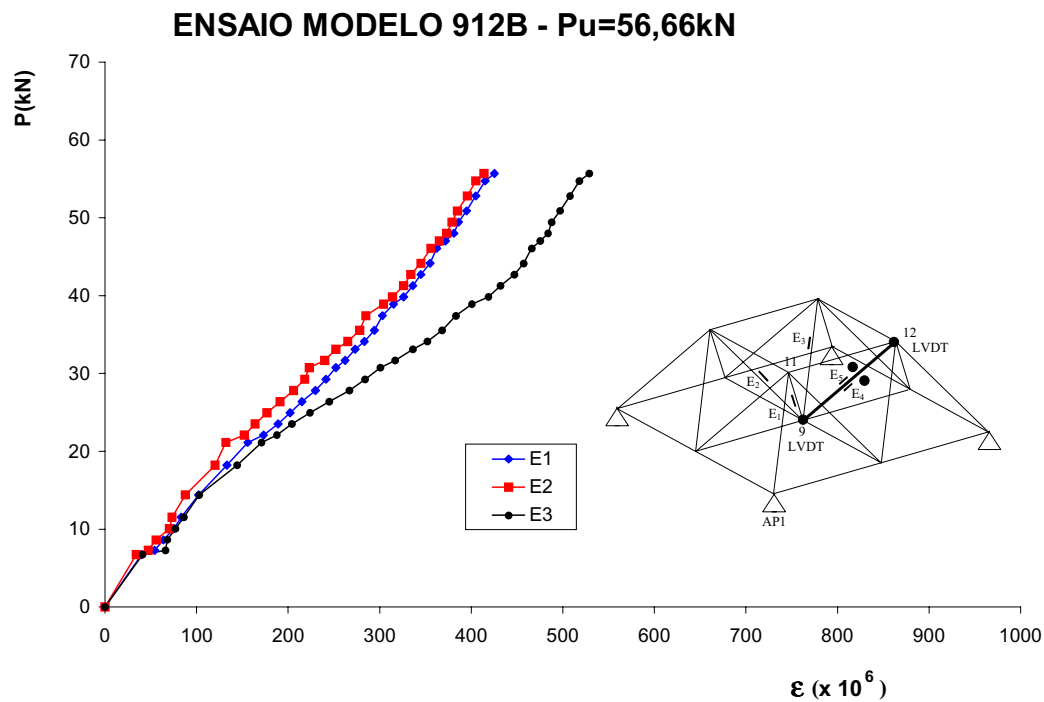


**Figura V.3** – Deslocamentos verticais do nó 12 medidos no ensaio 912B.

Neste ensaio foram ainda utilizados extensômetros elétricos de resistências nas barras 9-6, 9-7, e 9-11, com o objetivo de avaliar se haveria ou não escoamento do material destas barras, vizinhas à fragilizada. A figura V.4 ilustra as medições das deformações nos extensômetros. Observa-se que o extensômetro E3 apresentou maiores deformações que os extensômetros E1 e E2, caracterizando que a barra 9-6 absorveu maior carregamento quando da diminuição da resistência da barra 9-12 devido a flambagem da mesma.

O nível das deformações medidas nos três extensômetros ficou abaixo da deformação correspondente ao limite de escoamento do material. Portanto, nos ensaios posteriores foi substituída apenas a barra 9-12, mantendo-se as demais.

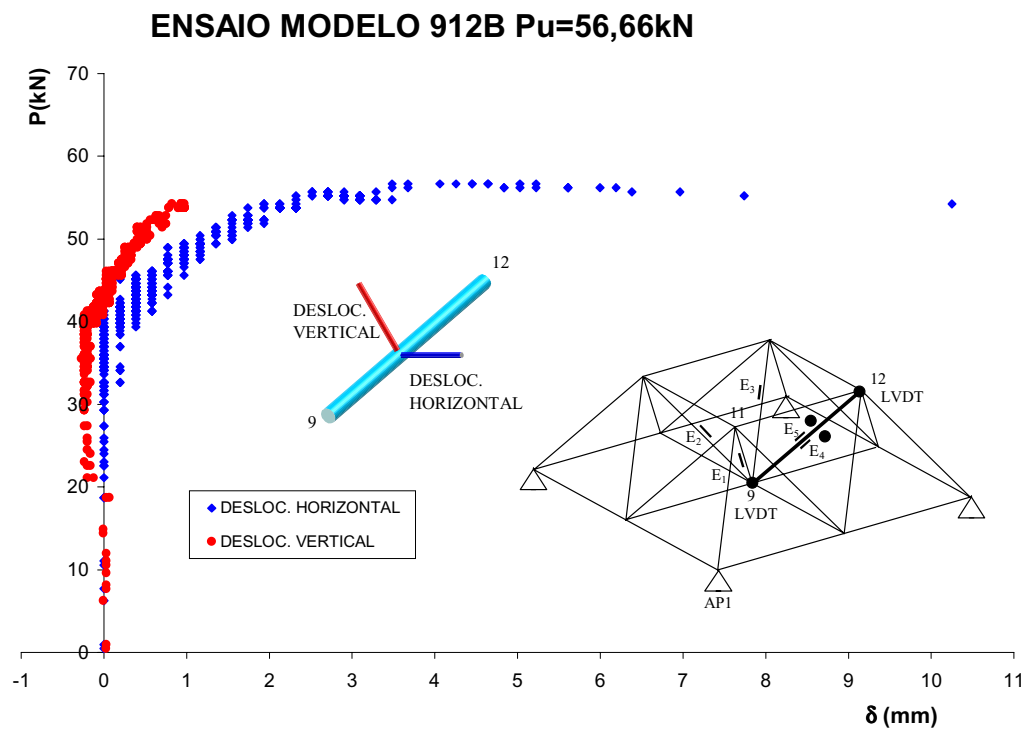




**Figura V.4** - Deformações medidas nas barras 9-6, 9-7 e 9-11 no ensaio 912B.

Na Figura V.5 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12 localizadas no meio do seu comprimento, segundo duas direções perpendiculares ao seu eixo, denominados de deslocamento horizontal e vertical.

Observa-se pelos deslocamentos horizontais da barra na direção perpendicular ao seu eixo, a caracterização do fenômeno de flambagem. As fotos V.5 e V.6 ilustram o posicionamento dos LVDT's na barra 9-12.



**Figura V.5** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo direções perpendiculares a seu eixo no ensaio 912B.



**Foto V.5** - Instrumentação da barra 9-12 no ensaio 912B.



**Foto V.6** - Instrumentação da barra 9-12 no ensaio 912B.

Na foto V.7 tem-se a deformada da barra 9-12 após a flambagem da mesma.

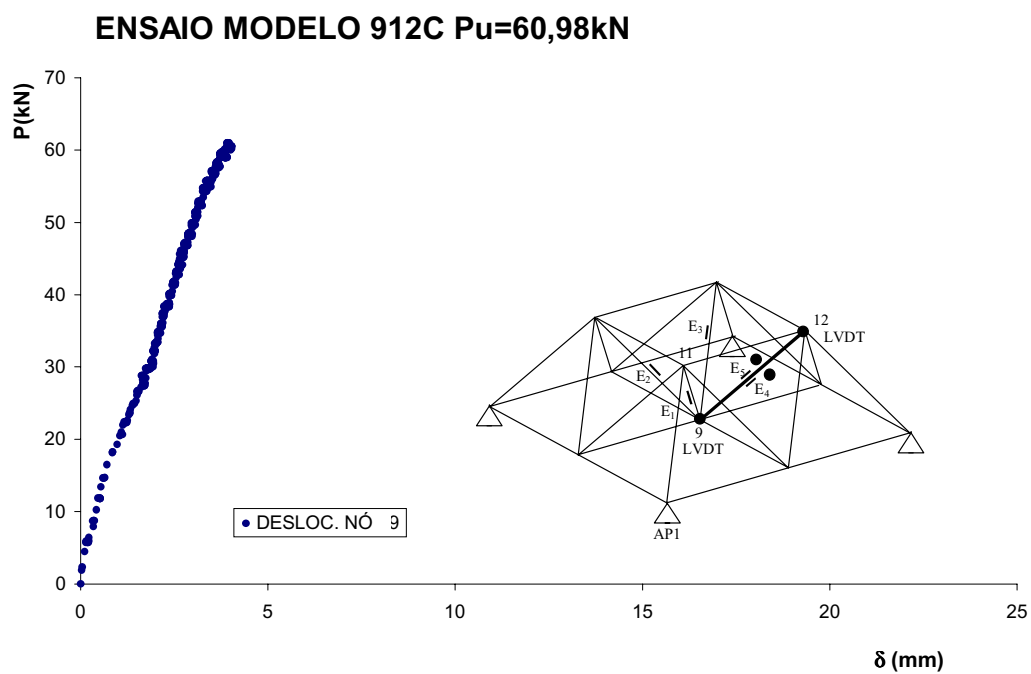


**Foto V.7** - Modo de flambagem da barra 9-12 no ensaio 912B.

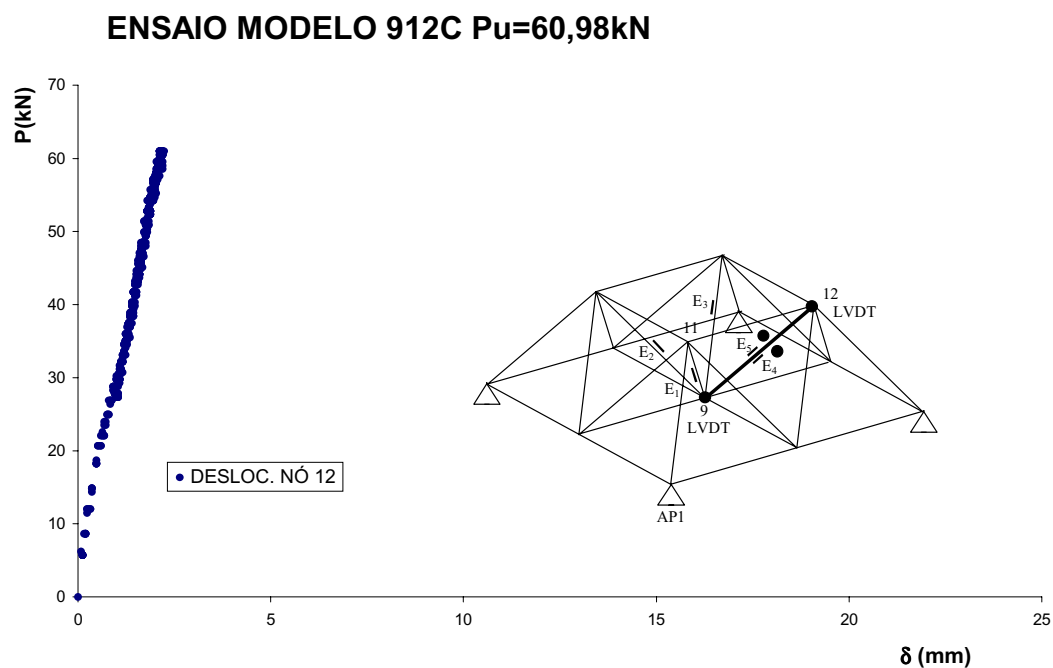
### V.3.4- ENSAIO 912C

A carga máxima da estrutura neste ensaio foi de 60,98 kN e o deslocamento correspondente 4,01 mm.

A Figura V.6 apresenta as medições das cargas versus deslocamentos no nó 9 e a Figura V.7 apresenta estas medições no nó 12.



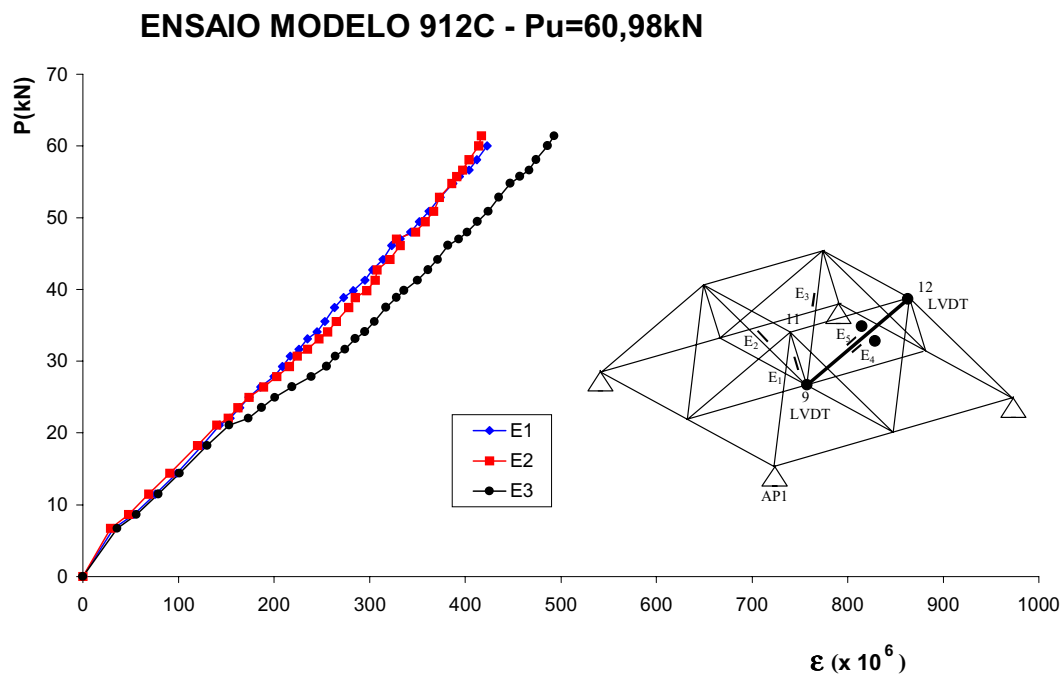
**Figura V.6** – Deslocamentos verticais do nó 9, medidos no ensaio 912C.



**Figura V.7** - Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912C.

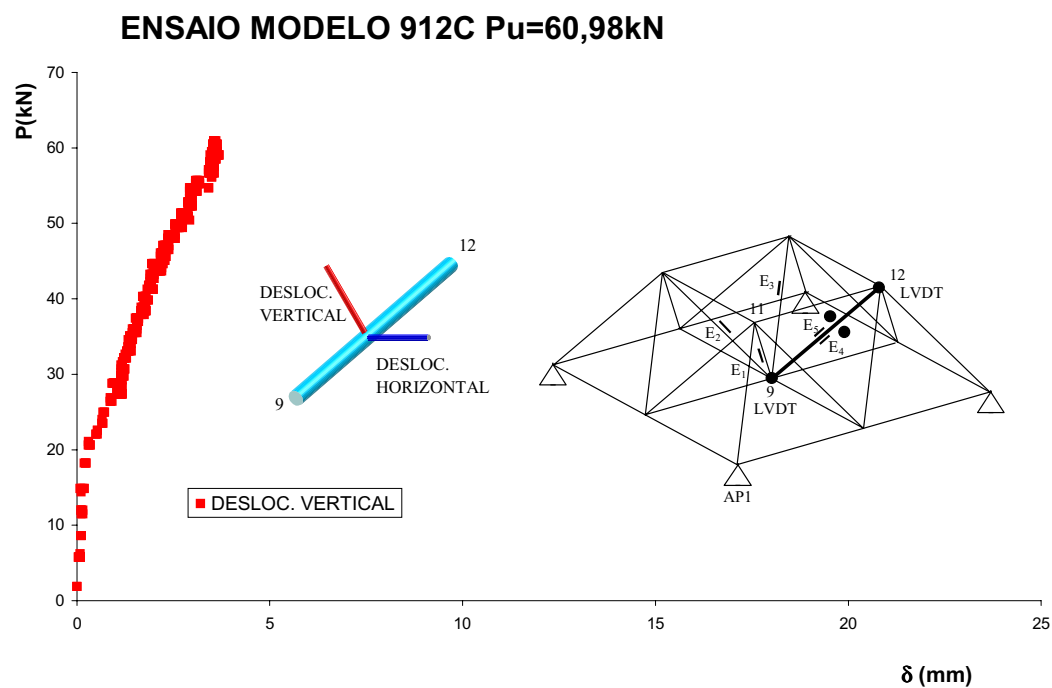
A Figura V.8 apresenta as medições das deformações nos extensômetros. Observa-se que o extensômetro E3, barra 9-6 mediu maiores deformações que E1 e E2 caracterizando maior contribuição da mesma quando da redistribuição do carregamento após a flambagem da 9-12.

O nível das deformações medidas nos três extensômetros está abaixo do limite das deformações para a tensão de escoamento do material.



**Figura V.8** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11 no ensaio 912C.

Na figura V.9 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12 localizadas no meio de seu comprimento, denominadas deslocamento horizontal e vertical. Neste ensaio as leituras na direção horizontal foram perdidas em função de problemas com o transdutor de deslocamento. Observa-se pelo gráfico o deslocamento perpendicular ao eixo vertical, caracterizando a flambagem da barra 9-12.



**Figura V.9** - Deslocamentos das barras 9-12 segundo a direção vertical no ensaio 912C.

As fotos V.8 e V.9 ilustram a curvatura da barra 9-12 nas direções horizontal e vertical após a flambagem da mesma, no ensaio 912C.



**Foto V.8** - Modo de flambagem da barra 9-12 segundo a direção vertical no ensaio 912C.



**Foto V.9** - Modo de flambagem da barra 9-12 segundo a direção horizontal no ensaio 912C.

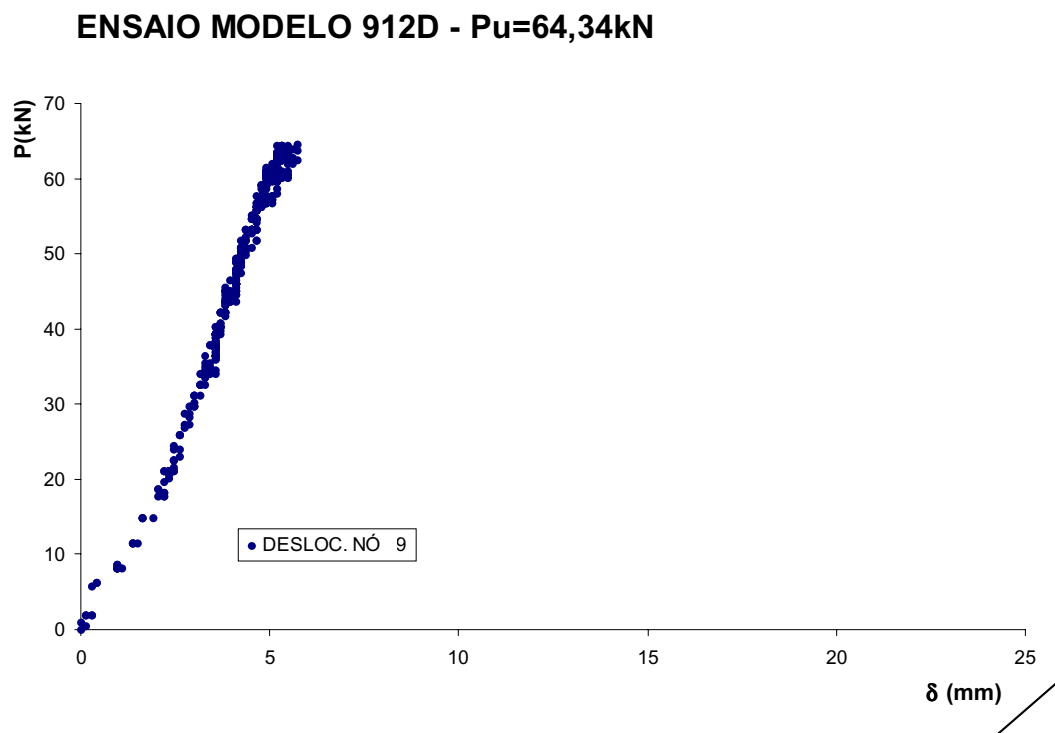


### V.3.5-ENSAIO 912D

Neste ensaio a barra 9-12 é composta de uma barra interna e outra externa de diâmetros diferentes e apresentados na tabela IV.1. A carga máxima medida no nó 9 da estrutura neste ensaio foi de 64,34 kN e o deslocamento correspondente neste nó foi de 5,73 mm.

Vale ressaltar que a carga última da estrutura neste ensaio é próxima da carga última dos ensaios anteriores, apesar da mudança da área da seção transversal. Isto se deve principalmente pelo motivo das duas seções comporem uma única barra. A interna não é ligada a externa ao longo do seu comprimento.

A figura V.10 ilustra as medições das cargas versus deslocamento no nó 9.



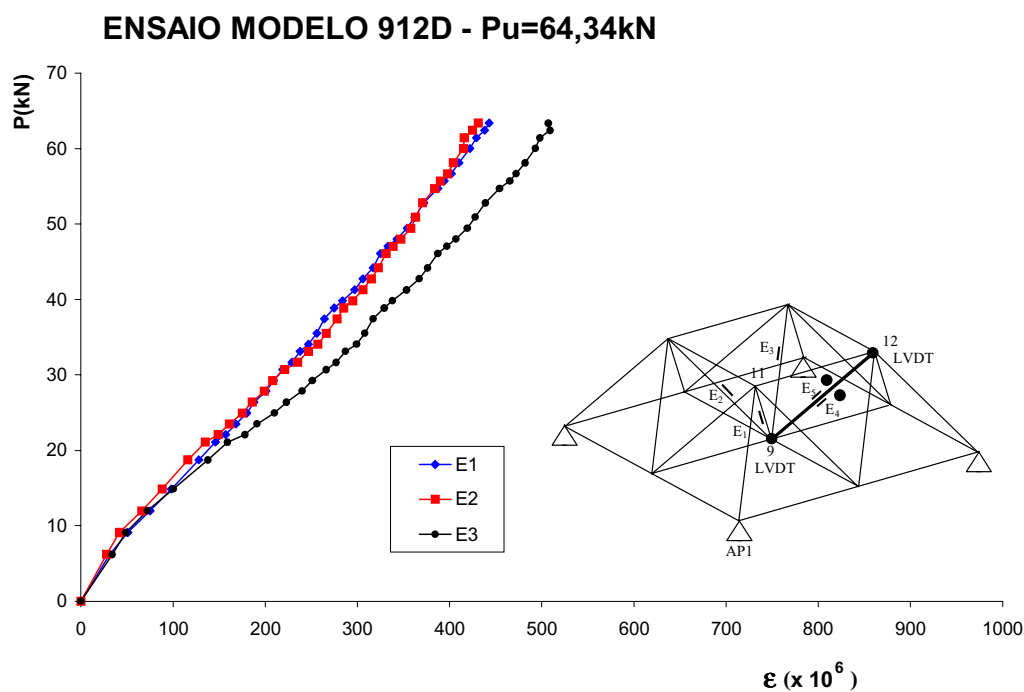
**Figura V.10** - Deslocamentos do nó 9 medidos no ensaio 912D.

Observa-se que em relação aos ensaios anteriores para um mesmo nível de carga, tem-se no ensaio 912D maiores deslocamentos. Isto se deve a resistência da barra 9-12 quanto a flambagem ou seja, inicialmente a da barra interna e em seguida há a contribuição da externa, já que as duas não trabalham conjuntamente a interna está desligada da externa.

No caso do nó 12 as medições foram interrompidas em função de problemas com o transdutor.

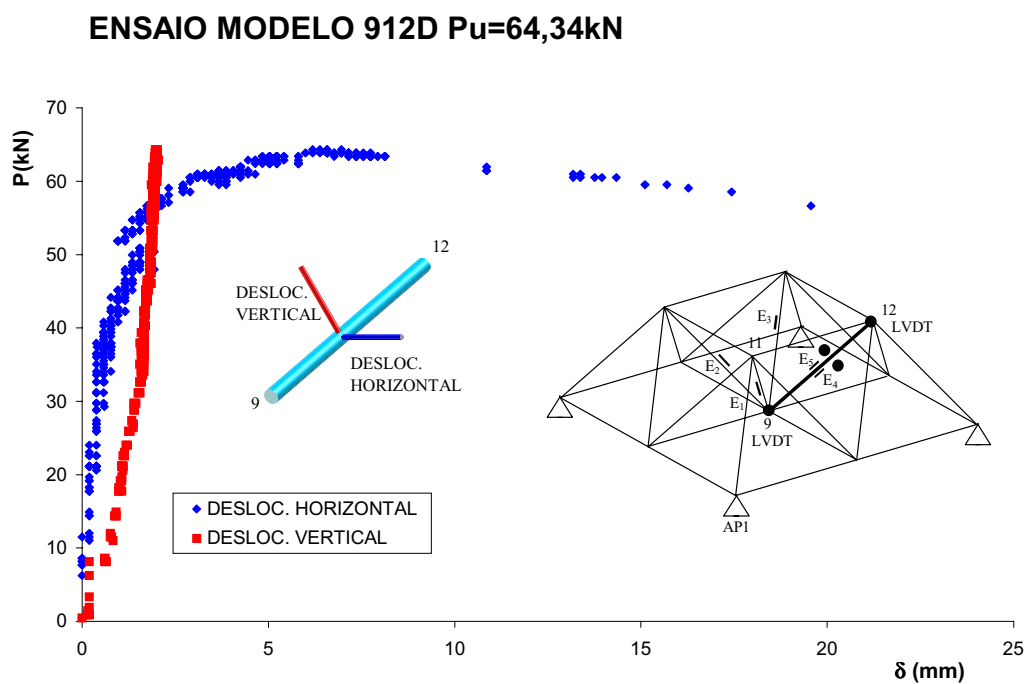
A Figura V.11 ilustra as medições das deformações nos extensômetros na barra 9-6, 9-7 e 9-11. Observa-se que o extensômetro E3, novamente detectou maiores deformações que o E1 e E2. Sendo assim a barra 9-6 a mais solicitada após a flambagem da 9-12.

O nível das deformações medidas nos três extensômetros se encontra na fase elástica do material.



**Figura V.11** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11 no ensaio 912D

Na Figura V.12 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12, nas direções perpendiculares ao seu eixo, conforme mostrado.



**Figura V.12** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares a seu eixo, no ensaio 912D.

### V.3.6 - ENSAIO 912E

Para o ensaio 912E a carga máxima no nó 9 da estrutura foi de 66,74 kN e o deslocamento correspondente a este nó foi de 5,18 mm.

Neste ensaio a seção transversal da barra é composta de uma barra interna e outra externa sendo as duas ligadas por 4 arames encaixados entre os dois tubos. Portanto com uma seção em que as duas barras trabalham solidarizadas.

Observa-se que a carga última obtida é 4,5% maior que a do ensaio 912D, portanto a solução de solidarizar as duas barras que compõem a 9-12 provoca um aumento na capacidade da estrutura.

As Figuras V.13 e V.14 ilustram as medições da carga versus deslocamento no nó 9 e 12, respectivamente.

#### ENSAIO MODELO 912E - $P_u=66,74\text{kN}$

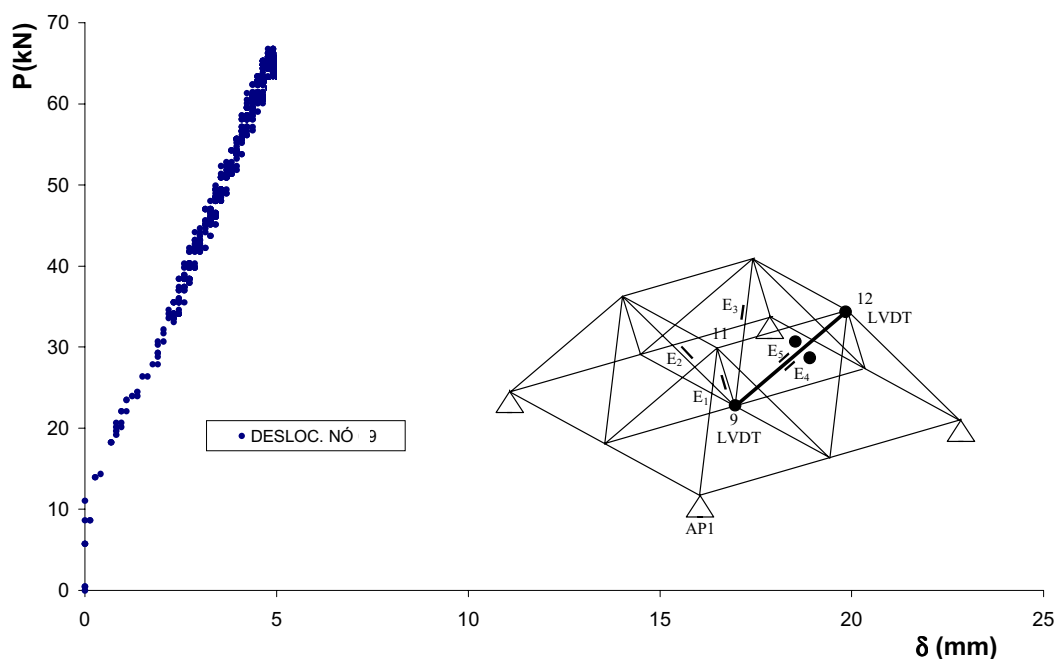
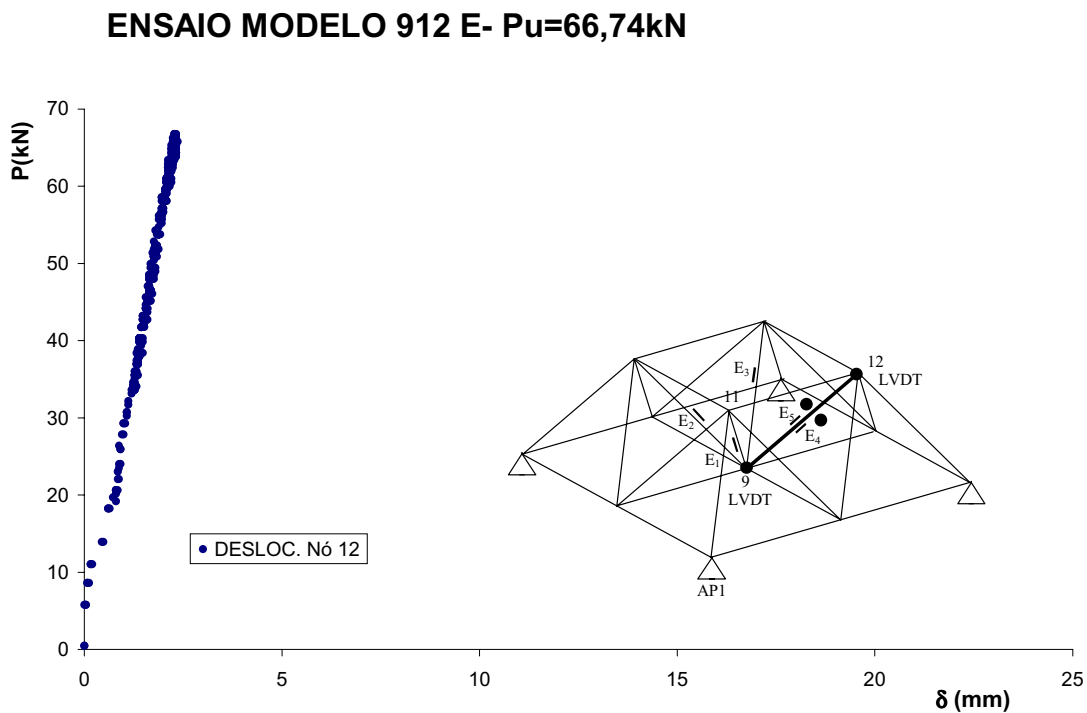


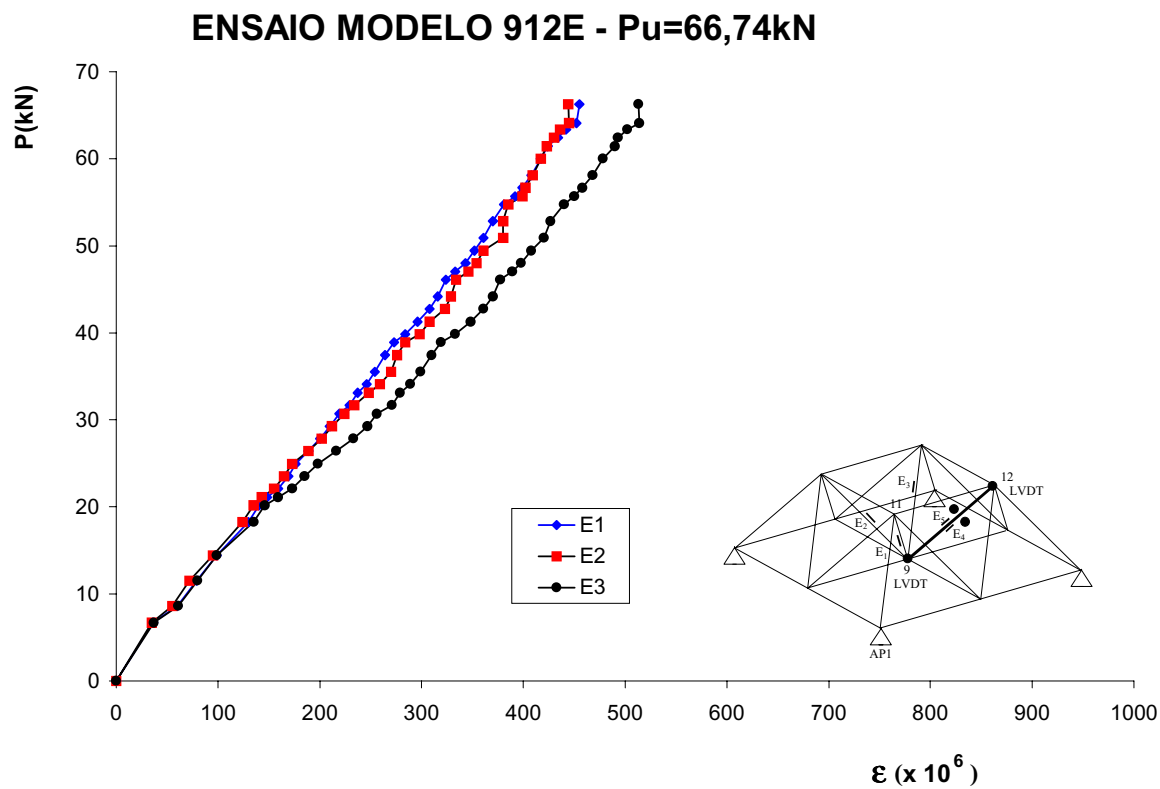
Figura V.13 - Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912E.



**Figura V.14** - Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912E.

Na Figura V.15 tem-se as deformações nos extensômetros na barra 9-6, 9-7 e 9-11. Observa-se, também neste ensaio, que o extensômetro E3 mediu maiores deformações devido a redistribuição, quando da flambagem.

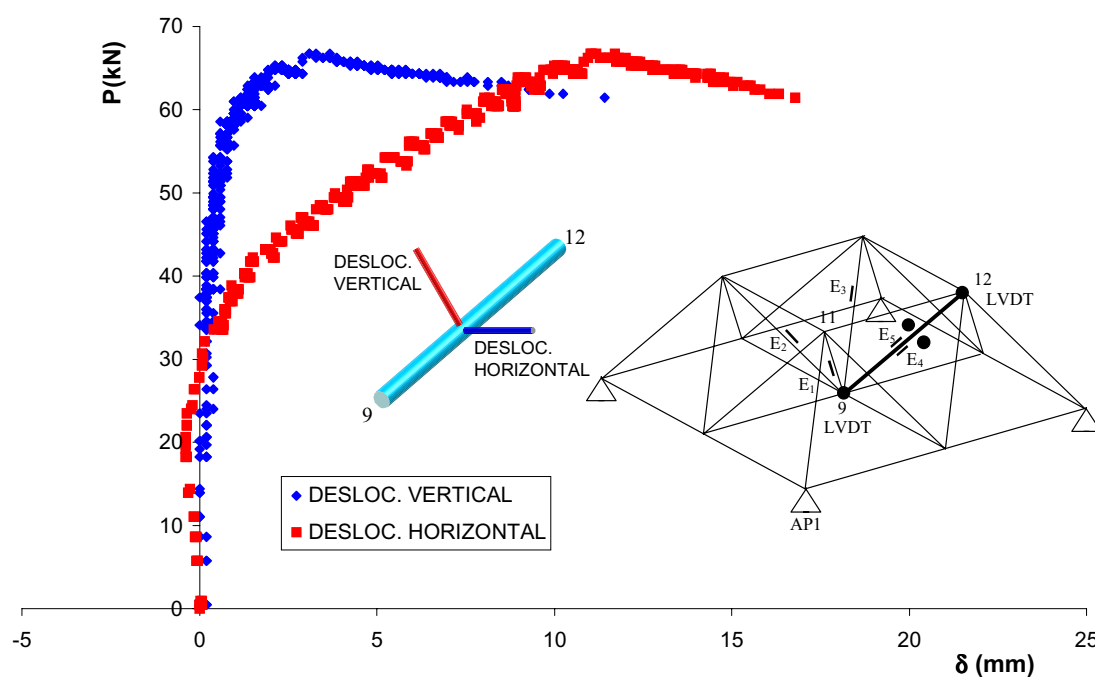
O nível das deformações medidas nos três extensômetros na barra citada anteriormente também encontra-se abaixo do limite de escoamento.



**Figura V.15** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, medidos no ensaio 912E.

Na figura V.16 tem-se as medidas dos deslocamentos da barra 9-12, nas direções perpendiculares a seu eixo, conforme mostrado. Observa-se neste gráfico que para uma carga aplicada no nó 9 inferior a última, ocorreu um deslocamento segundo o eixo vertical, caracterizando a flambagem da barra 9-12. Observa-se também que a deslocabilidade é na direção vertical ao contrário dos ensaios anteriores. Isto está associado a rigidez da barra ser maior neste caso, na direção horizontal.

# **ENSAIO MODELO 912E - $P_u=66,74\text{kN}$**



**Figura V.16** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo a direção perpendicular a seu eixo no ensaio 912E.

A Foto V.10 ilustra a deformada da barra 9-12 após a flambagem da mesma.



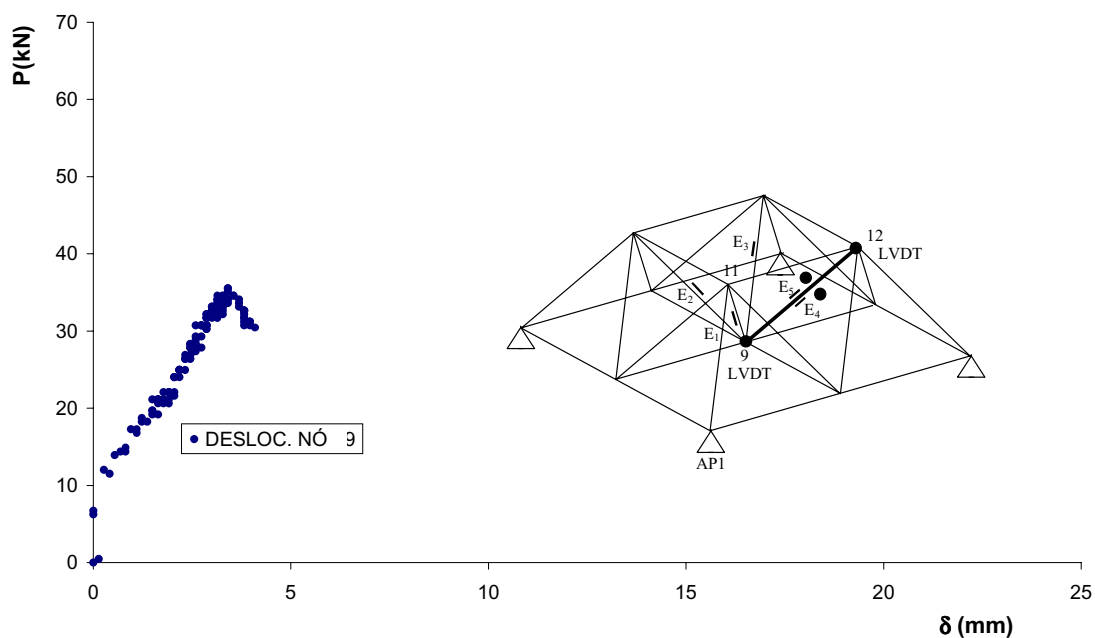
**Foto V.10** - Modo de flambagem da barra 9-12, no ensaio 912E.

### V.3.7- ENSAIO 912F

A carga máxima medida no nó 9 da estrutura neste ensaio foi de 35,53 kN e o deslocamento correspondente a este nó foi de 3,41 mm. Os valores são muito inferiores aos dos ensaios anteriores em função da seção transversal da barra ser de diâmetro inferior aos analisados na tabela IV.1.

A Figura V.17 ilustra as medições das cargas versus deslocamento no nó 9 e a Figura V.18 no nó 12.

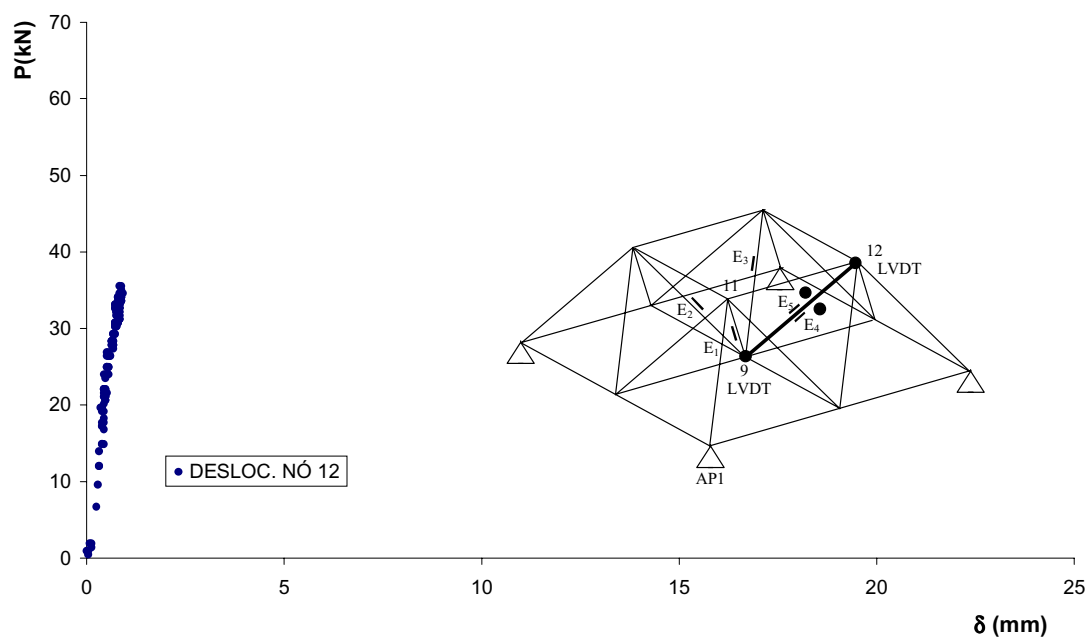
#### ENSAIO MODELO 912F - $P_u=35,53\text{kN}$



**Figura V.17** - Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912F.



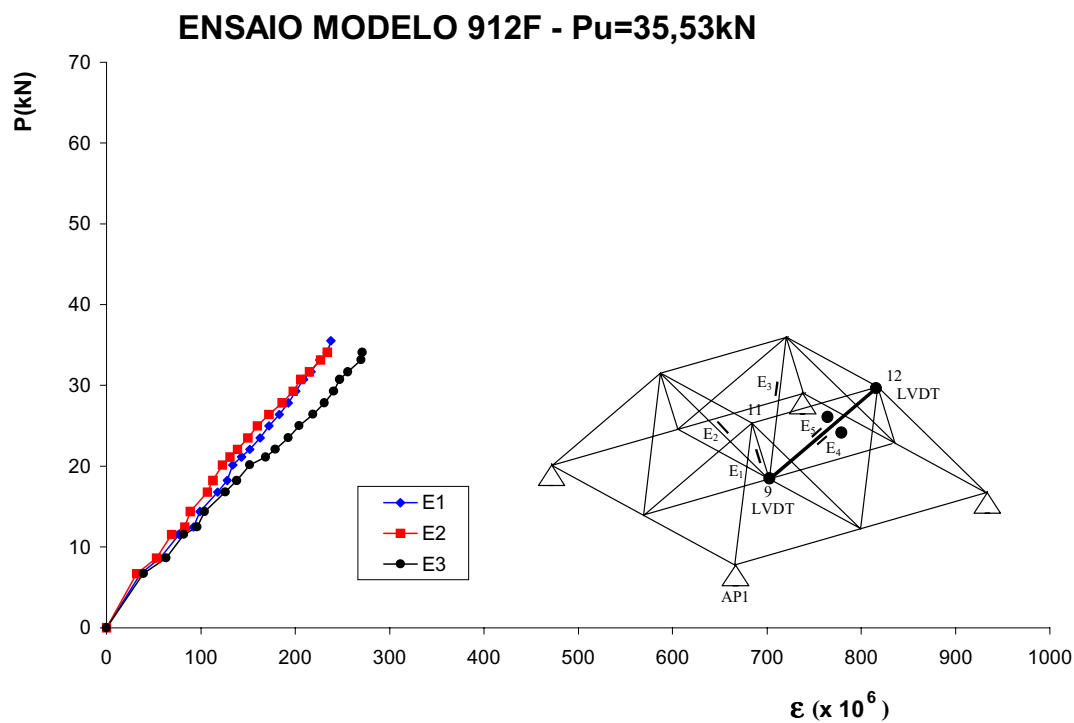
### ENSAIO MODELO 912F - $P_u=35,53\text{kN}$



**Figura V.18** - Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912F.

A Figura V.19 apresenta as deformações medidas nos extensômetros na barra 9-6, 9-7 e 9-11, novamente o extensômetro E3, mediu maiores deformações quando da redistribuição do carregamento após a flambagem da barra 9-12.

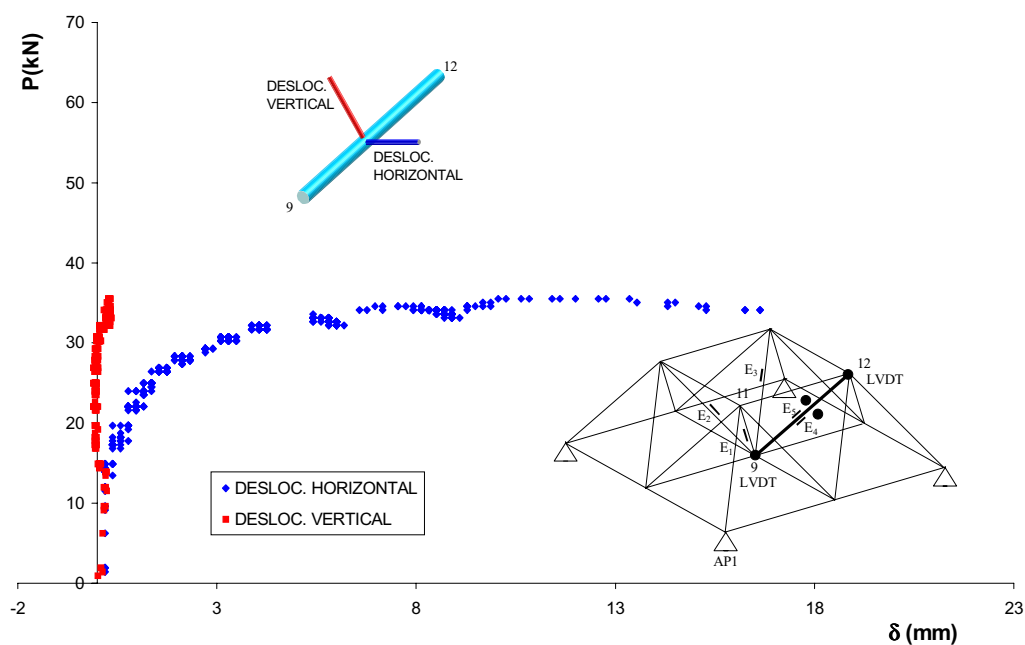
Os três extensômetros mediram deformações abaixo do limite de escoamento do material.



**Figura V.19** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, no ensaio 912F.

Na Figura V.20 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12, nas direções perpendiculares ao seu eixo, no ensaio 912F.

### ENSAIO MODELO 912F - $P_u=35,53\text{kN}$



**Figura V.20** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo direções perpendiculares a seu eixo, no ensaio 912F.

As Fotos V.11 e V.12 ilustram a deformada da barra 9-12 na direção horizontal e perpendicular a seu eixo, após a flambagem da mesma.



**Foto V.11** - Modo de flambagem da barra 9-12, no ensaio 912F.

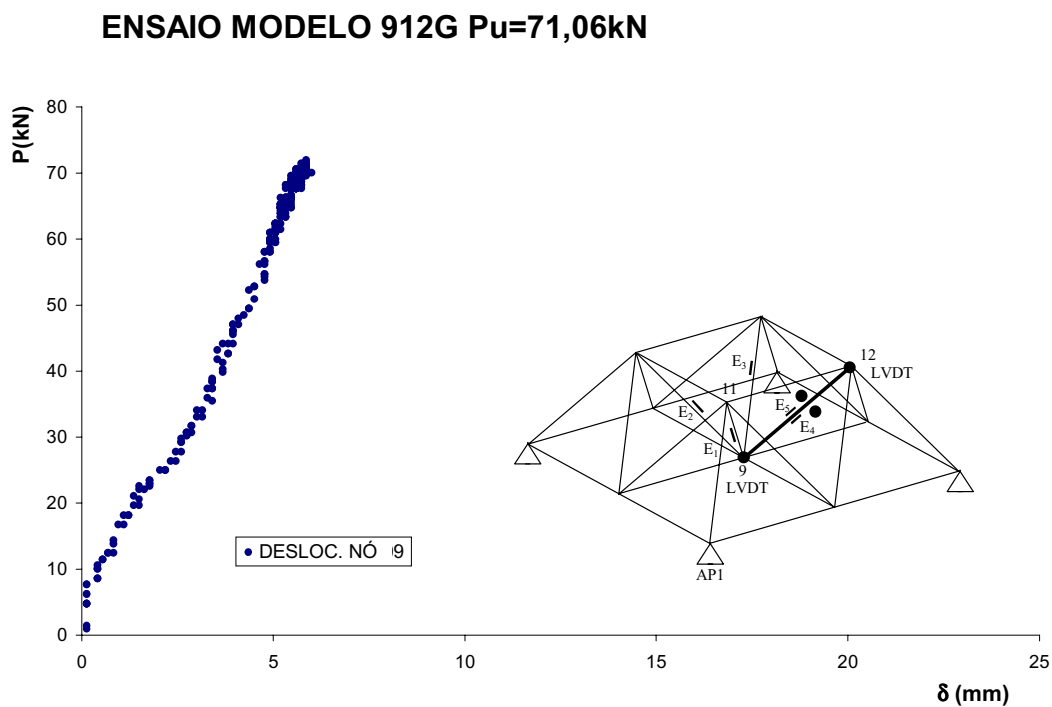


**Foto V.12** - Modo de flambagem da barra 9-12, no ensaio 912F.

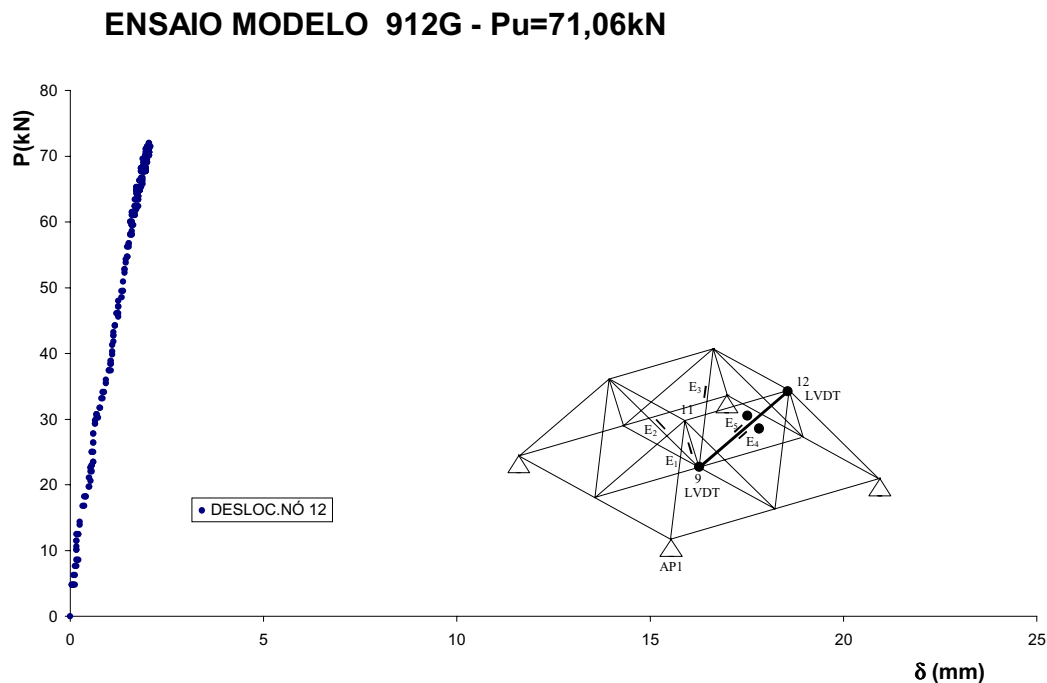
### V.3.8- ENSAIO 912G

Neste ensaio a barra 9-12 é composta de uma barra interna e outra externa de diâmetros diferentes como no ensaio 912D. A carga máxima medida no nó 9 da estrutura neste ensaio foi de 71,06 kN e o deslocamento correspondente neste nó foi de 5,86 mm.

As figuras V.21 e V.22 apresentam as medições das cargas versus deslocamento nos nós 9 e 12, respectivamente.



**Figura V.21** - Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912G.



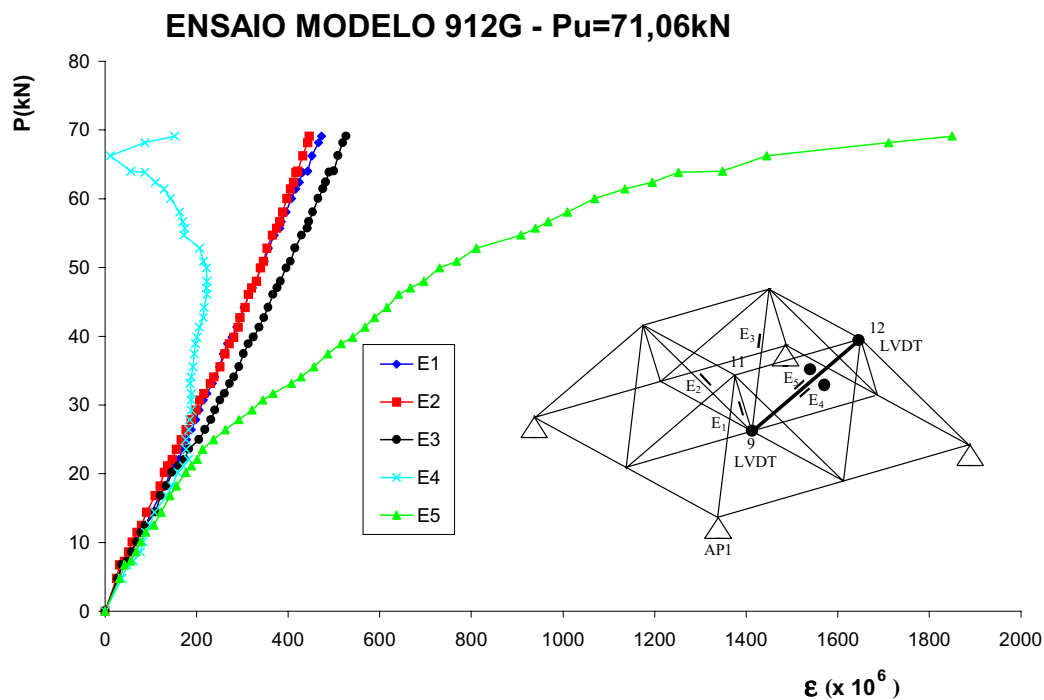
**Figura V.22** - Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912G.

A figura V.23 apresenta as deformações medidas nos extensômetros. Observa-se que o extensômetro E3 novamente mediu maiores deformações que o E1 e E2, a partir da flambagem ficando assim a barra 9-6 mais solicitada após a flambagem da 9-12. Os extensômetros E4 e E5 colados na barra 9-12 indicam as deformações nesta barra. Estas deformações vêm ratificar o limiar da flambagem da barra 9-12, uma vez que, estando opostos diametralmente, passaram a indicar deformações divergentes a partir da flambagem da barra fragilizada.

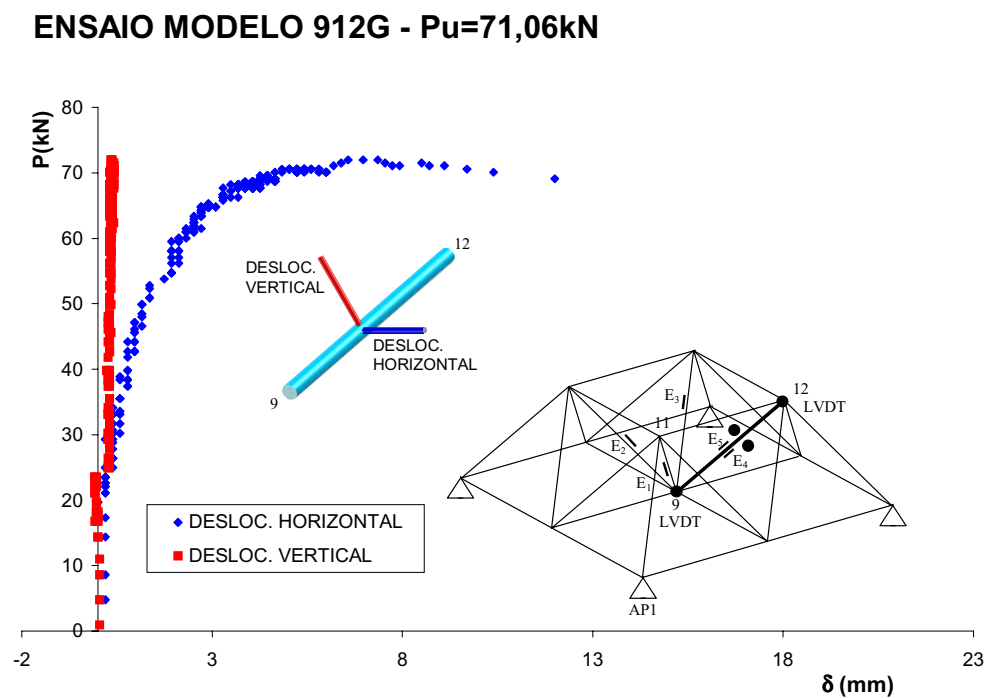
Observa-se que o nível de deformações ultrapassou a fase elástica ( $\epsilon_y = 1353\mu\text{strain}$ ), após a flambagem da barra.

O nível das deformações medidas nos três extensômetros está na fase elástica do material.

Na figura V.24 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12, na direção perpendicular ao seu eixo.



**Figura V.23** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, no ensaio 912G.



**Figura V.24** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares a seu eixo, no ensaio 912G.

A foto V.13 ilustra a deformada da barra 9-12 após a flambagem da mesma.



**Foto V.13** - Modo de flambagem da barra 9-12, no ensaio 912G.

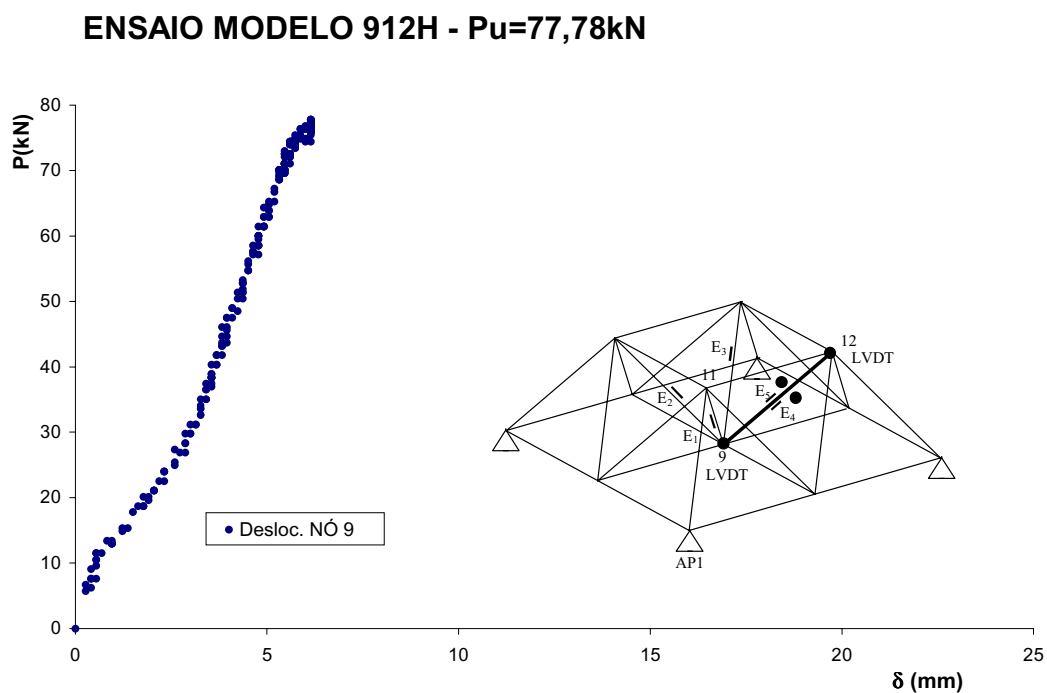


### V.3.9- ENSAIO 912H

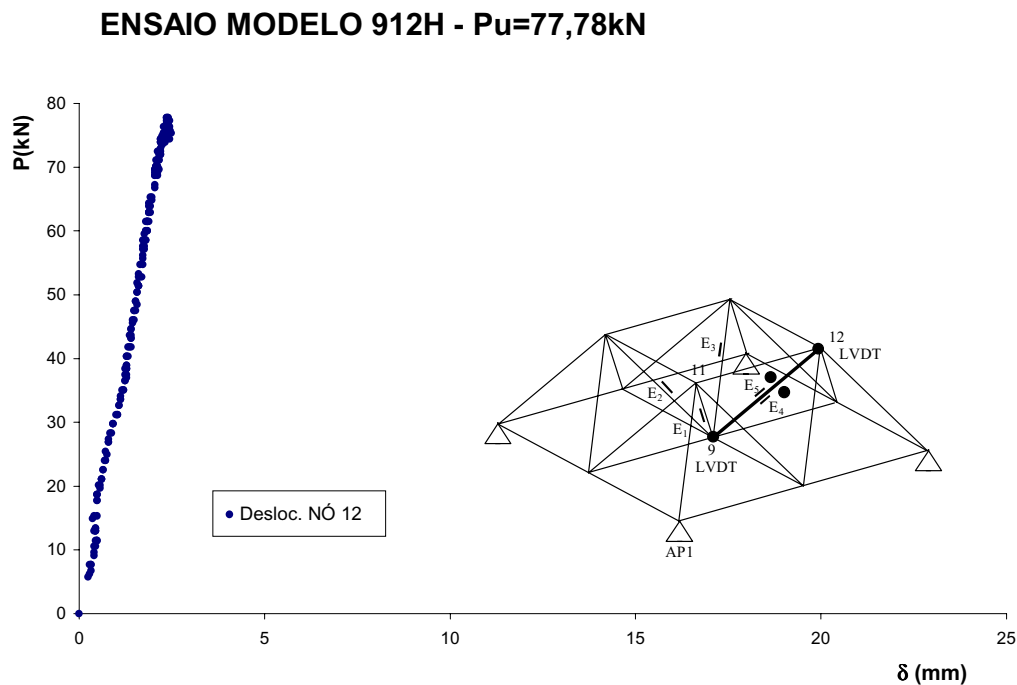
Para o ensaio 912H a carga máxima no nó 9 da estrutura foi de 77,78 kN e o deslocamento correspondente a este, foi de 6,14 mm.

Neste ensaio a seção transversal da barra é composta de uma barra interna e outra externa sendo as duas ligadas por 4 arames encaixados entre os dois diâmetros. Portanto com uma seção em que as duas barras trabalham solidarizadas.

As Figuras V.25 e V.26 ilustram as medições da carga versus deslocamento no nó 9 e 12, respectivamente.



**Figura V.25** - Deslocamentos do nó 9, medidos no ensaio 912H.

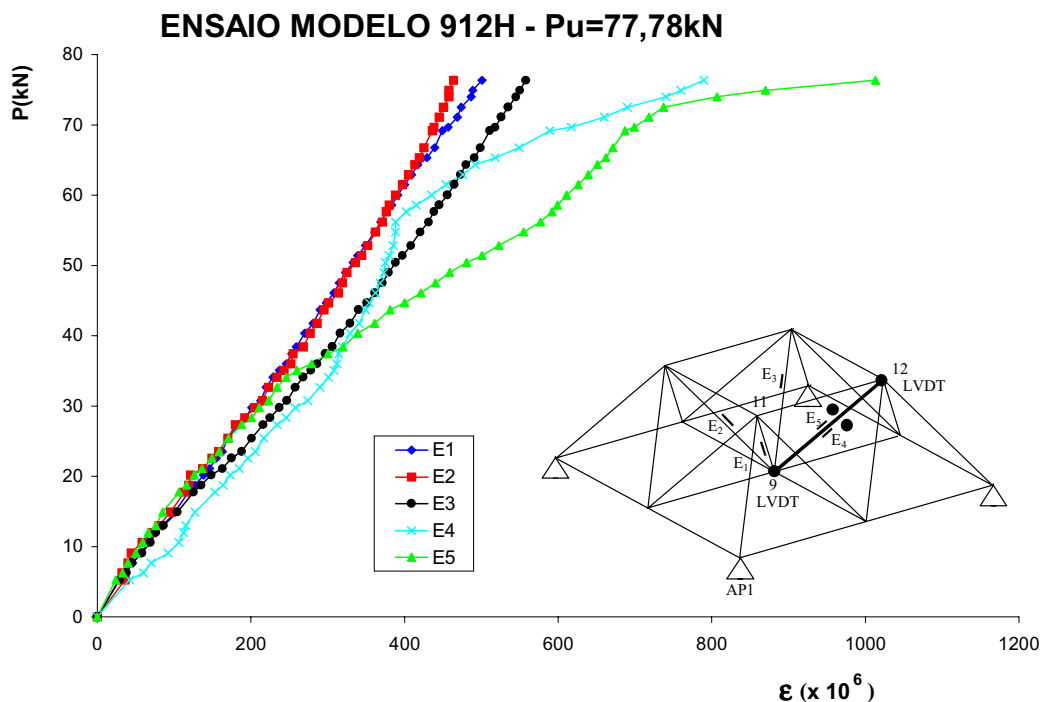


**Figura V.26** - Deslocamentos do nó 12, medidos no ensaio 912H.

A figura V.27 apresenta as deformações medidas nos extensômetros na barra 9-6, 9-7 e 9-11. Observa-se, também neste ensaio, que o extensômetro E3 mediu maiores deformações devido a redistribuição, quando da flambagem. Os extensômetros E4 e E5 colados na barra 9-12 indicam as deformações nesta barra.

Observa-se que o nível de deformações não ultrapassou a fase elástica ( $\epsilon_y=1535(\mu\text{strain})$ ) após a flambagem da barra.

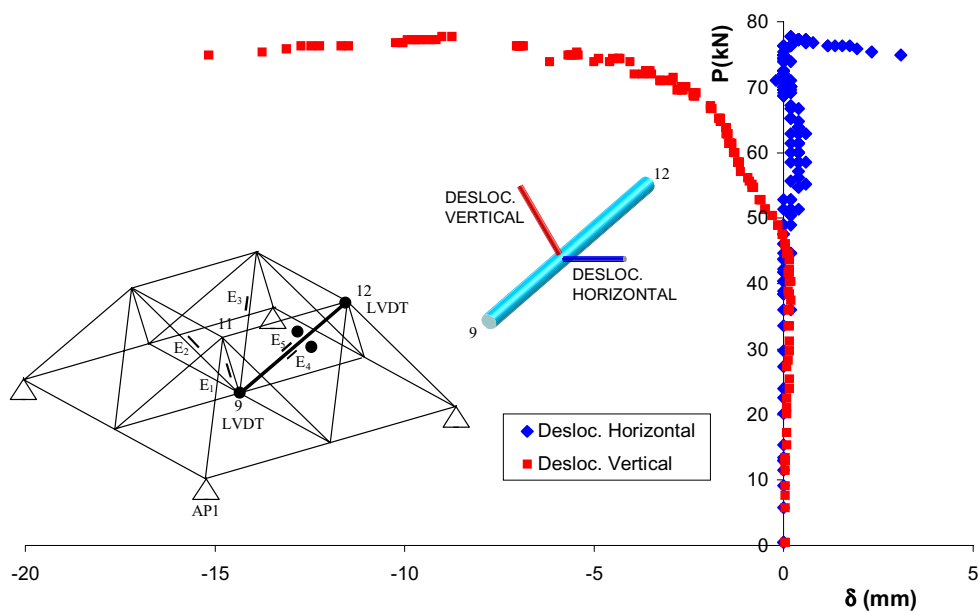
O nível das deformações medidas nos três extensômetros também encontra-se abaixo do limite de escoamento.



**Figura V.27** - Deformações nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, no ensaio 912H.

Na Figura V.28 tem-se as medidas dos deslocamentos na barra 9-12, deslocamento nas direções perpendicular a seu eixo. Observa-se pelo gráfico que para uma carga aplicada no nó 09 inferior a última, ocorreu um deslocamento segundo o eixo vertical, caracterizando a flambagem da barra 9-12. Observa-se também que este ocorreu na direção vertical ao contrário dos ensaios anteriores. O colapso da barra se deu na direção oposta a dos ensaios anteriores.

# **ENSAIO MODELO 912H - $P_u=77,78\text{kN}$**



**Figura V.28** - Deslocamentos da barra 9-12 segundo as direções perpendiculares a seu eixo no ensaio 912H.

As fotos V.14 e V.15 ilustram a deformada da barra 9-12 após a flambagem da mesma.



**Foto V.14** - Modo de flambagem da barra 9-12, no ensaio 912H.



**Foto V.15** - Modo de flambagem da barra 9-12. Ensaio 912H.

Em todos os gráficos que relacionam carga versus deslocamentos verticais do nó 9, verifica-se para todos os modelos o momento da perda de atrito dos parafusos de ligação das barra 9-12. Basta observar a mudança de rigidez inicial da estrutura após um determinado valor de carga.

Nos diagramas que apresentam os resultados da extensometria empregada nas barras 9-6, 9-7 e 9-11, vizinhas a barra 9-12, pode-se verificar o limiar da flambagem da barra 9-12, o que é mostrado a partir do ponto em que a resposta do extensômetro E3 se diferencia dos extensômetros E1 e E2.

# ***CAPÍTULO VI***

## **VI – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **VI.1 – APRESENTAÇÃO DOS VALORES TEÓRICOS**

A seguir apresentam-se para cada ensaio realizado os valores teóricos das propriedades geométricas das barras 9-12 de cada teste. Em seguida são determinados a partir dos deslocamentos transversais medidos, os valores das cargas máximas nas barras fragilizadas (barras 9-12) de todos os ensaios.

São feitas comparações entre os valores calculados pela norma brasileira para a carga última do módulo ensaiado, considerando-se as características da barra 9-12 de cada ensaio.

#### **VI.1.1 – Características geométricas das barras utilizadas nos ensaios (barras 9-12)**

##### **a) Modelo 912**

D= 3,35 cm e t = 0,225 cm

$$A = \frac{\pi}{4} (3,35^2 - 2,9^2) = 2,21 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{\pi}{64} (3,35^4 - 2,9^4) = 2,71 \text{ cm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2,71}{2,21}} = 1,11 \text{ cm}$$

Sendo:

D : diâmetro externo do tubo

t : espessura da chapa do tubo

A : área da seção transversal

I : momento de inércia da seção

r : raio de giração

**b) Modelos 912A, 912B e 912C**

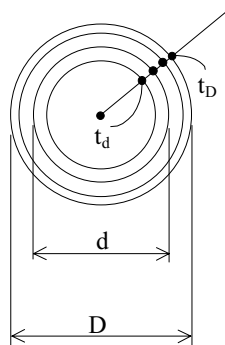
D = 2,54 cm e t = 0,12 cm

$$A = \frac{\pi}{4} (2,54^2 - 2,3^2) = 0,91 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{\pi}{64} (2,54^4 - 2,3^4) = 0,67 \text{ cm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,67}{0,91}} = 0,86 \text{ cm}$$

**c) Modelos 912D e 912G**



**Figura VI.1** – Detalhe da seção das barras duplas.

D = 2,54 cm ; d = 1,9 cm ; t<sub>D</sub> = 0,12 cm

t<sub>d</sub> = 0,19 cm

$$A = \frac{\pi}{4} [(2,54^2 - 2,3^2) + (1,9^2 - 1,52^2)] =$$

$$= 1,93 \text{ cm}^2 \begin{cases} A_{\text{ext}} = 0,91 \text{ cm}^2 \\ A_{\text{int}} = 1,02 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

$$I_{\text{ext}} = \frac{\pi}{64} (2,54^4 - 2,3^4) = 0,67 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{int}} = \frac{\pi}{64} (1,9^4 - 1,52^4) = 0,38 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{total}} = 1,05 \text{ cm}^4$$

$$r_{\text{ext}} = 0,86 \text{ cm}$$

$$r_{\text{int}} = 0,61 \text{ cm}$$

Sendo:

$A_{\text{ext}}$  : área da seção transversal do tubo externo

$A_{\text{int}}$  : área da seção transversal do tubo interno

$I_{\text{ext}}$  : momento de inércia da seção transversal do tubo externo

$I_{\text{int}}$  : momento de inércia da seção transversal do tubo interno

$t_{\text{ext}}$  : espessura da parede tubo externo

$t_{\text{int}}$  : espessura da parede tubo interno

**d) Modelos 912E e 912H**

$$A = 1,93 \text{ cm}^2$$

$$I = 1,05 \text{ cm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{1,05}{1,93}} = 0,74 \text{ cm}$$

**e) Modelo 912F**

$$D = 1,9 \text{ cm e } t = 0,19 \text{ cm}$$

$$A = 1,02 \text{ cm}^2$$

$$I = 0,38 \text{ cm}^4$$

$$r = 0,61 \text{ cm; já calculados no item (c)}$$

Para efeito do cálculo da carga crítica e da resistência à compressão dos modelos com barra interna sem travamento, foram consideradas suas características geométricas como sendo barras isoladas.. Assim utilizou-se a inércia  $I_{\text{int}} = 0,38 \text{ cm}^4$  e a área da seção  $A = 1,93 \text{ cm}^2$ , ou seja, inércia apenas da barra interna e área total das barras interna e externa.



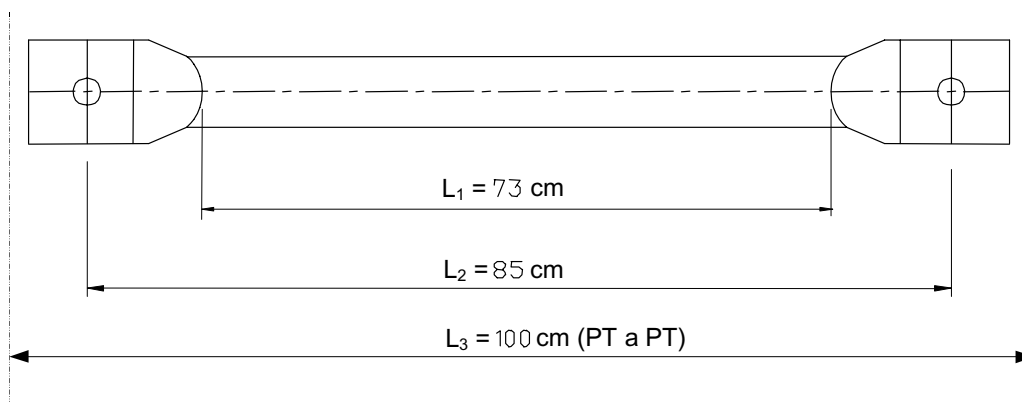
### VI.1.2 - Cálculo da resistência à compressão

A partir das características geométricas determinadas no item anterior foram calculadas as resistências à compressão para todos os modelos (912 a 912H). Foram considerados para efeito de cálculo destas resistências, três valores de comprimentos de flambagem, conforme ilustrado na Figura VI.2.

$L_1$  : distância entre os inícios de trechos amassados ( $L_1 = 73\text{cm}$ )

$L_2$  : distância entre centros de furos ( $L_2 = 85\text{cm}$ )

$L_3$  : distância entre os centros dos nós, ou de ponto de trabalho ( $L_3 = 100\text{cm}$ )



**Figura VI.2** – Detalhe dos comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$

Para as barras analisadas neste estudo (barra fragilizada), seus diâmetros tem valores tais que não alteram significativamente o valor de  $K$  determinado considerando-se a variação de inércia das extremidades amassadas, como apresentado no capítulo III. O valor de  $K$ , assim determinado, é igual a 1,0035. Portanto as barras foram consideradas bi-rotuladas, com coeficiente de flambagem  $K$  igual a 1,0.

As tabelas VI.1 a VI.4 mostram os resultados dos cálculos das resistências à compressão para todos os modelos considerados nos ensaios, segundo as normas AISI, AISI, NBR-8800 e EUROCODE.

A determinação dos valores que constam destas tabelas, é baseada nas formulações apresentadas no Capítulo III.

	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	K	A (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	r (cm)	$\lambda_c$	$f_{cr}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$F_{cr}$ (kN)
912	34,76	20500,00	1,00	2,21	73,00	1,11	0,86	25,47	56,29
	34,76	20500,00	1,00	2,21	85,00	1,11	1,00	22,80	50,39
912 A, B e C	34,76	20500,00	1,00	2,21	100,00	1,11	1,18	19,39	42,86
	27,73	20500,00	1,00	0,91	73,00	0,86	0,99	18,34	16,69
912 D e G	27,73	20500,00	1,00	0,91	85,00	0,86	1,16	15,83	14,41
	27,73	20500,00	1,00	0,91	100,00	0,86	1,36	12,77	11,62
912 E e H	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,61	1,40	12,19	23,54
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,61	1,63	9,14	17,64
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,61	1,92	6,60	12,74
	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,74	1,15	15,87	30,62
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,74	1,34	13,01	25,11
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,74	1,58	9,72	18,75
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	73,00	0,61	1,40	12,19	12,44
	27,73	20500,00	1,00	1,02	85,00	0,61	1,63	9,14	9,32
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	100,00	0,61	1,92	6,60	6,73

**Tabela VI.1** – Parâmetros de cálculo e carga de flambagem ( $F_{cr}$ ), segundo a AISC.

	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	K	A (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	r (cm)	Q	$\alpha$	$\bar{\lambda}$	$\beta$	$f_{cr}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$F_{cr}$ (kN)
912	34,76	20500,00	1,00	2,21	73,00	1,11	1,00	0,16	0,86	1,26	26,59	58,77
	34,76	20500,00	1,00	2,21	85,00	1,11	1,00	0,16	1,00	1,07	23,42	51,77
	34,76	20500,00	1,00	2,21	100,00	1,11	1,00	0,16	1,18	0,92	19,24	42,53
912 A, B e C	27,73	20500,00	1,00	0,91	73,00	0,86	1,00	0,16	0,99	1,08	18,87	17,18
	27,73	20500,00	1,00	0,91	85,00	0,86	1,00	0,16	1,16	0,94	15,78	14,36
	27,73	20500,00	1,00	0,91	100,00	0,86	1,00	0,16	1,36	0,83	12,39	11,28
912 D e G	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,61	1,00	0,16	1,40	0,81	11,83	22,82
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,61	1,00	0,16	1,63	0,74	9,11	17,59
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,61	1,00	0,16	1,92	0,68	6,79	13,11
912 E e H	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,74	1,00	0,16	1,15	0,94	15,82	30,54
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,74	1,00	0,16	1,34	0,83	12,64	24,39
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,74	1,00	0,16	1,58	0,75	9,62	18,57
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	73,00	0,61	1,00	0,16	1,40	0,81	11,83	12,06
	27,73	20500,00	1,00	1,02	85,00	0,61	1,00	0,16	1,63	0,74	9,11	9,30
	27,73	20500,00	1,00	1,02	100,00	0,61	1,00	0,16	1,92	0,68	6,79	6,93

**Tabela VI.2** – Parâmetros de cálculo e carga de flambagem ( $F_{cr}$ ), segundo a NBR-8800.

	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	K	A (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	r (cm)	$f_{cre}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{cr}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$F_{cr}$ (kN)
912	34,76	20500,00	1,00	2,21	73,00	1,11	46,78	28,30	62,55
	34,76	20500,00	1,00	2,21	85,00	1,11	34,50	26,01	57,47
912 A, B e C	34,76	20500,00	1,00	2,21	100,00	1,11	24,93	22,64	50,04
	27,73	20500,00	1,00	0,91	73,00	0,86	28,08	20,88	19,00
912 D e G	27,73	20500,00	1,00	0,91	85,00	0,86	20,71	18,45	16,79
	27,73	20500,00	1,00	0,91	100,00	0,86	14,96	14,88	13,54
912 E e H	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,61	14,13	14,12	27,26
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,61	10,42	10,42	20,11
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,61	7,53	7,53	14,53
	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,74	20,79	18,48	35,67
912 E e H	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,74	15,33	15,19	29,32
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,74	11,08	11,08	21,38
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	73,00	0,61	14,13	14,12	14,41
	27,73	20500,00	1,00	1,02	85,00	0,61	10,42	10,42	10,63
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	100,00	0,61	7,53	7,53	7,68

Tabela VI.3 – Parâmetros de cálculo e carga de flambagem ( $F_{cr}$ ), segundo a AISI.

	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	K	A (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	r (cm)	Q	$\alpha$	$\bar{\lambda}$	$\beta$	$f_{cr}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$F_{cr}$ (kN)
912	34,76	20500,00	1,00	2,21	73,00	1,11	1,00	0,16	0,86	1,24	27,67	61,16
	34,76	20500,00	1,00	2,21	85,00	1,11	1,00	0,16	1,00	1,06	24,31	53,73
	34,76	20500,00	1,00	2,21	100,00	1,11	1,00	0,16	1,18	0,91	19,81	43,78
912 A, B e C	27,73	20500,00	1,00	0,91	73,00	0,86	1,00	0,16	0,99	1,07	19,60	17,83
	27,73	20500,00	1,00	0,91	85,00	0,86	1,00	0,16	1,16	0,93	16,27	14,80
	27,73	20500,00	1,00	0,91	100,00	0,86	1,00	0,16	1,36	0,82	12,66	11,52
912 D e G	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,61	1,00	0,16	1,40	0,80	12,06	23,28
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,61	1,00	0,16	1,63	0,73	9,24	17,84
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,61	1,00	0,16	1,92	0,67	6,86	13,23
912 E e H	27,73	20500,00	1,00	1,93	73,00	0,74	1,00	0,16	1,15	0,93	16,31	31,48
	27,73	20500,00	1,00	1,93	85,00	0,74	1,00	0,16	1,34	0,83	12,92	24,93
	27,73	20500,00	1,00	1,93	100,00	0,74	1,00	0,16	1,58	0,74	9,76	18,85
912 F	27,73	20500,00	1,00	1,02	73,00	0,61	1,00	0,16	1,40	0,80	12,06	12,30
	27,73	20500,00	1,00	1,02	85,00	0,61	1,00	0,16	1,63	0,73	9,24	9,43
	27,73	20500,00	1,00	1,02	100,00	0,61	1,00	0,16	1,92	0,67	6,86	6,99

**Tabela VI.4** – Parâmetros de cálculo e carga de flambagem ( $F_{cr}$ ), segundo a EUROCODE.

### VI.1.3 – Cálculo da carga última em função do deslocamento lateral medido na barra ( $\delta$ )

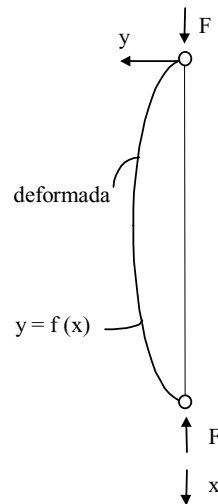
Uma barra sob a ação de uma carga de compressão axial ( $P$ ), tem o comportamento afetado por uma curvatura inicial provocada por imperfeições impostas durante o processo de fabricação ou montagem. Esta barra também apresenta excentricidade na aplicação da carga  $P$ , devido a problemas construtivos inevitáveis. Os valores afetados por estas imperfeições variam em função do tipo de material da barra.

Este fenômeno transforma a solicitação por esforço normal axial em uma flexão oriunda de um determinada excentricidade “ $e$ ” da carga  $P$ . Temos um problema de uma barra ideal solicitada por uma carga excêntrica  $P$ .

Uma solução aproximada para levar em conta este fato é considerar que estas imperfeições sejam equivalentes à sinuosidade inicial da deformada desta barra comprimida [38]. Considerando a barra com articulações nas extremidades, pode ser admitido o deslocamento inicial  $y_0$  da barra como uma meia onda de uma senóide, em que o deslocamento máximo seja igual a “ $a$ ”, isto é:

$$y_0 = a \cdot \sin(\pi x/L) \quad (VI.1)$$

Na Figura VI.3 é ilustrada a situação de uma barra axialmente comprimida com a senóide de sua deformada, onde o valor do deslocamento horizontal da seção central vale  $\delta_t = \delta_0 + \delta$ , sendo  $\delta_0$  o deslocamento inicial causado pelas imperfeições iniciais e  $\delta$  o deslocamento provocado pela flexão.



**Figura VI.3** – Meia onda de uma senóide

Para a determinação do valor de “a” foi considerado na equação VI.1 o valor  $x = L/2$ , isto, é a seção onde ocorre o máximo deslocamento inicial. Na seção central da barra, tem-se:

$$\text{Para } x = L/2 \rightarrow y_0 = \delta_0 = a$$

Logo, o momento fletor nesta seção é dado por:

$$M = P \cdot \delta_t = P(\delta_0 + \delta) \quad (\text{VI.2})$$

Substituindo esta expressão na equação diferencial da linha elástica ( $\ddot{y} = -M/EI$ ) e resolvendo a equação diferencial resultante, obtemos:

$$\delta = \frac{\delta_0}{1 - \alpha}; [38] \quad (\text{VI.3})$$

Onde:

$$\alpha = \frac{P}{P_e};$$

Sendo  $P$  a carga axial e  $P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ , a carga crítica de Euler.

Substituindo estes valores em (VI.3) obtemos:

$$P = P_e \left(1 - \frac{\delta_o}{\delta}\right); [38] \quad (VI.4)$$

O valor de  $\delta_o$  é considerado de acordo com [18] igual a  $L/1000$ , sendo  $L$  o comprimento da barra que nesta pesquisa vale 73cm, 85cm e 100cm, logo  $\delta_o$  tem os valores 0,073cm, 0,085cm e 0,1cm. Este é o valor considerado para o deslocamento inicial devido a imperfeição da barra e a provável excentricidade na aplicação da carga  $P$ .

Neste trabalho a equação VI.4 permite a determinação da carga última experimental da barra em função de  $\delta_o$  e do deslocamento máximo medido na seção central da barra  $\delta$ , obtido por meio do gráfico da carga no nó 9 versus o deslocamento. Os resultados foram obtidos para cada ensaio, exceto o 912 e 912A nos quais a barra 9-12 não foi instrumentada com LVDT.

Na tabela VI.5 tem-se os valores experimentais medidos,  $\delta$  para a carga última do ensaio. Tem-se também a carga de Euler ( $P_e$ ) para cada seção e comprimento considerado.

Nos cálculos relacionados aos modelos D e G, foram consideradas apenas a inércia da barra interna. O valor de  $\delta$  foi acrescido de 2mm (distância entre a face externa da barra interna e à face interna da barra externa). Este procedimento foi adotado já que a barra interna precipitou a flambagem do conjunto. Isto está em conformidade com a metodologia utilizada em projetos, como comentado anteriormente.

Na tabela VI.6 tem-se os valores da carga última experimental  $P_u$ , das barras, calculados com a equação VI.4, assim como o resumo dos valores das resistências à compressão de acordo com as quatro normas consideradas neste estudo

No cálculo dos valores apresentados na tabela VI.6 foram utilizados os seguintes valores para a tensão de escoamento:  $f_y = 34,76\text{kN/cm}^2$ , para o ensaio 912 e  $f_y = 27,73\text{kN/cm}^2$  para os ensaios 912A a 912H, correspondentes aos aços SAC-41 e SAE-1010, respectivamente.



Ensaio	I (cm <sup>4</sup> )	L (cm)		P <sub>e</sub> (kN)	δ (cm)	δ <sub>0</sub> (cm)	δ <sub>0</sub> /δ	P (kN)
912	2,71	L <sub>1</sub>	73	-	-	-	-	-
		L <sub>2</sub>	85	-				-
		L <sub>3</sub>	100	-				-
912A	0,67	L <sub>1</sub>	73	-	-	-	-	-
		L <sub>2</sub>	85	-				-
		L <sub>3</sub>	100	-				-
912B	0,67	L <sub>1</sub>	73	25,44	0,350	0,073	0,209	20,13
		L <sub>2</sub>	85	18,76		0,085	0,243	14,21
		L <sub>3</sub>	100	13,56		0,1	0,286	9,68
912C	0,67	L <sub>1</sub>	73	25,44	0,367	0,073	0,199	20,38
		L <sub>2</sub>	85	18,76		0,085	0,232	14,42
		L <sub>3</sub>	100	13,56		0,1	0,272	9,86
912D	0,38	L <sub>1</sub>	73	14,43	0,800	0,073	0,091	13,11
		L <sub>2</sub>	85	10,64		0,085	0,106	9,51
		L <sub>3</sub>	100	7,69		0,1	0,125	6,73
912E	1,05	L <sub>1</sub>	73	39,87	1,120	0,073	0,065	37,27
		L <sub>2</sub>	85	29,40		0,085	0,076	27,17
		L <sub>3</sub>	100	21,24		0,1	0,089	19,35
912F	0,38	L <sub>1</sub>	73	14,43	0,700	0,073	0,104	12,92
		L <sub>2</sub>	85	10,64		0,085	0,121	9,35
		L <sub>3</sub>	100	7,69		0,1	0,143	6,59
912G	0,38	L <sub>1</sub>	73	14,43	0,850	0,073	0,086	13,19
		L <sub>2</sub>	85	10,64		0,085	0,100	9,58
		L <sub>3</sub>	100	7,69		0,1	0,118	6,78
912H	1,05	L <sub>1</sub>	73	39,87	0,875	0,073	0,083	36,54
		L <sub>2</sub>	85	29,40		0,085	0,097	26,55
		L <sub>3</sub>	100	21,24		0,1	0,114	18,82

**Tabela VI.5** – Valores das cargas últimas experimentais das barras 9–12.

MODELO	P <sub>U</sub> (kN) Experimental da Estrutura	P <sub>U</sub> (kN) Experimental da Barra	L(cm)	P <sub>U</sub> (kN) Teórico da Barra			
				AISC	NBR	AISI	EUROCODE
				K=1	K=1	K=1	K=1
<b>912</b>	129,50	–	<b>73</b>	56,28	58,77	62,55	61,16
		–	<b>85</b>	50,39	51,76	51,47	53,72
		–	<b>100</b>	49,54	42,53	50,04	43,78
<b>912A</b>	48,06	–	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		–	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		–	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912B</b>	56,66	20,13	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		14,21	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		9,68	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912C</b>	60,98	20,38	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		14,42	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		9,86	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912D</b>	64,34	13,11	<b>73</b>	23,53	22,82	27,25	23,28
		9,51	<b>85</b>	17,64	17,59	20,11	17,83
		6,73	<b>100</b>	12,74	13,10	14,53	13,23
<b>912E</b>	66,74	37,27	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		27,17	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		19,35	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54
<b>912F</b>	35,53	12,92	<b>73</b>	12,44	12,06	14,40	12,30
		9,35	<b>85</b>	9,32	9,29	10,63	9,42
		6,59	<b>100</b>	6,73	6,93	7,68	6,99
<b>912G</b>	71,06	13,19	<b>73</b>	23,53	22,82	27,25	23,28
		9,58	<b>85</b>	17,64	17,59	20,11	17,83
		6,78	<b>100</b>	12,74	13,10	14,53	13,23
<b>912H</b>	77,78	36,54	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		26,55	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		18,82	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54

**Tabela VI.6** – Resumo dos valores das cargas últimas das barras 9–12.

MODELO	P <sub>U</sub> (kN) Experimental da Barra	L(cm)	P <sub>U</sub> (kN) Teórico / P <sub>U</sub> (kN) Experimental			
			AISC	NBR	AISI	EUROCODE
			K=1	K=1	K=1	K=1
<b>912B</b>	20,13	<b>73</b>	0,83	0,85	0,94	0,89
	14,21	<b>85</b>	1,01	1,01	1,18	1,04
	9,68	<b>100</b>	1,20	1,16	1,40	1,19
<b>912C</b>	20,38	<b>73</b>	0,82	0,84	0,93	0,87
	14,42	<b>85</b>	1,00	1,00	1,16	1,03
	9,86	<b>100</b>	1,18	1,14	1,37	1,17
<b>912D</b>	13,11	<b>73</b>	1,79	1,74	2,08	1,78
	9,51	<b>85</b>	1,85	1,85	2,11	1,87
	6,73	<b>100</b>	1,89	1,95	2,16	1,97
<b>912E</b>	37,27	<b>73</b>	0,82	0,82	0,96	0,84
	27,17	<b>85</b>	0,92	0,90	1,08	0,92
	19,35	<b>100</b>	0,97	0,96	1,10	0,96
<b>912F</b>	12,92	<b>73</b>	0,96	0,93	1,11	0,95
	9,35	<b>85</b>	1,00	0,99	1,14	1,01
	6,59	<b>100</b>	1,02	1,05	1,17	1,06
<b>912G</b>	13,19	<b>73</b>	1,78	1,73	2,07	1,76
	9,58	<b>85</b>	1,84	1,84	2,10	1,86
	6,78	<b>100</b>	1,88	1,93	2,14	1,95
<b>912H</b>	36,54	<b>73</b>	0,84	0,84	0,98	0,86
	26,55	<b>85</b>	0,95	0,92	1,10	0,94
	18,82	<b>100</b>	1,00	0,99	1,14	0,99

**Tabela VI.7** – Relação entre a carga última teórica e a carga experimental das barras 9-12, nos ensaios 912B a 912H.

Depreende-se das tabelas VI.6 e VI.7 que as normas AISC, NBR, e Eurocode apresentam boa correlação entre os resultados teóricos e os experimentais, exceto para os ensaios 912D e 912G, correspondentes a utilização de barras interna e externa, sem solidarização.

Para o caso da norma americana do AISI, considerando-se os ensaios, 912B, 912C, 912E, 912F e 912H, os valores teóricos comparados com os experimentais não apresentam boa correlação, sendo contra a segurança.

Nos ensaios 912D e 912G considerou-se nos cálculos a inércia da seção transversal da barra interna. Este procedimento, utilizado em escritórios de projetos, conduz a resultados que não correspondem aos experimentais. Observa-se que o cálculo da carga crítica de Euler utilizado na obtenção de  $P_u$  experimental foi com a inércia da barra interna, portanto tem-se a carga última da barra muito abaixo da resistência calculada por norma. Se considerarmos a inércia total teremos valores próximos ao do ensaio 912H, conforme a tabela VI.8 abaixo.

Assim, pode-se considerar para efeito de carga última da barra o valor da inércia total da barra interna e externa. Isto é válido para o caso de barras com pequena distância entre o diâmetro interno e externo (neste caso 2 mm).

MODELO	$P_U$ (kN) Experimental da Estrutura	$P_U$ (kN) Experimental da Barra	L(cm)	$P_U$ (kN) Teórico da Barra			
				AISC	NBR	AISI	EUROCODE
				K=1	K=1	K=1	K=1
<b>912D</b>	64,34	36,23	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		26,28	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		18,59	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54
<b>912G</b>	71,06	36,44	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		26,46	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		18,74	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54

**Tabela VI.8** – Resumo dos valores das cargas últimas dos ensaios 912D e 912G.

Analisando-se os valores do comprimento L da barra, observa-se que os valores de L iguais a 73cm e 85cm conduzem a melhores resultados se comparados com o comprimento de 100cm. Ou seja, considerando-se o comprimento entre inícios de amassamento das extremidades do tubo ou entre centros dos furos como ilustrado na figura VI.2.

# ***CAPÍTULO VII***

## **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

As conclusões obtidas neste trabalho são as seguintes:

- a) a estrutura ensaiada teve o comportamento rígido a despeito da barra fragilizada.
- b) O cálculo do coeficiente de flambagem,  $K$ , determinado considerando-se a variação de inércia devido a extremidade amassada que compõem as barras tubulares da estrutura, não alterou substancialmente o valor de  $K$ , considerado igual a 1,0, bi-rotulado. Isto ocorreu em função do pequeno diâmetro da barra analisada.
- c) Os valores de  $L$  iguais a 73 cm e 85 cm conduzem a melhores resultados quanto à resistência à compressão se comparados com o comprimento de 100 cm. Ou seja, considerando-se os comprimentos entre inícios de amassamentos das extremidades dos tubos e entre furos.
- d) Dentre as normas avaliadas a norma americana do AISI/91, obteve a maioria dos valores contra a segurança, enquanto que para as normas NBR-8800, EUROCODE/92, e AISC/86 obteve-se melhores resultados.
- e) A consideração da barra dupla com travamento conduz a bons resultados se considerarmos a área e a inércia da seção transversal das duas barras. No entanto, no caso das barras duplas sem travamento a determinação da sua resistência considerando-se apenas a inércia da barra interna conduz a resultados conservadores.

Como sugestões para continuidade dos estudos pode-se destacar:

- A necessidade de melhor avaliar a resistência das barras duplas sem travamento, por meio de ensaios experimentais.
- Avaliação numérica dos resultados através de programas de análise não linear de modo a considerar o efeito da flambagem de uma barra no comportamento da estrutura.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- [1] **ABNT** (1967), “Associação Brasileira de Normas Técnicas” NB-143 – Cálculo de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Leves. Rio de Janeiro – RJ.
- [2] **ABNT** (1986), NBR-8800, “Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- [3] **ABNT** (1988), NBR-6120, “Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações: Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro – RJ
- [4] **AGERSKOV, H.**(1986) “Optimum Geometry Design of Double-Layer Space Structures”. Journal of the Structural Engineering, vol. 112 n° 6, p 1454-1463, june.
- [5] **AISI-LRFD** (1991), “Load and Resistance Factor Design Especification for Cold-Formed Steel Structures Members”, American Iron and Steel Institute, New York.
- [6] **AISC-ASD** (1989), “Allowable Stress Design” Manual of Steel Construction, ninth ed., American Institute of Steel Construction, Chicago Il.
- [7] **AISC-LRFD** (1986) , “Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings”, 1<sup>st</sup> ed., American Institute of Steel Construction, USA.
- [8] **ASTM** (1994), “Standard Test Methods Tension Testing of Metallic Materials”. American Society For Testing and Materials. Philadelphia.
- [9] **ALVAREZ, A.A.**,(1975), “La Estructura Metálica Hoy” 2<sup>a</sup> edição, vol. 1 p. 759-798, Madrid.
- [10] **ANDRADE, P.B.** (1994), “Curso Básico de Estruturas de Aço”, Belo Horizonte – MG.

- [11] **BATISTA, R.C.; BATISTA, E.M.** (1997), “Determinação Experimental dos Mecanismos de Colapso de uma Junta Típica de Estruturas Metálicas Reticuladas Espaciais”. XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, EESC-USP, vol. 2 p. 665–674
- [12] **BATISTA, R.C.; PFEIL, M.** (1997), “ Habilitação Via Reforço da Estrutura Metálica de uma Grande Calota Esférica de Cobertura”. XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, EESC-USP , vol. 3 p 1127–1136.
- [13] **BULSON, P.S.; ALLEN, H.G.** (1980), “Background to Buckling”- McGraw-Hill.
- [14] **d’ESTE, A.V.** (1988) “Comportamento de Estruturas Espaciais Tubulares Padronizadas” - Tese de Mestrado – PUC-Rio-Rio de Janeiro.
- [15] **DINNIK, A.** (1932) “Design of Columns of Varying Cross Section “ Transaction ASME.
- [16] **EUROCODE** (1992), “European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings”, Brussels.
- [17] **FREITAS, A.M.S.** (1996) , “Análise do Comportamento e da Resistência de Estruturas Metálicas Treliçadas Sujeitas a Interação Entre Modos de Flambagem.” Tese DSc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ.
- [18] **GALAMBOS, T.V.** (1988), Guide Stability Design – Criteria for Metal Structures. Editor John Wiley & Sons, fourth edition
- [19] **HARTOG, J.P.D** (1949) “Strength of Materials”, New York, Dower Publications, Inc.
- [20] **IFFLAND, J.S.B** (1982), “Preliminary Planning of Steel Roof Space Structures” Journal of the Structural Division, vol. 108, nº st11, p2578-2589, november .



- [21] **JOHNSON, J.E.; SALMON, C.G.** (1980), “Steel Structure – Design and Behaviour” third edition.
- [22] **MAGALHÃES, J.R.M.** (1996), “Sobre o Projeto e a Construção de Estruturas Metálicas Espaciais”, Dissertação de Mestrado, EESC-USP.
- [23] **MAGALHÃES, J.R.M.; MALLITE, M.; SALLES, E.R.P.** (1997), “Estruturas Metálicas Espaciais no Brasil” XXVIII Jornadas Sul- Americanas de Engenharia Estrutural, EESC-USP, vol. 2, p. 885-894.
- [24] **MAKOWSKI, Z. S.**(1981), “Review of Development of Various Types of Double Grids”. In: Analysis , Design and Construction of Double-Layer Grids. Ed. By Z. S. Makowski, London, Aplied Science Publishers, ltd, p. 1-55.
- [25] **MALLA, R.B.; SERRETTE, R.L.**(1996) Double-Layer Grids: “Review of Static and Thermal Analysis Methods” Journal of the Structural Engineering”, vol. 122, nº 8, p. 873-881.
- [26] **MARGARIT, J.; BUXADÉ, C.** (1972), “Las Malhas Espaciales en Arquitectura” Barcelona, Gustavo Gilli.
- [27] **MORINI, F.** (1976), “Coperture Spaziale”. Construzione Metalliche, nº 6 p.328-332.
- [28] **MUKANOV, K.,** (1980), “Estruturas Metálicas” 1ª edição, Editora Mir, Moscou.
- [29] **MÚTIPLUS** (1988), “Cypecad” Cype Inginneros, Softwares de Cálculos Estruturais, Espanha.
- [30] **MURTHA-SMITH, E.** (1994) “Compression-Member Models for Space Trusses : Review. Journal of the Structural Engeneering”, vol. 120, nº 8, p2399-2407.
- [31] **NOSSHIN, H.** (1998) “Space Structures and Configuration Processing “ Progress in Structural Engineering and Matricials, vol. 1 nº 3.

- [32] **OKAMOTO, R.; KONDO TOYOSHI; INADA YUJI** (1989), “Structural Analysis of an Atrium”. Ed. By Z. S. Makowski e H. Nooshin, vol. 4, nº 3, England, p. 135-161.
  
- [33] **PARKE, G.A.R.; WALKER, H.B.**(1984) “A Limit State of Double-Layer Grids”. In: Third International Conference on Space Structures, University of Surrey, Guildford, set. 1994. Ed. By H. Nooshin, Elsevier Applied Publishers, London – New York, p.528-532.
  
- [34] **RIBEIRO, L. F. L.; GONÇALVES, R. M.** (1996) – “Análise de Comportamento e Simulação Numérica de Nós Característico de Estruturas Tubulares Espaciais”, XXVII Jornadas Suamericanas de Ingenieria Estructural, Tucumán, Argentina, 18–22/09/95, vol. 4, pp. 507–518.
  
- [35] **SAKA, T.; HEKI, K.** (1984). “The Effect of Joints on the Strength of Space Trusses”. In: Thirh International Conference on Space Structures. University of Surrey, Guildford. Anais. Ed. By H. Nooshin, Elsevier Applied Publishers, London- New York. P. 417-422.
  
- [36] **SCHIMIDT, L.C.; MORGAN, P.R.; CLARKSON, J.A.**(1976) “Space Trusses widt Brittle-Type Strut Buckling”. Journal of the Structural Division, vol. 102, nº ST7, p. 1479-1492.
  
- [37] **SMITH, E.M.; BEAN, J.E.** (1989), “Double- Layer Grid Space Frame Buckling”. Ed. By Z. S. Makowsky e H. Nooshin, vol.4 nº 3, England, p. 117-127.
  
- [38] **THIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.M.** (1984), “Mecânica dos Sólidos” vol.2, LTC. , Rio de Janeiro- RJ
  
- [39] **THIMOSHENKO, S. P.** (1966), “Resistência dos Materiais” p. 137-172,vol. 2 LTC. , Rio de Janeiro –RJ.

- [40] WANG,T. S.. et al.(1989) "Post-Buckling Analysis of steel Space Trusses"Journal of Structural Engineering, vol 115, n<sup>o</sup>4.