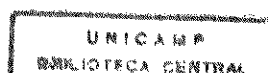


André Bartholomeu

**“Análise Teórico-Experimental de
Pórtico-Treliça de Madeira”**

**Dissertação de Mestrado
apresentada à Faculdade
de Engenharia Civil da
Universidade Estadual de
Campinas.**

Orientador: Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo



03321, 5

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	B283a
V.	Fi
TOMBO BC	27242
PRG.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	09/04/96
N.º CPD	

CM-00086172-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B283a Bartholomeu, André
 Análise teórico-experimental de pórtico-treliça de
 madeira / André Bartholomeu.--Campinas, SP: [s.n.],
 1995.

 Orientador: Mauro Augusto Demarzo.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

 1. Conforto térmico. 2. Tesouras (Construção civil).
 3. Madeira - Estruturas. 4. *Ligações semi-rígidas. I.
 Demarzo, Mauro Augusto. II. Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil

**“Análise Teórico-Experimental de
Pórtico-Treliça de Madeira”**

André Bartholomeu

1995

Ao meu pai Francisco, origem do meu entusiasmo em aprender, e à minha mãe Elvira, princípio de perseverança e doçura, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo, aquele que me aceitou, pelas orientações seguras e pela clareação do caminho tortuoso.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Menezes, pelas Matrizes sobre as quais este trabalho pôde caminhar.

A cada membro da minha numerosa família, pelo incentivo e pelos instantes (tantos...) roubados.

À Profª Belquis e ao Tato, pelo primeiro empurrão.

A todos os professores de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pela acolhida e colaboração.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pela disposição e pela ajuda.

Ao Fábio, Márcio, Cláudio, Roberta, Eliete, Rosa e principalmente ao André Romanin, da USF - Itatiba, pelo apoio e colaboração.

Declaração

Eu, Prof. Dr. Mauro A. Demarzo, declaro ser esta a versão definitiva da dissertação de mestrado “Análise Teórico-Experimental de Pórtico-Treliça de Madeira”, de autoria do meu orientado André Bartholomeu.

Campinas, 11 de dezembro de 1995



Prof. Dr. Mauro A. Demarzo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil
Departamento de Construção Civil

Dissertação de Mestrado

“Análise Teórico-Experimental de
Pórtico-Treliça de Madeira”

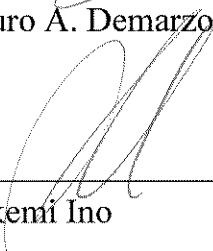
Autor: André Bartholomeu

Orientador: Prof.Dr. Mauro A. Demarzo

Aprovado por:



Prof. Dr. Mauro A. Demarzo, Presidente



Prof.^a. Dr.^a. Akemi Ino



Prof. Dr. Francisco Antonio Menezes

Campinas, 11 de dezembro de 1995

RESUMO

O Brasil é um país de clima tropical e o conforto térmico é de capital importância na elaboração de projetos de edificações. Entretanto não se observa este cuidado amiúde, o que conseqüentemente leva os edifícios a serem mal ventilados e desconfortáveis.

Um estudo sobre a eficiência de lanternins em coberturas, para melhoria do conforto térmico, propõe uma nova geometria de treliça de madeira que contemple um incremento na ventilação natural do ambiente. É fixado um valor ideal de abertura em lanternins assimétricos, incorporados às treliças, em função do vão coberto.

A treliça de madeira proposta foi construída usando-se conectores metálicos dentados tipo “gang-nail”, que conferem engastamento parcial às ligações. Esses podem apresentar valores desde próximos da articulação até aqueles próximos do engaste perfeito, dependendo do tamanho da chapa, superfície efetivamente pregada e da espécie da madeira.

Nesse trabalho são feitas abordagens teóricas que se aplicam a essas ligações, originando o Programa Engnail, para cálculo de estruturas planas com ligações semi-rígidas. Uma análise experimental desenvolvida em laboratório teve o objetivo de comparar os resultados teóricos e experimentais, bem como contribuir para o equacionamento dos casos onde se pretende considerar ligações semi-rígidas.

Abstract

Thermal comfort is a very important point to be considered in buildings placed in a tropical country like Brazil.

Using natural ventilation and an efficient ridge vent, we can minimize the thermal discomfort and increase the personal welfare.

A new Portico-Truss, proposed by an original geometry, improves the thermal comfort.

Using nail plates, this truss joints have a semirigid behavior. Normally the behavior of the joints is considered pinned or rigid.

The experimental tests of all sizes of nail plates, named "Gang-Nail", resulted in a Partial Fixing Coefficient (CEP) for each size. These CEP's have important influence in truss stiffness.

A truss, built in natural scale and with new geometry, was tested. The difference between theoretical and experimental results was acceptable.

Índice

4 Panorama Geral e Objetivos

4.1	<i>Introdução</i>	1
4.2	<i>Objetivos</i>	2

5 Revisão Bibliográfica

5.1	<i>Conforto Térmico</i>	3
5.2	<i>Engastamento parcial em ligações de madeira com conectores metálicos dentados</i>	5

6 Enfoque Teórico

6.1	<i>O Conforto Térmico</i>	8
6.1.1	A necessidade da Ventilação	9
6.1.2	A Ventilação Natural	9
6.1.3	O lanternim como auxiliar da Ventilação Natural	10
6.1.4	Pesquisa experimental sobre a eficiência de lanternins assimétricos na melhoria do conforto térmico de um ambiente	11
6.2	<i>Análise Matricial do Pórtico-Treliça</i>	13
3.2.1	Matriz de Rigidez de uma Barra Bi-Engastada	13
3.2.2	O Conector Metálico Dentado e suas características nas ligações	16
3.2.3	A Barra Bi-Engastada parcialmente	18
3.2.4	O CEP - Coeficiente de Engastamento Parcial	19
3.2.5	A Matriz de Rigidez de uma Barra Bi-Engastada parcialmente	22
3.2.5.1	Matriz de Equilíbrio [T]	23
3.2.5.2	Matriz de Flexibilidade [F_{AA}] de uma viga em balanço com extremidade B Engastada Elasticamente	23
3.2.5.3	Submatriz de Rigidez [S_{AA}] de uma barra AB	24
3.2.5.4	Submatriz de Rigidez [S_{BA}]	25
3.2.5.5	Submatriz de Rigidez [S_{AB}]	25
3.2.5.6	Submatriz de Rigidez [S_{BB}]	25
3.2.6	Ações de Engastamento Elástico	26
3.2.6.1	Devidas a uma carga p uniformemente distribuída	27
3.2.6.2	Devidas a uma carga concentrada P	28
3.2.6.3	Devidas a um momento concentrado	29

3.2.7	Proposta de um Pórtico-Treliça como elemento estrutural de cobertura pró conforto térmico	30
3.2.8	O Programa ENGNAIL	31
4	Experimentação	
4.1	<i>Materiais utilizados em ensaios de ligações parcialmente engastadas de madeira</i>	
4.1.1	A Madeira	32
4.1.2	Os Conectores Metálicos Dentados	33
4.2	<i>Equipamentos utilizados</i>	
4.2.1	Equipamentos de carga e leitura usados na pesquisa de ligações parcialmente engastadas	36
4.2.2	Equipamentos de leitura usados na pesquisa sobre eficiência de lanternins assimétricos	36
4.3	<i>Descrição dos Ensaios</i>	
4.3.1	Pesquisa experimental sobre eficiência de lanternins assimétricos quanto ao conforto térmico	36
4.3.2	Ensaio de Ligações parcialmente engastadas	38
4.4	<i>Resultados obtidos e suas análises.</i>	
4.4.1	Eficiência de lanternins assimétricos	41
4.4.2	Ligações parcialmente Engastadas	45
4.4.2.1	Ensaio para obtenção do Teor de Umidade da madeira utilizada	45
4.4.2.2	Ensaio para obtenção do Módulo de Elasticidade do Angico-Preto	45
4.4.2.3	Ensaio para obtenção dos valores do CEP dos conectores metálicos dentados	51
4.4.2.4	Ensaio de um Pórtico-Treliça	90
4.4.2.5	Ensaio de uma Barra Bi-Engastada parcialmente	95
5	Conclusões e Perspectivas	97
	Bibliografia	99
	Apêndice	101

1 - PANORAMA GERAL E OBJETIVOS

1.1) INTRODUÇÃO

Vive-se uma era de grandes transformações. A rapidez com que alguns conceitos são mudados exige do ser humano de hoje uma atenção nunca antes reclamada.

A arquitetura moderna exhibe concepções futuristas e, ao mesmo tempo, remete-nos a lições do passado.

Novos materiais são testados e a tecnologia é um moto contínuo a oferecer, atrativamente, novas soluções para problemas antigos.

Assim, é imperativo para o profissional da construção civil renovar-se e buscar sempre melhores resultados.

O profissional-artesão vem sendo substituído por outro que deve saber aplicar, da melhor maneira possível, aquilo que já estiver estabelecido, planejado, calculado. É a norma de nosso tempo.

O mundo novo está à nossa volta para ser construído, e a própria sociedade tem pressa.

Não coadunar-se com estas regras significa, portanto, capitular. É preciso pesquisar e aprender !

Em tempos remotos, as estruturas de madeira tinham larga utilização. Em função de sua própria escassez e com a utilização de novos materiais, a madeira acabou, nos dias de hoje, tornando-se cara e não mais competitiva como material estrutural.

Entretanto, há novas soluções racionalizando o uso da madeira como material de estrutura de cobertura.

Novas formas de ligação das peças remodelam os elementos estruturais invocando a madeira, novamente, como opção.

Conectores metálicos dentados têm sido desenvolvidos, principalmente nos EUA, e atuam fortemente na construção civil, impulsionando a indústria da madeira.

O Brasil, país cuja abundância de madeira é notável, começa a utilizar mais racionalmente esta nova tecnologia e a perspectiva de incremento de sua utilização é altamente promissora.

A madeira, replantada dentro de normas ecológicas e comerciais, prova que pode ser o material ideal para utilização em estruturas leves.

1.2) OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o de encontrar coeficientes de engastamento parcial para conectores metálicos dentados em ligações de madeira.

Outro objetivo é o estudo de um Pórtico-Treliça de madeira-estrutura principal de uma cobertura de um galpão industrial- construído com uma geometria não usual e utilizando tais ligações.

A sua geometria peculiar auxilia no conforto térmico de um ambiente, virtude que ousa respeitar premissas estruturais e necessidades biológicas de conforto térmico humano. Porisso principiou-se pela análise da abertura adequada de um lanternim objetivando tal conforto.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) CONFORTO TÉRMICO

A bibliografia sobre conforto térmico é abundante, e pode ser encontrada sem muita dificuldade. Porém os livros que a tratam tecnicamente são em número mais restrito. Trabalhos recentes abordam principalmente o conforto térmico ligado à criação de animais existindo, ainda hoje, lacunas quanto aos parâmetros de conforto térmico humano.

Estes parâmetros são essenciais. Segundo Mesquita, Guimarães e Nefussi [10], "torna-se necessária a fixação de critérios específicos que permitem estabelecer os limites de exposição ao calor em diferentes tipos de trabalho e a redução da exposição para respostas excessivas do organismo. Os critérios assim desenvolvidos devem levar em conta não só a resposta fisiológica, mas também a psicológica, a produtividade e a ocorrência de desordens devido ao calor".

Um importante efeito negativo do desconforto térmico é a queda de produtividade apresentada por operários trabalhando sob altas temperaturas. Frota e Schiffer [4] observam que :

- para o trabalho físico, o aumento da temperatura ambiente de 20°C para 24° C diminui o rendimento em 15%;
- a 30°C de temperatura ambiente, com umidade relativa de 80%, o rendimento cai 28%.

Existem, ainda, estudos, segundo estas mesmas autoras, que relacionam ambientes termicamente desconfortáveis com índices mais elevados de acidentes no trabalho.

A determinação de um índice de conforto térmico é o primeiro passo para a análise adequada de um recinto destinado ao uso humano. Ainda conforme Frota e Schiffer [4], "os índices de conforto térmico procuram englobar, num parâmetro, o efeito conjunto de certas variáveis, como a

atividade desenvolvida pelos indivíduos, suas vestimentas, sexo, idade, raça, hábitos alimentares, etc."

Na pesquisa realizada por este trabalho foi adotado como índice comparativo de confortos térmicos entre ambientes diferentes o Índice de Temperatura do Globo e Umidade (ITGU), dado pela expressão:

$$ITGU = T_{gn} + 0,36 T_{po} - 330,08 \quad (2.1)$$

onde :

T_{gn} = Temperatura do Globo Negro ($^{\circ}K$)

T_{po} = Temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}K$)

A aplicação deste índice nas suas diferentes ambiências está demonstrada na seção 4.3.1.

Outros índices podem ser apontados, como por exemplo o IBUTG (Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo), adotado pelo Manual Técnico do Departamento de Obras Públicas, porém com resultados semelhantes ao ITGU.

Muito significativo foi o problema do equacionamento da quantidade ideal de abertura em um lanternim para que este atuasse efetivamente na melhoria do conforto térmico de um ambiente.

Esta idéia nos remete imediatamente à do "efeito chaminé". Este efeito, como define Macintyre [8] se dá porque "a menor densidade do ar quente faz com que o mesmo se eleve e tenda a escapar por aberturas colocadas nas partes elevadas, em lanternins, etc.", e proporciona uma vazão dada pela equação :

$$Q = 9,4 A \quad (2.2)$$

onde: Q = vazão do ar (pés cúbicos/min)

A = área livre, das entradas ou saídas, iguais (pés²)

h = distância vertical entre as aberturas entr/saída(pés)

T_i = Temp. média do ar interior à altura das saídas (°F)

T_e = Temp. do ar exterior (°F)

Entretanto, para o caso estudado nesta pesquisa, decidiu-se encontrar experimentalmente o tamanho de abertura ideal de lanternim pois não há na literatura um equacionamento que se aplique integralmente à sua circunstância.

Maiores detalhes desta pesquisa e seus resultados estão apontados nas seções 4.3.1. e 4.4.1.

2.2) ENGASTAMENTO PARCIAL EM LIGAÇÕES DE MADEIRA COM CONECTORES METÁLICOS DENTADOS

Vários artigos escritos por diversos pesquisadores enfocam o uso de conectores metálicos dentados em ligações de madeira. Entretanto em nenhum deles é abordada a absorção parcial de momentos fletores pelos conectores.

Ujvari [17] faz uma abordagem quase que completa do uso e dimensionamento de conectores metálicos em treliças de madeira. Entretanto, seus resultados enfocam basicamente os esforços de tração, compressão e cisalhamento.

No tocante à absorção de momentos fletores, seu trabalho produziu uma tabela listando tamanhos de conectores e os respectivos momentos máximos aplicáveis, não havendo menção de parcialidade de engastamento.

Mesmo a fabricante de conectores Gang-Nail do Brasil Ind. e Com. Ltda. [5] nada cita em termos de absorção parcial de momentos fletores pelos conectores.

O Truss Plate Institute [16], através das suas especificações, delimita na seção 304, comprimentos de flambagem de banzos de treliças, mas também nada detalha a respeito de engastamentos parciais via conectores.

Sendo assim, este trabalho de pesquisa vem acrescentar à literatura atinente importantes dados acerca dos tamanhos comerciais de conectores metálicos dentados e seus respectivos coeficientes de engastamento parcial.

Outro ponto importante estudado por esta pesquisa e que mereceu revisão bibliográfica foi a questão da relação entre momentos aplicados em nós e seus consequentes deslocamentos angulares (giros, ou rotações).

Este tema tem sido alvo de alguns estudos que, em sua maioria, demonstram a não-linearidade do comportamento das ligações na relação Momento Aplicado-Rotação ($M-\varnothing$). Entretanto, a zona de fronteira entre a linearidade e a não-linearidade, em muitos casos, é indelineável. Segundo Bjorhovde, Colson e Brozzetti [3] "num diagrama $M-\varnothing$ temos regiões demarcadas por curvas não-lineares. Isto está mostrado na figura 2.1 onde os modelos básicos de comportamento das ligações estão indicados. Para utilização prática, contudo, é mais fácil utilizar as regiões linearizadas, como mostra a figura 2.2.

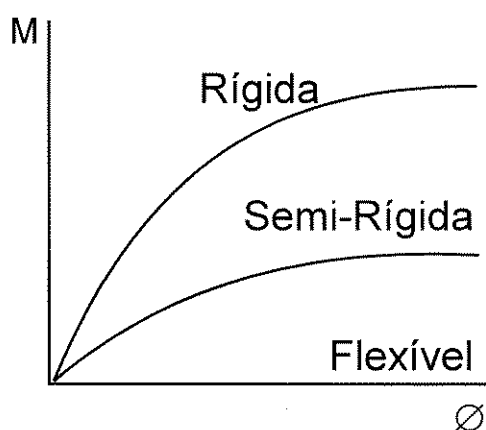


Figura 2.1 - Regiões básicas para ligações com comportamento não-linear.

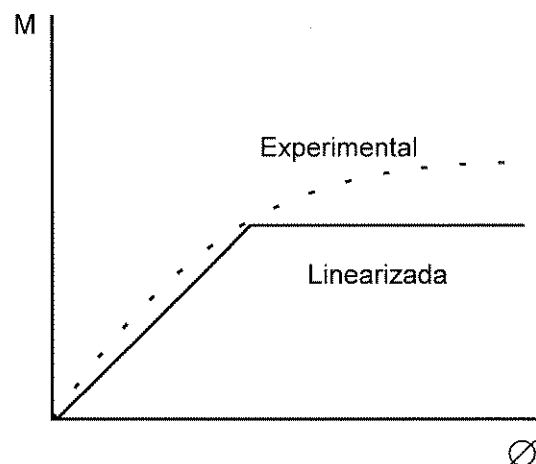


Fig. 2.2 - Linearização da relação Momento-Rotação em ligações.

No caso do nosso estudo, os ensaios para obtenção dos Coeficientes de Rigidez de conectores metálicos dentados mostraram que a linearidade da relação Momento-Rotação é factível dentro da ordem de grandeza de carregamentos habituais aplicados em estruturas de madeira. As tabelas contidas na seção 4.4.2.3. confirmam, através de retas, a tese da linearidade desta relação.

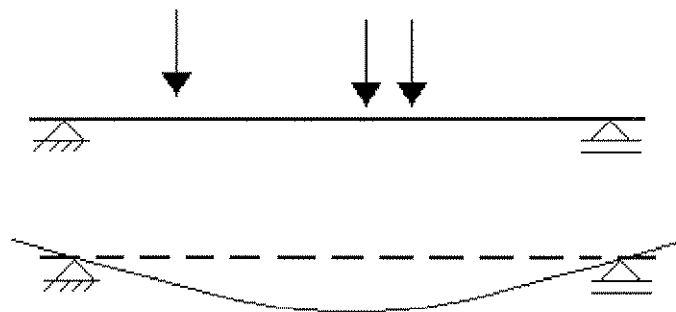


Fig. 2.3 - Barra com Momentos nulos nos apoios.

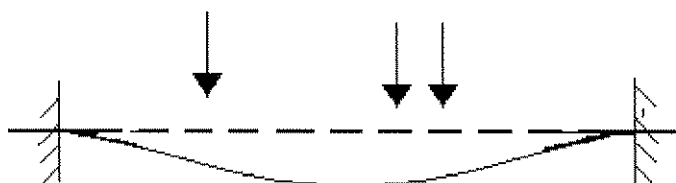


Fig. 2.4 - Barra com Momentos de Engastamento Perfeito nos apoios.

Quando uma barra bi-apoiada (fig. 2.3) é solicitada por um carregamento qualquer, não há restrição ao giro em seus apoios e os momentos fletores, nestes, são zero. Entretanto, se nos apoios desta mesma barra houver restrição total ao giro, os momentos atuantes que aparecerão ali serão os de engastamento perfeito (fig. 2.4). Desta forma, dentro da relação linear Momento-Rotação, quando esta barra tiver apoios que restrinjam o giro em, por exemplo, 50% é fácil demonstrar-se também que os momentos atuantes nos apoios valerão metade dos momentos de engastamento perfeito, como se pode observar na literatura citada a seguir.

Merritt [9] traz a tese da linearidade dos Deslocamentos angulares em relação aos Momentos aplicados quando trata de conexões metálicas rígidas e semi-rígidas.

S. Goldenhörn [6] reproduz a mesma tese quando aborda vigas com "grados de empotramiento".

Odone Belluzzi [2] confirma, em sua obra, esta teoria no capítulo 11, ítem 19, "Vigas imperfectamente empotradas".

3 - ENFOQUE TEÓRICO

3.1) O CONFORTO TÉRMICO

Grande parte da extensão territorial de nosso país possui um clima tropical, e, portanto, torna-se relevante a consideração do conforto térmico nas edificações.

Entretanto, não presenciamos esta relevância cotidianamente na maioria dos edifícios. Esta falha deve-se, talvez, à falta de disseminação de estudos de efeitos do desconforto térmico sobre os indivíduos.

O conforto térmico é tão importante para o ser humano quanto qualquer outro conforto. Sabe-se, por exemplo, que há baixa produtividade

em ambientes nos quais operários trabalham sob altas temperaturas ou sob condições insalubres devidas à falta de ventilação ambiente.

3.1.1) A Necessidade da Ventilação

A ventilação é extremamente necessária para a vida do ser humano. Através dela é que são retiradas de um ambiente as impurezas odorantes e outros gases que causam desconforto.

Também, através dela, se concretiza a renovação do oxigênio do ar deste ambiente, possibilitando ao metabolismo humano seu processamento contínuo.

Por meio do ar, renovado pela ventilação, é que se dá a sensação de conforto térmico. Este, quando dentro de parâmetros adequados, possibilita ao homem seu bem-estar para o desempenho de toda e qualquer atividade.

Desta maneira, a importância da ventilação passa a ser uma questão técnica necessária e não apenas uma figura de retórica.

3.1.2) A Ventilação Natural

A ventilação de um ambiente é natural quando ela é processada sem o auxílio de meios artificiais. Entende-se como meios artificiais o uso de ventiladores, insufladores ou outros aparelhos.

A ventilação natural pode se dar de três maneiras:

- ventilação devida à ação do vento;
- ventilação devida à diferença de temperaturas interna e externa;
- ventilação pela combinação da ação do vento e da diferença de temperaturas.

A ventilação devida à ação do vento é aquela que se utiliza de aberturas nas paredes de um recinto voltadas para a face de predominância do vento. Este, penetrando no ambiente, realiza a necessária renovação do ar, saindo por aberturas localizadas em regiões de baixa pressão exterior.

A ventilação devida à diferença de temperaturas se dá porque a menor densidade do ar quente faz com que ele escape por aberturas colocadas em partes elevadas da edificação, como, por exemplo, os lanternins. Este escoamento do ar é decorrente do chamado "efeito chaminé".

A proposta de pesquisa de conforto térmico que esta dissertação aborda segue este tratamento teórico, quando verifica o efeito de lanternins no desempenho do conforto térmico de recintos ventilados naturalmente.

3.1.3) O Lanternim como Auxiliar da Ventilação Natural

Como vimos, aberturas colocadas em partes elevadas de recintos possibilitam a saída de ar quente do mesmo e, conseqüentemente, melhoram sua ventilação natural e seu conforto térmico.

Todavia estas aberturas devem obedecer certas regras para que produzam o efeito desejado.

Assim, quanto maior a abertura e mais elevada a sua altura em relação ao piso do recinto, maior será seu efeito. Sua eficiência ainda será melhorada se junto ao piso forem providenciadas aberturas de entrada de ar, que sob a ação do efeito chaminé produzirá a expulsão do ar quente.

Entretanto estas aberturas junto ao piso não são habitualmente construídas e, assim, a ventilação sob o efeito chaminé, normalmente, só conta com as janelas (ou vitrôs) como aberturas de entrada.

Podemos destacar dois modelos principais de lanternim, conforme as figuras abaixo : o simétrico e o assimétrico.

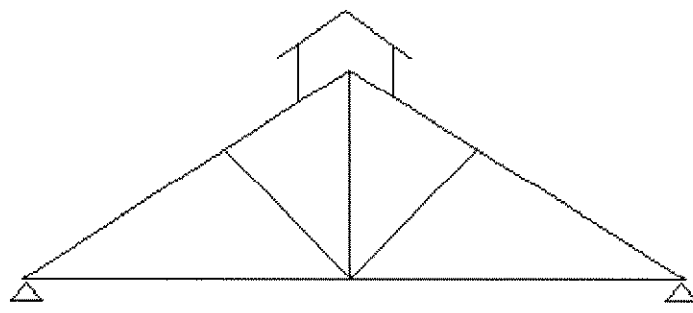


Fig. 3.1 - Lanternim simétrico.

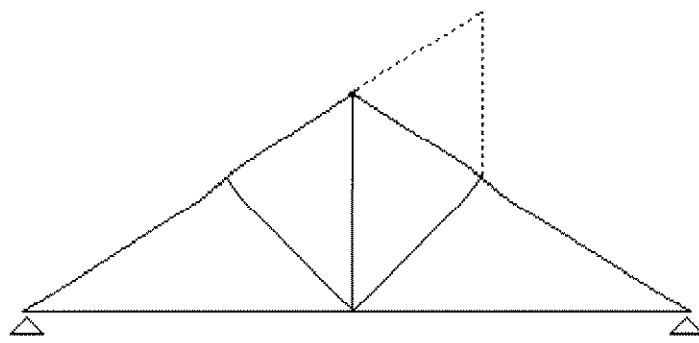


Fig. 3.2 - Lanternim assimétrico.

O lanternim torna-se, claramente, um elemento essencial na ventilação natural. A determinação do tamanho ideal de sua abertura, em face da quantidade habitual de aberturas de entrada, é um dado importante a ser estudado mais profundamente.

3.1.4) Pesquisa Experimental sobre a Eficiência de Lanternins Assimétricos na melhoria do Conforto Térmico de um Ambiente

Com o objetivo de pesquisar experimentalmente a eficiência de lanternins assimétricos construiu-se, em janeiro de 1.994, na cidade de Itatiba-SP três protótipos de uma edificação destinada a indústria têxtil. Estes protótipos consistiram em modelos reduzidos deste galpão, construídos de alvenaria e cobertos com telhas de fibrocimento de 6 mm. O galpão hipotético teria 30,00 x 12,00 m e pé-direito de 3,50 m.

A escala reduzida adotada (horizontalmente = 1 : 10 e verticalmente = 1 : 2), segue os parâmetros propostos por Naas, Bucklin,

Zazueta, Rossi, Sydenstricker e Moura [12] e os protótipos foram construídos nas medidas 3,00 x 1,20 x 1,75 m.

As aberturas projetadas foram seis : três na parede face sul e três na parede face norte, medindo cada uma 50 x 60 cm. Estas aberturas possuem, em escala, a mesma área de vitrôs usualmente colocados num galpão deste tipo.

Quanto aos lanternins, construiu-se cada protótipo com uma altura diferente : o primeiro com altura zero; o segundo com altura de 25 cm. e o terceiro com altura de 50 cm. Como estas aberturas também obedeciam a escala reduzida, na construção real estas alturas seriam zero, 50 cm. e 100 cm.

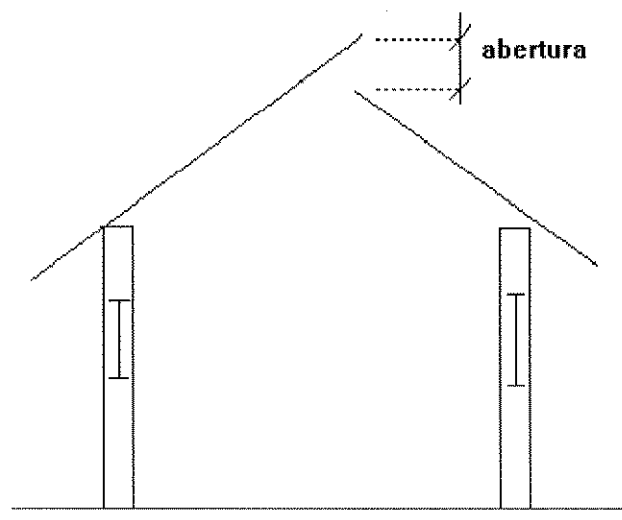


Fig. 3.3 - Esquema dos protótipos construídos.

Durante o verão de 1.994 foram coletados diariamente, quatro vezes ao dia, os seguintes dados no interior de cada protótipo :

- temperatura de bulbo seco;
- temperatura de bulbo úmido;
- temperatura de globo negro;
- temperaturas máximas e mínimas diárias.

Exteriormente colheu-se a velocidade do vento em cada horário estabelecido.

O objetivo principal desta pesquisa foi de, através da coleta destes dados, determinar índices de conforto térmico para cada protótipo e avaliar a eficiência do lanternim de maior abertura em relação aos outros dois, no quesito ventilação natural.

Pretendeu-se demonstrar que melhorando a ventilação natural de um ambiente aumenta-se o conforto térmico do mesmo.

Terminada a construção dos protótipos, iniciou-se a coleta de dados para as análises dos índices de conforto térmico que possibilitariam a diferenciação entre os três modelos. Os resultados desta pesquisa acham-se demonstrados na seção 4.4.1.

3.2) ANÁLISE MATRICIAL DO PÓRTICO-TRELIÇA

Tendo um projeto de um Pórtico-Treliça que satisfaça as condições de conforto térmico ideal e também a estruturação de uma cobertura, optou-se pela análise matricial para obtenção dos esforços e deslocamentos nos nós e esforços nas barras.

As ligações das barras, feitas com conectores dentados, conferem engastamento parcial às mesmas. Este detalhe consistiu no cerne da pesquisa que originou esta dissertação.

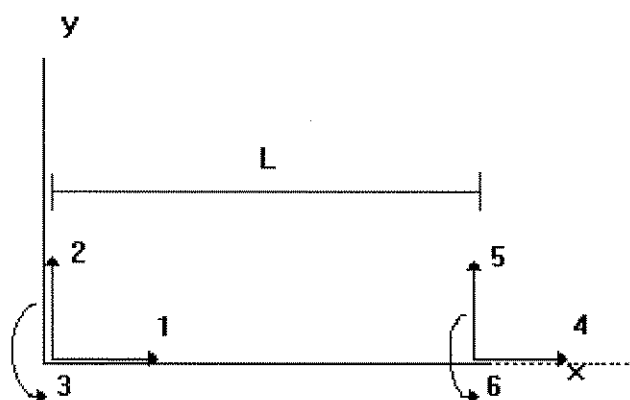
O Programa de computador desenvolvido para cálculo de Pórticos-Treliça calca-se na Análise Matricial de Estruturas, adaptado às condições características de vínculo dos nós.

3.2.1) Matriz de Rigidez de uma Barra Bi-engastada

A matriz de rigidez de uma barra, como sabemos, é constituída de coeficientes de rigidez. O coeficiente de rigidez é o valor de uma ação que deve ser aplicada para garantir que um corpo tenha uma deformação de valor unitário na direção da ação.

Conforme os esquemas apresentados abaixo, elencamos todos os deslocamentos possíveis sofridos por uma barra, tomando os sentidos como positivos:

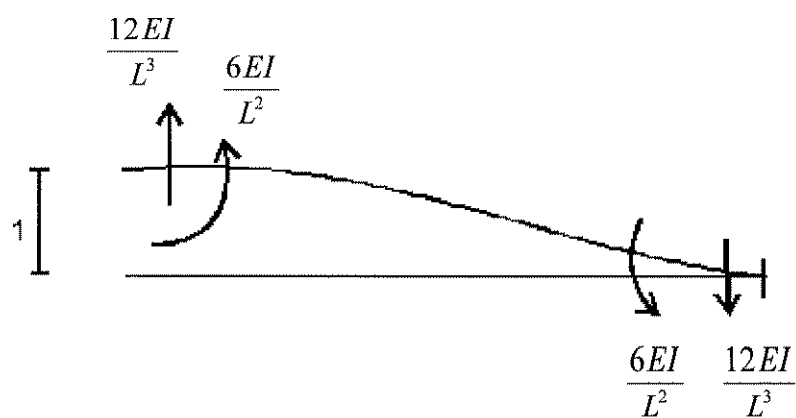
(a)



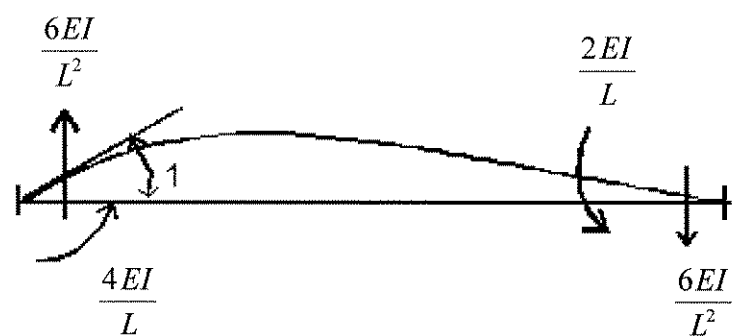
(b)



(c)



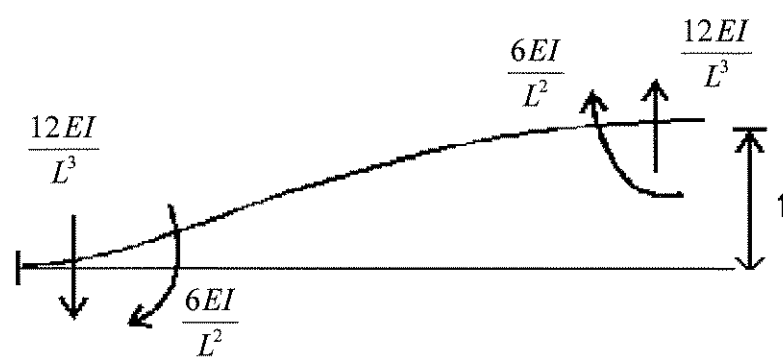
(d)



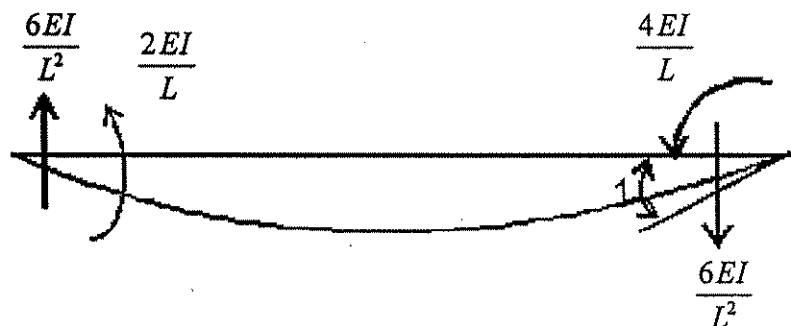
(e)



(f)



(g)



Se a barra bi-engastada de comprimento L , de material com módulo de elasticidade E , possuir momento de inércia I e área S constantes, sua Matriz de Rigidez (MR) referida ao seu próprio eixo será:

$$MR = \begin{bmatrix} \frac{ES}{L} & 0 & 0 & -\frac{ES}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{ES}{L} & 0 & 0 & \frac{ES}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

3.2.2) O Conector Metálico Dentado e suas características nas Ligações

Na análise de um Portico-Treliça é de suma importância a consideração dos elementos responsáveis pelas ligações.

As ligações das barras constituintes de uma estrutura qualquer podem ser executadas de várias maneiras. Tratando-se de madeira e, em especial, de treliças, as ligações são habitualmente consideradas

articuladas. Parafusos, pregos -auxiliados por grampos- são os elementos geralmente empregados. Como, no cálculo estrutural de uma treliça, a consideração quanto à rigidez do nó é feita supondo-o articulado, a determinação da quantidade de elementos de ligação restringe-se à verificação da resistência à tração ou compressão, visto que momentos fletores são desprezados.

Na construção moderna de treliças de madeira são usados conectores metálicos dentados industrializados. No Brasil, atualmente, a empresa Gang-Nail é uma das principais fabricantes e fornecedoras de conectores metálicos para ligações em peças de madeira. Estes conectores são de forma retangular e de tamanhos variados. Eles já vêm com os dentes estampados, sempre com a mesma profundidade e na mesma quantidade por centímetro quadrado. As especificações técnicas dos conectores estão elencadas na seção 4.1.2.

A fixação destes elementos de ligação pode ser feita de duas maneiras: manualmente através de pregagem (método arcaico) ou através de um processo moderno de prensagem utilizando-se máquinas "roller", equipamento formado por dois cilindros entre os quais circula a treliça.

Tanto o efeito de pregagem como o de prensagem conferem, através do conector, uma rigidez à ligação.

Esta rigidez depende do tamanho do conector e da sua posição na união. Os gráficos dos resultados obtidos em ensaios com os tamanhos comerciais de conectores fabricados pela empresa acima citada estão mostrados na seção 4.4.2.

É de se ressaltar que, no tocante à absorção de momento fletor, as ligações com conectores metálicos sempre engastam parcialmente. Os valores de engastamento parcial que cada modelo de conector confere estão apontados na mesma seção acima citada.

O programa para computador desenvolvido permite a introdução dos valores característicos dos engastamentos parciais em cada nó, os quais são usados para cálculo dos esforços e deslocamentos do mesmo e, através destes, os esforços e deslocamentos em cada barra.

3.2.3) A Barra Bi-engastada Parcialmente

Diz-se que uma barra engasta-se perfeitamente em um determinado apoio quando se consegue anular a inclinação de sua elástica referida a este apoio, ou seja, seu giro neste ponto é zero. Na prática, a consideração de tal situação nem sempre é real, visto que todos os materiais são elásticos.

Também se pode dizer que uma barra se conecta a um apoio articulado quando o giro de sua elástica referida a este ponto é livre, ou seja, o apoio oferece à barra uma rigidez nula quanto à absorção de momentos fletores. Esta situação, na prática, pode ser encontrada mais facilmente, quer seja em nós de treliças de madeira ou vigas biapoiadas de madeira ou aço.

O engastamento parcial dá-se quando nos deparamos com uma situação intermediária entre os dois casos acima descritos, ou seja, o apoio oferece à barra, no ponto conectado, certa rigidez que não é a de engastamento perfeito, possibilitando que esta gire de uma quantidade angular proporcional ao momento aplicado.

Na prática, podemos dizer que a grande maioria das conexões entre barras e nós são parcialmente engastadas, isto é, toda ligação de certa forma engasta.

Segundo Merritt [9], embora não existam parâmetros desta rigidez relativa, acredita-se que uma articulação possa engastar, na verdade, em até 20%; na ligação assumida como de engastamento perfeito este valor pode variar entre 90 e 100% e em conexões com engastamento parcial este pode estar entre 15 e 90%. A exatidão destas porcentagens depende de análise experimental.

No caso dos conectores metálicos dentados, objeto desta pesquisa, análises experimentais demonstraram que os coeficientes de engastamento parcial residiram entre 11 e 78%, de acordo com seus tamanhos e posições na ligação da barra em balanço, conforme a fig. 3.4

3.2.4) O CEP-Coeficiente de Engastamento Parcial

Para caracterizar a quantidade parcial de engastamento nas ligações ensaiadas em Laboratório, conforme descrito na seção 4.3.2, definimos um Coeficiente de Engastamento Parcial c , que representa a porcentagem de engastamento que uma ligação oferece à uma barra em balanço submetida a uma carga concentrada na borda livre.

Assim, para um engastamento perfeito 100/100, teremos $c = 1$. Para a situação de articulação, com engastamento zero, o coeficiente de engastamento parcial seria 0/100, ou seja, $c = \text{zero}$. Para engastamentos parciais deduz-se que o coeficiente c estaria situado entre zero e 1.

O valor do coeficiente c de cada conector ensaiado foi deduzido colhendo-se medidas das flechas de barras em balanço, engastadas parcialmente.

Como mostra a Fig. 3.4 a seguir, mediu-se o valor da flecha causada por uma força P aplicada em uma barra de madeira, em balanço, engastada parcialmente através de um conector metálico dentado:

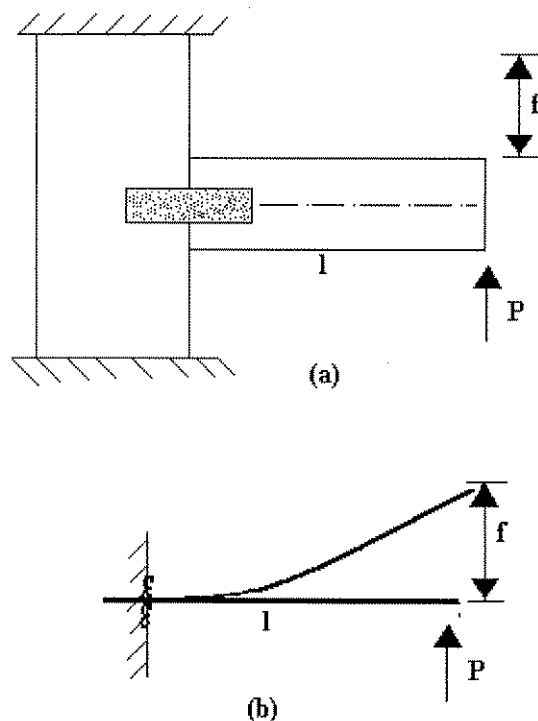


Fig. 3.4 - Esquema do ensaio para obtenção do coeficiente de engastamento parcial.

Se o engastamento fosse perfeito, a flecha f , desprezando-se a cortante, valeria:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (3.1)$$

Para um engastamento elástico podemos escrever:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI.c} \quad (3.2)$$

Ensaando cada modelo de conector, da maneira especificada mais detalhadamente na seção 4.3.2, obteve-se para cada modelo, através de regressão linear, uma reta representativa da carga P versus flecha f . Assim, podemos representar esta reta por:

$$P = a + (b.f) \quad (3.3)$$

Considerando-se que tal reta passa pela origem, "a" terá valor nulo, resultando:

$$P = b . f \quad (3.4)$$

Como,

$$P = \frac{3EI.c}{l^3} . f \quad (3.5)$$

tem-se que,

$$b = \frac{3EI.c}{l^3} \quad (3.6)$$

Logo:

$$c = \frac{l^3 \cdot b}{3EI} \quad (3.7)$$

Dessa maneira, para cada modelo de conector metálico dentado ensaiado calculou-se seu coeficiente de engastamento elástico c . A introdução do c no Programa para cálculo de Pórticos-Treliça, entretanto, deverá ser feita através do coeficiente de rigidez de mola, que representa o momento por unidade de rotação, na ligação, o qual será quantificado por uma “constante de mola” k .

No ensaio da barra engastada elasticamente, a flecha final será a soma de uma parcela de vida à deformação elástica da barra e outra parcela devida à rotação da mola:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI} + \Theta l = \frac{Pl^3}{3EI} + \frac{Pl^2}{k} \quad (3.8)$$

Donde tiramos que:

$$P = \frac{3EI k}{kl^3 + 3EI l^2} \times f \quad (3.9)$$

Usando as equações (3.7) e (3.9) podemos reescrever (3.6) chegando a:

$$b = \frac{3EI k}{kl^3 + 3EI l^2} \quad (3.10)$$

Através dos ensaios extraímos, então:

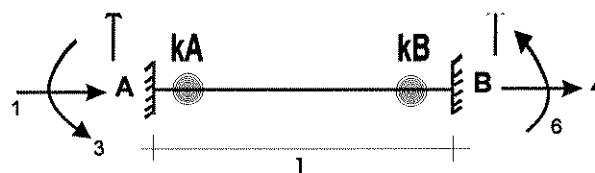
$$k = \frac{l^2 \times b}{1 - c} \quad (3.11)$$

Na oportunidade em que um determinado conector for utilizado numa ligação de barras de Pórtico-Treliça, o k relativo a este conector deve ser incorporado às Matrizes de Rigidez das barras, que concorrem

naquela ligação, proporcionalmente à área do conector que estiver pregada em cada barra.

3.2.5) A Matriz de Rigidez de uma Barra Bi-Engastada Parcialmente

Admite-se que a barra é ligada elasticamente aos nós de extremidade. Estas ligações podem ser idealizadas por “molas” de constantes elásticas k_A e k_B . As coordenadas do sistema local de referência são numeradas de 1 a 6.



Na prática, as ligações elásticas da barra aos nós são feitas pelas chapas “gang-nail” objeto deste estudo.

As constantes elásticas k dependem das dimensões das chapas dentadas e serão determinadas através de ensaio em laboratório.

A matriz de rigidez $[SM]$ da barra AB, de ordem 6×6 , pode ser desmembrada em 4 submatrizes conforme ilustrado abaixo:

$$[SM] = \begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} \\ S_{BA} & S_{BB} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

A matriz $[SM]$ será determinada numericamente com a seguinte estratégia:

- Calcula-se a matriz de flexibilidade $[F_{AA}]$, de ordem 3×3 , de uma barra em balanço com a extremidade B engastada e a extremidade A livre.
- Determina-se a submatriz de rigidez $[S_{AA}]$ de ordem 3×3 , da barra bi-engastada elasticamente AB, relativamente as coordenadas 1,2 e 3 por inversão da matriz $[F_{AA}]$.
- Determina-se a submatriz de rigidez $[S_{BA}]$, de ordem 3×3 , por considerações de equilíbrio.

- d) Determina-se a submatriz de rigidez $[S_{AB}]$, de ordem 3×3 , por considerações de simetria
- e) Determina-se finalmente a submatriz $[S_{BB}]$ de ordem 3×3 , por considerações de equilíbrio.

3.2.5.1) Matriz de Equilíbrio $[T]$

Uma vez conhecida 3 ações concentradas aplicadas na extremidade A de uma barra, as ações na extremidade B que equilibram aquelas aplicadas em A valem:

$$A_4 = -A_1 \quad (3.12)$$

$$A_5 = -A_2 \quad (3.13)$$

$$A_6 = +A_2 \times l - A_3 \quad (3.14)$$

Colocando em forma matricial tem-se:

$$\begin{Bmatrix} A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & +l & -1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

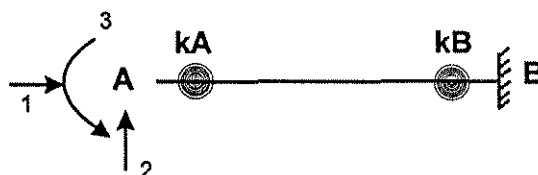
Pode-se chamar a matriz da expressão acima de $[T]$. Essa matriz será chamada neste trabalho de matriz de equilíbrio.

$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & +l & -1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Deste modo, as reações na extremidade B devidas às ações aplicadas em A, podem ser calculadas conforme (3.15), ou seja:

$$\begin{Bmatrix} A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{Bmatrix} = [T] \times \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

3.2.5.2) Matriz de Flexibilidade $[F_{AA}]$ de uma viga em balanço com extremidade B engastada elasticamente.



A matriz de flexibilidade $[F_{AA}]$, de ordem (3X3), relativa “as coordenada locais 1,2 e 3 numa viga em balanço engastada em B tem o seguinte aspecto:

$$[F_{AA}] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

temos:

$$F_{12} = F_{13} = F_{21} = F_{31} = 0 \quad (3.19)$$

$$F_{11} = \frac{l}{EA} \quad (3.20)$$

$$F_{22} = \frac{l^3}{3EI} + \frac{l^2}{k_B} \quad (3.21)$$

$$F_{23} = F_{32} = -\frac{l^2}{2EI} - \frac{l}{k_B} \quad (3.22)$$

$$F_{33} = \frac{l}{EI} + \frac{1}{k_A} + \frac{1}{k_B} \quad (3.23)$$

onde :
 E = módulo de elasticidade
 I = momento de inércia
 A = área da seção transversal
 k_A e k_B = constantes de mola

3.2.5.3) Submatriz de rigidez $[S_{AA}]$ de uma barra AB, relativamente às coordenadas 1, 2 e 3:

A submatriz $[S_{AA}]$ é a inversa de $[F_{AA}]$:

$$[S_{AA}] = [F_{AA}]^{-1} \quad (3.24)$$

3.2.5.4) Submatriz de rigidez $[S_{BA}]$:

Por considerações de equilíbrio tem-se que:

$$[S_{BA}] = [T] \cdot [S_{AA}] \quad (3.25)$$

onde : $[T]$ = matriz de equilíbrio calculada por (3.18)

3.2.5.5) Submatriz de rigidez $[S_{AB}]$

Por considerações de simetria é sabido que:

$$[S_{AB}] = [S_{BA}]^t \quad (3.26)$$

$$[S_{AB}] = ([T] \cdot [S_{AA}])^t \quad (3.27)$$

$$[S_{AB}] = [S_{AA}] \cdot [T]^t \quad (3.28)$$

3.2.5.6) Submatriz $[S_{BB}]$

Novamente por considerações de equilíbrio tem-se que:

$$[S_{BB}] = [T] \cdot [S_{AB}] \quad (3.29)$$

$$[S_{BB}] = [T] \cdot [S_{AA}] \cdot [T]^t \quad (3.30)$$

Uma vez encontradas as 4 submatrizes $[S_{AA}]$, $[S_{AB}]$, $[S_{BA}]$ e $[S_{BB}]$ tem-se calculados numericamente os 36 coeficientes da matriz de rigidez $[SM]$ da barra bi-engastada elasticamente em relação ao sistema local de referência local.

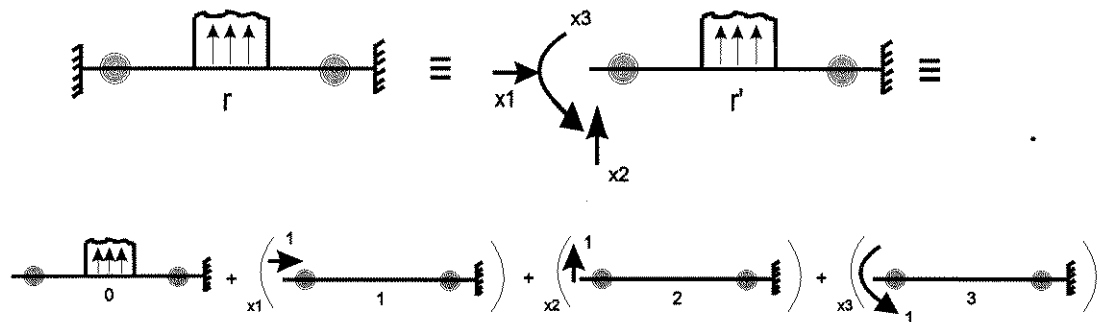
É importante salientar que foram feitos vários testes numéricos com a matriz de rigidez obtida para a barra bi-engastada elasticamente.

Na passagem ao limite do valor dos coeficientes de mola tendendo a infinito em ambas as extremidades, obtém-se exatamente a matriz de rigidez clássica da barra bi-engastada perfeitamente. Na passagem ao limite do coeficiente de mola na extremidade A tendendo a zero e do coeficiente de mola na extremidade B tendendo a infinito, por exemplo,

obtém-se, dentro da precisão numérica do computador, a matriz exata de uma barra articulada-engastada.

3.2.6) Ações de Engastamento Elástico numa barra bi-engastada elasticamente em relação ao sistema local de referência.

O problema da determinação das ações de engastamento elástico nas extremidades de uma barra AB pode ser resolvido pelo processo dos esforços, tomando como estrutura isostática fundamental a viga em balanço com a extremidade esquerda livre e a extremidade direita engastada.



Os deslocamentos na extremidade livre da viga em balanço devido ao carregamento aplicado (problema (0)), serão denotados Δ_{10} , Δ_{20} e Δ_{30} .

Os deslocamentos na extremidade livre da viga em balanço devido ao carregamentos unitários (problema(1), problema(2) e problema(3)) são os coeficientes de flexibilidade que formam a matriz de flexibilidade $[F_{AA}]$ da viga em balanço, já mostrada anteriormente na equação (3.18):

Fazendo a compatibilização dos deslocamentos na direção das incógnitas hiperestáticas tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \Delta_{10} \\ \Delta_{20} \\ \Delta_{30} \end{Bmatrix} + [F] \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

A expressão acima representa um sistema linear de equações nas incógnitas x_1 , x_2 e x_3 , que pode ser facilmente resolvido fornecendo os valores dos engastamentos elásticos na extremidade A da barra bi-engastada AB.

Os valores das ações de engastamento elástico na extremidade direita podem ser determinados por equilíbrio, à partir das ações da extremidade esquerda e das reações isostáticas do carregamento.

$$\begin{Bmatrix} x4 \\ x5 \\ x6 \end{Bmatrix} = [T] \times \begin{Bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R4 \\ R5 \\ R6 \end{Bmatrix} \quad (3.32)$$

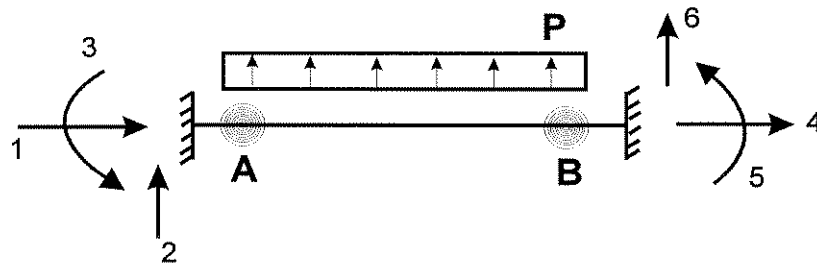
onde :

[T] = matriz de equilíbrio dada pela expressão (3.16).

R4, R5 e R6 = reações de apoio em B na viga em balanço devido ao carregamento aplicado ao longo da barra.

Os valores de $x1, x2 \dots x6$ formam o vetor das ações de engastamento elástico devido ao carregamento aplicado na barra bi-engastada elasticamente AB.

3.2.6.1) Ações de engastamento elástico devidas a uma carga p uniformemente distribuída sobre toda a barra AB.



Para este tipo de carregamento temos:

$$\Delta 10 = 0 \quad (3.33)$$

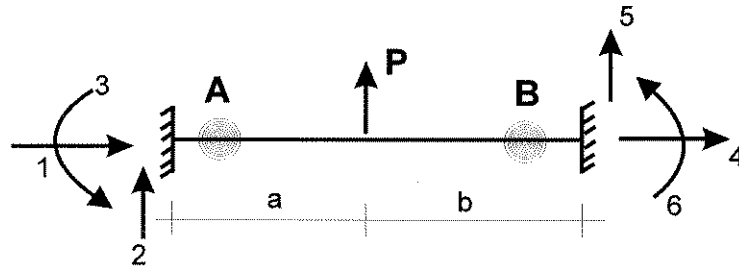
$$\Delta 20 = \frac{pl^4}{8EI} + \frac{pl^3}{2kB} \quad (3.34)$$

$$\Delta 30 = \frac{ql^3}{6EI} + \frac{pl^3}{2kB} \quad (3.35)$$

Com esses valores, e através da expressão (3.31) deduz-se facilmente x_1 , x_2 e x_3 . Para deduzir-se x_4 , x_5 e x_6 , usando a expressão similar a (3.32), temos:

$$\begin{Bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -pl \\ \frac{pl^2}{2} \end{Bmatrix} \quad (3.36)$$

3.2.6.2) Ações de engastamento elástico devidas a uma carga concentrada P.



Para este argumento temos que:

$$\Delta 10 = 0 \quad (3.37)$$

$$\Delta 20_A = \frac{Pb^2}{6EI}(3l-b) + \frac{Pbl}{kB} \quad (3.38)$$

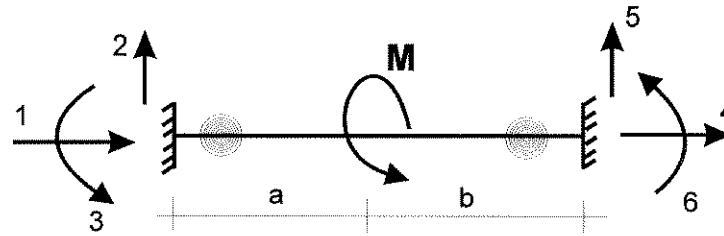
$$\Delta 30_A = \frac{Pb^2}{2EI} + \frac{Pb}{kB} \quad (3.39)$$

Com esses valores e através da expressão (3.31) deduz-se facilmente x_1 , x_2 e x_3 .

Para encontrar-se x_4 , x_5 e x_6 , usando a expressão (3.32), temos:

$$\begin{Bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -P \\ Pb \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

3.2.6.3) Ações de engastamento elástico devidas a um momento concentrado.



Para esse tipo de carregamento temos:

$$\Delta 10 = 0 \quad (3.41)$$

$$\Delta 20 = -\frac{b}{2EI} \times M(a+l) - \frac{Ml}{kB} \quad (3.42)$$

$$\Delta 30 = \frac{b}{EI} \times M + \frac{M}{kB} \quad (3.43)$$

Com esses valores, e através da expressão (3.31) deduz-se facilmente \$x_1\$, \$x_2\$ e \$x_3\$.

Para encontrar \$x_4\$, \$x_5\$ e \$x_6\$, usando a expressão (3.32), temos:

$$\begin{Bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -M \end{Bmatrix} \quad (3.44)$$

3.2.7) Proposta de um pórtico-treliça como elemento estrutural de cobertura pró conforto térmico.

Além do estudo do engastamento parcial das ligações num Pórtico-Treliça, objetivou-se que esta estrutura auxiliasse, como elemento de cobertura de uma edificação, no seu conforto térmico.

Visto que na seção 3.1.4 pesquisou-se o tamanho de abertura mais favorável para um lanternim assimétrico, propõe-se uma geometria de Pórtico-Treliça com a seguinte configuração:

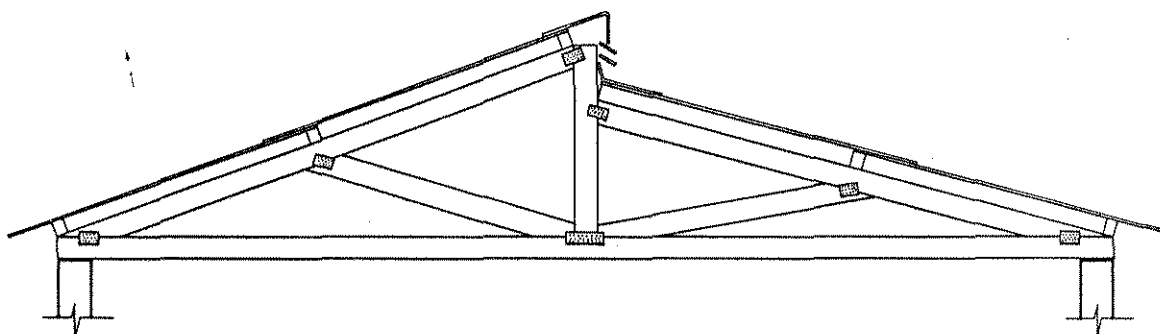


Fig. 3.6 - Pórtico-Treliça proposto.

Neste modelo, nota-se que a descontinuidade no banzo superior do Pórtico-Treliça, na altura da cumeeira, possibilita um incremento da ventilação natural e consequente aumento do conforto térmico.

Note-se a disposição das peças de fibrocimento, que dão concordância e acabamento nos arremates das cumeeiras "superior" e "inferior".

Um modelo parecido ao da Fig. 3.6 já é de conhecimento antigo, conforme ilustra o desenho :

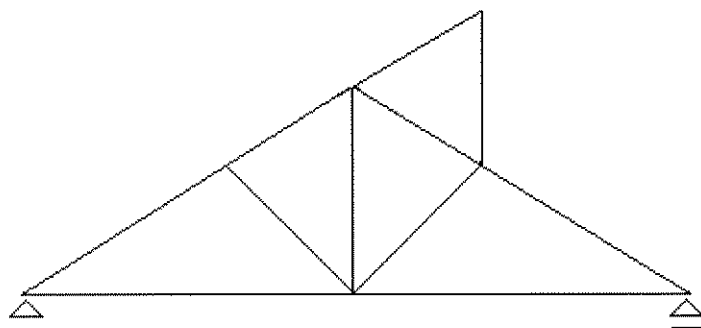


Fig. 3.7 - Treliça habitual com lanternim.

Entretanto, é evidente a maior facilidade construtiva do Pórtico-Treliça em relação ao modelo tradicional. Isto sem contar com a economia de material, dado sempre importante nas avaliações de custos.

3.2.8) O Programa ENGNAIL

O programa ENGNAIL foi desenvolvido especialmente para resolução de Pórticos-Treliça. Isto equivale dizer que ele tanto pode ser aplicado na resolução de pórticos planos quanto na resolução de treliças planas, ambos com diferentes graus de engastamento nas ligações- engastamento parcial- como já foi abordado na seção 3.2.4.

O programa foi elaborado na linguagem Pascal baseado no processo dos Deslocamentos em sua forma matricial para o equacionamento.

Os resultados são : Ações Axiais, Transversais e Momento Fletor em cada extremidade de barra , reações e deslocamentos em cada nó.

A listagem completa do ENGNAIL encontra-se no Apêndice.

Em cada barra deve ser fornecido o coeficiente de rigidez elástica das chapas de ligações existentes em sua extremidade. No caso de nó articulado, o coeficiente de mola é zero e no caso de barra ligada rigidamente o coeficiente de mola é infinito. No programa o valor $k = 0$ deve ser substituído por um valor muito pequeno, $k=10E-06$, e o valor $k=\infty$ deve ser representado por um valor grande, $k=10E+15$.

4- EXPERIMENTAÇÃO

4.1) MATERIAIS UTILIZADOS EM ENSAIOS DE LIGAÇÕES PARCIALMENTE ENGASTADAS DE MADEIRA

4.1.1) A Madeira

A madeira utilizada na experimentação de ligações parcialmente engastadas foi o ANGICO-PRETO (*Anadenanthera macrocarpa*).

A peças utilizadas nos ensaios, que estão descritos na seção 4.3.2, foram adquiridas na cidade de Itatiba-SP, e a sua procedência é do município de Ponta Porã no Mato Grosso do Sul, conforme atesta a nota fiscal exibida pelo distribuidor.

De acordo com o IPT [7] o ANGICO-PRETO é uma madeira muito pesada, com cerne castanho amarelado quando recém-cortado, passando a castanho-avermelhado, escurecendo para vermelho-queimado; apresenta abundantes veios ou manchas arroxeadas que são mais destacadas quando a madeira é recém-cortada; textura média; grã irregular a revessa; superfície pouco lustrosa e irregularmente áspera; cheiro imperceptível; gosto ligeiramente adstringente.

Ainda de acordo com o IPT, as propriedades físicas e mecânicas de amostras de ANGICO-PRETO ensaiadas em seus laboratórios são :

- Massa específica aparente (a 15% de umidade) : 1,05 g/cm³
- Limite de resistência à compressão axial : 8,86 kN/cm²
- Módulo de elasticidade à compressão axial : 2.071 kN/cm²
- Limite de resistência à flexão estática : 18,9 kN/cm²
- Módulo de elasticidade à flexão estática : 1.668 kN/cm²
- Limite de resistência ao cisalhamento : 1,98 kN/cm²
- Dureza Janka : 11,75 kN
- Tração normal às fibras : 1,39 kN/cm²
- Fendilhamento : 0,15 kN/cm²

Os resultados dos ensaios efetuados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, com amostras de ANGICO-PRETO que foram utilizadas para utilização nesta pesquisa, estão demonstrados na seção 4.4.2.

4.1.2) Os Conectores Metálicos Dentados

Na pesquisa sobre ligações de madeira parcialmente engastadas foram utilizados conectores metálicos dentados gentilmente cedidos pela Gang-Nail do Brasil Ind. e Com. Ltda.

De acordo com boletim técnico do fabricante as características mecânicas do produto são :

- Aço de acordo com os requisitos da ASTM A 446-72 grau C
- Tensão admissível à tração : 14 kN/cm²
- Tensão de cisalhamento admissível : 9,84 kN/cm²
- Limite de fluência : 23,2 kN/cm²
- Elongação em 5 cm : 20% (mínimo)
- Resistência à ruptura : 31,54 kN/cm²
- Tração longitudinal : 2,05 kN/cm de largura do conector
- Tração transversal : 0,95 kN/cm de comprimento do conector
- Cisalhamento longitudinal : 0,80 kN/cm da largura do conector
- Cisalhamento transversal : 1,70 kN/cm de comprimento do conector
- Número de dentes no conector : 1,5/cm²
- Peso do conector : 1,05 g/cm²
- Espessura do conector: 1,2 mm

Os tamanhos padrões de conectores, em centímetros, são:

TABELA 1 : Tamanho de conectores (cm)

3,6 x 6,0	7,1 x 7,9	10,7 x 11,9	14,2 x 15,9
3,6 x 7,9	7,1 x 9,9	10,7 x 13,9	14,2 x 19,8
3,6 x 9,9	7,1 x 11,9	10,7 x 15,9	14,2 x 23,8
3,6 x 11,9	7,1 x 13,9	10,7 x 17,9	14,2 x 31,7
3,6 x 13,9	7,1 x 15,9	10,7 x 19,8	14,2 x 39,7
3,6 x 17,9	7,1 x 17,9	10,7 x 23,8	14,2 x 121,0
3,6 x 121,0	7,1 x 19,8	10,7 x 29,8	
	7,1 x 25,8	10,7 x 31,7	
	7,1 x 31,7	10,7 x 39,7	
	7,1 x 121,0	10,7 x 121,0	

Embora os tamanhos de conectores normalmente utilizados comercialmente estejam resumidos na TABELA 1 , pode-se solicitar qualquer outra medida no comprimento. As larguras , entretanto, seguem as medidas fixas : 3,6 , 7,1 , 10,7 e 14,2 cm.

Os conectores têm resistência à corrosão segundo os requerimentos da ASTM A 525 G 90, com galvanização em imersão quente no valor de 305 g/m² de zincagem. Recomenda-se uma proteção mais intensa contra a ferrugem apenas em ambientes com possibilidade de ataques químicos.

A seguir, o desenho e a foto ilustram os dados já discriminados.

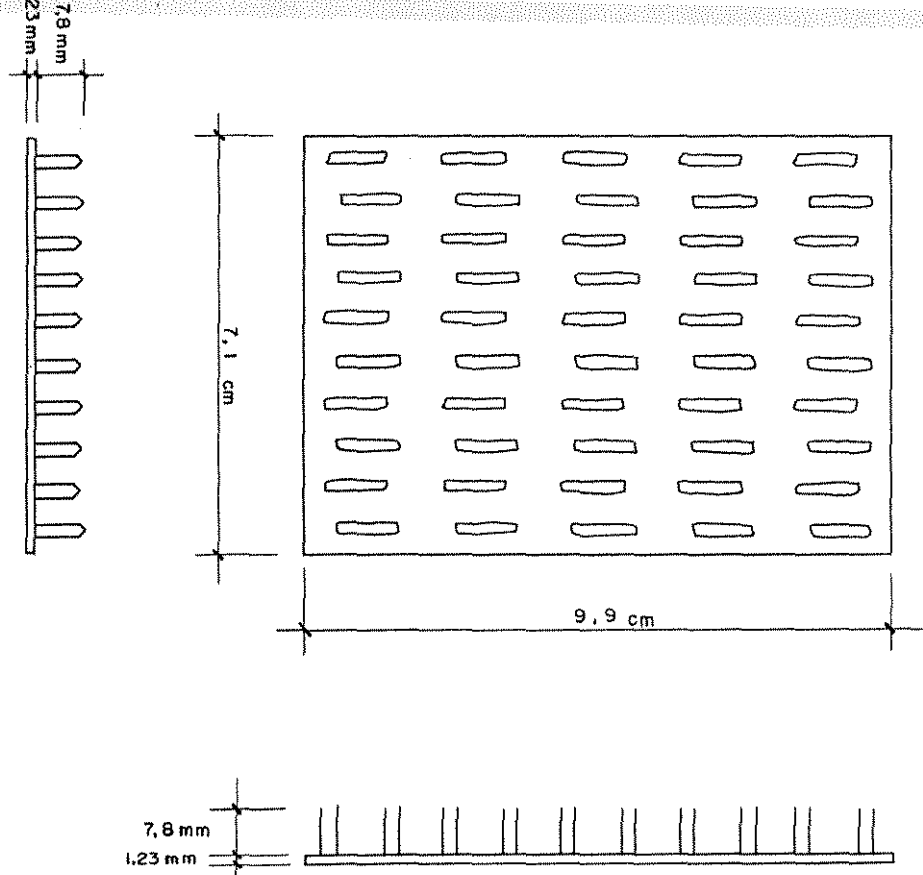


Fig. 4.1 - Detalhe do conector metálico dentado.

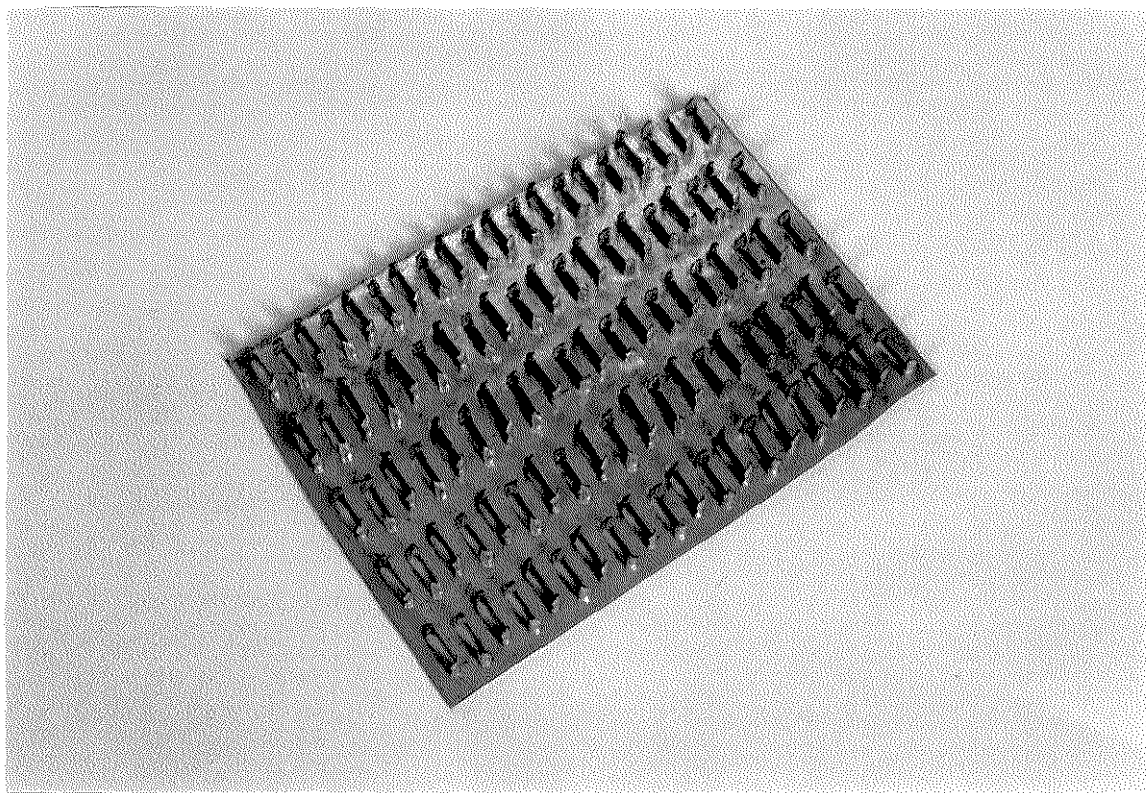


Foto 4.1 - O conector metálico dentado.

4.2) EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.2.1) Equipamentos de Carga e Leitura Usados na Pesquisa de Ligações Parcialmente Engastadas

Os equipamentos de carga e leitura que foram utilizados na pesquisa de ligações parcialmente engastadas descrita na seção 4.4.2, foram :

- 1 Prensa de 40 Toneladas VEB
- 1 Macaco Bestetti de 2 Toneladas
- 1 Ponte Wheatstone
- 1 Célula de Carga para 2 Toneladas
- 4 Relógios comparadores

4.2.2) Equipamentos de Leitura Usados na Pesquisa sobre eficiência de Lanternins assimétricos

Os equipamentos de leitura utilizados na pesquisa sobre eficiência de Lanternins assimétricos, conforme descrição de resultados na seção 4.4.1, foram:

- 3 Termômetros de bulbo seco
- 3 Termômetros de bulbo úmido
- 3 Termômetros de globo negro
- 3 Termômetros de temperatura máxima
- 3 Termômetros de temperatura mínima
- 1 Anemômetro marca R.Fuess

4.3) DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.3.1) Pesquisa Experimental sobre Eficiência de Lanternins Assimétricos quanto ao Conforto Térmico

Conforme já foi apresentado na seção 3.1.4, desenvolveu-se na cidade de Itatiba-SP uma pesquisa experimental sobre o grau de eficiência de lanternins assimétricos em cobertura de telhas fibrocimento.

Este grau de eficiência pode ser determinado através da utilização de três protótipos de um galpão industrial construídos em escala reduzida, com paredes de alvenaria e cobertura de telhas de fibrocimento.

No interior de cada protótipo instalou-se um termômetro de cada tipo especificado na seção 4.2.2 e, externamente, entre os três protótipos, instalou-se um anemômetro para registro das velocidades do vento.

Colheu-se as temperaturas diariamente durante o verão de 1.994. Os horários de tomada eram 08h00, 11h00, 14h00 e 17h00. Exceções foram feitas nos dias de chuva.

Após o término desta fase, procedeu-se o cálculo dos dias de maior entalpia. A entalpia traduz a medida do calor total de determinada situação de ambiente. Assim,

$$H = U + p.v \quad (4.1)$$

onde:

H = entalpia
U = energia
p = pressão
v = volume

Escolhidos os dias de maior entalpia, procedeu-se ao cálculo do índice de conforto térmico Itgu para cada um dos três protótipos, para cada horário, em cada dia.

Define-se o índice Itgu como :

$$\text{Itgu} = \frac{H}{U + p.v}$$

$$Itgu = Tgn + 0,36 Tpo - 330,08 \quad (4.2)$$

onde:

Itgu = Índice de conforto térmico de Temperatura do Globo e Umidade

Tgn = Temperatura do Globo Negro (°K)

Tpo = Temperatura do Ponto de Orvalho (°K)

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão demonstrados na seção 4.4.1, com os devidos comentários e conclusões.

A foto 4.2 ilustra, em plano geral, os protótipos construídos.



Foto 4.2 - Vista dos protótipos.

4.3.2) Ensaios de Ligações Parcialmente Engastadas

Na seção 3.2.4 já foi explicitado o conceito dos Coeficientes de Rigidez em Ligações. Sua origem, no caso de Pórticos-Treliça de madeira, está na absorção parcial de momentos fletores em ligações entre as barras via conector metálico dentado.

Desta maneira, compreende-se que cada tamanho de conector produzirá um k característico, e além disto, dependendo de sua posição na ligação, aquele proporcionará às extremidades das barras que liga, um engaste parcial.

Os ensaios com todos os tamanhos comerciais de conectores dentados já especificados na seção 4.1.2 vieram trazer os resultados que poderão ser utilizados no cálculo e dimensionamento de Pórticos-Treliça de madeira.

Tais ensaios consistiram em verificar as flechas provocadas por cargas concentradas na extremidade de uma viga de madeira em balanço, ligada, através de um conector metálico dentado, a um pilar de madeira engastado numa prensa hidráulica.

Uma vez constatadas as flechas (decorrentes de uma ligação com engastamento parcial), construiu-se para cada tamanho de conector um gráfico CARREGAMENTO x FLECHA.

Em função deste gráfico, colheu-se para cada tamanho o coeficiente b já mencionado na seção 3.2.4 e, assim, através da equação (3.7) chegou-se ao valor do c de cada conector.

O ensaio, repetido para todos os tamanhos de conector, resumiu-se em:

a) ligação de uma viga de madeira de comprimento igual a 100 cm com espessura de 4 cm e altura igual à do conector a um pilar de madeira também com espessura de 4 cm e largura variável entre 12 e 20 cm através da pregagem de um conector metálico dentado em cada lado, formando um "T";

b) posicionamento dos conectores no centro geométrico da ligação;

c) engastamento do "T" numa prensa hidráulica de 40t. posicionando-se verticalmente a peça mais resistente, ou seja o pilar, e horizontalmente a viga, que, desta maneira ficará em balanço;

d) instalação de um macaco hidráulico exatamente sob a extremidade livre da viga, apoiado sobre um suporte de concreto que, por sua vez, apoiar-se-á sobre o solo;

e) entre o macaco e a viga instalação de uma célula de carga para leitura do carregamento;

f) sobre a viga e igualmente engastada na prensa hidráulica instalação de uma barra de cantoneira metálica de 2"x 3/16" para fixação de relógios de leitura;

g) instalação de um relógio na extremidade livre da viga para leitura das flechas e outro na metade da parte do conector pregada à viga para leitura e cálculo de rotações na ligação;

h) aplicação, através do macaco hidráulico, de cargas, no sentido de baixo para cima, na extremidade livre da viga, colhendo os valores das respectivas flechas;

Depois de todo este processo construiu-se os gráficos já mencionados anteriormente, cujos resultados acham-se na seção 4.4.2.

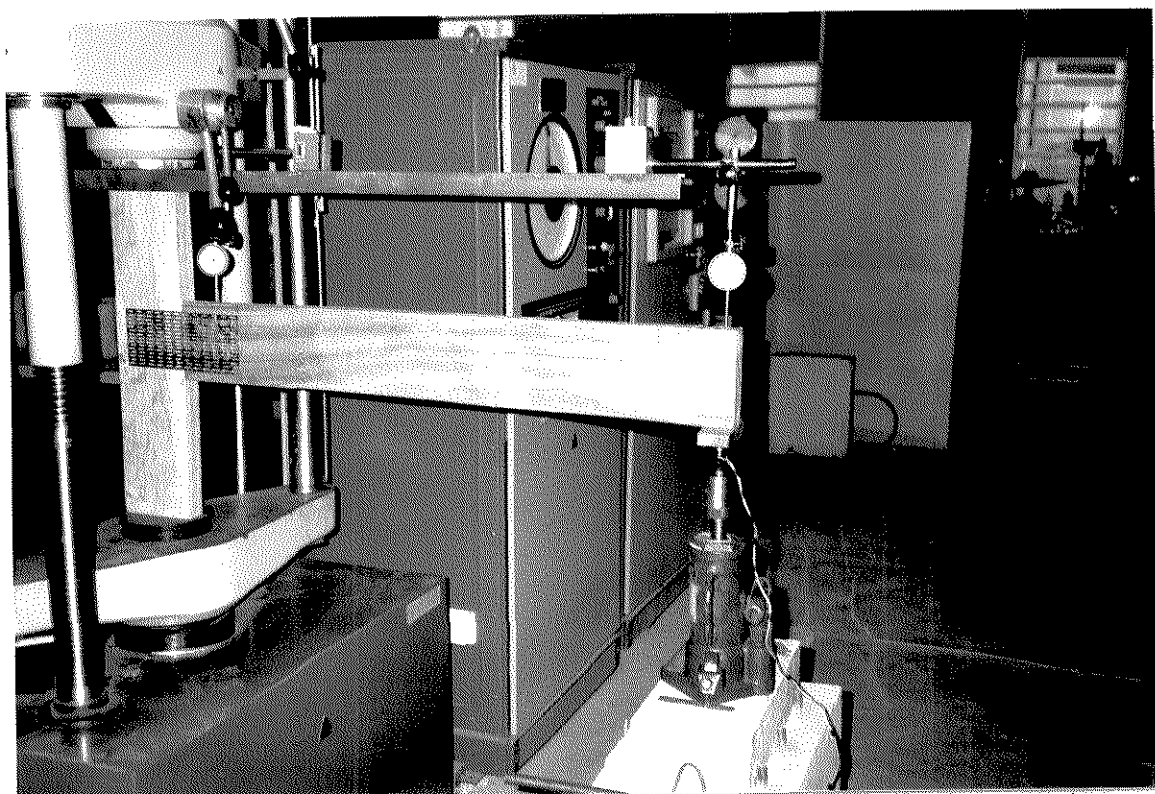


Foto 4.3 - Ensaio para obtenção da Constante de mola (c) de cada tamanho de conector.

4.4 - RESULTADOS OBTIDOS E SUAS ANÁLISES

4.4.1) Eficiência de Lanternins Assimétricos

Conforme já explicado na seção 4.3.1. os resultados das entalpias e dos ITGUs referentes à pesquisa sobre conforto térmico foram :

Verão/94 (21/12 a 21/3)

DIA	ENTALPIA
18/3	91,387
17/3	88,224
10/3	87,609
25/3	86,238
30/3	85,368
23/3	84,928
16/3	84,457
29/3	83,904

Valores de Itgu

18/3 $T_{po} = 297,2^{\circ} K$

	1	2	3
08h00	72,062	72,062	72,062
11h00	81,062	81,062	80,062
14h00	82,562	82,062	80,562
17h00	80,562	79,562	79,562

17/3 $T_{po} = 296,10^{\circ} K$

	1	2	3
08h00	70,666	70,666	70,666
11h00	80,166	79,660	70,666
14h00	83,666	82,666	82,166
17h00	82,166	81,166	80,666

10/3 $T_{po} = 296^{\circ} \text{ K}$

	1	2	3
08h00	71,13	70,63	70,63
11h00	76,63	76,63	76,63
14h00	83,630	82,630	81,130
17h00	77,63	77,63	77,63

25/3 $T_{po} = 295,69^{\circ} \text{ K}$

	1	2	3
08h00	71,518	71,518	71,518
11h00	79,518	79,518	79,518
14h00	81,018	79,518	79,018
17h00	78,018	77,518	77,518

30/3 $T_{po} = 295,41^{\circ} \text{ K}$

	1	2	3
08h00	67,917	67,917	67,917
11h00	79,917	79,417	78,917
14h00	83,417	82,417	81,417
17h00	81,417	80,417	80,417

23/3 $T_{po} = 295,59^{\circ} \text{ K}$

	1	2	3
08h00	70,482	70,482	70,482

11h00	77,982	77,982	76,482
14h00	79,482	78,482	77,482
17h00	78,982	78,482	78,482

16/3 T_{po} = 294,95 ° K

	1	2	3
08h00	70,252	70,752	70,752
11h00	77,752	77,752	77,252
14h00	82,252	81,252	80,252
17h00	80,252	79,252	79,252

29/3 T_{po} = 295,01 ° K

	1	2	3
08h00	67,773	68,273	68,273
11h00	79,273	78,773	78,273
14h00	83,343	82,343	81,843
17h00	80,773	78,773	78,773

Análise Estatística dos Dados

	1	2	3
1	82,562	82,062	80,562
2	83,666	82,666	82,166
3	83,630	82,630	81,130
4	81,018	79,518	79,018
5	83,417	82,417	81,417
6	79,482	78,482	77,482
7	82,252	81,252	80,252
8	83,343	82,343	81,843
X	82,421	81,421	80,483
s	1,488	1,583	1,566

Comparando 1 e 3

$$sp = \sqrt{\frac{(7 \times 1,488^2) + (7 \times 1,566^2)}{14}} = 1,527$$

$$t = \frac{1,938}{(1,527)\sqrt{0,25}} = 2,538 > |t| = 2,145$$

Comparando 1 e 2

$$sp = \sqrt{\frac{(7 \times 1,488^2) + 7(1,583^2)}{14}} = 1,536$$

$$t = \frac{1}{1,536\sqrt{0,25}} = 1,30 < |t| = 2,145$$

Comparando 2 e 3

$$sp = \sqrt{\frac{(7 \times 1,583^2) + 7(1,566^2)}{14}} = 1,574$$

$$t = \frac{0,938}{1,574\sqrt{0,25}} = 1,19 < |t| = 2,145$$

Checando s

$$s1 = 1,488$$

$$s_2 = 1,566$$

$$\frac{1,566^2}{1,488^2} = 1,1076 < F_{0,05} = 3,79$$

Não há diferença significativa, portanto vale o método usado para comparações.

Como pode-se observar, o modelo 3 (abertura de 50 cm) foi o mais eficiente entre os protótipos ensaiados.

4.4.2) Ligações Parcialmente Engastadas.

4.4.2.1) ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA UTILIZADA

De acordo com as recomendações do MB-26 procedeu-se a secagem de dois corpos de prova da madeira ANGICO-PRETO, utilizada no presente trabalho, para obtenção do seu teor de umidade.

As dimensões dos corpos de prova eram 3,7 x 7,0 x 6,7 cm.

Como resultados deste ensaio temos :

Corpo de prova I	10,56% de umidade
Corpo de prova II	11,09% de umidade

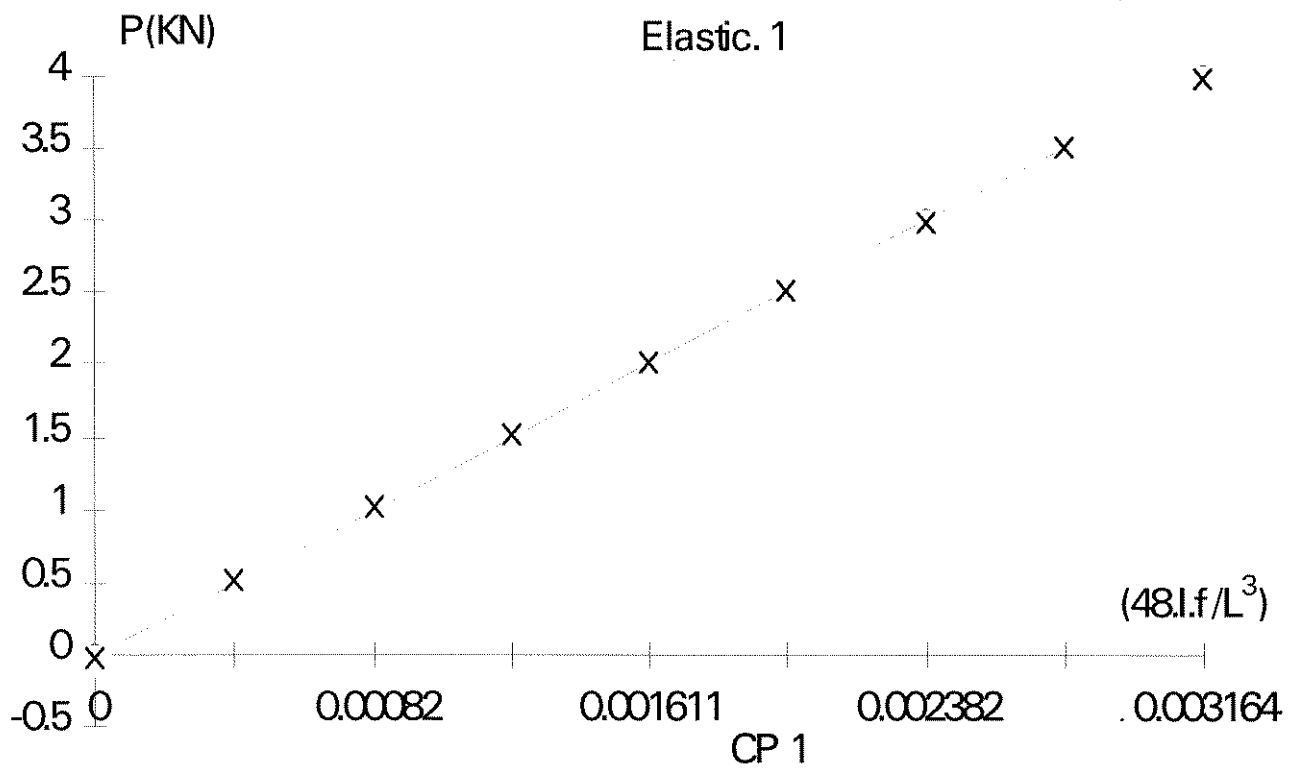
4.4.2.2) ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO ANGICO-PRETO

Usando três amostras de ANGICO-PRETO de dimensões 100 x 14,2 x 4,1 cm, utilizadas posteriormente nos ensaios para obtenção do CEP dos conectores metálicos dentados, procedeu-se aos ensaios que visaram a determinação do Módulo de Elasticidade à Flexão desta madeira.

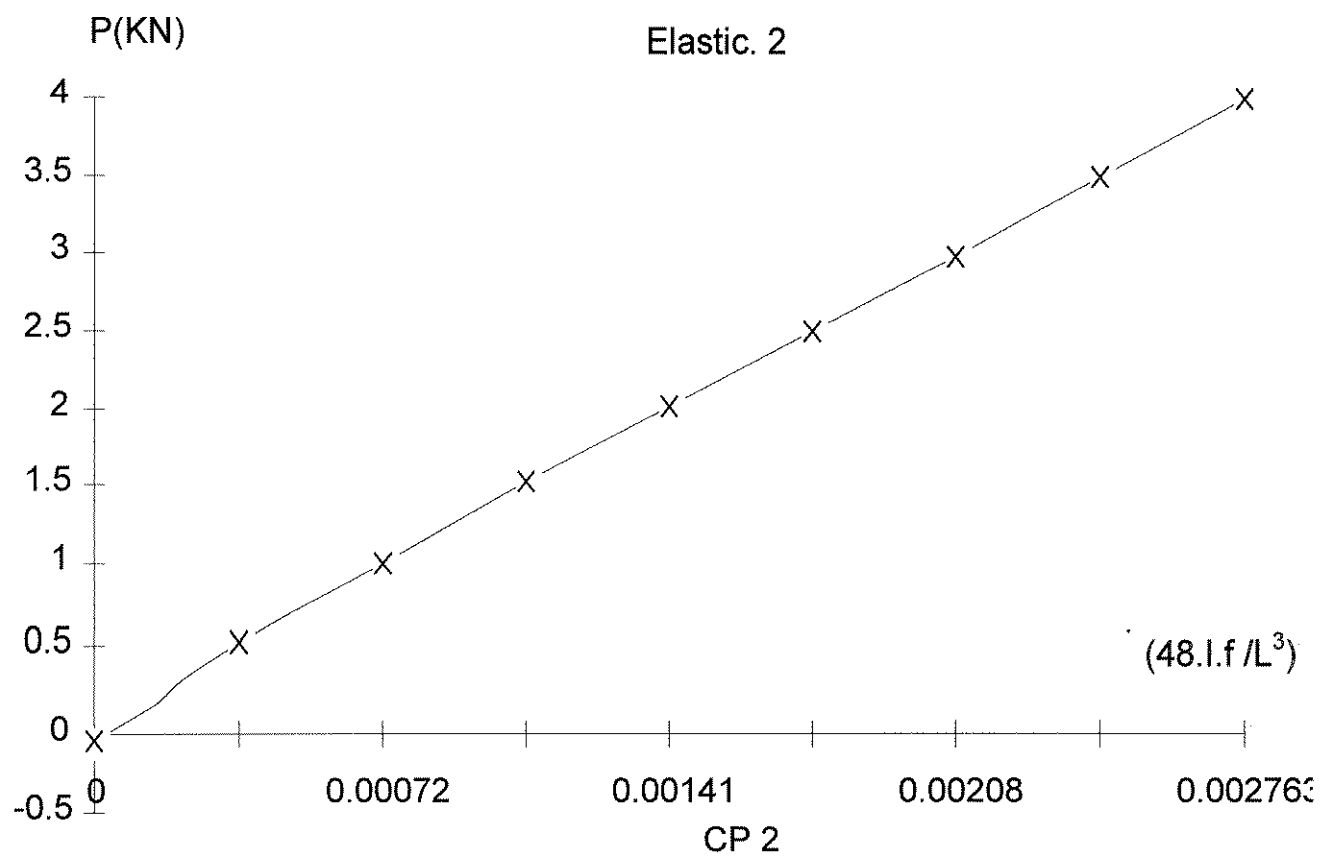
Os resultados obtidos serviram para o cálculo das flechas nos ensaios dos conectores metálicos.

Os gráficos Elastic.1, 2 e 3 , a seguir, ilustram os resultados obtidos para cada carregamento.

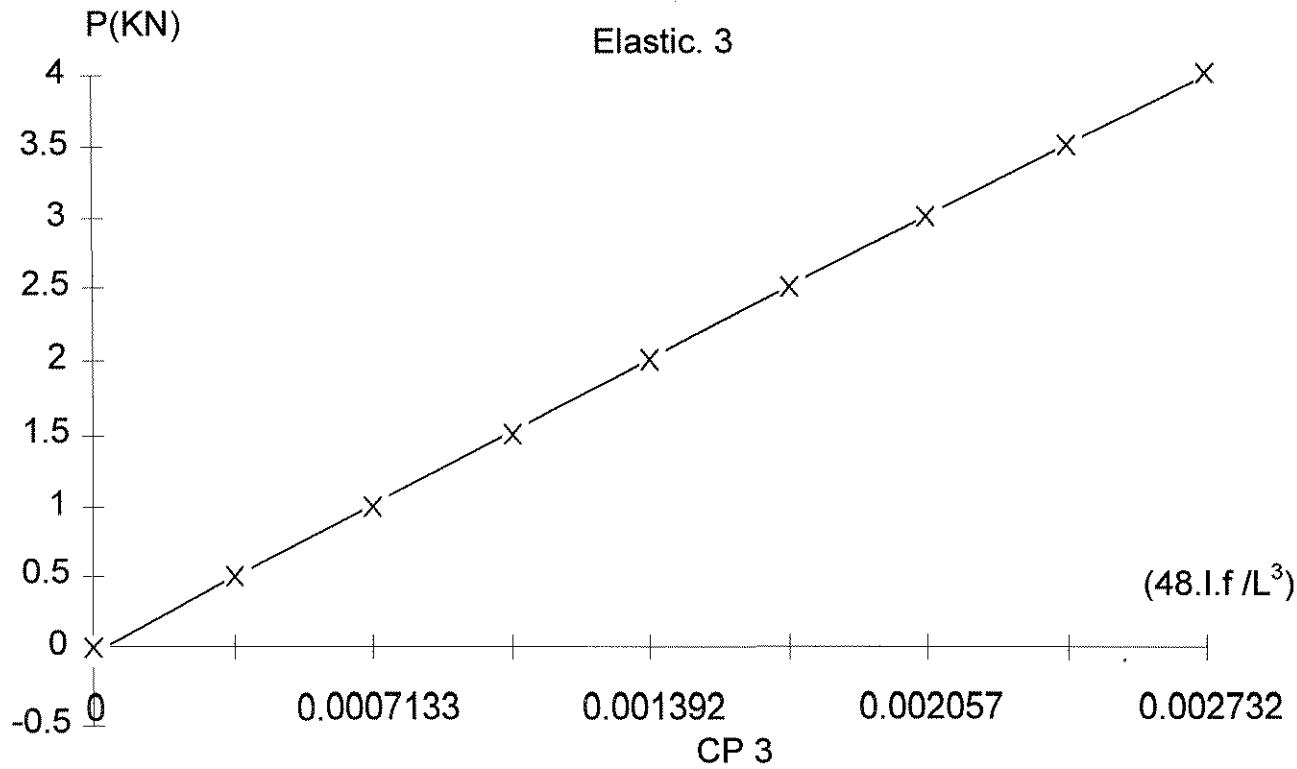
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	9
0	0	0	0	-0.03339	a1 =	1270.513
0.000426	0.5	1.81E-07	0.000213	0.507853	a0 =	-0.03339
0.00082	1	6.72E-07	0.00082	1.008435		
0.001225	1.5	1.5E-06	0.001838	1.522993		
0.001611	2	2.6E-06	0.003222	2.013411		
0.001998	2.5	3.99E-06	0.004995	2.5051		
0.002382	3	5.67E-06	0.007146	2.992977		
0.002778	3.5	7.72E-06	0.009723	3.4961		
0.003164	4	1E-05	0.012656	3.986518		
		0	0	-0.03339		
0.014404	18	3.23E-05	0.040613			



xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	9
0	0	0	0	-0.03951	a1 = 1458.29	6
0.00038	0.5	1.46E-07	0.00019	0.51756	a0 = -0.03951	
2			1	2		
0.00072	1	5.18E-07	0.00072	1.01046		
				5		
0.00107	1.5	1.14E-06	0.00160	1.52086		
			5	9		
0.00141	2	1.99E-06	0.00282	2.01668		
				9		
0.00173	2.5	3.02E-06	0.00434	2.49355		
7			3	2		
0.00208	3	4.33E-06	0.00624	2.99374		
				7		
0.00242	3.5	5.88E-06	0.00848	3.49685		
5			8	9		
0.00276	4	7.63E-06	0.01105	3.98976		
3			2	3		
		0	0	-0.03951		
0.01258	18	2.47E-05	0.03545			
7			8			



xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	9
0	0	0	0	-0.04067	a1 = 1474.36	8
0.00037	0.5	1.43E-07	0.00018	0.51604	a0 = -0.04067	
8			9	9		
0.00071	1	5.09E-07	0.00071	1.01099		
3			3	4		
0.00106	1.5	1.13E-06	0.00159	1.52510		
2			3	6		
0.00139	2	1.94E-06	0.00278	2.01164		
2			4	8		
0.00172	2.5	2.97E-06	0.00430	2.49966		
3			8	3		
0.00205	3	4.23E-06	0.00617	2.99210		
7			1	2		
0.0024	3.5	5.76E-06	0.0084	3.49781		
0.00273	4	7.46E-06	0.01092	3.9873		
2			8			
		0	0	-0.04067		
0.01245	18	2.41E-05	0.03508			
7			6			



De acordo com as retas obtidas determinou-se os seguintes valores para o Módulo de Elasticidade:

Amostra I.....E = 1.270,51 kN/cm²

Amostra II.....E = 1.458,29 kN/cm²

Amostra III.....E = 1.474,36 kN/cm²

Assim, trabalhou-se com a média destes resultados, ou seja:

$$E = 1.400 \text{ kN/cm}^2$$

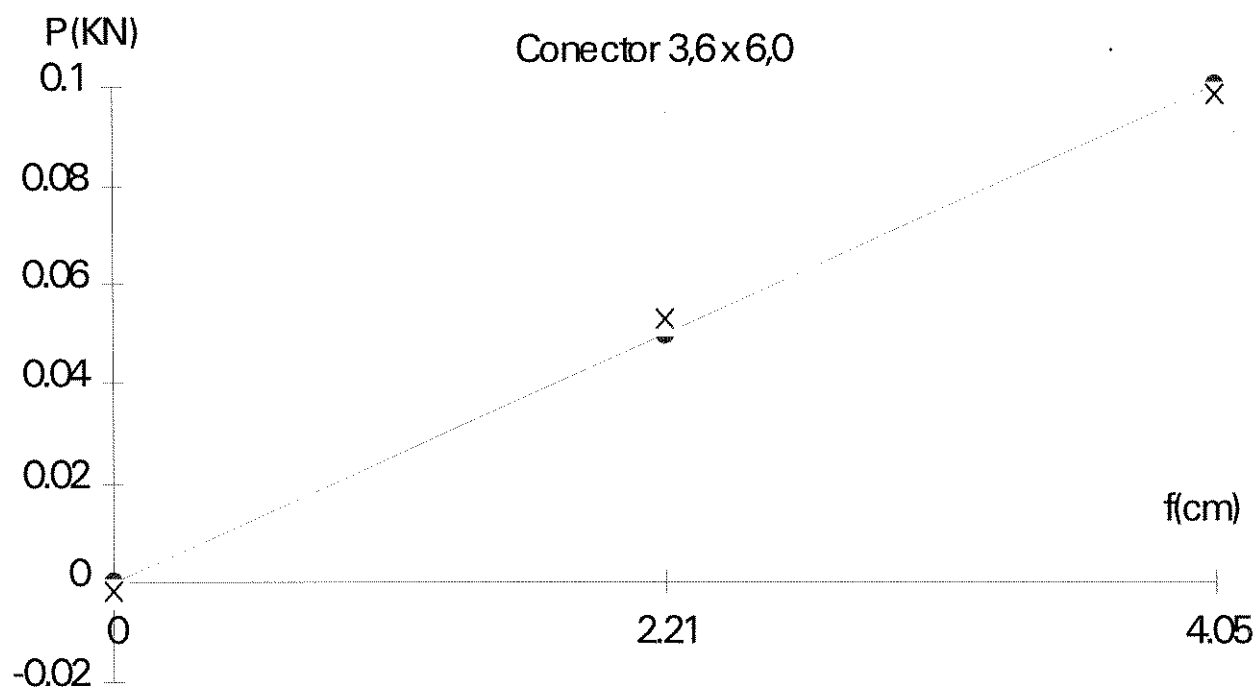
4.4.2.3.) ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DOS VALORES DO CEP DOS CONECTORES METÁLICOS DENTADOS

De maneira já explicitada na seção 4.3.2, procedeu-se aos ensaios para obtenção dos valores do CEP para cada tamanho comercial de conector metálico dentado produzido pela Gang-Nail do Brasil Ind. e Com. Ltda.

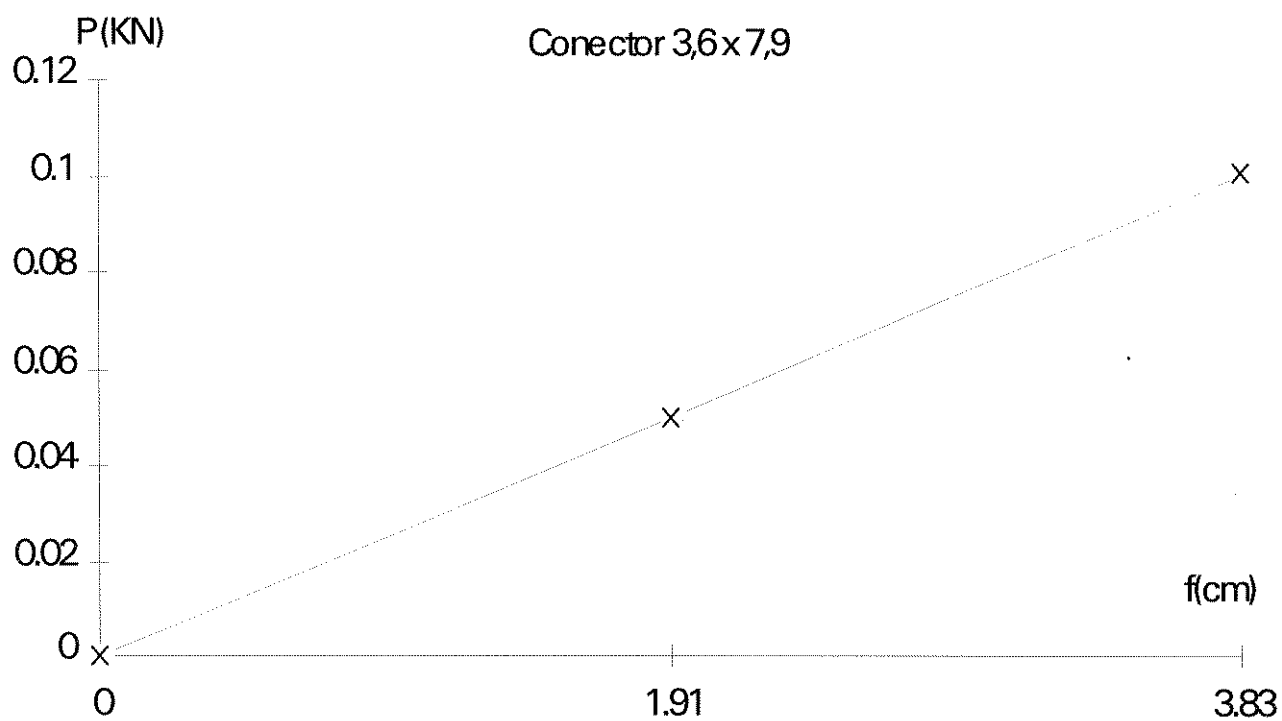
Os gráficos, que se seguem, representam os resultados obtidos nos ensaios. Através das Tabelas II pode-se obter os valores do CEP e de seu respectivo k , de acordo com o tamanho do conector e posição na ligação.

Os Nomogramas 1, 2, 3 e 4 também fornecem diretamente os valores de k para qualquer comprimento efetivo de pregagem, para serem utilizados no Programa Engnail.

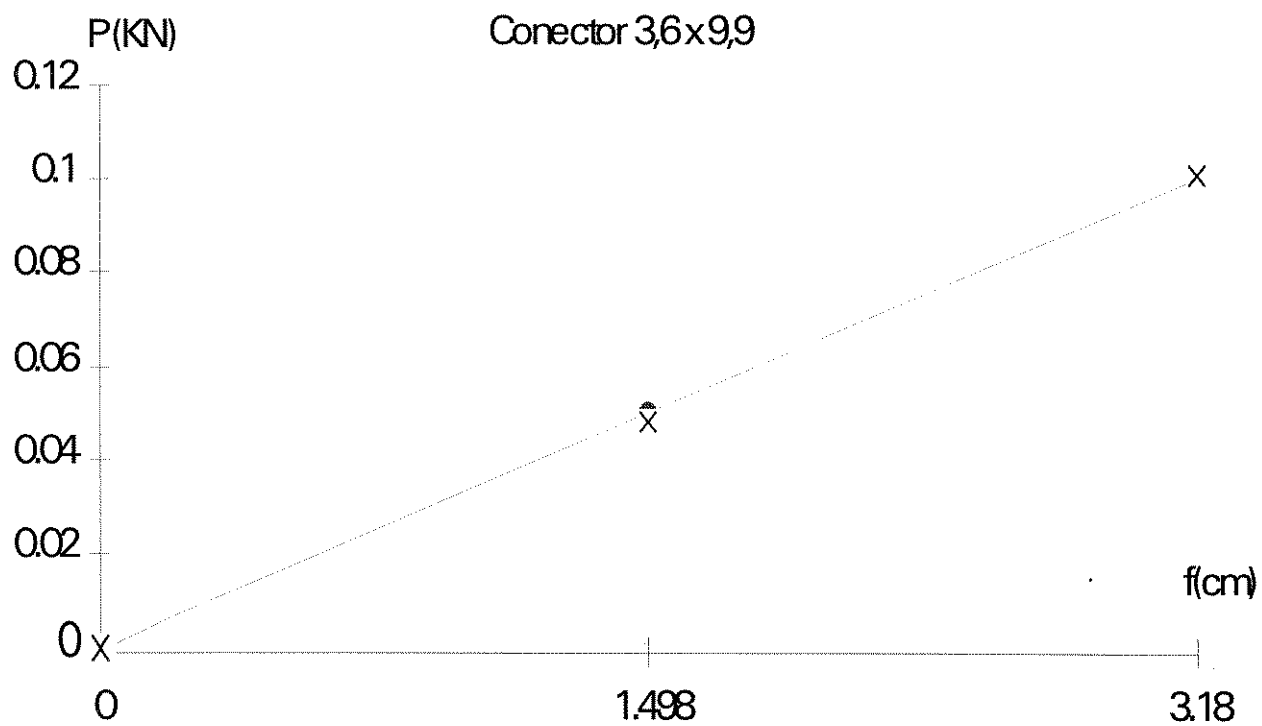
	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	3
0	0	0	0	-0.00138	$a_1 = 0.02462$	3
2.21	0.05	4.8841	0.1105	0.05303	$a_0 = -0.00138$	
4.05	0.1	16.4025	0.405	0.09834		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
		0	0	-0.00138		
6.26	0.15	21.2866	0.5155			



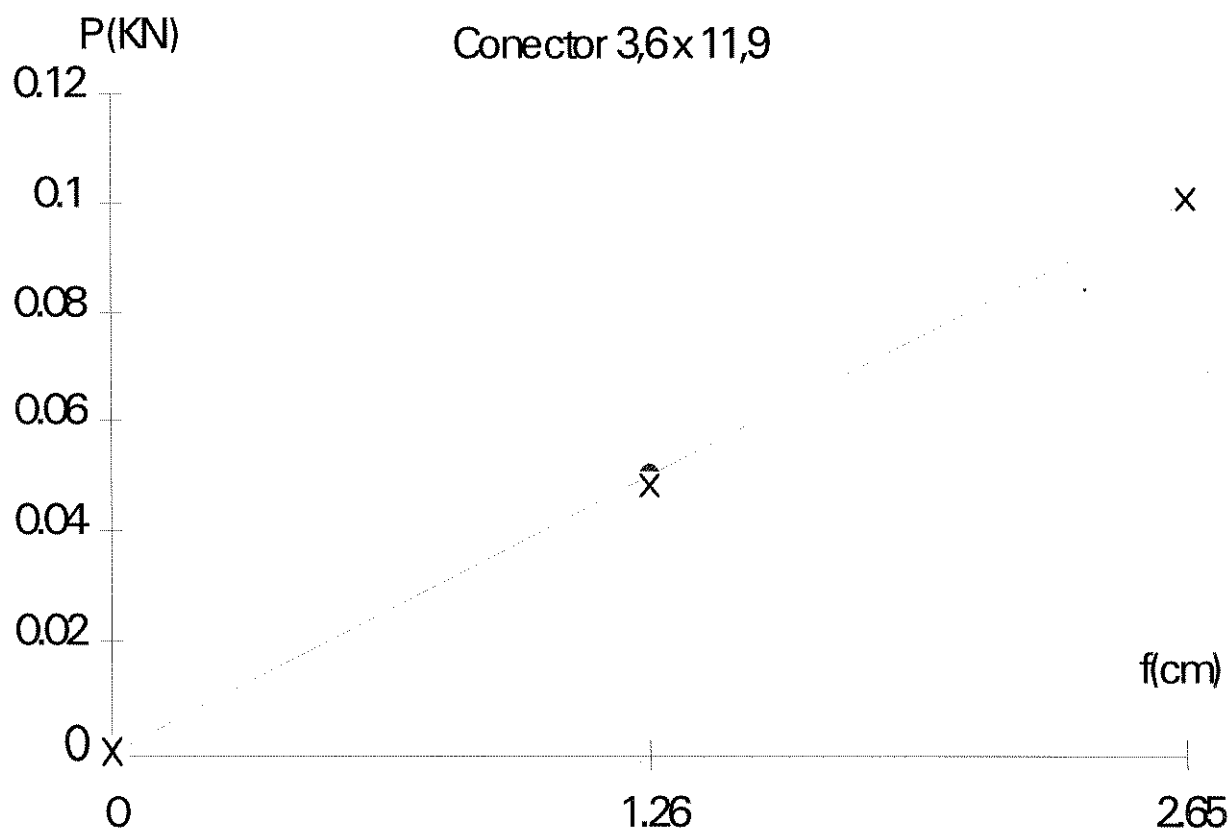
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	3
0	0	0	0	0.436E-05	$a_1 =$	0.02611
1.91	0.05	3.6481	0.0955	0.04991	$a_0 =$	4.36E-05
3.83	0.1	14.6689	0.383	0.10004		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
		0	0	0.436E-05		
5.74	0.15	18.317	0.4785			



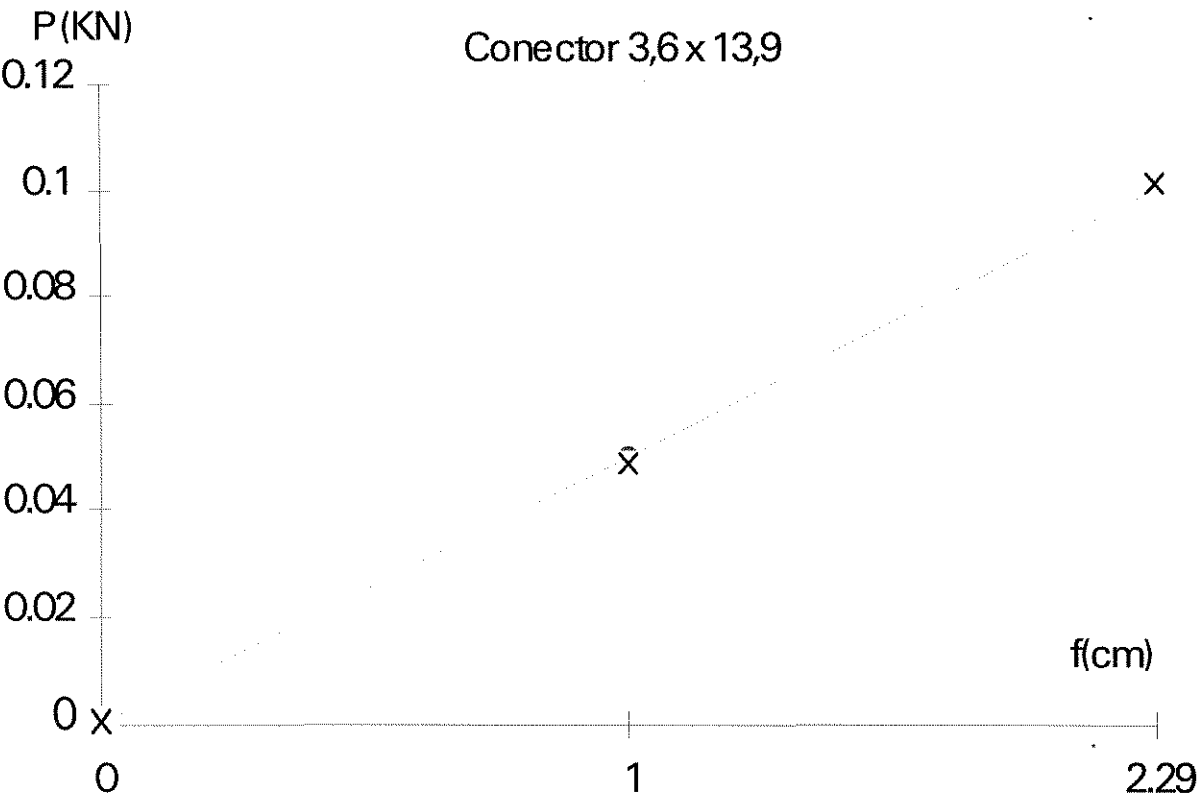
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	3
0	0	0	0	0.00101	$a_1 = 0.03141$	1
1.498	0.05	2.24400	0.0749	0.04807	$a_0 = 0.00101$	9
3.18	0.1	10.1124	0.318	0.10090		8
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
		0	0	0.00101		9
4.678	0.15	12.3564	0.3929			



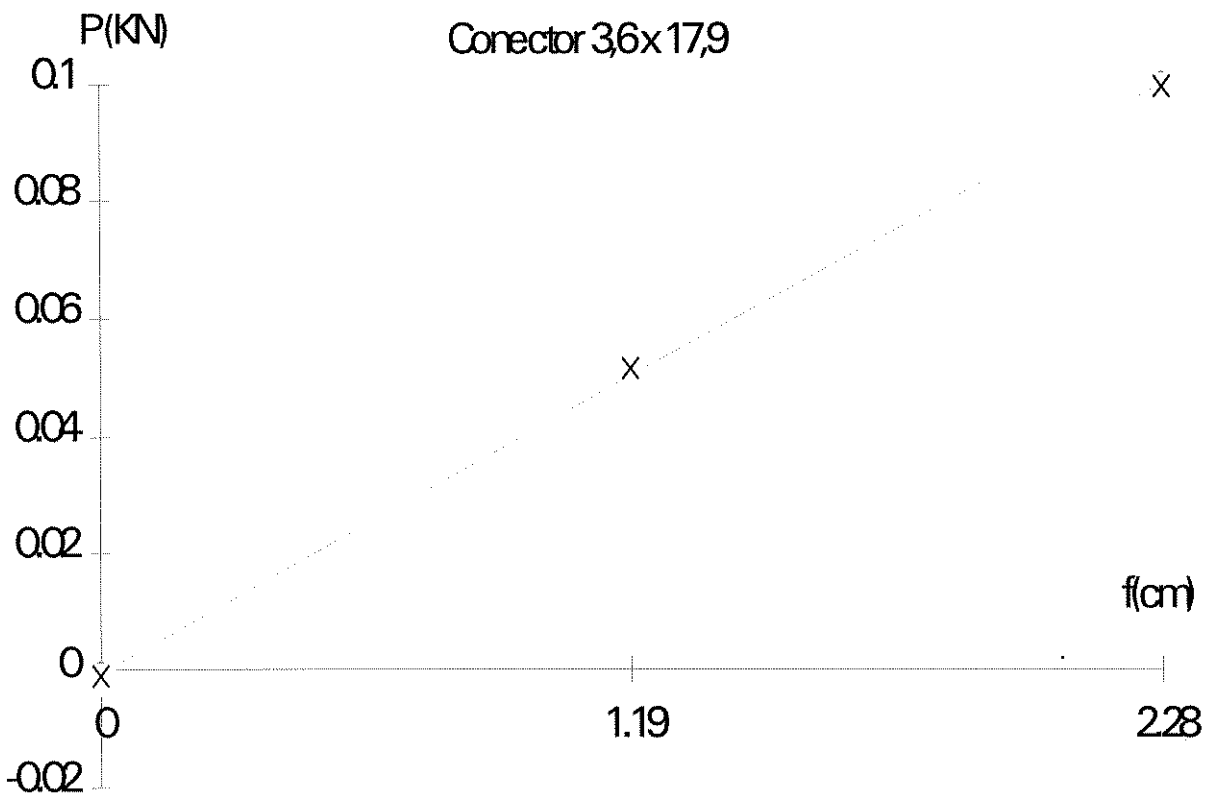
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	3
0	0	0	0	0.00085	$a_1 = 0.03770$	6
1.26	0.05	1.5876	0.063	0.04836	$a_0 = 0.00085$	7
2.65	0.1	7.0225	0.265	0.10077		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
		0	0	0.00085		
3.91	0.15	8.6101	0.328			



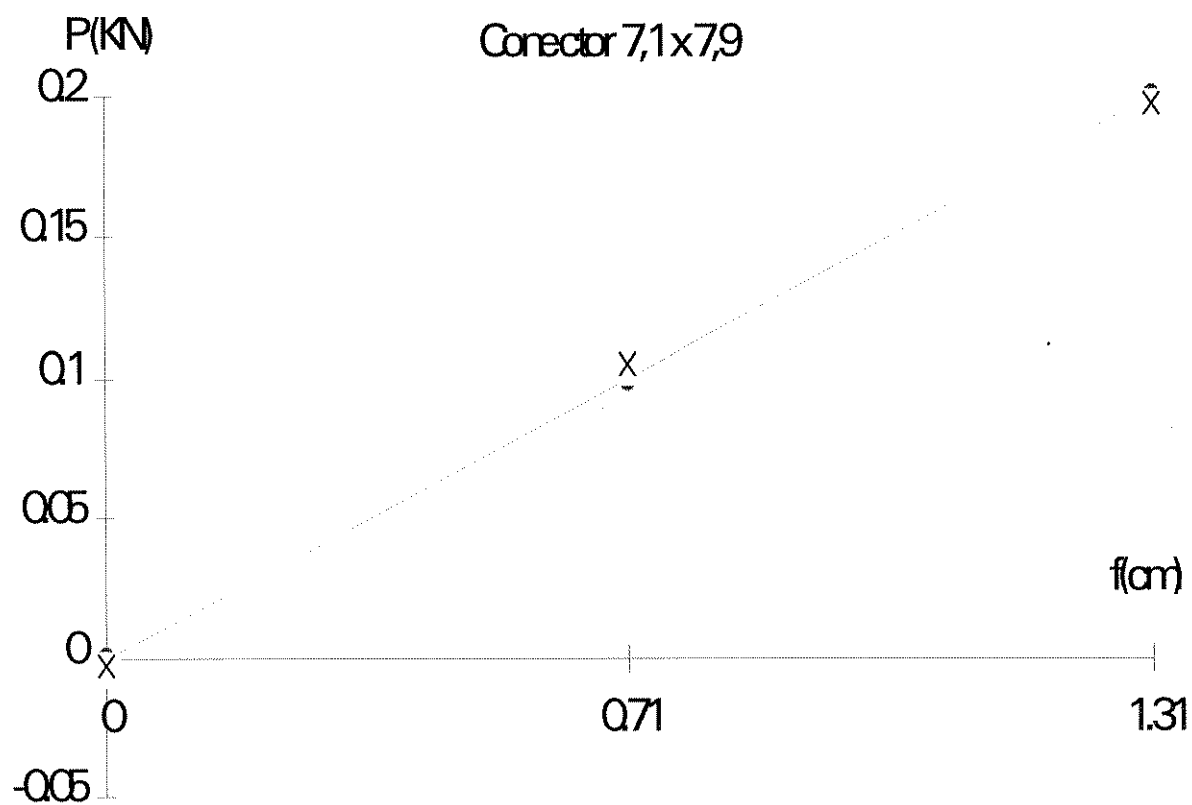
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	3
0	0	0	0	0.00082	a1 = 0.04363	6
1	0.05	1.19028	0.05455	0.04842	a0 = 0.00082	2
2.29	0.1	5.2441	0.229	0.10074		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
		0	0	0.00082		
3.381	0.15	6.43438	0.28355			



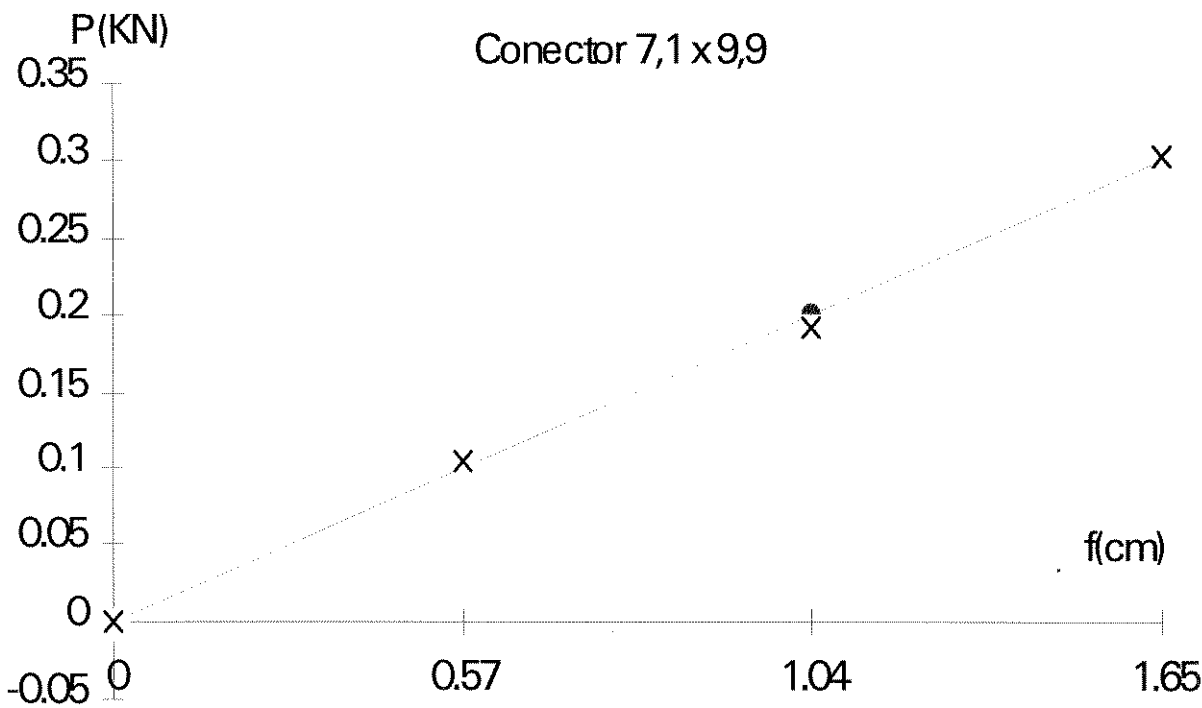
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n = 3
0	0	0	0	-0.0007	a1 = 0.04383
1.19	0.05	1.4161	0.0595	0.05146	a0 = -0.0007
2.28	0.1	5.1984	0.228	0.09923	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
		0	0	-0.0007	
3.47	0.15	6.6145	0.2875		



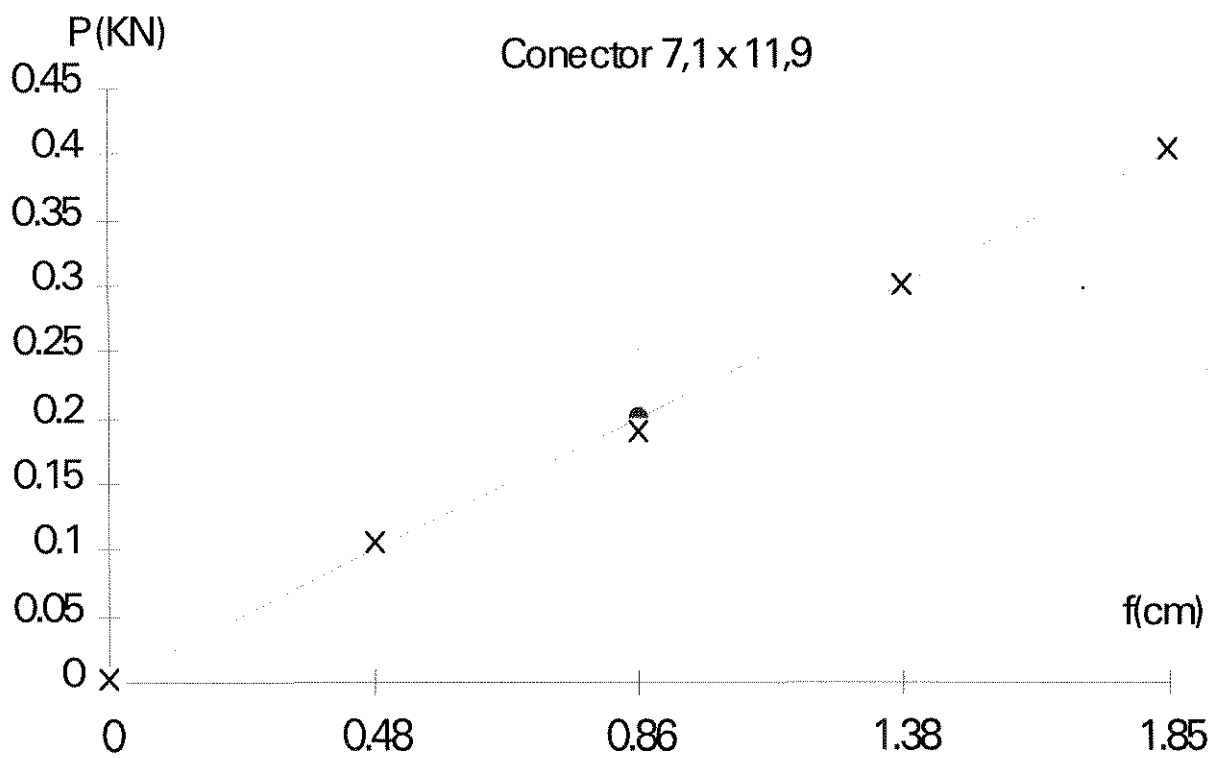
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	3
0	0	0	0	-0.00256	$a_1 = 0.15231$	4
0.71	0.1	0.5041	0.071	0.10558	$a_0 = -0.00256$	5
1.31	0.2	1.7161	0.262	0.19697		3
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
		0	0	-0.00256		
2.02	0.3	2.2202	0.333			



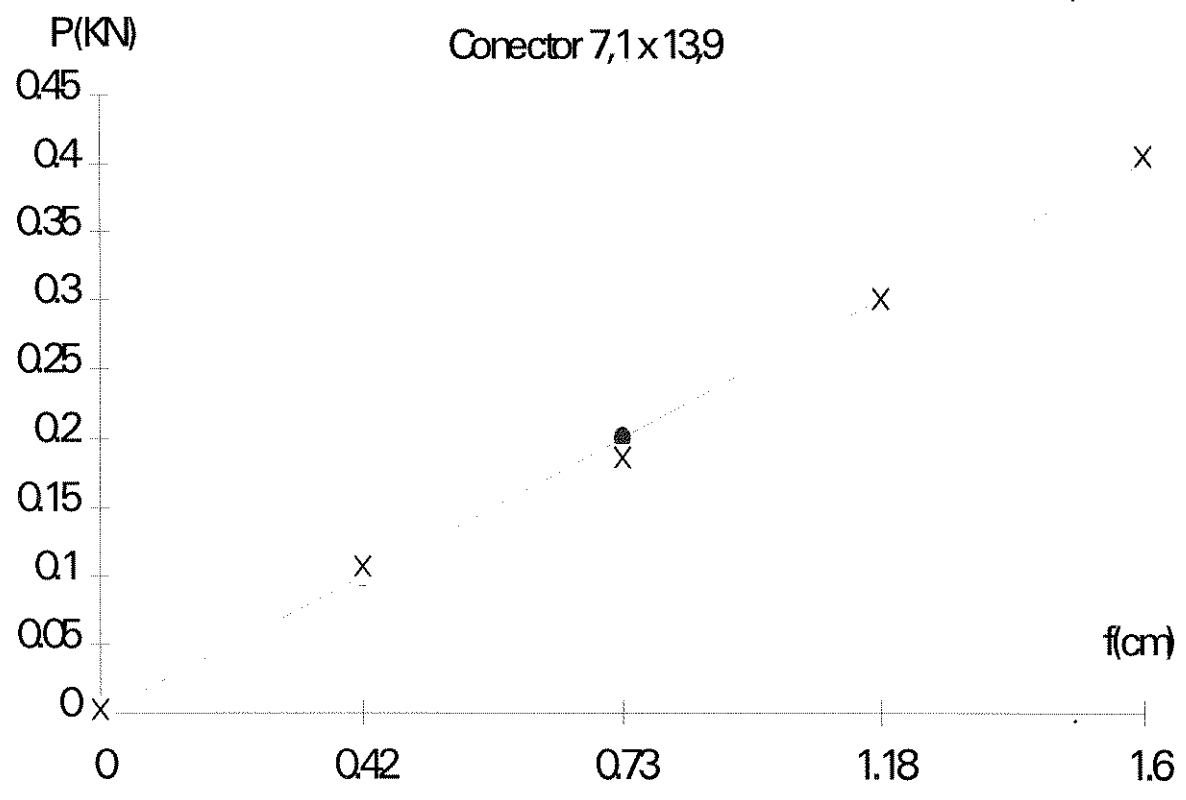
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n = 4
0	0	0	0	-3.4E-05	a1 = 0.18409
0.57	0.1	0.3249	0.057	0.10489	a0 = -3.4E-05
1.04	0.2	1.0816	0.208	0.19142	
1.65	0.3	2.7225	0.495	0.30371	
		0	0	-3.4E-05	
		0	0	-3.4E-05	
		0	0	-3.4E-05	
		0	0	-3.4E-05	
		0	0	-3.4E-05	
		0	0	-3.4E-05	
3.26	0.6	4.129	0.76		



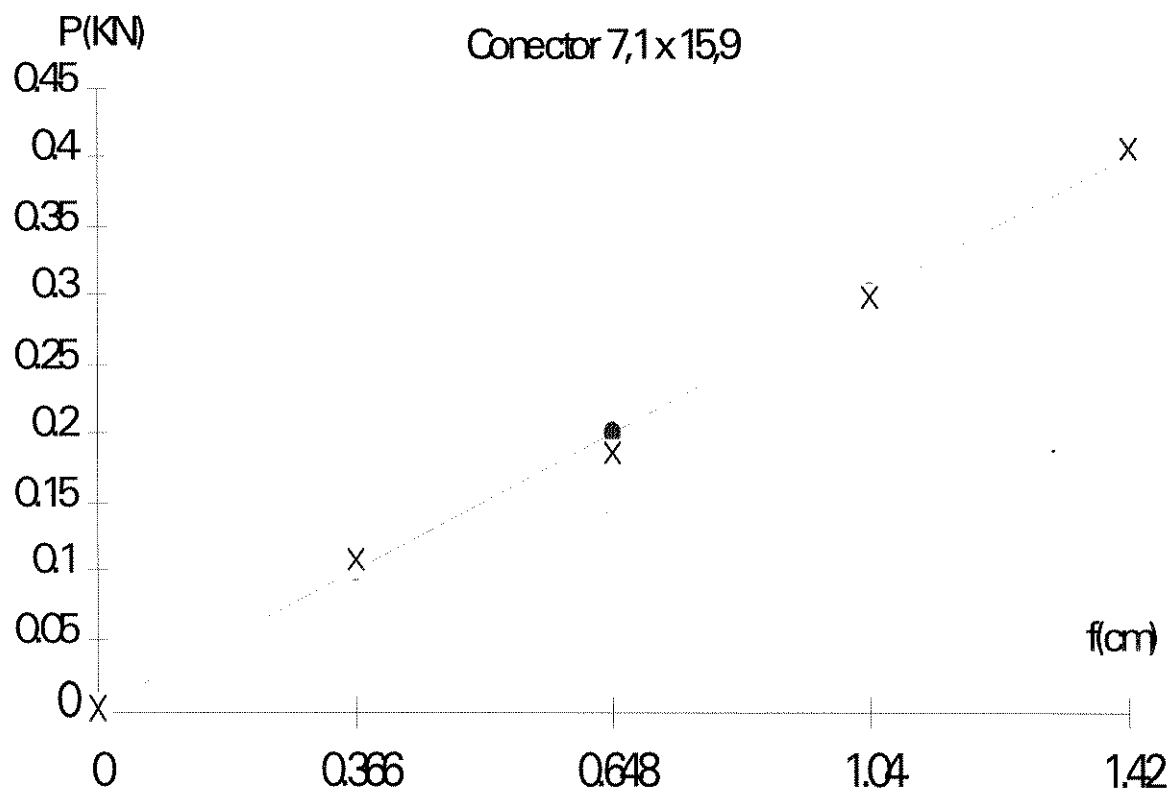
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n = 5
0	0	0	0	0.00167	
0.48	0.1	0.2304	0.048	0.10582	a1 = 0.21698
0.86	0.2	0.7396	0.172	0.18828	a0 = 0.00167
1.38	0.3	1.9044	0.414	0.30111	
1.85	0.4	3.4225	0.74	0.40310	
		0	0	0.00167	
		0	0	0.00167	
		0	0	0.00167	
		0	0	0.00167	
		0	0	0.00167	
4.57	1	6.2969	1.374		



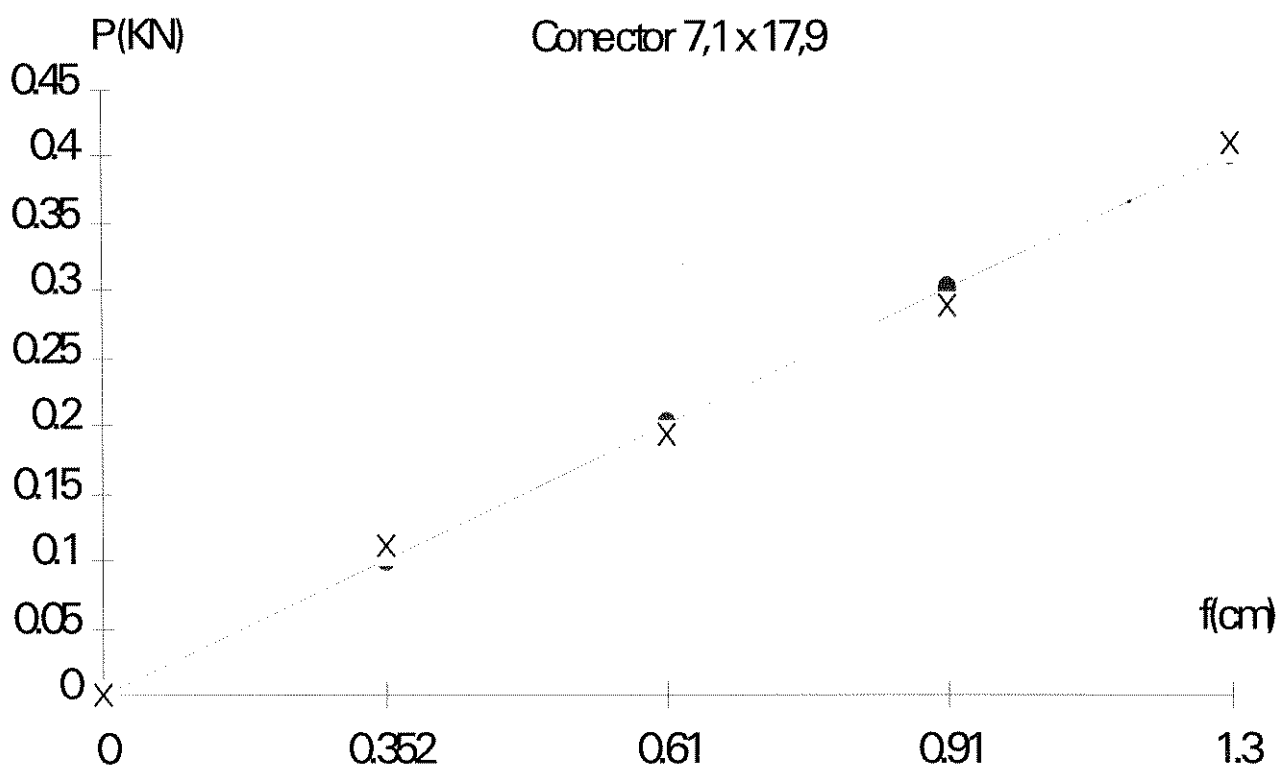
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	5
0	0	0	0	0.00209	a1 = 0.25179	3
0.42	0.1	0.1764	0.042	0.10784	a0 = 0.00209	1
0.73	0.2	0.5329	0.146	0.1859		
1.18	0.3	1.3924	0.354	0.29920		
1.6	0.4	2.56	0.64	0.40496		
		0	0	0.00209		1
		0	0	0.00209		1
		0	0	0.00209		1
		0	0	0.00209		1
		0	0	0.00209		1
		0	0	0.00209		1
3.93	1	4.6617	1.182			



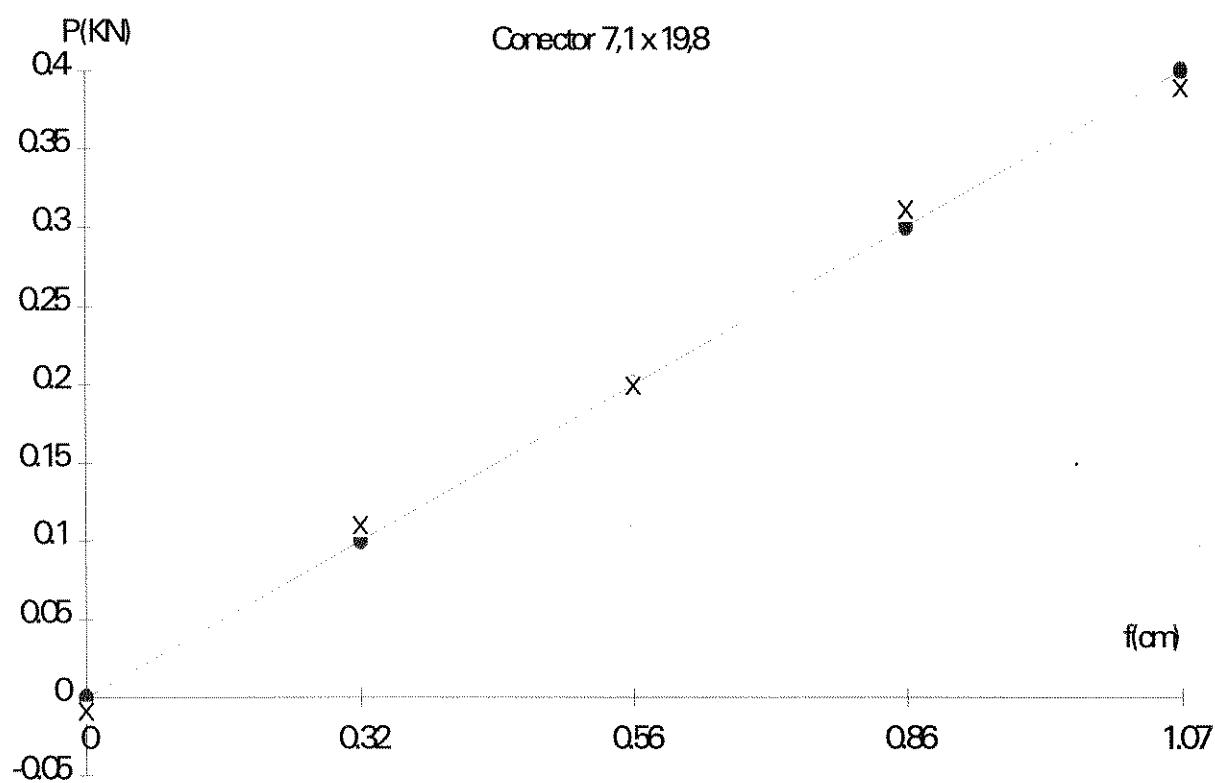
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	5
0	0	0	0	0.00280	a1 = 0.28381	6
0.366	0.1	0.13395	0.0366	0.10668	a0 = 0.00280	4
0.648	0.2	0.41990	0.1296	0.18671		7
1.04	0.3	1.0816	0.312	0.29797		3
1.42	0.4	2.0164	0.568	0.40582		4
		0	0	0.00280		4
		0	0	0.00280		4
		0	0	0.00280		4
		0	0	0.00280		4
		0	0	0.00280		4
		0	0	0.00280		4
3.474	1	3.65186	1.0462			



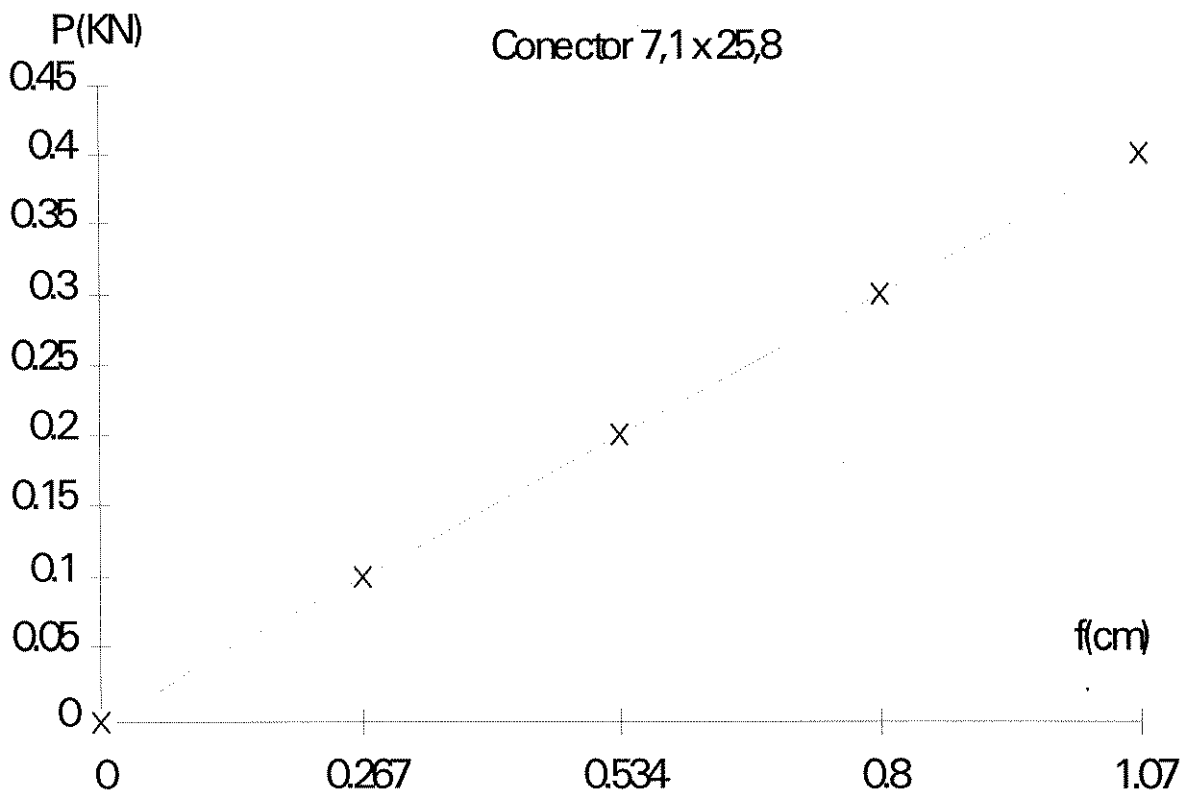
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	5
0	0	0	0	1.39E-05	a1 = 0.31523	7
0.352	0.1	0.12390	0.0352	0.11097	a0 = 1.39E-05	
0.61	0.2	0.3721	0.122	0.19230		
0.91	0.3	0.8281	0.273	0.28687		
1.3	0.4	1.69	0.52	0.40982		
		0	0	1.39E-05		
		0	0	1.39E-05		
		0	0	1.39E-05		
		0	0	1.39E-05		
		0	0	1.39E-05		
3.172	1	3.01410	0.9502			



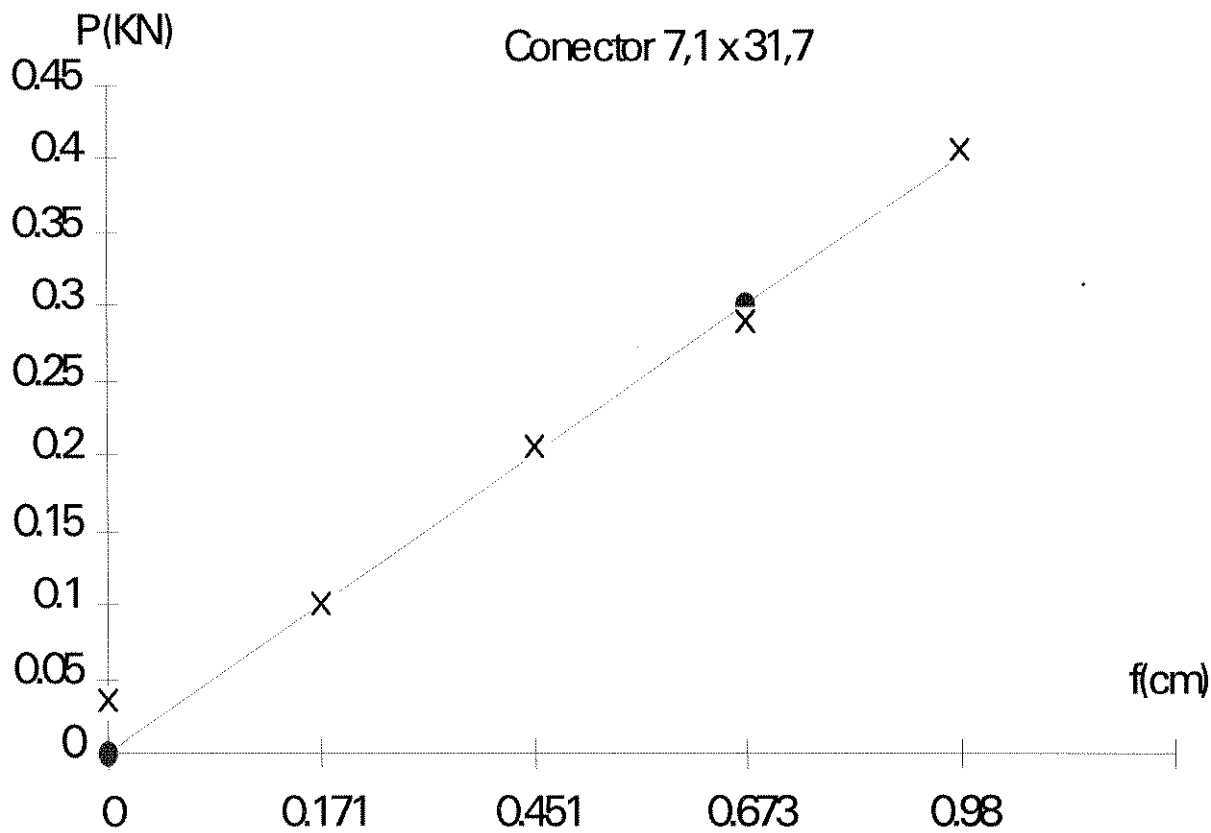
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n = 5$
0	0	0	0	-0.00882	$a_1 = 0.37156$
0.32	0.1	0.1024	0.032	0.11008	$a_0 = -0.00882$
0.56	0.2	0.3136	0.112	0.19925	
0.86	0.3	0.7396	0.258	0.31072	
1.07	0.4	1.1449	0.428	0.38875	
		0	0	-0.00882	
		0	0	-0.00882	
		0	0	-0.00882	
		0	0	-0.00882	
		0	0	-0.00882	
2.81	1	2.3005	0.83		



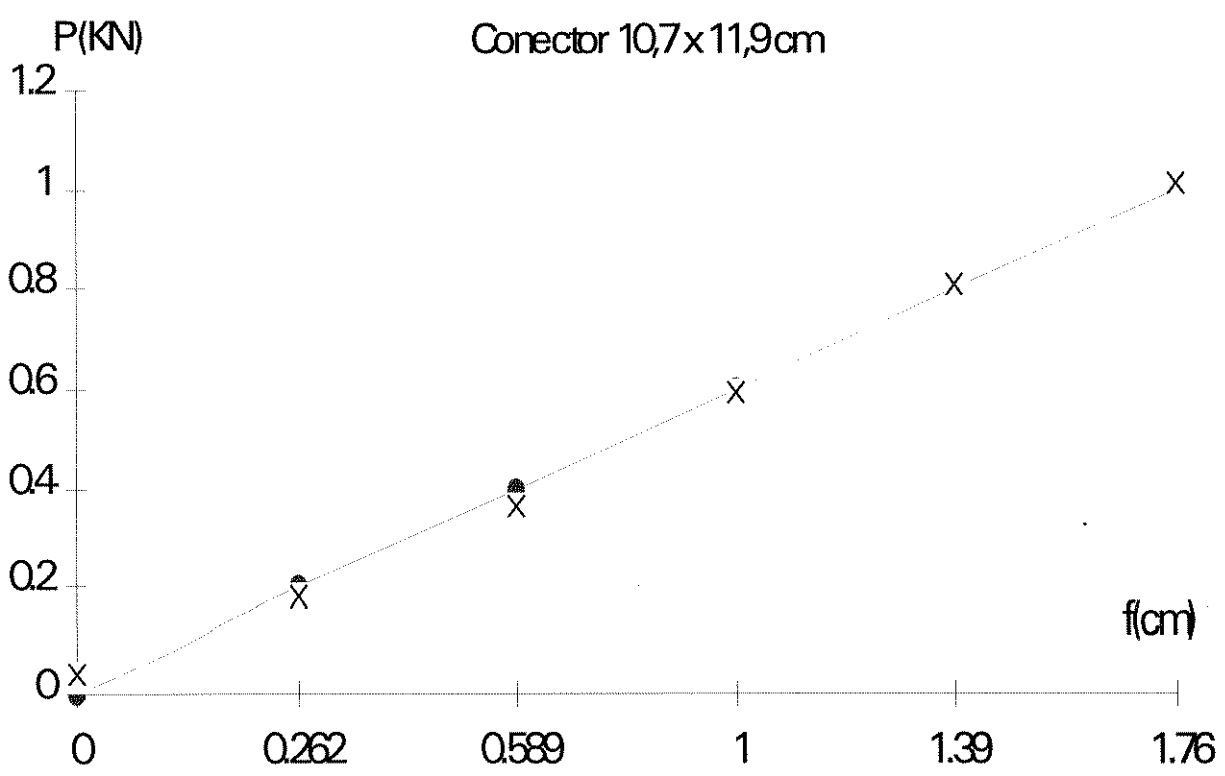
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	5
0	0	0	0	0.00015	a1 = 0.37410	9
0.267	0.1	0.07128	0.0267	0.10003	a0 = 0.00015	1
0.534	0.2	0.28515	0.1068	0.19992		
0.8	0.3	0.64	0.24	0.29943		
1.07	0.4	1.1449	0.428	0.40044		
		0	0	0.00015		
		0	0	0.00015		
		0	0	0.00015		
		0	0	0.00015		
		0	0	0.00015		
		0	0	0.00015		
2.671	1	2.14134	0.8015			5



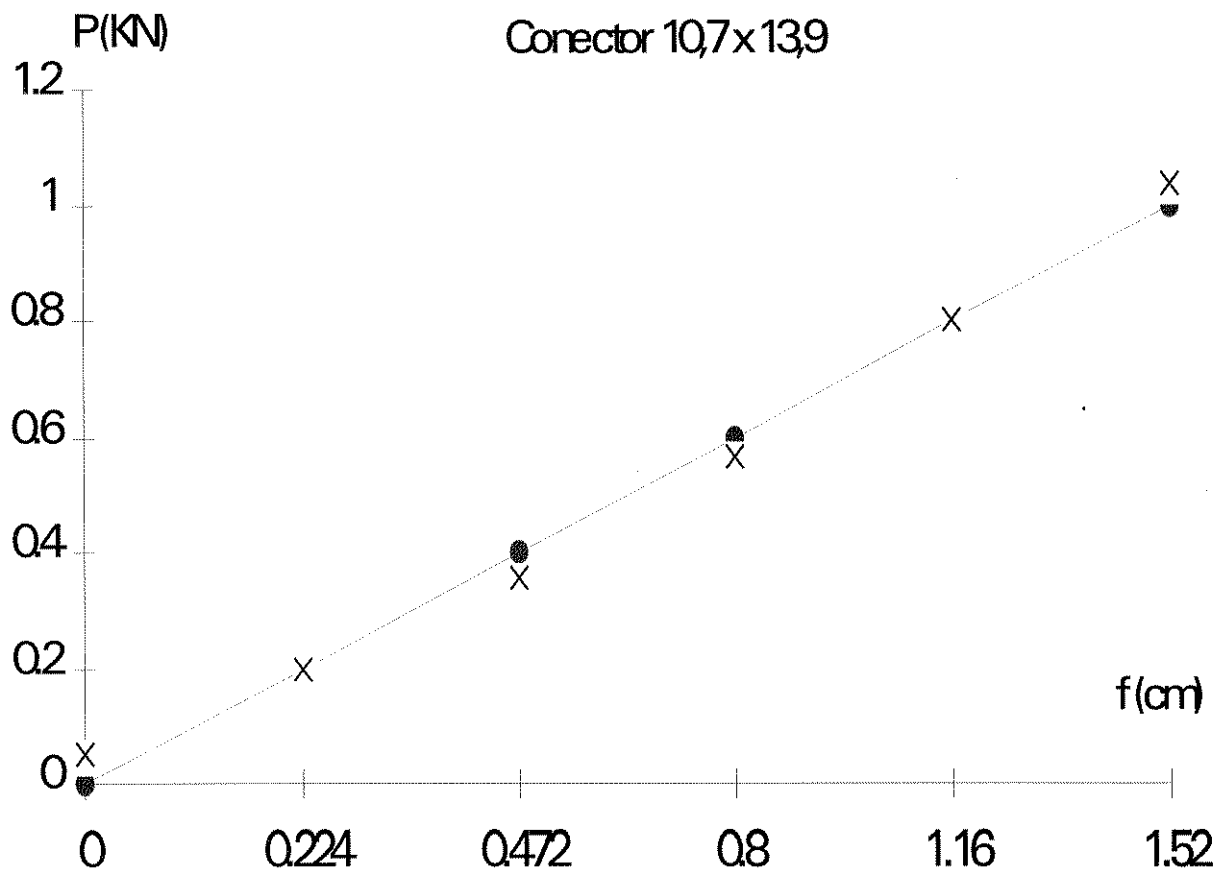
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	4
0	0	0	0	0.03603	a1 = 0.37620	9
0.171	0.1	0.02924	0.0171	0.10036	a0 = 0.03603	1
0.451	0.2	0.20340	0.0902	0.20570		
0.673	0.3	0.45292	0.2019	0.28922		
0.98	0.4	0.9604	0.392	0.40471		
		0	0	0.03603		
		0	0	0.03603		
		0	0	0.03603		
		0	0	0.03603		
		0	0	0.03603		
		0	0	0.03603		
2.275	1	1.64597	0.7012			



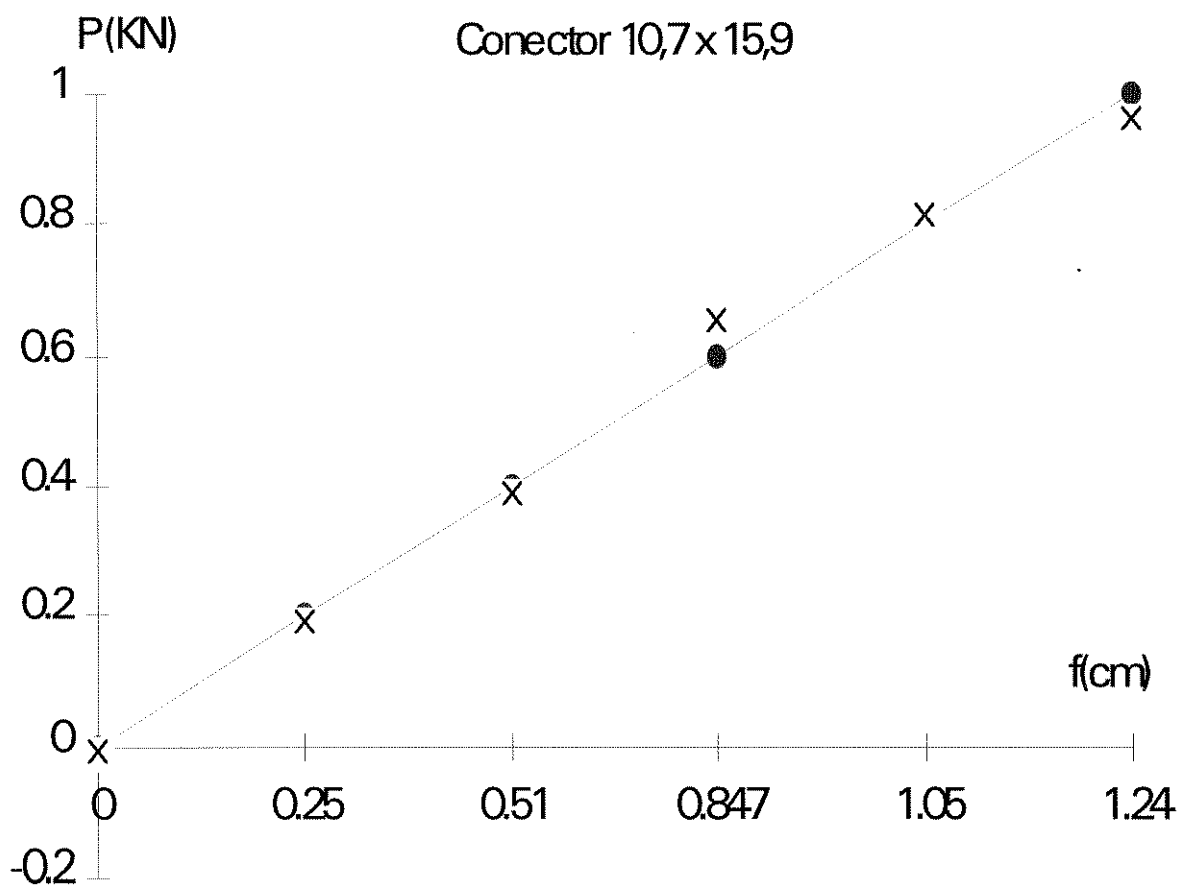
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	6
0	0	0	0	0.03894	a1 = 0.55315	
0.262	0.2	0.06864	0.0524	0.18387	a0 = 0.03894	
0.589	0.4	0.34692	0.2356	0.36475		
1	0.6	1	0.6	0.59210		
1.39	0.8	1.9321	1.112	0.80783		
1.76	1	3.0976	1.76	1.0125		
		0	0	0.03894		
		0	0	0.03894		
		0	0	0.03894		
		0	0	0.03894		
		0	0	0.03894		
5.001	3	6.44526	3.76			



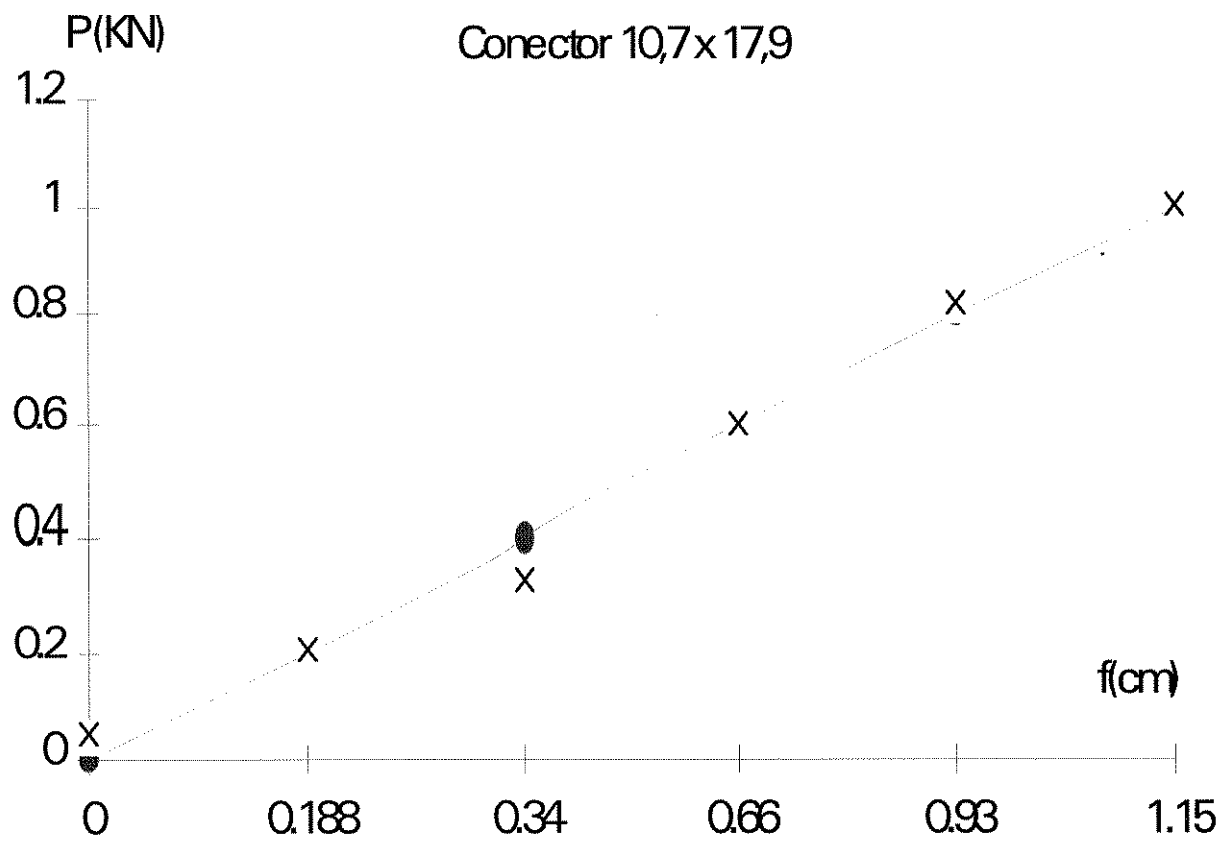
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	6
0	0	0	0	0.05053	a1 = 0.64578	8
0.224	0.2	0.05017	0.0448	0.19518	a0 = 0.05053	1
0.472	0.4	0.22278	0.1888	0.35534		3
0.8	0.6	0.64	0.48	0.56716		2
1.16	0.8	1.3456	0.928	0.79964		6
1.52	1	2.3104	1.52	1.03213		0
		0	0	0.05053		1
		0	0	0.05053		1
		0	0	0.05053		1
		0	0	0.05053		1
		0	0	0.05053		1
4.176	3	4.56896	3.1616			



xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n = 6
0	0	0	0	-0.00518	a1 = 0.77780
0.25	0.2	0.0625	0.05	0.18926	2
0.51	0.4	0.2601	0.204	0.39149	8
0.847	0.6	0.71740	0.5082	0.65361	7
1.05	0.8	1.1025	0.84	0.81151	6
1.24	1	1.5376	1.24	0.95929	2
		0	0	-0.00518	
		0	0	-0.00518	
		0	0	-0.00518	
		0	0	-0.00518	
3.897	3	3.68010	2.8422		9

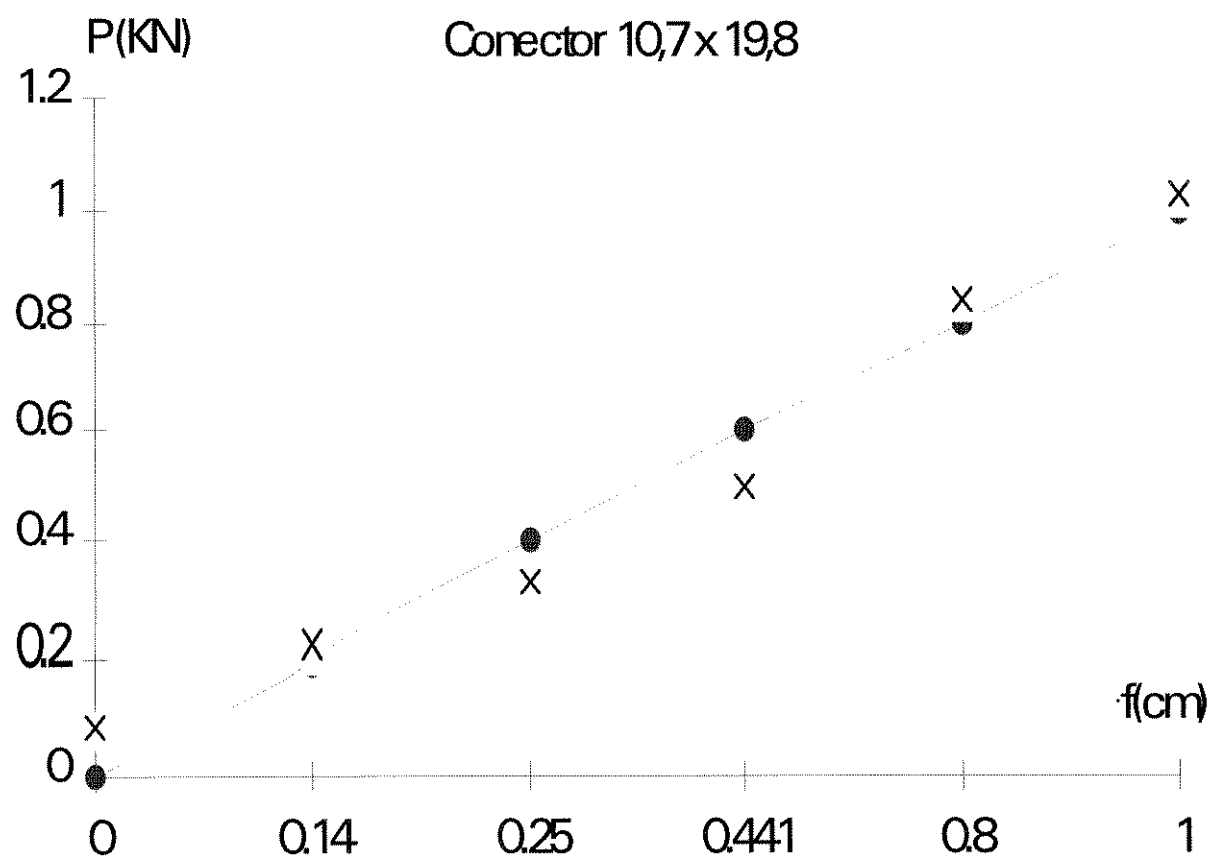


xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	6
0	0	0	0	0.04540	a1 =	0.83463
				5		
0.188	0.2	0.03534	0.0376	0.20231	a0 =	0.04540
		4		5		5
0.34	0.4	0.1156	0.136	0.32917		
				9		
0.66	0.6	0.4356	0.396	0.59626		
				1		
0.93	0.8	0.8649	0.744	0.82161		
				1		
1.15	1	1.3225	1.15	1.00522		
				9		
		0	0	0.04540		
				5		
		0	0	0.04540		
				5		
		0	0	0.04540		
				5		
		0	0	0.04540		
				5		
3.268	3	2.77394	2.4636			
		4				

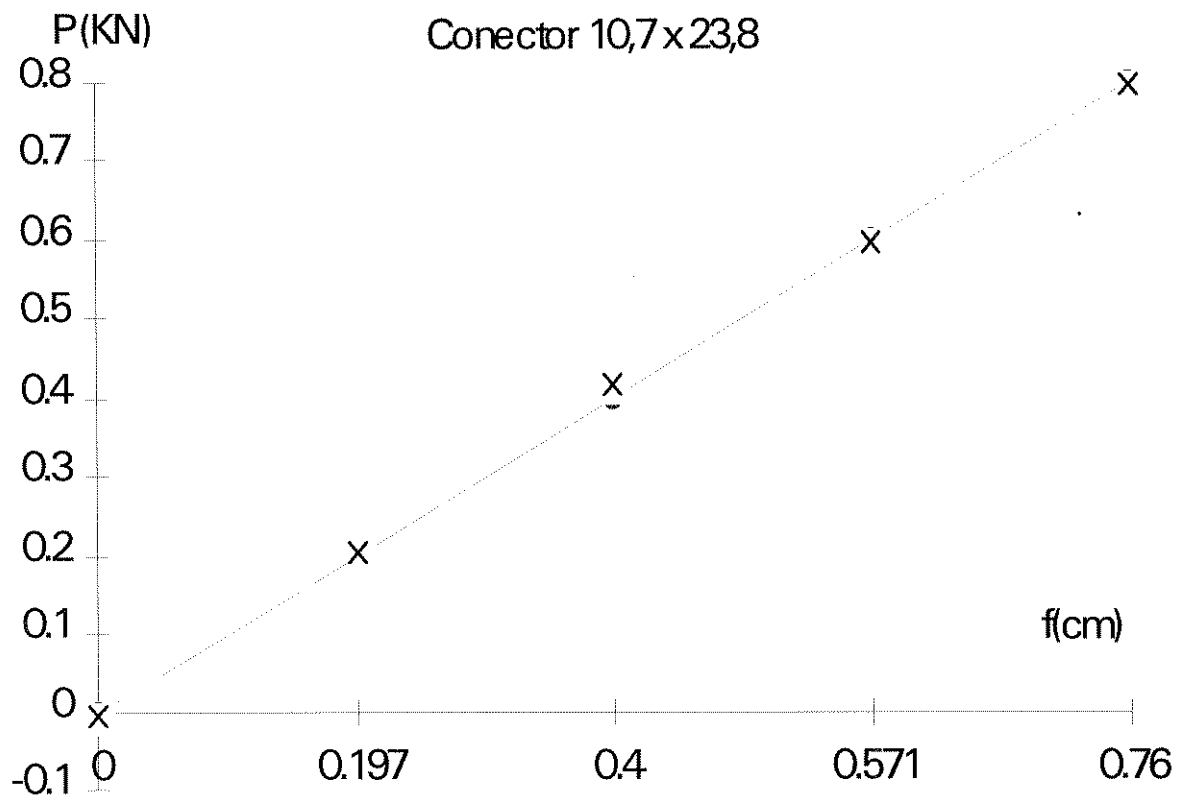


xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	6
0	0	0	0	0.08781	a1 = 0.93998	1
0.14	0.2	0.0196	0.028	0.21941	a0 = 0.08781	8
0.25	0.4	0.0625	0.1	0.32281		4
0.441	0.6	0.19448	0.2646	0.50235		1
0.8	0.8	0.64	0.64	0.83980		3
1	1	1	1	1.0278		8
		0	0	0.08781		8
		0	0	0.08781		8
		0	0	0.08781		8
		0	0	0.08781		8
2.631	3	1.91658	2.0326			1

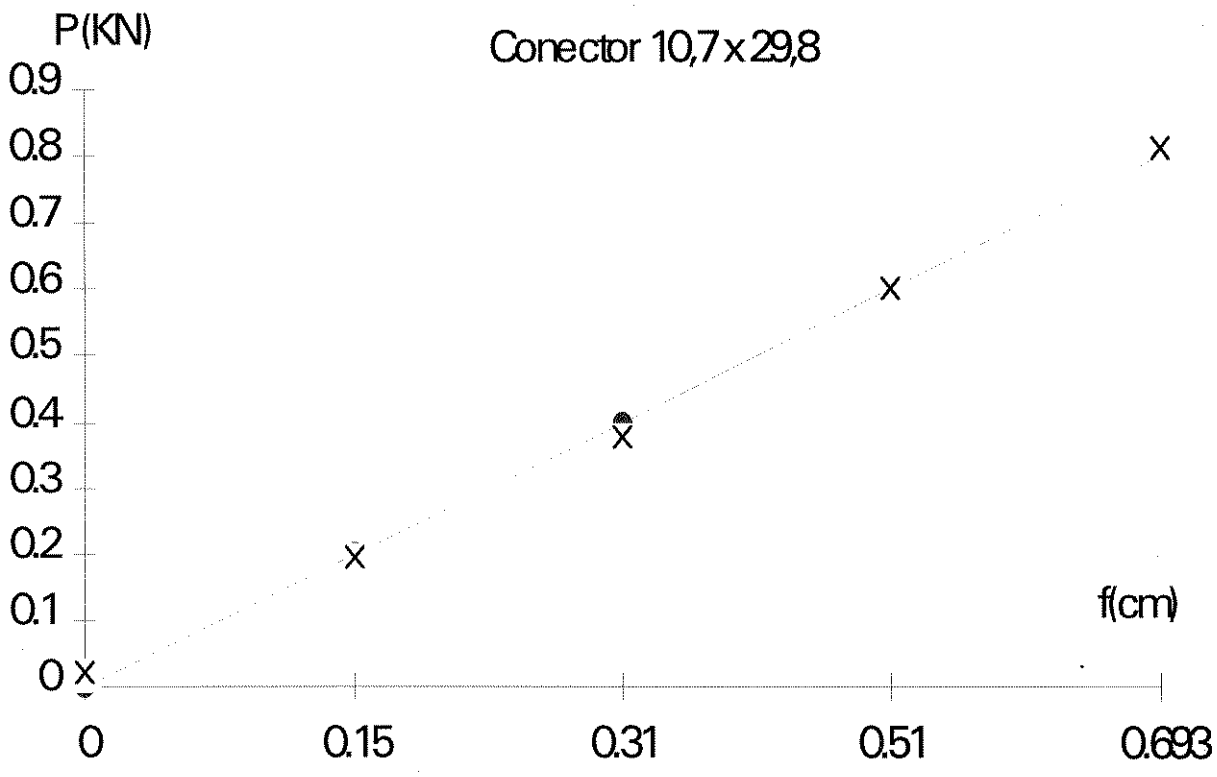




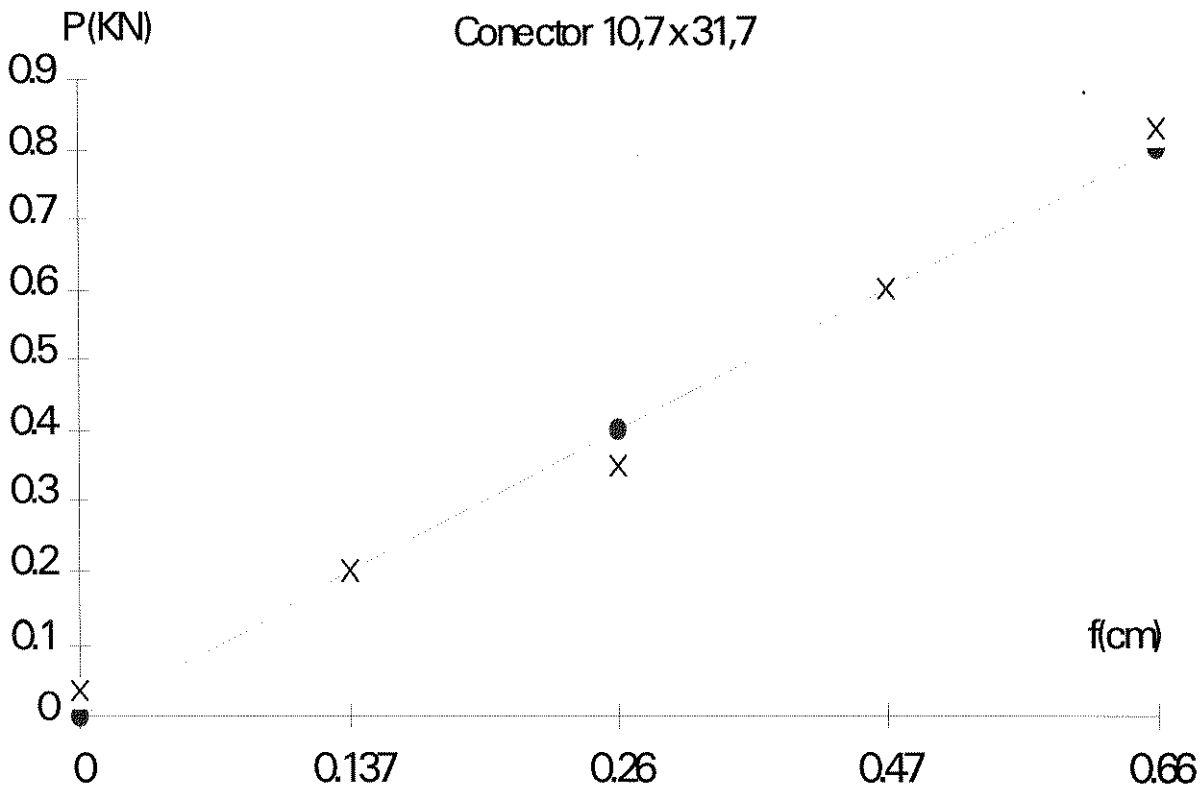
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n = 5
0	0	0	0	-0.00685	a1 = 1.05511
0.197	0.2	0.038809	0.0394	0.201005	a0 = -0.00685
0.4	0.4	0.16	0.16	0.415194	
0.571	0.6	0.326041	0.3426	0.595618	
0.76	0.8	0.5776	0.608	0.795035	
		0	0	-0.00685	
		0	0	-0.00685	
		0	0	-0.00685	
		0	0	-0.00685	
		0	0	-0.00685	
1.928	2	1.10245	1.15		



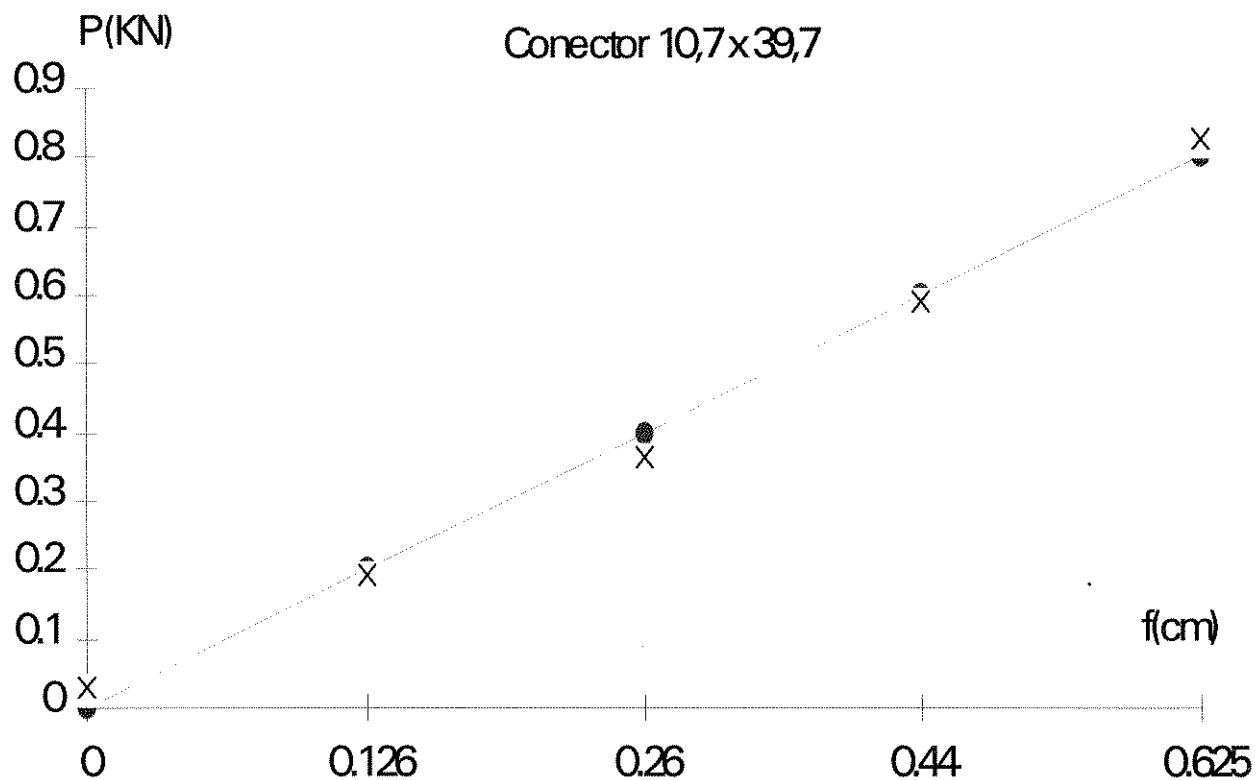
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	5
0	0	0	0	0.02024	a1 = 1.14179	1
0.15	0.2	0.0225	0.03	0.19150	a0 = 0.02024	
0.31	0.4	0.0961	0.124	0.37419		
0.51	0.6	0.2601	0.306	0.60255		
0.693	0.8	0.48024	0.5544	0.81150		
		9		2		
		0	0	0.02024		
		0	0	0.02024		
		0	0	0.02024		
		0	0	0.02024		
		0	0	0.02024		
1.663	2	0.85894	1.0144			
		9				



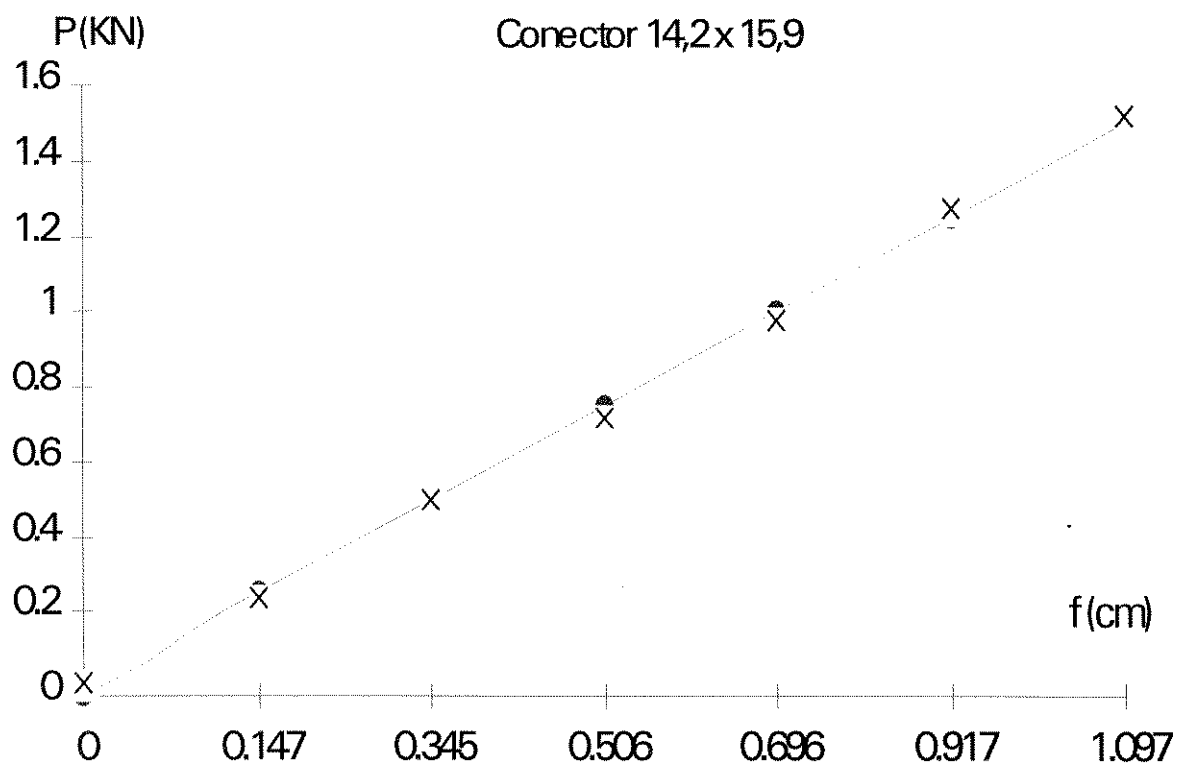
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	5
0	0	0	0	0.03487	a1 =	1.19556
0.137	0.2	0.01876	0.0274	0.19866	a0 =	0.03487
0.26	0.4	0.0676	0.104	0.34572		
0.47	0.6	0.2209	0.282	0.59678		
0.66	0.8	0.4356	0.528	0.82394		
		0	0	0.03487		
		0	0	0.03487		
		0	0	0.03487		
		0	0	0.03487		
		0	0	0.03487		
		0	0	0.03487		
1.527	2	0.74286	0.9414			



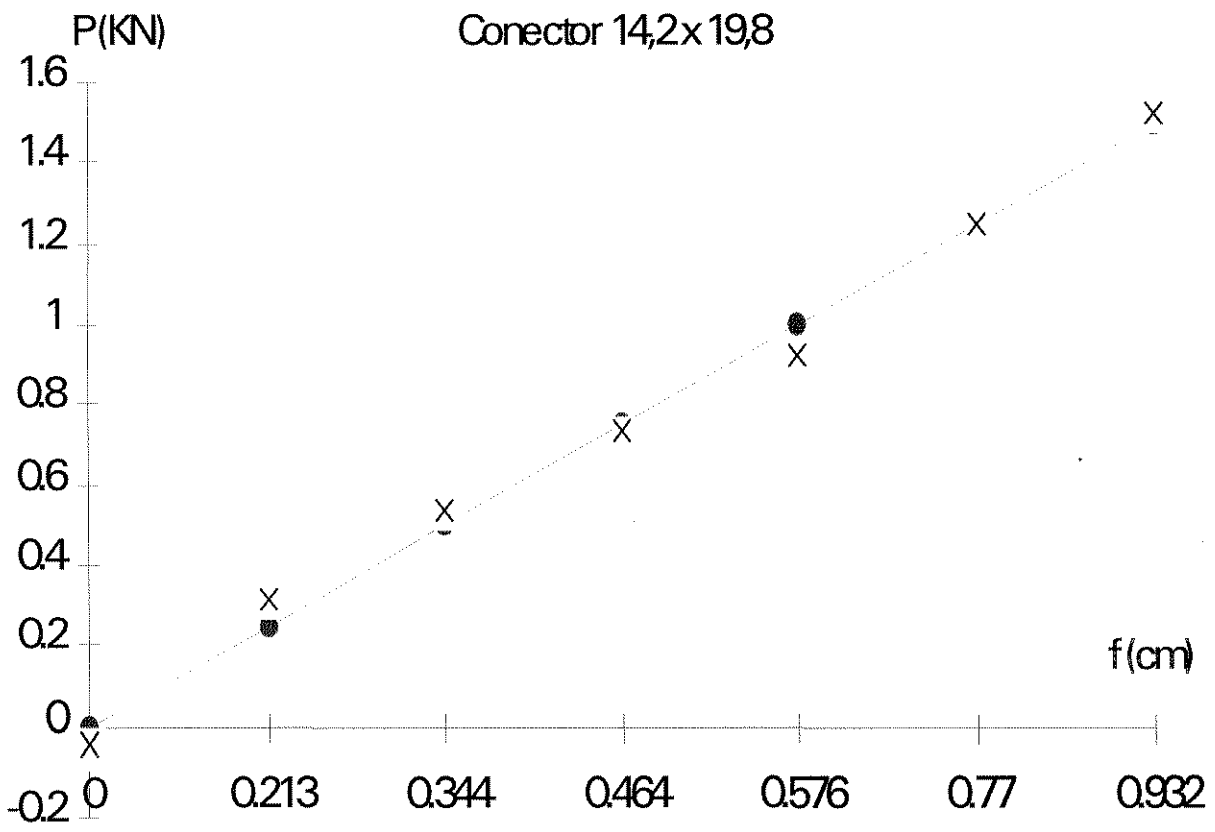
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	5
0	0	0	0	0.031927	a1 =	1.268344
0.126	0.2	0.015876	0.0252	0.191738	a0 =	0.031927
0.26	0.4	0.0676	0.104	0.361696		
0.44	0.6	0.1936	0.264	0.589998		
0.625	0.8	0.390625	0.5	0.824642		
		0	0	0.031927		
		0	0	0.031927		
		0	0	0.031927		
		0	0	0.031927		
		0	0	0.031927		
1.451	2	0.667701	0.8932			



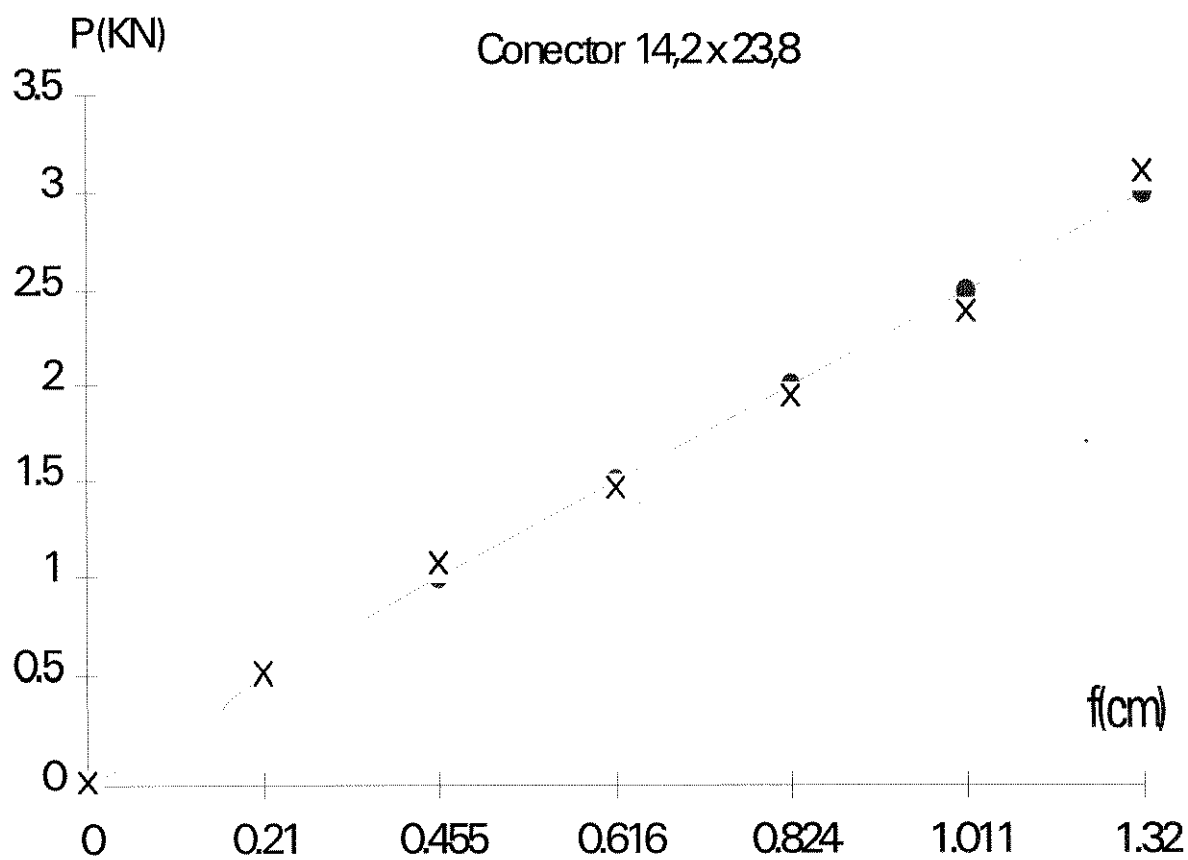
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	7
0	0	0	0	0.03605	a1 =	1.34779
0.147	0.25	0.02160	0.03675	0.23418	a0 =	0.03605
0.345	0.5	0.11902	0.1725	0.50104		7
0.506	0.75	0.25603	0.3795	0.71803		
0.696	1	0.48441	0.696	0.97411		
0.917	1.25	0.84088	1.14625	1.27198		
1.097	1.5	1.20340	1.6455	1.51458		
		0	0	0.03605		
		0	0	0.03605		
		0	0	0.03605		
3.708	5.25	2.92538	4.0765			



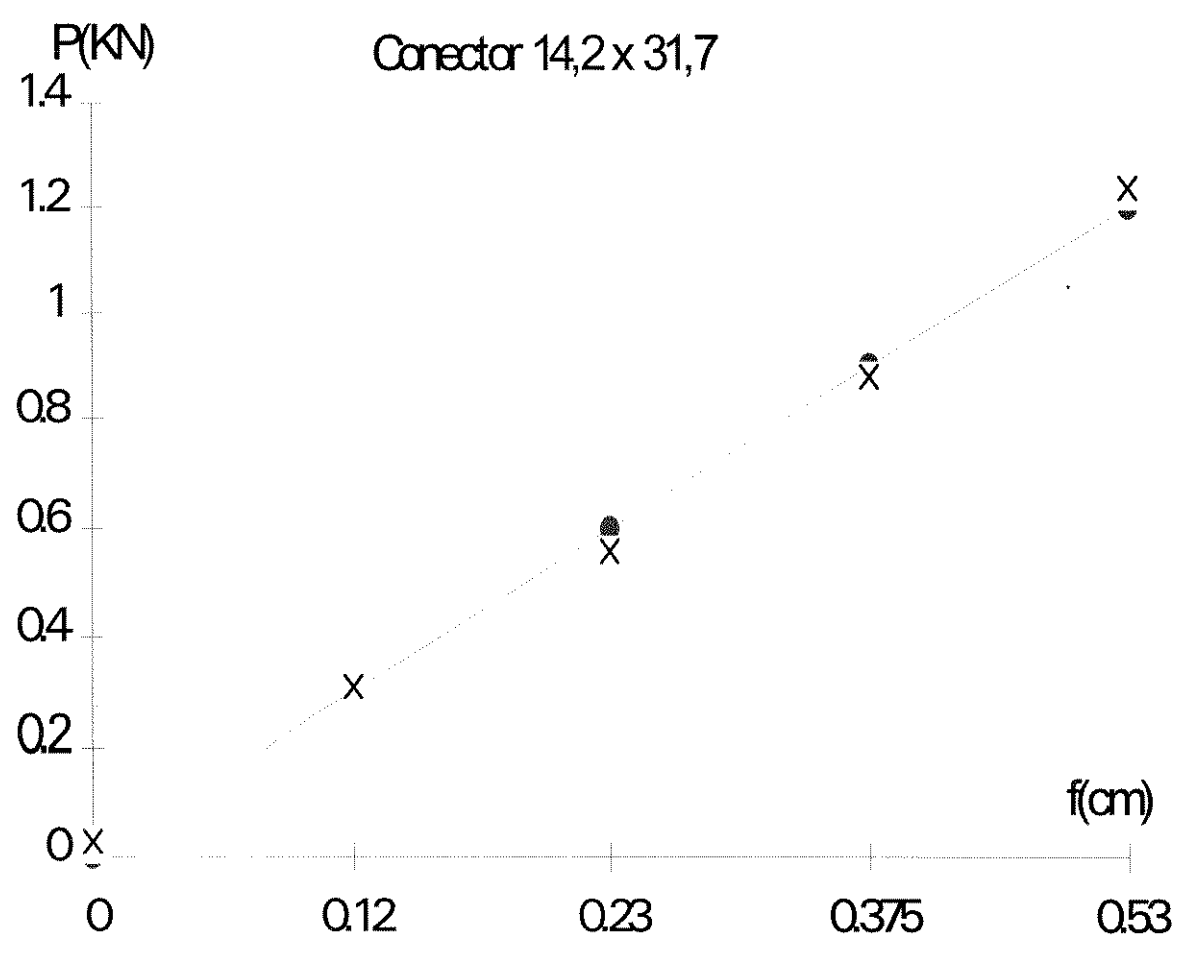
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n =	7
0	0	0	0	-0.04027	a1 = 1.67684	3
0.213	0.25	0.04536	0.05325	0.31689	a0 = -0.04027	
0.344	0.5	0.11833	0.172	0.53656		
0.464	0.75	0.21529	0.348	0.73778		
0.576	1	0.33177	0.576	0.92558		
0.77	1.25	0.5929	0.9625	1.25089		
0.932	1.5	0.86862	1.398	1.52254		
		0	0	-0.04027		
		0	0	-0.04027		
		0	0	-0.04027		
3.299	5.25	2.17230	3.50975			



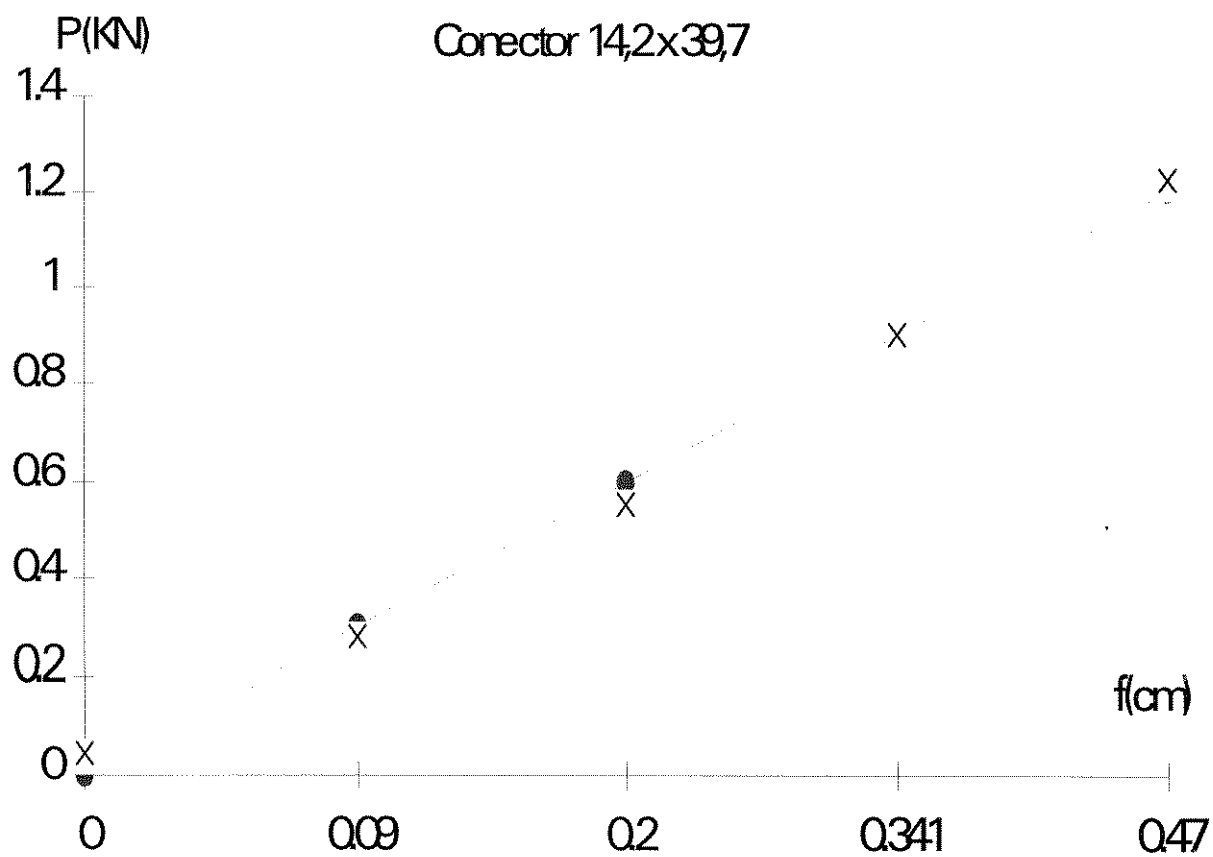
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	7
0	0	0	0	0.01195	a1 = 2.34812	7
0.21	0.5	0.0441	0.105	0.50506	a0 = 0.01195	8
0.455	1	0.20702	0.455	1.08035		
0.616	1.5	0.37945	0.924	1.45840		
0.824	2	0.67897	1.648	1.94681		
1.011	2.5	1.02212	2.5275	2.38591		
1.32	3	1.7424	3.96	3.11148		
		0	0	0.01195		
		0	0	0.01195		
		0	0	0.01195		
4.436	10.5	4.07407	9.6195			



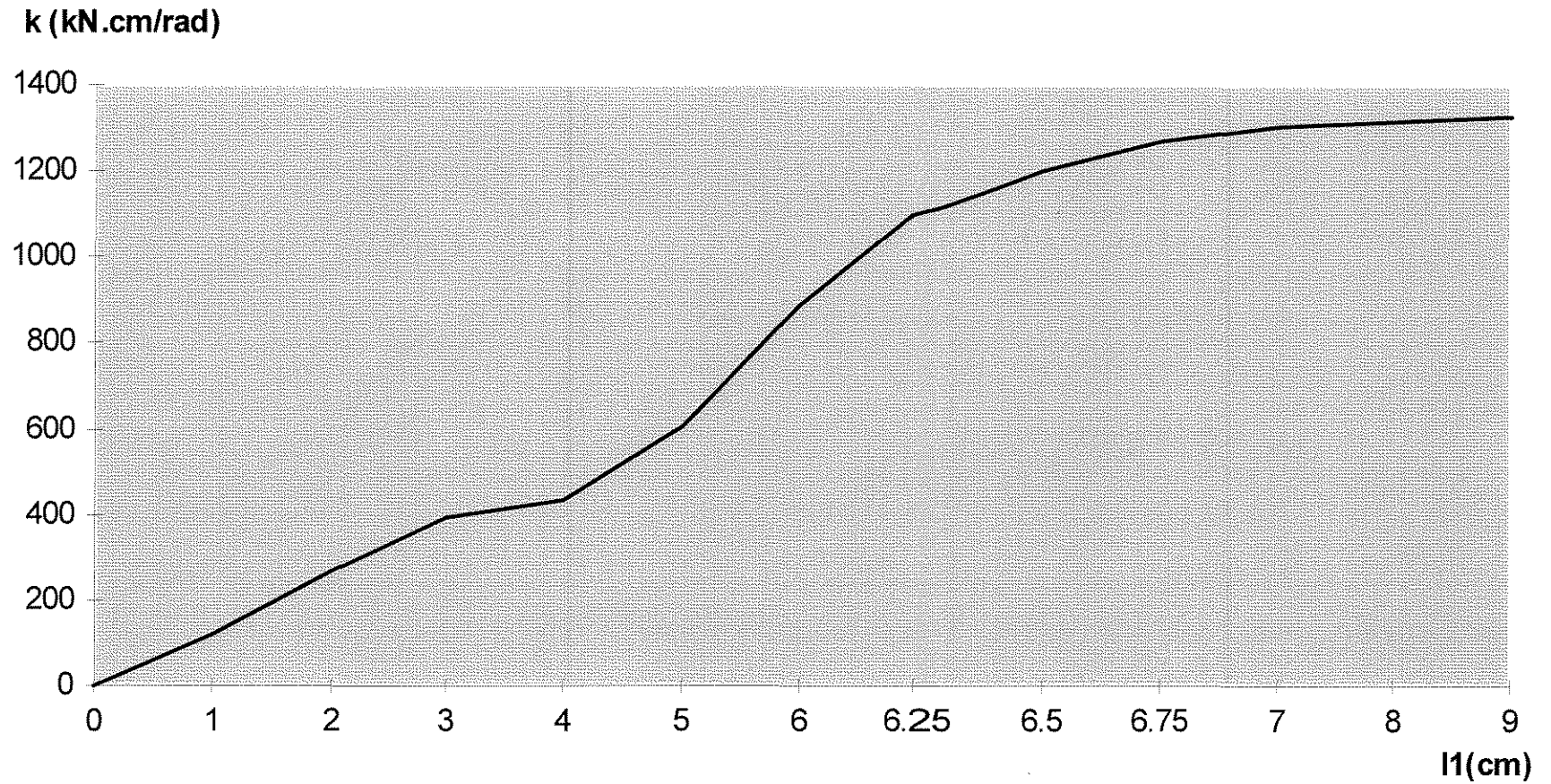
xi	yi	xi2	xiyi	a0 + a1x	n=	5
0	0	0	0	0.03033	a1 = 2.26958	9
0.12	0.3	0.0144	0.036	0.30268	a0 = 0.03033	3
0.23	0.6	0.0529	0.138	0.55233		
0.375	0.9	0.140625	0.3375	0.88142		
0.53	1.2	0.2809	0.636	1.23321		
		0	0	0.03033		
		0	0	0.03033		
		0	0	0.03033		
		0	0	0.03033		
		0	0	0.03033		
		0	0	0.03033		
1.255	3	0.488825	1.1475			



x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	$a_0 + a_1 x$	$n =$	5
0	0	0	0	0.04919	$a_1 = 2.50138$	6
0.09	0.3	0.0081	0.027	0.27432	$a_0 = 0.04919$	5
0.2	0.6	0.04	0.12	0.54947		2
0.341	0.9	0.11628	0.3069	0.90216		7
0.47	1.2	0.2209	0.564	1.22484		6
		0	0	0.04919		5
		0	0	0.04919		5
		0	0	0.04919		5
		0	0	0.04919		5
		0	0	0.04919		5
		0	0	0.04919		5
1.101	3	0.38528	1.0179			1

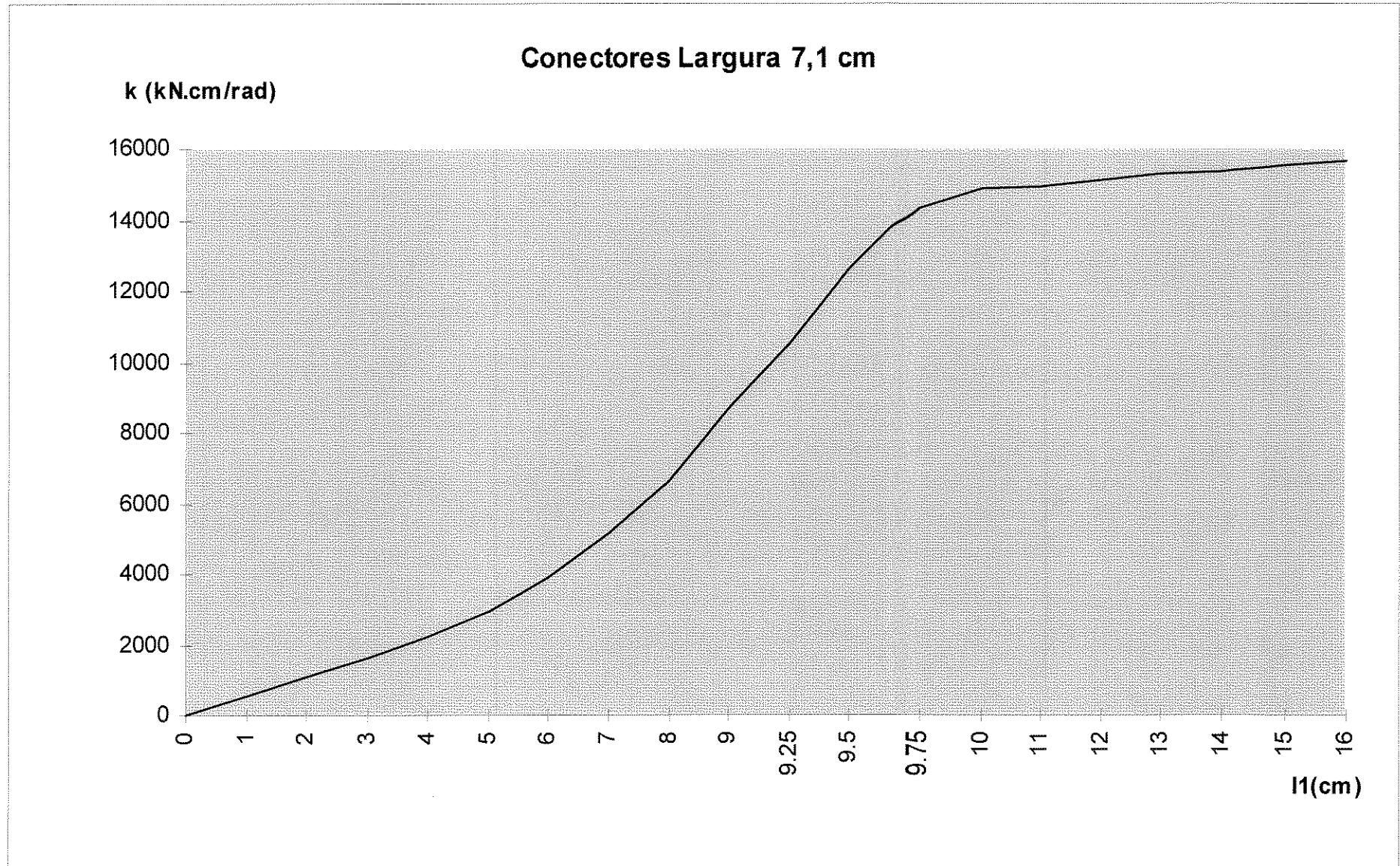


Conectores Largura 3,6 cm



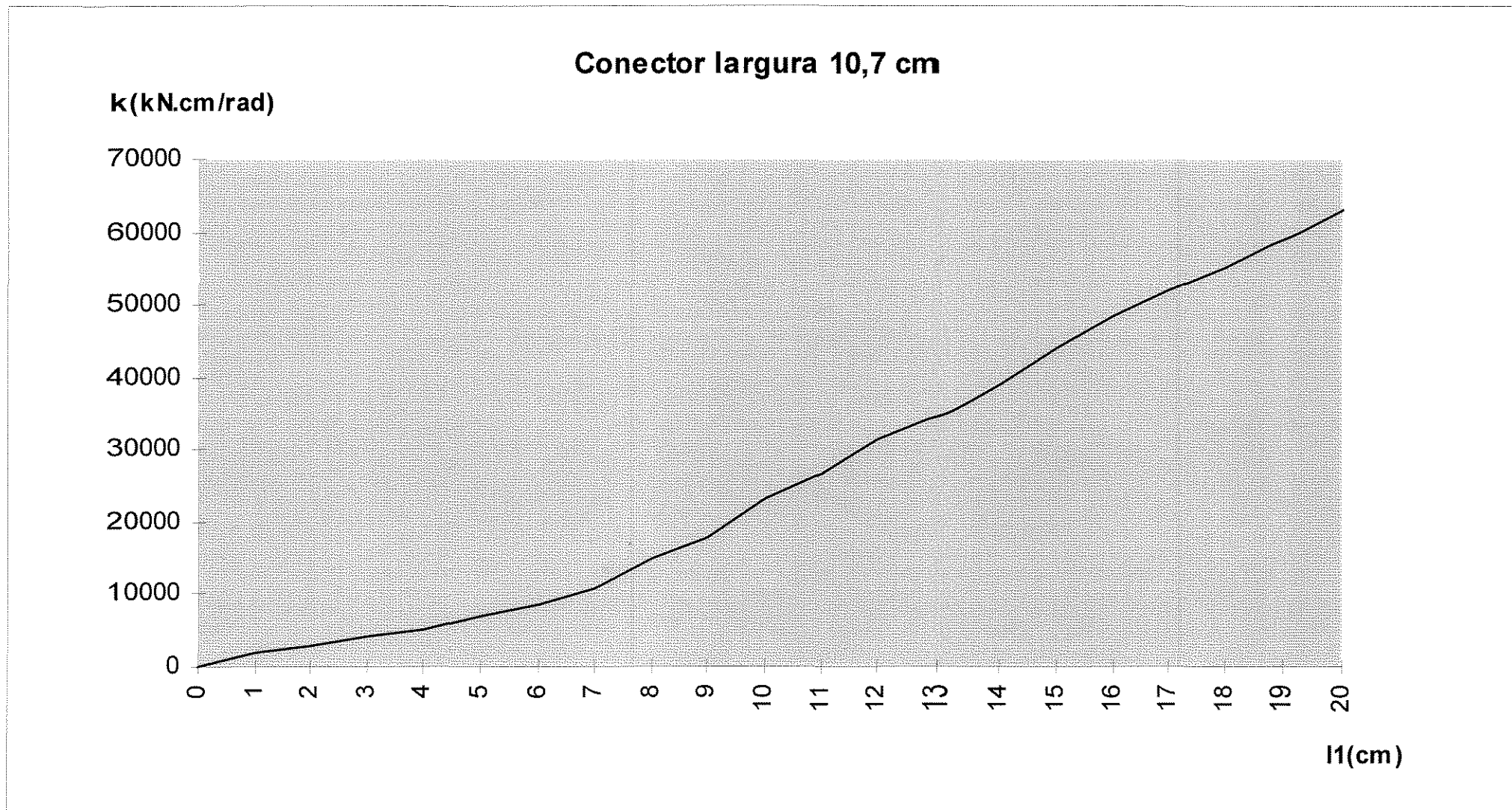
- Nomograma de valores de k para ligações de madeira Angico-Preto com conectores metálicos dentados Gang-Nail de largura 3,6 cm, pregados bilateralmente.

-Curvas para $\frac{a}{d} = 1$. Para situações intermediárias, interpolar. Vide figura 4.2.



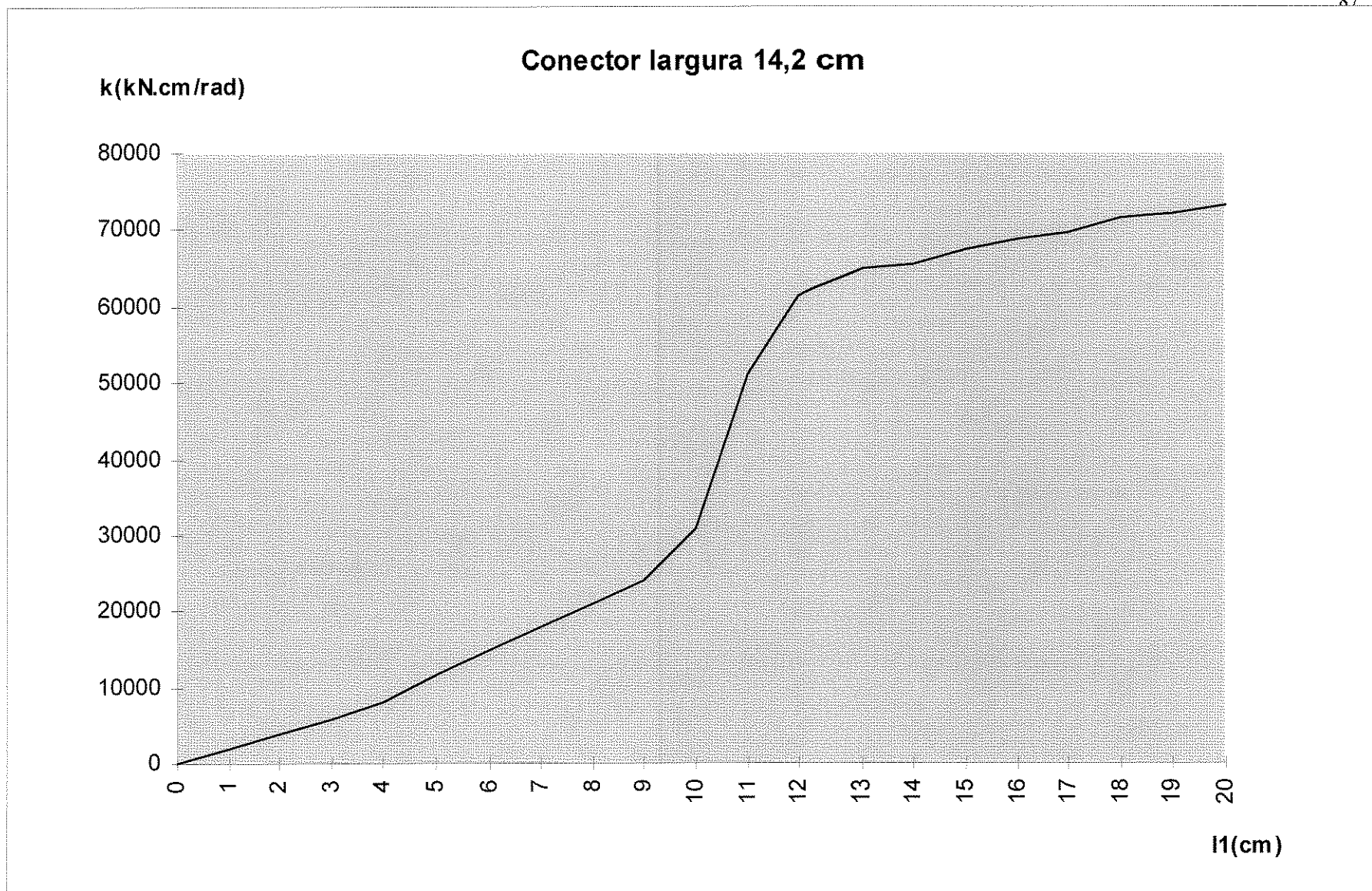
- Nomograma de valores de k para ligações de madeira Angico-Preto com conectores metálicos dentados Gang-Nail de largura 7,1 cm, pregados bilateralmente.

-Curvas para $\frac{a}{d} = 1$. Para situações intermediárias, interpolar. Vide figura 4.2.



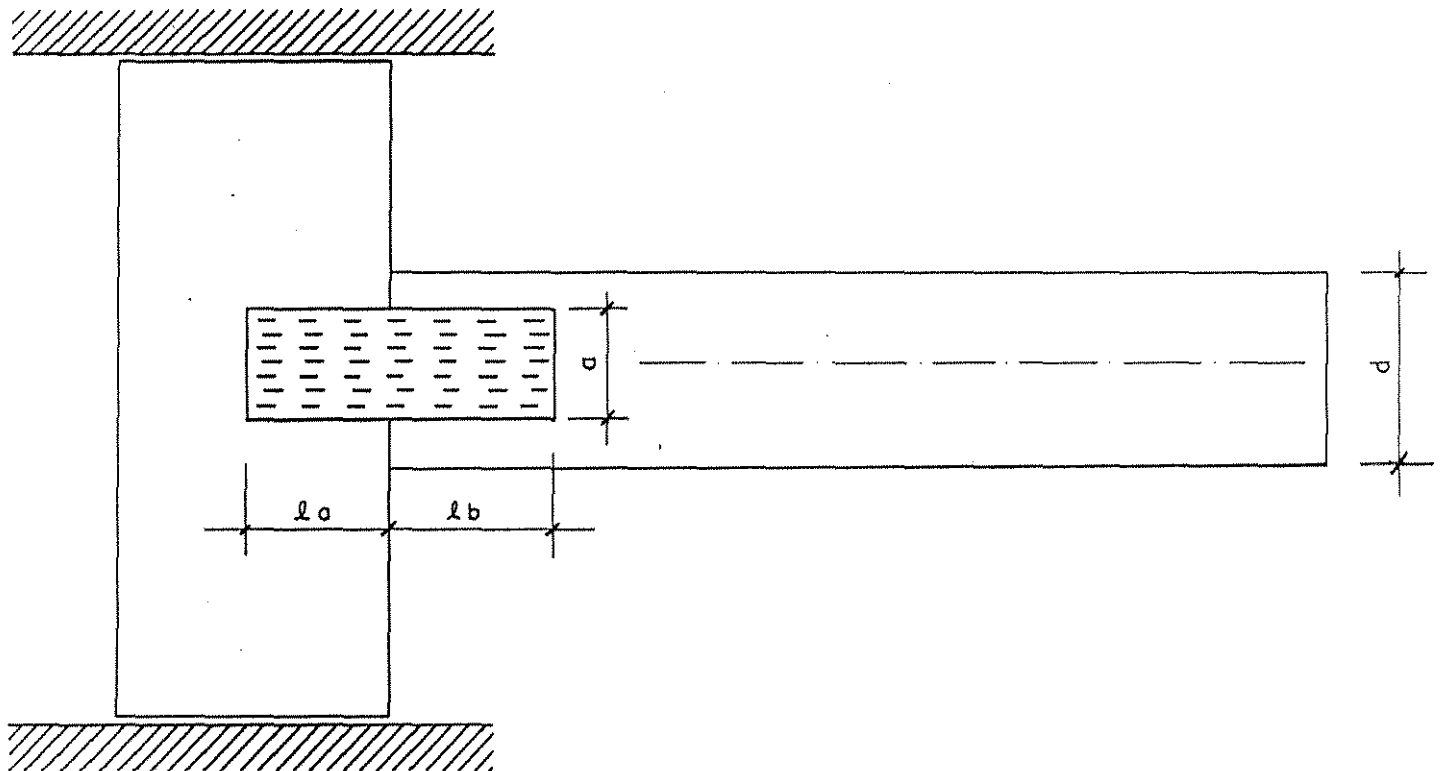
- Nomograma de valores de k para ligações de madeira Angico-Preto com conectores metálicos dentados Gang-Nail de largura 10,7 cm, pregados bilateralmente.

-Curvas para $\frac{a}{d} = 1$. Para situações intermediárias, interpolar.Vide figura 4.2.



- Nomograma de valores de k para ligações de madeira Angico-Preto com conectores metálicos dentados Gang-Nail de largura 14,2 cm, pregados bilateralmente.

-Curvas para $\frac{a}{d} = 1$. Para situações intermediárias, interpolar. Vide figura 4.2.



$$l_1 \leq l_a \text{ ou } l_b$$

onde :

l_1 é o comprimento a ser empregado nos nomogramas de valores de k .

Fig. 4.2 - Esquematização Básica de uma ligação de madeira usando chapas metálicas dentadas Gang-Nail.

Desta maneira, e de acordo com a equação (3.7), fazendo $b=a_1$, pode-se resumir os resultados nas tabelas seguintes :

TABELAS II - Os conectores metálicos dentados
e seus respectivos coeficientes de mola.

CONECTOR (cm x cm)	c**	k*
3,6 x 6,0	0,38	394
3,6 x 7,9	0,40	434
3,6 x 9,9	0,52	604
3,6 x 11,9	0,68	888
3,6 x 13,9	0,72	1305
3,6 x 17,9	0,76	1327

CONECTOR(cm x cm)	c**	k*
7,1 x 7,9	0,29	2200
7,1 x 9,9	0,35	2928
7,1 x 11,9	0,42	3860
7,1 x 13,9	0,49	5118
7,1 x 15,9	0,56	6640
7,1 x 17,9	0,62	8662
7,1 x 19,8	0,71	14846
7,1 x 25,8	0,73	15260
7,1 x 31,7	0,78	15616

CONECTOR (cm x cm)	c**	k*
10,7 x 11,9	0,32	8490
10,7 x 13,9	0,39	10885
10,7 x 15,9	0,45	15248
10,7 x 17,9	0,50	17598
10,7 x 19,8	0,55	23043
10,7 x 23,8	0,63	31458
10,7 x 29,8	0,65	40660
10,7 x 31,7	0,72	48415
10,7 x 39,7	0,77	63072

CONECTOR(cm x cm)	c**	k*
14,2 x 15,9	0,34	20870
14,2 x 19,8	0,45	29980
14,2 x 23,8	0,57	61322
14,2 x 31,7	0,62	56240
14,2 x 39,7	0,66	73000

* - em kN.cm/rad

** - obtidos experimentalmente p/uma barra em balanço submetida a uma carga concentrada na borda livre

4.4.2.4) ENSAIO DE UM PÓRTICO-TRELIÇA

Com o objetivo de verificar a compatibilidade entre o cálculo teórico e o valor real da flecha no meio do vão de um Pórtico-Treliça com a mesma geometria proposta na seção 3.2.6., construiu-se e ensaiou-se o mesmo no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. As barras foram ligadas com conectores metálicos dentados que produziram coeficientes k conforme mostra a figura 4.3. A seção das barras foi de $(4 \times 6,5) \text{ cm}^2$

Uma amostra da madeira utilizada para construção do Pórtico-Treliça foi ensaiada para obtenção do módulo de elasticidade à flexão, a qual acusou um resultado de $E = 1.100 \text{ kN/cm}^2$. No ensaio de teor de umidade verificou-se que esta amostra continha 18,65% de umidade, o que explica seu menor valor de módulo de elasticidade E em comparação com peças ensaiadas para obtenção de valores do c dos conectores metálicos dentados (seção 4.4.2.2.).

O Pórtico-Treliça foi ensaiado sob o pórtico metálico do Laboratório para que este assegurasse a estabilidade lateral do mesmo. Foram usadas sacas de cal hidratada, na taxa de $0,5 \text{ kN/m}$, para efetuar-se o carregamento nos banzos superiores, como mostra a foto 4.4.

O objetivo foi medir a flecha central da estrutura e compará-la com o resultado do Programa ENGNAIL.

Assim, os resultados foram :

Flecha verificada no ensaio : 15 mm, após 30 minutos de
aplicada a carga.

Flecha calculada pelo ENGNAIL : 15,5 mm.

A figura 4.3 e a foto 4.4 detalham a geometria do Pórtico-Treliça e mostram a caracterização do ensaio. As tabelas (III), (IV) e (V) mostram resultados obtidos com o programa para a simulação de ligações com todos os nós articulados (treliça convencional) com os nós parcialmente engastados (conceito de pórtico-treliça) e nós rigidamente ligados (pórtico plano).

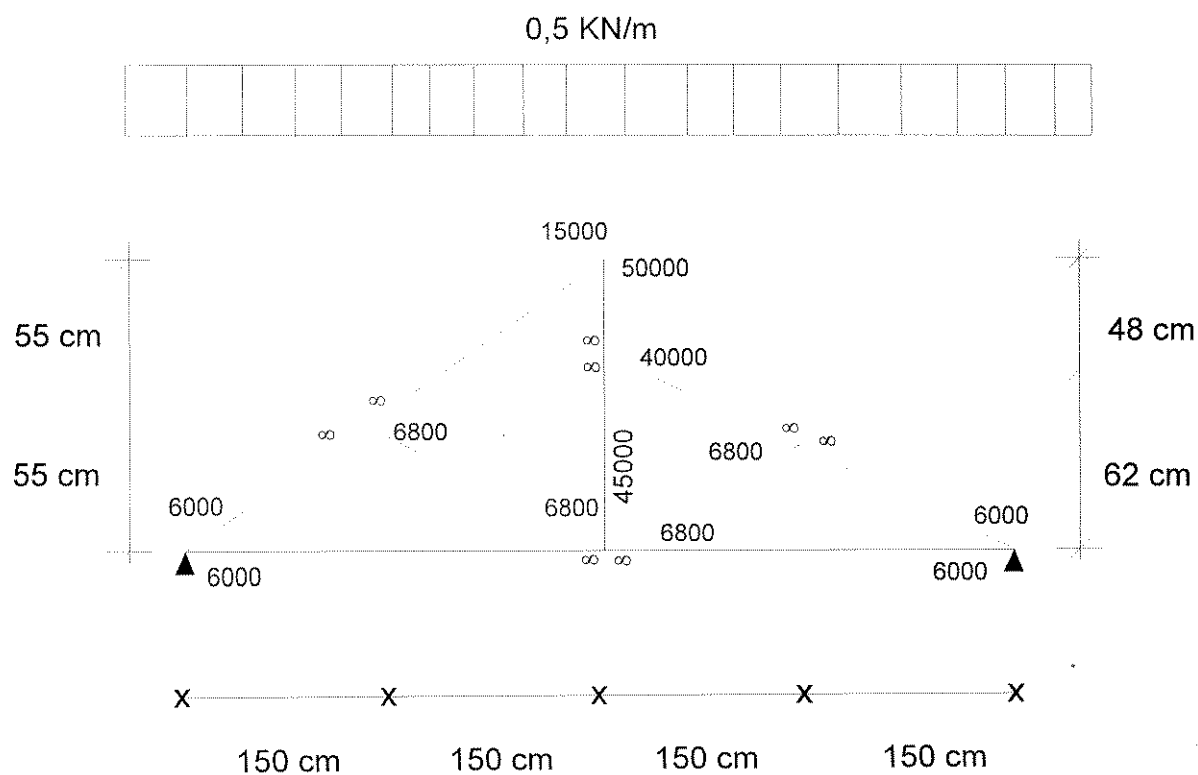


Figura 4.3- Pórtico-Treliça ensaiado, com os correspondentes k nas barras.

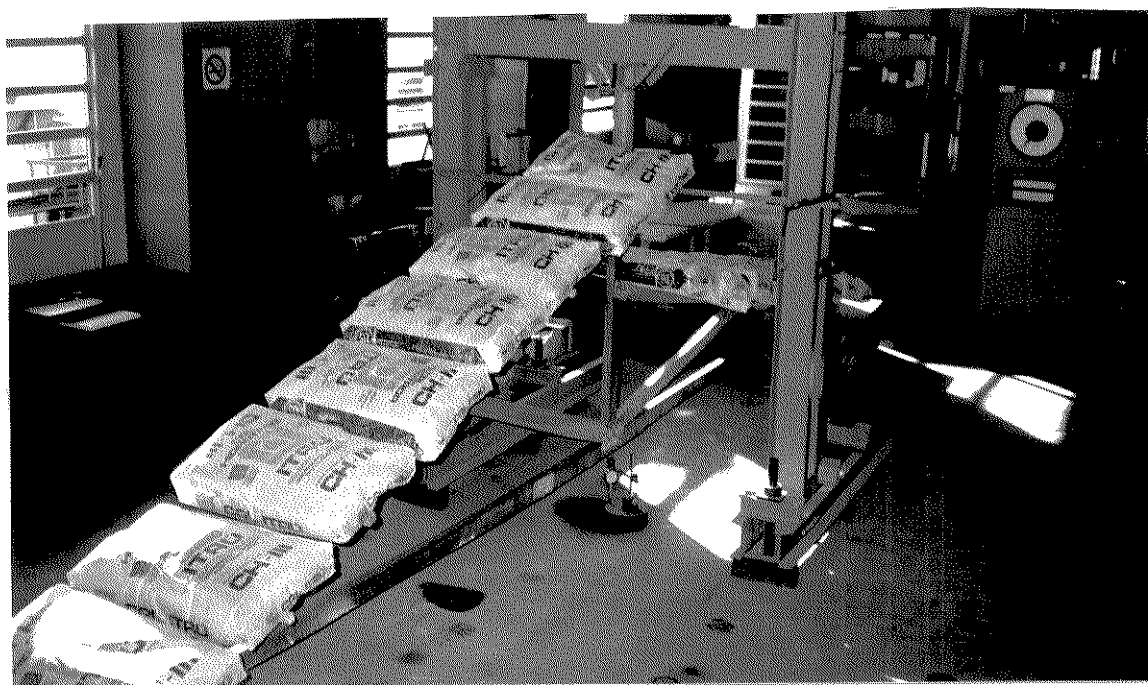


Foto 4.4- Ensaio do Pórtico-Treliça com a geometria proposta.

Deslocamentos dos Nos

	NO	DX	DY	DZ
1	0.000000	0.000000	-0.008670	
2	0.003807	-0.010788	-0.006634	
3	0.000246	-0.020358	0.000000	
4	-0.003136	-0.020347	-0.009772	
5	0.007214	-0.020347	-0.016904	
6	-0.001562	-0.011992	0.006367	
7	0.000683	0.000000	0.009072	

Acoes finais nas extremidades das barras

BARRA	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6
1	-2989.148667	28.979478	0.001510	2989.148667	-28.979478	86.936923
2	-5303.343954	-28.975256	-86.924660	5303.343954	28.975256	-0.001107
3	3183.751048	-0.000616	-0.001510	-3183.751048	0.000616	0.000525
4	089.304913	0.003849	-0.000243	-1089.304913	-0.003849	0.006392
5	-692.043003	-1522.3727	-0.013068	692.043003	1522.372708	-943.858
6	1852.891323	-0.003139	-0.005587	-1852.891323	0.003139	0.000779
7	5415.415712	-0.000320	-0.001597	-5415.415712	0.000320	0.001107
8	2094.442464	-0.006782	-0.000283	-2094.442464	0.006782	-0.010552
9	28.984810	1966.42475	943.873332	-28.984810	-1966.42476	0.010552
10	3562.525631	-0.009469	-0.015321	-3562.525631	0.009469	0.000818

Reacoes de Apoio

NO	RX	RY	RZ
1	0.000000	1499.999999	0.000000
7	-0.000000	1499.999999	-0.000000

Tabela (III)

Resultados obtidos (em N e m) através do programa Engnail considerando as barras da estrutura da fig. 4.3 como articuladas.

Deslocamentos dos Nos

NO	DX	DY	DZ
1	0.000000	0.000000	-0.007853
2	0.002913	-0.008341	-0.003987
3	0.000240	-0.015513	0.003726
4	-0.002132	-0.015501	-0.006029
5	0.005441	-0.015503	-0.017070
6	-0.001067	-0.009631	0.006452
7	0.000686	0.000000	0.006141

Acoes finais nas extremidades das barras

BARRA	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6
1	-2907.78608	41.911841	7.843512	2907.786	-41.911841	117.892010
2	-5416.11722	-5.618855	-17.958079	5416.117	5.618855	1.101514
3	3102.90962	15.866942	-7.843512	-3102.909	-15.866942	33.193403
4	946.500717	34.757019	9.350317	-946.5007	-34.757019	46.179392
5	-682.597192	-1339.463927	-146.44642	682.5971	1339.46392	-684.02120
6	2115.080580	9.039681	0.333103	-2115.080	-9.039681	13.512962
7	5530.582239	-0.049212	1.026136	-5530.582	0.049212	-1.101514
8	2100.092102	-102.967323	-42.543720	-2100.092	102.967323	-121.96249
9	123.707113	2007.173715	841.480893	-123.7071	-2007.1737	121.962490
10	3440.566878	-112.292853	-157.45968	-3440.566	112.292853	-14.539098

Reacoes de Apoio

NO	RX	RY	RZ
1	0.000000	1500.000000	0.000000
7	0.000000	1500.000000	0.000000

Tabela (IV)

Resultados obtidos (em N e m) através do programa Engnail considerando as barras da estrutura da figura 4.3 como parcialmente engastadas (Pórtico-Treliça).

Deslocamentos dos Nos

	NO	DX	DY	DZ
1		0.000000	0.000000	-0.005512
2		0.002173	-0.006330	-0.002962
3		0.000245	-0.011468	0.002228
4		-0.001299	-0.011458	-0.003780
5		0.003957	-0.011462	-0.012014
6		-0.000646	-0.007583	0.004511
7		0.000686	0.000000	0.005058

Acoes finais nas extremidades das barras

BARRA	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6
1	-2975.2121	37.240903	2.812489	975.212162	-37.240903	88.910219
2	-5350.8893	-3.071753	-16.694003	5350.88936	3.071753	7.478744
3	3167.8223	-2.959367	-22.812489	3167.82236	2.959367	18.084443
4	931.147585	184.75301	105.97661	-931.14758	-184.75301	189.194872
5	-572.95934	-1306.316	-280.8381	572.959345	1306.31586	-529.077750
6	2060.00714	50.296982	19.426999	-2060.0071	-50.296982	57.612808
7	5467.21977	-15.74505	-16.637922	-5467.2197	15.745049	-7.478744
8	2079.75776	-246.1618	-124.06106	-2079.7577	246.161845	-269.220526
9	265.149249	2037.3776	708.72075	-265.14925	-2037.3776	269.220526
10	3444.12055	-144.0348	-179.64300	-3444.1205	144.034810	-40.974886

Reacoes de Apoio

	NO	RX	RY	RZ
1		0.000000	1499.999999	-0.000000
7		0.000000	1499.999999	-0.000000

Resultados obtidos (em N e m) através do programa Engnail considerando as barras da estrutura da fig. 4.3 como rigidamente engastadas (Pórtico Plano).

4.4.2.5) ENSAIO DE UMA BARRA BI-ENGASTADA PARCIALMENTE

O objetivo deste ensaio foi medir as rotações nos dois apoios parcialmente engastados de uma barra de madeira ANGICO-PRETO, ligada a dois pilares, desta mesma madeira, através de conectores metálicos dentados.

Os resultados obtidos foram comparados com os cálculos extraídos do Programa ENGNAIL que simulou a situação do ensaio.

Os conectores usados foram de 7,1 x 15,9 cm num apoio e 3,6 x 11,9 cm no outro. A seção da barra foi de 4,0 x 7,0 cm

No ensaio para obtenção do Módulo de Elasticidade da madeira utilizada foi obtido um resultado de $E = 1.523 \text{ kN/cm}^2$, com um teor de umidade de 9,87%.

Como carregamento, usou-se sacas de cal na forma de uma carga concentrada no meio do vão. Uma saca de cal representa uma carga de 0,2 kN, e a barra foi ensaiada com uma, depois duas e depois três sacas, como mostra a foto 4.5.

Para cada carregamento leu-se os giros nos apoios e a flecha no meio do vão, calculando-se posteriormente os k efetivos deste ensaio em cada apoio. Rodando o Programa ENGNAIL com dados como seção e comprimento da barra, E da madeira, tamanho e posição dos conectores com seus respectivos k calculados pelo Nomograma, e carregamento no nó central, chegou-se às rotações teóricas calculadas pelo Programa.

A TABELA VI compara os valores teóricos e experimentais dos coeficiente de rigidez k para os dois tamanhos de conector.

TABELA VI

Conector	k teórico (kN.cm/rad)	k do ensaio (kN.cm/rad)
7,1 x 15,9	6640	6900
3,6 x 11,9	477	500

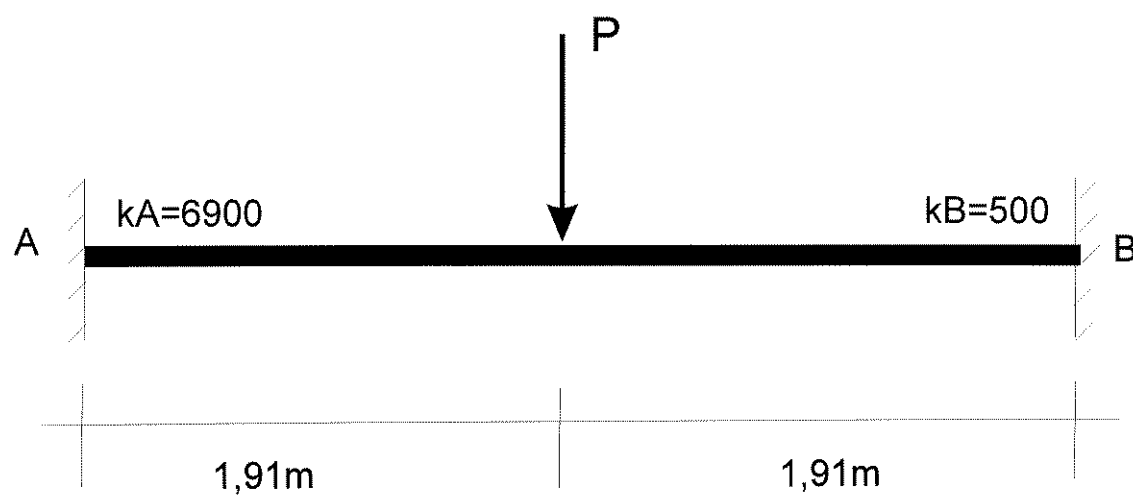


Fig. 4.4 - Esquema do ensaio usando uma barra bi-engastada parcialmente e seus k .

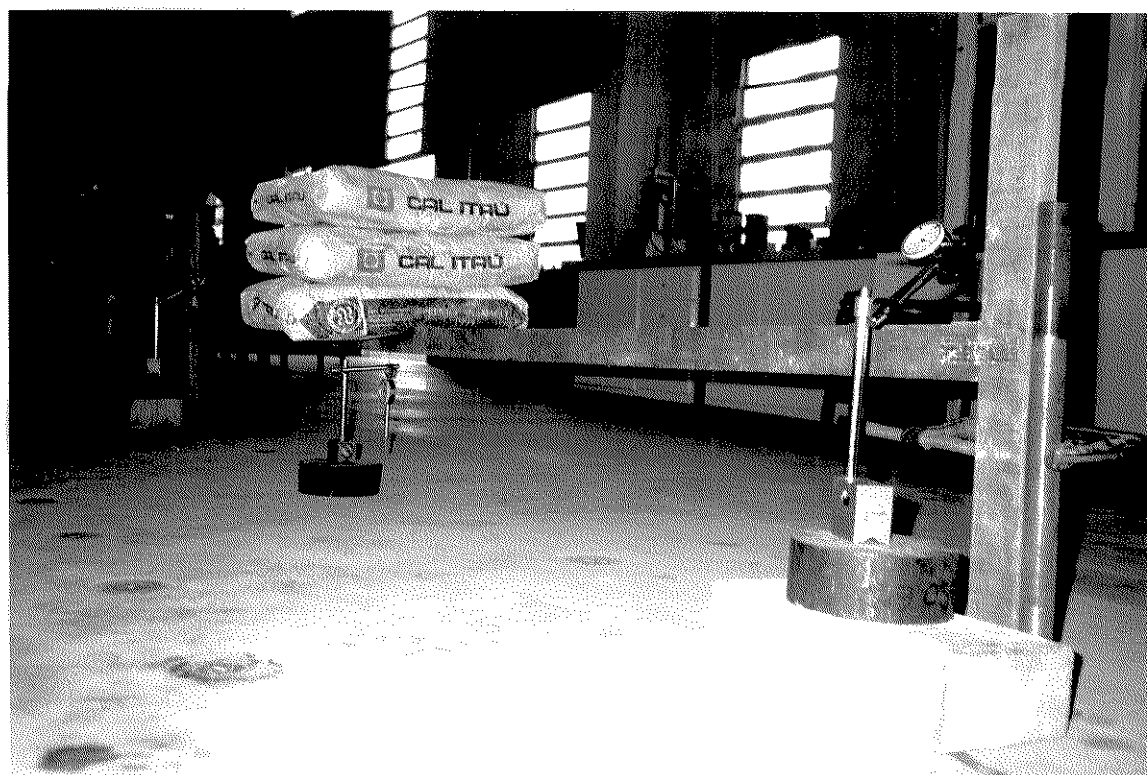


Foto 4.5 - Ilustração do ensaio.

5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Definidos os objetivos deste trabalho (seção 1.2), procurou-se através de estudos teóricos e de ensaios, concretizá-los.

De acordo com os ensaios usando a madeira ANGICO-PRETO (*Anadenanthera macrocarpa*) e para cada tamanho de conector metálico dentado produzido pela Gang-Nail do Brasil Ind. Com. Ltda., obteve-se um coeficiente de rigidez da ligação k correspondente, e assim, construiu-se um Nomograma para utilização prática das ligações com estes materiais, segundo a posição e tamanho do conector. Através deste Nomograma pode-se obter valores correspondentes de k das ligações e utilizá-los no Programa ENGNAIL para cálculo de esforços e deslocamentos em Pórticos-Treliça.

Posteriormente, através de ensaios de um Pórtico-Treliça e uma viga bi-engastada parcialmente, buscou-se a comprovação dos resultados dos ensaios dos conectores, e de seus respectivos k , tendo como consequência a aferição dos Nomograma. De acordo com estes ensaios verificou-se que as diferenças entre os resultados práticos e teóricos foram suficientemente aceitáveis, o que valida as proposições apresentadas.

No tocante à assimetria criada no Pórtico-Treliça destinado a estruturas de cobertura, verificou-se, através de ensaios, que a abertura ideal do lanternim deve ser em torno de 8% do vão do Pórtico-Treliça para que haja uma sensível melhoria do conforto térmico do ambiente. Devido à sua geometria peculiar, certos cuidados devem ser tomados principalmente no dimensionamento e nas ligações do pendural.

A preocupação com o conforto térmico é absolutamente necessária e facilmente exequível, o que, sem dúvida, melhora as qualidades das estruturas de cobertura.

Espera-se, como perspectiva, que este trabalho venha colaborar na literatura atinente, bem como encorajar usuários de treliças de madeira a trabalhar com "Pórticos-Treliça", visto que o incremento na rigidez das

ligações nas treliças pode trazer benefícios em muitos aspectos, tais como resistência e economia.

A indústria da madeira no Brasil precisa modernizar-se, na acepção humanista da palavra. Isto significa utilizar-se dela não usurariamente, mas dentro de conceitos que eternizem seu uso, e renovem suas fontes.

A técnica pode colaborar neste objetivo. Esta foi a intenção deste trabalho.

Bibliografia

1. ASHRAE, 1985. Handbook of fundamentals. American Society of Heating and Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
2. BELLUZZI, Odone. Ciencia de la construccion I. 1 ed. Madrid. Aguilar S/A de Ediciones, 1977. 666p.
3. BJORHOVDE, COLSON, BROZZETTI. Classification system for beam-to-column connections. Journal of Structural Engineering. New York. vol 116, number 11, 3059-3076, november 1990.
4. FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. Manual de conforto térmico. Livraria Nobel S/A - 1988, 228p.
5. GANG-NAIL do Brasil Indústria e Comércio LTDA. Sistema GANG-NAIL para estruturas de madeira - Manual para engenheiros. São Paulo 1994.
6. GOLDENHORN, Simon. Calculista de Estructuras. 15ed. Buenos Aires. Editorial H.F. Martinez de Murguía S.A. C. y E. 1978. 635p.
7. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. 2ed. São Paulo. IPT. 1989. 418p.
8. MACINTYRE, Archibald Joseph. Ventilação industrial e controle da poluição. 2ed. Rio de Janeiro. Editora Guanabara Koogan S.A.. 1990. 403p.
9. MERRIT, Frederick S. Building construction handbook. 3ed. New York. McGraw Hill Book Company. 1975.
10. MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. Engenharia de ventilação industrial. 2ed. São Paulo. ASCETESB, 1985. 442p.
11. NÄÄS, Irenilza de Alencar. Princípios de conforto térmico na produção animal. 1ed. São Paulo. Ícone Editora LTDA, 1989. 183p.
12. NÄÄS, I.A.; BUCKLIN, R.A.; ZAZUETA, F.S.; ROSSI, L.A.; SYDENSTRICKER, K; MOURA, D.J. Natural ventilation model for dairy housing. 3ª International Dairy Hoosing Conference. American Society Agric Engineers, 1994. Orlando, USA 9 pág.
13. NETTO, José de Almendra Freitas; VIEIRA, Inaldo Ayres. Análise matricial de estruturas - volume 2. 1ed. Curitiba, Edição dos Autores 1973. 175p.
14. SIDERBRÁS - Siderurgia Brasileira S.A. Ligações em estruturas metálicas - volume 2. 1ed, Brasília. Edição da Empresa, 1988. 75p.
15. TRICHE, M.H; SUDDARTH, S.K. Advanced design of metal plate connector joints. Forest Products Journal. West Lafayette. Vol 38 nº 9. 7-12. September ,1988.
16. TRUSS PLATE INSTITUTE, Inc. TPI-78 - Design specification for metal plate connected wood trusses. Glenview, 1978. 35p.

17. UJVARI, Walter Zago. Ligações em madeira, feitas com conectores dentados "GANG-NAIL". 1º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Universidade de São Paulo, 1983. São Carlos. Volume II - Ligações. 25p.

APÊNDICE

Programa ENGNAIL.PAS

```

program ttt;
uses crt;

const
tol = 1.0e-12;
nnmax = 32;
nbmax = 50;

type
matriz3nnx3nn = array [1..3*nnmax,1..3*nnmax] of real;
vetor3nn = array [1..3*nnmax] of real;
matriz6x6 = array [1..6,1..6] of real;
matriz3x3 = array [1..3,1..3] of real;
vetor6 = array[1..6] of real;
element = record
    e,iz,ax,l,ke,kd,cx,cy : real;
    ni,nf: integer;
    aml: array[1..6] of real;
end;
joint = record
    X,y : real;
    rx,ry,rz : integer;
    fx,fy,fz,dx,dy,dz : real;
end;

var
ch: char;
ie,is:text;
nome:string;
c1,c2,dx,dy : real;
jj,kk,i,j,k,jg,kg : integer;
tipo : integer;
sm,smd : matriz6x6;
nn,nb,nnr,nnnc,ntcb,p,a : integer;
nos : array [1..nnmax] of joint;
barras: array [1..nbmax] of element;
ae,at : vetor3nn;
s : matriz3nnx3nn;
j1,j2,j3,k1,k2,k3 : integer;
ind: array [1..6] of integer;
dl : array [1..6] of real;
procedure inicializacao_de_variaveis;
var
i,j:integer;
begin
for i:=1 to nn do
with nos[i] do
begin
rx:=0; ry:=0; rz:=0;
fx:=0.0; fy:=0.0; fz:=0.0;
end;
for i:=1 to nb do
with barras[i] do
for j:=1 to 6 do aml[j]:=0.0;
for i:=1 to 3*nn do
ae[i]:=0.0;
for i:=1 to 3*nn do
for j:=1 to 3*nn do
s[i,j]:=0.0;
end;

procedure flexibilidade_balanco(e,iz,ax,l,ke,kd:real; var f:matriz3x3);
begin {inicio da rotina flexibilidade do balanco}
f[1,1]:= l/(e*ax); f[1,2]:= 0.0; f[1,3]:= 0.0;
f[2,1]:= 0.0; f[2,2]:= l*I*I/(3*e*iz)+l*I/kd; f[2,3]:=-l*I/(2*e*iz)-l/kd;

```



```
f[3,1]:= 0.0; f[3,2]:= -l*(2*e*iz) - l/kd; f[3,3]:= l/(e*iz)+1/ke+1/kd;
end; {final da rotina flexibilidade do balanço}
```

```
procedure matriz_de_equilibrio(l:real;var t:matriz3x3);
begin {início da rotina que calcula a matriz de equilíbrio}
  t[1,1]:= -1; t[1,2]:= 0.0; t[1,3]:= 0.0;
  t[2,1]:= 0.0; t[2,2]:= -1.0; t[2,3]:= 0.0;
  t[3,1]:= 0.0; t[3,2]:= l; t[3,3]:= -1.0;
end; {final da rotina que calcula a matriz de equilíbrio}
```

```
procedure rigidez_barra_local(e,iz,ax,l,ke,kd:real; var s:matriz6x6);
var
  sjj,skj,sjk,skk,t:matriz3x3;
  i,j,k : integer;
```

```
procedure rigidez_balanço(e,iz,ax,l,ke,kd:real; var sjj:matriz3x3);
var
  f:matriz3x3;
  d: real;
  var j,k :integer;
```

```
begin {início da rotina rigidez do balanço}
  flexibilidade_balanço(e,iz,ax,l,ke,kd,f);
  d:=f[2,2]*f[3,3]-f[2,3]*f[3,2];
  sjj[1,1]:=e*ax/l; sjj[1,2]:=0.0; sjj[1,3]:= 0.0;
  sjj[2,1]:=0.0; sjj[2,2]:= f[3,3]/d; sjj[2,3]:=-f[3,2]/d;
  sjj[3,1]:=0.0; sjj[3,2]:=-f[2,3]/d; sjj[3,3]:= f[2,2]/d;
end; {final da rotina rigidez do balanço}
```

```
begin {início da rotina rigidez da barra}
  rigidez_balanço(e,iz,ax,l,ke,kd,sjj);
  matriz_de_equilibrio(l,t);
  {cálculo da sub-matriz [skj]=[t][sjj]}
  for j:=1 to 3 do
    for k:=1 to 3 do
      begin
        skj[j,k]:=0.0;
        for i:=1 to 3 do
          skj[j,k]:=skj[j,k]+t[j,i]*sjj[i,k];
        end;
      {cálculo da sub-matriz [sjk]=[skj]' ([sjk]' e' a transposta de [skj])}
      for j:=1 to 3 do
        for k:=1 to 3 do
          sjk[j,k]:=skj[k,j];
        {cálculo da sub-matriz [skk]=[t][sjk]}
        for j:=1 to 3 do
          for k:=1 to 3 do
            begin
              skk[j,k]:=0.0;
              for i:=1 to 3 do
                skk[j,k]:=skk[j,k]+t[j,i]*sjk[i,k];
              end;
            {montagem da matriz de rigidez da barra}
            for j:=1 to 3 do
              for k:=1 to 3 do
                begin
                  s[j,k]:=sjj[j,k];
                  s[j+3,k]:=skj[j,k];
                  s[j,k+3]:=sjk[j,k];
                  s[j+3,k+3]:=skk[j,k];
                end;
              {final da rotina que calcula a rigidez da barra no sistema local}
```

```
procedure rigidez_barra_global(e,iz,ax,l,ke,kd,cx,cy:real; var smd:matriz6x6);
var
  i,j,k : integer;
  r,aux,sm : matriz6x6;
begin
  for i:=1 to 6 do
    for j:=1 to 6 do
```

```

    r[i,j]:=0.0;
    r[1,1]:= cx; r[1,2]:=cy;
    r[2,1]:=-cy; r[2,2]:=cx;
    r[3,3]:=1;
    r[4,4]:= cx; r[4,5]:=cy;
    r[5,4]:=-cy; r[5,5]:=cx;
    r[6,6]:=1;
    rigidez_barra_local(e,iz,ax,l,ke,kd,sm);
    for i:=1 to 6 do
    for j:=1 to 6 do
    begin
    aux[i,j]:=0.0;
    for k:=1 to 6 do
    aux[i,j]:=aux[i,j]+sm[i,k]*r[k,j];
    end;
    for i:=1 to 6 do
    for j:=1 to 6 do
    begin
    smd[i,j]:=0.0;
    for k:=1 to 6 do
    smd[i,j]:=smd[i,j]+r[k,i]*aux[k,j];
    end;
    end;{final da subrotina que calcula a matriz de rigidez da barra
    no sistema global}

```

procedure engastamento_elastico_carga_uniformemente_distribuida
 (var barra:element; p:real);

```

var
    d,mb,mparab,d20,d30:real;
    f:matriz3x3;
    i : integer;
    ee : vetor6;
begin
    with barra do
    begin
    mb:=p*l/2.0;
    mparab:=mb/4;
    d20:=l/e/iz/3*mb*l - l/e/iz/3*mparab*l + mb*l/kd;
    d30:=-l/e/iz/2*mb + l*2/e/iz/3*mparab - mb/kd;
    flexibilidade_balanco(e,iz,ax,l,ke,kd,f);
    d:=f[2,2]*f[3,3]-f[2,3]*f[3,2];
    ee[1]:=0;
    ee[2]:= (-d20*f[3,3]+d30*f[2,3])/d;
    ee[3]:= (-d30*f[2,2]+d20*f[3,2])/d;
    ee[4]:=0;
    ee[5]:=-ee[2]-p*l;
    ee[6]:= ee[2]*l-ee[3]+p*l/2;
    for i:=1 to 6 do
    aml[i]:=aml[i]+ee[i];
    end;
    end;
end;

```

procedure engastamento_elastico_carga_concentrada
 (var barra:element; p,a:real);

```

var
    d,mb,m1,m2,d20,d30:real;
    f:matriz3x3;
    i : integer;
    ee : vetor6;
begin
    with barra do
    begin
    mb:=p*(l-a);
    m1:=a;
    m2:=l;
    d20:= (l-a)/e/iz/6*mb*(2*m2+m1) + mb*l/kd;
    d30:=- (l-a)/e/iz/2*mb - mb/kd;
    flexibilidade_balanco(e,iz,ax,l,ke,kd,f);
    d:=f[2,2]*f[3,3]-f[2,3]*f[3,2];
    ee[1]:=0;

```

```

ee[2]:= (-d20*f[3,3]+d30*f[2,3])/d;
ee[3]:= (-d30*f[2,2]+d20*f[3,2])/d;
ee[4]:=0;
ee[5]:=-ee[2]-p;
ee[6]:= ee[2]*l-ee[3]+p*(l-a);
for i:=1 to 6 do
  aml[i]:=aml[i]+ee[i];
end;
end;

```

```

procedure engastamento_elastico_momento_concentrado
  (var barra:element; m,a:real);

```

```

var
  d,mb,m1,m2,d20,d30:real;
  f:matriz3x3;
  i : integer;
  ee : vetor6;
begin
  with barra do
    begin
      mb:=m;
      m1:=a;
      m2:=l;
      d20:= -(l-a)/e/iz/2*mb*(m1+m2) - mb*l/kd;
      d30:= (l-a)/e/iz*mb + mb/kd;
      flexibilidade_balanco(e,iz,ax,l,ke,kd,f);
      d:=f[2,2]*f[3,3]-f[2,3]*f[3,2];
      ee[1]:=0;
      ee[2]:=(-d20*f[3,3]+d30*f[2,3])/d;
      ee[3]:=(-d30*f[2,2]+d20*f[3,2])/d;
      ee[4]:=0;
      ee[5]:=-ee[2];
      ee[6]:= ee[2]*l-ee[3] - m;
      for i:=1 to 6 do
        aml[i]:=aml[i]+ee[i];
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

procedure cholesky(n:integer;var A:matriz3nnx3nn;var B:vetor3nn);

```

```

var
  i,j,k:integer;
  soma,temp : real;
begin
  for j:=2 to n do
    begin
      if (j-1) <> 1
      then
        for i:=2 to (j-1) do
          begin
            soma:=A[i,j];
            for k:=1 to (i-1) do
              soma:= soma - A[k,i]*A[k,j];
            A[i,j]:=soma;
          end;
        soma:=A[j,j];
        for k:=1 to (j-1) do
          begin
            temp:=A[k,j]/A[k,k];
            soma:=soma-temp*A[k,j];
            A[k,j]:=temp;
          end;
        if soma <=0.0
        then
          begin
            writeln('matriz de rigidez singular');
            halt;
          end;
        A[j,j]:=soma;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

for i:=1 to n do
begin
soma:=B[i];
if i <> 1
then
for k:=1 to (i-1) do
soma:=soma-A[k,i]*B[k];
B[i]:=soma;
end;
for i:=1 to n do
B[i]:=B[i]/A[i,i];
for j:=1 to n do
begin
i:=n-j+1;
soma:=B[i];
if i<>n
then
for k:=(i+1) to n do
soma:=soma-A[i,k]*B[k];
B[i]:=soma;
end;
end;
end;

begin {inicio do programa principal}
clrscr;
write('nome do arquivo=');readln(nome);
assign(ie,nome+'.dat');reset(ie);
assign(is,{nome+'.res'}'con');rewrite(is);
{leitura e inicializacao dos parametros basicos}
readln(ie,nn,nb,nnr,nnc,ntcb);
inicializacao_de_variaveis;
{leitura das coordenadas dos nos}
for i:=1 to nn do
read(ie,j,nos[j].x,nos[j].y);
{leitura das restricoes de nos com algum deslocamento impedido}
for i:=1 to nnr do
readln(ie,j,nos[j].rx,nos[j].ry,nos[j].rz);
{leitura e calculo dos dados sobre as barras}
for i:=1 to nb do
begin
read(ie,j);
with barras[j] do
begin
readln(ie,ni,nf,e,iz,ax,ke,kd);
dx:=nos[nf].x - nos[ni].x;
dy:=nos[nf].y - nos[ni].y;
l:=sqrt(dx*dx+dy*dy);
cx:=dx/l;
cy:=dy/l;
end;
end;
{leitura de cargas nos nos}
if nnc > 0 then
for i:=1 to nnc do
begin
read(ie,j);
with nos[j] do readln(ie,fx,fy,fz)
end;
{leitura das cargas nas barras}
if ntcb > 0 then
begin
for i:=1 to ntcb do
begin
read(ie,j,tipo);
begin
case tipo of
1:{uniformemente distribuida - positiva se no sentido do eixo 2 da barra}
begin
readln(ie,p);
engastamento_elastico_carga_uniformemente_distribuida(barras[j],p);

```

```

    end;
2:{concentrada - positiva se no sentido do eixo 2 da barra}
begin
    readln(ie,p,a);
    engastamento_elastico_carga_concentrada(barras[j],p,a);
end;
3:{momento concentrado - positivo se anti-horario}
begin
    readln(ie,p,a);
    engastamento_elastico_momento_concentrado(barras[j],p,a);
end;
end;
end;
end;

{acoes nodais equivalentes}
for i:=1 to nb do
    with barras[i] do
        begin
            ind[1]:=3*ni-2; ind[2]:=ind[1]+1; ind[3]:=ind[2]+1;
            ind[4]:=3*ni-2; ind[5]:=ind[4]+1; ind[6]:=ind[5]+1;
            ae[ind[1]]:=ae[ind[1]]-aml[1]*cx + aml[2]*cy;
            ae[ind[2]]:=ae[ind[2]]-aml[1]*cy - aml[2]*cx;
            ae[ind[3]]:=ae[ind[3]]-aml[3];
            ae[ind[4]]:=ae[ind[4]]-aml[4]*cx + aml[5]*cy;
            ae[ind[5]]:=ae[ind[5]]-aml[4]*cy - aml[5]*cx;
            ae[ind[6]]:=ae[ind[6]]-aml[6];
        end;
    end;
{acoes totais na estrutura}
for i:=1 to nn do
    begin
        at[3*i-2]:=ae[3*i-2]+nos[i].fx;
        at[3*i-1]:=ae[3*i-1]+nos[i].fy;
        at[3*i ]:=ae[3*i ]+nos[i].fz;
    end;
{montagem da matriz de rigidez da estrutura}
for i:=1 to nb do
    with barras[i] do
        begin
            rigidez_barra_global(e,iz,ax,l,ke,kd,cx,cy,smd);
            ind[1]:=3*ni-2; ind[2]:=ind[1]+1; ind[3]:=ind[2]+1;
            ind[4]:=3*ni-2; ind[5]:=ind[4]+1; ind[6]:=ind[5]+1;
            for j:=1 to 6 do
                for k:=1 to 6 do
                    s[ind[j],ind[k]]:=s[ind[j],ind[k]]+smd[j,k];
                end;
            end;
{imposicao das condicoes de contorno}
for i:=1 to nn do
    for j:=1 to 3 do
        begin
            jg:=3*(i-1)+j;
            case j of
                1: k:=nos[i].rx;
                2: k:=nos[i].ry;
                3: k:=nos[i].rz;
            end;
            if k<>0
            then
                begin
                    for kg:=1 to 3*nn do
                        begin
                            s[jg,kg]:=0.0; s[kg,jg]:=0.0;
                        end;
                        s[jg,jg]:=1.0; at[jg]:=0.0;
                    end;
                end;
            end;
(* resolucao do sistema linear de equacoes [s]{d}={at} *)
cholesky(3*nn,s,at);
for i:=1 to nn do

```

```

begin
  nos[i].dx:=at[3*i-2];
  nos[i].dy:=at[3*i-1];
  nos[i].dz:=at[3*i];
end;
{resultados}
writeln(is,'Deslocamentos dos Nos');
writeln(is,'NO':4,'DX':12,'DY':12,'DZ':12);
for i:=1 to nn do
  writeln(is,i:4,nos[i].dx:12:6,nos[i].dy:12:6,nos[i].dz:12:6);
writeln(is);
writeln(is,'Acoes finais nas extremidades das barras');
writeln(is,'BARRA':5,'AF1':12,'AF2':12,'AF3':12,'AF4':12,'AF5':12,'AF6':12);
for i:=1 to nb do
  with barras[i] do
    begin
      rigidez_barra_local(e,iz,ax,l,ke,kd,sm);
      dl[1]:= at[3*ni-2]*cx+at[3*ni-1]*cy;
      dl[2]:=-at[3*ni-2]*cy+at[3*ni-1]*cx;
      dl[3]:= at[3*ni];
      dl[4]:= at[3*nf-2]*cx+at[3*nf-1]*cy;
      dl[5]:=-at[3*nf-2]*cy+at[3*nf-1]*cx;
      dl[6]:= at[3*nf];
      for j:=1 to 6 do
        for k:=1 to 6 do
          aml[j]:=aml[j]+sm[j,k]*dl[k];
        write(is,i:5);
        for j:=1 to 6 do
          write(is,aml[j]:12:6);
        writeln(is);
      end;
    end;
  writeln(is);
{calculo de reacoes de apoio}
for i:=1 to nn do
  with nos[i] do
    begin
      fx:=-fx; fy:=-fy; fz:=-fz;
    end;
  end;
for i:=1 to nb do
  with barras[i] do
    begin
      with nos[ni] do
        begin
          fx:=fx+aml[1]*cx-aml[2]*cy;
          fy:=fy+aml[1]*cy+aml[2]*cx;
          fz:=fz+aml[3];
        end;
      with nos[nf] do
        begin
          fx:=fx+aml[4]*cx-aml[5]*cy;
          fy:=fy+aml[4]*cy+aml[5]*cx;
          fz:=fz+aml[6];
        end;
      end;
    end;
  writeln(is,'Reacoes de Apoio');
  writeln(is,'NO':4,'RX':13,'RY':13,'RZ':13);
for i:=1 to nn do
  with nos[i] do
    if (rx+ry+rz) <> 0
      then
        writeln(is,i:4,fx:13:6,fy:13:6,fz:13:6);
  ch:=readkey;
{fechar arquivo de saida}
close(is);
end.

```