

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

*LIGAÇÕES COM TUBOS GALVANIZADOS EM  
MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO  
GRANDIS, SOLICITADAS A MOMENTO FLETOR  
E FORÇA CORTANTE*

**CYNARA FIEDLER BREMER**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco

Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

Dezembro de 1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

*LIGAÇÕES COM TUBOS GALVANIZADOS EM  
MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO  
GRANDIS, SOLICITADAS A MOMENTO FLETOR E  
FORÇA CORTANTE*

**CYNARA FIEDLER BREMER**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Edgar V. Mantilla Carrasco  
DEES – UFMG (Orientador)

---

Prof. Dr. Eduardo Chahud  
DEES – UFMG

---

Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira  
DEES – UFMG

---

Prof. Dr. Antônio Alves Dias  
EESC - USP

Belo Horizonte, 28 de Dezembro de 1999.

## AGRADECIMENTOS

Principalmente a Deus, sem o qual esta vitória não seria possível.

Ao Professor Edgar V. Mantilla Carrasco, pela orientação, pela paciência e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Professor Eduardo Chahud, pelo apoio, amizade e exemplo durante todos os anos em que passei na Escola de Engenharia.

Ao Professor Luís Eustáquio Moreira, pelas palavras de incentivo durante os ensaios.

Aos funcionários do LAEES (Laboratório de Análise Experimental de Estruturas) pela enorme ajuda na confecção dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Estruturas, pelo convívio e amizade.

À Alba Química pelo fornecimento do adesivo.

À Marlene, minha mãe, minha amiga e minha cúmplice incondicional de todas as horas.

Ao Breno, meu pai, pelo incentivo e exemplo de distinção e persistência.

Aos meus irmãos Anderson, Patrícia e Felipe pelo apoio, amor, confiança e paciência.

Ao Leonardo, que me apoiou e me acompanhou desde o primeiro dia até o último, em todas as etapas.

Às minhas tias e amigas de sempre: Marli e Fátima.

À Andreíse, pelo apoio e carinho.

Aos meus amigos e colegas, que compartilharam comigo esta etapa tão importante.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 – <i>Quanto às análises experimentais</i>	5
2.2 – <i>Quanto às análises numéricas</i>	47
<b>CAPÍTULO 3 - OBJETIVO</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 4 – PROJETO DO EXPERIMENTO</b>	<b>57</b>
4.1 – <i>Para os ensaios à flexão</i>	57
4.1.1 – Distâncias mínimas	57
4.1.2 – Esquema de ensaio à flexão	59
4.1.3 – Determinação da carga máxima aplicada no corpo de prova através das resistências dos materiais	61
4.1.3.1 – <i>carga máxima através da resistência das chapas</i>	63
4.1.3.2 – <i>carga máxima através das resistências dos tubos e da madeira</i>	68
4.1.4 – Dimensões dos corpos de prova	79
4.1.5 – Cargas máximas dos modelos	80
4.2 – <i>Para os ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras</i>	81
4.2.1 – Dimensões dos corpos de prova	81
4.2.2 – Esquema de ensaio ao embutimento	82
<b>CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>84</b>
5.1 – <i>Materiais utilizados</i>	84
5.1.1 – A madeira	84
5.1.2 – A resina e o catalisador	84
5.1.3 – Os tubos e as chapas de ligação	85
5.2 – <i>Ensaio preliminares</i>	85
5.2.1 – Classificação visual e preparação da superfície das lâminas	85
5.2.2 – Ensaio de caracterização	87
5.3 – <i>Fabricação das peças de madeira laminada colada e a montagem dos corpos de prova</i>	91
5.4 – <i>Sistema de aquisição de dados (SAD)</i>	97
5.5 – <i>Os ensaios</i>	99
5.5.1 – Ensaio à flexão	100
5.5.1.1 – <i>Instrumentação</i>	100
5.5.1.2 – <i>O carregamento</i>	103
5.5.1.3 – <i>O ensaio</i>	104
5.5.2 – Ensaio de embutimento normal e paralelo às fibras	105
5.5.2.1 – <i>Instrumentação</i>	105
5.5.2.2 – <i>O carregamento</i>	107
5.5.2.3 – <i>O ensaio</i>	107

<i>5.5.2.4 – Determinação da resistência ao embutimento</i>	107
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E TRATAMENTO DE DADOS</b>	<b>110</b>
<i>6.1 – Para os ensaios à flexão</i>	110
<i>6.2 – Para os ensaios ao embutimento</i>	117
6.2.1 – Embutimento normal às fibras	118
6.2.2 – Embutimento paralelo às fibras	121
<i>6.3 – Tensões de embutimento normal e paralela às fibras para as séries A, B e C</i>	124
<b>CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>126</b>
<i>7.1 – Obtenção das variáveis momento e rotação</i>	126
<i>7.2 – Homogeneização da seção</i>	129
<i>7.3 – Determinação da rigidez rotacional da ligação</i>	132
<b>CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES</b>	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>174</b>

## RESUMO

BREMER, C. F. – “Ligações com tubos galvanizados em madeira laminada colada de *Eucalypto Grandis*, solicitadas a momento fletor e força cortante”. Belo Horizonte, 1999. 210p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Esta dissertação trata de um estudo experimental de ligações em madeira laminada colada de *Eucalypto Grandis*, sob a ação de esforços combinados de momento fletor e força cortante, a fim de se determinar o nível de rigidez destas ligações.

Os ensaios à flexão foram realizados em corpos de prova em forma de L. Na região da ligação foram utilizados oito tubos galvanizados (parafusos ocos) e instalados dois transdutores de deslocamento, um na posição horizontal e outro na vertical, com o objetivo da determinação do giro entre as peças. Como previsto houve o esmagamento da madeira e não a flexão dos tubos durante a realização dos ensaios. A partir dos resultados obtidos foram traçados gráficos momento x rotação.

Foram avaliadas as características mecânicas das lâminas, através de ensaios não destrutivos via ultra-som. Foram também determinadas as resistências de embutimento, nas direções normal e paralela às fibras. Na região da ligação foram instalados dois transdutores de deslocamento, na posição vertical, com o objetivo de se medir o deslocamento relativo entre o tubo e a extremidade do corpo de prova. A partir dos resultados obtidos foram traçados diagramas tensão x deformação específica e determinada a resistência ao embutimento nas direções normal e paralela às fibras, quando é utilizado este tipo de ligação.

Palavras – chave: ligações, tubos, momento fletor, força cortante, embutimento.

## **ABSTRACT**

BREMER, C. F. – “Galvanized tubes connections in Eucalyptus Grandis glulam, under bending moment and shear force”. Belo Horizonte, 1999. 210p. Dissertation. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

This Dissertation is about an experimental study made in Eucalyptus Grandis laminated timber connections under combined efforts (bending moment and shearing force) to determine these connections rigidity.

The bending tests were made in wood pieces in L form. At the connection region, eight galvanized tubes (hollow screws) were used and two displacement transducers were installed, one in horizontal position and the other in vertical position, to determine the rotation between the wood pieces. As predicted, the wood walls were crushed and the bending of the tubes did not occur. From the results some moment x rotation curves were plotted.

Wood mechanical properties were analyzed through non destructive tests by ultrasound. The embedment resistances in perpendicular and parallel to the grain directions were also determined. At the connection region two displacement transducers were installed to measure the relative displacement between the tube and the wood piece extreme. From the results some tension x strain curves were plotted and then the embedment resistances were found when this connection is used.

Keywords: connections, tubes, bending moment, shear force, embedment.

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

A madeira tem sido usada como material de construção por tanto tempo quanto a existência do homem. Embora o uso da madeira tenha se modificado em termos de aplicação, o material bruto pouco mudou. Hoje em dia, no entanto, a destruição das florestas nativas e a plantação de árvores com crescimento mais rápido levaram a espécies com características físico - mecânicas muito diversificadas. Com isso veio a necessidade da engenharia produzir um material resistente, econômico e competitivo: *a madeira laminada colada (MLC)*.

A MLC é um produto que utiliza tanto lâminas de madeira muito resistente quanto de madeira pouco resistente, cuja posição na estrutura é dada em função dos esforços atuantes, tornando os elementos estruturais mais eficientes. Pode ser definida como um elemento composto de pequenas peças de madeira, inferiores em tamanho ao lenho original, unidas por meio de cola em toda a sua extensão e com as fibras das lâminas aproximadamente paralelas ao comprimento da peça. O elemento estrutural pode ser reto ou curvo, com seção transversal variada, permitindo uma infinidade de opções em projeto. Para a madeira laminada colada a espessura das lâminas varia de 0,75 cm a 5,00 cm.

A introdução às técnicas do laminado começou no século dezenove mas não atingiu seu potencial até que adesivos duráveis foram introduzidos durante a Segunda Guerra Mundial. No caso de eventuais envergaduras e defeitos na madeira, estes podem ser distribuídos ao longo da peça, em regiões onde os esforços atuantes têm valores mínimos. Da mesma forma, onde os esforços solicitantes forem maiores, lá estarão

lâminas com maior resistência . Assim a força do conjunto pode vir a ser melhor que a soma das suas partes.

Entre as inúmeras vantagens apresentadas pela MLC destacam-se as seguintes:

- a) as estruturas de MLC podem ser fabricadas com qualquer seção, forma e comprimento, tendo como limitação apenas o transporte das peças;
- b) a espessura das tábuas permite uma secagem mais regular com melhor controle da umidade desejada;
- c) a seção transversal das peças pode variar de acordo com as tensões solicitantes na seção, evitando gastos excessivos de material;
- d) o método de fabricação permite o uso de lâminas de menor qualidade nas zonas de baixa solicitação, minimizando o custo, e o uso de lâminas de melhor qualidade nas zonas de maior solicitação, podendo ser possível a combinação de duas espécies distintas;
- e) apresenta um efeito estético excelente, não sendo necessário ocultar a estrutura, como no caso de outros materiais;
- f) os elementos laminados têm uma baixa razão peso / resistência, podendo ser facilmente instalados.

Entre os inúmeros tipos de madeira existentes temos o Eucalipto, árvore da família [Myrtaceae], com cerca de seiscentas espécies. É nativa da Austrália e Tasmânia. Cresce rapidamente, atingindo um porte gigantesco por volta de 15 anos. Embora algumas variedades cresçam em regiões frias e montanhosas, a maioria dos Eucaliptos se desenvolve melhor nos climas quentes e úmidos. Suas folhas são longas, estreitas e coriáceas. Na Austrália, o Eucalipto é a mais importante fonte de madeira. É ainda usado na indústria para construir navios, dormentes de estradas de ferro, postes telegráficos, cercas e cais. A casca de algumas espécies de eucalipto contém um óleo valioso, de cheiro semelhante ao da cânfora, chamado eucaliptol. Esse óleo é usado como anti-séptico, desodorante e estimulante.

A partir das vantagens da madeira laminada colada na construção, como descritas anteriormente, surgiu a idéia de um estudo da região mais crítica em uma estrutura: a área das ligações. Como tradicionalmente as estruturas de madeira são projetadas com ligações que não possuem capacidade de resistência ao momento fletor, o resultado se traduz em peças de grandes dimensões. Estas ligações podem ser de vários tipos: ligações coladas, parafusadas, pregadas ou com anéis. Nesta dissertação foram estudadas as ligações parafusadas, sendo porém utilizados os chamados parafusos ocos, ou seja, tubos metálicos. Estes tubos metálicos têm o mesmo papel dos parafusos, possuem resistência ao esforço cortante e também ao momento fletor. A vantagem de utilização deste tipo de conector é a economia de material, pois o miolo do parafuso pouco contribui para a sua resistência, sendo as suas paredes a parte resistente.

Para realizar este estudo foram ensaiados modelos em escala natural, utilizando a espécie Eucalipto Grandis, que foram submetidos a um carregamento cíclico e levados até a ruptura. A partir dos resultados obtidos, ou seja, o giro entre as peças de MLC e o momento fletor atuante a cada incremento de carga, foi possível caracterizar o comportamento da ligação com o tipo de conector proposto: os parafusos ocos ou tubos metálicos. Foi proposto também, a partir de ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras, um pré-dimensionamento para ligações como as estudadas aqui.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Segundo a pesquisa bibliográfica de 1984 a 1998 os trabalhos específicos relativos ao assunto em estudo são muito poucos. A seguir são apresentados os de maior relevância dentre todos os artigos lidos. Para uma melhor compreensão foi feita uma classificação por tipo de enfoque. Seguem primeiramente os estudos levando em consideração as análises experimentais, seguidas das análises numéricas.

### ***2.1 - Quanto às análises experimentais***

De acordo com estudos do **Forest Products Laboratory**, tratando de ligações adesivas, os adesivos transferem carga de um aderente para outro por meio de uma ligação superficial. A resistência das uniões das peças de madeira por adesivos depende da resistência de cada elemento envolvido na união (adesivo, aderentes e interfaces). O desenvolvimento das ligações adesivas depende de como são conhecidos e controlados os fatores envolvidos na resistência de cada elo. Os principais fatores são: espécie da madeira, adesivo, tipo de união, qualidade da superfície da madeira, processo de colagem e, finalmente, as condições de serviço.

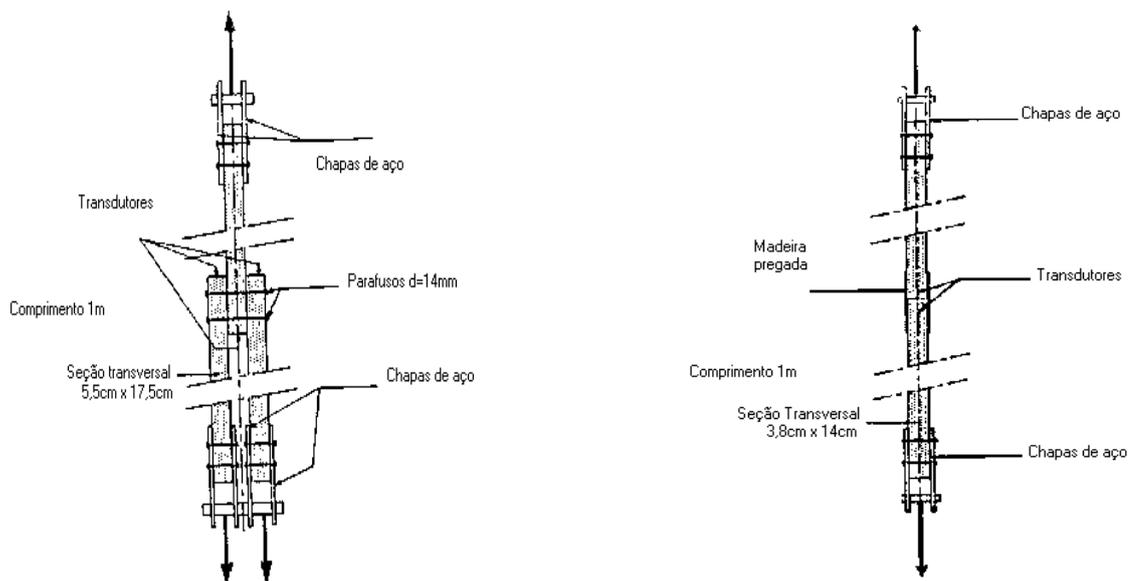
Segundo **MANTILLA (1989)**, a resistência, estabilidade e a vida de uma estrutura dependem em grande parte da resistência, rigidez e durabilidade das ligações.

As principais vantagens na utilização de adesivos na confecção de ligações são:

- a) A distribuição de esforços em áreas mais amplas torna possível a obtenção de ligações mais leves e resistentes;
- b) A linha adesiva pode ser uma barreira contra a umidade;
- c) Sua execução pode ser mais rápida e econômica;
- d) Há a possibilidade de se melhorar a relação força/peso e a estabilidade dimensional dos materiais anisotrópicos por meio de peças cruzadas, como na madeira compensada;
- e) Os adesivos permitem a união de materiais não semelhantes, aumentando ainda mais o seu campo de aplicação;
- f) Fibras, pequenas partículas e filmes pouco espessos que não puderam ser aproveitados por qualquer outra técnica podem ser agrupados com o uso de adesivos.

O dimensionamento das ligações estruturais de madeira por adesivos tem sido pouco abordado na literatura nacional e internacional. Em estudos realizados por este pesquisador foram determinadas as resistências características das ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento (compressão, tração, flexão e torção). Neste estudo foi considerado o efeito de tração normal na película adesiva, efeito este bastante importante.

**FAUGERAS e VERGNE (1992)** realizaram ensaios a respeito das ligações pregadas e parafusadas utilizadas nas indústrias. Todos os ensaios foram feitos com a espécie [*Picea Excelsa*]. Dois tipos de solicitações foram considerados: tração longitudinal e flexão. Nos ensaios relacionados com a tração axial os parafusos foram ensaiados em situação de duplo cisalhamento (dois planos de corte). Foi aplicado um pré carregamento para que houvesse a acomodação da ligação. Os parafusos possuíam diâmetro 14 mm e as peças ensaiadas tinham seção transversal igual a  $5,5 \times 17,5 \text{ cm}^2$ , Figura 2.1-a. Os pregos possuíam diâmetro de 2,2mm e comprimento de 45mm. A seção transversal das peças testadas com pregos foi de  $3,8 \times 14 \text{ cm}^2$ . O aço usado possuía tensão de escoamento igual a 500MPa.



(a) Ligação parafusada

(b) Ligação pregada

Figura 2.1 – Ensaio das ligações, FAUGERAS e VERGNE (1992)

Nos ensaios realizados à flexão, também utilizando ligações pregadas, três transdutores de deslocamento permitiram determinar a rotação média de cada extremidade da viga. A carga última variou de 128kN a 153kN, Figura 2.2.

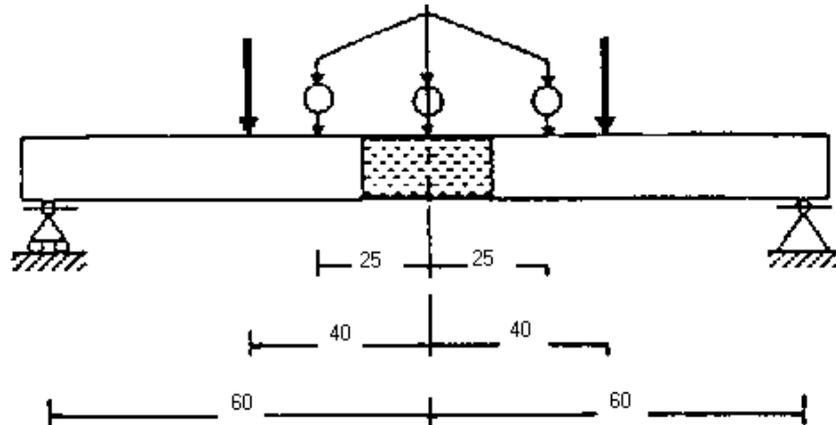


Figura 2.2 – Ensaio da viga, FAUGERAS e VERGNE (1992)

Nas Figuras 2.3 e 2.4 são mostradas as curvas resultantes dos ensaios das ligações parafusadas e pregadas, respectivamente.

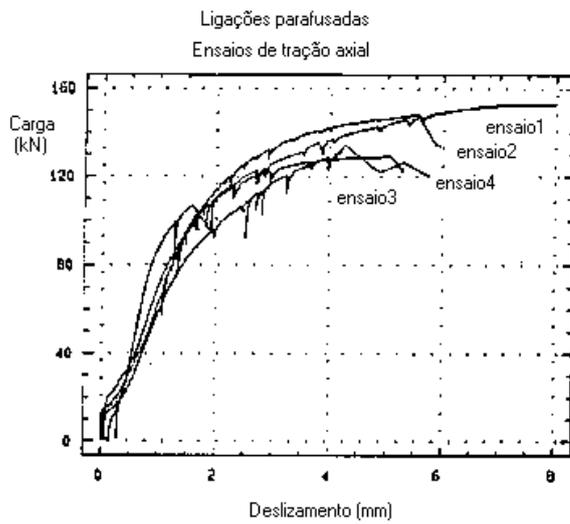


Figura 2.3 – Resultado dos ensaios das ligações parafusadas, FAUGERAS e VERGNE (1992)

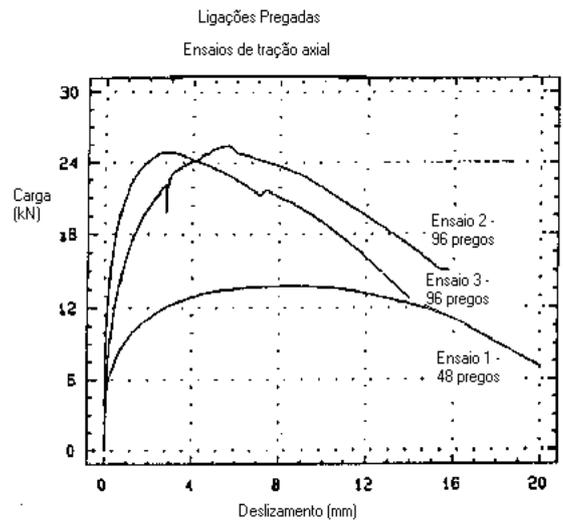


Figura 2.4 – Resultado dos ensaios das ligações pregadas, FAUGERAS e VERGNE (1992)

Na Figura 2.5 são mostrados os resultados dos ensaios à flexão. O gráfico mostra a variação do momento em função da rotação da ligação. A inclinação da curva indica a rigidez da ligação.

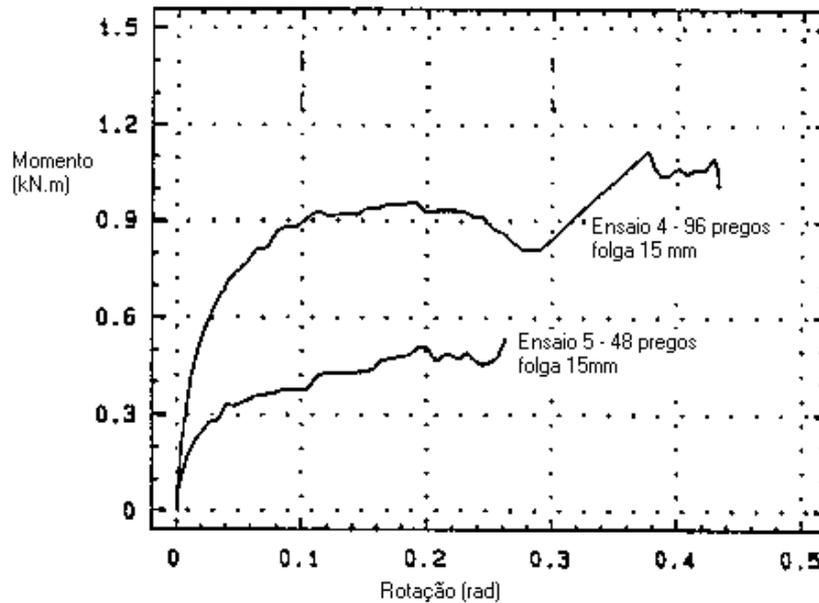


Figura 2.5 – Resultado dos ensaios à flexão, FAUGERAS e VERGNE (1992)

Analisando os ensaios das ligações parafusadas, os autores concluíram que o comportamento real das ligações mostra uma solicitação composta. Já na análise dos ensaios das ligações pregadas, os resultados mostram que o comportamento inicial destas ligações é complexo, pois vários aspectos, como por exemplo a torção, deveriam ser analisados. Por fim, FAUGERAS e VERGNE concluíram, analisando os ensaios à flexão, que para se verificar experimentalmente a rotação média ocorrida na ligação pregada seriam necessários para ensaios posteriores transdutores nas regiões próximas à aplicação das cargas. Uma boa aproximação em relação ao Eurocode 5 foi conseguida ao se realizar os ensaios.

**CHENG (1996)** analisou vários modelos de ligações, ensaiando-as sob carga cíclica para entender seu comportamento à ação de momento fletor. A proposta foi de ligações com rebite e sua performance sob carregamentos monotônico e cíclico. Corpos de prova em escala real foram construídos usando cobrejunta metálica e rebites, Figura 2.6. Os parâmetros analisados foram: a geometria da placa cobrejunta, diferentes tipos de rebites (e conseqüentemente o número de rebites), dois tamanhos de peças coladas e pré-tensão na ligação, Figura 2.7. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 2.8. As ligações mostraram significativa capacidade de resistência ao momento fletor e ductilidade tanto sob carregamento monotônico quanto cíclico, especialmente se aplicada uma pré-tensão. Os limites de carregamento elástico também foram estudados com o objetivo de avaliar a capacidade no estado limite de serviço quando havia ação do momento fletor. Para evitar falha na ligação foi aplicado um sistema de carga crítica com pré – tensão: foram introduzidos parafusos ao longo da profundidade do membro onde apareceram rachaduras em ensaios anteriores, ganhando-se com isso, rigidez naquela região. Para oferecer uma melhor distribuição da pré – tensão na peça foram introduzidos quatro parafusos, Figura 2.7. Com a aplicação dos carregamentos monotônico e cíclico as peças de MLC com placa cobrejunta podem ser consideradas como ligações semi - rígidas.

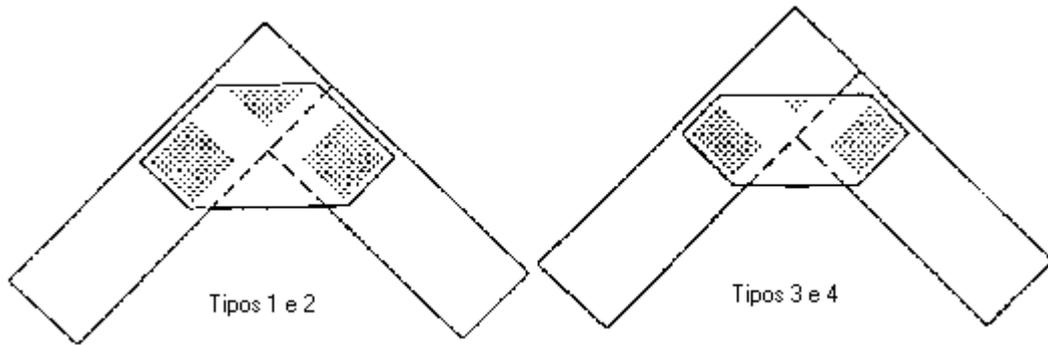


Figura 2.6 – Corpo de prova com diferentes geometrias para a placa cobrejunta, CHENG (1996)

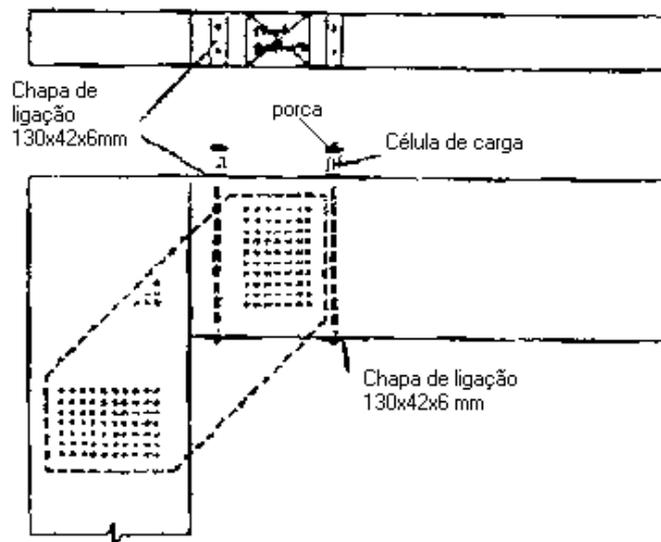


Figura 2.7 – Pré tensão na ligação, CHENG (1996)

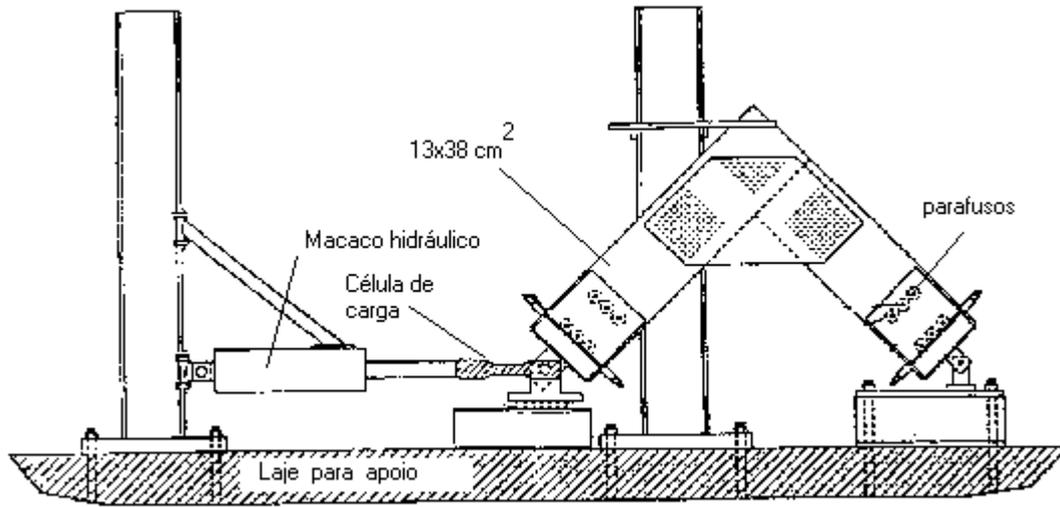


Figura 2.8 – Ensaio do corpo de prova, CHENG (1996)

Seguem na Figura 2.9 os resultados dos ensaios através da curva momento x rotação.

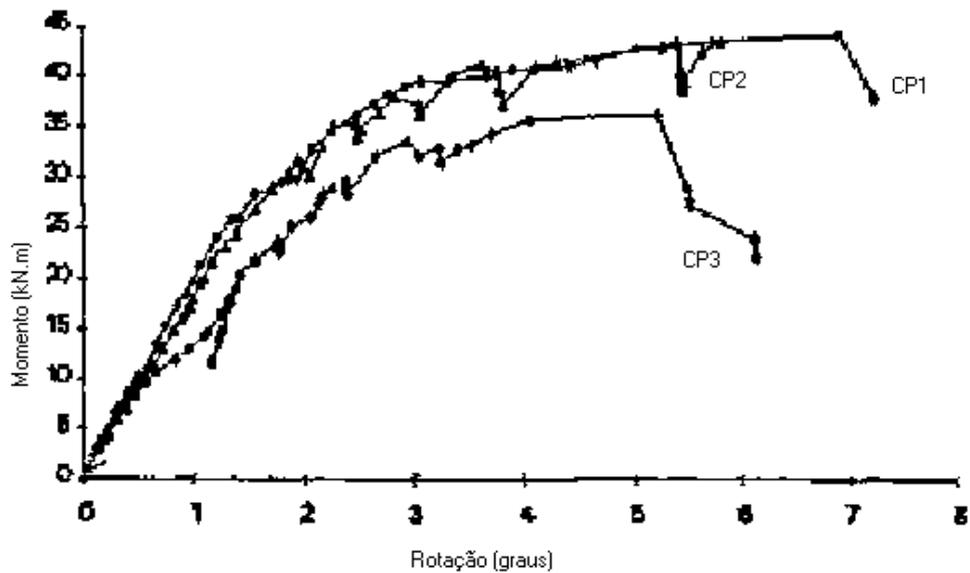


Figura 2.9 – Gráfico Momento x Rotação para os ensaios, CHENG (1996)

Como conclusões do autor sobre este estudo vale ressaltar:

- a) A ruptura ocorreu na ligação como uma combinação de três tipos de comportamento: esmagamento no lado superior e na interface entre as duas peças; rachaduras paralelas às fibras no menor membro e a deformação na interação rebite - madeira;
- b) Os corpos de prova se mostraram com comportamento estável até que grandes deformações foram impostas, quando grande ductilidade foi observada;
- c) As ligações com rebites mostraram melhor performance que as ligações parafusadas, tanto em resistência quanto em rigidez;
- d) A pré-tensão aumenta a rigidez, mas um longo período de pré-tensão deve ser estudado para efeitos de cisalhamento;
- e) O tamanho da peça sobrejunta, o número e o tipo de rebites e a pré-tensão eram consideradas variáveis importantes quanto à performance das ligações. Nenhum efeito significativo foi encontrado quando tamanhos diferentes de membros foram utilizados.

**LEIJTEN<sup>1</sup> (1996a)** propôs um modelo de ligação que combinasse resistência, rigidez e ductilidade. A necessidade da ductilidade e rigidez depende mais do tipo de estrutura e do método de cálculo do que qualquer outra variável. Embora muito

---

<sup>1</sup> LEIJTEN (1996) estudou as propriedades da madeira densificada DVW (densified veneer wood), que é comercialmente feita colocando-se folhas de madeira resinada de 0,5 a 3 mm de espessura entre prensas aquecidas ( $\pm 160^{\circ}\text{C}$ ), com pressão hidráulica. Estas folhas são comprimidas perpendicularmente ao plano da lâmina com pressão de 20MPa e rapidamente resfriadas até a temperatura ambiente. O teor de umidade não deve ser superior a 12% para prevenir sua recuperação com a remoção da compressão. As propriedades físicas do material resultante são muito superiores às propriedades das folhas que o originaram.

resistentes, as ligações coladas sempre racham. Comparando madeiras unidas por pinos, a capacidade destes nunca ultrapassa 40 % ou 60% da resistência à flexão ou da resistência às ações axiais da madeira, respectivamente. Existem métodos para aumentar a resistência reduzindo o espaçamento entre conectores, mas esse procedimento causa um aumento no risco de fendilhamento. O autor dividiu as ligações em três grupos principais. No primeiro e mais antigo, estão as “ligações dos carpinteiros”. O segundo grupo é caracterizado pela aplicação de um adesivo. O terceiro grupo, assunto deste estudo, consiste de ligações mecânicas. Este pesquisador estudou a ocorrência de rachaduras na madeira, que ocorrem mais provavelmente quando as ligações são rígidas e os conectores localizados em linhas. Segundo LEIJTEN, algumas normas tentam contornar este efeito introduzindo fatores de redução de resistência nestes locais. Ao invés disso, a ligação pode ser projetada para evitar tais rachaduras: são feitos “furos” na madeira que devem ser preenchidos com resina e madeira densificada (densified veneer wood – DVW), ao redor dos furos, com o objetivo de reforçar as paredes da peça \_ este método apesar de eficiente não é prático, pois o controle de qualidade é ainda difícil. Depois são introduzidos tubos expansíveis, que são tracionados por um macaco hidráulico, como um tirante e colados com adesivo estrutural nas paredes do furo. Assim, com a retirada da ação da tração, os tubos se aderem fortemente às paredes dos furos. Se fosse feita a pré-furação comum o diâmetro do furo seria muito maior do que com este procedimento, onde o diâmetro do furo é praticamente o mesmo do tubo, Figura 2.10.

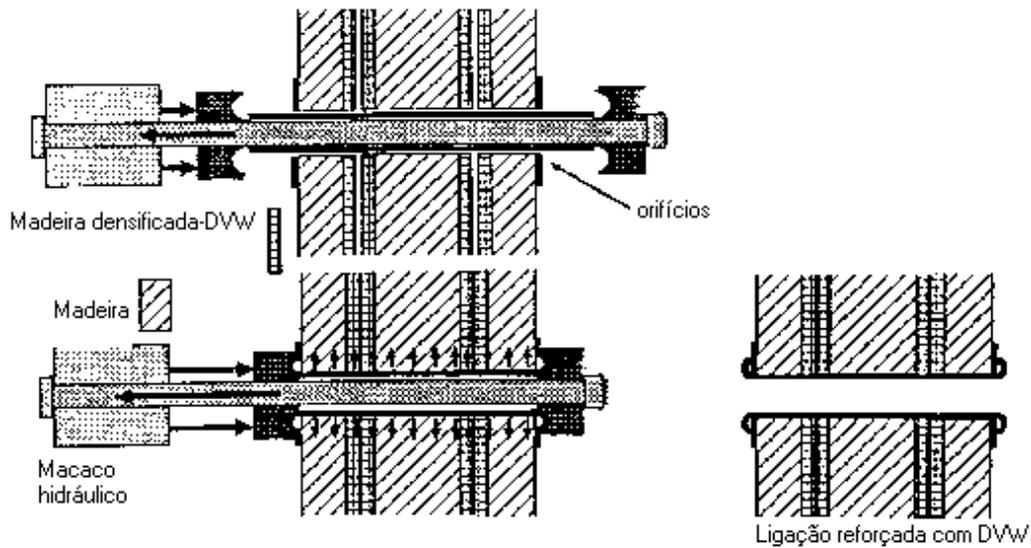


Figura 2.10 - O princípio da pré-tensão: a ligação de um membro central e dois membros laterais. DVW é colado na interface de todos os membros separadamente,

LEIJTEN (1996a)

Na Figura 2.11 é mostrada a redução do número de conectores devido à técnica de se usar tubos expansíveis.

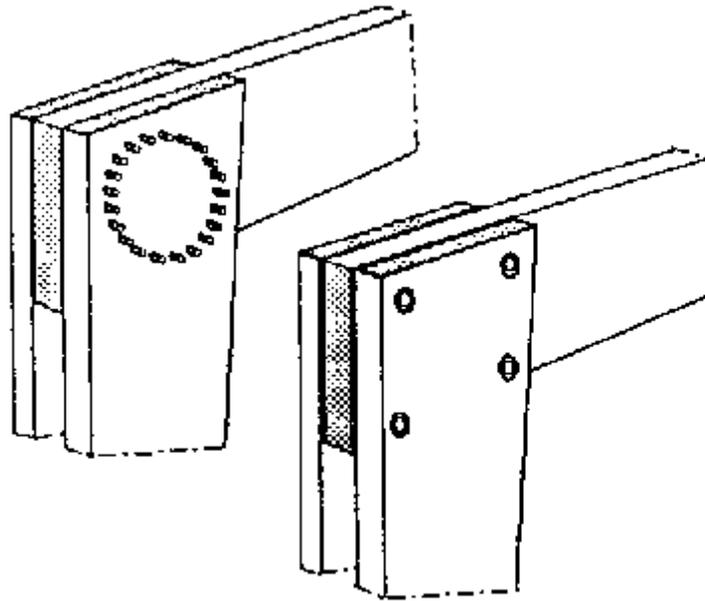


Figura 2.11 – Redução do número de conectores com o uso de tubos expansíveis,  
LEIJTEN (1996a)

Como conclusões o autor indica que a resistência aumenta quase que duas vezes e a rigidez com a pré - tensão do tubo, aumenta de quatro a seis vezes. A capacidade de resistência do conjunto é governada pela resistência do tubo combinada à aderência ao DVW. Como a ductilidade está combinada com a natureza do tubo, a capacidade de deformação e ductilidade não causou muitos danos no material ao redor deste tubo. O número de conectores necessários diminui bastante se comparados com pregos ou parafusos. Conseqüentemente, as dimensões da madeira não precisam mais ser governadas pelos padrões de espaçamento e a madeira pode ser usada mais efetivamente, especialmente, quando da transmissão do momento fletor. A resistência pode ser aumentada ainda mais expandindo-se um segundo tubo dentro do primeiro.

Surpreendentemente esta seqüência de tubos permite fazer esta operação. Com isto consegue-se um aumento de 20% na resistência. Os resultados se encontram na Figura 2.12.

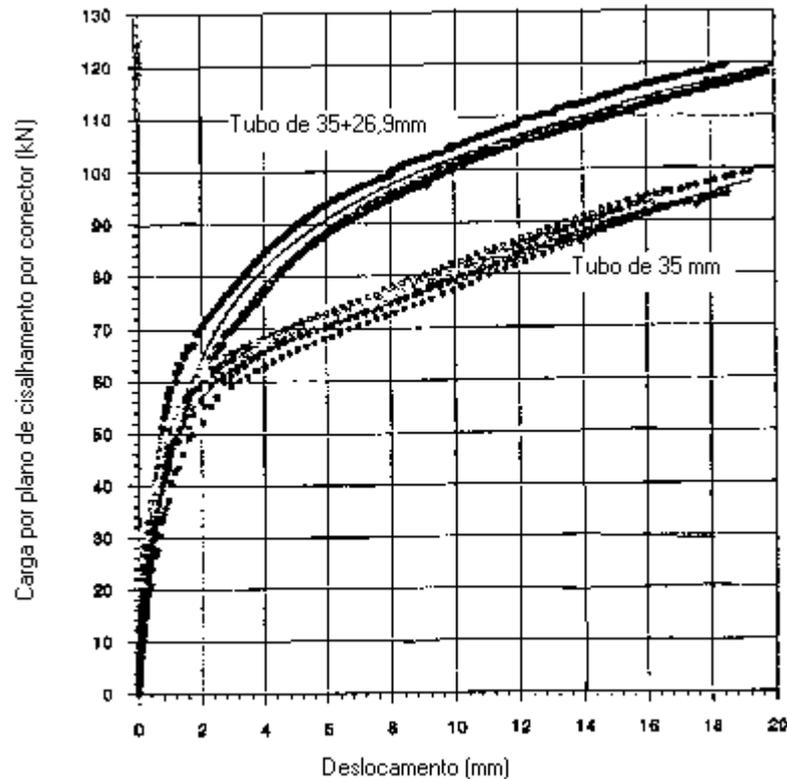


Figura 2.12 – Resultados dos ensaios usando um tubo expansível de 35 mm e dois tubos expansíveis, um de 35 mm e outro de 26,9 mm, LEIJTEN (1996a)

Em outra aplicação de ligações com madeira densificada (DVW), **LEIJTEN e RODD (1996b)** propuseram uma ligação colada, com vários corpos de prova. Métodos usados para reforçar ligações de madeira com pinos laterais carregados deveriam resolver dois problemas básicos. Primeiro a baixa resistência às rachaduras no sentido

paralelo às fibras. Segundo, a distância entre conectores quando colocados em furos maiores que o seu diâmetro. O tipo de conector oferece um método alternativo de fabricação que pode ser a solução para ambos os problemas: o DVW foi feito como descrito em LEIJTEN<sup>1</sup>. Os tubos eram galvanizados e expandidos com o auxílio de um macaco hidráulico, como descrito anteriormente e os deslocamentos foram medidos com LVDT's. O esquema dos corpos de prova e de como eles foram ensaiados se encontra na Figura 2.13. Translações e rotações dentro de uma ligação ocorrem simultaneamente e não podem ser medidas separadamente. Segundo o autor alguns resultados dos ensaios das peças em L precisam ser corrigidos pelos efeitos de segunda ordem. Primeiramente, quando as pernas do corpo de prova são separadas bruscamente, as peças fletem e a ligação abre. Isto causa um braço de alavanca, que é medido na linha de ação do macaco, que encurta e requer correção antes do cálculo do momento fletor. Similarmente, há um efeito devido à fixação dos transdutores nas peças do corpo de prova, como mostrado na Figura 2.14. Durante um ensaio, enquanto as peças do corpo de prova são separados, elas sofrem rotação em relação ao eixo de coordenadas x-y e isto afeta as leituras de deslocamento. Outro item que tem sido levado em consideração é a posição variável do centro de rotação, que afeta as leituras de translação. Nos ensaios das peças em L os resultados mostraram comportamento de grande resistência, rigidez e ductilidade.

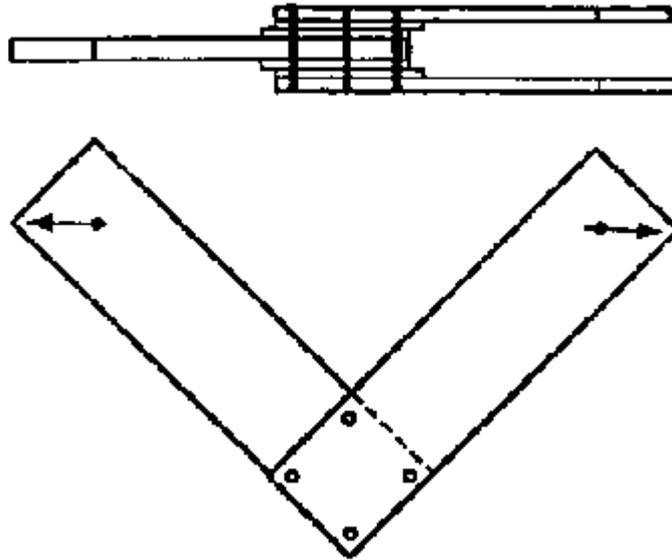


Figura 2.13 – Corpo de prova em L, LEIJTEN e RODD(1996b)

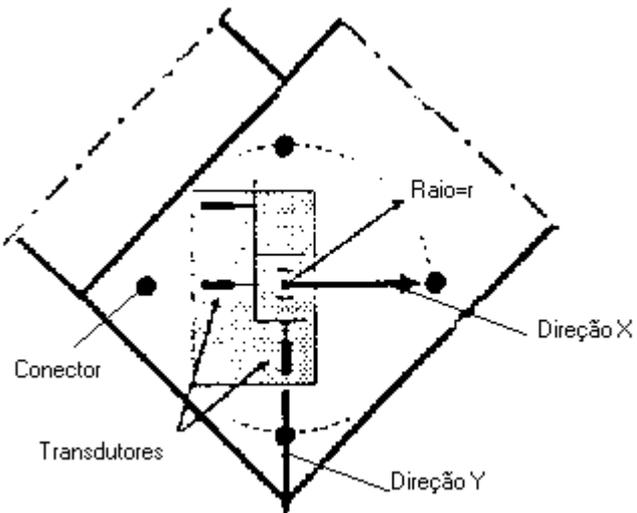


Figura 2.14 - Medida dos deslocamentos no corpo de prova em L, LEIJTEN e RODD  
(1996b)

Seguem na Figura 2.15 os resultados dos ensaios sob as curvas momento x rotação e resistência à flexão da madeira x rotação.

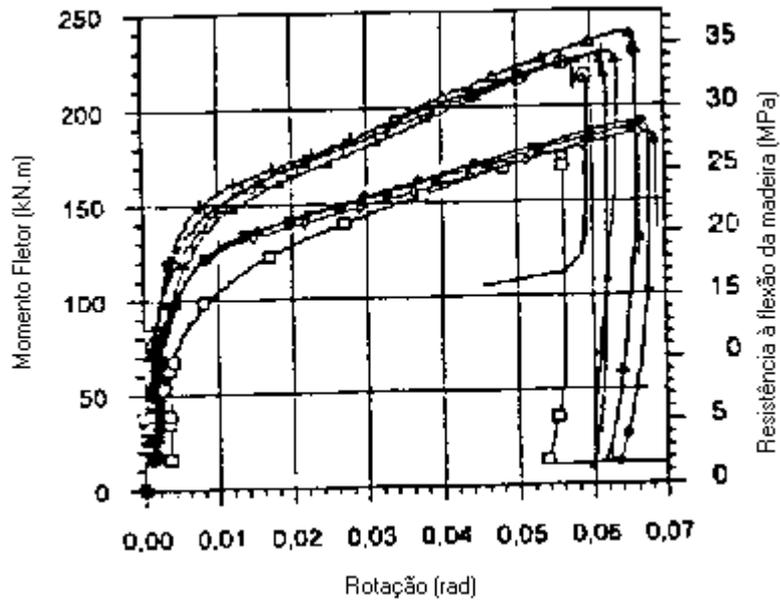


Figura 2.15 – Curvas momento x rotação e resistência à flexão da madeira x rotação,

LEIJTEN e RODD (1996b)

Para as ligações consideradas anteriormente aplicou-se o método simplificado de RICHARD-JASPART, que tem a curva mostrada na Figura 2.16.

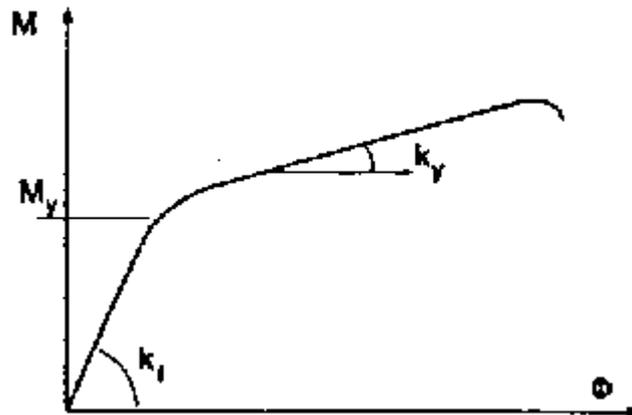


Figura 2.16 – Modelo de regressão não linear, LEIJTEN e RODD (1996b)

O momento fletor é dado pela Equação 2.1:

$$M = \frac{(k_i - k_y)}{\left\{ 1 + \left[ \frac{(k_i - k_y) \cdot \phi}{M_y} \right]^C \right\}^{\frac{1}{C}}} + K_y \cdot \phi \quad 2.1$$

onde: M= momento fletor imposto (F);

$\phi$  = rotação ( $\delta$ );

K<sub>i</sub> = rigidez inicial (a);

K<sub>y</sub> = rigidez final (b);

M<sub>y</sub> = momento fletor de transição (c);

C = parâmetro de ajuste à curva (d)

Como escrita, a equação 2.1 retrata uma característica momento – rotação, mas se o centro de rotação na ligação se mantém no centro geométrico de cálculo, então é um simples problema converter a medida dos dados momento–rotação nos dados equivalentes carga – deslocamento (F- $\delta$ ). Como conclusões do autor tem-se que as ligações feitas com reforço DVW e tubos expansíveis são muito resistentes e rígidas. Neste tipo de ligação é possível que a seção na conexão seja mais resistente que nos membros ligados.

Em 1998 **HALLER** analisou o comportamento de ligações, classificando-as como rígidas, semi-rígidas ou flexíveis. Segundo ele, apesar das ligações serem classificadas como rígidas ou flexíveis, na maioria das vezes seu comportamento é semi-rígido. Com os estudos do COST C1 (Co-operation in Science and Technology), intitulados “Ligações Semi- Rígidas em Engenharia Civil, 1991-1998”, o comportamento semi-rígido foi estudado para ligações em aço, concreto e madeira.

A única maneira de se obter ductilidade numa ligação é através de conectores capazes de formar rótulas plásticas antes da ruptura. Assim, o projeto e o desenvolvimento de ligações em madeira apontam não somente o aumento da rigidez e da carga última, mas também sua ductilidade, para a qual os critérios que levam ao escoamento de cada conector são necessários. O comportamento à flexão das ligações está representado na Figura 2.17.

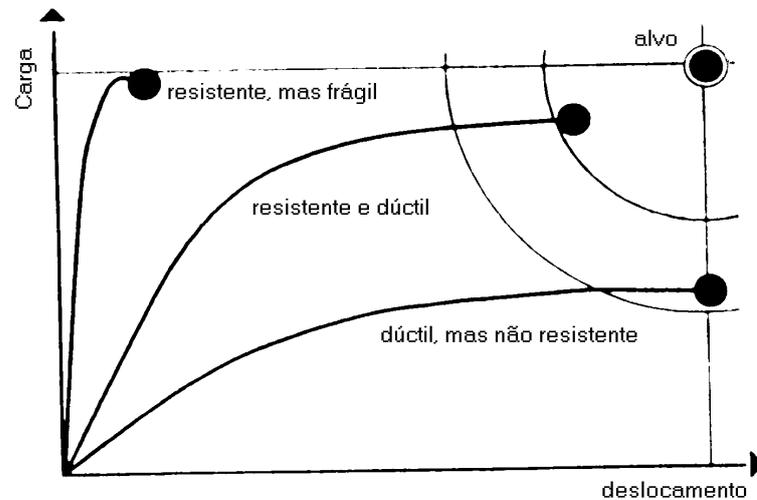


Figura 2.17 – Comportamento à flexão das ligações, HALLER (1998)

Uma otimização estrutural é feita com base nesta curva. Uma ligação eficiente necessita, primeiramente, de uma alta capacidade de resistência ao momento fletor, que não seja muito diferente da resistência da seção transversal das peças ligadas. Por outro lado, é necessária uma grande deformação que leva sempre a uma alta resistência, rigidez e ductilidade. O último requisito, porém, não é dado automaticamente pela presença dos conectores porque a ruptura pode ocorrer na madeira antes de atingir o limite de escoamento do conector. Os objetivos da análise de ligações semi-rígidas são:

- a) Desenvolver ligações com as características acima mencionadas;
- b) Entender o comportamento da ligação para os diversos tipos de carregamento;
- c) Desenvolver modelos para uso estrutural, para normas futuras;

- d) Analisar estruturas de madeira considerando comportamento semi-rígido com o objetivo de prever a transferência de carga e avaliar o nível de segurança da estrutura.

Geralmente as ligações em madeira sujeitas a um carregamento monotônico passam por diferentes estágios relacionados a vários fenômenos, Figura 2.18 e Tabela 2.1. A fase I é caracterizada por um deslizamento sem transferência visível de carga devido à falta de encaixe dos conectores. Na fase II a madeira e os conectores mostram um comportamento linear elástico; em particular o conector pode ser considerado como uma viga em uma fundação linear elástica. A fase III é caracterizada pelo processo irreversível de escoamento e microfissuras. Finalmente, na fase IV estes fenômenos continuam a se desenvolver até a completa ruptura.

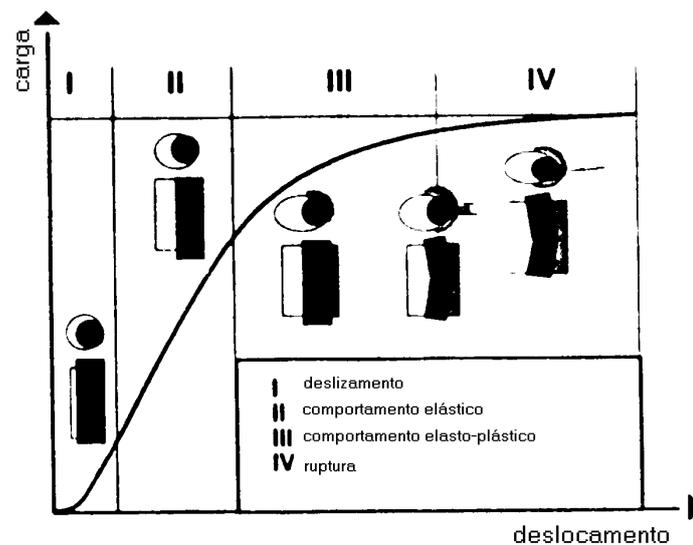


Figura 2.18 – Fases do ensaio à flexão, HALLER (1998)

Tabela 2.1 – As fases do ensaio relacionadas com os fenômenos físicos presentes,

HALLER (1998)

<b>Fase</b>	<b>Fenômeno relacionado</b>	<b>Teoria relacionada</b>	<b>Melhoramentos</b>
I	Falta de ajustamento dos conectores	Contato e fricção	Fabricação precisa; Ajustamento perfeito dos conectores; Injeção de resina; Conectores expansíveis
II	Comportamento elástico	Teoria da Elasticidade	Módulo de rigidez da fundação; Alta resistência de embutimento; Carga uniformemente distribuída
III	Comportamento elasto-plástico e pequenas rachaduras	Teoria da Plasticidade e Mecânica da Fratura	Reforços para diminuir fragilidade (ex: fibra de vidro)
IV	Comportamento oscilando entre estável e instável;	Mecânica da Fratura	Reforços para diminuir fragilidade (ex: fibra de vidro)

	Rachaduras		
--	------------	--	--

As curvas carga x deslocamento de ligações parafusadas mostram um deslizamento devido à folga entre o conector e o orifício (acomodação), levando a uma redução notável da rigidez inicial. Ligações rígidas requerem cuidado durante a sua confecção e um ajuste perfeito do conector no orifício. Isto, no entanto, pode levar a uma alta pré-tração indesejável causando o fendilhamento da madeira. Como uma alternativa, Rodd *appud* (HALLER, 1994) desenvolveu uma técnica que preenche a folga entre o conector e o orifício através de uma injeção de resina. LEIJTEN (1996a), como mencionado anteriormente, resolve este problema de folga por meio de tubos expansíveis.

A resistência e a rigidez da curva carga x deslocamento na fase II são determinadas pelas características de embutimento. A rigidez inicial é aumentada pelo módulo de elasticidade da madeira e pela sua resistência ao embutimento, onde o limite de elasticidade da ligação pode ser aumentado usando um material mais resistente ou menos frágil, como por exemplo madeira densificada ou reforço de fibras têxteis (fibra de vidro ou fibra de carbono).

Quanto ao modelamento da curva carga x deslocamento da ligação, HALLER (1998) diz que esta pode ser dividida em 4 estágios, os quais estão relacionados a diversos fenômenos físicos, ver a Tabela 2.2 . O comportamento semi-rígido pode ser representado por diferentes aproximações.

Tabela 2.2 – Comparação entre os modelamentos de aproximação, HALLER (1998)

Método	Esforço	Flexibilidade	Compreensão	Abstração	Entendimento
<b>Experimental</b>	+	-	±	-	-
<b>Barra Elástica</b>	±	±	+	+	++
<b>Analítico</b>	++	+	++	+	+
<b>MEF</b>	++	++	-	-	±

Obs: (esforço: ++ muito grande, + grande; flexibilidade: ++ muito flexível, + flexível; compreensão da ligação a partir do modelo: ++ boa, - modelo preciso mas não contribui à compreensão; abstração: + alto nível de abstração, - baixo nível de abstração; entendimento: ++ muito fácil, - difícil),

O autor ainda menciona que há numerosos estudos sobre modelamento de ligações usando modelos elásticos lineares e não lineares para a determinação da resistência ao embutimento do conector, Komatsu *appud* (HALLER, 1989). A dificuldade que resulta quando são usados conectores múltiplos consiste na interação entre eles e o compartilhamento da carga. Este método pode ser aplicado com sucesso se o mecanismo da possível ruptura é conhecido e implementado a priori no modelo. Mudanças no cálculo da ligação levam a uma mudança na resposta do modelo e na sua curva carga x deslocamento. Também existem modelos analíticos que descrevem os fenômenos das fases I a IV por meios de equações diferenciais. Essas equações fornecem uma resposta contínua ao longo do comprimento do conector. A solução pode

ser difícil em alguns casos e deve ser feita por métodos numéricos. Os fenômenos relacionados ao estágio IV ainda não foram resolvidos analiticamente para ligações de madeira. No entanto, existem relações analíticas na mecânica da fratura que podem ser usadas. Finalmente pode-se contar com o método dos elementos finitos, com aproximação menos rigorosa para prever o comportamento da ligação. O esforço computacional aumenta consideravelmente com o número de fenômenos envolvidos.

No mesmo ano, **MOSS (1998)** estudou os fatores de redução da capacidade de carga do parafuso em ligações com múltiplos parafusos. Segundo este autor a capacidade de uma ligação com conectores múltiplos é menor que a soma das capacidades de cada conector. Esta distribuição (que é desigual entre os conectores) é função do número de conectores, do espaçamento entre eles, da rigidez da ligação e das características de carregamento dos conectores. A distribuição mais uniforme entre os conectores ocorre quando a madeira e os conectores têm rigidezes iguais. Cada linha de conectores tem uma distribuição de cargas dependente das curvas carga x deslizamento e da sua execução. O autor comenta ainda que é possível prever a carga última se essas relações anteriores são conhecidas. Em ligações com conectores de aço a distribuição entre eles é tal que aqueles localizados nas extremidades são mais solicitados que os do meio. Os resultados mostram que conhecidas as curvas carga x deslizamento para cada conector na ligação e os efeitos de sua fabricação, qualquer conector pode suportar a sua carga máxima. Porém na carga última da ligação todos os conectores deverão chegar à carga máxima da sua curva carga x deslizamento. Como conclusão MOSS (1998) diz

que os fatores de redução não têm sentido quando o número de conectores é maior do que 6 numa mesma linha. Isso ocorre porque quando a ligação possui um número razoável de conectores (acima de 6), a carga é compartilhada igualmente pelos conectores. Estes resultados são comprovados por ensaios realizados, onde valores médios de carga por conector se mantêm constante.

Também em 1998 **QUENNEVILLE** previu o modo de fratura e a resistência de ligações parafusadas. No total foram ensaiados 29 corpos de prova. Os corpos de prova consistiam de 3 peças: chapa de aço+peça de madeira+chapa de aço, Figura 2.19. Todos os CP's foram tracionados paralelamente às fibras até a capacidade última de um dos seus componentes.

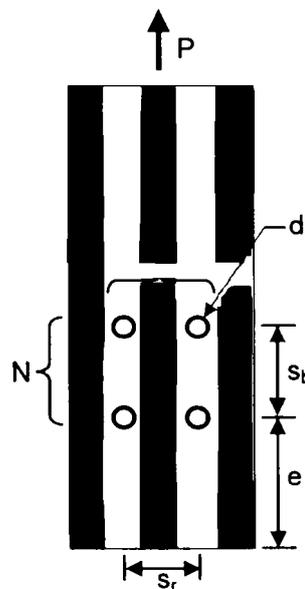


Figura 2.19 – Corpo de prova, QUENNEVILLE (1998)

Segundo o autor pode-se notar a diferença crescente entre os resultados teóricos e os experimentais com o aumento da resistência na Figura 2.20. Isto se deve ao resultado combinado do fator distância entre conectores e do fator distância entre o conector e a borda. O primeiro fator foi analisado e segundo QUENNEVILLE os corpos de prova com espaçamento 5d numa mesma linha romperam predominantemente por cisalhamento. Os corpos de prova com espaçamento 3d numa mesma linha romperam com o fenômeno de “rasgamento”. Segundo QUENNEVILLE nenhuma equação leva este fenômeno em consideração em qualquer norma conhecida.

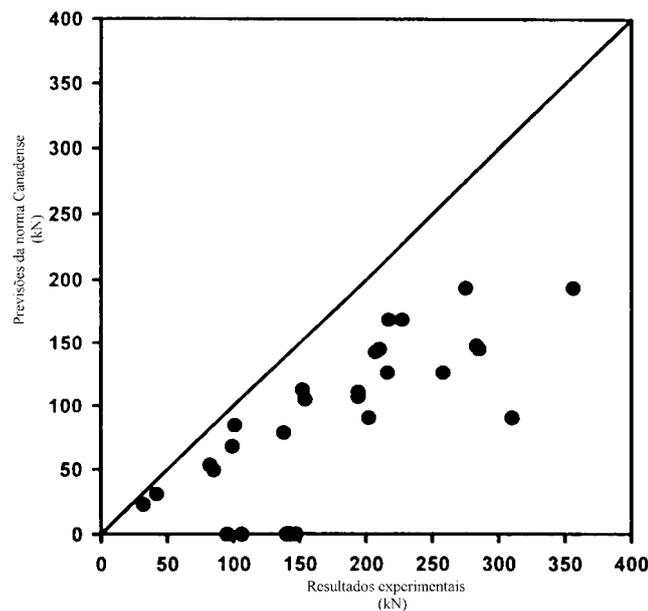


Figura 2.20 – Resultados dos ensaios e sua aproximação da norma Canadense,

QUENNEVILLE (1998)

O autor concluiu que nenhuma das curvas carga x deslizamento mostrou um comportamento de flexão pura, ou seja, nem a madeira rompeu nem o conector escoou devido à flexão somente. Todas as curvas indicaram que outro mecanismo estava envolvido: o cisalhamento. Em alguns corpos de prova houve a combinação da flexão da madeira com o escoamento do conector, somada à rigidez axial dos conectores, até o ponto onde o cisalhamento longitudinal passou a governar. As curvas obtidas nos ensaios são mostradas na Figura 2.21.

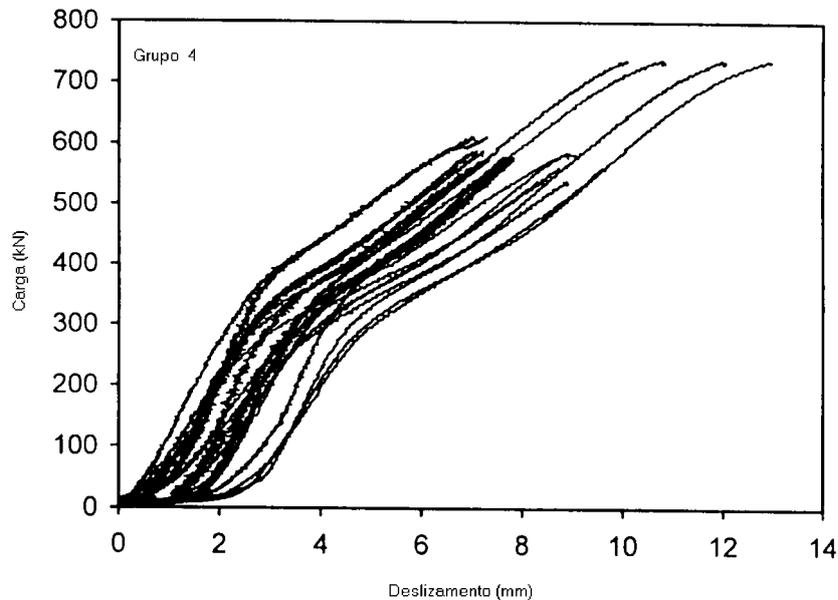


Figura 2.21 – Curva carga x deslizamento de um ensaio, QUENNEVILLE (1998)

Comentários do mesmo autor indicam que essas curvas são caracterizadas por um ponto de escoamento (primeira mudança na curva), uma redução na rigidez (segunda curva) e um pequeno aumento na rigidez em alguns corpos de prova. Uma análise em

vários grupos onde houve o cisalhamento foi feita. Uma equação foi proposta, depois de uma análise de regressão linear, conjugando a influência entre a resistência ao cisalhamento e a menor grandeza entre os valores: a) Distância entre conectores; b) Distância entre conectores e borda. Esta equação fornece o valor da resistência ao cisalhamento longitudinal.

Como conclusão principal do autor tem-se que o espaçamento nas linhas de parafusos é o responsável pela resistência última. Variando esta grandeza pode-se resultar em “rasgamento” da peça ou em cisalhamento.

**SATO e ARIMA (1998)** analisaram ensaios repetitivos em ligações pregadas, com ciclos variando entre 1000 e 3000 repetições. O deslocamento da ligação sob carga cíclica geralmente ocorreu com o aumento na magnitude da carga e com o número de ciclos. A resistência última das ligações depois do carregamento cíclico não foi afetada.

Segundo os autores as ligações são os componentes mais importantes na resposta de uma estrutura sob carregamento cíclico, tal como o vento e terremoto. Porém os estudos de ligações pregadas sujeitas a estes carregamentos ainda são raros.

Os ensaios foram divididos em 2 séries:

\_Série A: Ensaio com 3 peças com 2 pregos em cada lado, com um plano de corte de cisalhamento. Esta série tinha como objetivo analisar o efeito da peça externa, número de ciclos e resistência da ligação sob carregamento cíclico, Figuras 2.22 e 2.23;

\_Série B: Estudo dos efeitos da espessura da peça externa e do tamanho dos pregos.

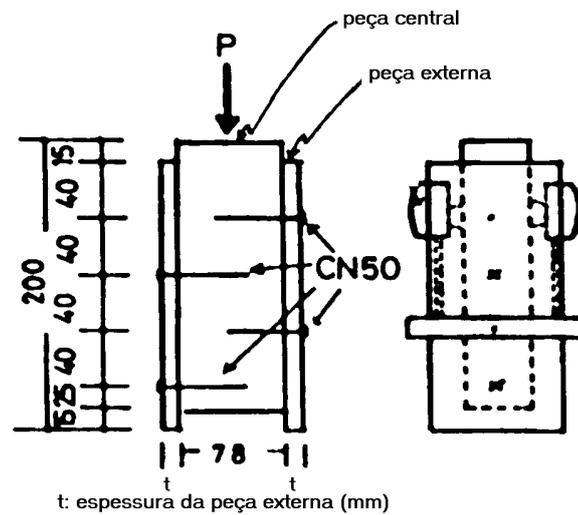


Figura 2.22 – Corpo de prova dos ensaios cíclicos, SATO e ARIMA (1998)

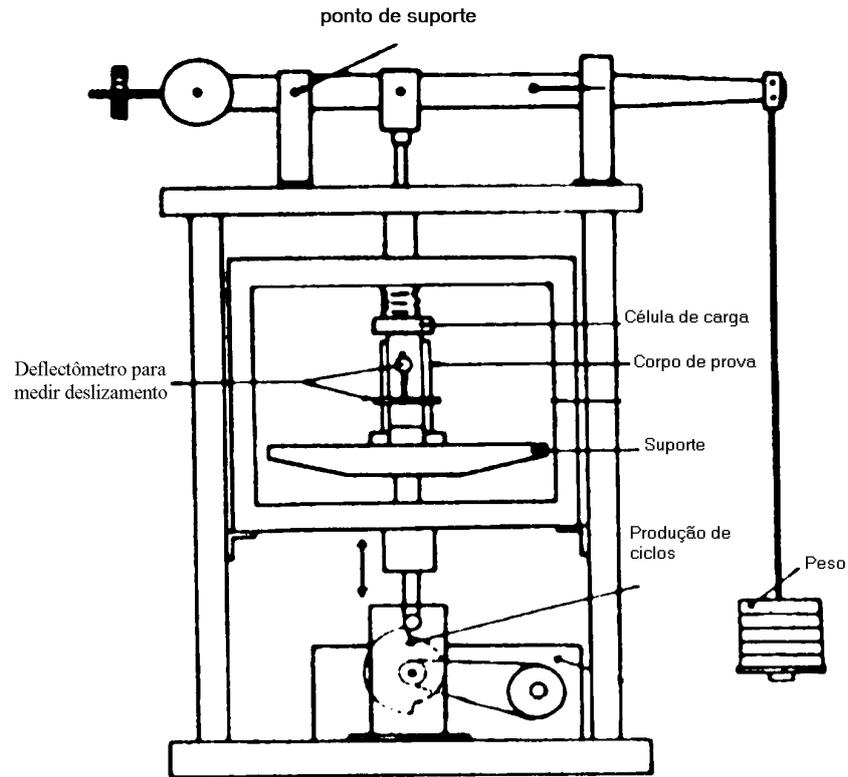


Figura 2.23 – Esquema do ensaio, SATO e ARIMA (1998)

Um corpo de prova foi levado à ruptura e os demais foram carregados com 0%, 10%, 30% e 50% da carga última obtida do ensaio com o primeiro corpo de prova. A taxa de ciclos foi de aproximadamente 17 ciclos/min. O diagrama é mostrado na Tabela 2.3. Na Figura 2.24 são mostradas as curvas carga x tempo e deslocamento x tempo, obtidas dos ensaios.

Tabela 2.3 – Ciclos aplicados aos ensaios, SATO e ARIMA (1998)

Condição Experimental	Modelo de carregamento cíclico (porcentagem de carga aplicada)
I	10% 30% 50%
II	10% → 30% → 50%
III	30% → 10% → 30%
IV	50% → 10% → 50%

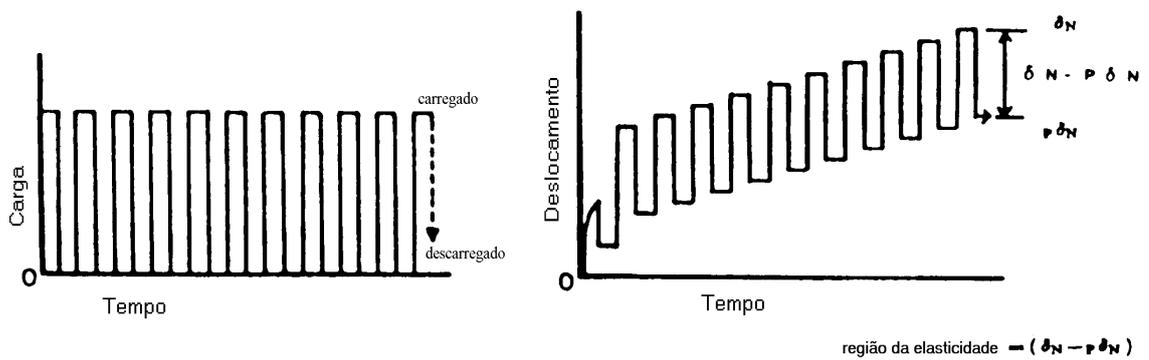


Figura 2.24 – Curvas carga x tempo e deslocamento x tempo, SATO e ARIMA (1998)

Os resultados são mostrados na Figura 2.25, para os corpos de prova de número II, III e IV, já que o de número I foi levado à ruptura, como dito anteriormente.

Observando a figura ocorre que o aumento do deslocamento relativo foi causado pelo aumento do número de ciclos e da sua magnitude propriamente dita. A recuperação do deslocamento não foi observada nas condições III e IV, quando a carga foi reduzida. Isso pode ter ocorrido porque a ligação foi afetada pela carga de maior valor durante a fadiga.

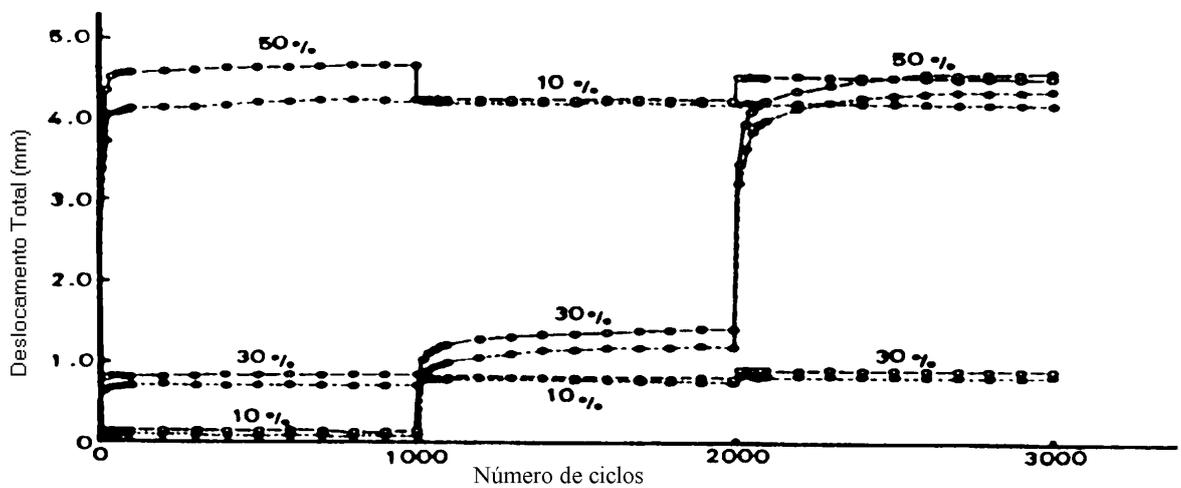


Figura 2.25 – Resultados dos ensaios dos corpos de prova II, III e IV, SATO e ARIMA

(1998)

Um gráfico típico de deslocamento x porcentagem da carga aplicada pode ser mostrado na Figura 2.26:

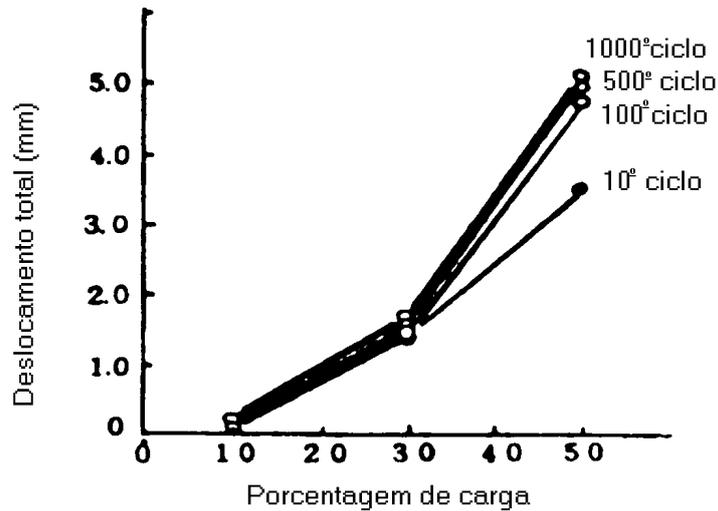


Figura 2.26 – Curva deslocamento x porcentagem de carga aplicada, SATO e ARIMA (1998)

A partir da Figura 2.26 concluiu-se que o aumento no deslocamento é muito pequeno depois da centésima repetição e tende a um valor constante. Isso ocorre porque a peça interna e a externa possuem uma região de contato com o prego que é parcialmente esmagada pelo carregamento cíclico. E mais: o deslocamento aumentou depois do carregamento de 30%.

Uma equação empírica foi proposta para caracterizar o ensaio:

$$SL = a.\delta^b - c.\text{Log}N \quad 2.2$$

onde:

SL: % da carga última;

a, b, c: constantes;

$\delta$ : deslocamento total;

N: número do ciclo.

A relação entre a carga do primeiro ciclo da equação anterior e a carga de um ensaio estático é mostrada na Figura 2.27.

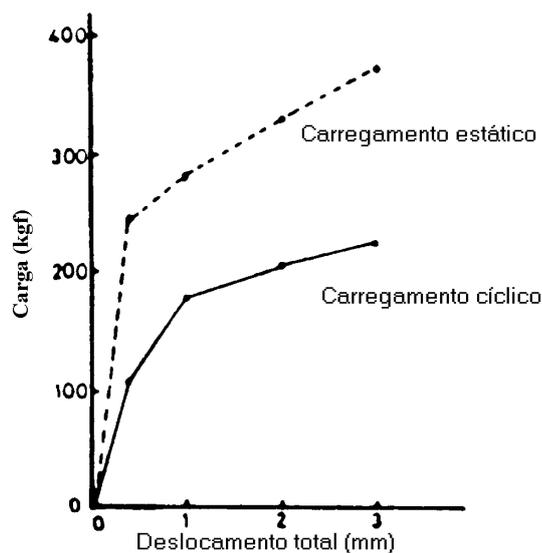


Figura 2.27 – Relação entre a carga do primeiro ciclo e a carga do ensaio estático,

SATO e ARIMA (1998)

Pode-se ver que o ensaio com carregamento cíclico é bastante diferente do estático, pois o valor da carga para cada deslocamento depois do teste cíclico é de cerca de 70% daquela do ensaio não cíclico.

A Figura 2.28 mostra a relação entre o deslocamento elástico e a porcentagem da carga aplicada. Segundo o autor pode-se notar que com o aumento da porcentagem da carga para a madeira compensada há o aumento do deslocamento elástico. Para peças de madeira maciça este crescimento é maior até os 30%, mas depois de 30% este aumento não é tão grande. Isso ocorre, como dito anteriormente, porque a peça interna e a externa possuem uma região de contato com o prego que é parcialmente esmagada pelo carregamento repetitivo.

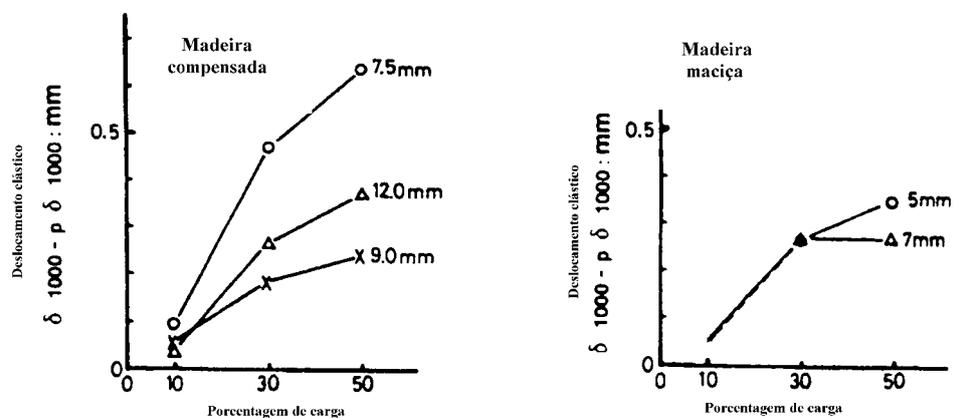


Figura 2.28 – Relação entre o deslocamento elástico e a porcentagem de carga aplicada,

SATO e ARIMA (1998)

A Tabela 2.4 mostra a carga última de ligações sob carregamento cíclico como uma porcentagem da carga última de ligações sob carregamento não cíclico. De acordo com os autores, a resistência das ligações depois do carregamento cíclico, em geral, não é significativamente diferente daquela depois de um ensaio estático. Este resultado está de acordo com Mack *appud* (SATO e ARIMA, 1960) .

Tabela 2.4 – Relação da carga última de ligações sob carregamento cíclico como uma porcentagem da carga última de ligações sob carregamento não cíclico, SATO e ARIMA (1998)

Tipo de madeira	Espessura da madeira (mm)	Porcentagem de carga			
		10 (%)	30 (%)	50 (%)	10→30→50 (%)
Madeira Compensada	7,5	1,06	1,17	0,99	1,01
	9,0	0,96	1,04	0,95	0,93
	12,0	1,07	1,01	1,08	1,12
Madeira Maciça com resina fenol	12,0	1,00	0,96	0,99	1,02
Madeira maciça	5,0	1,03	0,95	1,11	1,03
	7,0	1,13	1,17	1,13	1,11

A partir dos resultados da Figura 2.29 o autor concluiu que se o tamanho do prego é o mesmo, o deslocamento relativo é influenciado pela espessura da peça

externa. Além disso, quanto menor o diâmetro do prego, maior o seu deslocamento relativo.

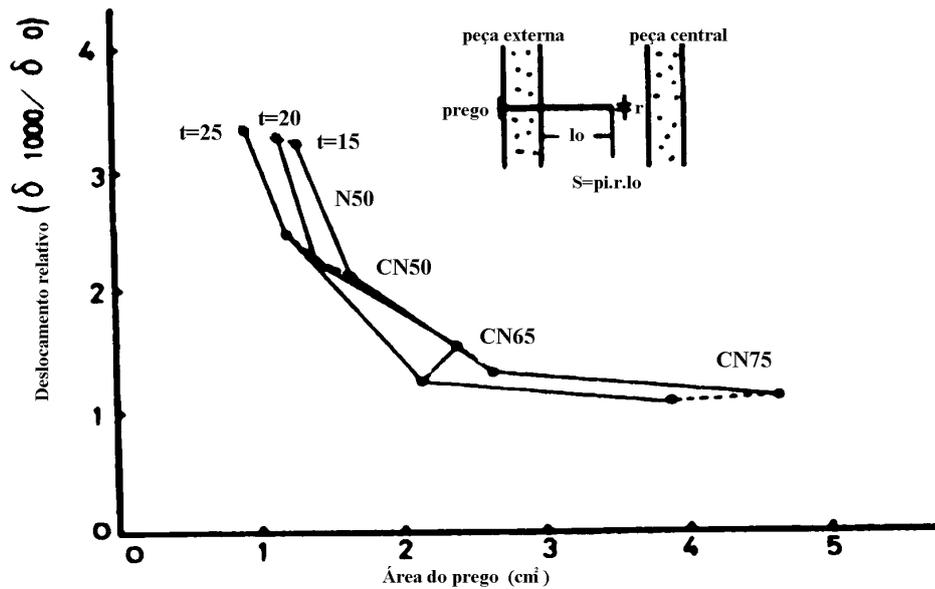


Figura 2.29 – Curva deslocamento relativo x área do prego, SATO e ARIMA(1998)

**HIRAI et alii (1998)** estudaram ligações com conectores múltiplos. Segundo estes pesquisadores, essas ligações possuem uma resistência menor que a resistência ideal. Os orifícios para abrigar os conectores possuem um diâmetro bem maior que o diâmetro dos próprios conectores. Assim, realizando uma análise da posição de cada conector, observou-se que cada um dos conectores possui uma localização randômica dentro de seu próprio orifício. Embora esta localização seja bidimensional, há uma simplificação para uma análise unidimensional, ou seja, na direção do esforço, Figuras 2.30 e 2.31.

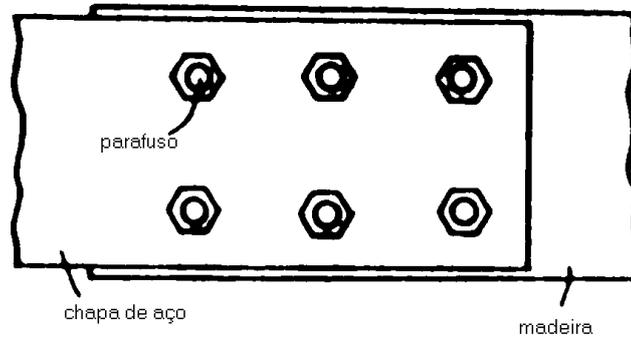


Figura 2.30 – Ligação sob ação de força axial, HIRAI *et alii* (1998)

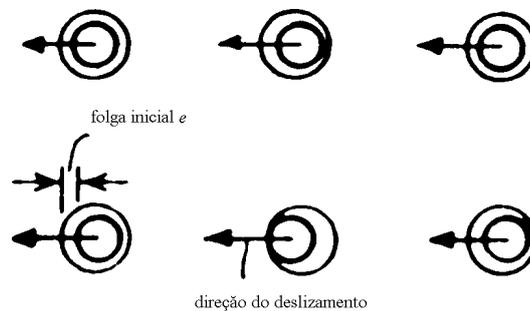


Figura 2.31 – Simplificação da posição inicial dos parafusos, HIRAI *et alii* (1998)

Observando a Figura 2.32 os autores concluíram que o conector com a menor folga,  $e$ , rompe primeiro, considerando que cada conector tem a mesma curva força  $x$  deslizamento. Para um mesmo deslocamento,  $s$ , e um mesmo  $\Delta s$ , o conector com menor folga recebe uma carga maior e começa a trabalhar antes dos demais. Se um

conector se rompe, torna-se incapaz de resistir parcial ou totalmente e redistribui o reforço atuante aos outros conectores.

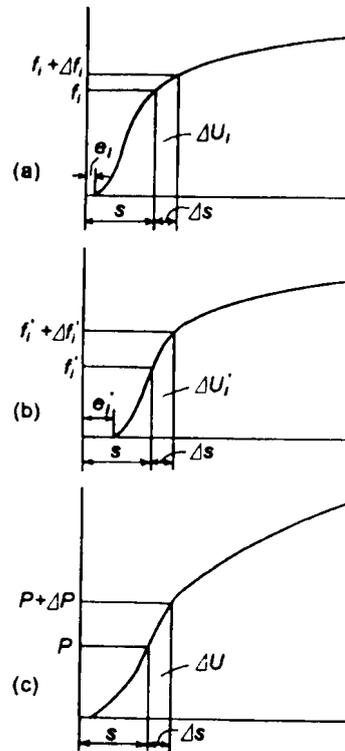


Figura 2.32 – Curvas carga x deslizamento para ligações parafusadas - (a) e (b) curvas carga x deslizamento para cada parafuso; (c) curva carga x deslizamento da ligação,

HIRAI *et alii* (1998)

**RACHER, P. (1996)** publicou um artigo sobre ligações resistentes a momento fletor. Segundo o autor, o tipo de ligação e as tecnologias aplicadas dependem fortemente do *layout* da estrutura e de como as peças trabalham. Ele propôs uma

equação que, se seguida, produz cálculos mais exatos e as ligações podem ser convenientemente classificadas, considerando o parâmetro  $\beta_r$ , dado pela Equação 2.3.

$$k_r = \beta_r \frac{EI}{L} \quad 2.3$$

onde:

$K_r$  é a rigidez rotacional da ligação;

$EI$  é a rigidez à flexão;

$L$  é o comprimento da peça.

Uma substancial diminuição no momento na ligação ocorre quando o coeficiente  $\beta_r$  é menor do que 6. Se o valor de  $\beta_r$  estiver entre 8 e 12 a ligação pode ser considerada rígida. Se  $\beta_r$  estiver próximo de 0,5 a ligação será flexível.

O autor ainda analisa o comportamento local da ligação, que deve ser examinada quando atua o momento fletor. Considerando o comportamento ortotrópico da madeira, os conectores são carregados a um ângulo variável com as fibras. Para atingir uma análise elástica as peças são consideradas como rígidas, visto que elas são mais resistentes que a região da ligação. Portanto, a rotação da ligação resulta de um deslocamento rotacional  $\omega$  dos conectores.

O valor de  $K_r$  também pode ser obtido pela Equação 2.4.

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\alpha_j} r_j^2 \quad 2.4$$

onde:

$K_{\alpha_j}$  é o módulo de deslizamento na direção da força do conector j;

$r_j$  é a distância entre o centro do conector e o centro da ligação.

Para peças paralelas o módulo de deslizamento é determinado pela fórmula de Hankinson, Equação 2.5.

$$K_{\alpha_j} = \frac{K_{0,j} K_{90,j}}{K_{0,j} \sin^2 \alpha_j + K_{90,j} \cos^2 \alpha_j} \quad 2.5$$

onde:

$K_{0j}$  é o módulo de deslizamento a  $0^\circ$ ;

$K_{90j}$  é o módulo de deslizamento a  $90^\circ$ ;

$\alpha_j$  é o ângulo entre a linha que liga o centro da ligação ao conector j e as fibras.

Se as peças forem perpendiculares entre si, o módulo de deslizamento é independente da posição do conector e a Equação 2.6 é utilizada.

$$K_{aj} = \frac{2 \cdot K_{0,j} K_{90,j}}{K_{0,j} + K_{90,j}} \quad 2.6$$

## 2.2 - Quanto às análises numéricas

Em algumas análises de MEF (método dos elementos finitos) foi levada em consideração a proporção de elementos para modelar a linha de cola quando a ligação era colada. **MILNER e YEOH (1991)** analisaram a linha de uma cola especial, pois eram grandes as dificuldades numéricas associadas ao coeficiente de rigidez paralelo e normal à linha de cola comum. A teoria matemática foi desenvolvida e tais elementos submetidos à análise nas ligações, variando a geometria.

**JENSEN** em (1992) analisou um pórtico plano de madeira com um elemento de duas dimensões, levando em conta a não linearidade das ligações. O modelo considera cada conector e soma sua contribuição em cada conexão. A matriz de rigidez tangente para um elemento de dois nós é apresentada. As equações de equilíbrio global não linear são resolvidas usando o método do comprimento do arco, que permite descobrir o caminho do equilíbrio no espaço carga – deslocamento entre os pontos de limite. Em estruturas de madeira com pinos como conectores (pregos, parafusos, etc), a relação momento – rotação da conexão depende do nível da força transferida, e similarmente a relação força–translação depende da quantidade de momento transferido. O modelo leva em conta os efeitos de ligação e requer somente um número limitado de ensaios para ser

realizado, porque a teoria é baseada no conhecimento do comportamento de cada conector em separado. Testes com cargas laterais num conector separado mostram relações carga – deslizamento não lineares. Em alguns conectores a carga pode ainda diminuir depois de um ponto de máximo, mesmo aumentando-se constantemente o deslizamento. Levando em conta essas não linearidades do material as equações de equilíbrio global se tornam não lineares. A aplicação da técnica do comprimento do arco permite encontrar o caminho de equilíbrio complexo no espaço multidimensional mesmo depois que pontos limites tenham passado. Isto se torna importante quando da análise de estruturas onde a rigidez da ligação pode se tornar negativa.

**VERGNE (1992)** formulou um modelo numérico analisando o comportamento global de uma estrutura de madeira, já conhecendo o comportamento de suas ligações. A área da ligação não é definida e os efeitos da interação nas vigas conectadas podem ser distribuídos. Isto é diferente de ligações de aço, onde a ruptura é mais localizada. Os métodos numéricos existentes são muito complexos ou não exatos o bastante para a resposta geral da ligação. O modelamento matemático geral de comportamento local na ligação não é possível de ser feito porque a curva pode vir a ter diferentes formas até a ruptura. Isto se deve à grande heterogeneidade das ligações em madeira e aos vários fenômenos locais. A definição geométrica é puntual, permitindo o deslocamento relativo de dois pontos nodais. O método dos elementos finitos pode usar análise local ou geral. Os resultados do modelo foram comparados com outros modelos numéricos e experimentais e a aproximação foi muito boa.

**BOUCHAIR *et alii* (1996)** analisaram um modelo baseado no comportamento ortotrópico da madeira. O objetivo deste estudo era entender a ação combinada de diversos conectores em círculo em uma ligação de madeira e seu efeito nas cargas dos conectores, que é condição para a resistência da ligação. Uma solução elástica da interação de conectores múltiplos em ligações de madeira é dada, baseada na análise do método dos elementos finitos, para checar a validade dos métodos analíticos. Com o objetivo de modelar o nó, um modelo numérico foi feito para se ter acesso aos efeitos da rigidez inicial da curva de distribuição dos pinos de um nó real. Uma extensão das aplicações do modelo à forma não linear total foi feita para estudar a redistribuição devida às fases não lineares de comportamento de cada conector. Dois tipos de ligações foram estudados (L e T), usando simulação dos elementos finitos através de malhas. O programa experimental consistia de um teste de uma ligação T com grandes dimensões. Diversas espécies de madeira foram extraídas da área do nó para analisar alguns parâmetros que influenciam no comportamento da ligação, como por exemplo, o teor de umidade. A ligação em T tinha pinos localizados em círculo. Este estudo levou em consideração a rigidez inicial da curva de embutimento para cada pino. É interessante mostrar o efeito desta hipótese de cálculo. O efeito do embutimento inicial é mais importante que a ortotropia. Há um grande efeito na carga entre todos os conectores. A descrição matemática das complexas relações carga x deslizamento e momento x rotação de conexões mecânicas em madeira serve para quantificar o comportamento desses sistemas estruturais.

**MALLORY e PELLICANE (1998)** analisaram o comportamento de ligações parafusadas em madeira. O modelo considerou a natureza tridimensional não linear da madeira. Dois fatores foram levados em consideração:

- A madeira é idealizada como um material 3D, homogêneo e ortotrópico;
- O comportamento da madeira pode ser modelado como um contínuo homogêneo.

Segundo estes pesquisadores, embora a madeira não seja nem homogênea nem um contínuo, o modelamento de uma peça que é grande em comparação com o tamanho de uma célula como sendo homogêneo é rotina. A madeira é linearmente elástica para análise do comportamento de um pequeno trecho, válido para intervalos abaixo de 75-80% da resistência última à compressão.

O programa usado foi o ABAQUS, com as seguintes características:

- a) Análise tridimensional;
- b) Material isotrópico;
- c) Comportamento constitutivo elasto-plástico;
- d) Comportamento constitutivo linear elástico ortotrópico;
- e) Superfícies 3D de contato.

A característica de material com comportamento constitutivo ortotrópico não linear não estava disponível. No entanto, o programa permitiu uma subrotina em FORTRAN, que levou em consideração o comportamento não linear da madeira. Este comportamento foi desenvolvido usando curvas tensão x deformação de compressão e tensão x deformação de cisalhamento, derivadas de experimentos e retiradas da literatura. As rigidezes de compressão e cisalhamento foram armazenadas independentemente como uma função de deformações de compressão e cisalhamento, respectivamente durante uma análise com incrementos. O modelo constitutivo para modelar os conectores de aço foi o modelo de material isotrópico perfeitamente plástico.

Como resultados, os pesquisadores não encontraram solução analítica para usar este experimento como base para uma comparação direta à análise do MEF. Entretanto, a análise resultou ser razoável em termos experimentais. Essas comparações mostraram que o modelo de MEF mostrou comportamentos importantes P- $\Delta$ , observados durante os experimentos, tais como a não plastificação por flexão do conector em pequenas proporções e a sua plastificação em grandes proporções. Outros modelos constitutivos em 3D são necessários para desenvolver melhor um modelo numérico para ligações parafusadas.

**JENSEN e LARSEN(1998)** estudaram o comportamento de ligações em estruturas de madeira com placas sobrepostas e conectores como anéis, pregos ou parafusos.

A maneira mais simples de tratar o comportamento semi-rígido é modelando as ligações por meio de 3 molas: uma mola rotacional que interage com rotação mútua e duas translações que interagem com deslizamentos mútuos em duas direções ortogonais. Tal modelo tem pelo menos 2 inconvenientes, o que torna inadequado o seu uso na análise das ligações. As molas têm comportamento independente, ou seja, a resistência de uma mola não é influenciada pelo nível de carga das outras duas molas. Mas nesse tipo de ligação o conector está sujeito ao carregamento das 3 molas. Devido ao comportamento não linear de cada conector, o princípio da superposição de efeitos não é aplicável e a superposição de efeitos repetidos pode ocorrer. Outra grande desvantagem desse modelo é a grande quantidade de trabalho experimental necessário pra estabelecer as relações constitutivas. 3 relações carga x deslocamento tem que ser determinadas para a geometria de cada ligação. O elemento usado foi designado PGMF (Plane Group of Mechanical Fasteners).

**KHAROUF et alii (1998)** analisaram a tensão em ligações com 1 e 2 conectores em madeira. Uma investigação sobre o comportamento estático de ligações parafusadas em MLC é apresentada. Os campos tensão-deformação são analisados quando a parede do orifício está sob tensão. Deformações previstas são comparadas às obtidas com

extensômetros elétricos em locais críticos próximos à concentração de tensões em peças com diferentes distâncias entre conectores e a borda, e entre conectores. A análise foi feita, devido à simetria, em uma metade da ligação carregada, com o elemento ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis). A malha deste elemento está mostrada na Figura 2.33.

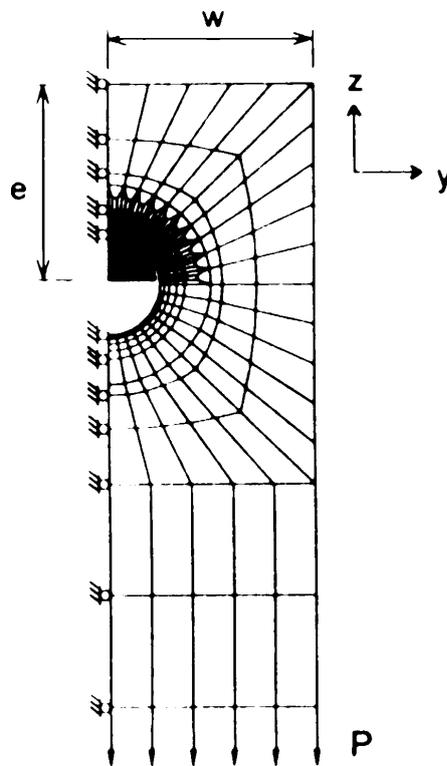


Figura 2.33 – Elemento ADINA, KHAROUF *et alii* (1998)

Deformações previstas quando o carregamento era paralelo e normal às fibras foram próximas das obtidas no ensaio. Porém, deformações à compressão e cisalhamento foram menores que as medidas. A análise de deformações e tensões

ênfatiza a necessidade de se considerar um modelo elasto-plástico ortotrópico na região de contato. Uma distribuição desigual entre os parafusos nas ligações com 2 parafusos em uma linha é verificada pelo valor da resultante das forças de contato. A maior razão para isso são as limitações do modelo constitutivo, pois não leva em consideração a deformação inelástica. A variação na geometria e no número de parafusos resultou em malhas levemente diferentes para cada configuração estudada. O refinamento das malhas foi necessário nas proximidades da parede do orifício carregado por causa do alto gradiente de tensão.

### **CAPÍTULO 3 - OBJETIVO**

O principal objetivo desta dissertação é o estudo do comportamento das ligações com tubos metálicos (parafusos ocos) em peças de madeira laminada colada submetidas a esforços combinados de momento fletor e força cortante.

Para a análise da resistência das tábuas de Eucalipto foi utilizado o aparelho SYLVA TEST, via ultra-som, que determinou a sua resistência à compressão. Logo em seguida as tábuas foram devidamente coladas.

Os conectores utilizados foram os parafusos ocos, ou seja, tubos metálicos. Este tipo de conector já foi utilizado pelos pesquisadores **Leijten e Rodd (1996a)**, porém aqui os tubos não foram expandidos. Eles simplesmente substituíram os parafusos comuns, pois a região central dos parafusos contém material em excesso que não trabalha às solicitações, constituindo desperdício e elevação de custos. No Brasil este tipo de conexão ainda não foi estudado.

Foram realizados dois tipos de ensaios:

I) Duas peças de MLC foram dispostas e conectadas de modo a terem formato de L e constituírem o corpo de prova a ser ensaiado. Os diversos corpos de prova receberam então carga concentrada em uma de suas extremidades. Eles foram ensaiados à flexão, o que permitiu relacionar o momento fletor aplicado e a rotação ocorrida entre as peças;

II) Foram realizados também ensaios de embutimento que permitiram medir o deslocamento relativo médio entre o tubo e a extremidade do corpo de prova.

Pretendeu-se definir o(s) modo(s) de ruptura de ligações com tubos ocos em peças de Eucalipto laminado colado quando ensaiadas em (I) e em (II).

Pretende-se contribuir com os estudos de ligação no Brasil, apresentando os resultados obtidos em ensaios de um conector que se mostrou bastante eficiente em estruturas no exterior.

## **CAPÍTULO 4 - PROJETO DO EXPERIMENTO**

Antes de se iniciar a realização dos ensaios foi necessário um pré-dimensionamento dos tubos a serem usados, das peças de madeira, das chapas de ligação, enfim, dos modelos a serem ensaiados. Esta etapa é de suma importância, pois teve-se uma noção das dimensões que os corpos de prova teriam em função da resistência de cada componente do modelo. Os corpos de prova foram divididos em três séries: série A, com corpos de prova utilizando tubos de ½”; série B, utilizando tubos de ¾” e finalmente, série C, utilizando tubos de 1”. As chapas tinham espessura de ¼”.

Foram analisados primeiramente os requisitos dos ensaios à flexão e a seguir os referentes aos ensaios de embutimento, nas direções normal e paralela às fibras.

### ***4.1 – Para os ensaios à flexão***

#### **4.1.1 – Distâncias mínimas**

Como na NBR 7190/97 não existem distâncias mínimas preliminares para ligações com tubos em corpos de prova de madeira foram adotadas as mesmas prescritas para os parafusos.

Distâncias mínimas:

\* Entre tubos:  $a=4\phi$  (na direção do esforço);

\* Entre tubo e borda:  $a=2\phi$  (na direção do esforço);

$a=1,5\phi$  (na direção perpendicular ao esforço).

Os tubos encontrados no comércio tinham diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ " e 1", dimensões internas. Para os tubos funcionarem como pinos, foram medidos seus diâmetros externos, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores dos diâmetros externos medidos para cada tipo de tubo

Diâmetro interno(polegadas)	Diâmetro externo medido (mm)
$\frac{1}{2}$	21,4
$\frac{3}{4}$	26,9
1	34,5

A NBR 7190/97 recomenda ainda que:

- As ligações com quatro ou mais parafusos são consideradas rígidas ou deformáveis de acordo com o diâmetro do furo  $d^o$ . Se  $d^o \leq (\phi + 0,5)$ mm a ligação será rígida. Se  $d^o > (\phi + 0,5)$ mm a ligação será deformável.
- A resistência característica de escoamento dos parafusos deve ser no mínimo 240 MPa e  $\phi_{\text{mín}}=10$ mm.

Finalmente, de posse de todos estes valores os espaçamentos mínimos adotados foram: distância entre tubos e bordas  $2\phi$  e distância entre tubos  $4\phi$ . Na Tabela 4.2 são apresentados os valores adotados para cada tubo.

Tabela 4.2 – Tabela com os valores das distâncias entre bordas e tubos e entre tubos

$\phi$ (polegadas)	$2\phi$ (mm)	$4\phi$ (mm)
$\frac{1}{2}$	50	100
$\frac{3}{4}$	55	110
1	70	140

#### 4.1.2 – Esquema de ensaio à flexão

Os ensaios à flexão foram realizados no Laboratório de Análise experimental de Estruturas, LAEES, da UFMG. O sistema de carregamento para a realização dos ensaios consistia de um pórtico, com a aplicação de carga feita através de um cilindro hidráulico, Figura 4.1. Com o intuito de se obter o maior tamanho possível do modelo, foi medida a altura,  $l$ , disponível entre o ponto de aplicação de carga e o nível do chão. O valor de  $l$  foi de 93 cm.

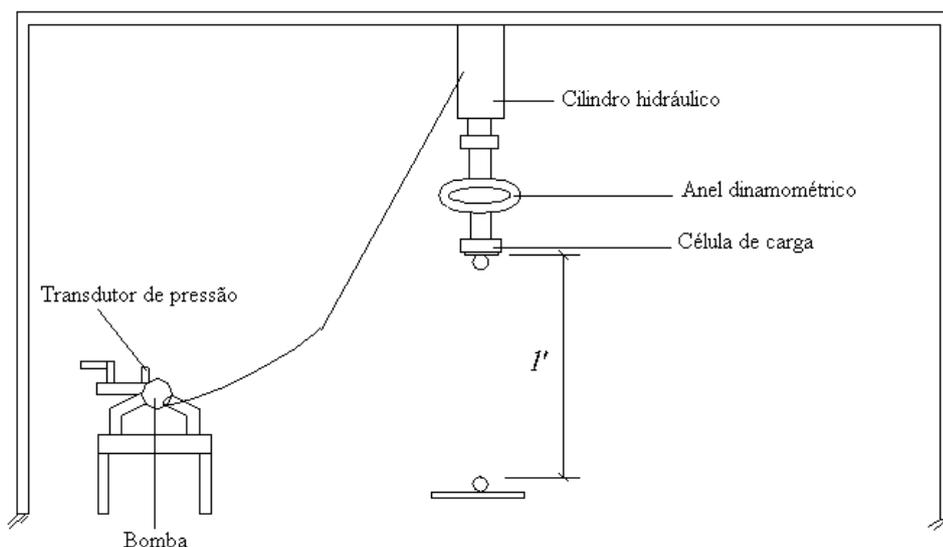


Figura 4.1 – Pórtico para teste de flexão

Os corpos de prova para o ensaio à flexão foram projetados de modo que houvesse a aplicação de momento fletor e força cortante solicitando a ligação. O resultado foi um corpo de prova em L, com duas peças ligadas através de oito tubos de aço galvanizado e um par de chapas de ligação, cada uma localizada de um lado do corpo de prova. O ensaio, como foi idealizado, tinha dois apoios: um apoio articulado móvel no ponto de aplicação de carga e outro articulado fixo na região do apoio. As duas peças do corpo de prova tinham a mesma altura na seção transversal,  $b$ . O diâmetro, e conseqüentemente as distâncias mínimas entre tubos e entre tubos e borda, eram diferentes para cada série (A, B ou C). Assim, cada série teve um valor característico para a grandeza,  $b$ . De acordo com a distância medida no laboratório entre o ponto de aplicação de carga e o ponto de apoio os corpos de prova poderiam ter no máximo 93 cm de altura, Figura 4.2.

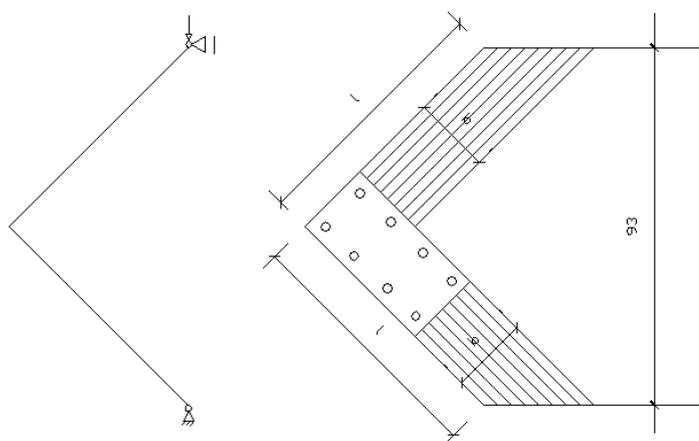


Figura 4.2 – Corpo de prova dos ensaios à flexão

#### 4.1.3 – Determinação da carga máxima aplicada no corpo de prova através das resistências dos materiais

De acordo com a Figura 4.3 a carga é aplicada na peça **A**. Esta carga se transfere da madeira para os tubos e destes para a chapa. A chapa por sua vez transmite novamente o esforço para a madeira, peça **B** e esta reage no apoio.

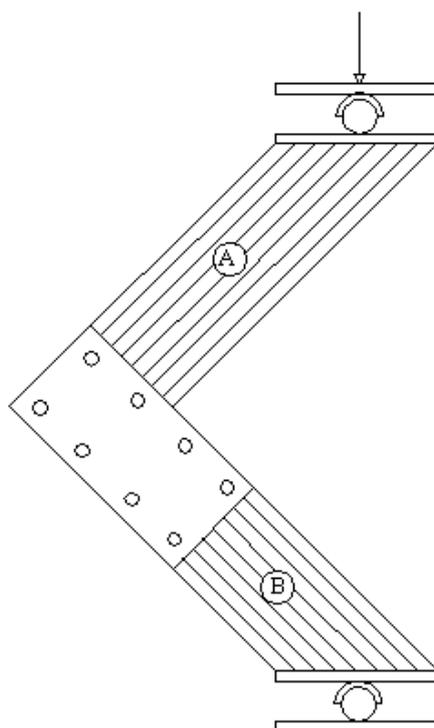


Figura 4.3 – Esquema do ensaio com os apoios articulados

O dimensionamento do corpo de prova foi feito com base nas resistências dos seus componentes, ou seja, nas chapas de ligação e no conjunto tubos-madeira. Assim de posse dos valores de resistência de cada um foi determinada a carga máxima a ser aplicada no corpo de prova. Esse valor foi dado pela menor das resistências encontradas, pois todos os componentes deveriam estar em serviço quando solicitados com a carga última do modelo. Os cálculos foram feitos para os diâmetros de  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ " e 1".

4.1.3.1 – carga máxima através da resistência das chapas

capacidade de carga das chapas

A chapa do corpo de prova tem a ação do momento fletor e da força cortante como mostrado na Figura 4.4.

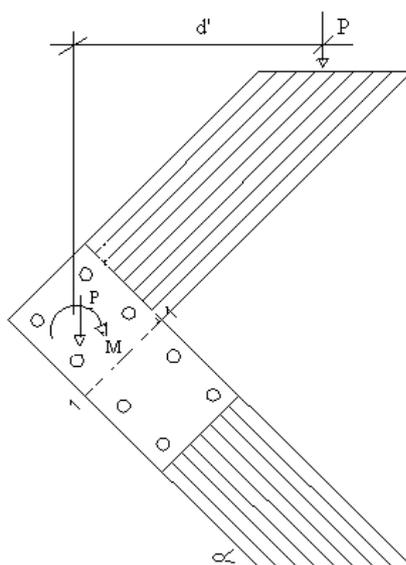


Figura 4.4 – Chapa do corpo de prova

Observando a parte inferior da chapa na altura da linha 1-1, tem-se a ação de esforços na extremidade da chapa, Figura 4.5.

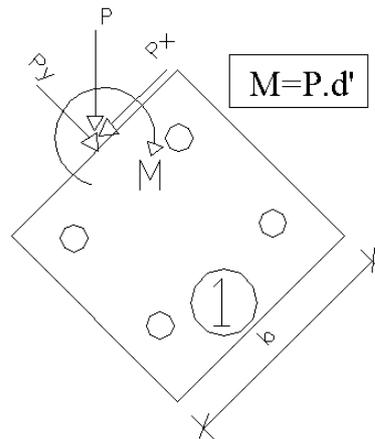


Figura 4.5 – Ações na extremidade da chapa

$P_x$  e  $P_y$  são as componentes da carga que atua na seção transversal da chapa. Assim existem na chapa as ações de tensões normais, causadas pelo momento fletor,  $M$  e por  $P_y$ , e tensão de cisalhamento, causada por  $P_x$ , Figura 4.6. As resultantes das ações na chapa encontram-se na Figura 4.7.

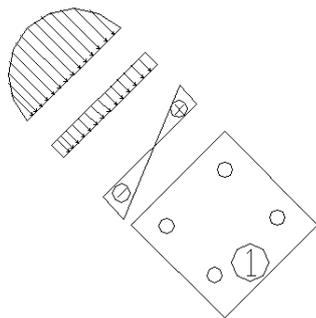


Figura 4.6 – Tensões normais na seção 1-1

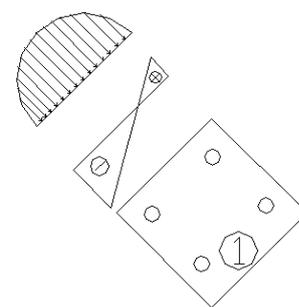


Figura 4.7 – Resultante das ações

Ao se verificar as tensões normais é preciso obedecer a condição dada pela Equação 4.1, ou seja, a tensão normal atuante deve ser no máximo, igual à resistência da chapa a estas ações.

$$\sigma_{(M)} + \sigma_{(P_y)} \leq f_y \quad 4.1$$

onde:  $\sigma_{(M)}$  é a tensão normal devida à ação do momento fletor, M;

$\sigma_{(P_y)}$  é a tensão normal devida à ação de  $P_y$ ;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

Substituindo-se as ações do momento fletor e da força  $P_y$  tem-se a Equação 4.2.

$$\frac{M \cdot y}{I_x} + \frac{P_y}{A} \leq f_y \quad 4.2$$

onde: M é o momento fletor atuante;

y é distância da borda à linha neutra;

$I_x$  é o momento de inércia em relação ao eixo x-x da chapa;

$P_y$  é a força atuante no eixo y-y da chapa;

A é a área onde atua  $P_y$ .

Como queremos a carga máxima, P e não  $P_y$  e M, tem-se a Equação 4.3.

$$\frac{P.d'.y}{I_x} + \frac{P.\cos \alpha}{A} \leq f_y \quad 4.3$$

onde: P é a força cortante atuante;

$d'$  é o braço de alavanca;

y é distância da borda à linha neutra;

$I_x$  é o momento de inércia em relação ao eixo x-x da chapa;

$\alpha$  é o ângulo de inclinação da chapa.

Ao se verificar a tensão de cisalhamento é preciso obedecer a condição dada pela Equação 4.4, ou seja, a tensão de cisalhamento atuante deve ser no máximo igual à resistência da chapa a esta ação.

$$\tau_{(P_x)} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad 4.4$$

onde:  $\tau_{(P_x)}$  é a tensão de cisalhamento devido a  $P_x$ ;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

Substituindo-se a ação da força  $P_x$  tem-se a Equação 4.5.

$$\frac{P_x}{t.b} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad 4.5$$

onde:  $P_x$  é a força atuante no eixo x-x da chapa;

t é a espessura da chapa;

b é a largura da chapa.

Como se quer a carga máxima, P e não  $P_x$ , tem-se a Equação 4.6.

$$\frac{P.\text{sen } \alpha}{t.b} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad 4.6$$

onde: P é a força cortante atuante;

$\alpha$  é o ângulo de inclinação da chapa.

#### Carga máxima no corpo de prova devida às chapas

Foram verificadas as Equações 4.1 a 4.6 para cada diâmetro de tubo, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Cargas máximas a serem aplicadas nos corpos de prova de acordo com a resistência das chapas

Corpos de prova	Tubo	Cargas Máximas (kN)	
		Chapa na flexão (kN)	Chapa no cisalhamento (kN)
Série A	1/2"	19	259
Série B	3/4"	23	285
Série C	1"	35	362

4.1.3.2 – carga máxima através das resistências dos tubos e da madeira capacidade de carga dos tubos

Foram analisadas em conjunto as resistências dos tubos e da madeira. A NBR7190/97 define a resistência de um pino maciço e, por analogia, será aqui adotada para o cálculo da resistência de um tubo.

A determinação da resistência ao embutimento é feita através de equações em formato de resistência de cálculo. Como interessou a carga máxima, estas equações foram reescritas em formato de resistência característica, Equações 4.7 e 4.8.

$$f_{e0,k} = f_{c0,k} \quad 4.7$$

onde:  $f_{e0,k}$  é a resistência característica ao embutimento a  $0^\circ$  (paralela às fibras);

$f_{c0,k}$  é a resistência característica à compressão a  $0^\circ$  (paralela às fibras).

$$f_{e90,k} = 0,25 \cdot f_{c0,k} \cdot \alpha_e \quad 4.8$$

onde:  $f_{e90,k}$  é a resistência característica ao embutimento a  $90^\circ$  (normal às fibras);

$f_{c0,k}$  é a resistência característica à compressão a  $0^\circ$  (paralela às fibras);

$\alpha_e$  é um coeficiente relacionado ao diâmetro do tubo.

Assim para o [*Eucalipto Grandis*], de acordo com a tabela de valores médios tem-se  $f_{c0,m}=40,3$  MPa.

Para se obter os valores característicos foram utilizadas as Equações 4.9 e 4.10.

$$f_{e0,k} = 0,70 \cdot f_{c0,m} \quad 4.9$$

onde:  $f_{c0,m}$  é a resistência média à compressão a  $0^\circ$  (paralela às fibras).

$$f_{e90,k} = 0,175 \cdot f_{c0,m} \cdot \alpha_e \quad 4.10$$

Finalmente a resistência ao embutimento a um ângulo  $\theta$  é dada pela equação de Hankinson, Equação 4.11.

$$f_{e\theta,k} = \frac{f_{e0,k} \cdot f_{e90,k}}{f_{e0,k} \cdot \text{sen}^2 \theta + f_{e90,k} \cdot \text{cos}^2 \theta} \quad 4.11$$

onde:  $f_{e\theta,k}$  é a resistência característica ao embutimento a um ângulo de  $\theta$ ;

$f_{e0,k}$  é a resistência característica ao embutimento a  $0^\circ$  (paralela às fibras);

$f_{e90,k}$  é a resistência característica ao embutimento a  $90^\circ$  (normal às fibras);

$\theta$  é o ângulo entre a direção de atuação da resultante em tubo e a direção das fibras.

Na determinação da resistência de um tubo podem acontecer dois fenômenos: ou o tubo pode fletir por causa da força ou esmagar a parede do furo da madeira. O valor da resistência de um tubo metálico é determinado em função do valor do parâmetro  $\beta$ , Equação 4.12.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad 4.12$$

onde:  $t$  é a espessura convencional da peça de madeira;

$d$  é o diâmetro do tubo usado.

Para pinos maciços a NBR7190/97 estipula como valor limite a Equação 4.13.

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\theta,d}}} \quad 4.13$$

onde:  $f_{yd}$  é a resistência de cálculo ao escoamento do tubo;

$f_{e\theta d}$  é a resistência de cálculo ao embutimento a um ângulo  $\theta$ .

O cálculo do  $\beta_{lim}$  para os parafusos ocos foi feito por analogia ao cálculo do  $\beta_{lim}$  para as cavilhas (NBR7190/97). A sua equação se encontra em 4.14.

$$\beta_{lim} = \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{aço}}} \quad 4.14$$

onde:  $f_{yd}$  é a resistência de cálculo ao escoamento do tubo;

$f_{aço}$  é a tensão de esmagamento nas paredes do tubo, considerada na flexão.

O cálculo de  $f_{aço}$  foi feito pela Resistência dos Materiais, considerando o tubo como uma viga simplesmente apoiada com uma carga  $p$  uniformemente distribuída, Figura 4.8.

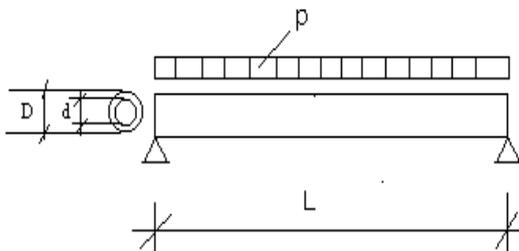


Figura 4.8

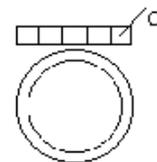


Figura 4.9

Foi calculada a tensão causada pelo valor máximo de p, considerando finas as paredes do tubo. Tem-se a condição expressa na Equação 4.15.

$$\frac{M \cdot y}{I} \leq f_{yd} \quad 4.15$$

Como  $M = \frac{p \cdot l^2}{8}$  e  $I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$  tem-se que o valor da carga distribuída p é aquele da Equação 4.16.

$$p \leq \frac{f_{yd} \cdot \pi \cdot (D^4 - d^4)}{4 \cdot D \cdot l^2} \quad 4.16$$

Como são finas as paredes do tubo tem-se a Figura 4.9, onde a carga p se distribui ao longo do diâmetro D, originando a carga distribuída  $q = \frac{p}{D}$ .

Da Resistência dos Materiais a Equação 4.17 deve ser satisfeita.

$$\sigma = \frac{q \cdot r}{e} \leq f_{yd} \quad 4.17$$

Se o valor encontrado para q satisfizer a Equação 4.17 este é o valor máximo procurado, ou seja,  $f_{aço}$ .

Como interessava a carga última do ensaio, foram tomados os valores característicos na Equação 4.14. Finalmente foi possível obter o valor de  $\beta_{lim}$ .

- Se  $\beta > \beta_{lim}$  ocorre a flexão do tubo e a resistência do tubo é dada pela Equação 4.18.

$$R_{vd,1} = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{yd} \quad 4.18$$

- Se  $\beta \leq \beta_{lim}$  ocorre o esmagamento da madeira e a resistência do tubo é dada pela Equação 4.19.

$$R_{vd,1} = 0,40 \cdot \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{e\theta,k} \quad 4.19$$

onde:  $R_{vd,1}$  é a resistência do tubo;

$t$  é a espessura convencional;

$f_{e\theta,k}$  é a resistência característica ao embutimento a um ângulo  $\theta$

$d$  é o diâmetro do tubo;

$f_{yd}$  é a resistência de cálculo ao escoamento do tubo.

### carga atuante nos tubos

Inicialmente serão determinadas as solicitações em cada tubo. Na ligação do modelo existem 8 tubos, sendo 4 em cada peça. Será então analisada uma das peças.

Admitiu-se que a força cortante atuante, P, se distribui igualmente entre os tubos, Equação 4.20.

$$F_i = F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \frac{P_{m\acute{a}x}}{4} \quad 4.20$$

onde:  $P_{m\acute{a}x}$  é a força cortante máxima aplicada no ensaio;

$F_i$  é a parcela da força cortante máxima correspondente em cada tubo.

O momento fletor atuante, M, foi decomposto em forças vetoriais,  $\vec{F}_{Mi}$ , como mostra a Figura 4.10.

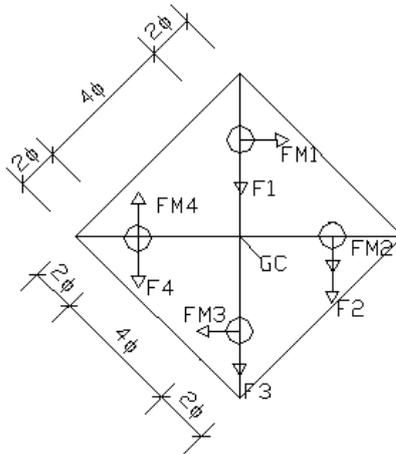


Figura 4.10 – Ação conjunta da força cortante e do momento fletor decomposto em suas componentes em cada tubo

O momento fletor pode ter a sua ação transformada em força, de acordo com a Equação 4.21.

$$F_{M_i} = \frac{M \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad 4.21$$

onde  $\overrightarrow{F_{M_i}}$  é a ação da força no tubo i, devida ao momento fletor, M;

$z_i$  é a distância do parafuso i até o centro de gravidade;

M é o momento de ensaio dado pelo produto  $P_{\text{máx}} \cdot d'$ ;

$d'$  é o braço de alavanca;

n é o número de tubos.

A resultante das forças  $\overrightarrow{F_i}$  e  $\overrightarrow{F_{M_i}}$  é dada pela Equação 4.22.

$$\overrightarrow{R_i} = \sqrt{\overrightarrow{F_{M_i}}^2 + \overrightarrow{F_i}^2 + 2 \cdot \overrightarrow{F_{M_i}} \cdot \overrightarrow{F_i} \cdot \cos \gamma} \quad 4.22$$

onde:  $\overrightarrow{R_i}$  é a resultante em cada tubo;

$\overrightarrow{F_{M_i}}$  é a força causada pela ação do momento em cada tubo;

$\overrightarrow{F_i}$  é a parcela da força cortante em cada tubo;

$\gamma$  é o ângulo entre os vetores  $\overrightarrow{F_{M_i}}$  e  $\overrightarrow{F_i}$ .

*carga máxima no corpo de prova devida aos tubos*

Para se determinar a carga máxima no corpo de prova foi necessário que se determinasse a resultante  $R_i$  em cada tubo, de acordo com a Equação 4.22. De posse da resistência de cada tubo,  $R_{vd,1}$  (capacidade de carga), verificada com a Equação 4.18 ou 4.19 e da sua resultante, é possível prever a qual carga máxima podemos levar o ensaio em relação a cada tubo. Esta equação está demonstrada em 4.23.

$$R_i \leq R_{vd,1} \quad 4.23$$

onde:  $R_i$  é a resultante no tubo mais solicitado;

$R_{vd,1}$  é a resistência do tubo  $i$ .

Assim verificou-se a hipótese da Equação 4.23 para cada tubo e montou-se a Tabela 4.4 .

Tabela 4.4 – Cargas máximas a serem aplicadas nos corpos de prova de acordo com a resistência dos tubos e da madeira

<b>Tubos de ½”</b>				
<b>Tubo</b>	<b>R<sub>i</sub> (kN)</b>	<b>θ (graus)</b>	<b>R<sub>vd,1</sub> (kN)</b>	<b>P<sub>máx,i</sub> (kN)</b>
<b>1</b>	10,54	0	16,86	31
<b>2</b>	14,52	45	8,50	11
<b>3</b>	10,54	90	5,68	10
<b>4</b>	3,40	45	8,50	39
<b>P<sub>máx</sub> = 10kN</b>				

<b>Tubos de ¾”</b>				
<b>Tubo</b>	<b>R<sub>i</sub> (kN)</b>	<b>θ (graus)</b>	<b>R<sub>vd,1</sub> (kN)</b>	<b>P<sub>máx,i</sub> (kN)</b>
<b>1</b>	11,85	0	21,26	42
<b>2</b>	16,47	45	10,08	14
<b>3</b>	11,85	90	6,60	13
<b>4</b>	3,13	45	10,08	56
<b>P<sub>máx</sub> = 13kN</b>				

<b>Tubos de 1”</b>				
<b>Tubo</b>	<b>R<sub>i</sub> (kN)</b>	<b>θ (graus)</b>	<b>R<sub>vd,1</sub> (kN)</b>	<b>P<sub>máx,i</sub> (kN)</b>
<b>1</b>	16,31	0	27,38	63
<b>2</b>	23,00	45	12,40	20
<b>3</b>	16,31	90	8,00	18
<b>4</b>	1,71	45	12,40	124
<b>P<sub>máx</sub> = 18kN</b>				



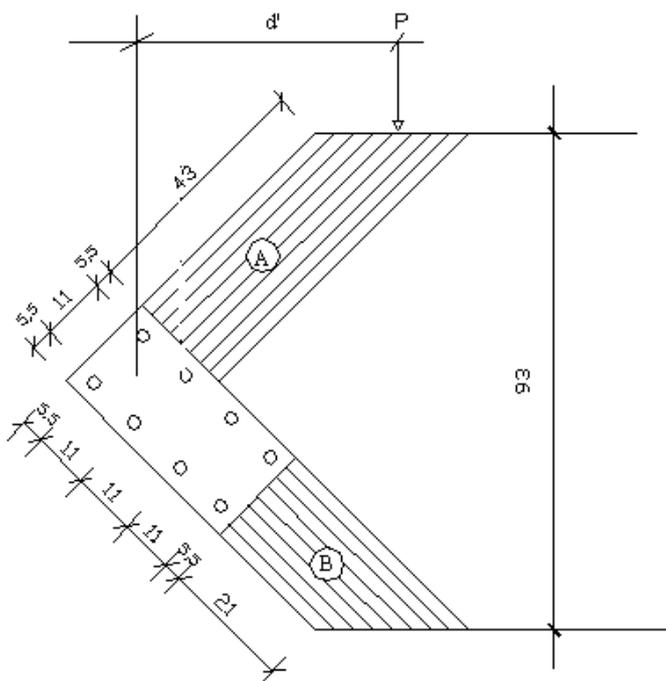


Figura 4.12 – Dimensões da série B ( $\phi = 3/4$  ”)

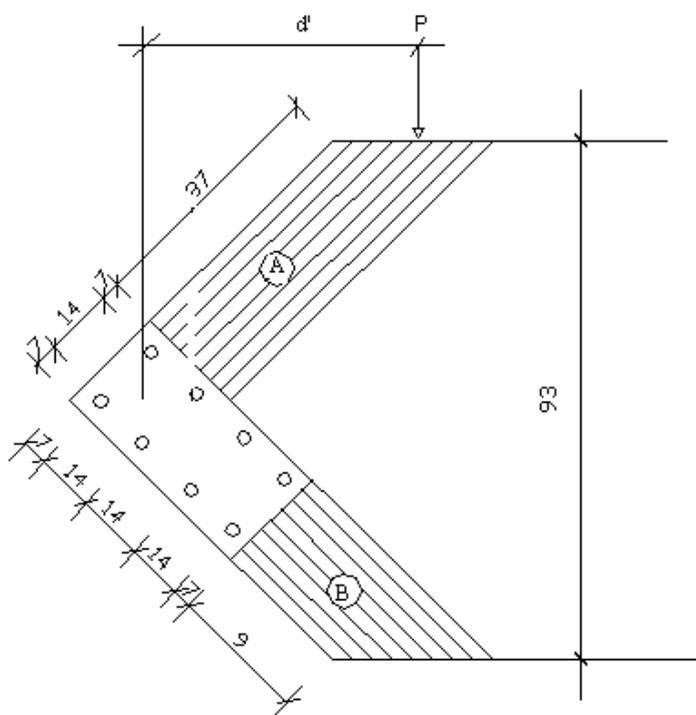


Figura 4.13 – Dimensões da série C ( $\phi = 1$  ”)

#### 4.1.5 – Cargas máximas dos modelos

Foram determinadas as cargas máximas de acordo com as resistências dos componentes do corpo de prova das séries A, B e C, ou seja, das chapas, dos tubos e da madeira. Com esses valores foi montada a tabela resumo abaixo e adotada a menor das cargas.

Tabela 4.5 – Tabela resumo das capacidades de cada componente dos corpos de prova e a carga máxima adotada nos ensaios

Corpos de prova	Tubo	Cargas Máximas (kN)			
		Chapa na flexão (kN)	Chapa no cisalhamento (kN)	Madeira+tubo (kN)	Carga máxima adotada (kN)
Série A	1/2"	19	259	10	10
Série B	3/4"	23	285	13	13
Série C	1"	35	362	18	18

## 4.2 – Para os ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras

### 4.2.1 – Dimensões dos corpos de prova

Os corpos de prova de embutimento foram retirados dos corpos de prova dos ensaios à flexão. De acordo com as dimensões dos corpos de prova provenientes dos ensaios à flexão fizemos uma adaptação quanto à exigência da norma. Devido à quantidade madeira, que às vezes foi insuficiente para atender aos requisitos da NBR7190/97 as dimensões dos corpos de prova foram proporcionais àsquelas previstas. Assim, os corpos de prova tiveram as dimensões mostradas nas Figuras 4.14 a 4.16.

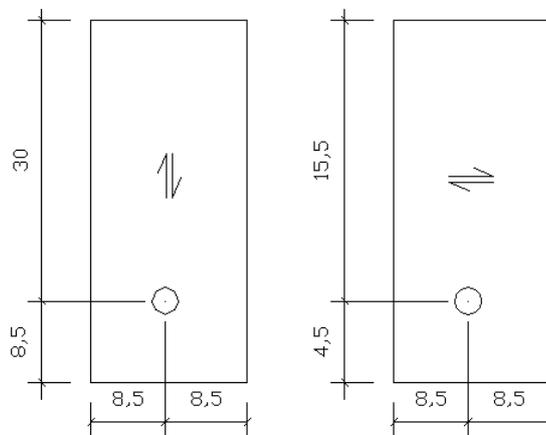


Figura 4.14 – Corpo de prova de embutimento, série A - tubos de 1/2"

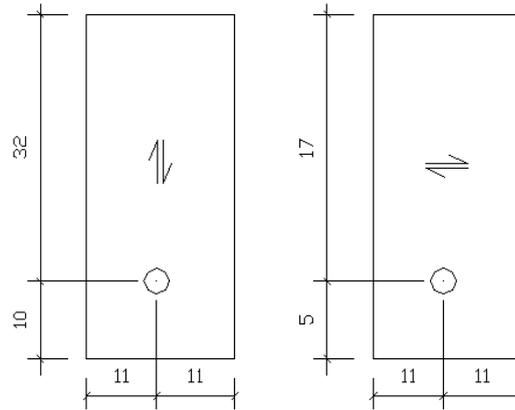


Figura 4.15 – Corpo de prova de embutimento, série B - tubos de  $\frac{3}{4}$ ”

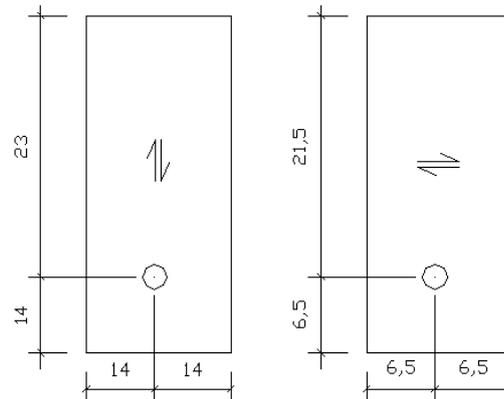


Figura 4.16 – Corpo de prova de embutimento, série C - tubos de 1”

#### 4.2.2 – Esquema de ensaio ao embutimento

Os ensaios ao embutimento foram realizados no Laboratório de Análise experimental de Estruturas, LAEES, da UFMG. O sistema de carregamento para a realização dos ensaios foi a mesma para os ensaios à flexão. Porém, como a altura entre

o ponto de aplicação de carga e o chão era de 93 cm e o curso do cilindro era de apenas 10 cm, foi necessária a construção de um bloco de concreto para apoio dos corpos de prova, Figura 4.17.

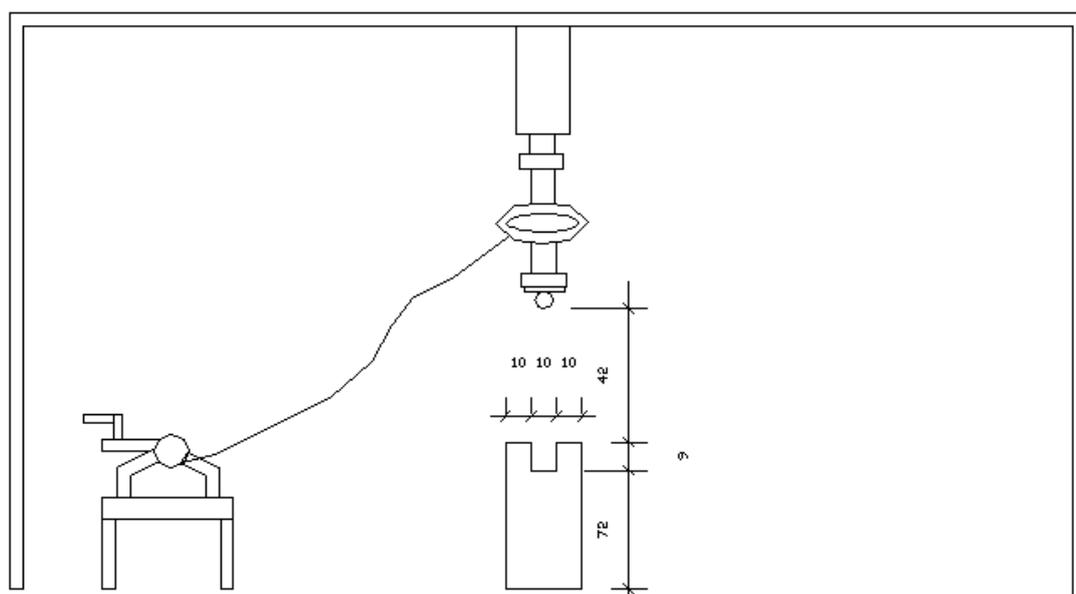


Figura 4.18 – Área de realização dos ensaios ao embutimento, LAEES, UFMG com a construção do bloco de apoio.

## **CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão vistos os materiais que foram utilizados para a confecção dos corpos de prova, os ensaios preliminares, a fabricação e a colagem das lâminas de [*Eucalipto Grandis*], a montagem dos corpos de prova, o funcionamento do sistema de aquisição de dados e finalmente os ensaios realizados.

### ***5.1 – Materiais utilizados***

#### **5.1.1 – A madeira**

A madeira utilizada foi o *Eucalipto Grandis*, da região de Martins Campos, MG. As tábuas foram escolhidas aleatoriamente, isentas de nós ou outros defeitos visuais.

#### **5.1.2 – A resina e o catalisador**

A resina utilizada foi o Cascophen RS-216-M, da Alba Química. Este tipo de resina, à base de Resorcinol-Formol, é recomendado para colagens resistentes à água, solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco e úmido, etc. O catalisador foi o Endurecedor FM-60-M, em pó, também da Alba Química. O conjunto requer um tempo mínimo de montagem isto é, o tempo compreendido entre o espalhamento da cola na superfície até a aplicação da pressão, a fim de permitir a penetração da cola. No presente estudo o tempo mínimo foi de 24 horas. Após 10 dias as colagens atingiram o máximo da sua resistência.

### 5.1.3 – Os tubos e as chapas de ligação

Os tubos escolhidos foram galvanizados com três diâmetros diferentes:  $\frac{1}{2}$ ”,  $\frac{3}{4}$ ” e 1”. Estes tubos foram cortados de acordo com as dimensões dos corpos de prova, que foram divididos em três séries: a série A, que consistia de seis corpos de prova com tubos com diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ”; a série B, com seis corpos de prova com tubos com diâmetro de  $\frac{3}{4}$ ” e série C, com de seis corpos de prova com tubos com diâmetro de 1”. Cada tubo foi preso com meia luva de aço galvanizado de cada lado, funcionando como porca. Entre o tubo e a madeira foi colocada uma arruela de cada lado do corpo de prova.

Para unir as peças de MLC foram colocadas duas chapas de ligação, uma de cada lado do corpo de prova.

## ***5.2 – Ensaios preliminares***

### 5.2.1 – Classificação visual e preparação da superfície das lâminas

Primeiramente foram escolhidas no lote, aleatoriamente, as tábuas de madeira isentas de nós ou outros defeitos visuais. Depois que as tábuas foram escolhidas elas passaram para a etapa do desengrosso, Figura 5.1. Esta etapa consiste em retirar da superfície da madeira possíveis defeitos. A seguir as tábuas passaram para a etapa da plaina, que consiste em tornar a superfície ainda mais lisa e com a espessura desejada, ou seja, de 3 cm, Figuras 5.2 e 5.3.



Figura 5.1 – As tábuas na etapa do desengrosso



Figura 5.2 – As tábuas na etapa da plaina maior



Figura 5.3 – As tábuas na etapa da plaina menor

### 5.2.2 – Ensaios de caracterização

Para a obtenção de valores característicos experimentais exatos (ou próximos disso) a cada amostra utilizada do lote seria necessário que todos os ensaios de caracterização determinados pela NBR7190/97 fossem repetidos com o objetivo de caracterizar bem cada amostra. Como nesta dissertação o número de ensaios foi razoavelmente grande e em cada corpo de prova estavam presentes de oito a treze lâminas, optou-se pelo resultado obtido através do ensaio com o aparelho SYLVA TEST®. O SYLVA TEST® é um aparelho de

classificação mecânica não destrutiva (NDT) que tem como objetivo a determinação do módulo de elasticidade e a resistência da madeira na direção de propagação da onda. O ensaio consiste em colocar em uma das extremidades da peça de madeira em análise a fonte que emite a onda e na outra extremidade o receptor, Figura 5.4. Conforme o teor de umidade presente na amostra e a própria natureza da madeira, a onda terá maior ou menor velocidade de propagação. De posse deste valor suas características são determinadas.



Figura 5.4 – Aparelho SYLVA TEST®

Originalmente este aparelho foi calibrado para espécies originárias na Europa. Assim seria necessária uma calibração para as espécies tropicais, como por exemplo, o [*Eucalipto Grandis*]. Este trabalho foi realizado por **OLIVEIRA (1999)**, que ensaiou no SYLVA TEST® trinta tábuas de madeira de [*Eucalipto Grandis*]. Foram armazenados no aparelho os seguintes dados: comprimento da tábua e o tempo gasto para a onda percorrer a distância entre a fonte e o receptor. Com isso foi possível calcular a velocidade da onda através da Equação 5.1.

$$v = \frac{d}{t} \quad 5.1$$

onde:  $v$  é a velocidade de propagação da onda, dada em m/s;

$d$  é a distância entre a fonte e o receptor, dada em m;

$t$  é o tempo gasto para percorrer o percurso, dado em s

Depois disso, as mesmas tábuas foram ensaiadas de acordo com a NBR7190/97 para determinação dos seguintes valores: módulo de elasticidade longitudinal, resistência à compressão paralela às fibras e densidade.

Depois de várias análises estatísticas feitas através do programa MINITAB® a relação matemática encontrada para determinar o módulo de elasticidade em função da densidade da lâmina foi a Equação 5.2.

$$E_{c0,k} = \frac{v^{4,011} \cdot D^{0,822}}{10^{9,565}} \quad 5.2$$

onde:  $v$  é a velocidade da onda em m/s;

$D$  é a densidade aparente em g/cm<sup>3</sup>;

A partir dessa equação foi possível determinar o módulo de elasticidade de cada lâmina dos corpos de prova ensaiados nesta dissertação. Assim as características obtidas para cada lâmina no SYLVA TEST® foram as correspondentes a cada amostra do lote disponível. A Tabela 5.1 traz os valores encontrados para os módulos de elasticidade das lâminas de um corpo de prova em função da densidade. O corpo de prova escolhido foi o CPI de 3/4". Os resultados dos demais corpos de prova encontram-se no Anexo I.

Tabela 5.1 – Módulos de elasticidade para o CPI de 3/4"

Lâmina	l (cm)	t (1e- 6)s	v (m/s)	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Peso (g)	Densidade aparente (g/cm3)	Eco (MPa)
1	182	388	4690,722	2,664	1,899	6,838	26,5	0,766	11619,89
2	181	367	4931,880	2,511	2,004	6,889	23,5	0,678	12849,69
3	181	406	4458,128	2,428	2,149	6,864	30,2	0,843	10253,62
4	185	360	5138,889	2,628	1,965	6,854	27,1	0,766	16748,47
5	182	345	5275,362	2,492	2,002	6,852	26,1	0,764	18561,99
6	183	380	4815,789	2,380	1,985	6,856	25,4	0,784	13164,28
7	184	300	6133,333	2,500	1,885	6,869	18,8	0,581	27131,24
8	195	400	4875,000	1,939	1,897	6,842	16,3	0,648	11814,18

### ***5.3 –Fabricação das peças de madeira laminada colada e a montagem dos corpos de prova***

Como dito anteriormente as tábuas passaram pela etapa do desengrosso. Em seguida as tábuas foram aplainadas e finalmente coladas.

O adesivo foi preparado seguindo o consumo observado em ensaios preliminares: 0,055g/cm<sup>2</sup> de resina para cada área colada. Assim foram calculadas e depois somadas as áreas a serem coladas. O peso do catalisador foi de cerca de 1/6 do peso calculado para a resina.

Os dois produtos foram então misturados e distribuídos uniformemente nas lâminas de madeira, nas duas faces a serem coladas, com o auxílio de um rolo de lã de carneiro, Figura 5.5.



Figura 5.5 – Distribuição da mistura nas lâminas

Após coladas todas as lâminas o conjunto foi levado a uma prensa que ofereceu uma pressão constante. Na Figura 5.6 é mostrada esta seqüência.



Figura 5.6 – Sequência da colocação do conjunto sob a prensa

A peça foi deixada sob pressão durante 24 horas com a finalidade de desenvolver a cura do adesivo. Finalmente as peças foram passadas novamente no desengrosso para retirar os excessos de cola.

Os tubos galvanizados foram confeccionados a partir de tubos com 6 metros de comprimento. Os tubos foram então posicionados de forma que facilitasse o corte em tubos menores. Depois de cortados os tubos foram feitas as roscas em cada lado do tubo. Esta seqüência é mostrada na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Corte e roscas nas extremidades dos tubos

Os corpos de prova foram então cortados de acordo com as dimensões calculadas previamente. Foram feitos furos na região da ligação para alojarem os tubos. De cada lado do corpo de prova foi colocada uma chapa de ligação de aço, em seguida, alojados os tubos e posicionadas as arruelas. Cada luva foi cortada ao meio, funcionando como uma porca de cada lado. Esta seqüência está mostrada na Figura 5.8.

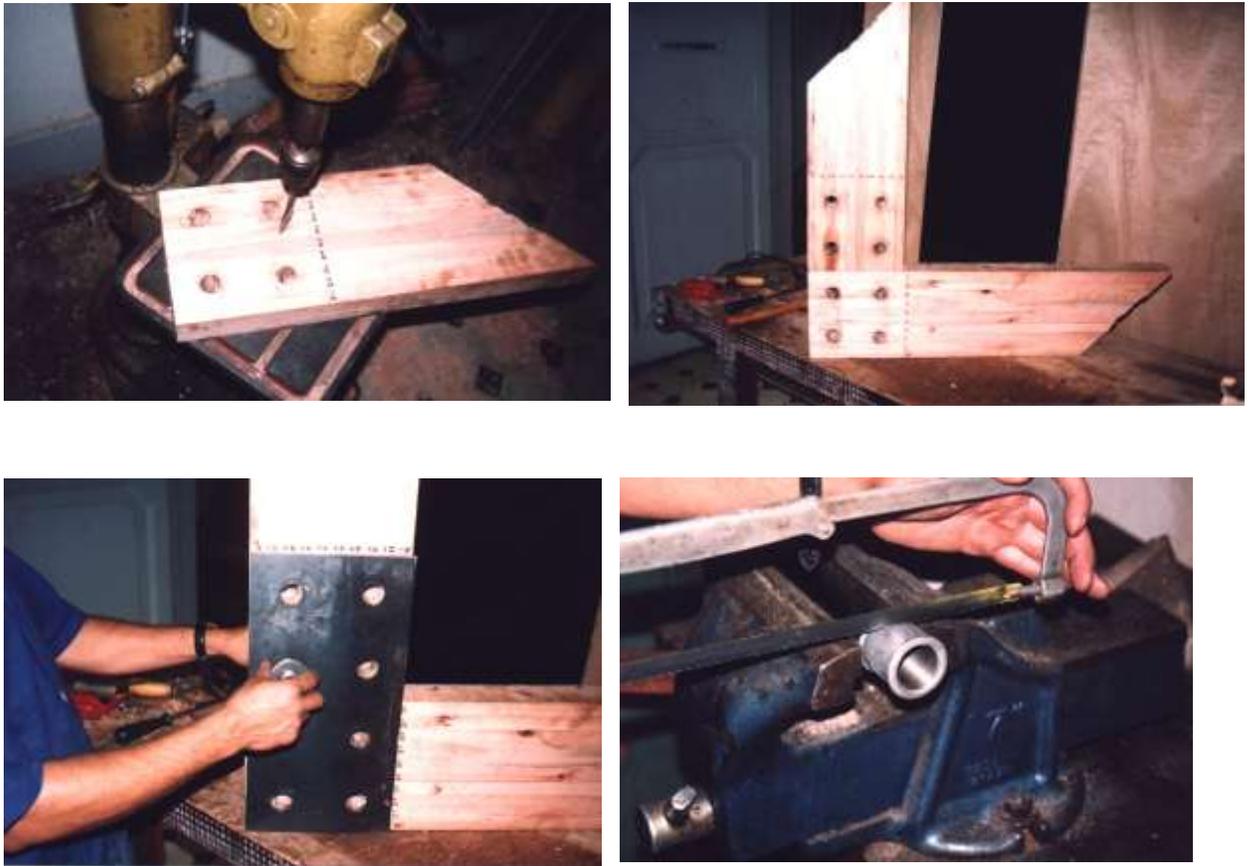


Figura 5.8 – Preparação da ligação

Em seguida os corpos de prova, já prontos com seus conectores instalados, tiveram suas rótulas parafusadas nas suas extremidades, Figuras 5.9 e 5.10



Figura 5.9 – Corpo de prova sendo preparado para receber uma parte da rótula



Figura 5.10 – Parte da rótula sendo parafusada nas extremidades do corpo de prova

#### 5.4 – Sistema de aquisição de dados (SAD)

Um sistema de aquisição de dados quando devidamente calibrado para um ensaio é capaz de transformar a voltagem lida nos seus terminais em grandezas reais. Em cada tipo de ensaio o sistema deve ser calibrado especificamente para cada grandeza a ser lida (ex: deslocamentos, deformações, cargas, temperatura, etc). Dependendo do modelo do SAD ele pode possuir mais ou menos canais, sendo que cada canal mede uma grandeza. O sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios desta dissertação usava um programa de aquisição e tratamento de dados, chamado AQDADOS, da Lynx®.

Cada aparelho a ser acoplado no SAD possui uma resistência interna característica de fabricação ( $R_g$ ). De posse desse valor  $R_g$ , dos valores de  $k'$  (constante gage) e  $R_{cal}$  (resistência de calibração), tem-se para cada aparelho conectado a cada canal uma grandeza chamada *valor de engenharia*, Equação 5.3.

$$V_{eng} = \frac{R_g \times 10^6}{k' \times (R_g + R_{cal})} \quad 5.3$$

onde:  $R_g$  é a resistência do extensômetro elétrico com o qual o aparelho foi fabricado, dado em  $\Omega$ ;

$R_{cal}$  é a resistência de calibração, dado em  $\Omega$ .

Tem-se também para cada aparelho uma faixa de voltagem (geralmente sugerida pelo fabricante) na qual este trabalha melhor.

De posse destes valores todos, depois de cada fio (terminal) devidamente ligado ao SAD, e iniciado o programa AQDADOS, verificou-se a leitura do equipamento. Isto é possível através da oscilação da voltagem inicial. Esta é uma etapa importante, pois se a voltagem não oscilar, ou o aparelho não foi devidamente ligado ou está com defeito.

O próximo passo foi a configuração das entradas, onde foi colocado o valor de engenharia em cada canal e escolhida sua respectiva faixa de voltagem.

Ainda na tela de configuração das entradas foi necessário calibrar a ponte (1/1 ou 1/2 ponte ou 1/4 de ponte).

A seguir calibrou-se cada canal. Como os aparelhos usados tinham configuração em ponte completa foi necessária a etapa calibração por regressão. Nesta etapa foram aplicadas ao aparelho condições conhecidas, relacionando-as com a voltagem lida a cada momento. Repetiu-se o processo até que fosse varrida toda a faixa de grandezas do ensaio. Acabados os valores foram registrados o ganho  $k$ , inclinação da reta da Figura 5.11-a e a porcentagem da relação entre as voltagens lidas e os valores reais digitados. Quanto mais próxima esta relação estiver de 100% melhor está a correlação entre a voltagem lida e a grandeza real. Para que o aparelho esteja zerado antes de iniciar um ensaio é necessário que

informemos ao programa que a voltagem lida será aquela correspondente ao ponto (0,0) na Figura 5.11. Assim deslocamos a reta para a origem com a mesma inclinação  $k$ , Figura 5.11-b.

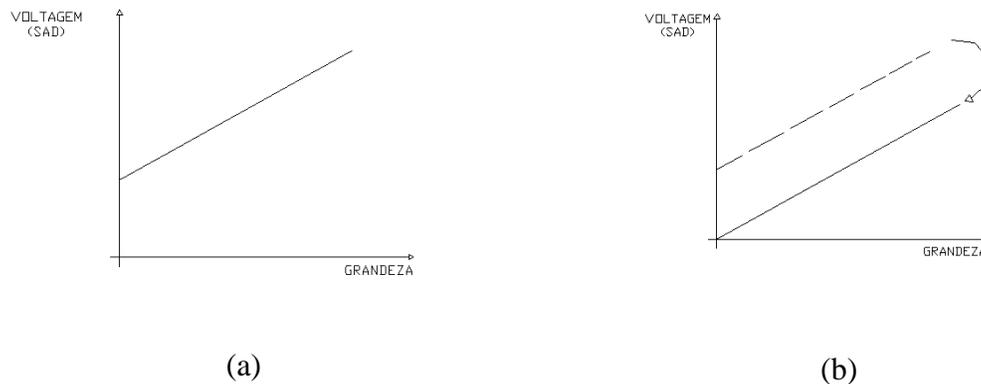


Figura 5.11 – (a)Curva da relação entre a voltagem lida e a grandeza medida;

(b)Deslocamento da reta para a origem com a mesma inclinação  $k$

### 5.5 – Os ensaios

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), da UFMG. Os corpos de prova tinham as dimensões como mostrado no capítulo 4. Foram realizados ensaios de flexão com seis corpos de prova da série A, seis da série B e seis da série C, totalizando dezoito ensaios à flexão. Depois cada corpo de prova (das séries A, B e C) foi cortado, originando dois corpos de prova menores, que foram ensaiados para determinar a resistência ao embutimento (normal e paralelo às fibras), totalizando trinta e

seis ensaios de embutimento (dezoito normal às fibras e dezoito paralelo às fibras). Assim, foram realizados cinquenta e quatro ensaios no total.

### 5.5.1 – Ensaio à flexão

#### 5.5.1.1 – Instrumentação

Na região da ligação foram colocados dois transdutores de deslocamento (DTs), um na posição horizontal e outro na posição vertical. Um terceiro transdutor foi colocado na região de aplicação de carga. A carga aplicada e os deslocamentos dos transdutores foram coletados a partir de um sistema de aquisição de dados. Na Figura 5.12 são mostrados alguns detalhes da instrumentação dos apoios e do corpo de prova.

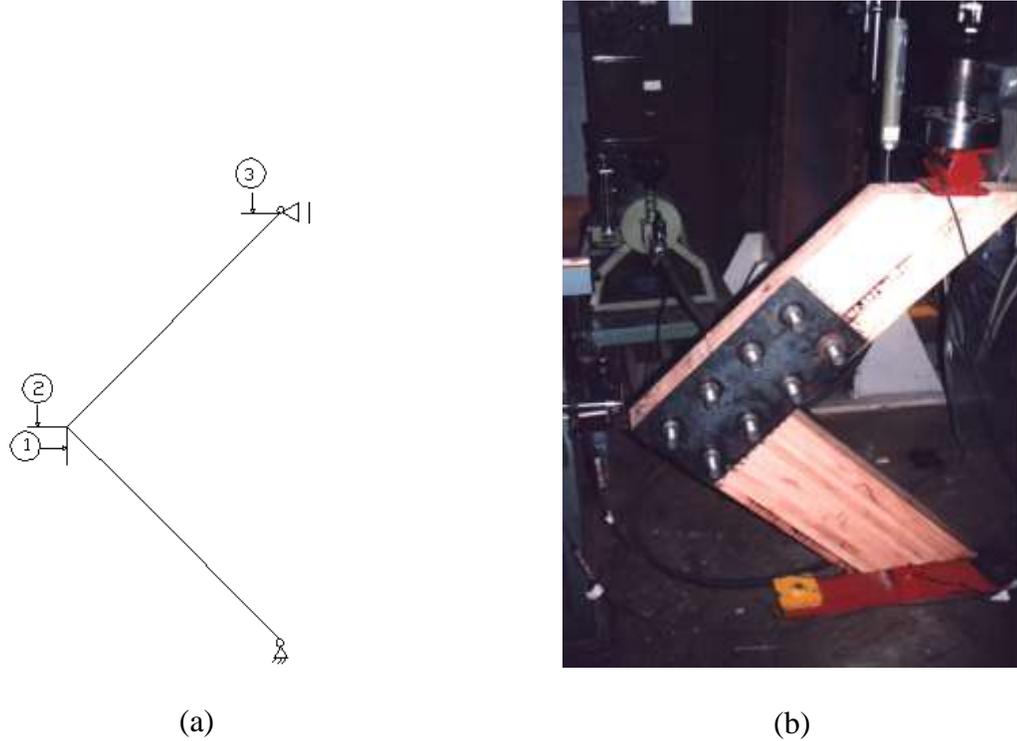


Figura 5.12 – (a) Posicionamento dos transdutores de deslocamento – Esquemático;  
(b) Posicionamento dos transdutores de deslocamento - Físico

Na Figura 5.13 são mostrados os detalhes do conjunto chapa+tubos+luvas 5.13-a e o detalhe do apoio rotulado 5.13-b.



(a)



(b)

Figura 5.13 – (a) Detalhe do conjunto chapa+tubos+luvas;

(b) Detalhe do apoio rotulado

Para efeito de comparação a carga aplicada foi registrada de duas maneiras: uma célula de carga e um transdutor de pressão.

Todas as grandezas (deslocamentos e carga aplicada) foram armazenadas no sistema de aquisição de dados, Lynx ®.

### 5.5.1.2 – O carregamento

O carregamento aplicado nos corpos de prova foi do tipo cíclico, obedecendo à forma do gráfico da Figura 5.14, indicado pela NBR7190/97.

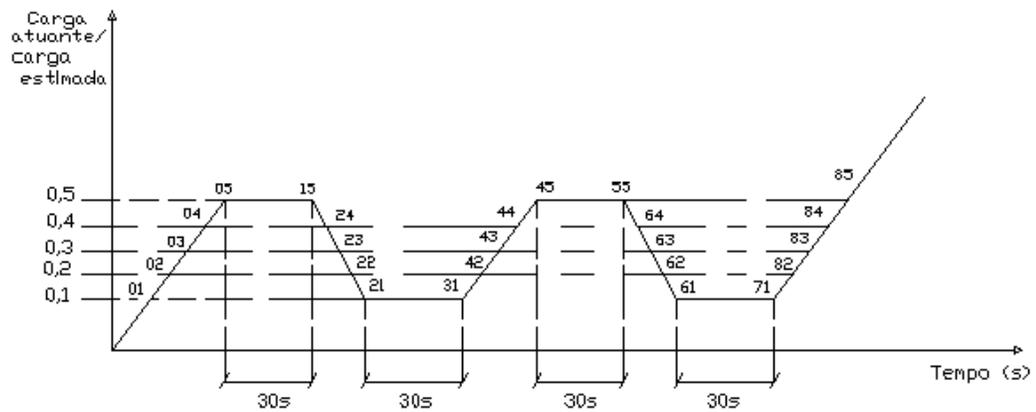


Figura 5.14 – Carregamento cíclico do corpo de prova

### 5.5.1.3 – O ensaio

O ensaio consistiu de duas etapas. Na primeira etapa os corpos de prova receberam 50% do valor da carga determinada pelo ensaio destrutivo de um corpo de prova de cada série e permaneceram com esta carga aplicada por cerca de trinta minutos. Esta etapa tinha como objetivo a acomodação da ligação. Decorrido este tempo foi retirada a carga e o corpo de prova foi então devidamente ensaiado. O carregamento obedeceu ao programa da Figura 5.14.

## 5.5.2– Ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras

### 5.5.2.1 – Instrumentação

Foram instalados dois transdutores de deslocamento, um de cada lado do corpo de prova, Figura 5.15. Seguem na Figura 5.16 as fotos dos ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras, mostrando o posicionamento dos DT's. A carga aplicada e os deslocamentos dos transdutores foram coletados a partir de um sistema de aquisição de dados.

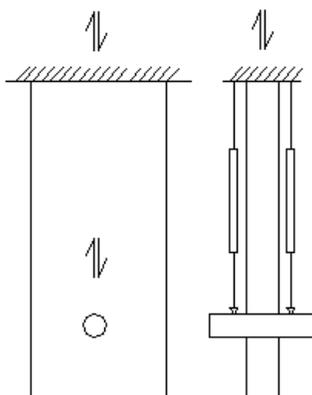


Figura 5.15 – Corpo de prova de embutimento e a localização dos transdutores de deslocamento



Figura 5.16 – Detalhes dos corpos de prova de embutimento e do posicionamento dos DT's

### 5.5.2.2 – O carregamento

Para o ensaio de embutimento, tanto normal quanto paralelo às fibras, foi estimada a resistência através de um ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo. Conhecida a resistência de embutimento estimada o carregamento aplicado nos demais corpos de prova foi do tipo cíclico, como mostrado na Figura 5.14.

### 5.5.2.3 – O ensaio

O ensaio de embutimento (normal e paralelo às fibras) consistiu de uma só etapa, que obedeceu ao carregamento cíclico mostrado na Figura 5.14.

### 5.5.2.4 – Determinação da resistência ao embutimento

A resistência de embutimento  $f_e$  é definida pela Equação 5.4.

$$f_e = \frac{F_e}{A_e} = \frac{F_e}{t.d} \quad 5.4$$

onde:  $f_e$  é a resistência de embutimento;

$F_e$  é a força que causa a deformação específica residual de 2%;

$A_e$  é a área de embutimento.

t é a espessura do corpo de prova, em metro (m);

d é o diâmetro do pino, em metro (m).

As resistências de embutimento nas direções normal e paralela às fibras,  $f_{e90}$  e  $f_0$  são determinadas a partir do diagrama tensão x deformação específica de embutimento, Figura 5.17, onde  $f(71)$  e  $f(85)$  são as tensões de embutimento correspondentes aos pontos 71 e 85 na figura 5.14. Estas resistências são dadas pelas Equações 5.5 e 5.6.

$$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{t.d} \quad 5.5$$

onde:  $f_{e90}$  é a tensão de embutimento na direção normal às fibras;

$F_{e90}$  é a força aplicada na direção normal às fibras, correspondente à deformação residual de  $\varepsilon=2\%$ , dada em Newton (N);

t é a espessura do corpo de prova, em metro (m);

d é o diâmetro do pino, em metro (m).

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{t.d} \quad 5.6$$

onde:  $f_{e0}$  é a tensão de embutimento na direção normal às fibras;

$F_{e0}$  é a força aplicada na direção paralela às fibras, correspondente à deformação residual de  $\epsilon=2\%$ , dada em Newton (N).

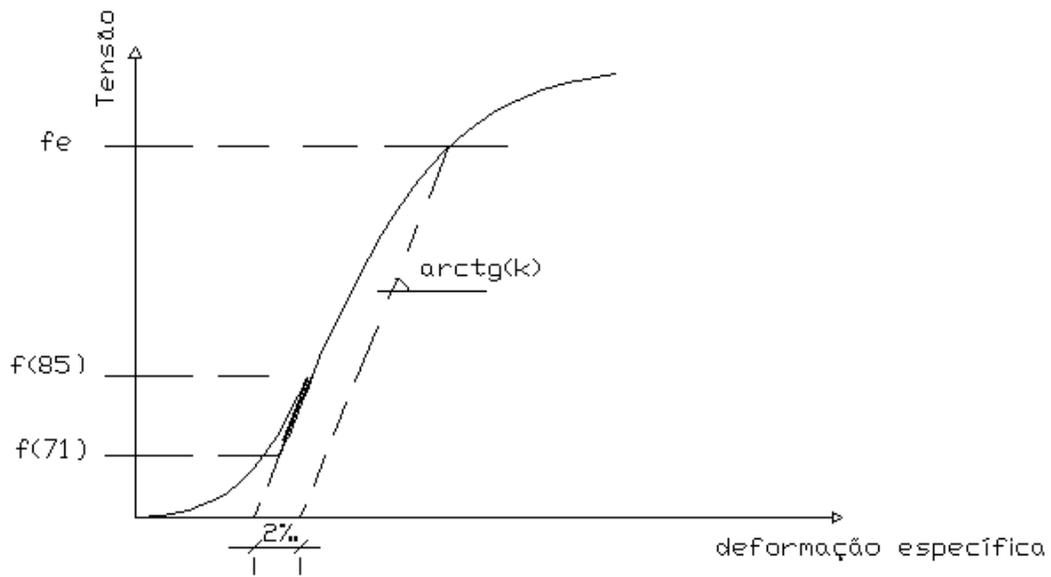


Figura 5.17 – Diagrama tensão x deformação específica de embutimento

## **CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E TRATAMENTO DE DADOS**

Como dito anteriormente, os dados foram armazenados no programa AQDADOS. Este programa permite que seus arquivos sejam exportados para um programa de planilhas eletrônicas, como por exemplo, o Excel. Todos os dados passaram por um tratamento de filtragem, matemático e de ajuste.

### ***6.1 – Para os ensaios à flexão***

Para um melhor entendimento das etapas que compreendem a análise dos resultados e conseqüentemente o tratamento de dados, serão apresentados os dados referentes ao ensaio do C<sub>PII</sub> de ½”. Os demais resultados dos ensaios à flexão das séries A, B e C encontram-se no anexo II.

Inicialmente foi traçado o gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo, Figura 6.1. Pode-se observar que o diagrama de cargas foi o estipulado pela NBR7190/97.

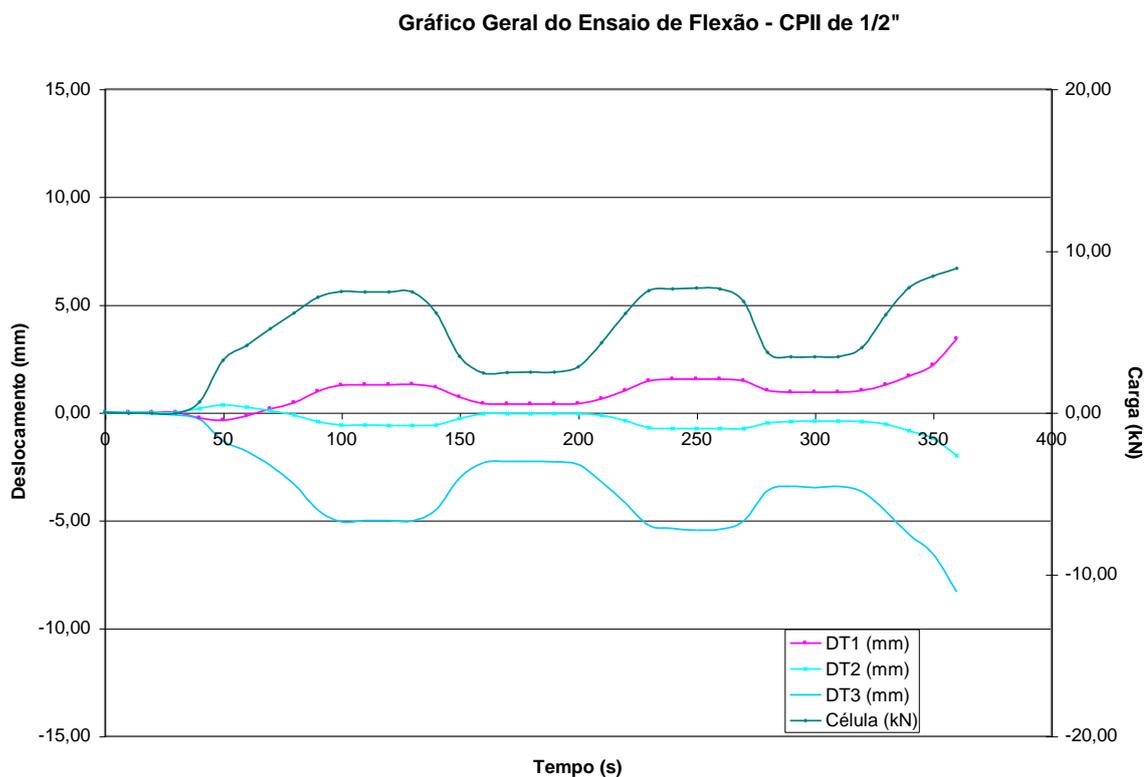


Figura 6.1 – Gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo para o CPIX de 1/2"

Para que fosse feita uma análise do comportamento dos DT's com o incremento de carga foi traçado o gráfico da Figura 6.2.

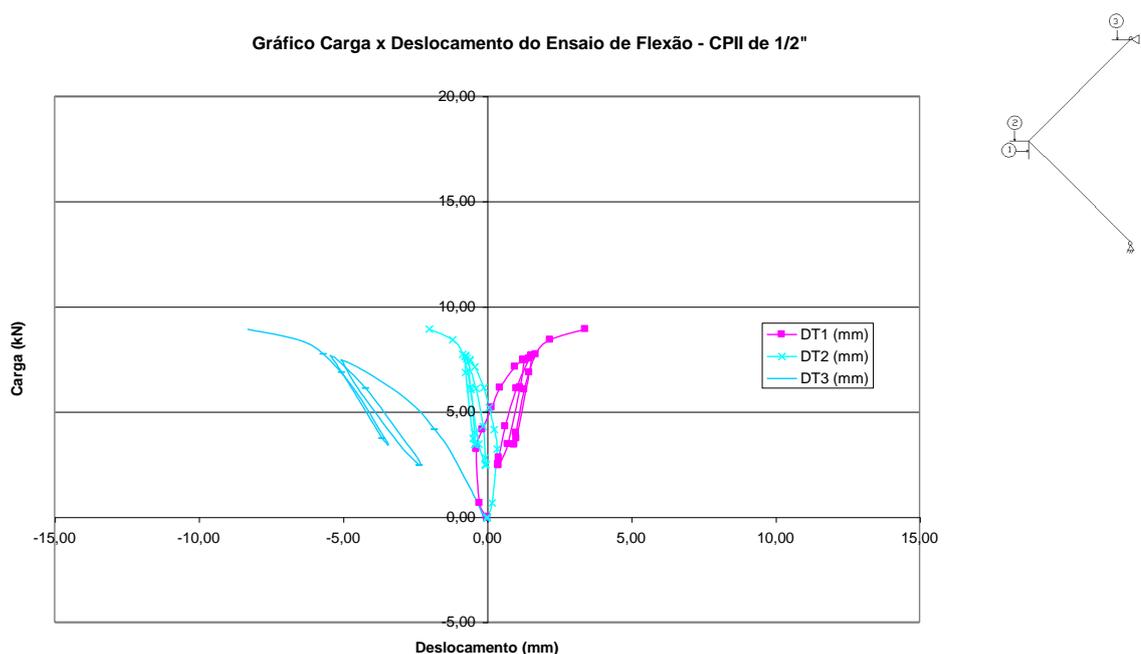


Figura 6.2 – Gráfico carga x deslocamento para o CII de 1/2”

Pode-se notar que o sinal do DT1 foi positivo enquanto o sinal dos demais foi negativo. Isso ocorreu porque a convenção de sinais adotada foi: positivo para o encurtamento da haste do DT e negativo para o seu alongamento.

A carga aplicada durante os ensaios foi armazenada no canal correspondente à célula de carga. O momento atuante na ligação correspondente a cada instante pode ser calculado pela Equação 6.1.

$$M_i = P_i \cdot d' \tag{6.1}$$

onde:  $M_i$  é o momento fletor a cada instante  $i$ , dado em N.m;

$P_i$  é a carga atuante a cada instante  $i$ , em N;

$d'$  é o braço de alavanca.

Na Figura 6.3 é mostrado o posicionamento do corpo de prova no início do ensaio, descarregado.

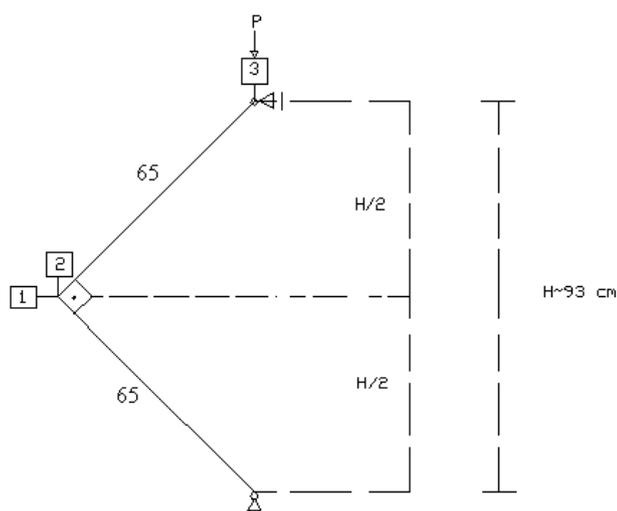


Figura 6.3 – Corpo de prova descarregado no início do ensaio

Com o incremento da carga o ponto 3 desloca-se para baixo, diminuindo o ângulo de  $90^\circ$  entre as duas peças. Os deslocamentos dos pontos 1, 2 e 3 foram armazenados nas variáveis DT1, DT2 e DT3, respectivamente no AQDADOS. Observando a Figura 6.4-a tem-se que com o incremento de carga a peça 1 gira de um ângulo  $\beta$  e a peça 2 de um ângulo  $\alpha$ .

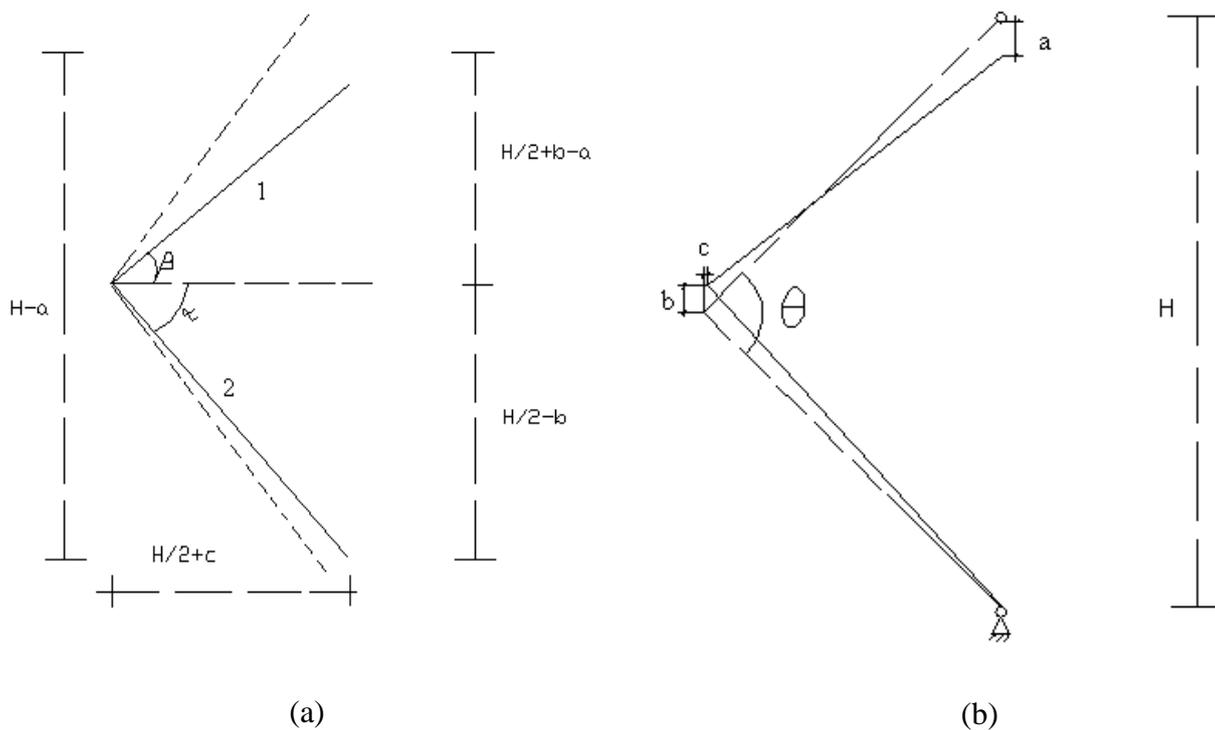


Figura 6.4 – Giros das peças 1 e 2

O giro relativo, ou seja, a rotação  $\theta$  pode ser vista na Figura 6.4-b e é calculada pela Equação 6.2.

$$\theta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \quad 6.2$$

onde:  $\alpha$  é a rotação da peça 2 do corpo de prova na Figura 6.4-a, em rad;

$\beta$  é a rotação da peça 1 do corpo de prova na Figura 6.4-a, em rad;

$\theta$  é a rotação (ou o giro) entre as peças, figura (6.4-b), dado em rad.

Observando-se a Figura 6.4 conclui-se que os valores de  $\alpha$  e de  $\beta$  podem ser calculados pelas Equações 6.3 e 6.4, respectivamente.

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{H/2 - b}{65}\right) \quad 6.3$$

$$\beta = \arcsen\left(\frac{H/2 + b - a}{65}\right) \quad 6.4$$

onde: H é a altura disponível, em cm;

a é o deslocamento vertical do ponto 3, em cm;

b é o deslocamento vertical do ponto2, em cm.

De posse dos resultados no Excel foram calculados o momento fletor na ligação e a conseqüente rotação. Os resultados se encontram na Figura 6.5 sob a forma de um gráfico cíclico momento x rotação.

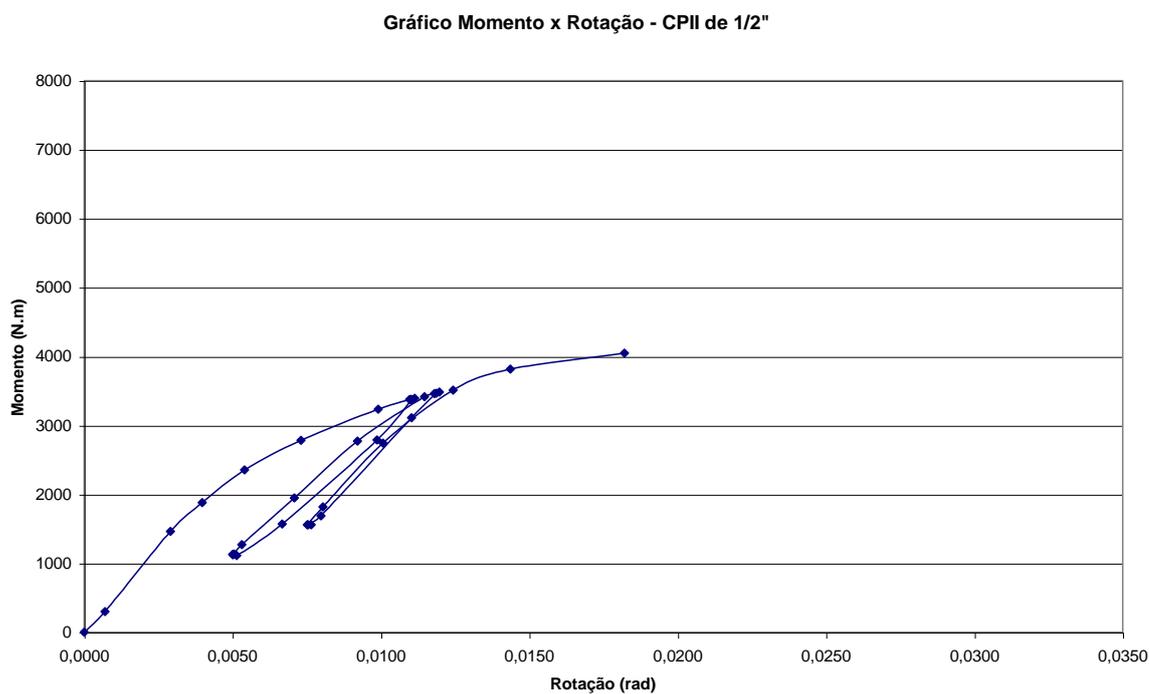


Figura 6.5 – Gráfico cíclico momento x rotação para o CII de 1/2”

Finalmente foi montado o gráfico momento x rotação sem os ciclos, Figura 6.6.

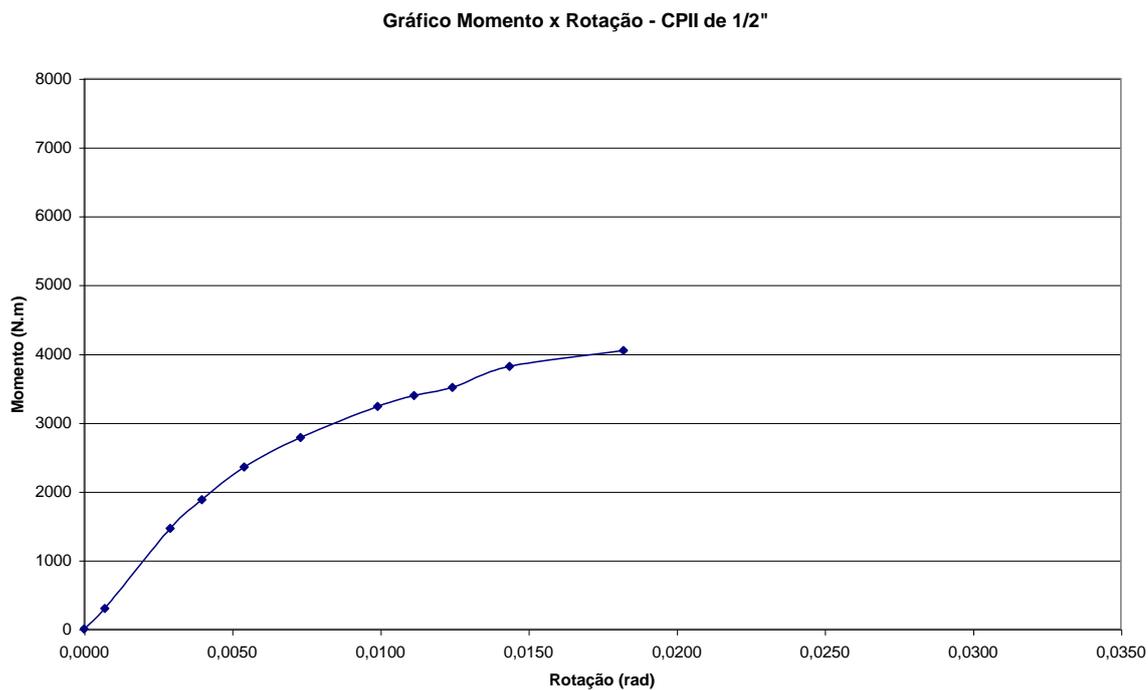


Figura 6.6 – Gráfico momento x rotação para o CPII de 1/2”

## 6.2 – Para os ensaios ao embutimento

Como feito anteriormente para os ensaios à flexão, nesta etapa serão apresentados os dados referentes a um corpo de prova. O corpo de prova escolhido foi o CPI de 1/2”. Os demais resultados dos ensaios ao embutimento (tanto normal quanto paralelo às fibras) das séries A, B e C encontram-se no anexo III.

### 6.2.1 – Embutimento normal às fibras

Para o ensaio de embutimento normal às fibras foi traçado o gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo para o CPI de 1/2”, Figura 6.7.

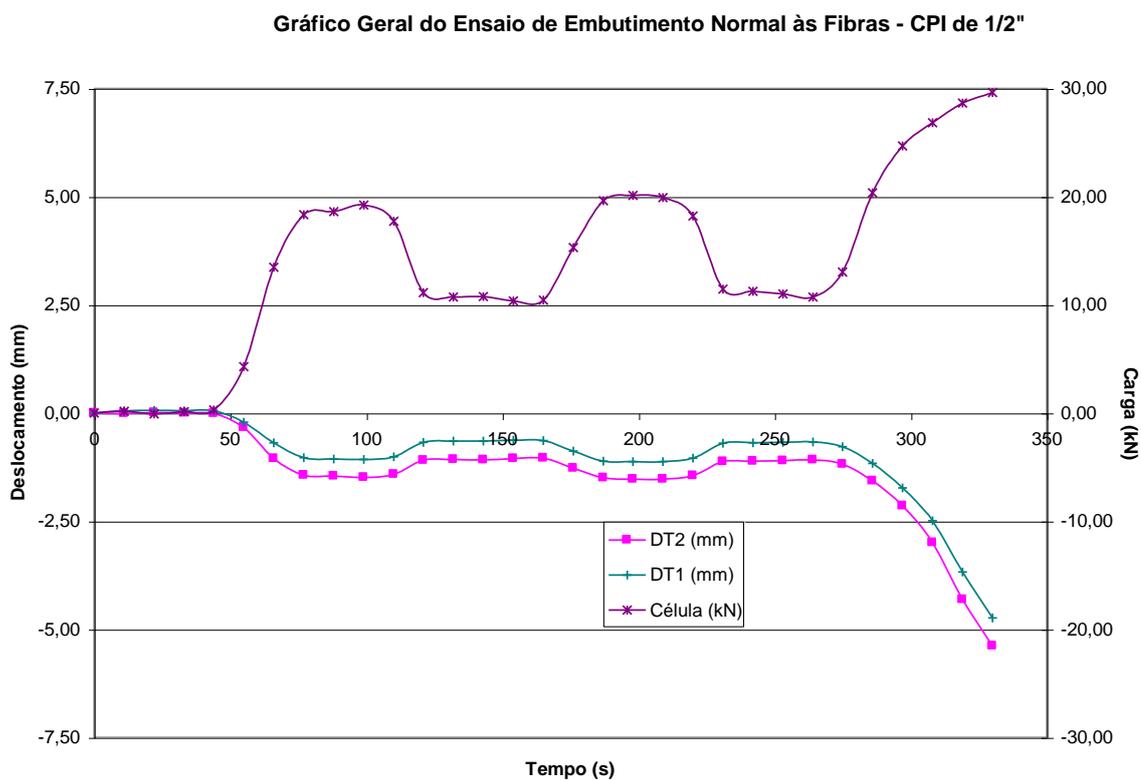


Figura 6.7 - Gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo do ensaio de embutimento normal às fibras para o CPI de 1/2”

Foi traçado também o gráfico carga x deslocamento, mostrado na Figura 6.8.

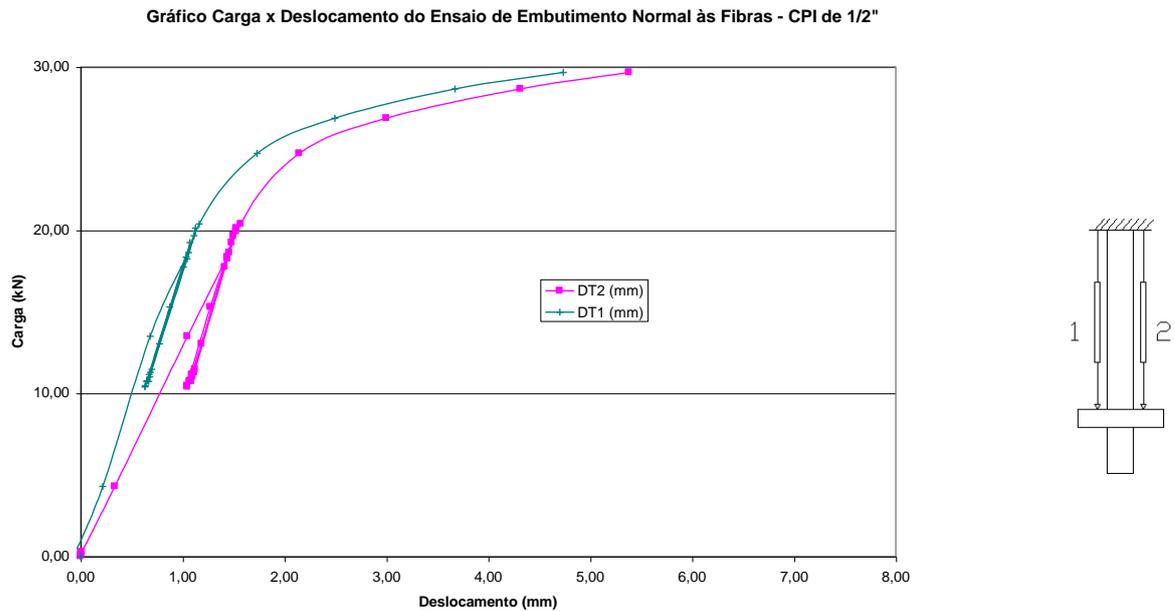


Figura 6.8 – Gráfico carga x deslocamento do ensaio de embutimento normal às fibras para o CPI de 1/2"

Similarmente ao que foi feito nos ensaios à flexão, a carga aplicada durante os ensaios foi armazenada no canal correspondente à célula de carga.

A tensão de embutimento normal às fibras a cada instante é dada pela Equação 6.5.

$$f_{e90,i} = \frac{F_{e90,i}}{t.d} \quad 6.5$$

onde:  $f_{e90,i}$  é a tensão de embutimento normal às fibras a cada instante  $i$ , dada em  $N/m^2$ ;

$F_{e90,i}$  é a força atuante na direção normal às fibras a cada instante  $i$ , em N;

$t$  é a espessura do corpo de prova, em m;

$d$  é o diâmetro do tubo, em m.

Na Figura 6.9 é mostrado o gráfico tensão x deformação específica de embutimento. Foi traçada uma reta paralela à reta que continha os pontos correspondentes a  $f(71)$  e  $f(85)$ , NBR7190/97. Esta reta foi traçada de modo que ao cortar o eixo x o ponto correspondente tivesse como abscissa o valor da deformação residual de 2‰.

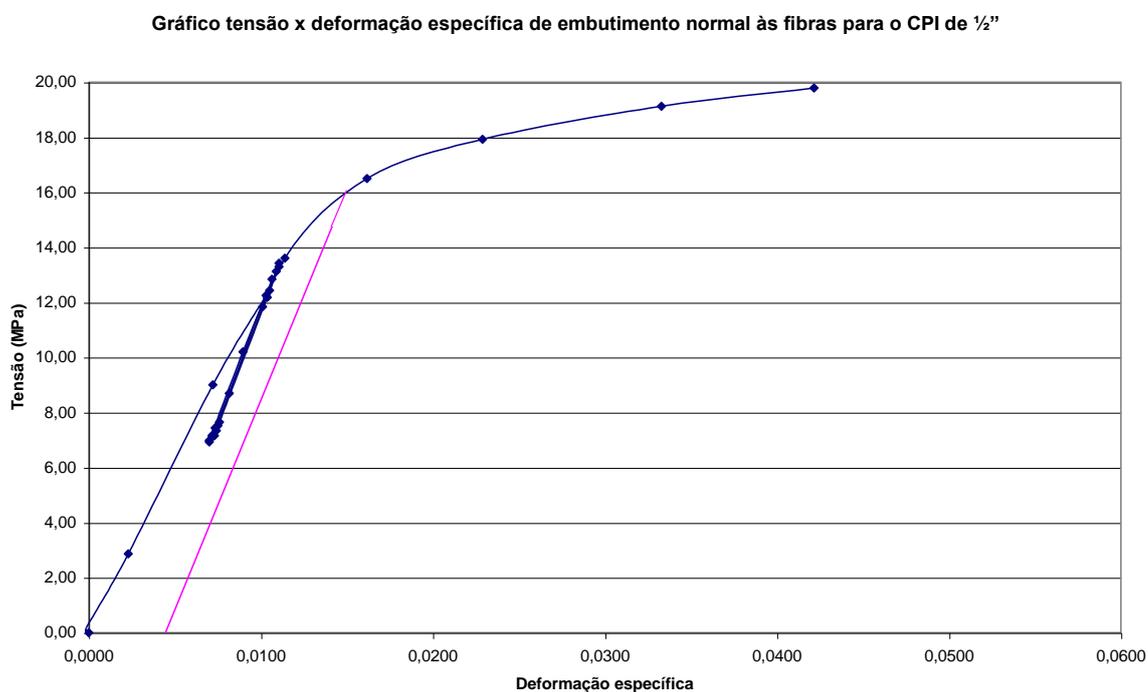


Figura 6.9 – Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPI de 1/2"

Assim a resistência de embutimento normal às fibras foi de 16,00 MPa.

### 6.2.2 – Embutimento paralelo às fibras

Analogamente ao feito para o ensaio de embutimento normal às fibras foi traçado o gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo para o CPI de 1/2", Figura 6.10.

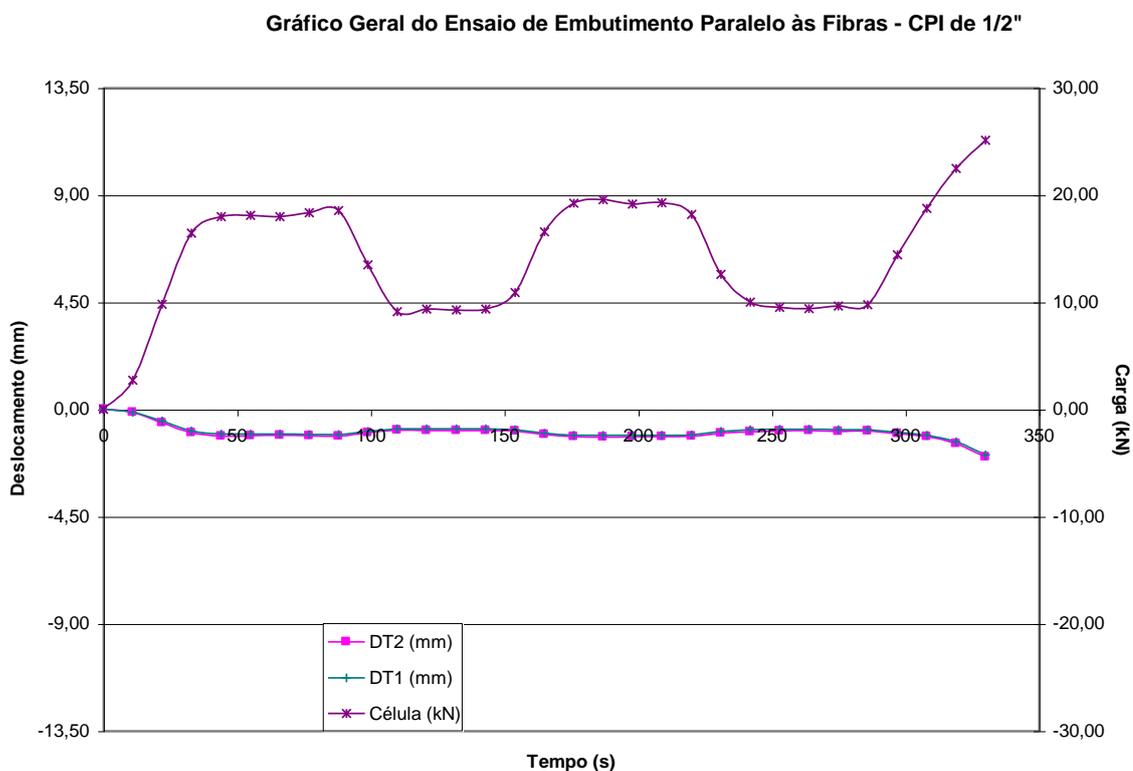


Figura 6.10 - Gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo do ensaio de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 1/2"

Foi traçado também o gráfico carga x deslocamento, mostrado na Figura 6.11.

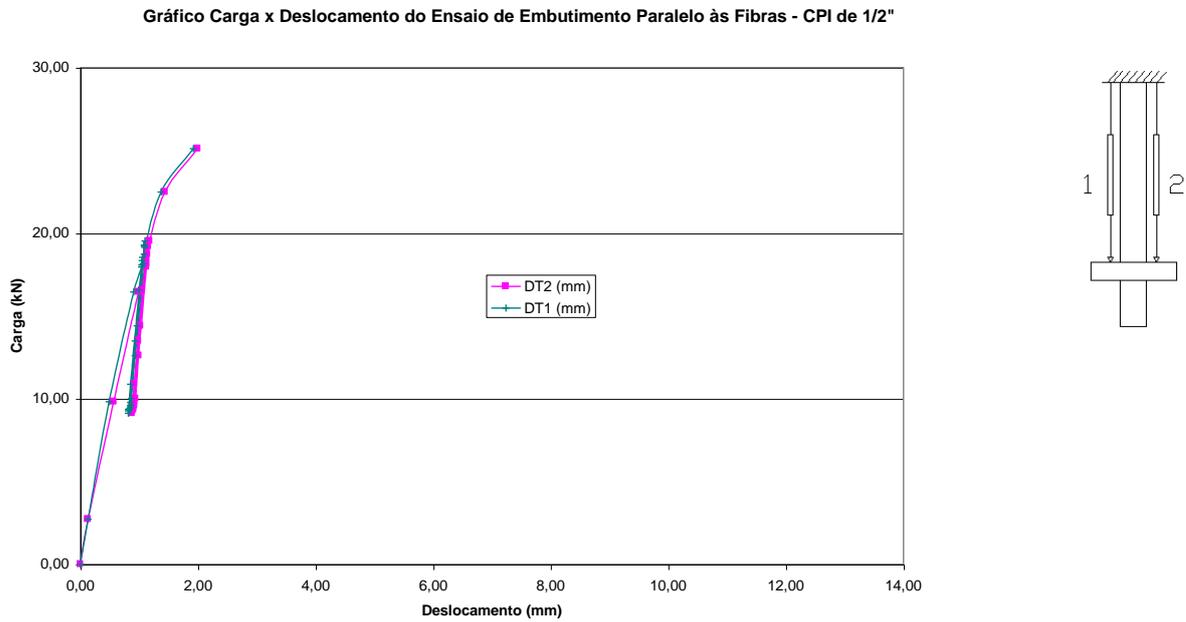


Figura 6.11 - Gráfico carga x deslocamento do ensaio de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 1/2"

Similarmente ao que foi feito anteriormente para os ensaios de embutimento normal às fibras, a tensão de embutimento paralelo às fibras a cada instante é dada pela Equação 6.6.

$$f_{e0,i} = \frac{F_{e0,i}}{t.d} \quad 6.6$$

onde:  $f_{e0,i}$  é a tensão de embutimento paralelo às fibras a cada instante  $i$ , dada em  $N/m^2$ ;

$F_{e0,i}$  é a força atuante na direção paralela às fibras a cada instante  $i$ , em N;

$t$  é a espessura do corpo de prova, em m;

$d$  é o diâmetro do tubo, em m.

Na Figura 6.12 é mostrado o gráfico tensão x deformação específica de embutimento. O processo de determinação da tensão de embutimento paralelo às fibras foi análogo àquele mostrado para a determinação da tensão de embutimento normal às fibras.

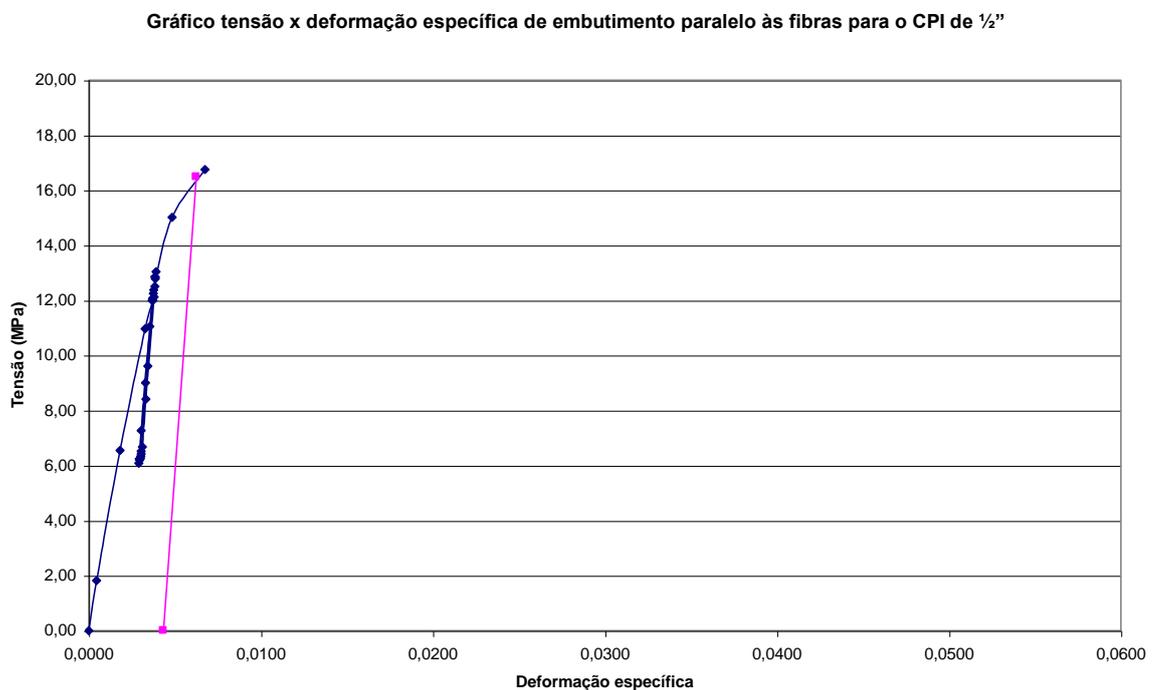


Figura 6.12 – Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 1/2"

Assim a resistência de embutimento paralelo às fibras foi de 16,48 MPa.

### **6.3 – Tensões de embutimento normal e paralela às fibras para as séries A, B e**

**C**

Seguem nas Tabelas 6.1 a 6.3 os resultados dos ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras, para as séries A, B e C.

Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras para a série A (1/2”)

<b>Corpo de prova</b>	<b>f<sub>e90</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>e0</sub> (MPa)</b>
I	16,00	16,48
II	12,46	16,40
III	13,11	12,63
IV	18,26	16,19
V	12,66	16,86
VI	15,67	19,44
<b>Média</b>	<b>14,69</b>	<b>16,33</b>

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras para a série B (3/4”)

<b>Corpo de prova</b>	<b>f<sub>e90</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>e0</sub> (MPa)</b>
I	17,85	17,43
II	15,59	17,41
III	12,98	17,31
IV	16,41	16,94
V	9,22	14,39
VI	10,62	16,24
<b>Média</b>	<b>13,78</b>	<b>16,62</b>

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de embutimento normal e paralelo às fibras para a série C (1”)

<b>Corpo de prova</b>	<b>f<sub>e90</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>e0</sub> (MPa)</b>
I	11,55	19,50
II	11,64	14,58
III	13,87	17,73
IV	10,87	17,58
V	11,63	14,21
VI	11,37	11,83
<b>Média</b>	<b>11,82</b>	<b>15,91</b>

## **CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A verificação experimental dos dados foi feita com base em equações similares às existentes nas estruturas metálicas e de acordo com **RACHER, P. (1996)**. Na análise das estruturas de aço se trabalha com a hipótese de que as ligações entre os elementos estruturais são classificadas como rígidas ou flexíveis. A ligação rígida significa que o ângulo original entre os elementos da estrutura indeformada não se modifica com o carregamento. Já na ligação flexível o ângulo entre os elementos não se mantém constante, variando proporcionalmente com as cargas que lhe são impostas.

### ***7.1 – Obtenção das variáveis momento e rotação***

Como visto no capítulo anterior foi feito para cada corpo de prova um gráfico momento x rotação. Estas curvas foram lançadas num único gráfico para cada série, Figuras 7.1 a 7.3.

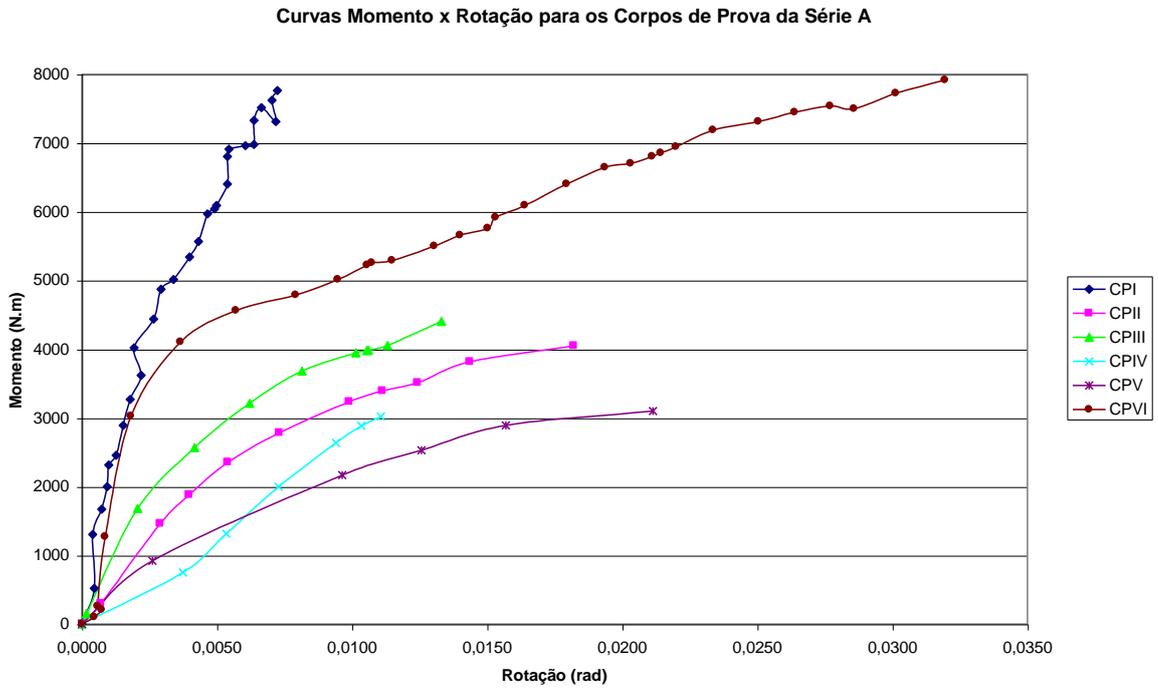


Figura 7.1 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série A (1/2")

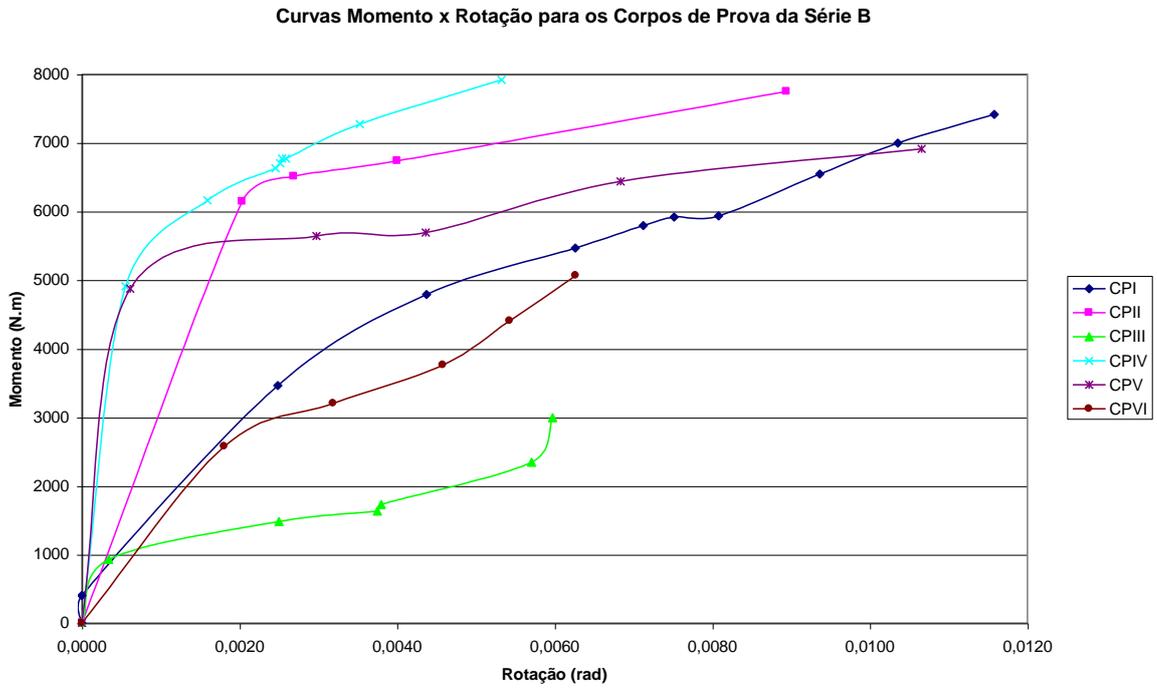


Figura 7.2 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série B (3/4'')

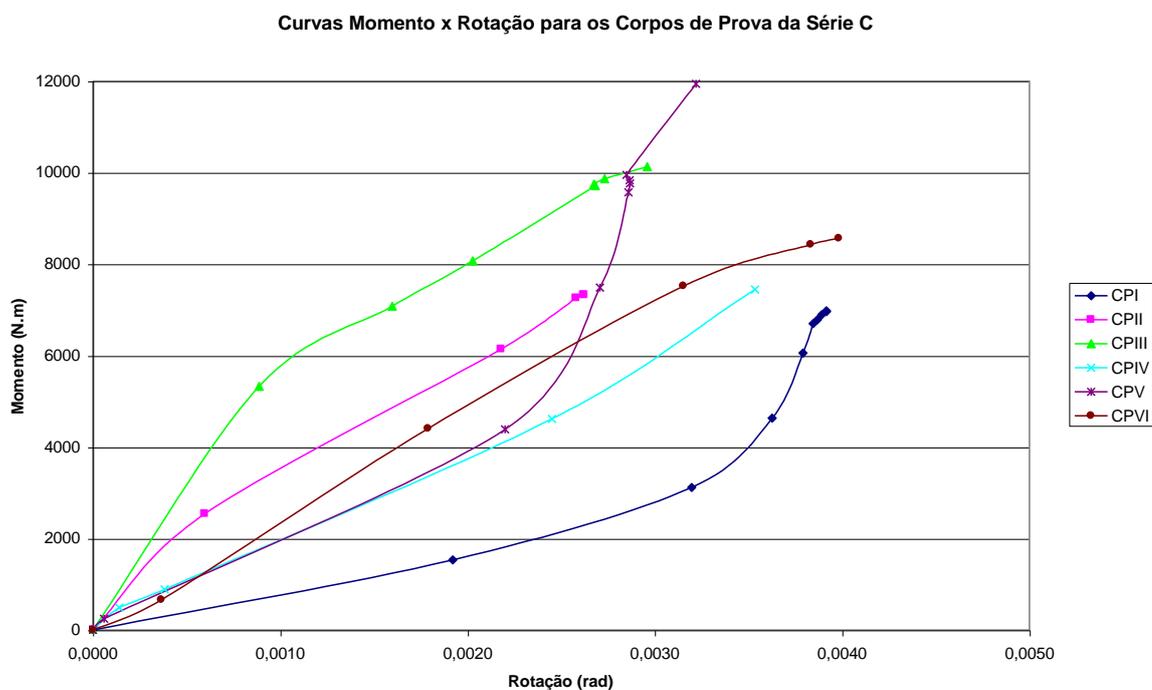


Figura 7.3 – Gráfico momento x rotação para os corpos de prova da série C (1'')

## 7.2 Homogeneização da seção

Cada lâmina do corpo de prova tinha suas características físicas e mecânicas próprias. No ensaio com o SYLVA TEST® foi determinado o módulo de elasticidade de cada uma destas lâminas. Para que cada corpo de prova tivesse um único valor de módulo de elasticidade como parâmetro, foi necessária uma homogeneização dos módulos de elasticidade da seção. Para tal recurso foi utilizada a Equação 7.1.

$$E_h = \frac{\sum_i^n E_i \cdot I_i}{I} \quad 7.1$$

onde:  $E_h$  é o módulo de elasticidade homogeneizado da peça, dado em MPa;

$E_i$  é o módulo de elasticidade da lâmina  $i$ , em MPa;

$I_i$  é o momento de inércia da lâmina  $i$  em relação à posição da linha neutra da seção transversal, em  $m^4$ ;

$I$  é o momento de inércia da peça, em  $m^4$ ;

$n$  é o número de lâminas, Figura 7.4.

$i=1$
$i=2$
$i=3$
⋮
$i=n-2$
$i=n-1$
$i=n$

Figura 7.4 – Lâminas da seção transversal do corpo de prova

Como exemplo segue na Tabela 7.1 a homogeneização do CPIV de 1”. Os resultados das homogeneizações dos demais corpos de prova encontram-se na Tabela 7.2.

Tabela 7.1 – Homogeneização do CPIV de 1”

Lâmina	v (m/s)	E (MPa)	I <sub>i</sub> (m <sup>4</sup> )	E <sub>i</sub> .I <sub>i</sub> (MN.m <sup>2</sup> )
1	5302,594	17788,75	2,5103E-05	4,4655E-01
2	4919,786	13428,78	1,7450E-05	2,3433E-01
3	4868,421	15586,74	1,1189E-05	1,7440E-01
4	6654,676	37288,12	6,3192E-06	2,3563E-01
5	7226,563	51936,89	2,8407E-06	1,4754E-01
6	5512,048	19611,52	7,5366E-07	1,4780E-02
7	5054,645	16404,01	5,7974E-08	9,5101E-04
8	6776,557	47367,06	7,5366E-07	3,5699E-02
9	6348,123	33692,22	2,8407E-06	9,5709E-02
10	5454,545	18140,57	6,3192E-06	1,1463E-01
11	6456,140	45059,35	1,1189E-05	5,0417E-01
12	5097,493	15185,54	1,7450E-05	2,6499E-01
13	5425,220	19497,13	2,5103E-05	4,8944E-01

$$I = \frac{0,07 \times 0,28^3}{12} = 1,2805 \times 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{13} E_i \cdot I_i = 2,7588$$

$$E = \frac{2,7588}{1,2805 \times 10^{-4}} = 21544,8576$$

Tabela 7.2 – Módulos de elasticidade (em MPa) homogeneizados para os corpos de prova das séries A, B e C

Corpo de prova	½” (série A)	¾” (série B)	1” (série C)
CPI	-	11405	22780
CPII	16403	10855	23816
CPIII	17432	8974	28727
CPIV	19017	23412	21544
CPV	14023	7657	27482
CPVI	22512	30825	18722
<b>Média</b>	<b>17877</b>	<b>15521</b>	<b>23845</b>

Observação: Não foi calculado o módulo de elasticidade para o CPI de ½” por problemas no aparelho SYLVA TEST® na época de sua confecção.

### 7.3 Determinação da rigidez rotacional da ligação

A determinação da rigidez rotacional,  $K_r$ , foi feita de duas maneiras, a partir dos ensaios de flexão (resultados experimentais) e utilizando os resultados dos ensaios de embutimento (resultados empíricos). A rigidez rotacional experimental foi obtida a partir do gráfico momento x rotação (inclinação do trecho linear da curva),  $K_{r, exp}$ , que corresponde ao  $K_r$  da Equação 2.3, transcrita na Equação 7.2.

$$k_r = \beta_r \frac{EI}{L} \quad 7.2$$

Como exemplo serão mostrados os resultados de um corpo de prova escolhido, CPVI de 3/4", Figura 7.5.

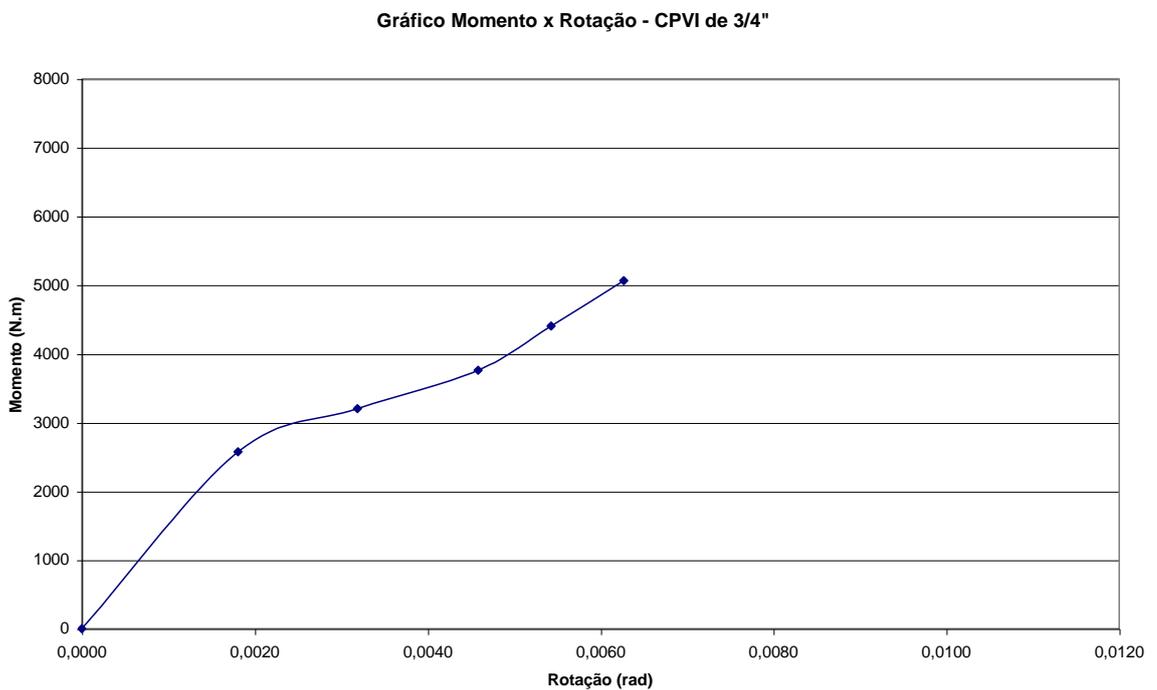


Figura 7.5 – Gráfico Momento x Rotação para o CPVI de 3/4"

O valor de  $K_{r, \text{exp}}$  é a inclinação da parte reta do gráfico momento x rotação, ou seja,  $K_{r, \text{exp}} = 1426014,59 \text{ N.m}$ .

Repetindo-se o processo para todos os corpos de prova das séries A, B e C, são apresentadas na Tabela 7.3 as médias destas séries.

Tabela 7.3 – Valores médios de  $K_{r, \text{exp}}$  para as séries de 1/2”, 3/4” e 1”

Série	$K_{r, \text{exp}}$ [N.m]
A	1094449,47
B	2038525,54
C	2235687,26

A rigidez rotacional empírica foi calculada a partir dos ensaios de embutimento carga x deslizamento,  $K_{r, \text{lig}}$ , correspondente ao  $K_r$  da Equação 2.4, transcrita na Equação 7.3.

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\alpha_j} r_j^2 \quad 7.3$$

onde:

$K_{\alpha_j}$  é o módulo de deslizamento na direção da força do conector j;

$r_j$  é a distância entre o centro do conector e o centro da ligação.

O valor do módulo de deslizamento,  $K_{\alpha_j}$ , é determinado pela fórmula de Hankinson, Equação 7.4.

$$K_{\alpha_j} = \frac{K_{0,j} K_{90,j}}{K_{0,j} \sin^2 \alpha_j + K_{90,j} \cos^2 \alpha_j} \quad 7.4$$

onde:

$K_{0,j}$  é o módulo de deslizamento a 0°;

$K_{90,j}$  é o módulo de deslizamento a 90°.

Na Figura 7.6 está representado o ensaio de embutimento normal às fibras do CPVI de  $\frac{3}{4}$ ", de onde foi retirado o valor de  $K_{90}$ .

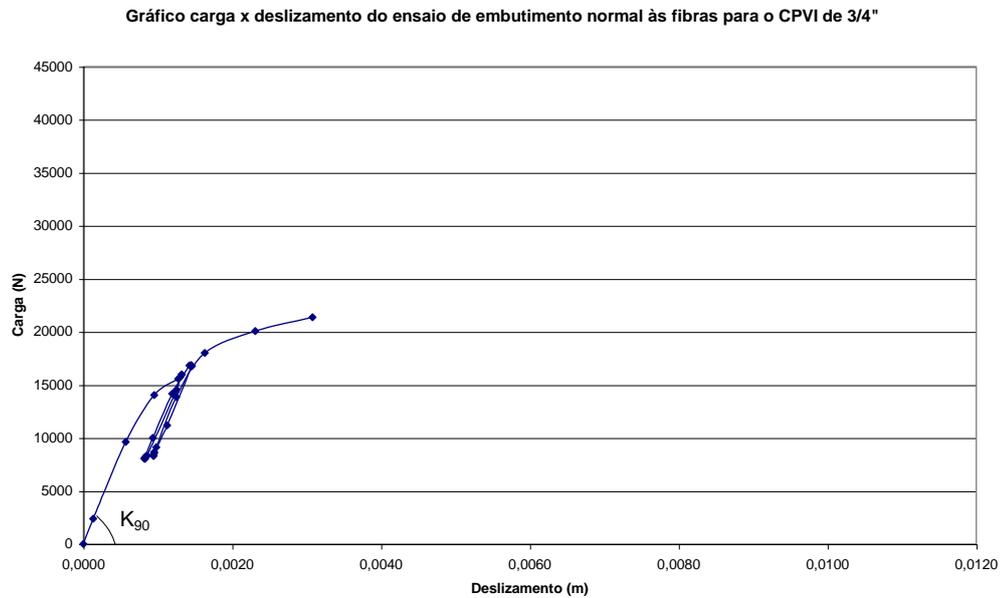


Figura 7.6 – Gráfico Carga x Deslizamento do ensaio de embutimento normal às fibras para o CPVI de  $\frac{3}{4}$ "

O valor de  $K_{90}$  é a inclinação da reta de tendência do ciclo, ou seja,  $K_{90} = 17676420,9330$  N/m.

Analogamente para o ensaio de embutimento paralelo às fibras, tem-se a Figura 7.7, ensaio de embutimento paralelo às fibras do CPVI de  $\frac{3}{4}$ ", de onde foi retirado o valor de  $K_0$ .

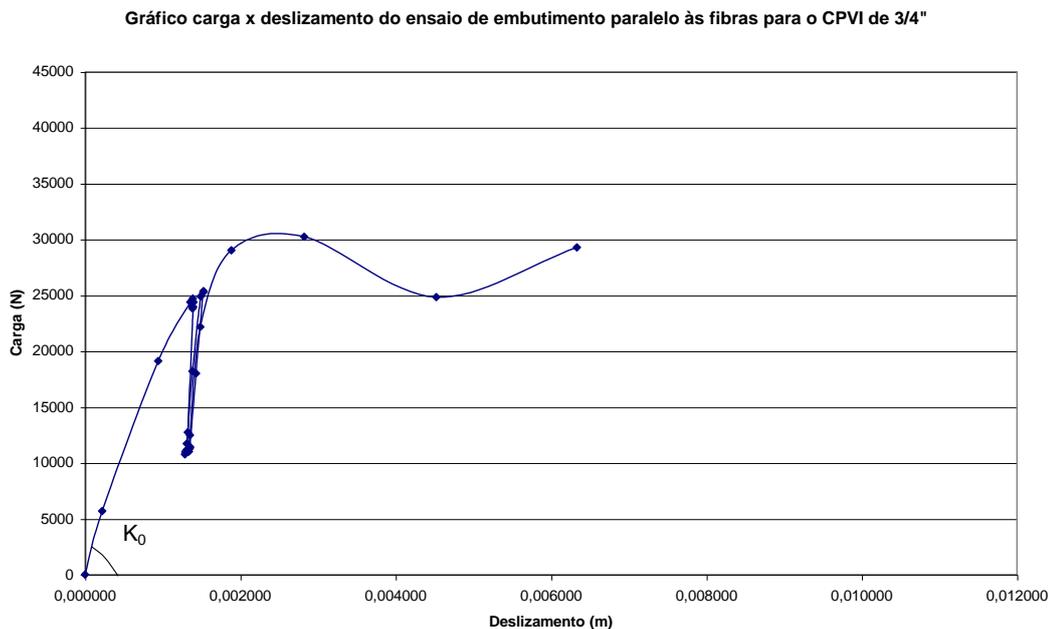


Figura 7.7 – Gráfico Carga x Deslizamento do ensaio de embutimento paralelo às fibras para o CPVI de 3/4"

O valor de  $K_0$  é a inclinação da reta de tendência do ciclo, ou seja,  $K_0 = 25537120,6641$  N/m.

A média dos valores encontrados para todos os corpos de prova,  $K_{r, lig.}$  estão na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Valores médios de  $K_{r, lig}$  para as séries de 1/2", 3/4" e 1"

Série	$K_{r, lig}$ [N.m]
A	981397,57
B	1635317,81
C	1667716,50

Comparando-se as Tabelas 7.3 e 7.4 nota-se que os valores obtidos pelos dois métodos não são muito diferentes, podendo ser feita uma estimativa da capacidade de carga da ligação através do método proposto por RACHER (1996). O dimensionamento pode ser feito a partir da determinação dos valores  $K_0$  e  $K_{90}$ , obtidos nos ensaios de embutimento ou através de tabelas. De posse desses valores, calcula-se para cada tubo o seu  $K_\alpha$ , a partir da Equação 7.4 e, em seguida, o valor de  $K_r$ , da Equação 7.3. Assim é possível determinar a capacidade de carga do tubo (parafuso oco), Equação 7.5.

$$F_{M,j} = \frac{K_{\alpha,j} \cdot r_j}{K_r} M \quad 7.5$$

onde  $F_{M,j}$  é a carga em cada tubo;

$r_j$  é a distância do centro do tubo ao centro da ligação, Figura 7.8.

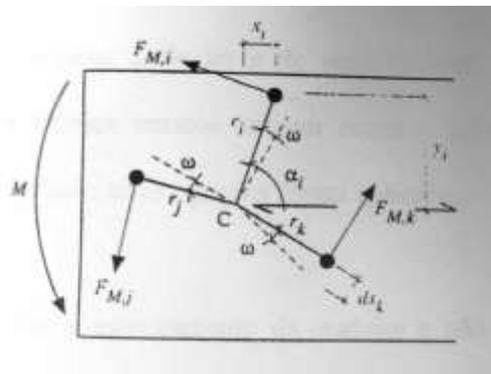


Figura 7.8 – Detalhe da ligação

## **CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES**

Na literatura estrangeira este tipo de ligação está sendo estudado e se mostrou eficiente, como visto no capítulo 2 desta Dissertação. A norma brasileira, NBR7190/97, ainda não aborda o tipo de ligação com parafusos ocos, ou seja, com tubos galvanizados. Assim foram feitas algumas adaptações no capítulo 4 para que este tipo de ligação fosse utilizado. Para trabalhos futuros aconselha-se que a distância adotada entre furo e borda seja superior à adotada aqui,  $2\phi$ . Com isso a ligação terá maior resistência e talvez rompa em outros locais.

O uso do aparelho SYLVA TEST® foi de suma importância, pois agilizou o cálculo do módulo de elasticidade das lâminas. Se não tivesse sido utilizado, teria sido necessária uma caracterização das amostras oriundas dos lotes de madeira recebidos para a confecção dos corpos de prova, o que provocaria um bom atraso na realização dos ensaios.

Foram realizados ensaios à flexão e de embutimento, tanto normal quanto paralelo às fibras. Estes últimos ensaios servem como o primeiro passo para um pré-dimensionamento futuro, quando estas ligações forem aplicadas.

Como previsto houve o esmagamento da madeira e não a flexão do tubo nos ensaios de embutimento.

O tipo de ligação apresentado nesta Dissertação se mostrou vantajoso, visto que a ruptura dos corpos de prova se deu com valores superiores àqueles previstos no capítulo 4. Pode-se, no futuro, fazer o uso da expansão do tubo, como em **LEIJTEN (1996-a)**, para se obter maior resistência.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AITC-American Institute of Timber Construction. 1935. Timber construction manual - third edition.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 1964. Normalização da documentação no Brasil. 2 ed.

BAIÃO, L. M. R 1997. Contribuição ao estudo de ligações em estrutura de madeira. Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud . Belo Horizonte – UFMG, Dissertação (Mestre Eng. Estruturas).

BOUCHAIR, A.; BOCQUET, J.F.; RACHER, P.; PEUCHOT, B. 1996. Behavior resisting connections. International wood conference, Lousiana, USA, volume 2.

CARRASCO, E. V. M; SANTANA, P.C.S.C. 1997. Ligações através de pregos e parafusos de peças de madeira laminada colada solicitadas a momento fletor e esforço cortante.

CARRASCO, E. V. M. 1989. Ligações estruturais de madeira por adesivos. Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister . São Carlos, LaMEM - EESC - USP, Dissertação (Mestre - Eng. Estruturas).

CARRASCO, E. V. M. 1995. Análise experimental da adesividade da madeira de Eucalipto Citriodora. V EBRAMEM, Belo Horizonte, volume II.

CARRASCO, E. V. M. 1995. Comportamento da ligação adesiva ao impacto. V EBRAMEM , Belo Horizonte, volume II.

CARRASCO, E. V. M. 1986. Dimensionamento de ligação de peças estruturais de madeira por adesivos. II EBRAMEM.

CARRASCO, E. V. M. 1989. Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas vigas retas de Madeira Laminada Colada(MLC). Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, Tese (Doutor Engenheiro).

CARRASCO, E. V. M. 1997. Apostila de Madeiras, Notas de Aula.

CHENG, R.J.J. 1996. Moment glulam rivet connections. International wood conference, Lousiana, USA, volume 2.

CHUGG, W. A. 1964. Glulam: The theory and practice of the manufacture of glued laminated timber structures. London, Ernest Benn. 423p.

EUROCODE 5. 1991. Design of Timber Structures.

- FAUGERAS, J.C. & VERGNE, A. 1996. Experimental results for timber connections under monotonic loading. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- FILHO, J.M. 1982. Redação de dissertações e teses. Piracicaba, USP.
- FREAS, A. D. & SELBO, M. L. 1954. Fabrication and design of glued Laminated wood structural members. Technical Bulletin, N. 1069 USDA-FS-FPL, Washington, D.C.. 220p.
- HALLER, P. 1998. Progress in timber joint development and modeling. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 337 a 344.
- HIRAI T.; OHTOMO T. e WAKASHIMA Y. 1998. Effective resistance of joints with multiple fastenings. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 145 a 152.
- JENSEN J. L. e LARSEN H.J. 1998. Modelling of semi-rigid joints and their influence on the behaviour of structures. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 305 a 312.
- KHAROUF N.; McCLURE G. e SMITH I. 1998. Stress analysis of one and two bolt timber connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 329 a 336.
- LEIJTEN, J.M. 1996. The concept of the prestressed DVW reinforced joint with expanded tubes. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- MALLORY P. M. e PELLICANE P. J. 1998. Material models used to predict the mechanical behaviour of bolted wood connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 297 a 304.
- MARTINS FERREIRA, C. E. 1989. Tecnologia de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicações em madeira. III EBRAMEM, volume VI.
- MILNER, H.R. ; YEOH, E. 1991. Análise em elementos finitos com ligações de MLC.
- MONTEIRO DE PAULA, E. V. 1983. Ligação colada entre peças de madeira submetida a momento torção na lâmina de cola. I EBRAMEM, Manaus – AM.
- MOSS, P.J. 1998. Research into row modifications factors for multiple-bolted timber joints. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 129 a 136.
- NBR 7190. 1997. Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira.

- OLIVEIRA, S. V. 1998. Evaluation of Eucalyptus' mechanical properties by ultrasound
- QUENNEVILLE, P. 1998. Predicting the failure modes and strength of brittle bolted connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 137 a 144.
- RODD, P.D. ; LEIJTEN, J.M. 1996. Some structural properties of densified veneer wood. International wood conference, Louisiana, USA volume 2.
- RODD, P.D. ; LEIJTEN, J.M. 1996. The bending moment capacity of DVW reinforced glulam joints. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- SATO M. e ARIMA, T. 1998. A behavior of nailed joints under repetitive loading. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 222 a 229.
- SCHMOKEL, C. 1990 Pontes de MLC/Conexão da madeira.
- SHIRAHMA NEIVA, G. 1989. Estudo de resinas sintéticas em ligações estruturais de peças de madeira. III EBRAMEM, volume VI.
- SIDEBRÁS SIDERÚRGICA BRASILEIRA S. A. 1988. Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção metálica, volume II
- SOUTH AFRICA BUREAU OF STANDARDS. 1976. Standards specification for Glued Laminated timber structural members. South Africa, SABS 876-76. 54p.
- WERNER, H. 1996 Reinforced joints with dowels and expanded tubes loaded in tension. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- WIPF, T.J. ; KLAIBER, F.W. ; FUNKE, R.W. 1990. Modelo de uma ponte de MLC.

## **BIBLIOGRAFIA**

AITC-American Institute of Timber Construction. 1935. Timber construction manual - third edition.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 1964. Normalização da documentação no Brasil. 2 ed.

BAIÃO, L. M. R 1997. Contribuição ao estudo de ligações em estrutura de madeira. Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud . Belo Horizonte – UFMG, Dissertação (Mestre Eng. Estruturas).

BOUCHAIR, A.; BOCQUET, J.F.; RACHER, P.; PEUCHOT, B. 1996. Behaviour resisting connections. International wood conference, Lousiana, USA, volume 2.

CARRASCO, E. V. M; SANTANA, P.C.S.C. 1997. Ligações através de pregos e parafusos de peças de madeira laminada colada solicitadas a momento fletor e esforço cortante.

CARRASCO, E. V. M. 1989. Ligações estruturais de madeira por adesivos. Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister . São Carlos, LaMEM - EESC - USP, Dissertação (Mestre - Eng. Estruturas).

\_\_\_\_\_. 1995. Análise experimental da adesividade da madeira de Eucalipto Citriodora. V EBRAMEM, Belo Horizonte, volume II.

\_\_\_\_\_ 1995. Comportamento da ligação adesiva ao impacto. V EBRAMEM , Belo Horizonte, volume II.

\_\_\_\_\_ 1986. Dimensionamento de ligação de peças estruturais de madeira por adesivos. II EBRAMEM.

\_\_\_\_\_ 1989. Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas vigas retas de Madeira Laminada Colada(MLC). Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, Tese (Doutor Engenheiro).

\_\_\_\_\_ 1997. Apostila de Madeiras, Notas de Aula.

CHENG, R.J.J. 1996. Moment glulam rivet connections. International wood conference, Lousiana, USA, volume 2.

CHUGG, W. A. 1964. Glulam: The theory and practice of the manufacture of glued laminated timber structures. London, Ernest Benn. 423p.

EUROCODE 5. 1991. Design of Timber Structures.

- FAUGERAS, J.C. & VERGNE, A. 1996. Experimental results for timber connections under monotonic loading. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- FILHO, J.M. 1982. Redação de dissertações e teses. Piracicaba, USP.
- FREAS, A. D. & SELBO, M. L. 1954. Fabrication and design of glued Laminated wood structural members. Technical Bulletin, N. 1069 USDA-FS-FPL, Washington, D.C.. 220p.
- HALLER, P. 1998. Progress in timber joint development and modeling. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 337 a 344.
- HIRAI T.; OHTOMO T. e WAKASHIMA Y. 1998. Effective resistance of joints with multiple fastenings. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 145 a 152.
- JENSEN J. L. e LARSEN H.J. 1998. Modelling of semi-rigid joints and their influence on the behaviour of structures. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 305 a 312.
- KHAROUF N.; McCLURE G. e SMITH I. 1998. Stress analysis of one and two bolt timber connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 329 a 336.
- LEIJTEN, J.M. 1996. The concept of the prestressed DVW reinforced joint with expanded tubes. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.
- MALLORY P. M. e PELLICANE P. J. 1998. Material models used to predict the mechanical behaviour of bolted wood connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 1: 297 a 304.
- MARTINS FERREIRA, C. E. 1989. Tecnologia de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicações em madeira. III EBRAMEM, volume VI.
- MILNER, H.R. ; YEOH, E. 1991. Análise em elementos finitos com ligações de MLC.
- MONTEIRO DE PAULA, E. V. 1983. Ligação colada entre peças de madeira submetida a momento torção na lâmina de cola. I EBRAMEM, Manaus – AM.
- MOSS, P.J. 1998. Research into row modifications factors for multiple-bolted timber joints. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 129 a 136.
- NBR 7190. 1997. Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira.

OLIVEIRA, S. V. 1998. Evaluation of Eucalyptus' mechanical properties by ultrasound

QUENNEVILLE, P. 1998. Predicting the failure modes and strength of brittle bolted connections. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 137 a 144.

RACHER, P. 1996. Moment resisting connections. STEP lecture C16, CUST Civil Engineering – Blaise Pascal University

RODD, P.D. ; LEIJTEN, J.M. 1996. Some structural properties of densified veneer wood. International wood conference, Louisiana, USA volume 2.

RODD, P.D. ; LEIJTEN, J.M. 1996. The bending moment capacity of DVW reinforced glulam joints. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.

SATO M. e ARIMA, T. 1998. A behavior of nailed joints under repetitive loading. 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering, Montreux, Suíça, volume 2: 222 a 229.

SCHMOKEL, C. 1990 Pontes de MLC/Conexão da madeira.

SHIRAHMA NEIVA, G. 1989. Estudo de resinas sintéticas em ligações estruturais de peças de madeira. III EBRAMEM, volume VI.

SIDERBRÁS SIDERÚRGICA BRASILEIRA S. A. 1988. Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção metálica, volume II

SOUTH AFRICA BUREAU OF STANDARTS. 1976. Standarts specification for Glued Laminated timber structural members. South Africa, SABS 876-76. 54p.

WERNER, H. 1996 Reinforced joints with dowels and expanded tubes loaded in tension. International wood conference, Louisiana, USA, volume 2.

WIPF, T.J. ; KLAIBER, F.W. ; FUNKE, R.W. 1990. Modelo de uma ponte de MLC.

# **ANEXO I**

Neste anexo estão todos os resultados dos ensaios realizados para o cálculo do Módulo de Elasticidade de cada lâmina dos corpos de prova.

1 – Série A (tubos de ½")

**CPII**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	184	377	4880,637	1,774	2,095	6,930	14,4	0,558	10500,56
2	195	329	5927,052	1,736	2,099	6,839	13,1	0,526	21791,40
3	192	411	4671,533	1,772	2,116	6,942	12,4	0,476	7735,40
4	192	383	5013,055	1,798	2,072	6,868	15,2	0,594	12308,42
5	186	396	4696,970	1,664	2,086	6,929	12,1	0,503	8268,28
6	190	402	4726,368	2,112	2,097	6,865	21,7	0,714	11301,32
7	188	363	5179,063	2,123	2,096	6,903	14,2	0,462	11413,45
8	190	309	6148,867	2,108	2,089	6,892	20,9	0,689	31527,29
9	190	308	6168,831	1,689	2,098	6,874	12,2	0,501	24584,97
10	188	363	5179,063	2,102	2,050	6,888	16,5	0,558	13322,78

**CPIII**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	190	440	4318,182	1,950	2,150	6,995	20,2	0,689	7642,02
2	186	355	5239,437	1,500	2,160	6,998	15,6	0,689	16598,42
3	195	337	5786,350	2,032	2,188	6,940	15,5	0,502	19064,63
4	192	340	5647,059	1,931	2,185	6,967	13,1	0,446	15668,61
5	195	406	4802,956	1,870	2,155	6,986	14,0	0,497	8956,63
6	190	399	4761,905	1,009	0,992	7,088	11,0	1,550	22036,45
7	191	375	5093,333	1,698	2,142	6,971	13,9	0,548	12280,40
8	188	364	5164,835	1,877	2,133	6,977	15,5	0,555	13116,21
9	190	326	5828,221	1,887	2,102	6,945	20,7	0,751	27324,32
10	193	335	5761,194	0,867	2,093	6,940	8,3	0,659	23419,43

**CPIV**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	182	300	6066,667	2,051	1,950	6,981	16,7	0,598	26603,66
2	184	356	5168,539	1,794	1,954	6,960	14,7	0,603	14074,93
3	200	414	4830,918	1,473	1,981	6,825	10,0	0,502	9240,78
4	188	402	4676,617	1,798	1,965	6,912	11,4	0,467	7640,76
5	185	426	4342,723	1,870	1,932	6,915	14,0	0,560	6596,60
6	185	294	6292,517	1,794	1,932	6,952	11,6	0,481	25770,03
7	184	281	6548,043	2,061	1,919	6,973	13,7	0,497	31021,07
8	182	387	4702,842	1,760	1,830	6,940	11,8	0,530	8673,46
9	186	306	6078,431	1,880	1,920	6,960	13,3	0,530	24274,07
10	187	320	5843,750	1,950	1,960	6,990	14,2	0,530	20727,88

**CPV**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	188	325	5784,615	2,089	1,840	6,942	13,3	0,498	18919,91
2	186	381	4881,890	1,776	1,890	6,944	12,4	0,532	10106,99
3	187	377	4960,212	1,876	1,892	7,001	12,2	0,491	10085,35
4	197	391	5038,363	2,020	1,913	6,979	13,6	0,504	10977,05
5	190	381	4986,877	1,924	1,938	6,979	14,4	0,553	11369,60
6	182	374	4866,310	1,882	1,931	6,931	15,0	0,596	10947,65
7	185	365	5068,493	2,083	1,947	6,939	17,7	0,629	13481,42
8	191	336	5684,524	1,093	1,941	6,926	8,5	0,578	19937,97
9	194	374	5187,166	1,886	1,956	6,976	14,1	0,548	13208,77
10	194	384	5052,083	1,788	1,988	6,988	13,6	0,548	11882,23

**CPVI**

<b>Lâmina</b>	<b>l(cm)</b>	<b>t(1e-6)s</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>c(cm)</b>	<b>peso(g)</b>	<b>densidade(g/cm3)</b>	<b>Eco (MPa)</b>
1	112	222	5045,045	1,241	2,063	6,910	10,0	0,565	12121,10
2	112	232	4827,586	2,067	2,074	6,886	19,7	0,667	11642,78
3	114	193	5906,736	2,046	2,070	6,931	14,5	0,494	20421,76
4	114	173	6589,595	1,736	2,019	6,931	14,6	0,601	37211,26
5	112	187	5989,305	1,997	1,849	6,962	14,8	0,576	24487,91
6	110	214	5140,187	1,945	1,960	6,933	12,9	0,488	11579,17
7	118	235	5021,277	1,923	1,840	6,975	13,8	0,559	11788,04
8	112	164	6829,268	2,075	1,945	6,969	13,3	0,473	35262,57
9	120	243	4938,272	2,011	1,915	6,989	14,0	0,519	10370,43
10	112	181	6187,845	2,015	1,523	6,589	10,5	0,519	25629,04
11	114	186	6129,032	2,053	1,456	6,985	10,8	0,519	24665,87
12	114	182	6263,736	2,068	1,427	6,945	9,6	0,468	24737,30
13	114	183	6229,508	2,018	2,090	6,946	13,9	0,474	24456,86
14	112	172	6511,628	2,124	2,205	6,940	14,0	0,431	26978,99
15	112	227	4933,921	2,137	2,085	6,967	15,9	0,512	10222,43
16	112	216	5185,185	1,781	2,149	6,985	12,1	0,453	11269,90
17	113	165	6848,485	1,940	2,178	6,982	16,3	0,553	40530,29
18	112	155	7225,806	2,001	2,202	6,990	13,3	0,432	41041,00
19	113	182	6208,791	1,797	2,237	6,947	15,7	0,562	27743,39
20	113	184	6141,304	1,777	2,225	6,985	14,3	0,519	24864,57

2 – Série B (tubos de ¾ ”)

**CPI**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	182	388	4690,722	2,664	1,899	6,838	26,5	0,766	11619,89
2	181	367	4931,880	2,511	2,004	6,889	23,5	0,678	12849,69
3	181	406	4458,128	2,428	2,149	6,864	30,2	0,843	10253,62
4	185	360	5138,889	2,628	1,965	6,854	27,1	0,766	16748,47
5	182	345	5275,362	2,492	2,002	6,852	26,1	0,764	18561,99
6	183	380	4815,789	2,380	1,985	6,856	25,4	0,784	13164,28
7	184	300	6133,333	2,500	1,885	6,869	18,8	0,581	27131,24
8	195	400	4875,000	1,939	1,897	6,842	16,3	0,648	11814,18

**CPII**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	188	313	6006,390	1,949	1,900	6,892	14,1	0,552	23943,98
2	184	345	5333,333	1,949	1,993	6,829	16,9	0,637	16712,94
3	190	373	5093,834	1,875	1,986	6,864	14,0	0,548	12276,12
4	189	339	5575,221	1,894	2,098	6,915	13,0	0,473	15634,32
5	200	343	5830,904	1,941	2,115	6,867	17,5	0,621	23396,95
6	188	378	4973,545	1,873	2,180	6,871	15,9	0,567	11471,18
7	182	365	4986,301	1,867	2,137	6,875	12,7	0,463	9815,18
8	188	370	5081,081	1,943	2,120	6,887	10,8	0,381	9012,20
9	188	375	5013,333	1,938	2,095	6,873	18,8	0,674	13652,53
10	190	410	4634,146	1,441	2,170	6,887	9,0	0,418	6725,73

**CPIII**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	177	367	4822,888	1,477	2,089	6,902	13,8	0,648	11320,57
2	185	364	5082,418	2,052	1,866	6,859	14,2	0,541	12037,15
3	188	349	5386,819	1,927	2,109	6,910	14,0	0,499	14219,26
4	188	411	4574,209	1,824	2,083	6,931	12,3	0,467	6994,72
5	190	349	5444,126	1,897	2,125	6,853	14,2	0,514	15213,69
6	188	371	5067,385	1,875	2,052	6,976	12,5	0,466	10521,73
7	186	351	5299,145	2,003	2,160	6,864	15,0	0,505	13457,59
8	185	359	5153,203	1,985	2,105	6,820	16,5	0,579	13460,79
9	185	374	4946,524	1,932	2,129	6,843	16,0	0,568	11251,06
10	190	369	5149,051	1,878	2,197	6,825	14,4	0,511	12114,83

**CPIV**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	184	381	4829,396	1,995	2,049	6,871	13,5	0,481	8903,44
2	190	420	4523,810	1,913	1,950	6,910	12,0	0,466	6672,45
3	190	300	6333,333	1,819	2,045	6,898	11,6	0,452	25114,76
4	190	350	5428,571	1,952	1,951	6,899	13,4	0,510	14943,62
5	187	200	9350,000	1,811	1,932	6,881	13,7	0,569	144761,57
6	187	140	13357,143	1,951	1,880	6,901	12,6	0,498	542259,05
7	190	269	7063,197	1,930	1,869	6,884	13,7	0,552	45817,61
8	185	130	14230,769	1,770	2,074	6,896	15,2	0,600	815636,56
9	180	140	12857,143	2,061	1,911	6,897	13,9	0,512	475980,91
10	190	200	9500,000	1,881	1,891	6,897	13,6	0,554	151025,97

**CPV**

<b>Lâmina</b>	<b>l(cm)</b>	<b>t(1e-6)s</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>c(cm)</b>	<b>peso(g)</b>	<b>densidade(g/cm3)</b>	<b>Eco (MPa)</b>
1	100	196	5102,041	1,963	2,124	7,120	14,5	0,488	11245,15
2	103	227	4537,445	1,966	1,771	7,148	11,2	0,450	6567,90
3	108	230	4695,652	2,084	2,027	7,136	13,7	0,454	7597,12
4	104,5	231	4523,810	2,046	1,960	7,130	16,9	0,591	8119,18
5	104	236	4406,780	1,883	1,712	7,133	10,5	0,457	5911,96
6	104,5	207	5048,309	2,081	2,037	7,120	15,2	0,504	11052,10
7	107	212	5047,170	1,996	1,893	7,112	13,4	0,499	10952,63
8	105	205	5121,951	1,873	2,051	7,110	14,1	0,516	11953,77
9	104	218	4770,642	2,316	1,901	7,112	18,3	0,584	9954,76
10	104	228	4561,404	0,852	1,977	7,133	4,9	0,408	6186,66
11	105	221	4751,131	2,066	2,014	7,112	17,8	0,602	10026,91
12	104	204	5098,039	1,931	1,974	7,107	13,8	0,509	11603,80
13	104	224	4642,857	1,732	2,049	7,079	18,8	0,748	10939,13
14	103	202	5099,010	2,08	1,983	7,113	15,8	0,539	12155,90
15	104,5	222	4707,207	1,837	2,057	7,124	13,9	0,516	8521,12
16	104,5	236	4427,966	2,085	1,745	7,136	12,8	0,493	6418,76
17	105,5	232	4547,414	1,877	1,973	7,141	15,9	0,601	8407,55
18	103	221	4660,633	2,177	1,968	7,139	17,5	0,572	8908,65
19	104,5	187	5588,235	1,674	2,010	7,103	13,9	0,582	18699,83
20	108	220	4909,091	1,989	2,050	7,102	15,4	0,532	10334,86

**CPVI**

<b>Lâmina</b>	<b>l(cm)</b>	<b>t(1e-6)s</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>c(cm)</b>	<b>peso(g)</b>	<b>densidade(g/cm3)</b>	<b>Eco (MPa)</b>
1	94	133	7067,669	1,874	1,998	6,997	13,3	0,508	42897,23
2	95	145	6551,724	1,595	2,039	6,989	14,4	0,634	37971,42
3	95	129	7364,341	1,799	1,871	7,020	11,0	0,466	47111,77
4	94	140	6714,286	1,975	1,860	6,950	12,6	0,494	34118,78
5	95	178	5337,079	1,917	1,967	6,992	15,6	0,592	15771,69
6	95	206	4611,65	1,941	1,977	7,005	10,5	0,391	6239,44
7	95	180	5277,778	1,775	1,994	6,972	11,2	0,454	12127,01
8	95	180	5277,778	2,068	1,793	6,961	11,4	0,442	11858,38
9	96	202	4752,475	1,733	1,988	6,972	11,4	0,475	8261,73
10	96	139	6906,475	1,984	1,768	7,004	15,7	0,639	47250,11
11	78	140	5571,429	1,984	1,849	6,988	18,2	0,710	21766,63
12	76	112	6785,714	1,696	2,048	7,003	9,3	0,382	28860,11
13	76	111	6846,847	1,881	1,915	7,001	16,1	0,638	45598,63
14	75	118	6355,932	1,773	1,930	7,000	11,7	0,488	27149,60
15	76	94	8085,106	1,960	1,858	7,017	14,6	0,571	81077,24
16	78	114	6842,105	1,852	2,038	6,981	13,2	0,501	37255,54
17	76	154	4935,065	1,898	1,915	7,000	13,7	0,538	10661,28
18	75	99	7575,758	1,939	1,948	7,003	13,6	0,514	57265,40
19	75	109	6880,734	1,948	1,962	6,995	15,0	0,561	41825,76
20	76	90	8444,444	1,881	1,909	7,008	13,4	0,532	91097,90

2 – Série C (tubos de 1 ”)

**CPI**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	76	155	4903,226	1,995	1,985	7,102	17,8	0,634	11880,65
2	75	170	4411,765	1,968	1,987	7,102	15,7	0,565	7078,27
3	75	172	4360,465	2,479	1,990	7,097	25,9	0,740	8424,86
4	75	176	4261,364	2,045	2,004	7,152	19,6	0,669	7070,74
5	75	161	4658,385	1,833	2,025	7,170	15,5	0,582	9022,09
6	76	153	4967,320	1,839	2,016	7,203	19,6	0,734	14116,50
7	73	106	6886,792	1,904	2,027	7,191	17,4	0,627	45985,07
8	70	87	8045,977	1,969	2,032	7,208	14,5	0,503	71583,68
9	76	102	7450,980	2,109	2,082	7,169	21,4	0,680	67402,98
10	80	170	4705,882	1,629	2,086	7,187	14,4	0,590	9492,48
11	75	161	4658,385	2,077	2,095	7,120	20,5	0,662	10020,03
12	80	175	4571,429	1,374	2,001	7,165	11,8	0,599	8560,86
13	80	161	4968,944	2,040	2,088	7,155	19,3	0,634	12532,36
14	97	133	7293,233	2,058	2,093	7,174	17,3	0,560	52733,45
15	95	194	4896,907	1,754	2,094	7,172	15,0	0,569	10820,62
16	96	153	6274,510	2,020	2,055	7,181	20,6	0,691	34290,77
17	96	139	6906,475	2,021	2,034	7,185	15,5	0,525	40187,17
18	97	195	4974,359	2,000	2,103	7,198	14,6	0,482	10052,22
19	100	157	6369,427	2,024	2,116	7,208	20,4	0,661	35104,26
20	98	192	5104,167	1,996	2,031	7,189	17,4	0,597	13285,17
21	105	166	6325,301	2,038	2,063	7,217	19,9	0,656	33926,62
22	96	132	7272,727	1,975	2,074	7,192	18,9	0,642	58319,81
23	100	206	4854,369	2,051	2,094	7,097	28,0	0,919	15480,34
24	98	142	6901,408	2,224	2,106	7,155	21,5	0,642	47263,62
25	100	139	7194,245	1,585	2,092	7,159	16,2	0,682	58745,50
26	100	203	4926,108	2,025	2,080	7,144	19,1	0,634	12104,61

**CPII**

<b>Lâmina</b>	<b>l(cm)</b>	<b>t(1e-6)s</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b>c(cm)</b>	<b>peso(g)</b>	<b>densidade(g/cm3)</b>	<b>Eco (MPa)</b>
1	75	110	6818,182	2,015	2,044	7,015	19,8	0,686	47566,71
2	79	173	4566,474	2,018	2,035	7,013	19,8	0,686	9528,79
3	71	159	4465,409	1,360	2,040	7,021	12,5	0,642	8245,72
4	77	101	7623,762	2,056	2,026	7,056	27,2	0,925	95218,02
5	77	166	4638,554	1,763	2,011	7,078	17,3	0,689	10187,88
6	90	166	5421,687	2,030	2,016	7,070	16,8	0,581	16540,23
7	79	189	4179,894	1,738	2,026	7,035	15,5	0,626	6196,08
8	84	255	3294,118	2,321	1,986	7,041	24,6	0,758	2790,75
9	75	105	7142,857	1,755	1,961	7,030	13,0	0,537	46895,62
10	75	187	4010,695	1,662	1,984	7,004	11,1	0,481	4226,27
11	75	152	4934,211	2,133	1,995	6,987	19,9	0,669	12739,80
12	75	102	7352,941	1,827	1,982	7,000	13,8	0,544	53249,70
13	76	210	3619,048	2,233	1,975	6,978	18,0	0,585	3289,02
14	100	218	4587,156	1,133	2,301	7,074	19,1	1,036	13613,30
15	100	159	6289,308	1,905	2,314	7,047	27,8	0,895	42811,56
16	100	232	4310,345	1,872	2,316	7,084	27,1	0,882	9297,13
17	100	207	4830,918	1,754	2,338	7,072	27,7	0,955	15676,71
18	96	140	6857,143	1,702	2,335	7,190	21,0	0,735	51501,86
19	96	202	4752,475	1,853	2,310	7,142	20,5	0,671	10976,52
20	96	208	4615,385	1,792	2,297	7,167	17,6	0,597	8866,33
21	95	202	4702,970	1,964	2,288	7,160	20,3	0,631	10010,90
22	95	154	6168,831	1,794	2,286	7,181	15,6	0,530	25743,37
23	94	196	4795,918	1,839	2,286	7,134	17,3	0,577	10059,21
24	96	206	4660,194	1,948	2,308	7,123	21,4	0,668	10117,14
25	94	193	4870,466	2,118	2,299	7,092	24,3	0,704	12600,44
26	95	149	6375,839	1,860	2,300	7,118	16,8	0,552	30386,82

**CPIII**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	190	258	7364,341	1,228	1,980	7,015	10,2	0,598	57879,19
2	185	480	3854,167	1,337	1,995	6,985	10,6	0,569	4138,38
3	185	323	5727,554	1,691	1,999	7,017	13,2	0,557	19906,16
4	185	330	5606,061	1,626	1,992	6,978	14,9	0,659	20995,28
5	184	372	4946,237	1,639	2,019	7,003	11,5	0,496	10060,06
6	185	457	4048,140	1,770	2,014	7,008	17,5	0,701	5979,02
7	194	395	4911,392	1,539	2,037	7,038	13,9	0,630	11898,05
8	190	430	4418,605	1,634	2,037	7,021	12,0	0,513	6581,15
9	190	401	4738,155	1,549	2,074	7,020	13,2	0,585	9697,33
10	191	397	4811,083	1,814	2,083	6,998	14,2	0,537	9605,64
11	178	376	4734,043	1,514	2,078	6,967	13,2	0,602	9892,73
12	193	377	5119,363	1,852	2,076	6,970	16,8	0,627	13994,92
13	187	357	5238,095	1,929	2,101	7,001	19,9	0,701	16825,30
14	197	374	5267,380	1,915	2,090	6,999	16,8	0,598	15092,61

**CPIV**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	184	347	5302,594	1,989	2,089	7,241	21,3	0,707	17788,75
2	184	374	4919,786	2,192	2,097	7,243	24,1	0,724	13428,78
3	185	380	4868,421	1,723	2,064	7,235	23,5	0,913	15586,74
4	185	278	6654,676	1,886	2,067	7,236	16,2	0,574	37288,12
5	185	256	7226,563	1,842	2,067	7,220	15,8	0,575	51936,89
6	183	332	5512,048	1,882	2,136	7,248	19,2	0,659	19611,52
7	185	366	5054,645	1,894	2,095	7,225	23,2	0,809	16404,01
8	185	273	6776,557	1,621	2,098	7,234	17,3	0,703	47367,06
9	186	293	6348,123	1,729	2,116	7,229	16,9	0,639	33692,22
10	186	341	5454,545	2,113	2,151	7,220	20,7	0,631	18140,57
11	184	285	6456,140	2,035	2,138	7,157	26,1	0,838	45059,35
12	183	359	5097,493	2,015	2,144	7,144	21,8	0,707	15185,54
13	185	341	5425,220	2,023	2,136	7,123	21,8	0,707	19497,13

**CPV**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	190	280	6785,714	1,895	2,034	7,106	16,4	0,599	41728,84
2	193,5	330	5863,636	1,951	2,015	7,074	14,1	0,507	20260,30
3	193	393	4910,941	1,652	2,004	7,097	13,5	0,575	11026,78
4	182	364	5000,000	1,738	1,982	7,107	13,8	0,564	11666,03
5	184	383	4804,178	1,695	1,984	7,108	12,7	0,531	9466,90
6	193	389	4961,440	1,728	1,958	7,101	13,0	0,541	10935,24
7	194	382	5078,534	1,830	1,951	7,162	20,4	0,798	16522,21
8	194	391	4961,637	1,608	2,047	7,130	14,0	0,597	11850,14
9	193	390	4948,718	1,716	1,990	7,067	13,8	0,572	11326,33
10	195	398	4899,497	1,704	1,960	7,065	12,1	0,513	9948,89
11	185	365	5068,493	1,908	1,948	7,066	13,8	0,525	11629,24
12	185	384	4817,708	1,755	1,945	7,082	13,9	0,575	10216,93
13	184	312	5897,436	1,875	1,963	7,109	15,0	0,575	22992,02
14	185	320	5781,250	1,822	1,852	7,101	13,8	0,575	21228,35

**CPVI**

Lâmina	l(cm)	t(1e-6)s	v(m/s)	a(cm)	b(cm)	c(cm)	peso(g)	densidade(g/cm3)	Eco (MPa)
1	190	362	5248,619	2,100	1,852	7,001	19,2	0,706	17053,68
2	190	366	5191,257	2,103	1,788	7,020	18,6	0,706	16318,32
3	186	344	5406,977	2,265	1,898	7,023	21,3	0,706	19213,12
4	186	349	5329,513	2,126	1,959	7,019	27,1	0,927	22682,81
5	187	331	5649,547	2,267	1,942	7,016	27,5	0,890	27723,65
6	185	335	5522,388	2,043	1,998	7,039	17,7	0,616	18694,81
7	185	279	6630,824	1,968	1,931	7,116	16,9	0,625	39399,49
8	188	326	5766,871	1,967	1,872	7,080	17,0	0,652	23307,22
9	185	326	5674,847	1,827	1,891	7,012	17,4	0,718	23657,56
10	190	366	5191,257	1,863	1,830	7,003	15,2	0,637	14988,57
11	185	335	5522,388	2,011	1,779	6,996	16,9	0,675	20159,42
12	190	326	5828,221	1,874	1,765	6,998	14,7	0,635	23795,26
13	194	371	5229,111	2,083	1,692	6,971	16,8	0,684	16365,22



## **ANEXO II**

Neste anexo estão todos os resultados dos ensaios realizados para o cálculo das curvas Momento x Rotação, obtidas a partir dos ensaios à flexão, para as séries A, B e C.

## Ensaio à flexão

Seguem os gráficos momento x rotação obtidos a partir dos ensaios à flexão.

1 – Série A (tubos de 1/2")

CPI

Gráfico Momento x Rotação - CPI de 1/2"

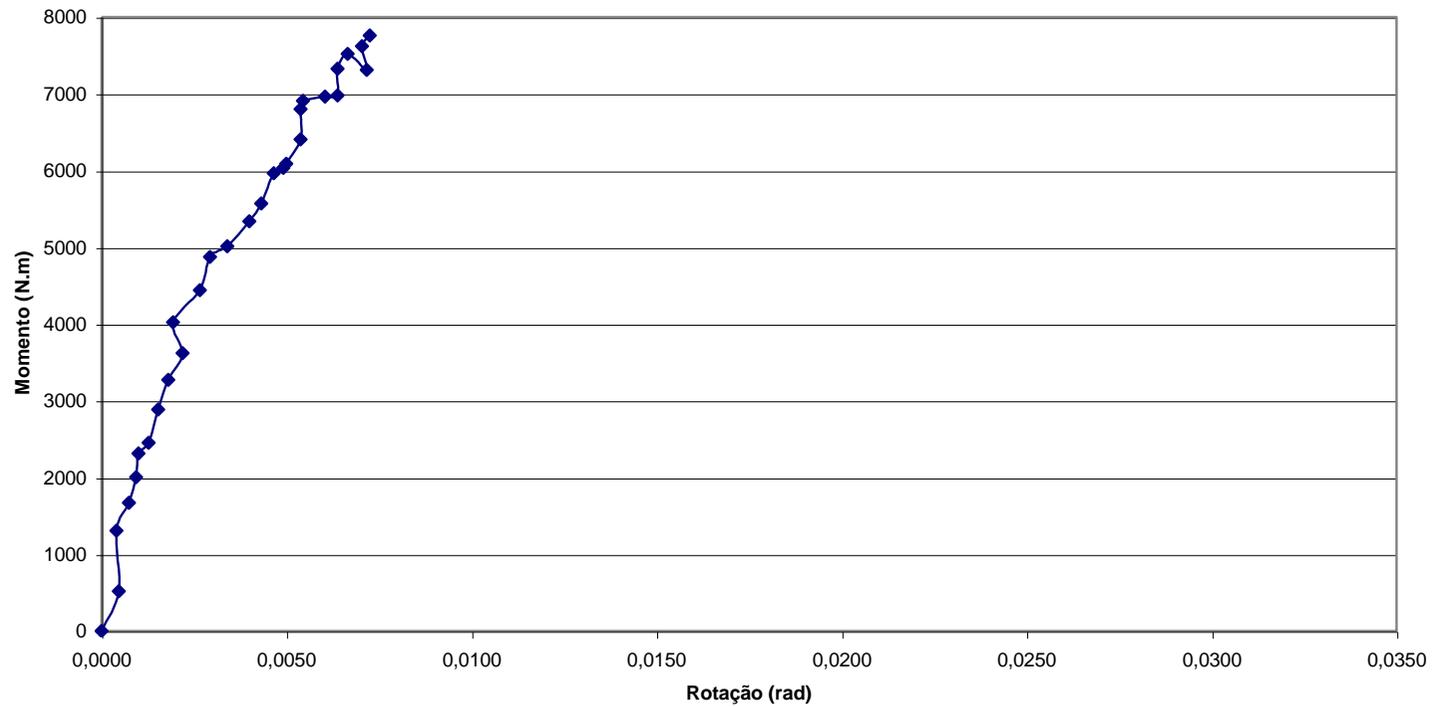
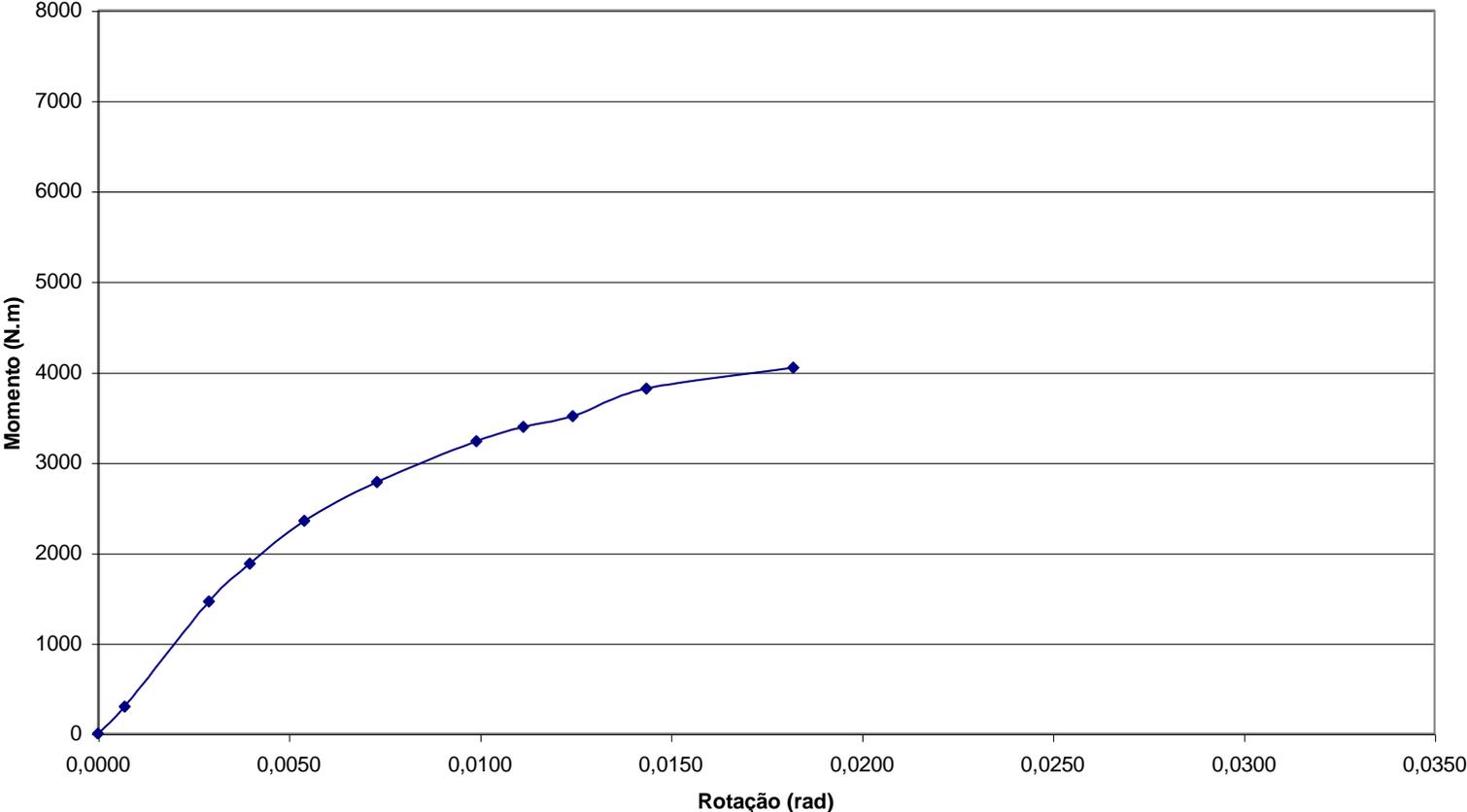
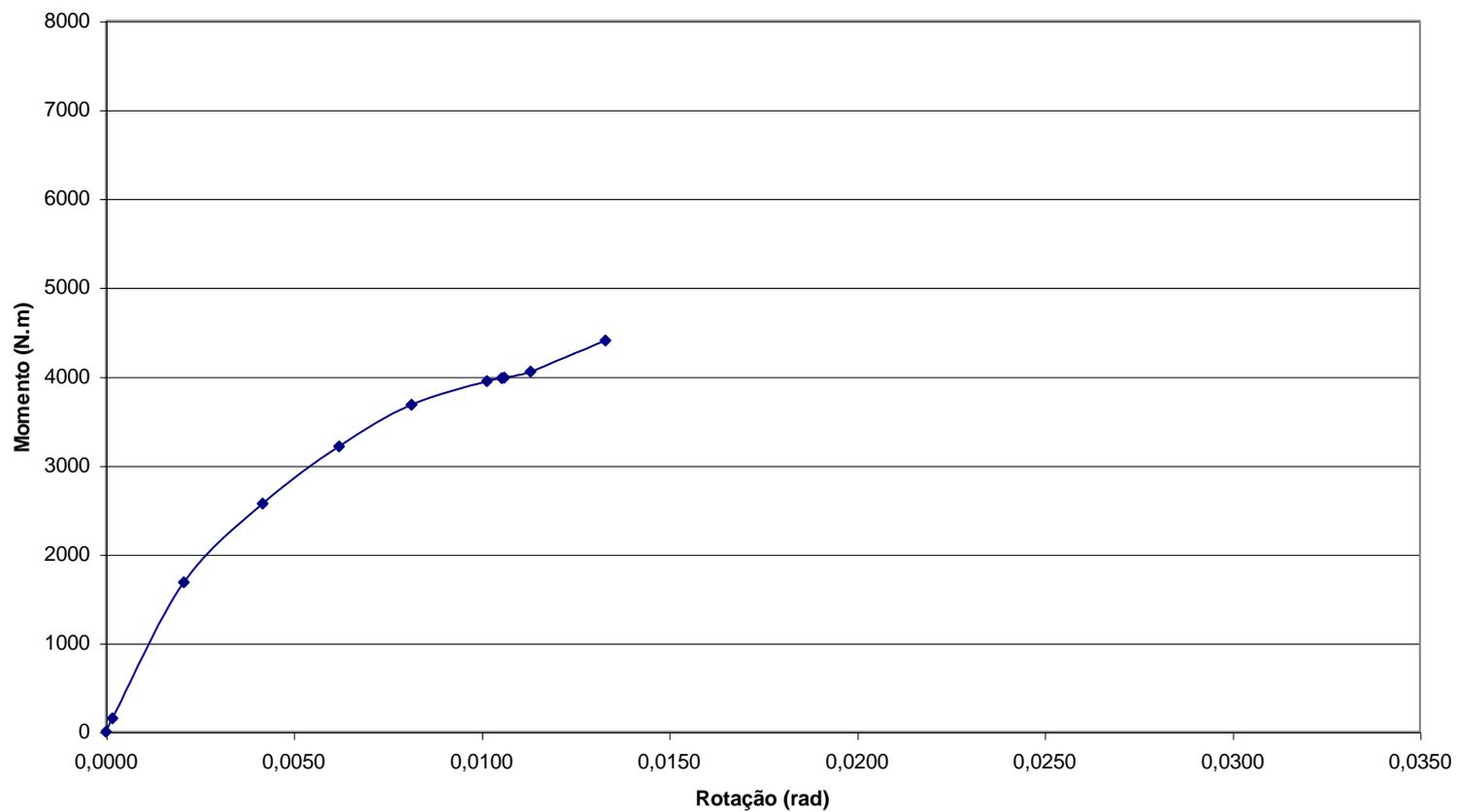


Gráfico Momento x Rotação - CPII de 1/2"



# CPIII

Gráfico Momento x Rotação - CPIII de 1/2"



# CPIV

Gráfico Momento x Rotação - CPIV de 1/2"

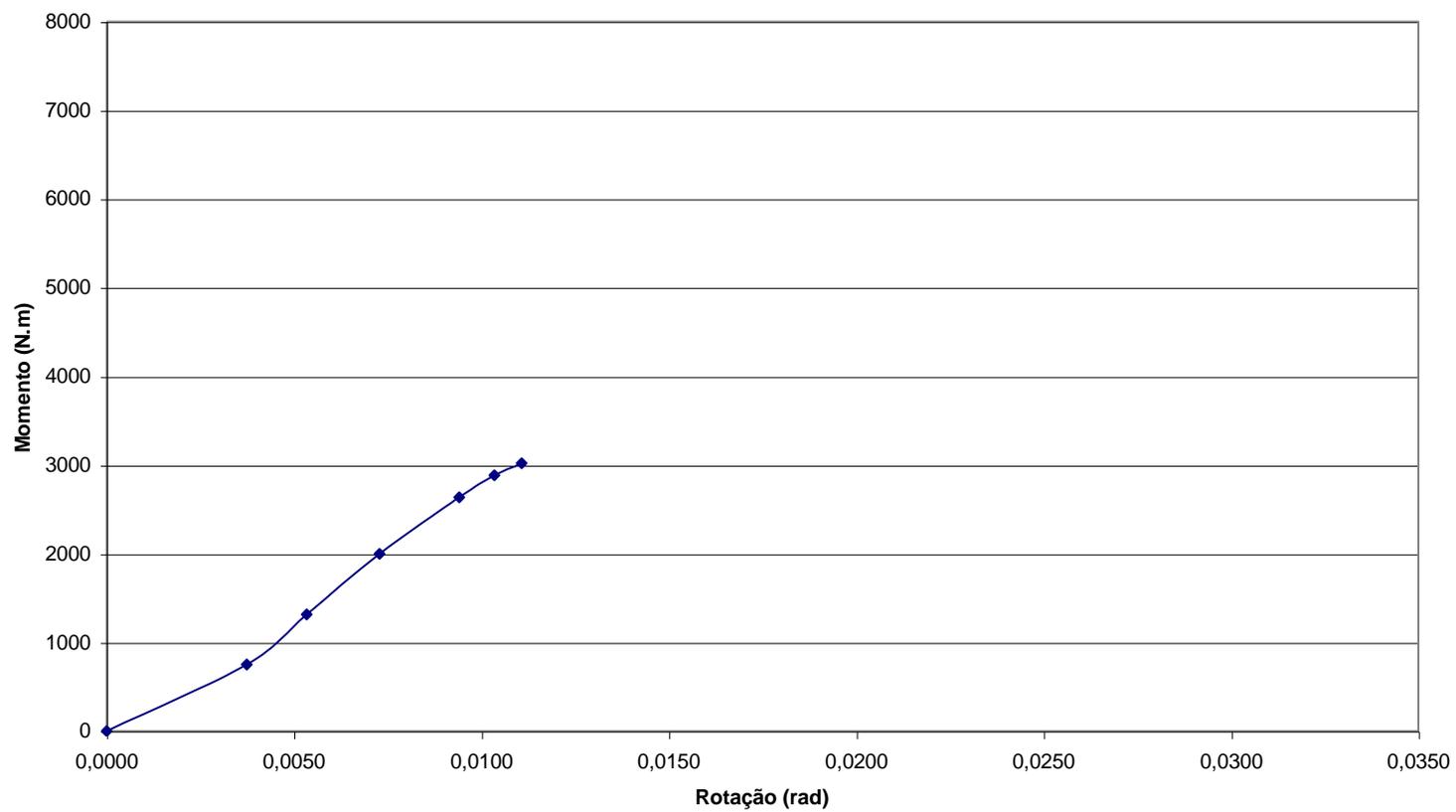


Gráfico Momento x Rotação - CPV de 1/2"

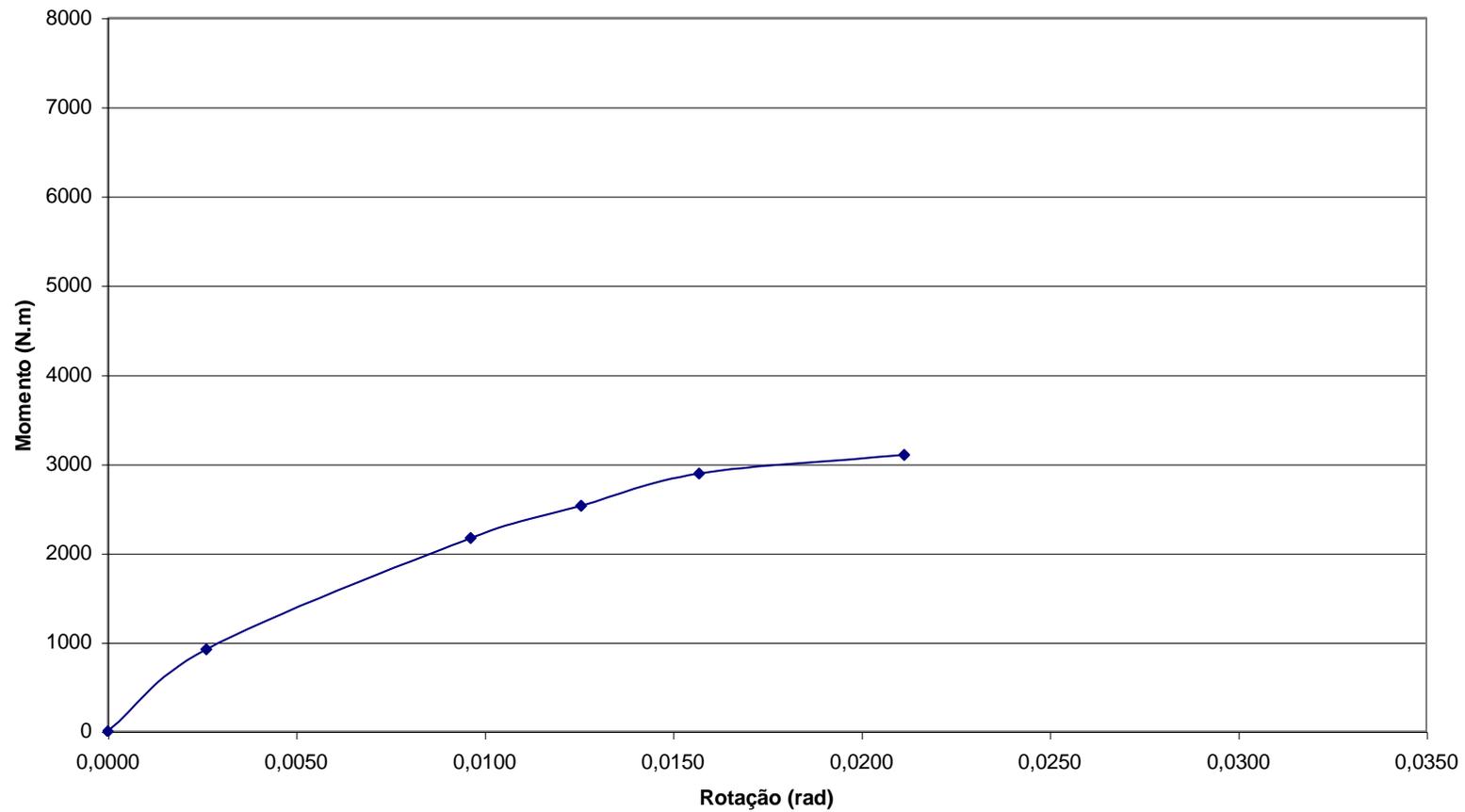
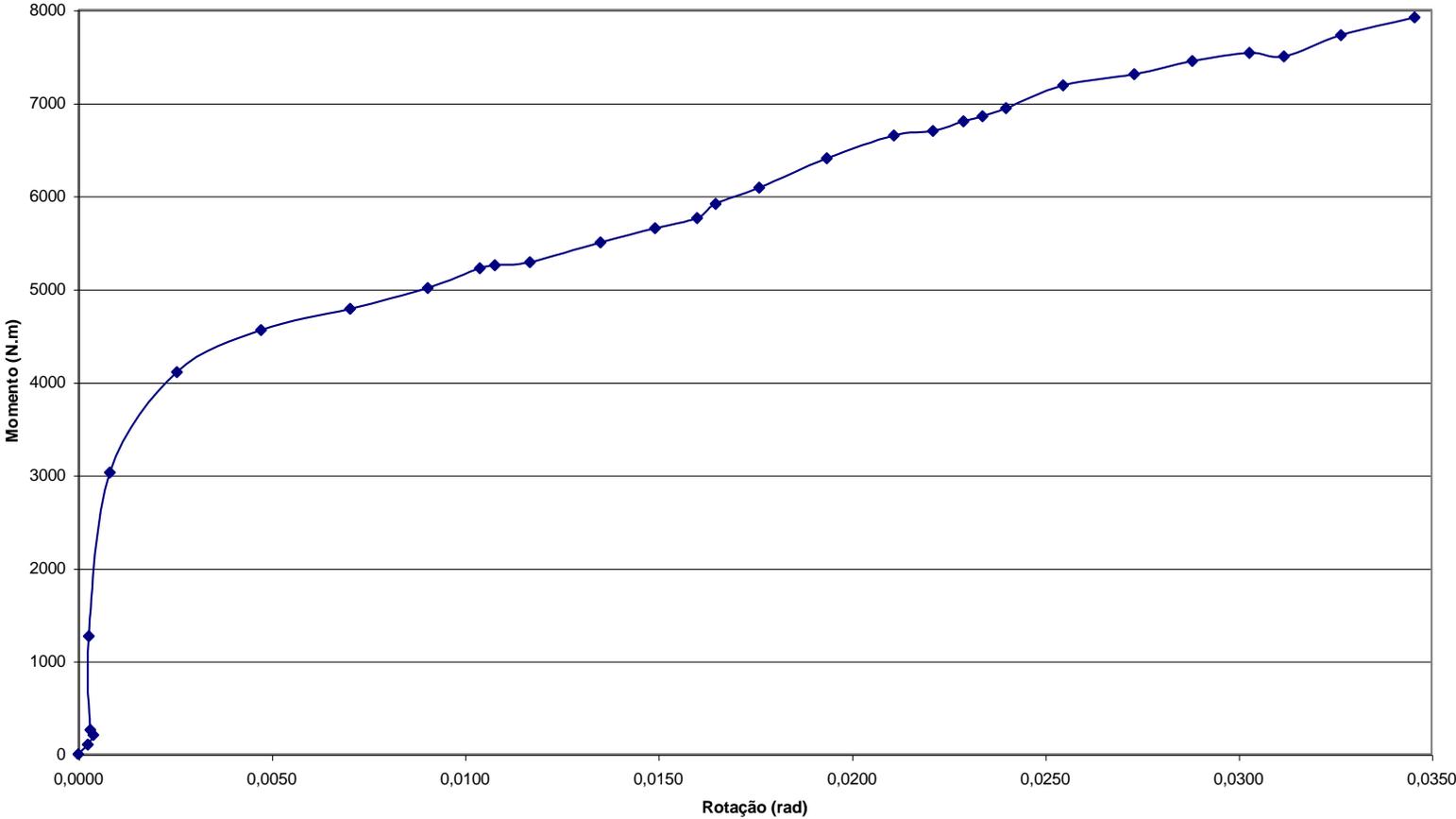


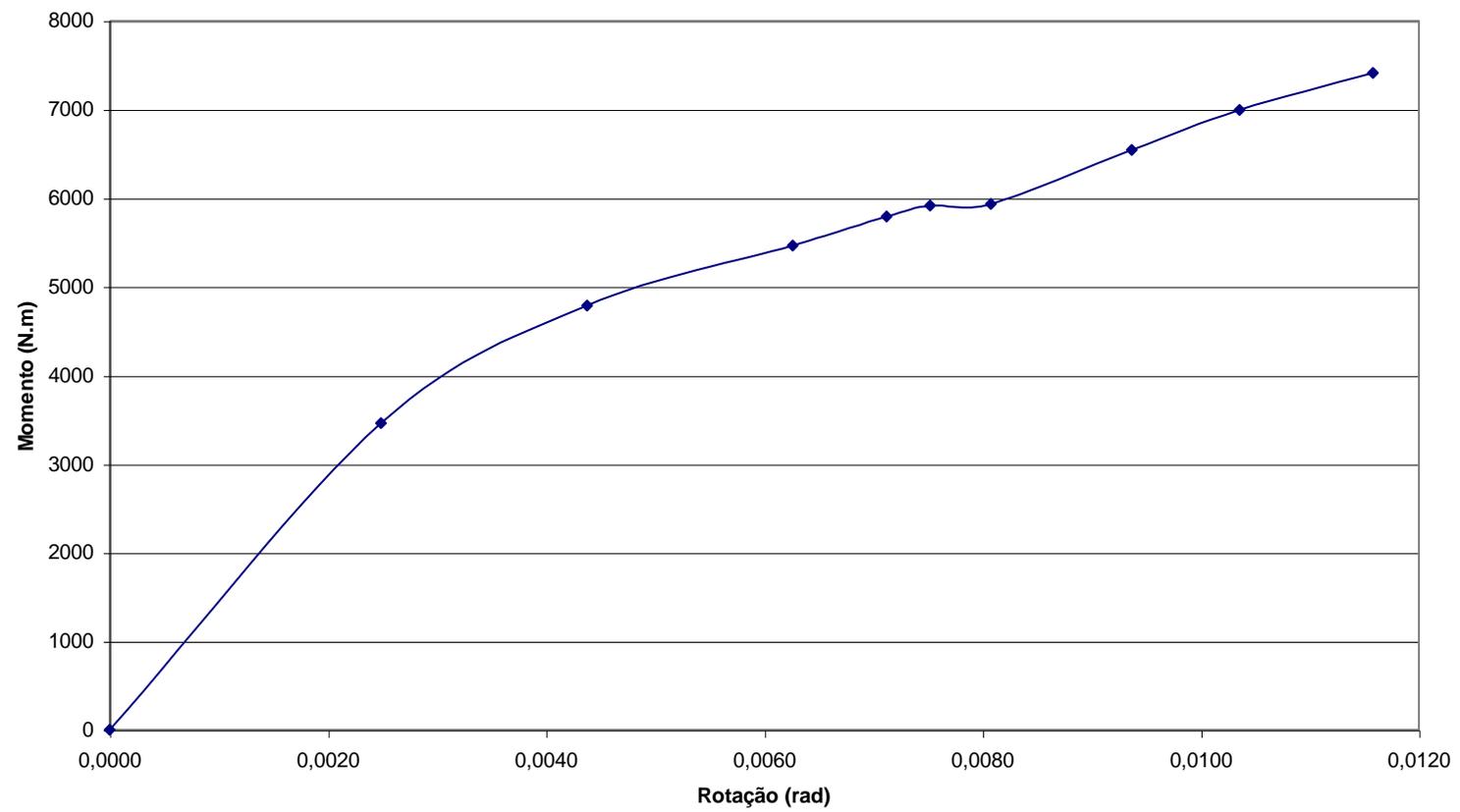
Gráfico Momento x Rotação - CPVI de 1/2"



2 – Série B (tubos de 3/4 ”)

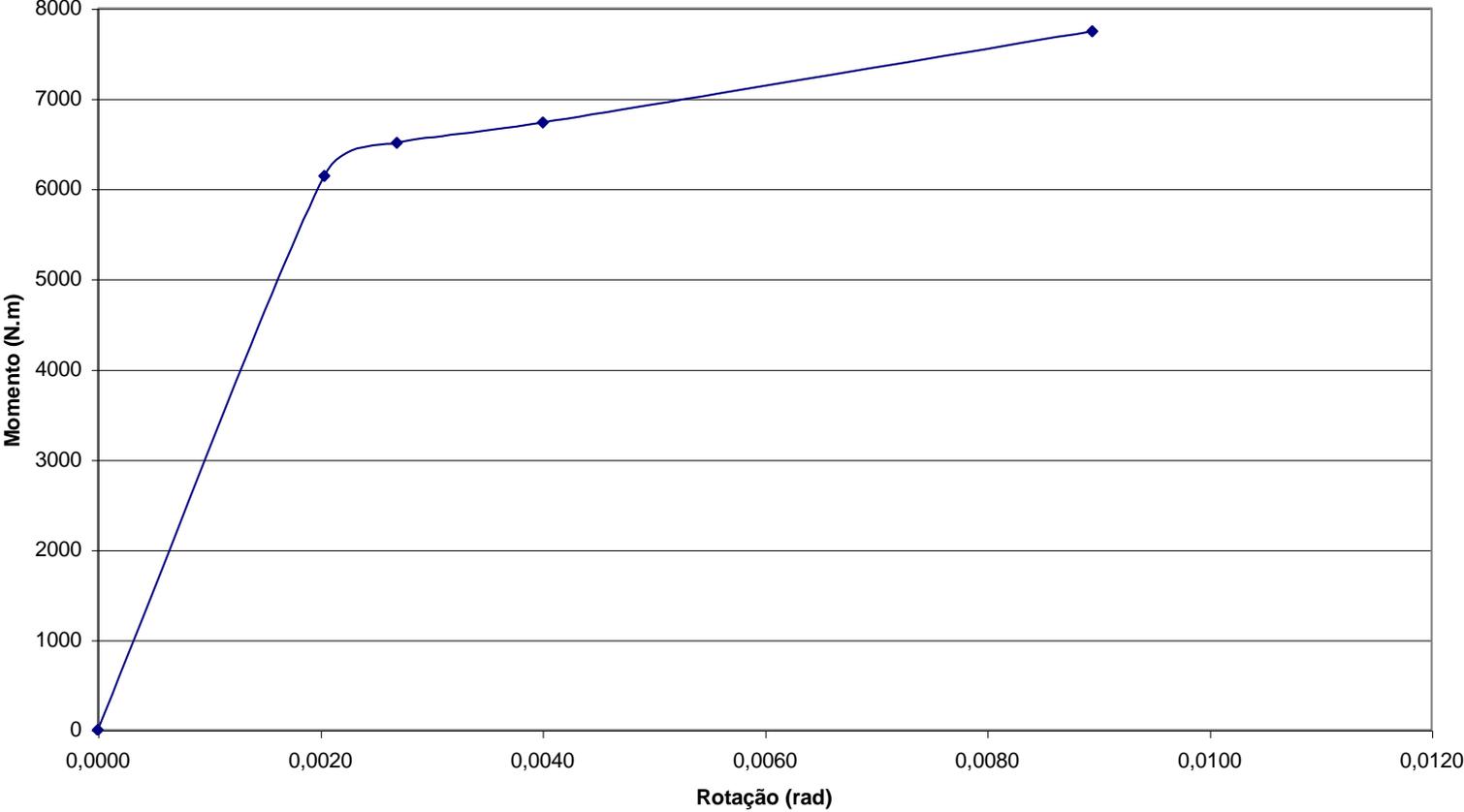
CPI

Gráfico Momento x Rotação - CPI de 3/4"



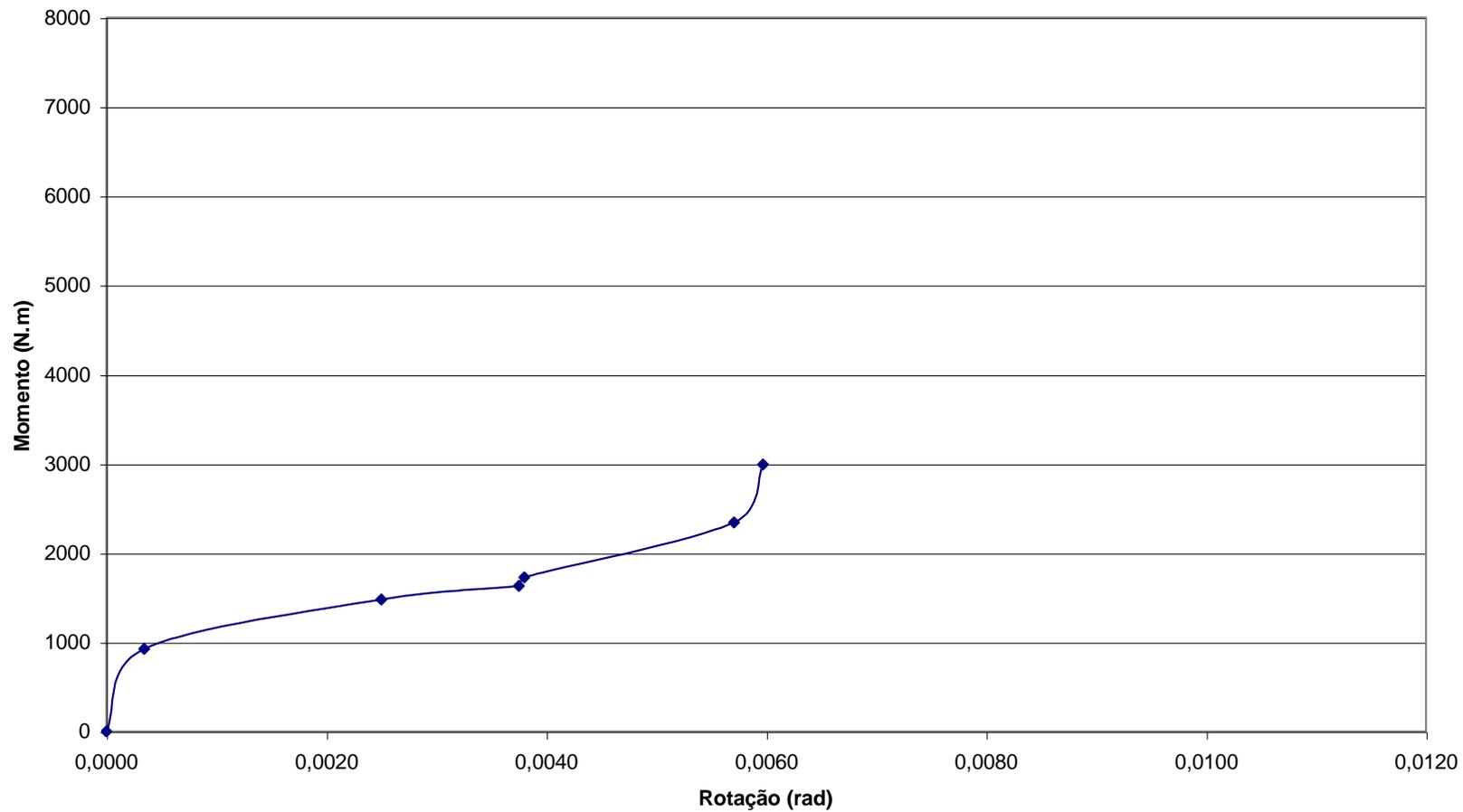
CPII

Gráfico Momento x Rotação - CPII de 3/4"



# CPIII

## Gráfico Momento x Rotação - CPIII de 3/4"



# CPIV

### Gráfico Momento x Rotação - CPIV de 3/4"

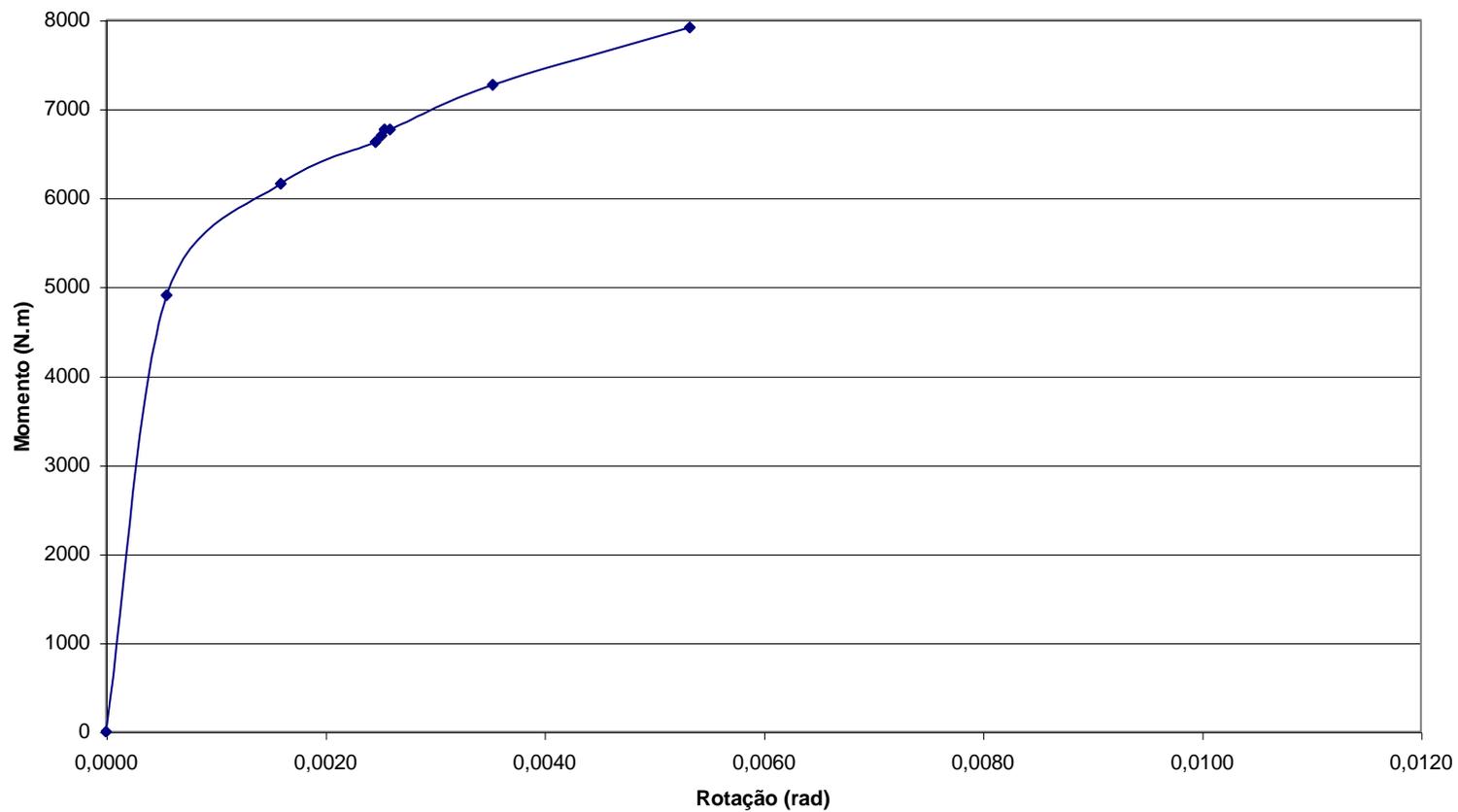
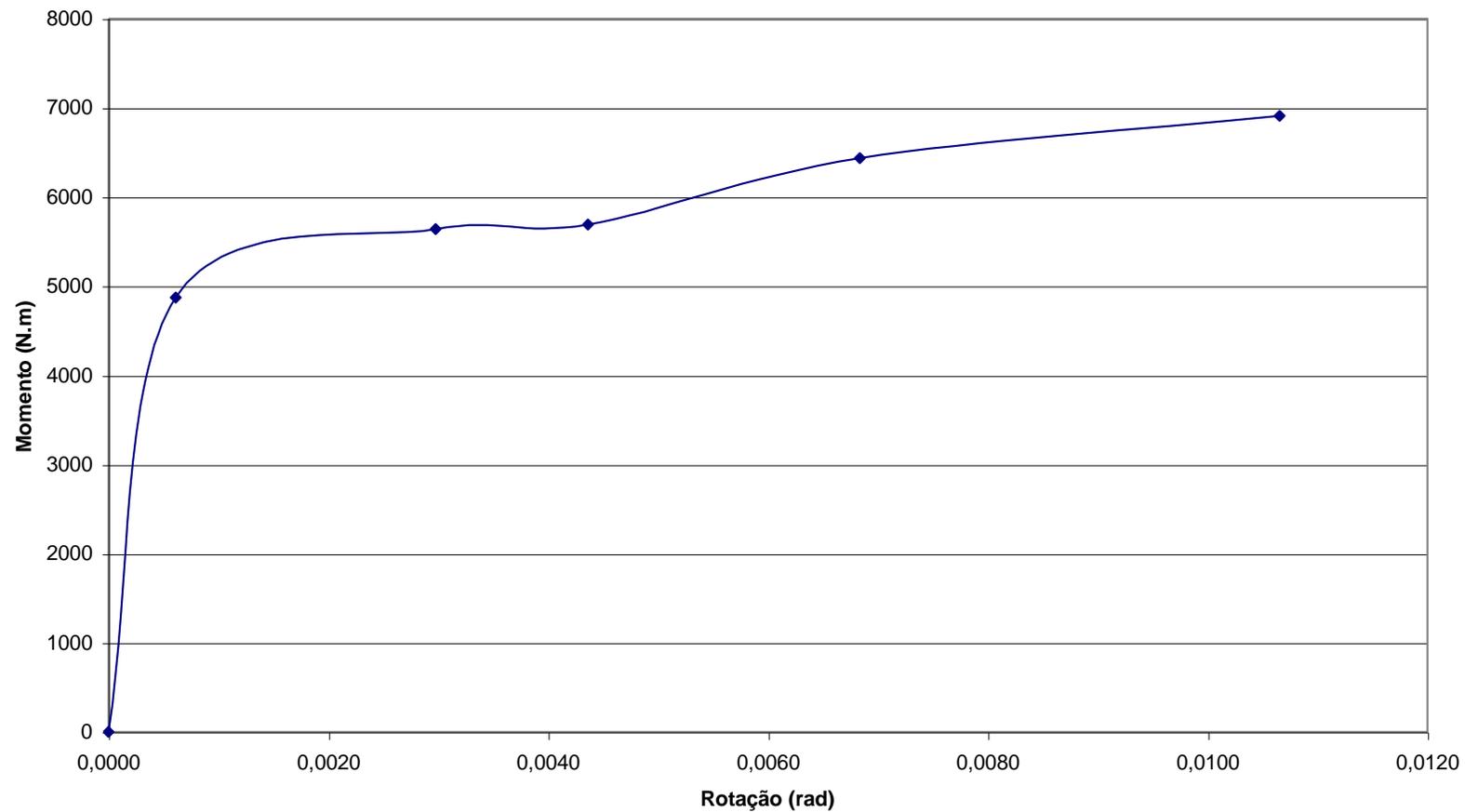
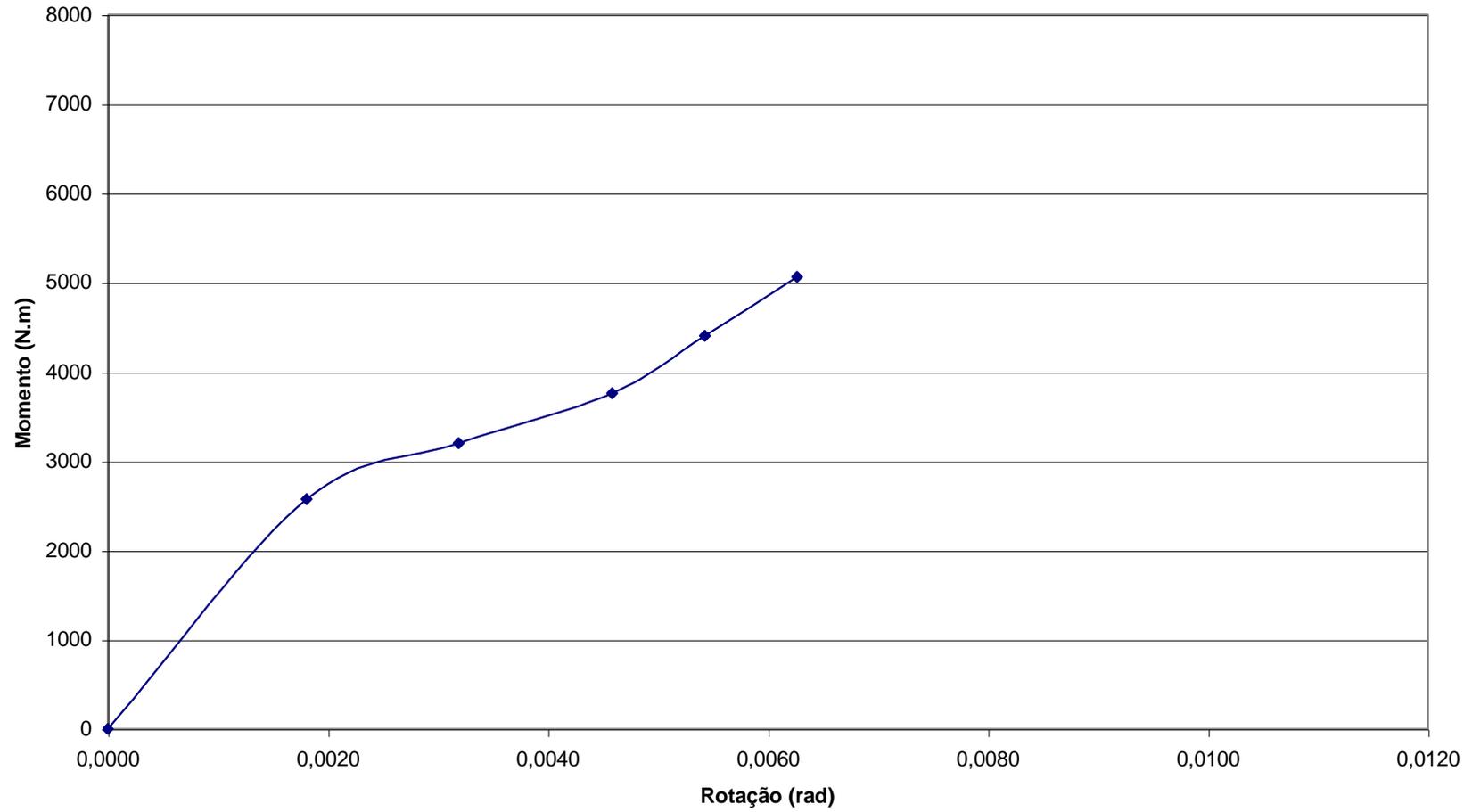


Gráfico Momento x Rotação - CPV de 3/4"



# CPVI

## Gráfico Momento x Rotação - CPVI de 3/4"



3 – Série C (tubos de 1 ")

**CPI**

**Gráfico Momento x Rotação - CPI de 1"**

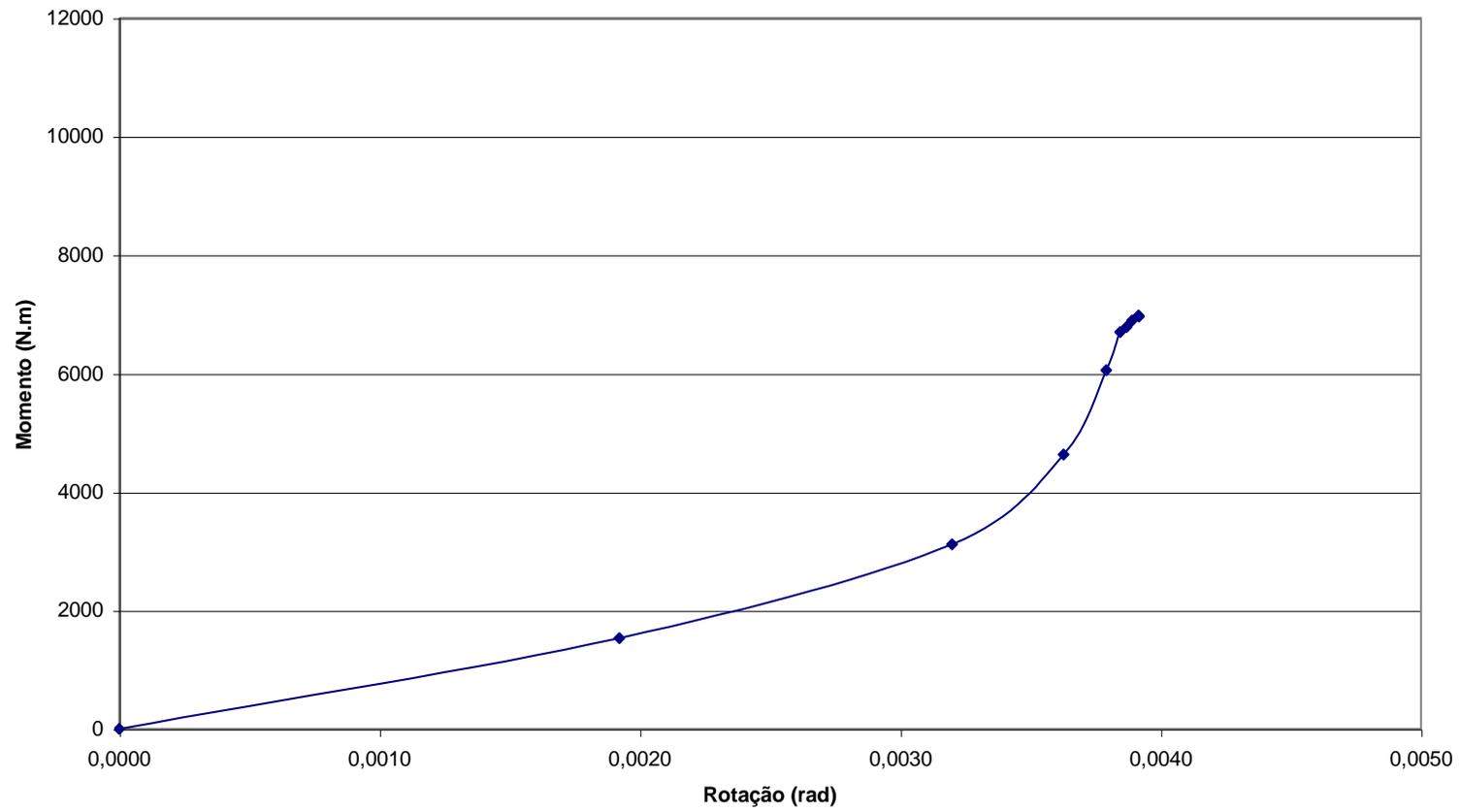


Gráfico Momento x Rotação - CPII de 1"

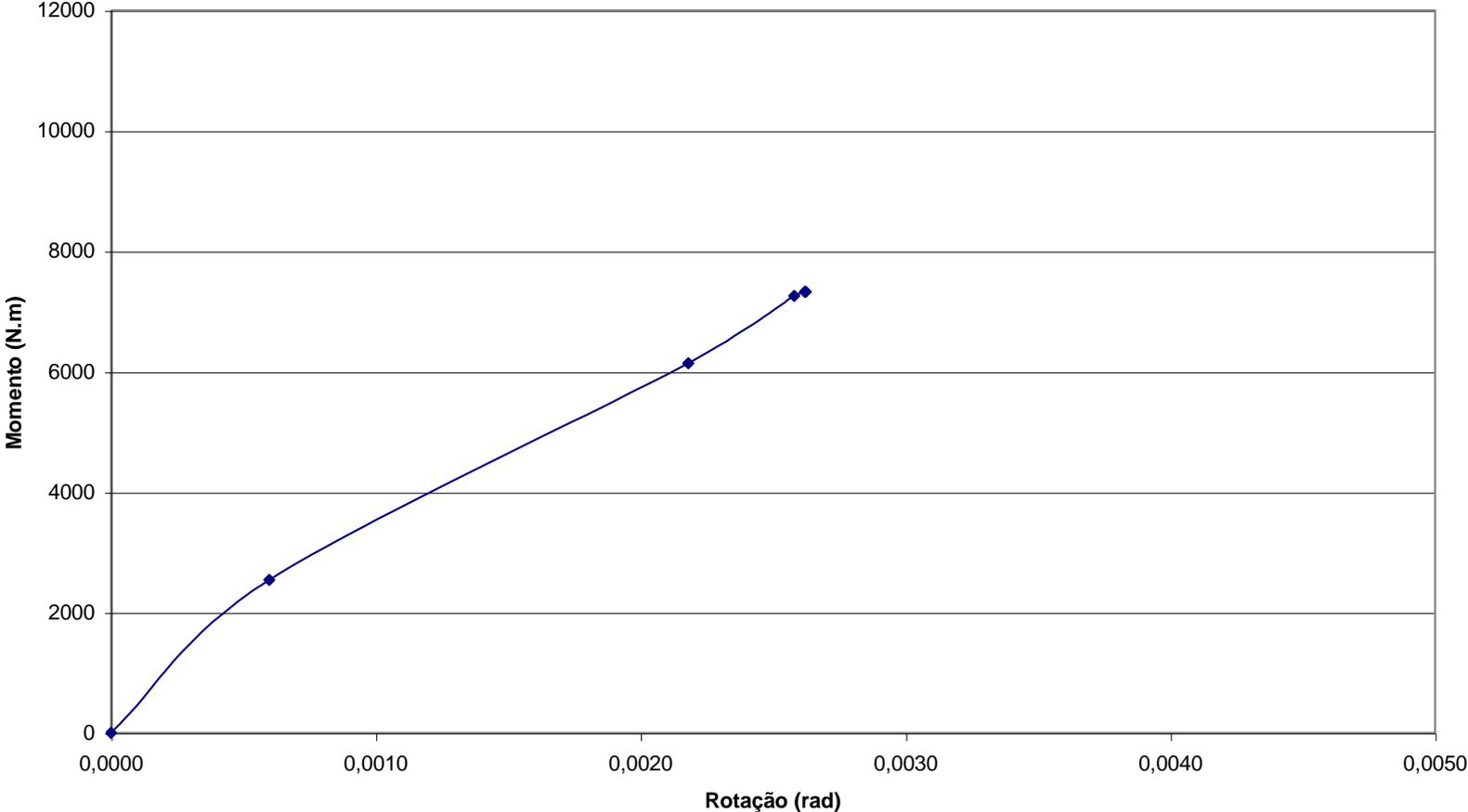
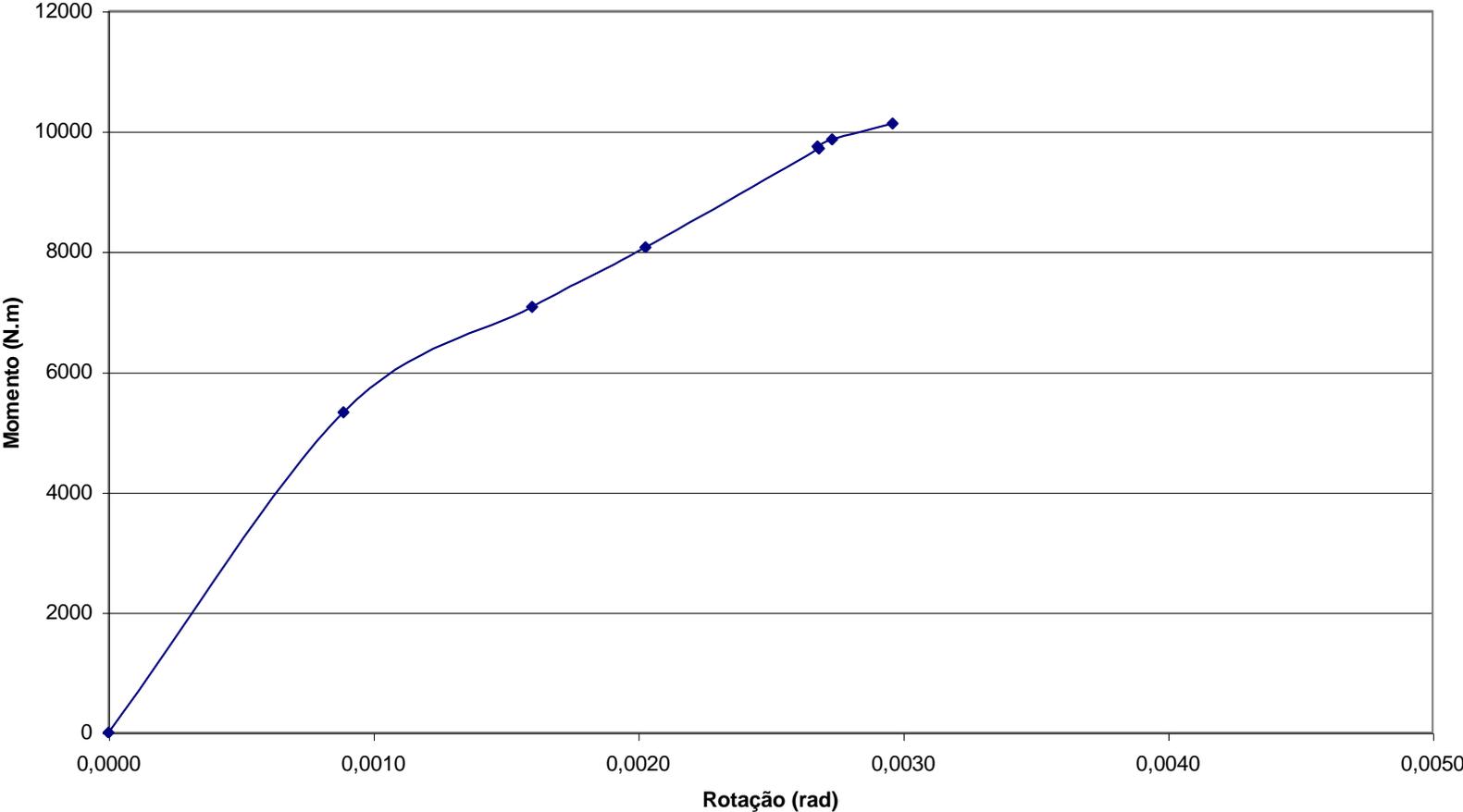


Gráfico Momento x Rotação - CPIII de 1"



# CPIV

Gráfico Momento x Rotação - CPIV de 1"

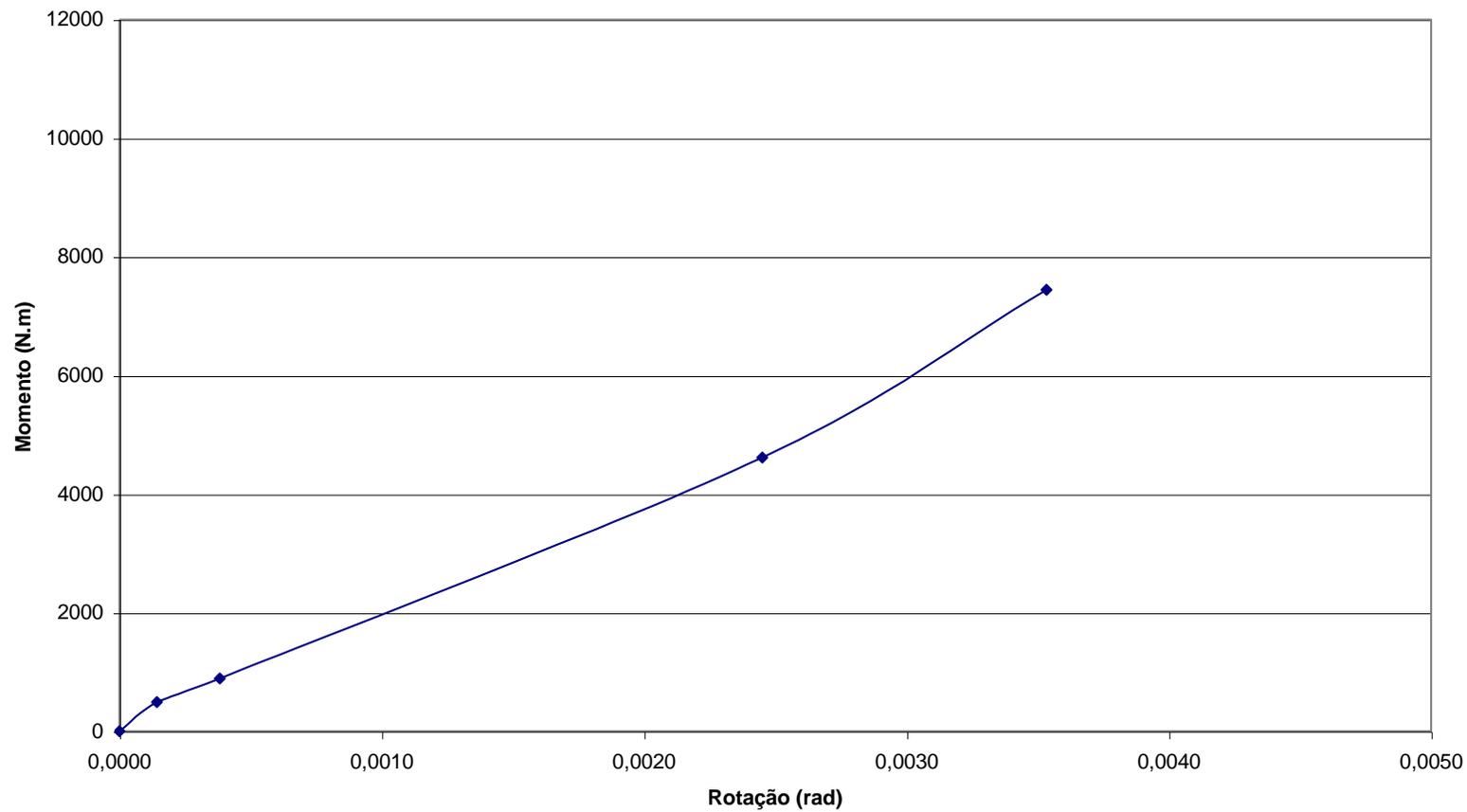
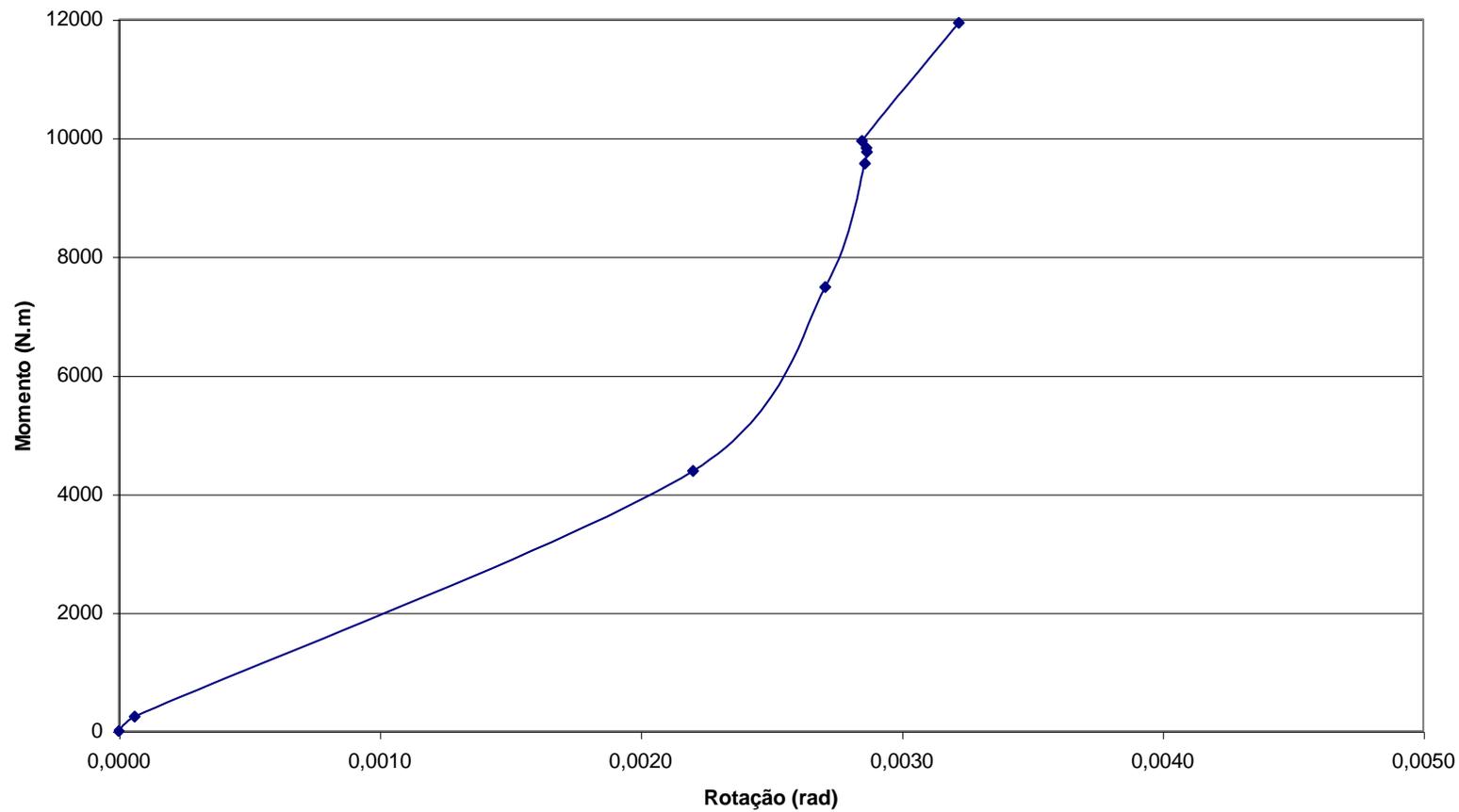
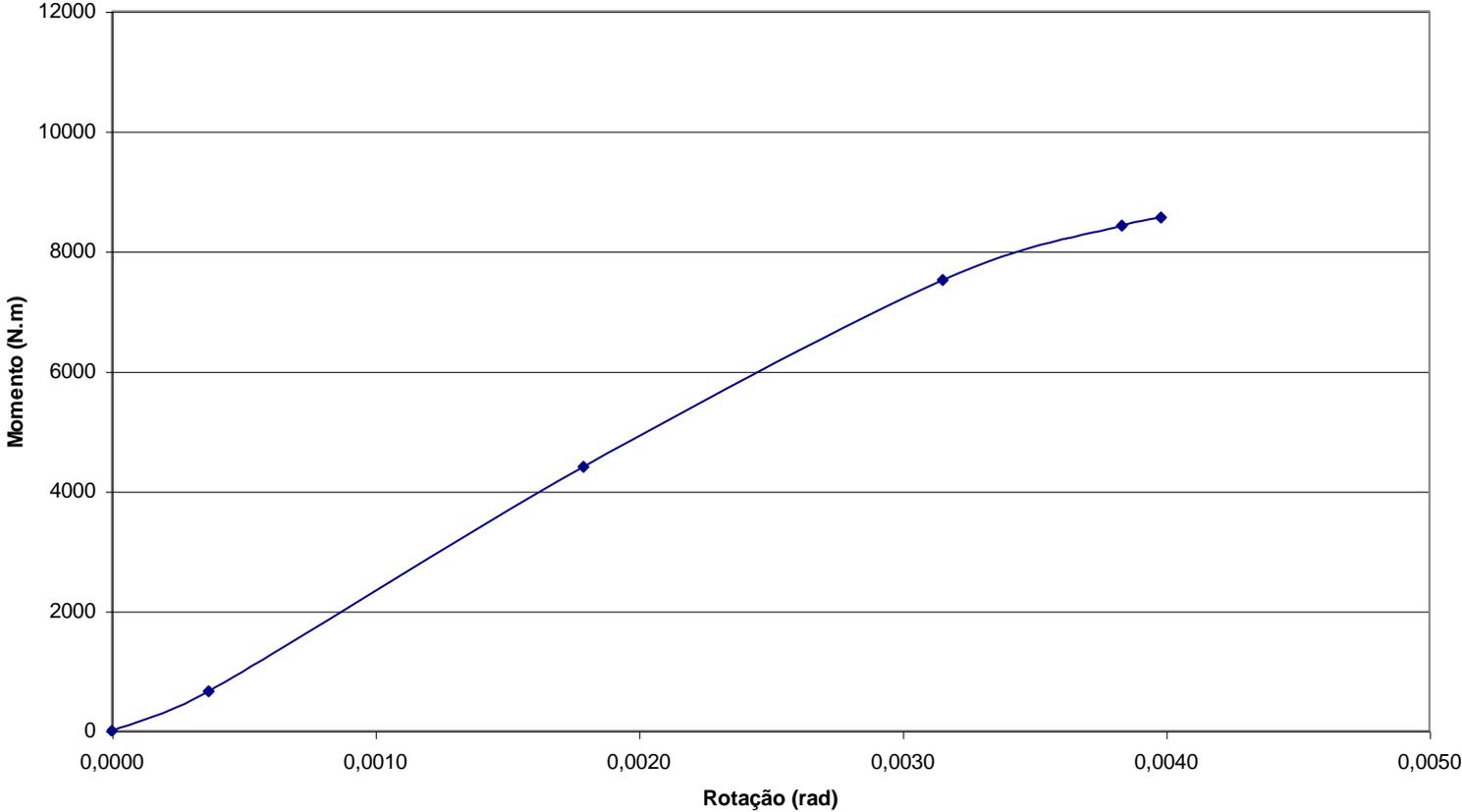


Gráfico Momento x Rotação - CPV de 1"



CPVI

Gráfico Momento x Rotação - CPVI de 1"



## **ANEXO III**

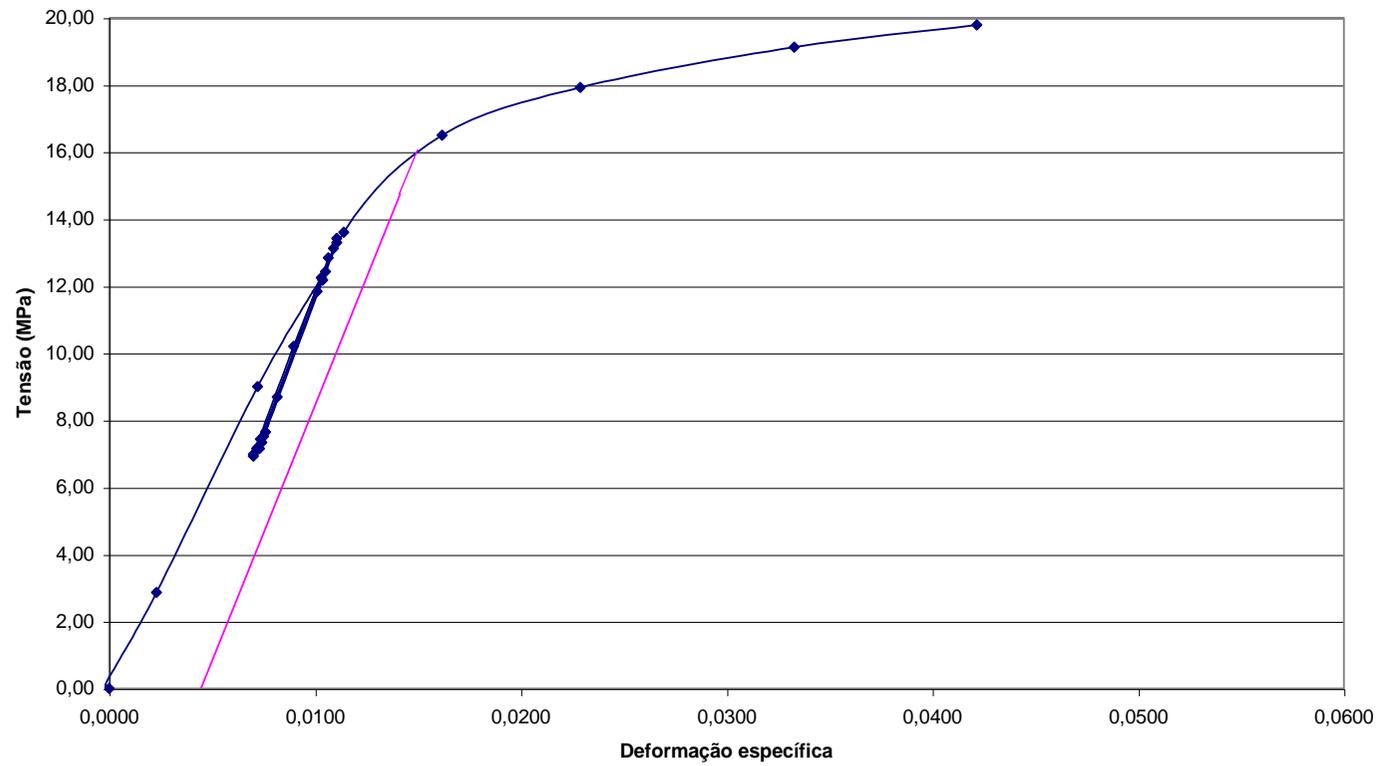
Neste anexo estão todos os resultados dos ensaios realizados para a determinação da tensão de embutimento normal e paralelo às fibras, para as séries A, B e C.

1 – Série A (tubos de 1/2")

- **Embutimento normal às fibras**

CPI

**Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPI de 1/2"**



CPII

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPII de 1/2"

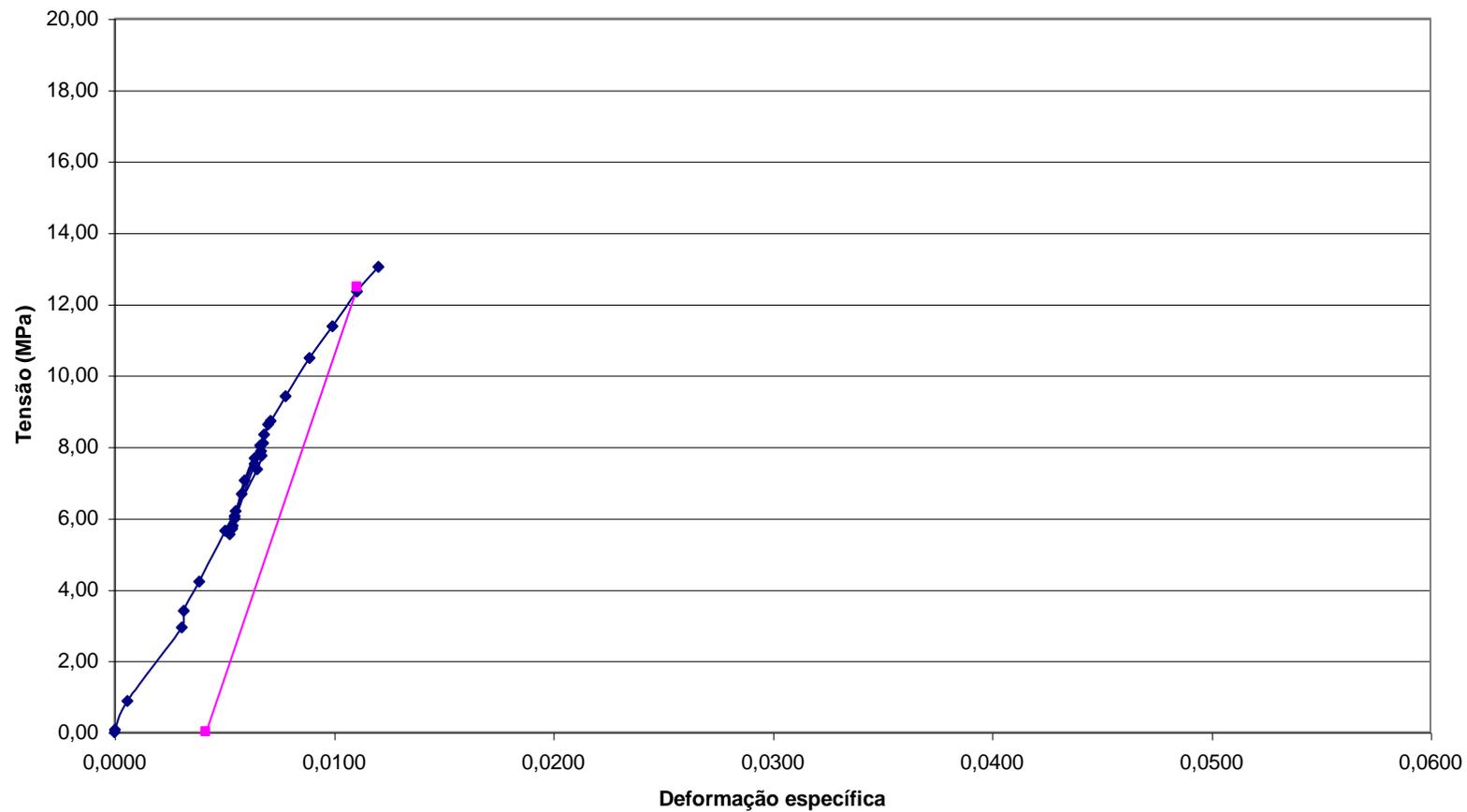


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIII de 1/2"

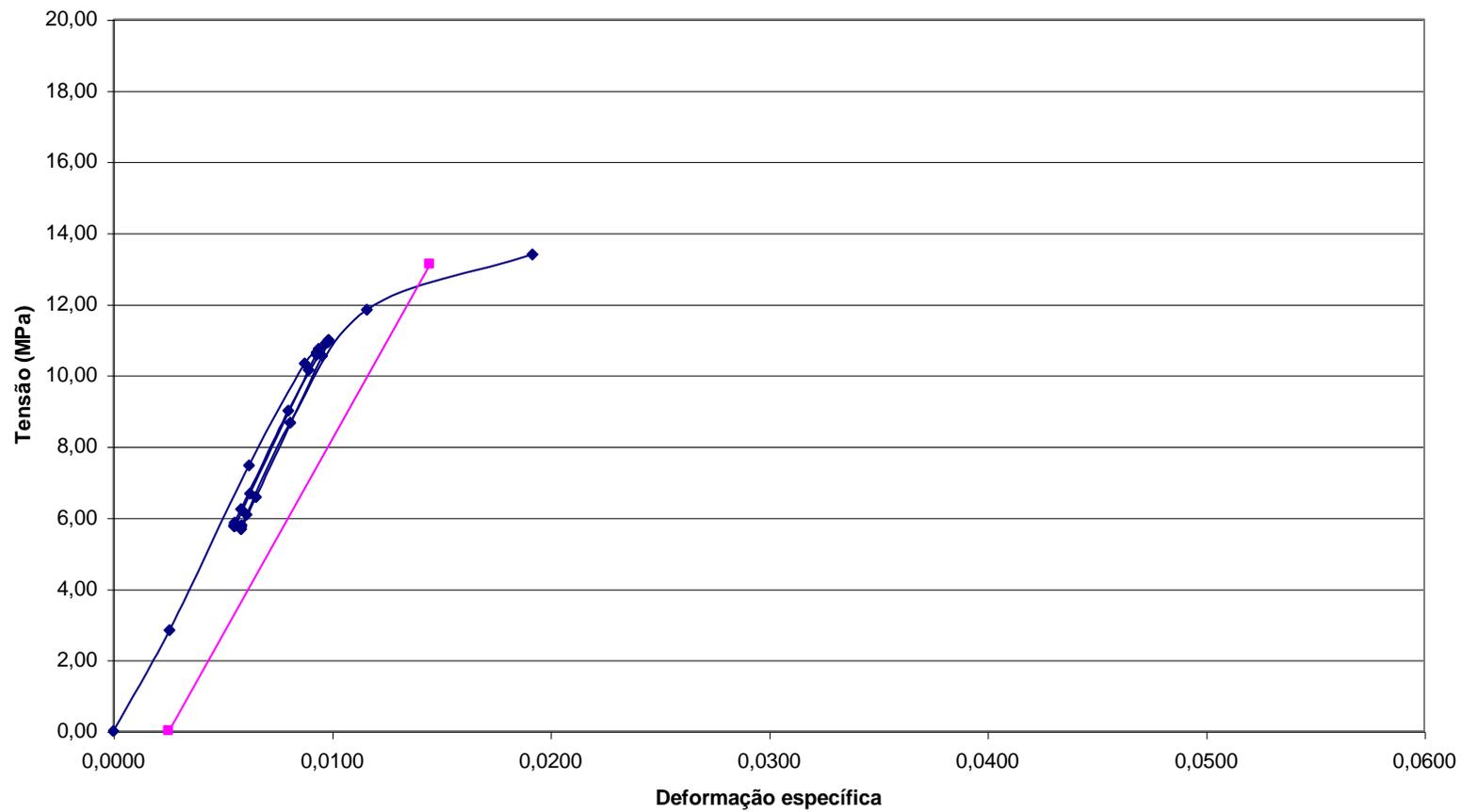


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIV de 1/2"

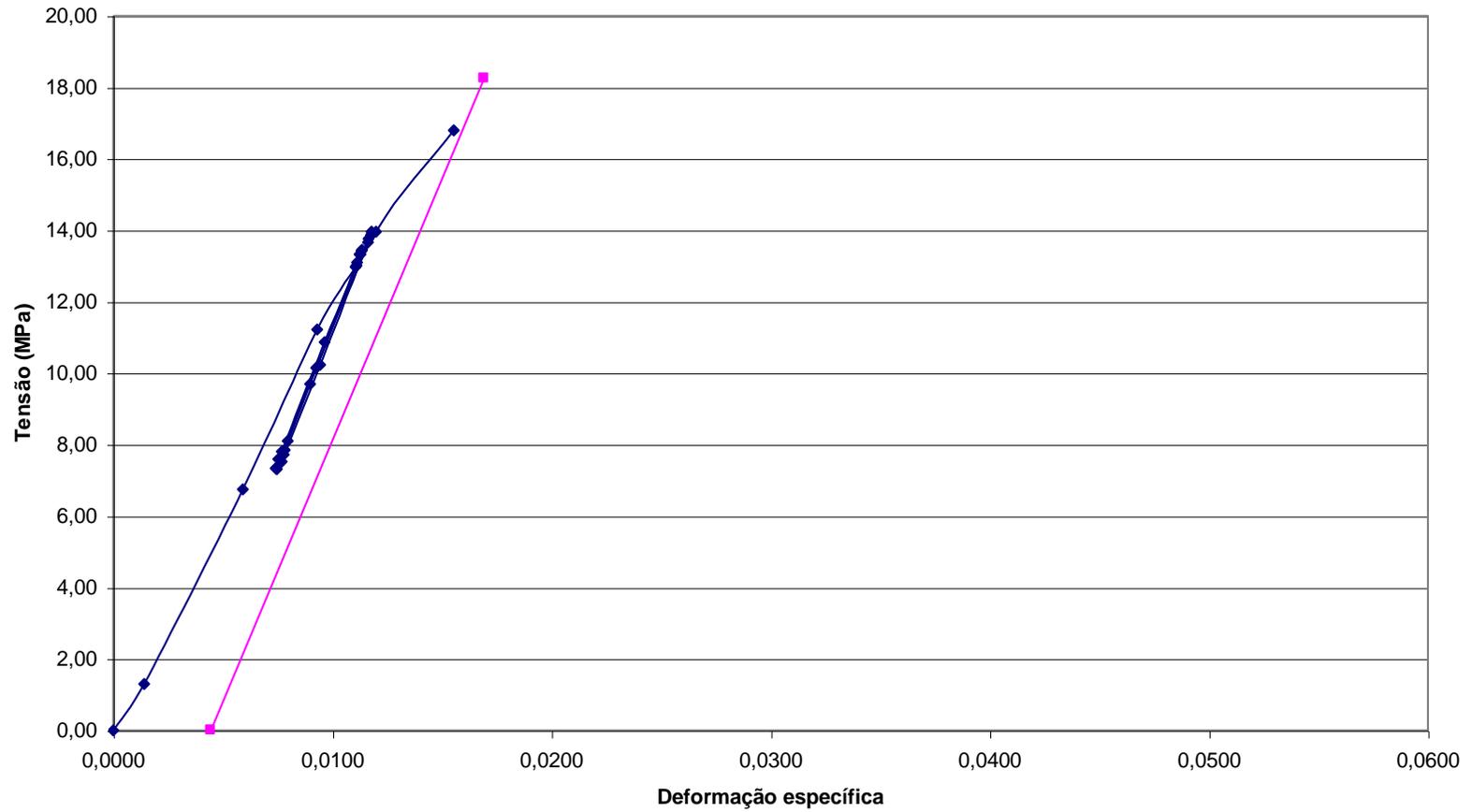


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPV de 1/2"

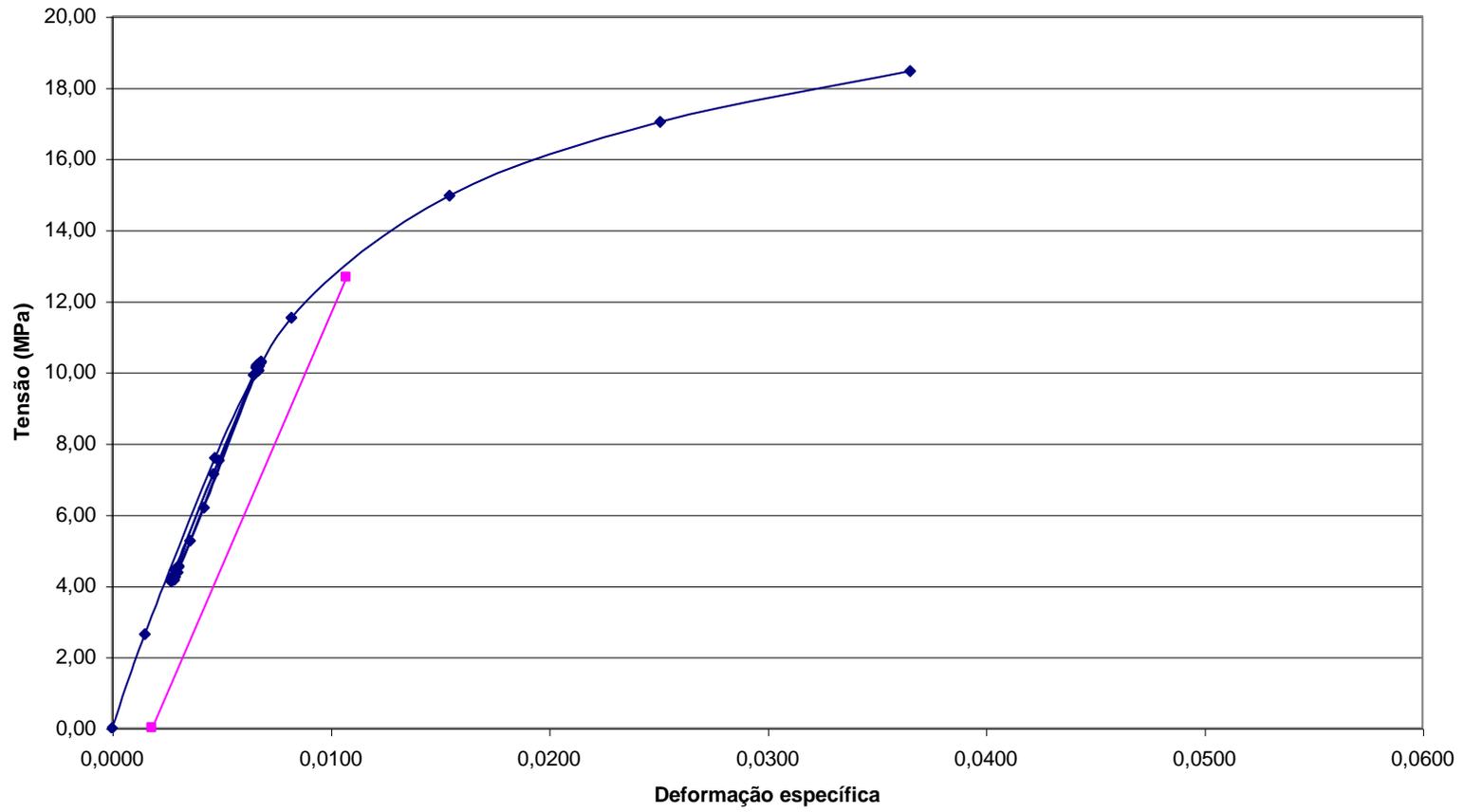
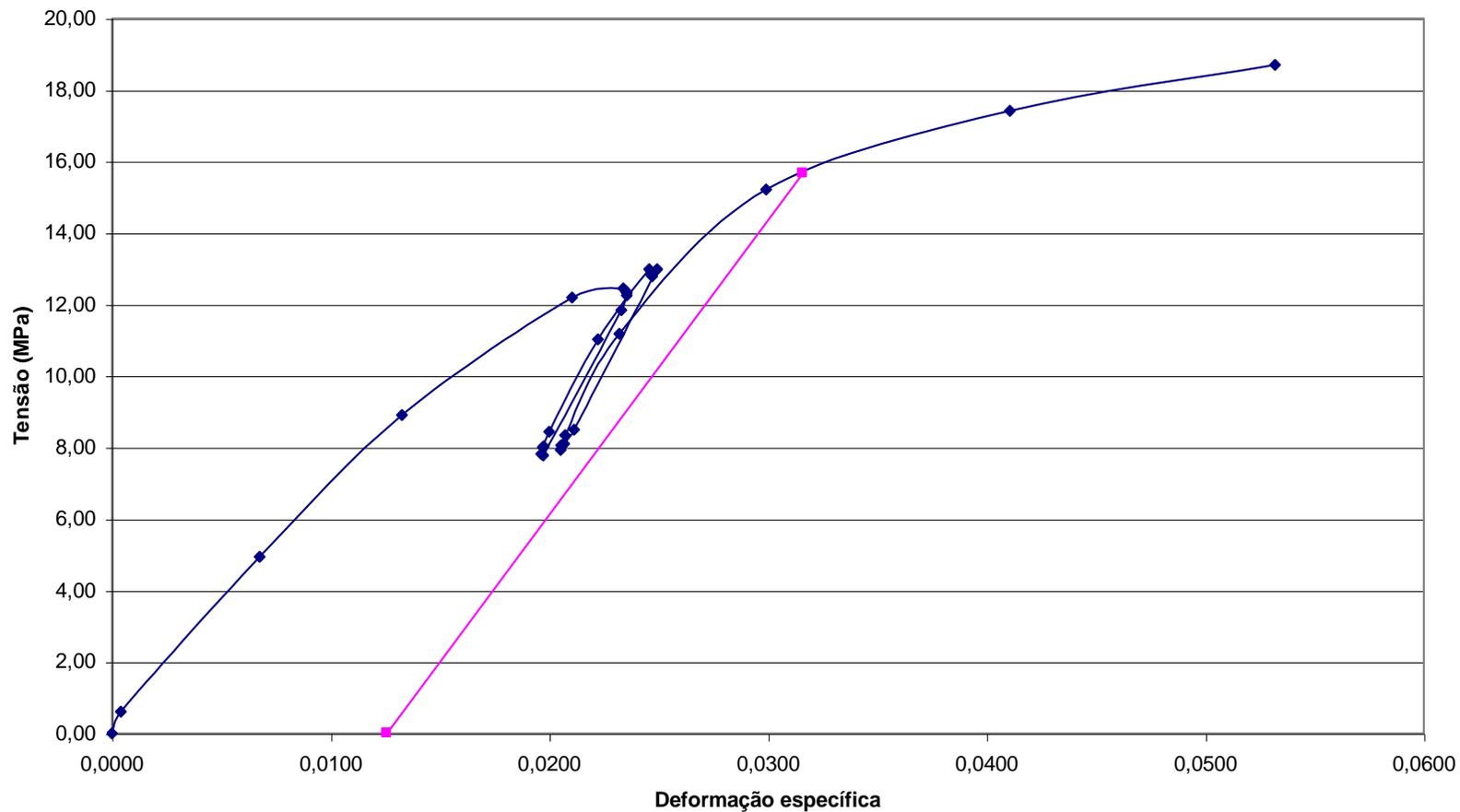


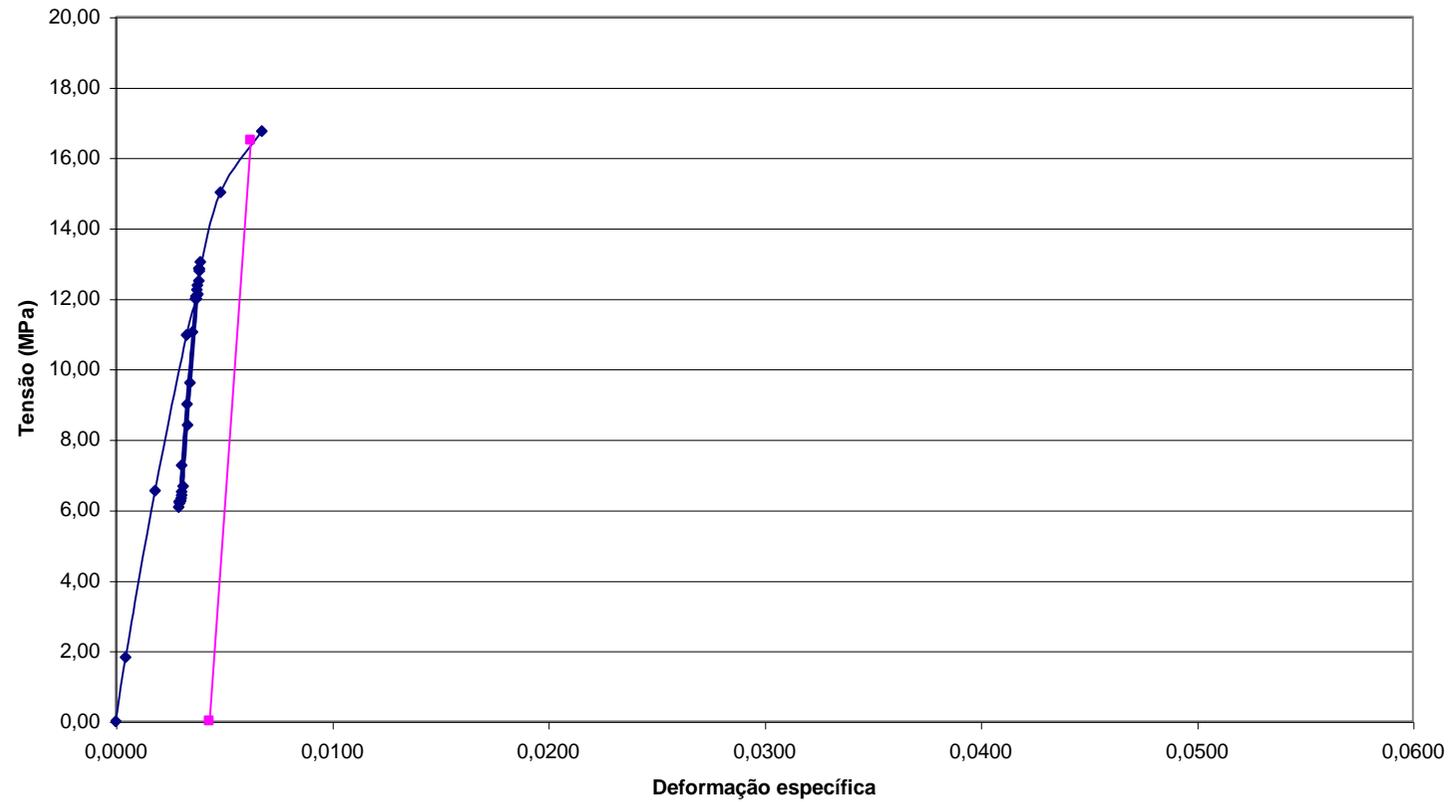
Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPVI de 1/2"



- Embutimento paralelo às fibras

CPI

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 1/2"



CPII

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPII de 1/2"

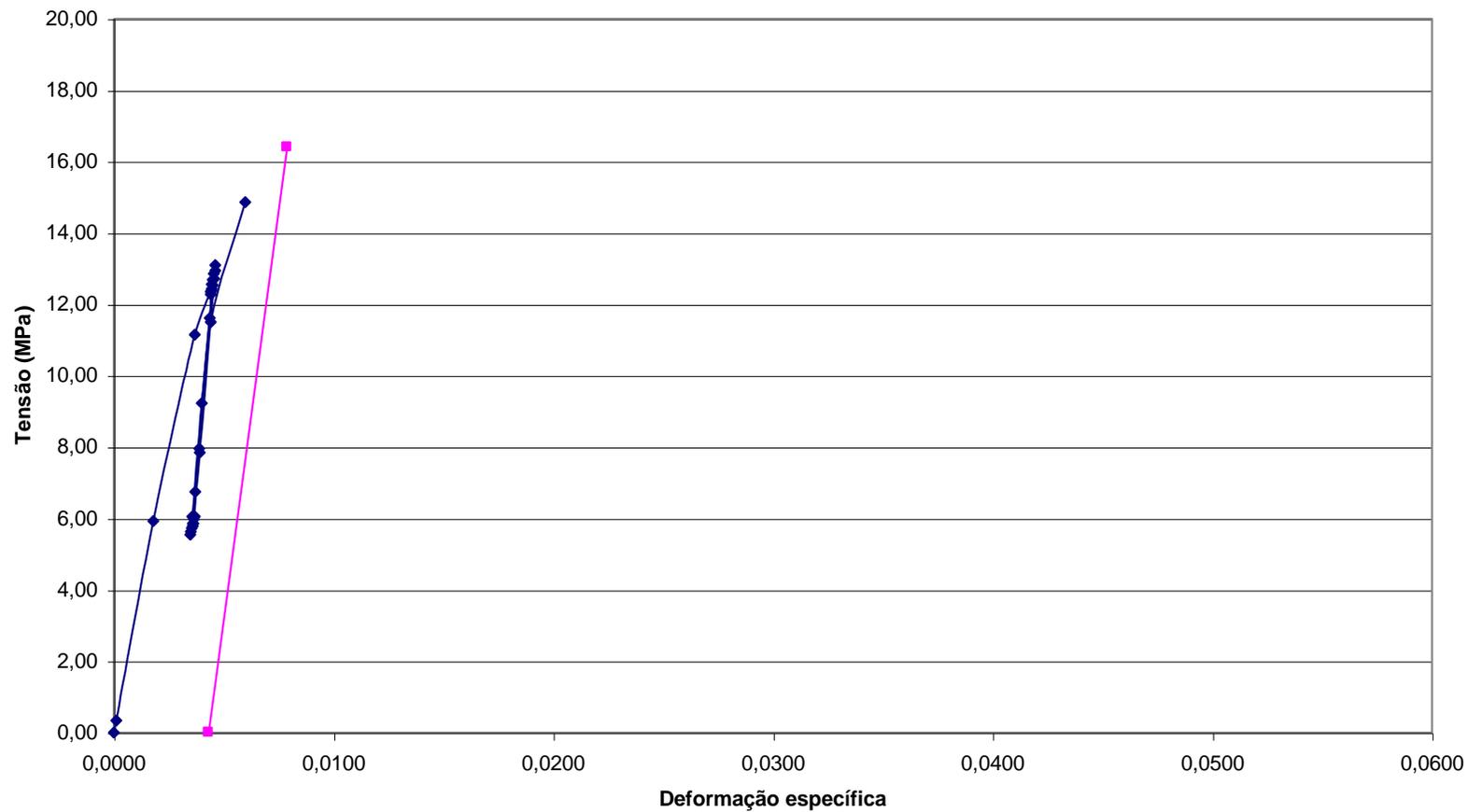


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIII de 1/2"

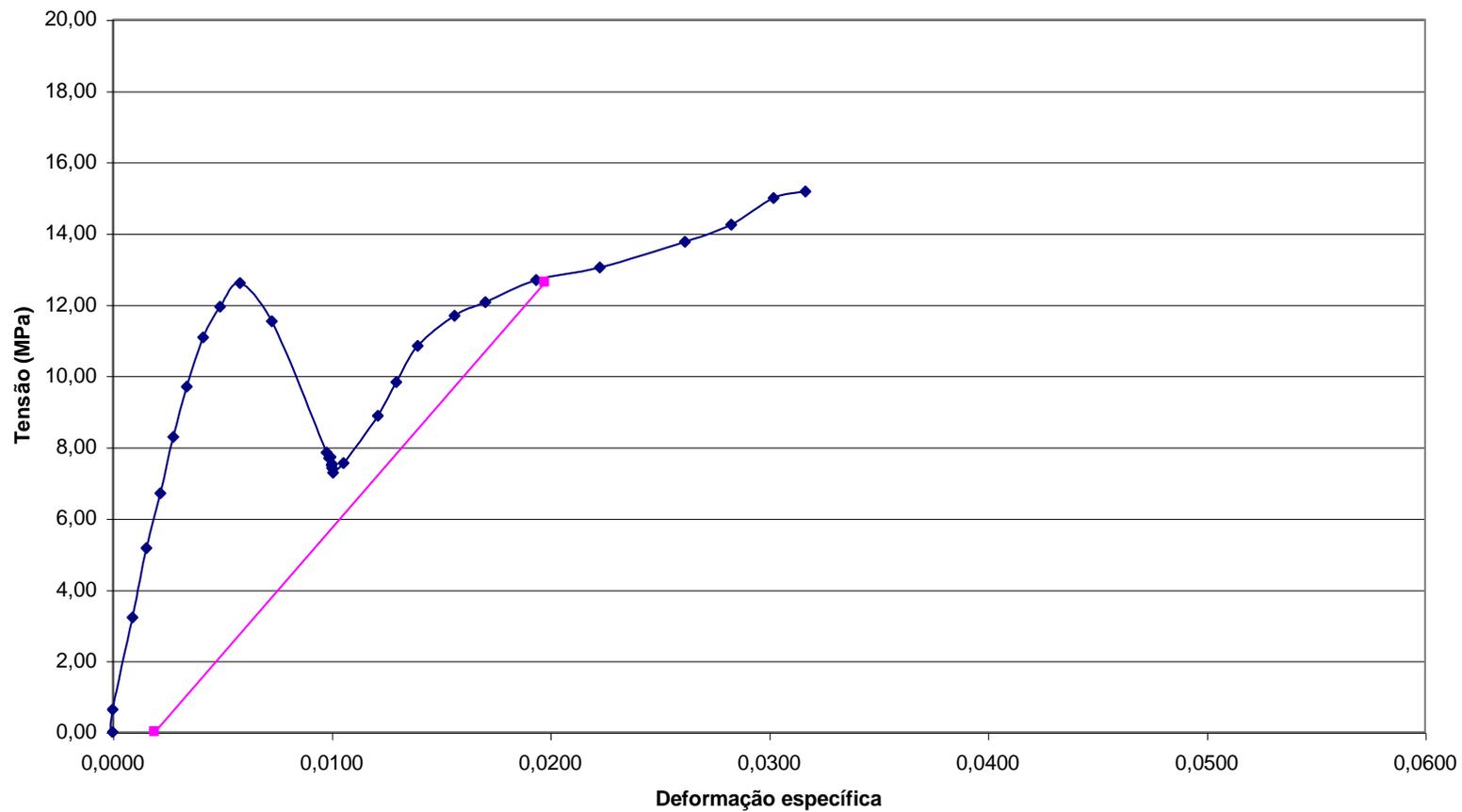


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIV de 1/2"

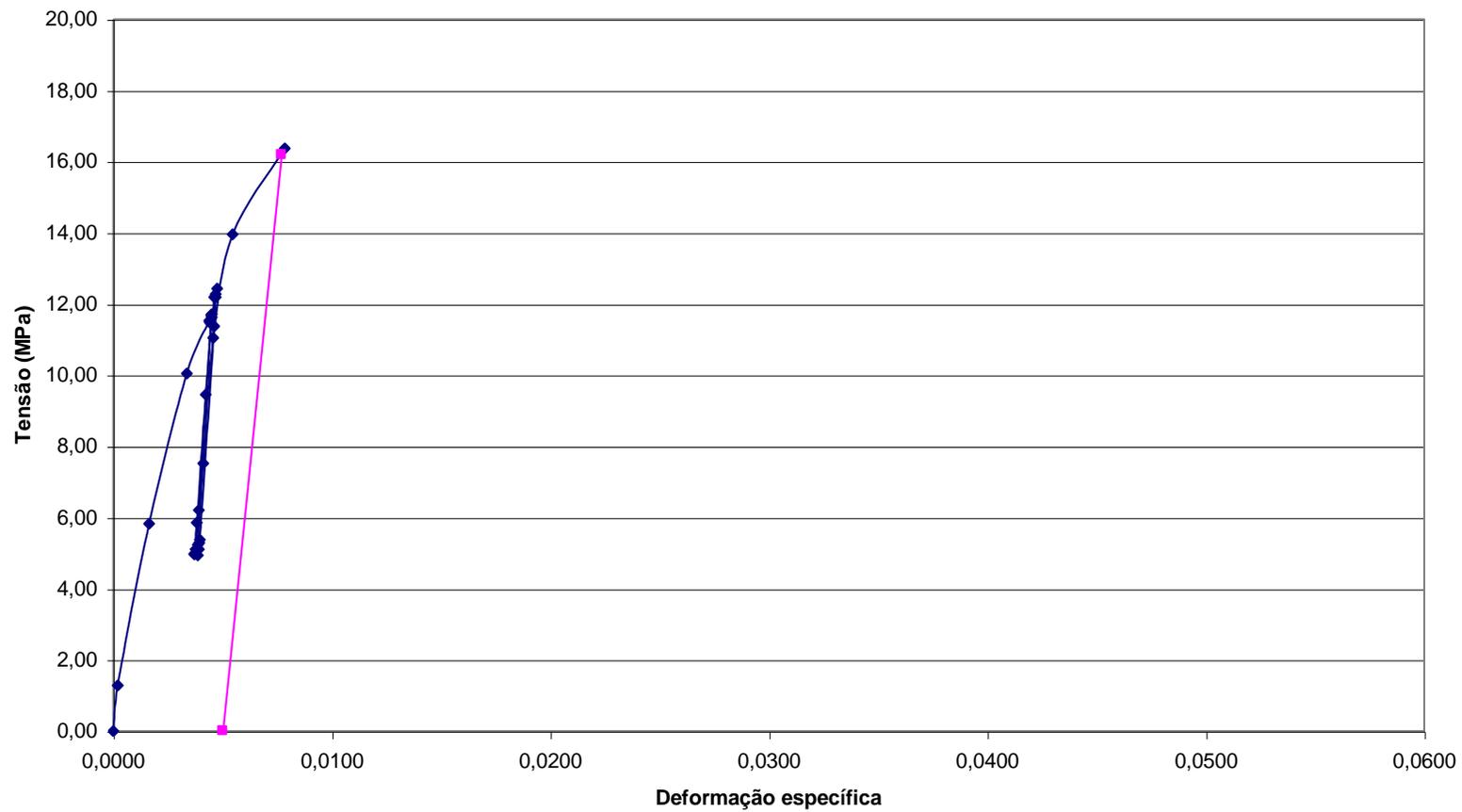


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPV de 1/2"

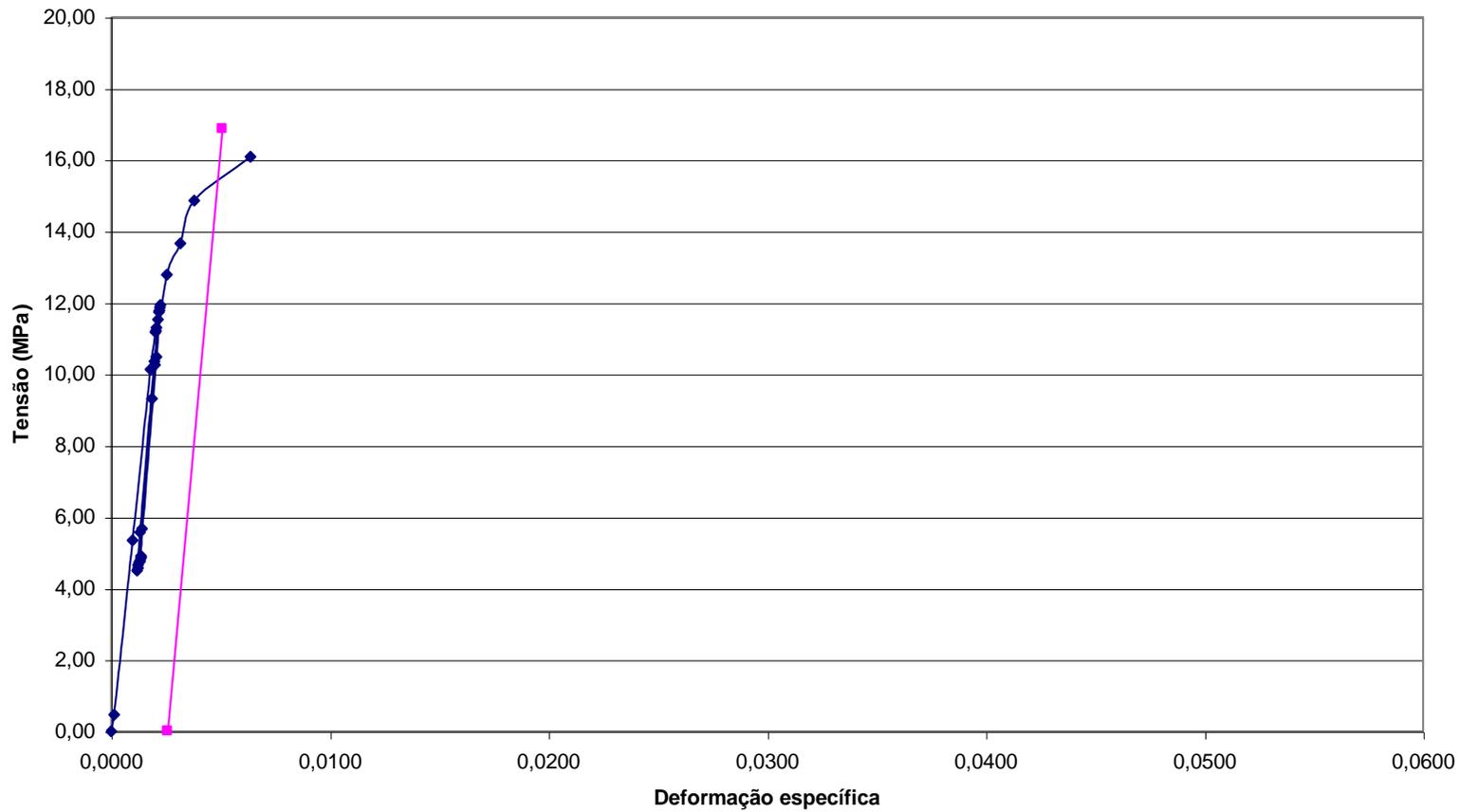
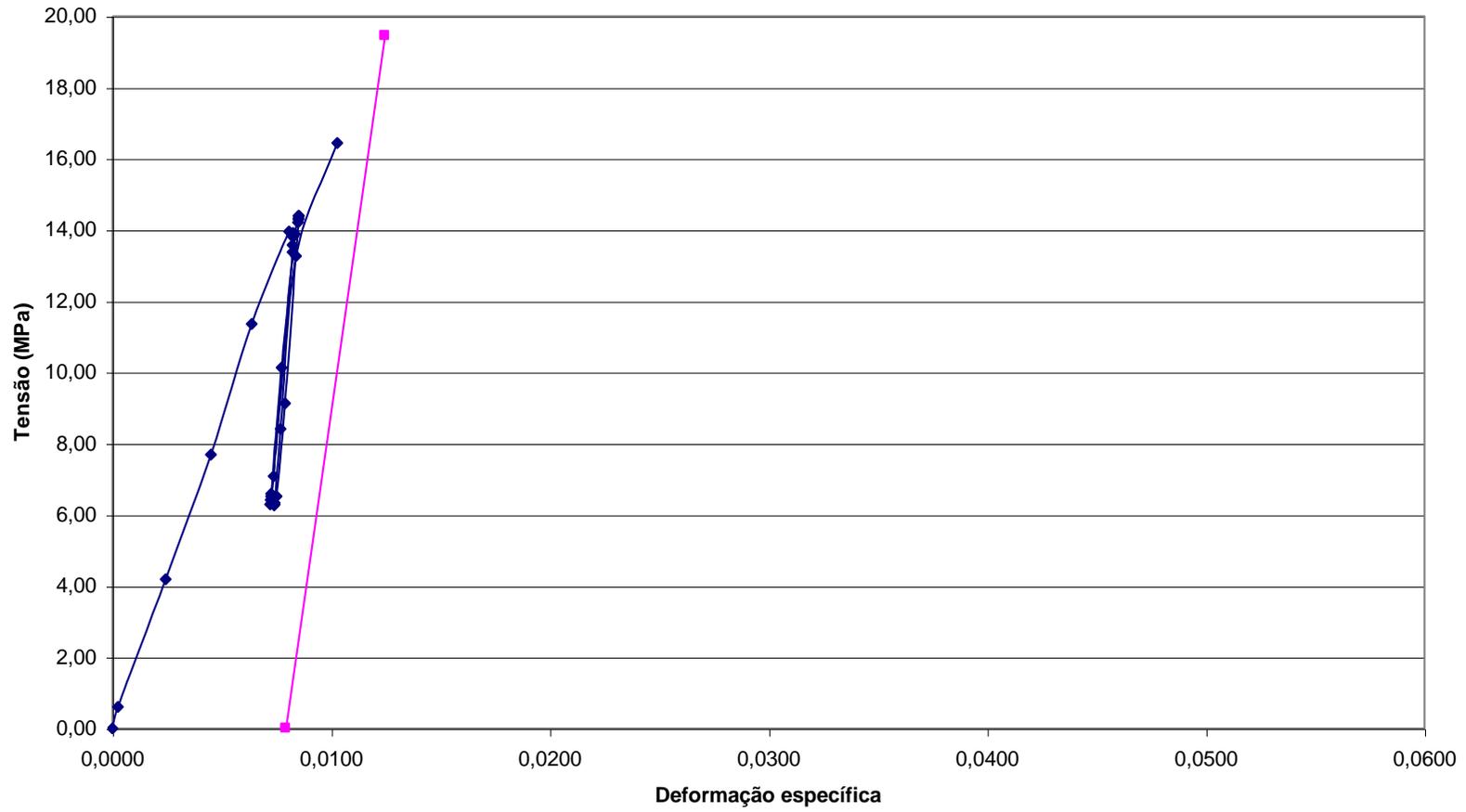


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPVI de 1/2"

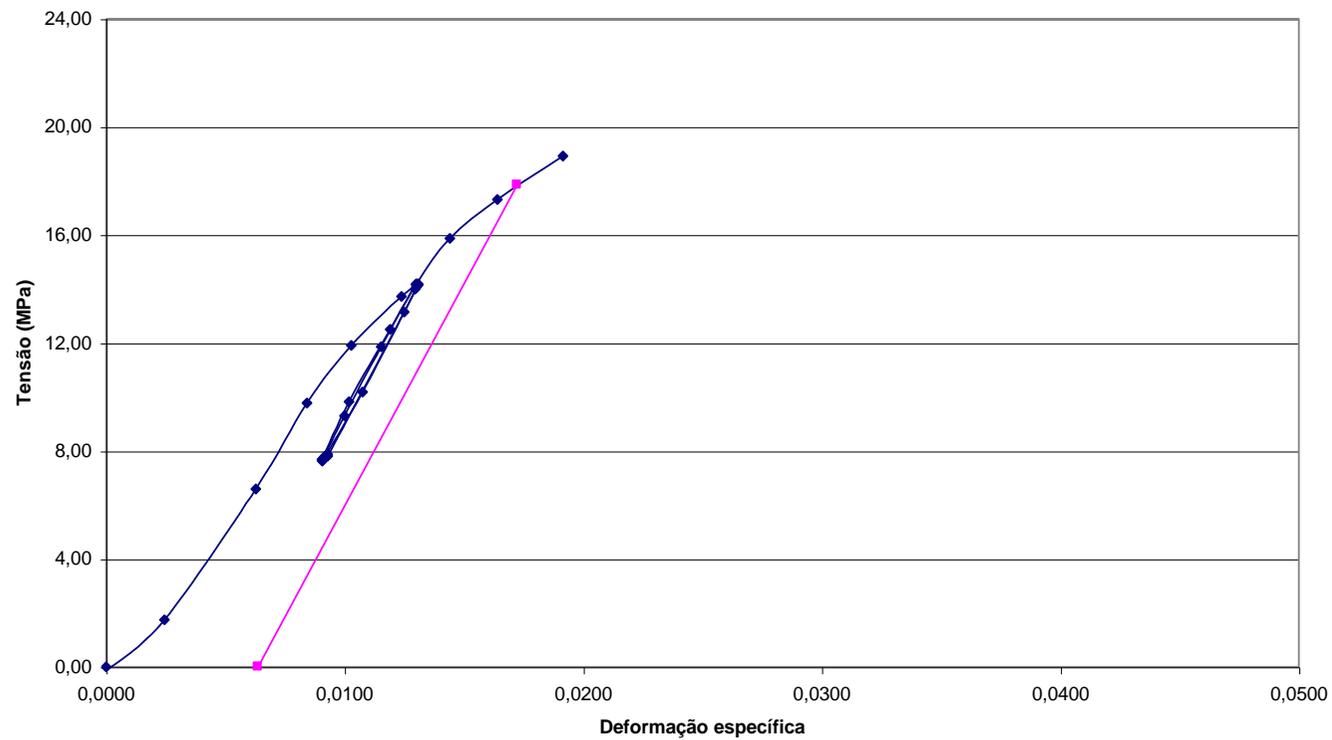


2 – Série B (tubos de 3/4 ”)

- **Embutimento normal às fibras**

CPI

**Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPI de 3/4"**



CPII

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPII de 3/4"

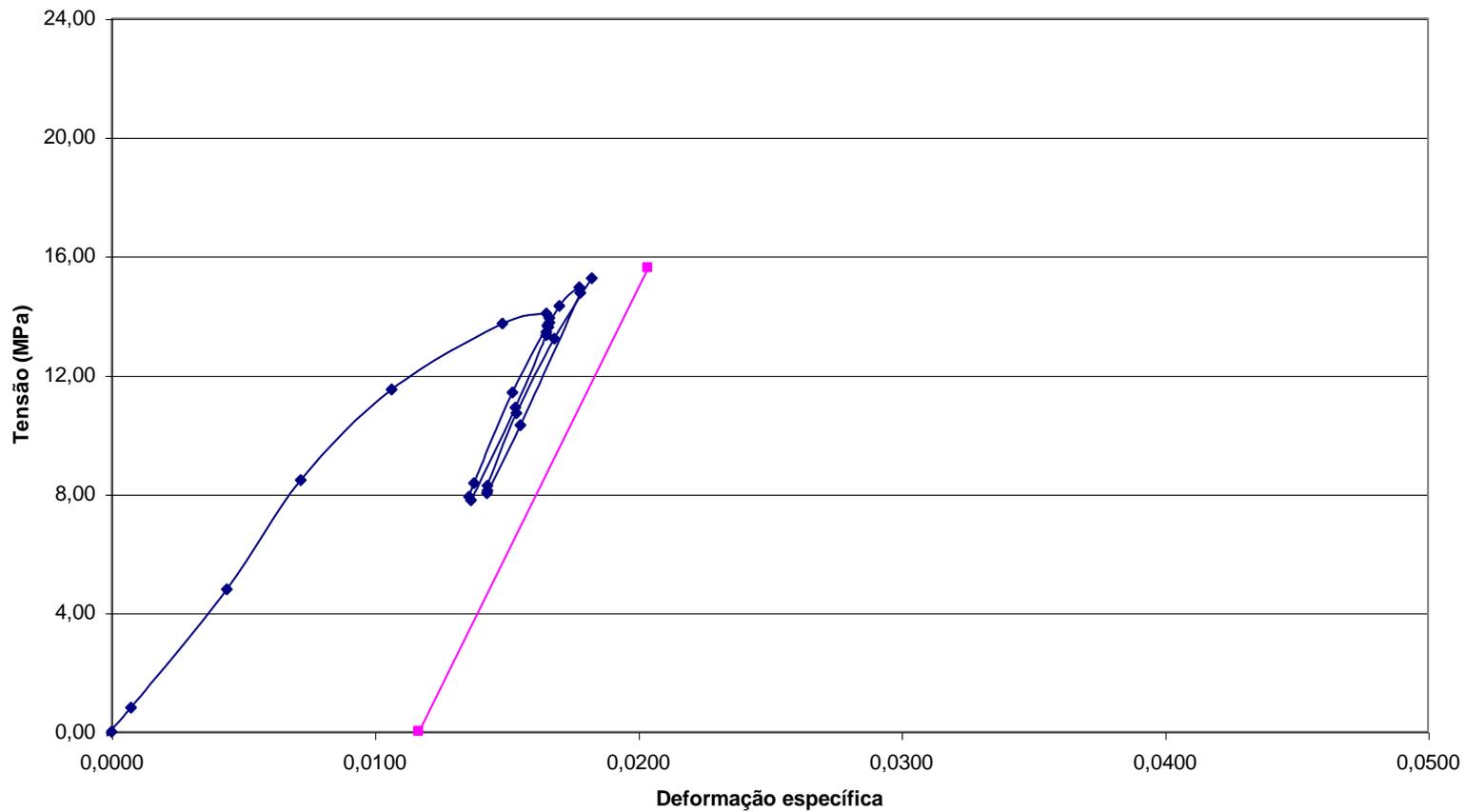


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIII de 3/4"

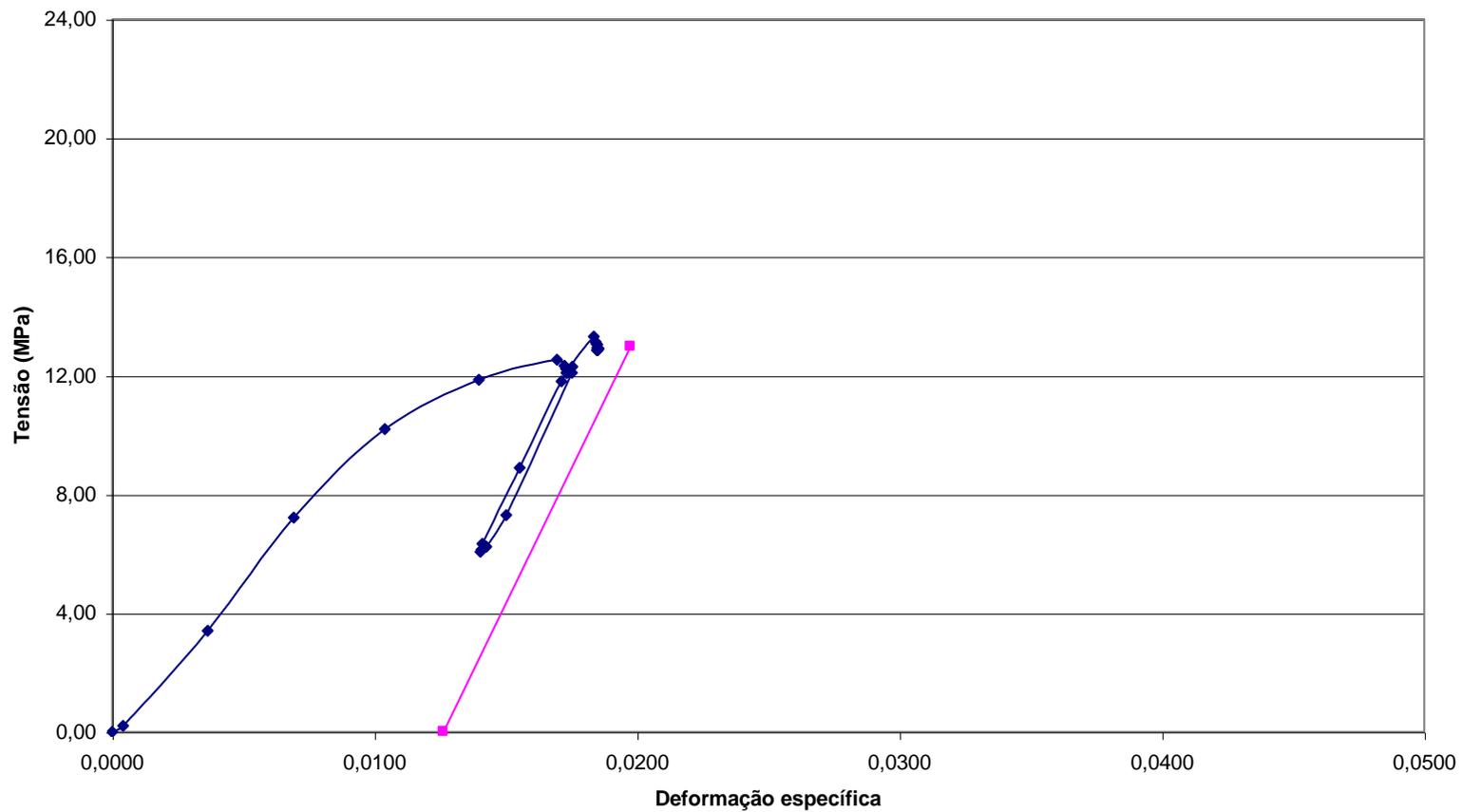


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIV de 3/4"

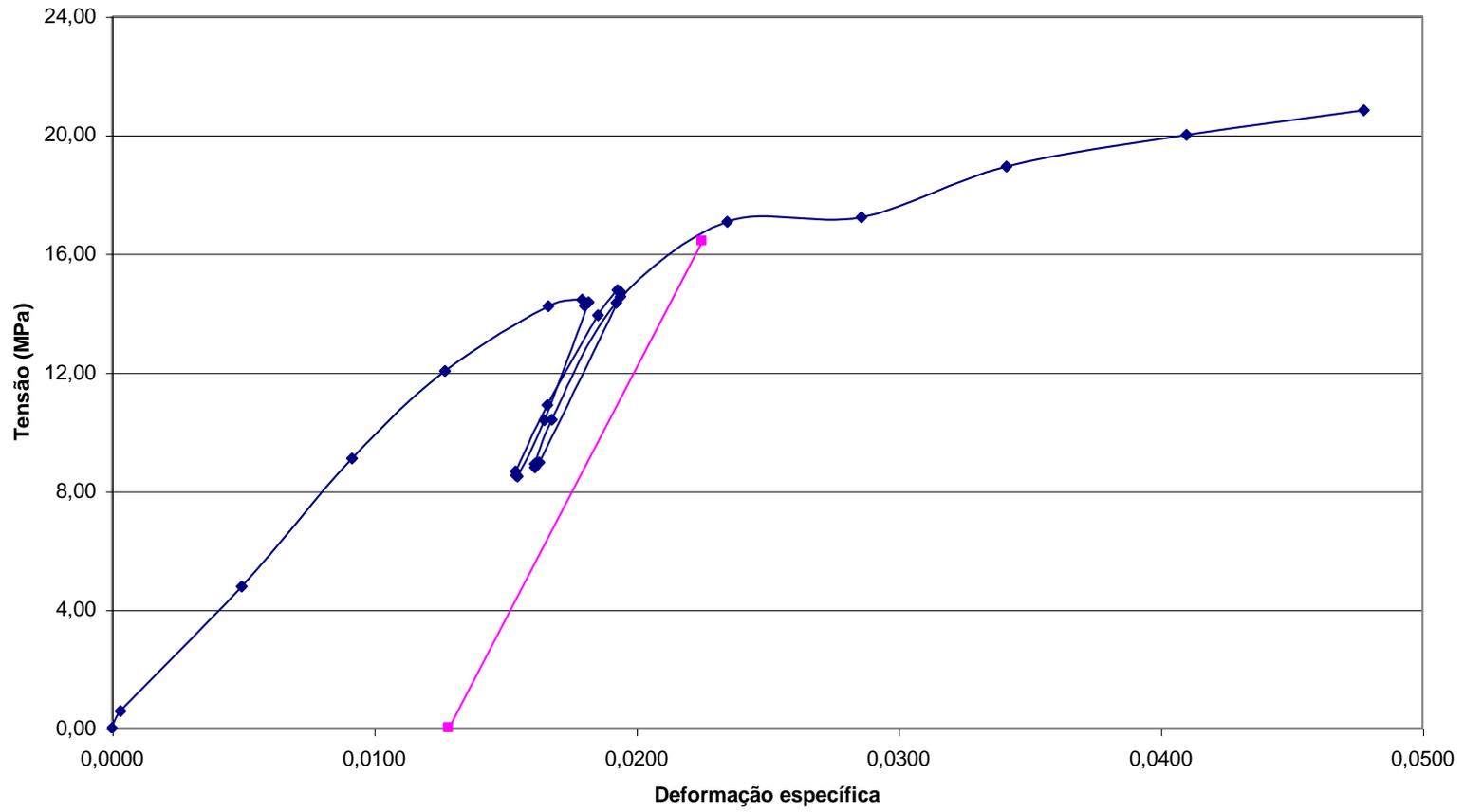


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPV de 3/4"

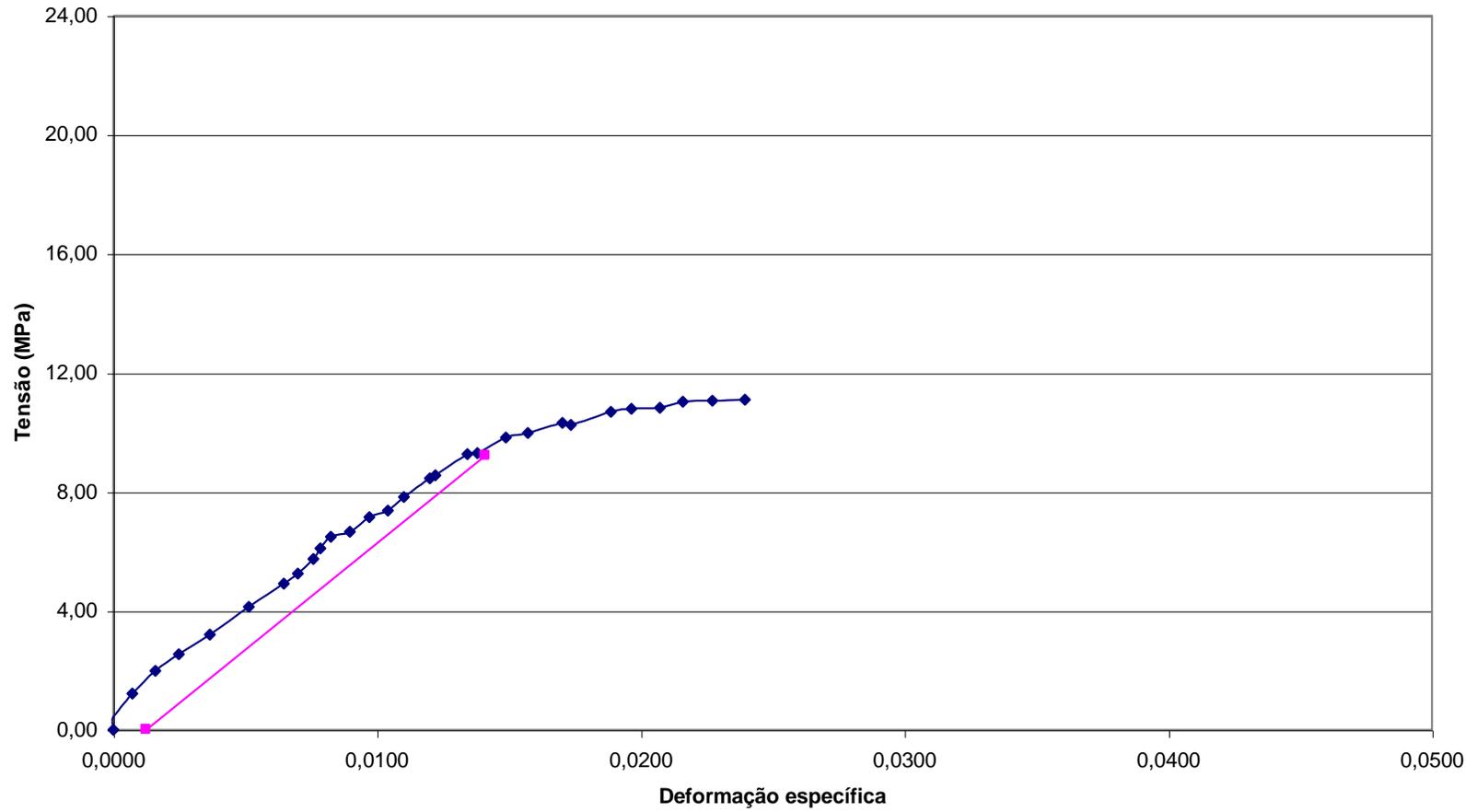
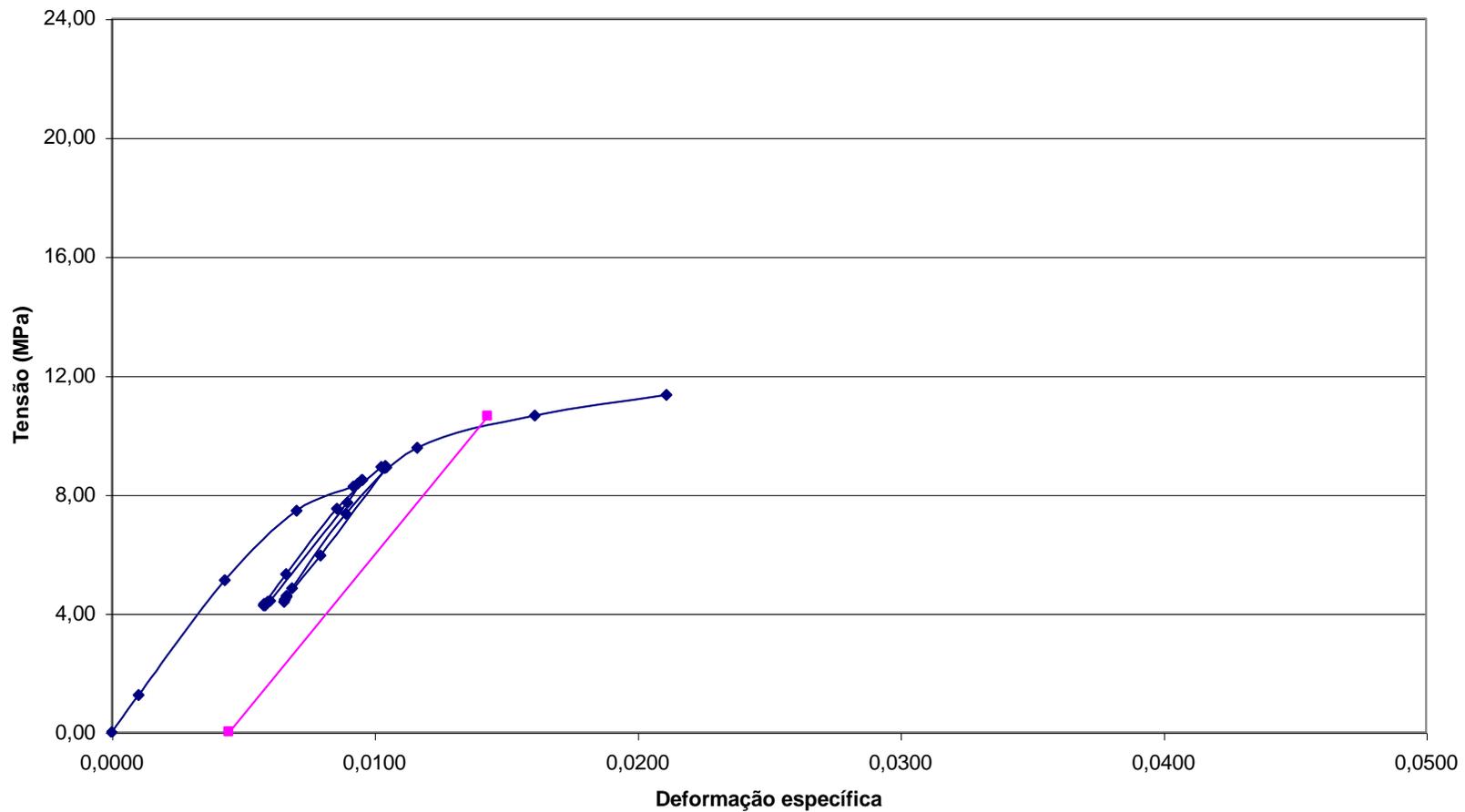


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPVI de 3/4"



- Embutimento paralelo às fibras

CPI

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 3/4"

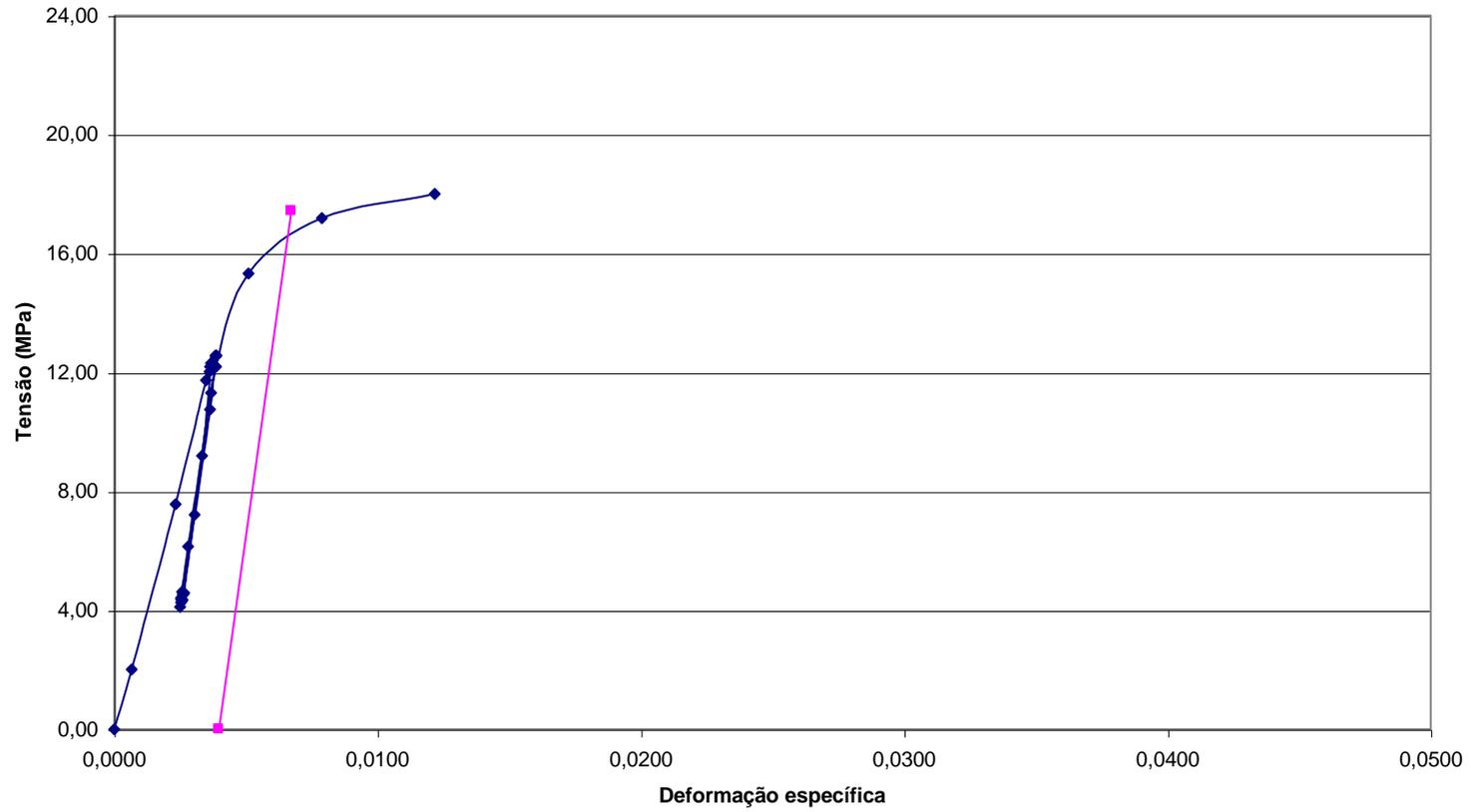


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPII de 3/4"

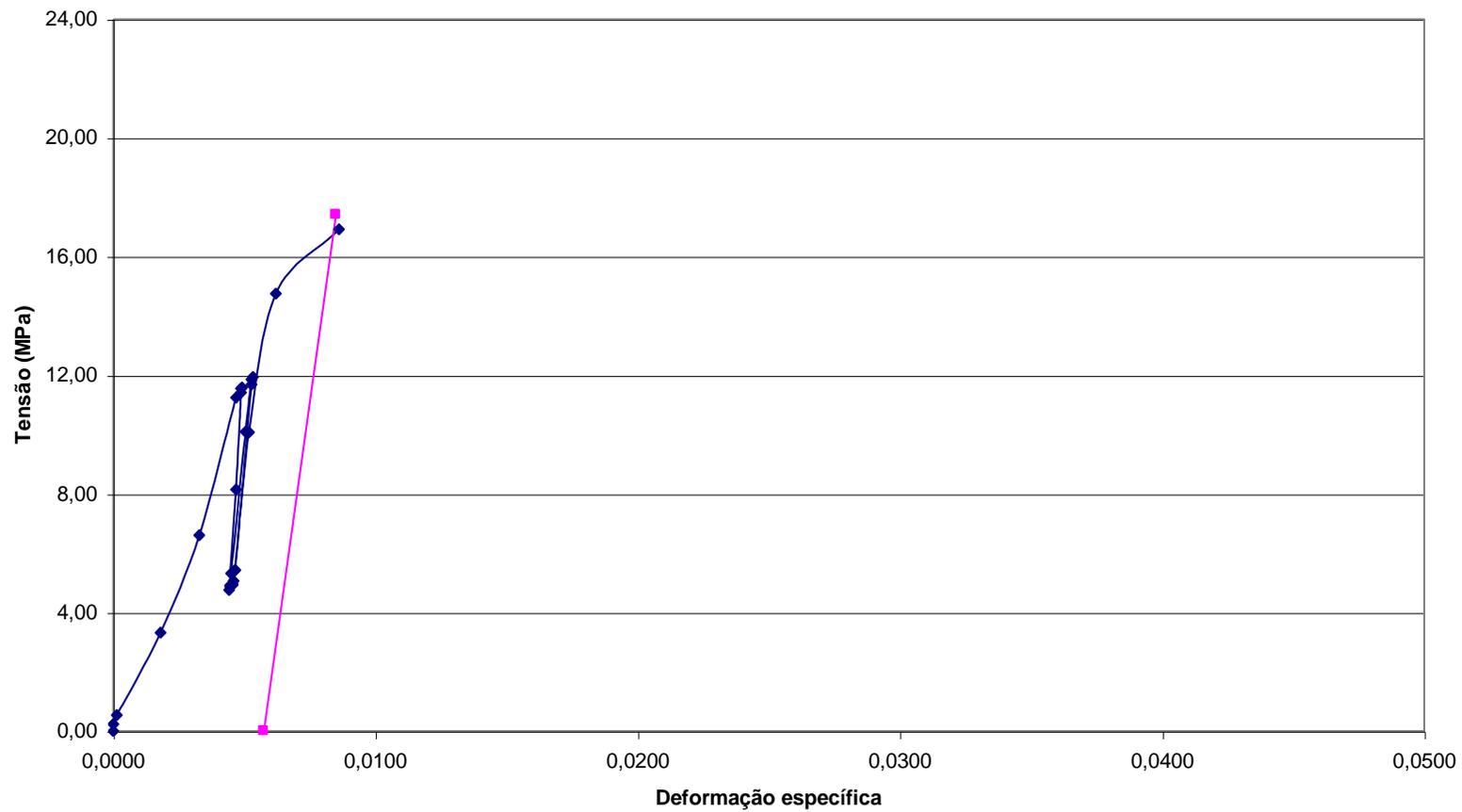


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIII de 3/4"

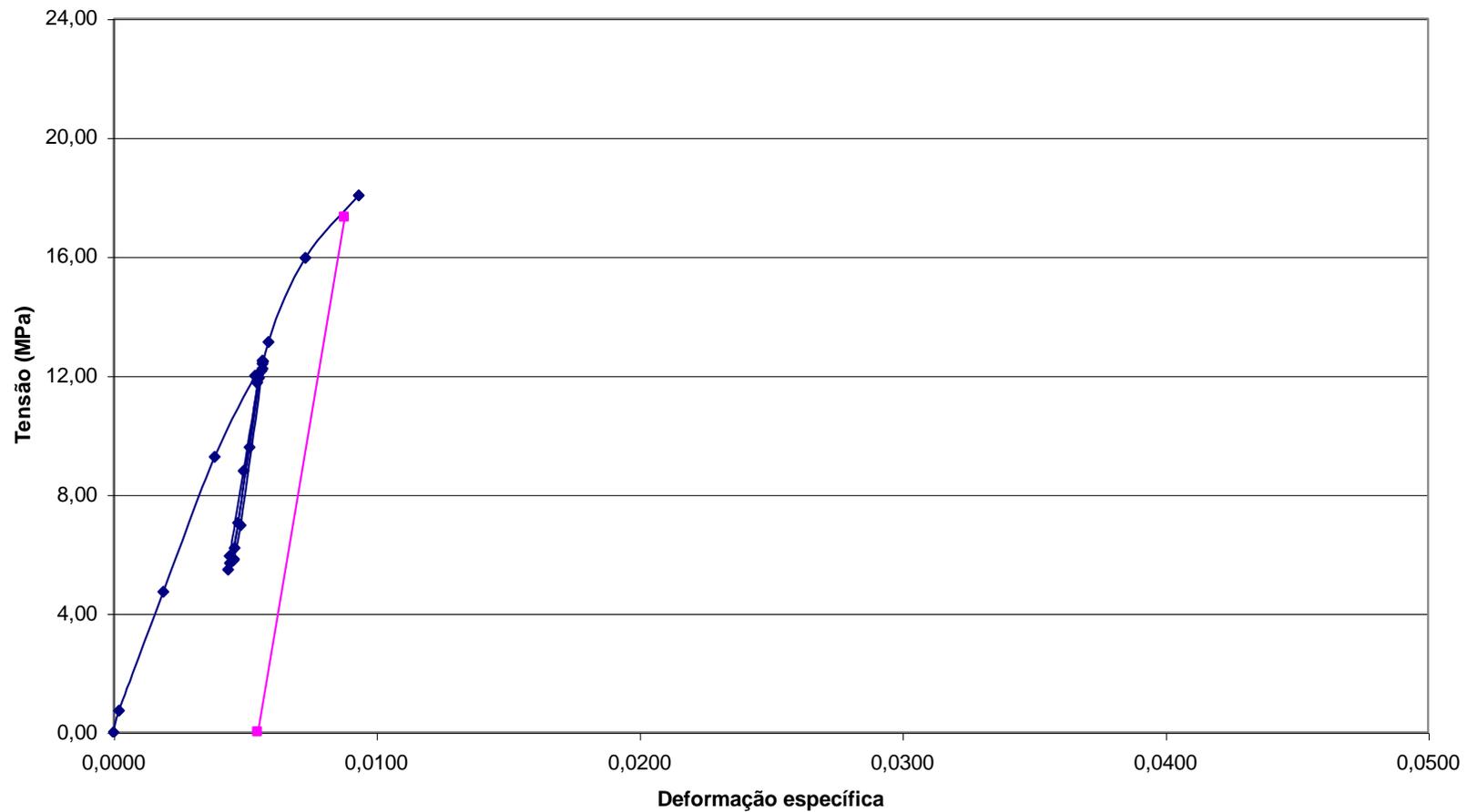


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIV de 3/4"

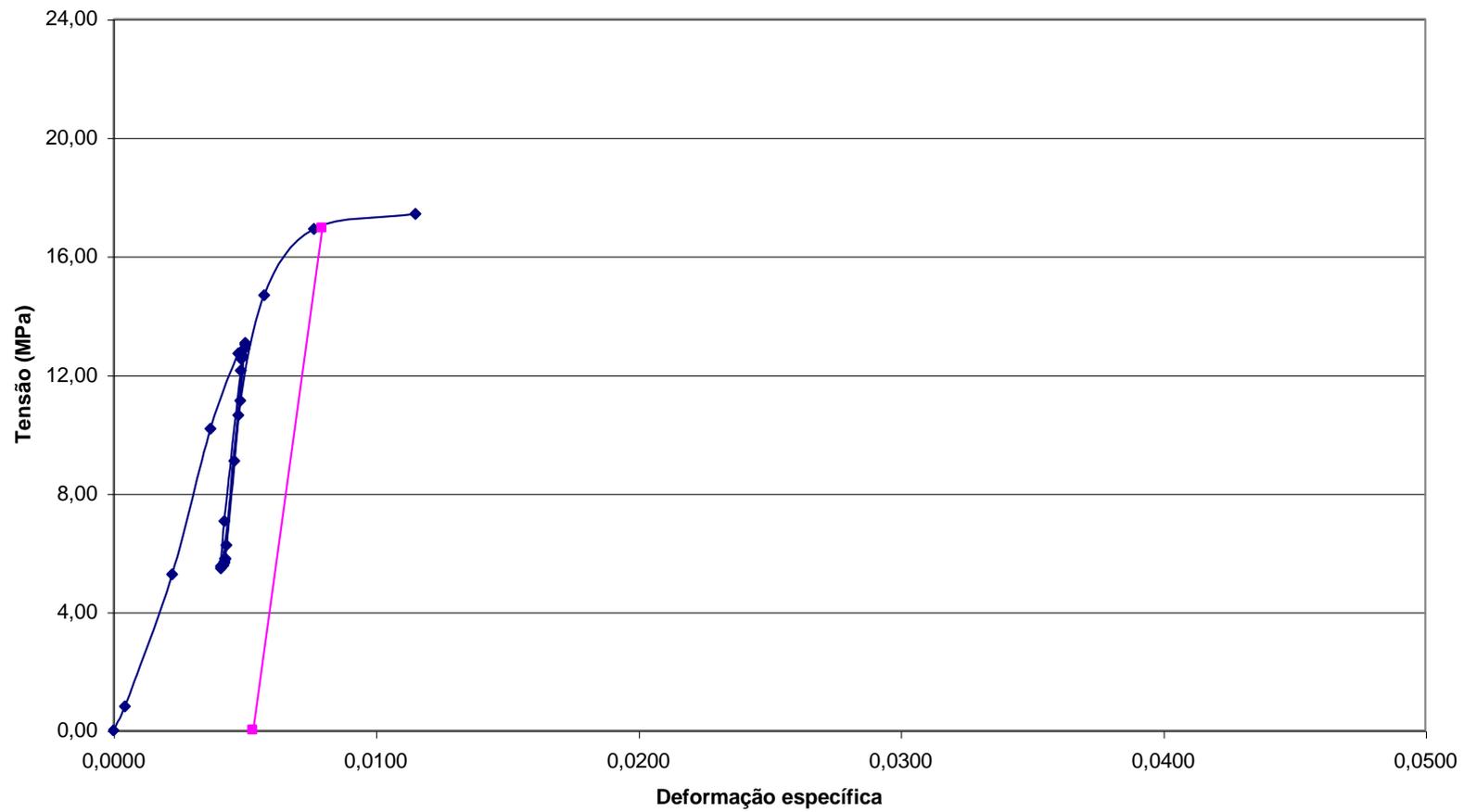


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPV de 3/4"

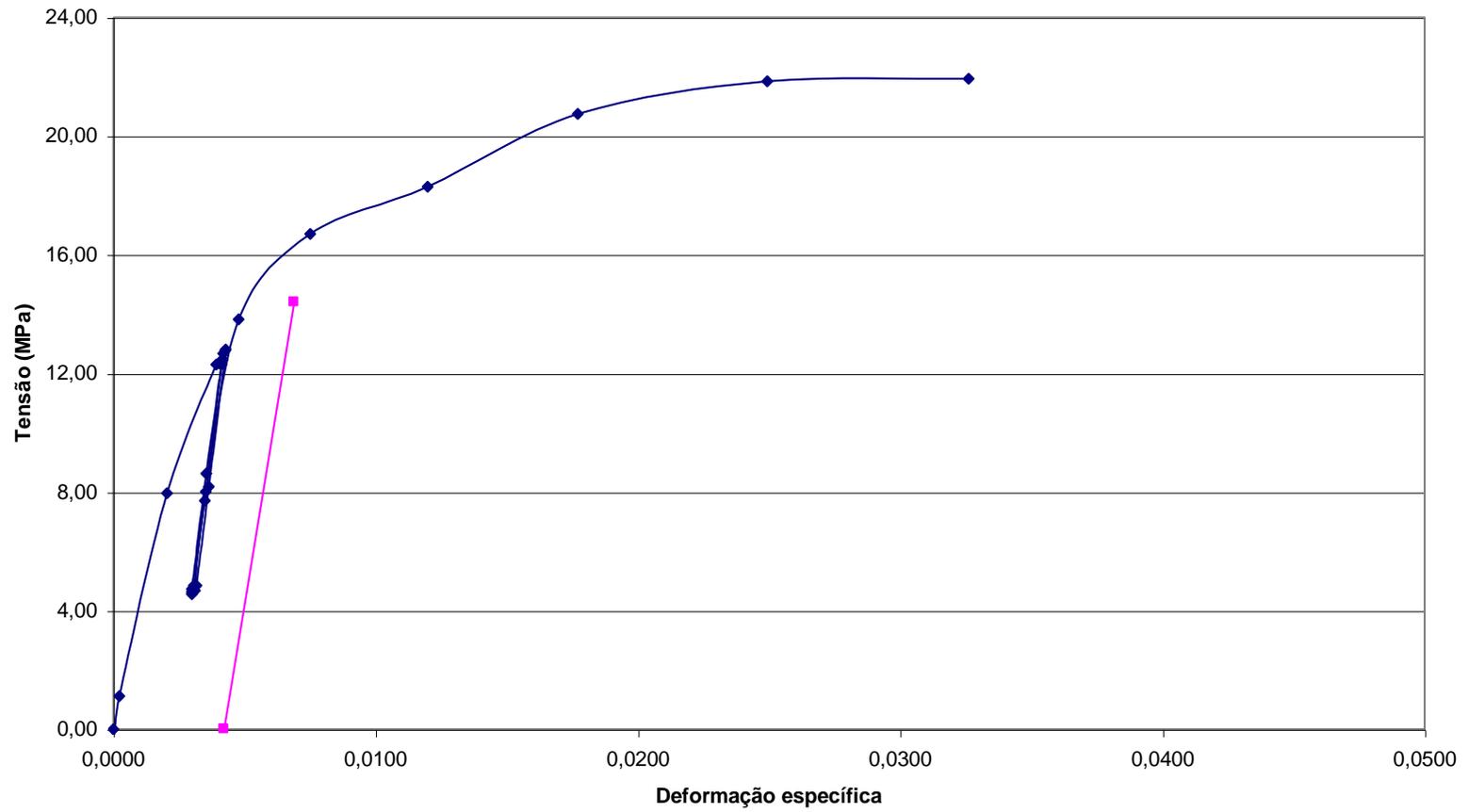
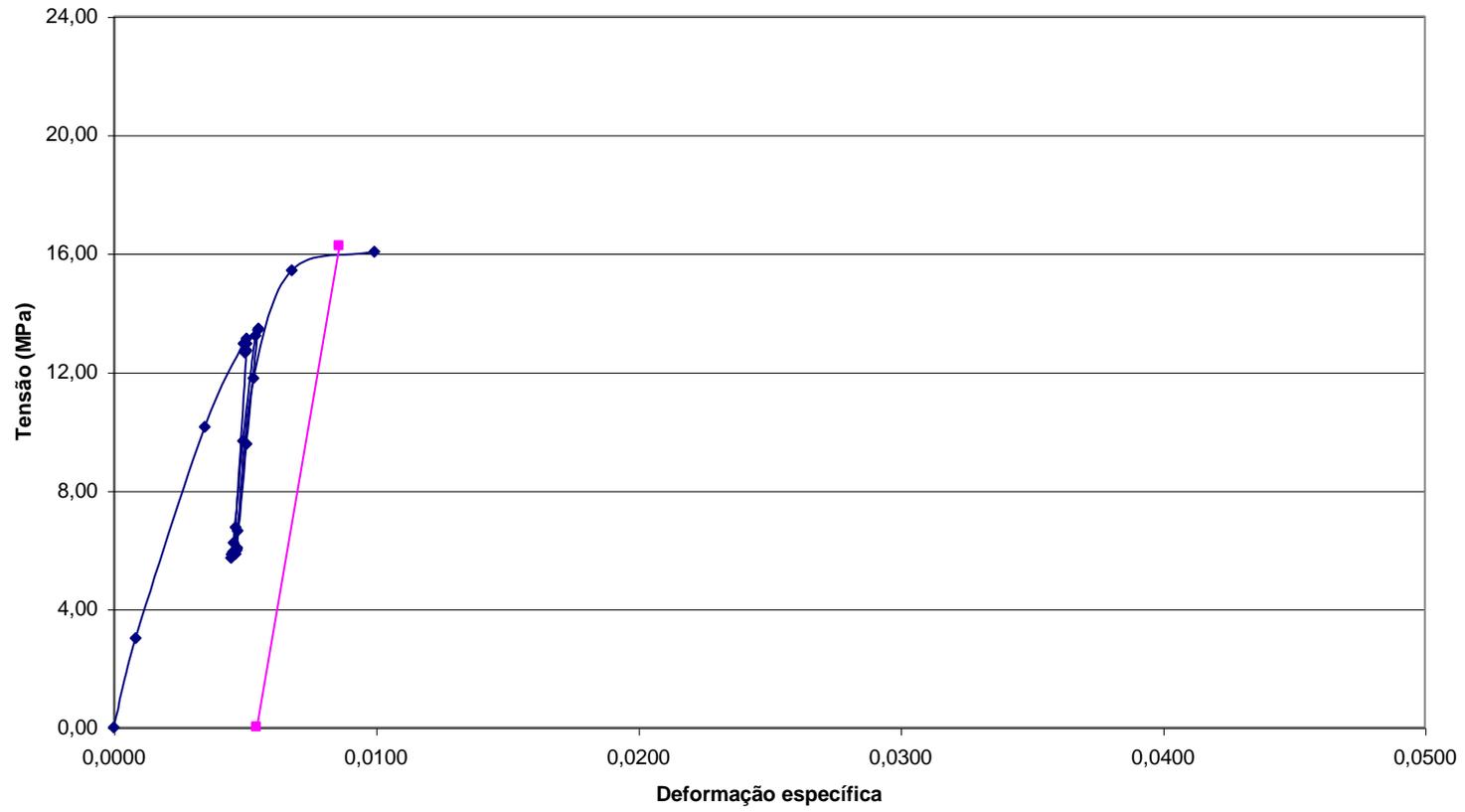


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPVI de 3/4"

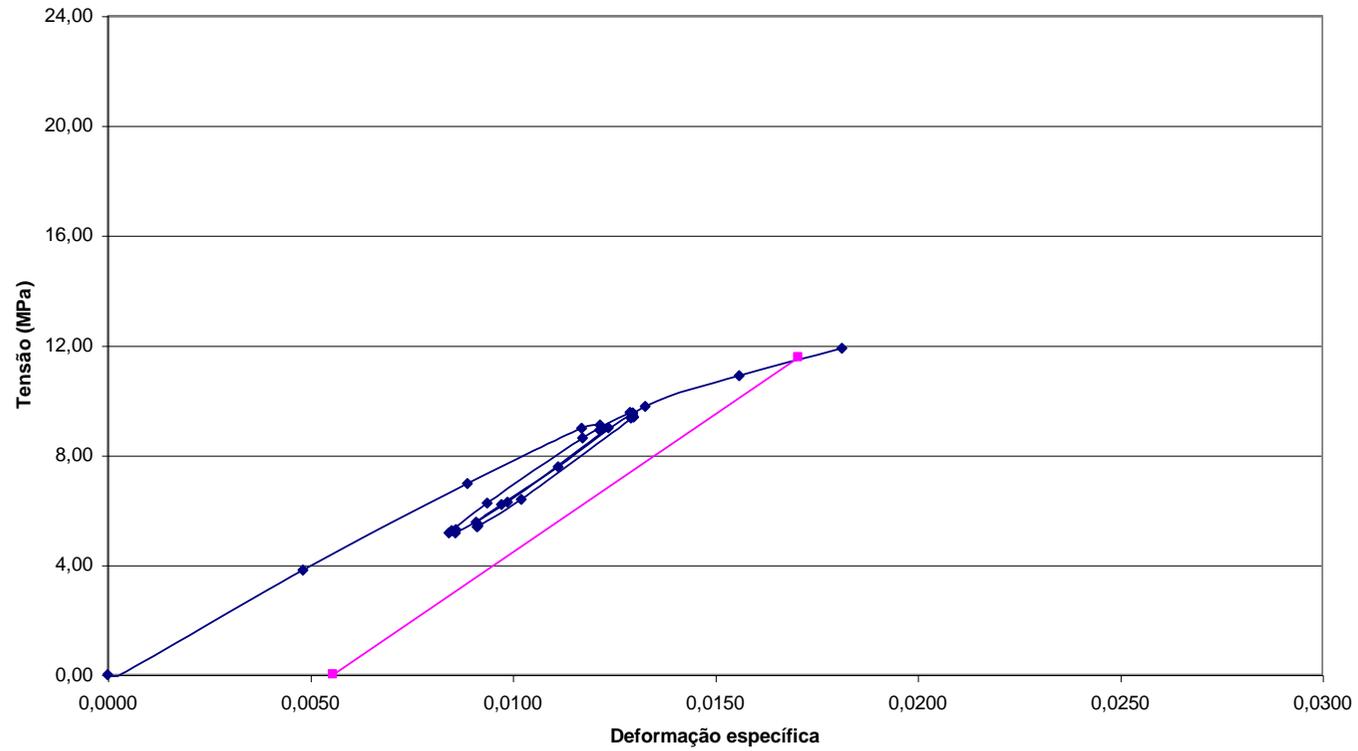


3 – Série C (tubos de 1 ”)

- Embutimento normal às fibras

CPI

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPI de 1"



CPII

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPII de 1"

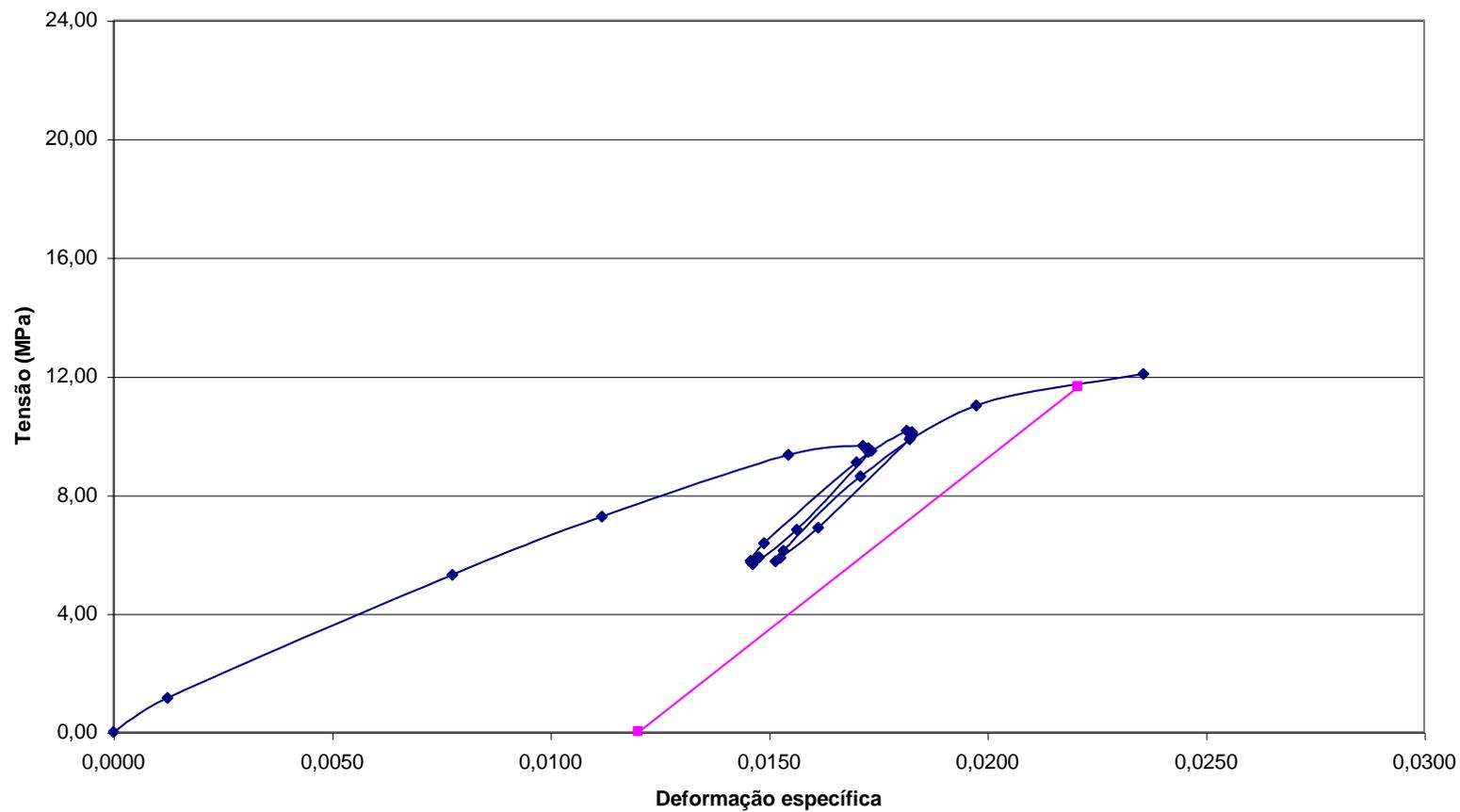


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIII de 1"

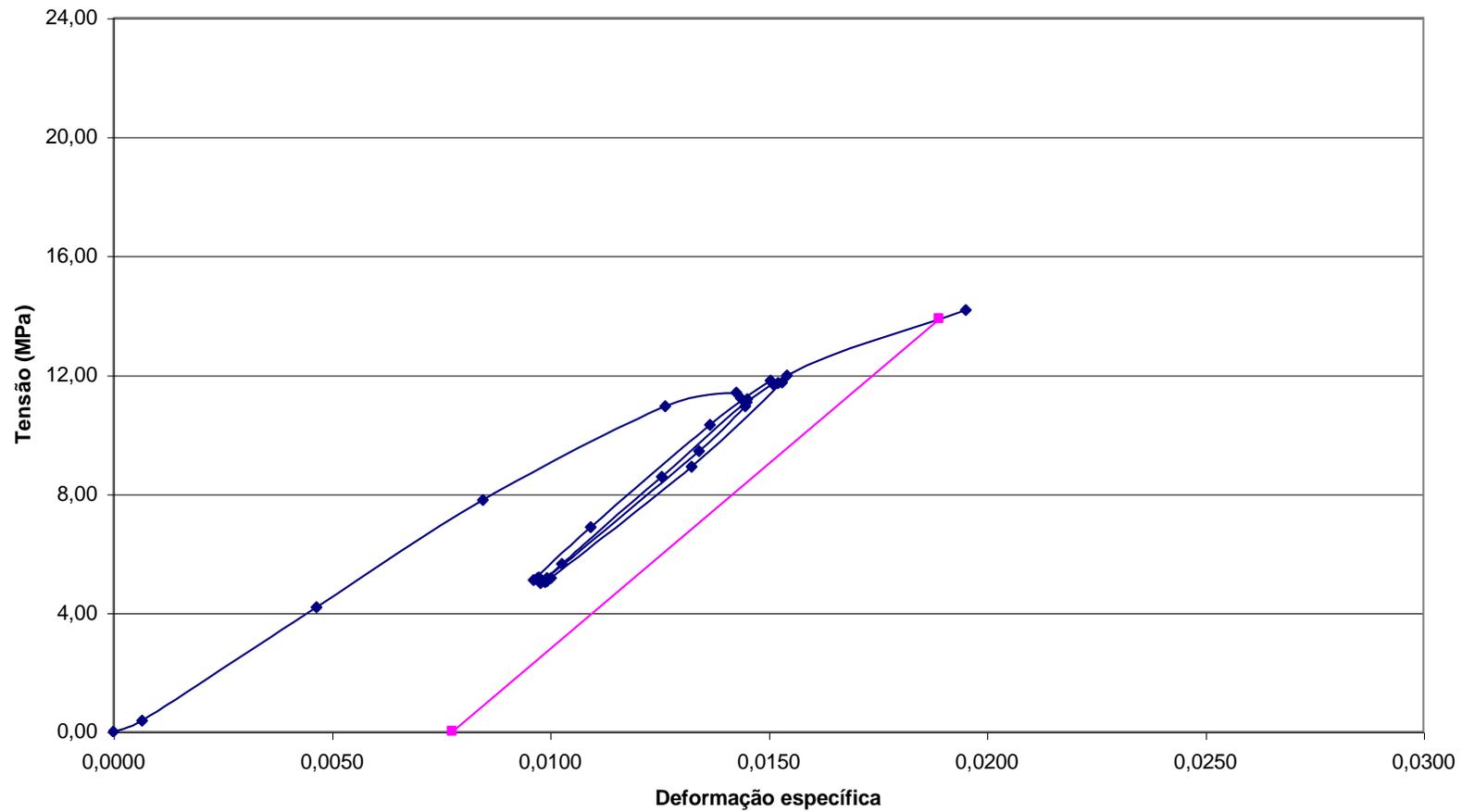


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPIV de 1"

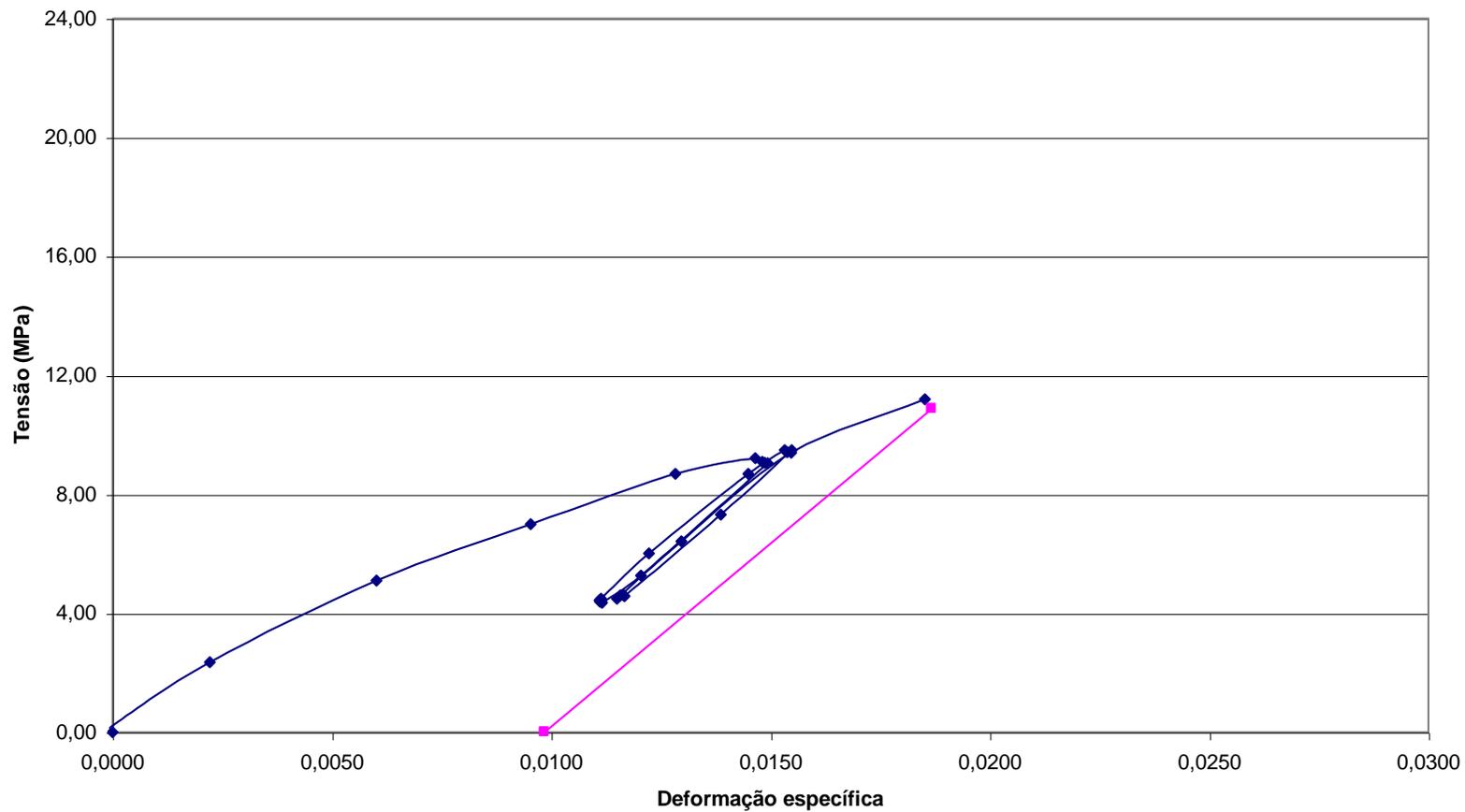


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPV de 1"

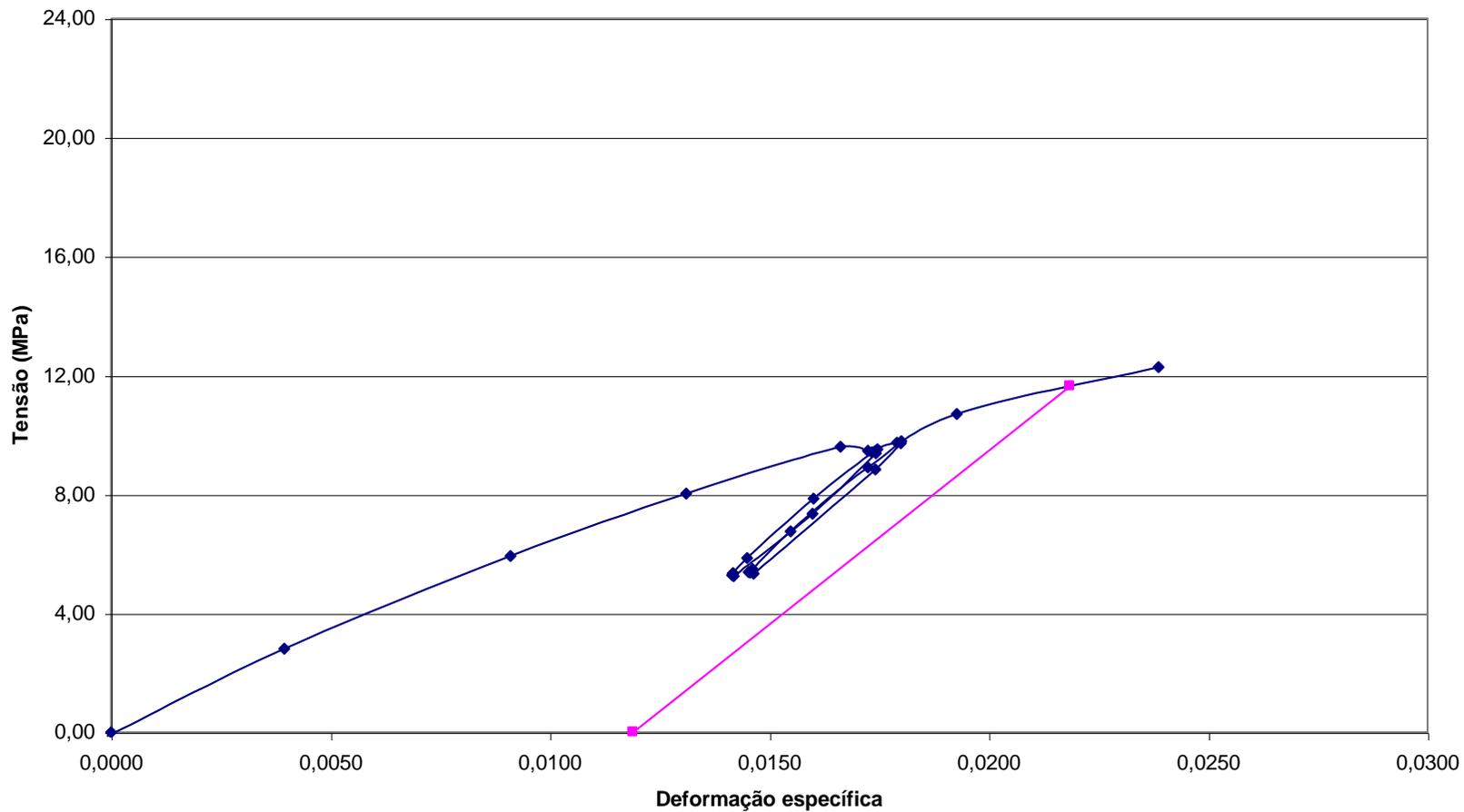
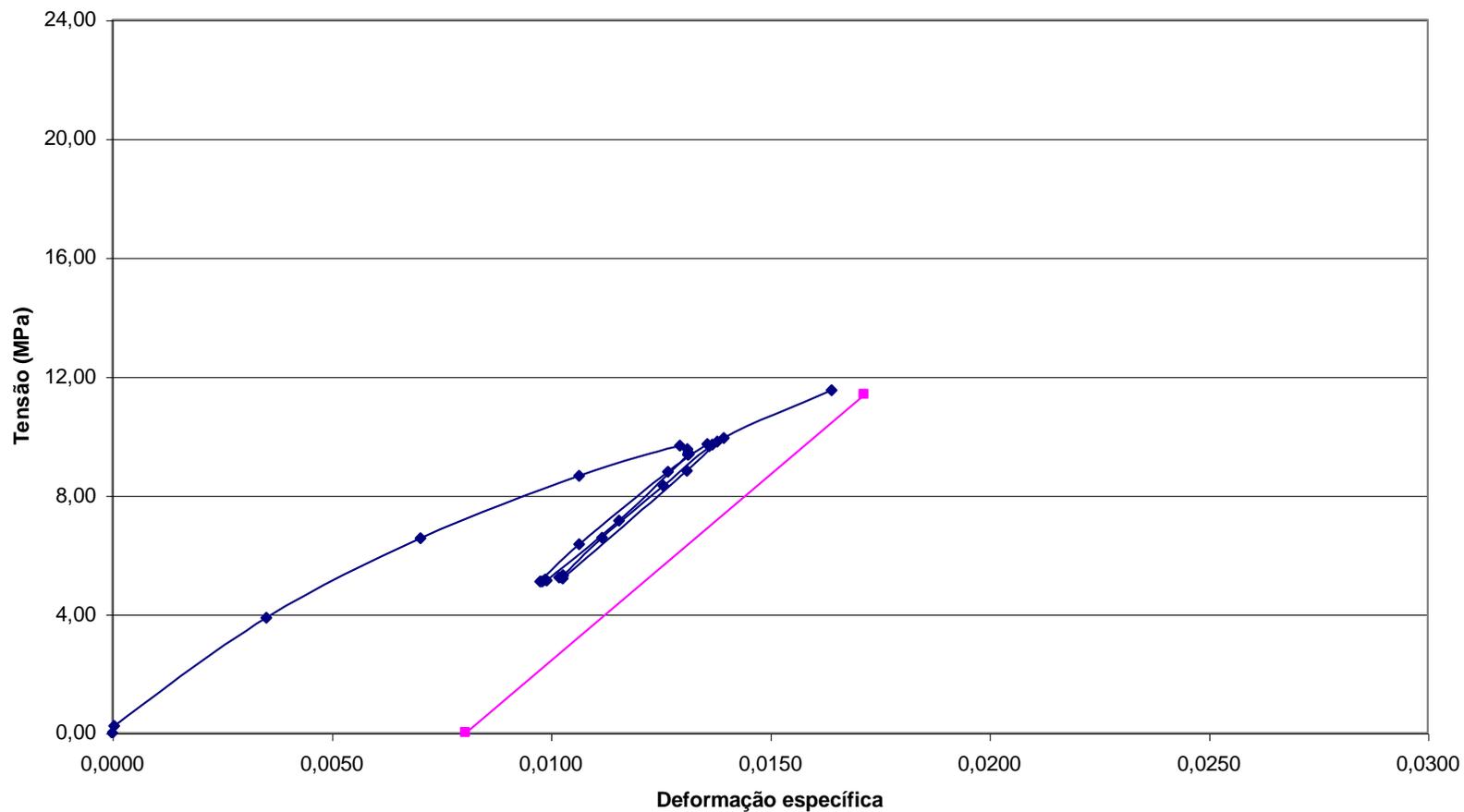


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento normal às fibras para o CPVI de 1"



- Embutimento paralelo às fibras

CPI

Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPI de 1"

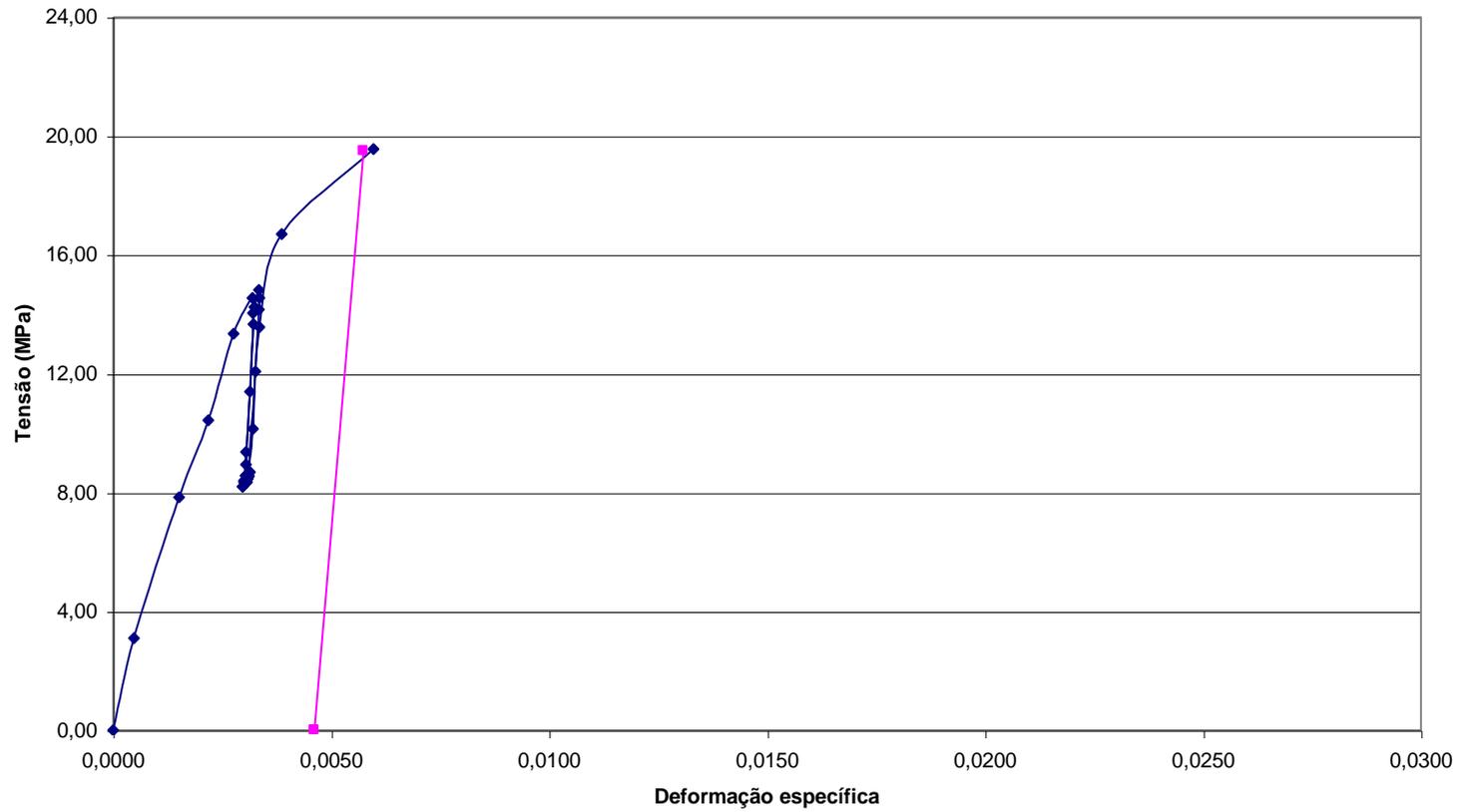


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPII de 1"

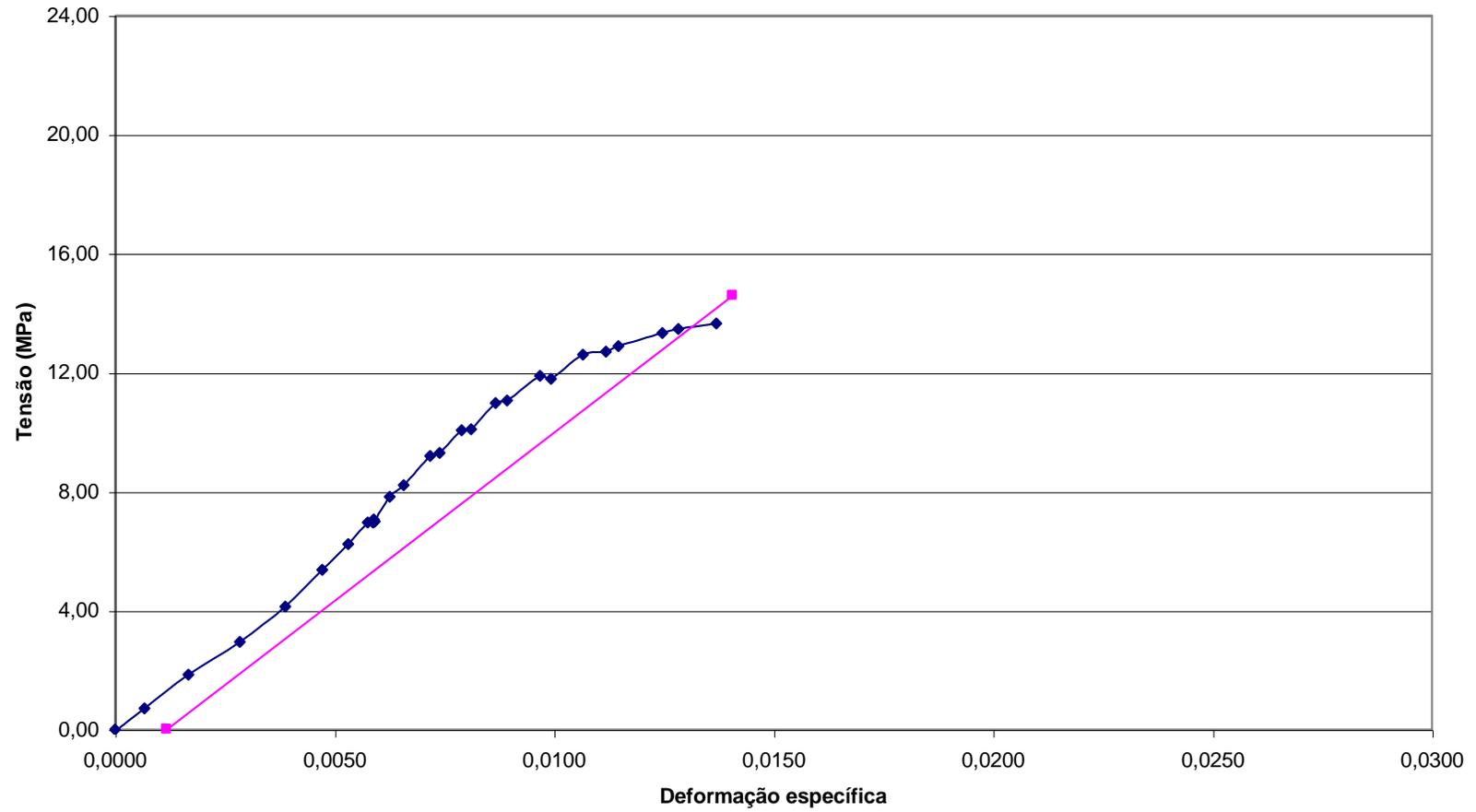


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIII de 1"

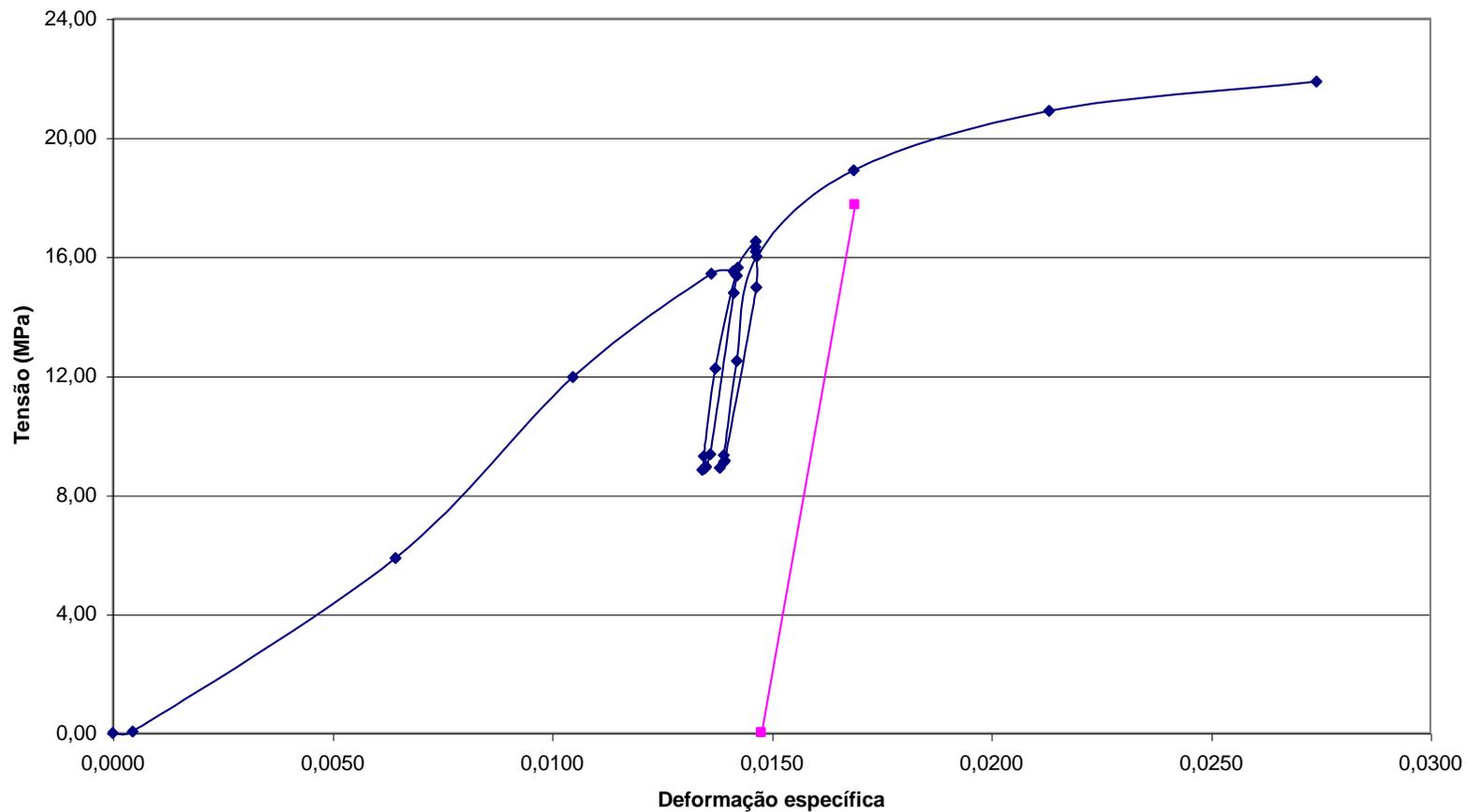


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPIV de 1"

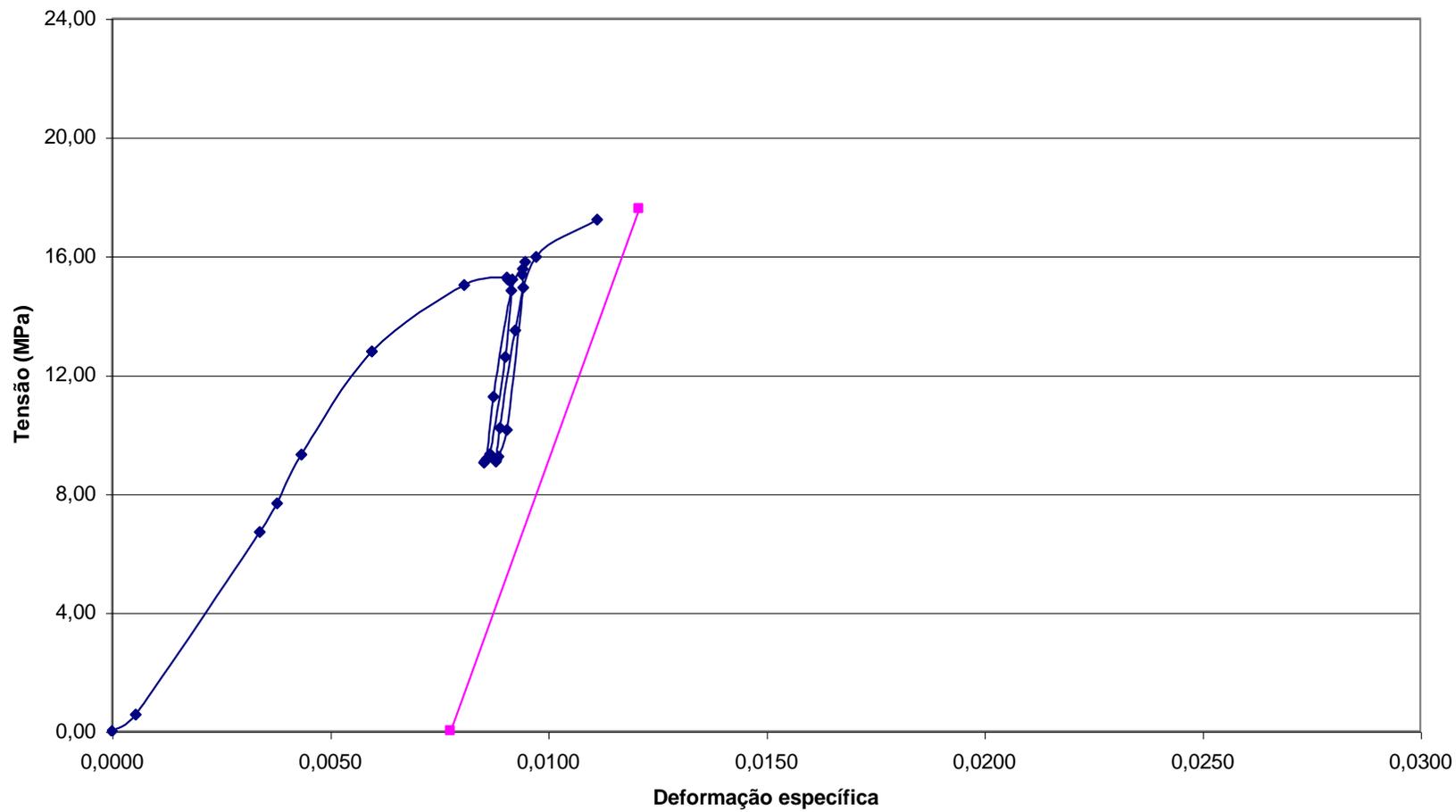


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPV de 1"

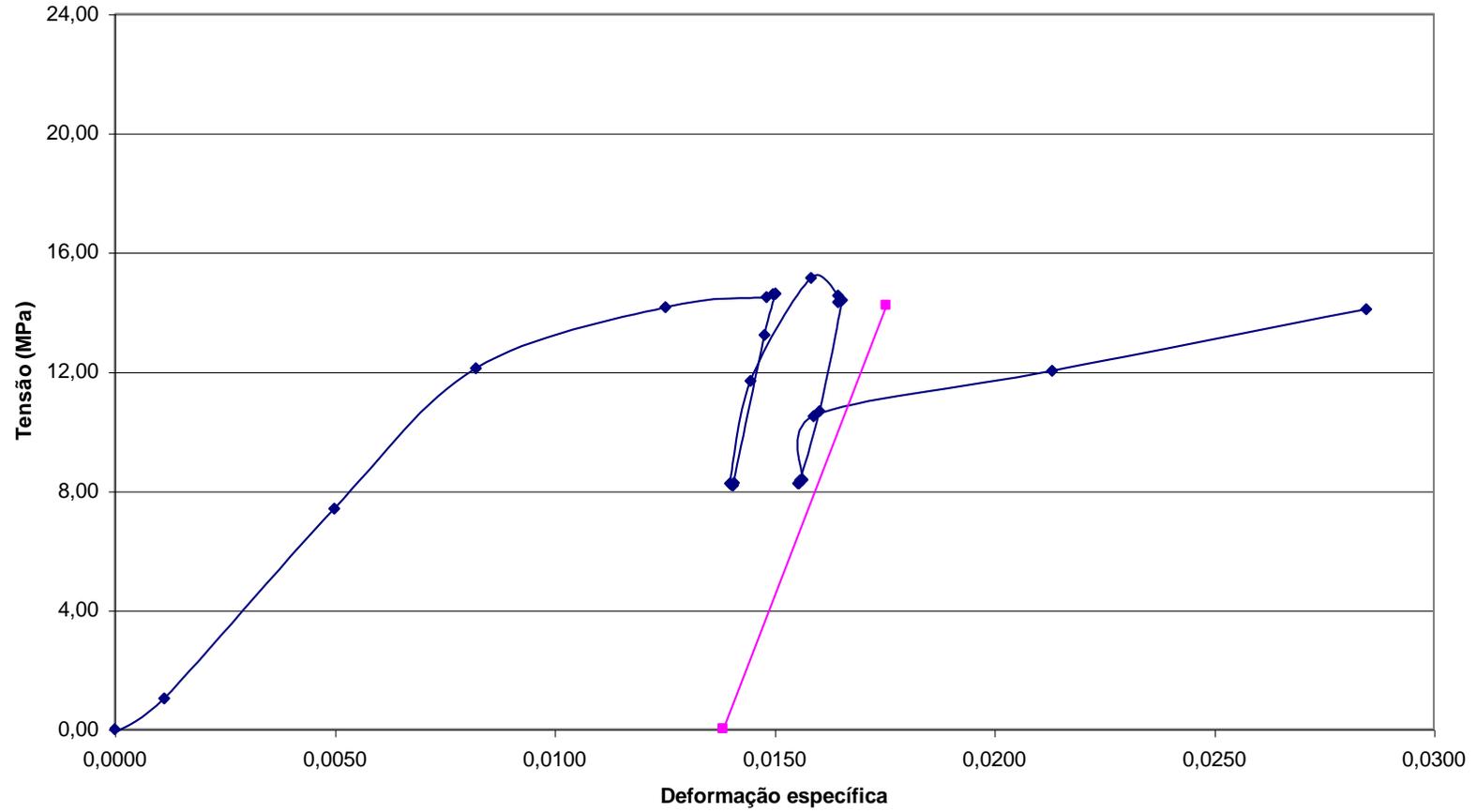


Gráfico tensão x deformação específica de embutimento paralelo às fibras para o CPVI de 1"

