

À minha esposa , Carla.

AGRADECIMENTOS

À todos que de alguma maneira proporcionaram, através de sua experiência, a realização deste trabalho, e em particular:

- ao Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, pelo apoio no decorrer de todo o curso de Mestrado e realização deste trabalho;
- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro;
- ao prof. Estevam, pela colaboração como orientador acadêmico;
- ao prof. Calixto, pela edição do software FLOOR, pelo acompanhamento e sugestões durante a realização do trabalho e amizade demonstrada;
- aos professores Elvio e Edgar, pelas sugestões e amizade demonstrada;
- à prof. Beth pela atenção e suporte oferecidos no Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC);
- aos estagiários Luiz, Wagner e Jério do LAMEC pelos esclarecimentos de dúvidas sobre os equipamentos e softwares;
- ao sr. Ataíde, pelo preparo das peças de madeira, dedicação e atenção demonstrada;
- ao Amilton e Geraldo pela colaboração na montagem das vigas e realização dos ensaios;
- à Gláucia, pela colaboração na montagem dos corpos-de-prova e realização dos ensaios;
- à minha esposa, pela confecção dos desenhos e incentivo à realização deste trabalho;

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

ao prof. Dr. Eduardo Chahud, meus sinceros agradecimentos pela grande receptividade para a realização de um trabalho, pelo apoio incondicional demonstrado ao longo do desenvolvimento desta pesquisa e pelo seu entusiasmo após os resultados.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Generalidades	1
1.2 - Objetivos do trabalho	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - Introdução	3
2.2 - Comportamento da Madeira à Solicitações Mecânicas	4
2.3 - Elemento de Ligação	15
2.4 - Normalização	17
CAPÍTULO 3 - COMPOSIÇÃO DAS VIGAS DE SEÇÃO T	
3.1 - Equipamentos	27
3.2 - Peças Estruturais das Vigas de Madeira	28
3.3 - Elemento de Ligação	30
3.4 - Montagem das Vigas Compostas	31
CAPÍTULO 4 - ENSAIOS PRELIMINARES	
4.1 - Determinação do Módulo de Elasticidade Longitudinal das Peças	35
4.2 - Determinação dos Parâmetros da Curva de Foschi para a Ligação	51
CAPÍTULO 5 - ENSAIO PRINCIPAIS	
5.1 - Ensaio das Vigas Compostas de Madeira	60
5.2 - Determinação da Rigidez Real das Vigas Compostas $(EI)_T$	62
5.3 - Traçado das Curvas Carga-Deslocamento das Vigas Compostas	71
5.4 - Traçado dos Diagramas de Deformações ao Longo da Seção	84
5.5 - Traçado das Curvas Carga-Deformação das Vigas Compostas	103
5.6 - Cargas de Ruptura por Ruína das Vigas Compostas	116
CAPÍTULO 6 - SOLUÇÃO APROXIMADA DO PROBLEMA	
6.1 - Introdução	117
6.2 - Solução Via Software FLOOR	118
6.3 - Solução Via Software SAP90	135

CAPÍTULO 7 - APRESENTAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS	
7.1 - Introdução	148
7.2 - Deslocamentos	149
7.3 - Deformações	167
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	203
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	206
BIBLIOGRAFIA	210

RESUMO

A modelagem de vigas mistas de duas camadas de madeira utilizando o software comercial SAP90 é apresentada. A geração de elementos do tipo estado-plano para caracterizar as peças de madeira e do tipo barra para os conectores foi realizada. As vigas construídas em laboratório apresentaram um vão teórico de, aproximadamente, 4400 mm e uma relação (vão/altura total) superior a 21. Foram determinados os módulos de elasticidade das peças e caracterizado o elemento de ligação. Foram traçados diagramas de deformações, curvas carga-deformação e curvas carga-deslocamento vertical para a seção do meio do vão além de curvas carga-escorregamento relativo para a seção no final das vigas. Na sequência, as vigas foram processadas no software FLOOR, específico para a análise de estruturas de duas camadas interligadas por conectores com recursos de não-linearidade. Finalmente, uma comparação dos resultados experimentais com os resultados computacionais (SAP90 e FLOOR) foi apresentada, alcançando uma boa precisão.

ABSTRACT

The modelling of two-layered wood beams with interlayer slip using the finite element package SAP90 is presented. Plane stress and beams elements were employed to model respectively the solid wood components and the connectors. Supported wood T-Beams, with an average span of 4400 mm and span/height ratio of 21 were constructed and tested in laboratory for comparison with the modelling. Prior to the construction of beams, the material properties of each component and the load-slip characteristics for the connectors were determined. The load midspan deflection relationship, load slip-curve for the connectors, as well as, the distributions of strains through the depth of the member were monitored through the tests. The beams were also analyzed employing the software FLOOR, specific for the nonlinear modelling of layered systems with interlayer slip. The comparison of these test results with two finite element models (SAP90 and FLOOR) indicates good correlation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

A utilização crescente de estruturas de madeira com diferentes finalidades nas construções torna necessário o desenvolvimento de novas técnicas mais compatíveis com a realidade existente. Ampliadas as possibilidades de empregos destas estruturas, são requeridos conhecimentos mais profundos a respeito das propriedades da madeira e do completo domínio do comportamento de peças fletidas, entre outros.

As recomendações da Norma Brasileira para o Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira (NBR 7190) e do Método Brasileiro de Ensaio Físicos e Mecânicos da Madeira (NBR 6230) cujos textos datam de 1951 e 1940, respectivamente, se apresentam insuficientes para atender às necessidades atuais dos projetos em estruturas de madeira. Em função disso, engenheiros e pesquisadores utilizam parâmetros de comportamento das madeiras mencionados em trabalhos internacionais, tornando-se duvidosa a aplicação dessas técnicas para as espécies nacionais.

Sendo assim, evidencia-se a necessidade de uma revisão e atualização dos textos do método de ensaio para a caracterização de madeiras e da norma para o cálculo e execução de peças de madeira utilizadas nas diversas estruturas. Entre vários tópicos a serem abordados, em especial, encontra-se a determinação do comportamento de peças de madeira de seção composta quando submetidas a esforços de flexão, em função do tipo de elementos utilizados na ligação das peças, tais como: parafusos, pregos, anéis metálicos, anéis plásticos, adesivos, tarugos, cavilhas, etc.

Inserido neste contexto, fica justificado o presente trabalho que não se constitui em uma abordagem definitiva a respeito de peças de madeira de seção composta unidas por pregos mas que pretende contribuir para o avanço da tecnologia nacional.

1.2 - Objetivos do Trabalho

Tendo em vista as considerações do item anterior, torna-se necessário realizar uma extensa revisão bibliográfica contendo trabalhos que estejam intimamente ligados ao comportamento de vigas de madeira. Após a realização desta primeira etapa, este trabalho objetiva comparar os resultados das deformações normais e dos deslocamentos na flexão de vigas compostas de madeira maciça de seção T tendo o prego como elemento de solidarização, obtidos em ensaios com resultados de análises via o método dos elementos finitos.

Ensaio preliminares serão realizados para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinal à flexão das peças que compõem as vigas. Paralelamente, serão também realizados ensaios em pequenos corpos-de-prova para a caracterização da rigidez inicial e final das ligações.

Montadas as vigas, novos ensaios far-se-ão necessários para a determinação de diagramas de deformações e de curvas carga-deslocamento vertical para a seção do meio do vão além de curvas carga-escorregamento relativo para a seção no final das vigas. De posse dos dados experimentais, será possível analisar a eficiência das ligações pela relação da rigidez real alcançada pelas peças com a rigidez teórica da seção composta.

Posteriormente ao término dos ensaios, soluções aproximadas serão pesquisadas através da modelagem das vigas compostas em dois sistemas computacionais, ou seja, utilizando o software comercial SAP90 e o software FLOOR desenvolvido pelo professor adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, José Márcio Fonseca Calixto.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Este capítulo apresenta um resumo da revisão bibliográfica elaborada durante a primeira fase deste trabalho . As publicações e trabalhos abordados a seguir, estão diretamente ou indiretamente relacionados com o assunto estudado e foram subdivididos em três itens: comportamento da madeira às solicitações mecânicas, elemento de ligação e aspectos de Normas.

No estudo sobre o comportamento mecânico da madeira, muitos autores admitem que o diagrama tensão-deformação de uma viga de madeira apresenta uma variação linear na fase elástica de carregamento até atingir o limite de proporcionalidade. A partir daí, tal variação não tem validade devido à diferença entre as resistências à compressão e à tração da madeira além dos diferentes aspectos da ruptura que na compressão se aproxima de uma ruptura plástica e na tração tende a uma ruptura frágil. Sendo assim, diversos autores propõem alterações na distribuição clássica de tensões na flexão afim de particularizá-la para o elemento madeira.

A curva carga-escorregamento para descrever o comportamento não-linear do elemento de ligação em peças estruturais de madeira tem sido formulada de várias maneiras pelos pesquisadores. No presente trabalho, devido à diferença de materiais nas ligações (aço e madeira), ao comportamento anisotrópico do material madeira e, também ao próprio processo construtivo das ligações, torna-se muito difícil caracterizar uma única curva.

Os itens referentes à parte de normalização foram subdivididos em aspectos de dimensionamento à flexão e em métodos de ensaios para obtenção da resistência da madeira à flexão de alguns países que desenvolvem pesquisas sobre o assunto.

2.2 - Comportamento da Madeira à Solicitações Mecânicas

Baumann, em 1924, mencionado por Kollmann [01], propôs uma distribuição de tensões normais para uma viga de madeira submetida à flexão simples. Conforme Baumann, o diagrama teórico de Navier seria alterado à medida que fosse ultrapassada a fase elástica do material apresentando uma configuração diferenciada que pode ser atribuída às diferenças de resistências à tração e compressão da madeira de acordo com a figura 2.1.

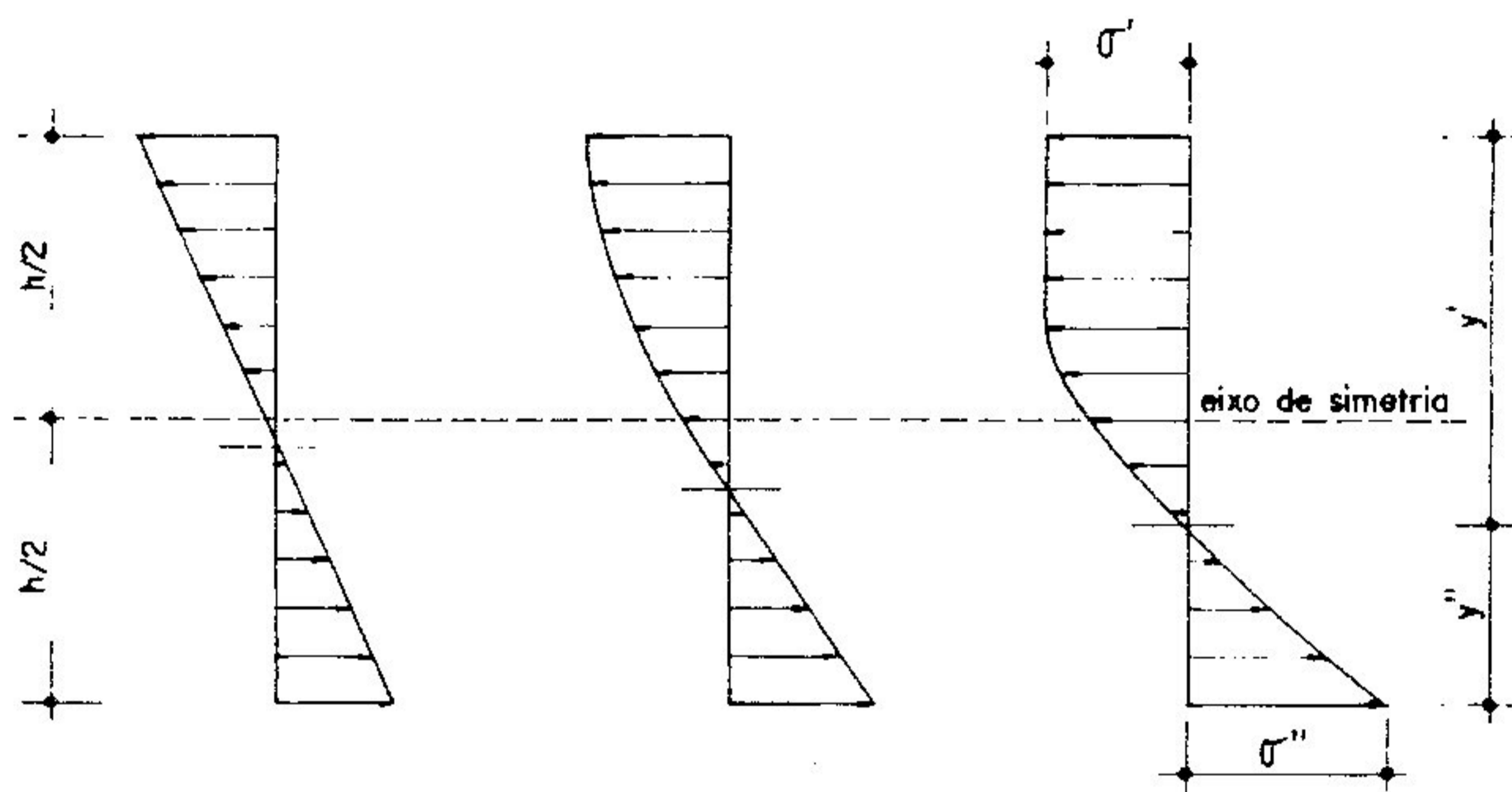


Figura 2.1 - Tensões de Tração e Compressão na Flexão conforme Baumann

Ross, em 1936 e Thunell, em 1940, comentado por Kollmann [02], estabeleceram a distribuição de tensões trapezoidal de acordo com a figura 2.2.

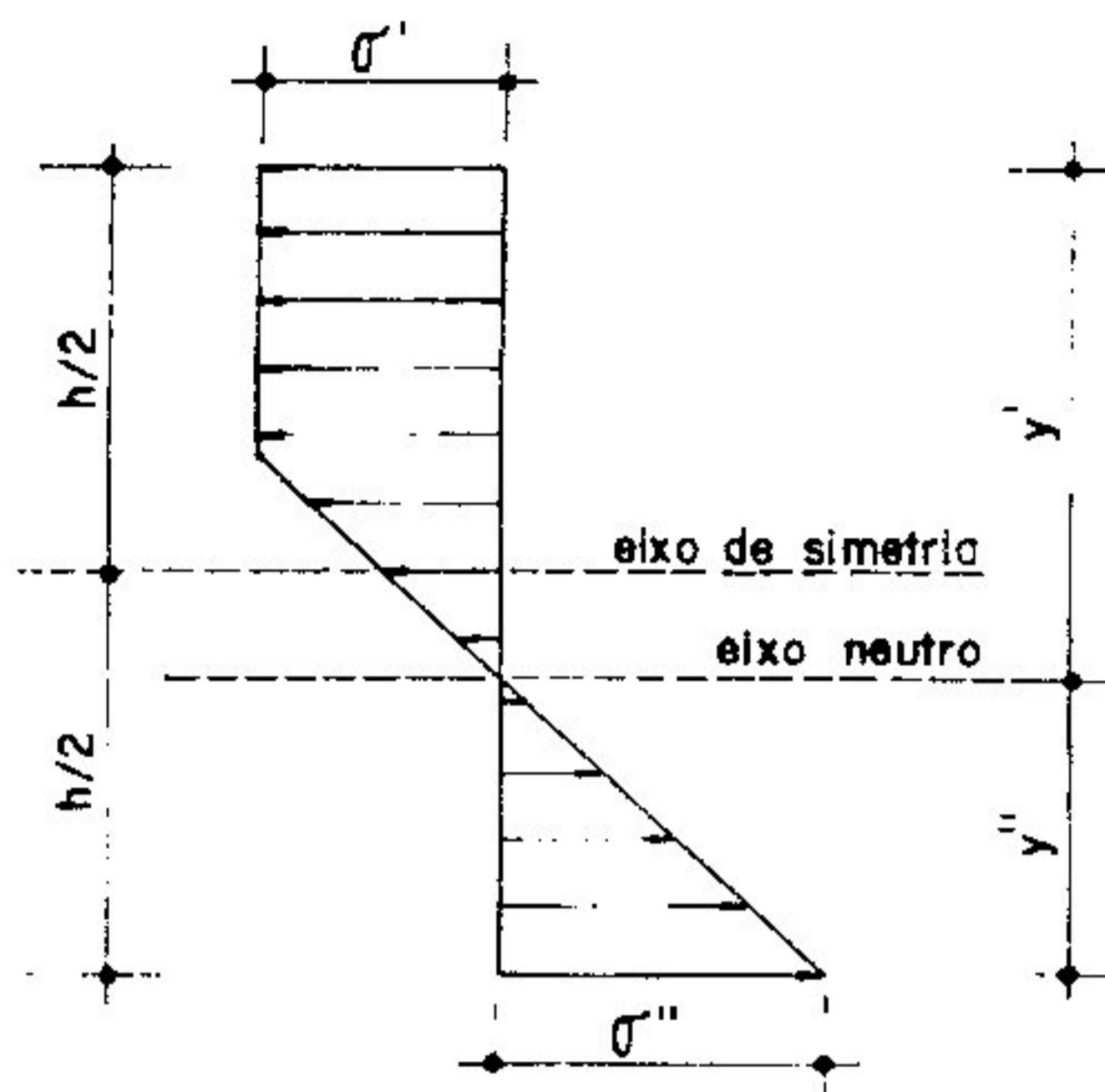


Figura 2.2 - Diagrama de Tensões Normais conforme Ross e Thunell

com, σ' : tensão de ruptura à compressão

σ'' : tensão de ruptura à tração

h : altura da viga

y' : distância da borda mais comprimida à linha neutra.

Fazendo-se a resultante de tração igual à resultante de compressão e levando-se em consideração que ambas as tensões se relacionam pelo fator m onde $\sigma' = m \sigma''$, a posição da linha neutra pode ser determinada pela equação:

$$y'/h = (1 + m^2)/(1 + m)^2$$

m	0.67	0.50	0.40	0.33
y'/h	0.52	0.56	0.60	0.62

Suenson, citado por Kollmann [03], em 1941, admitiu uma curva parabólica do segundo grau com vértice na borda comprimida até a linha neutra. A partir daí, até a borda tracionada admite uma distribuição linear de acordo com a figura 2.3

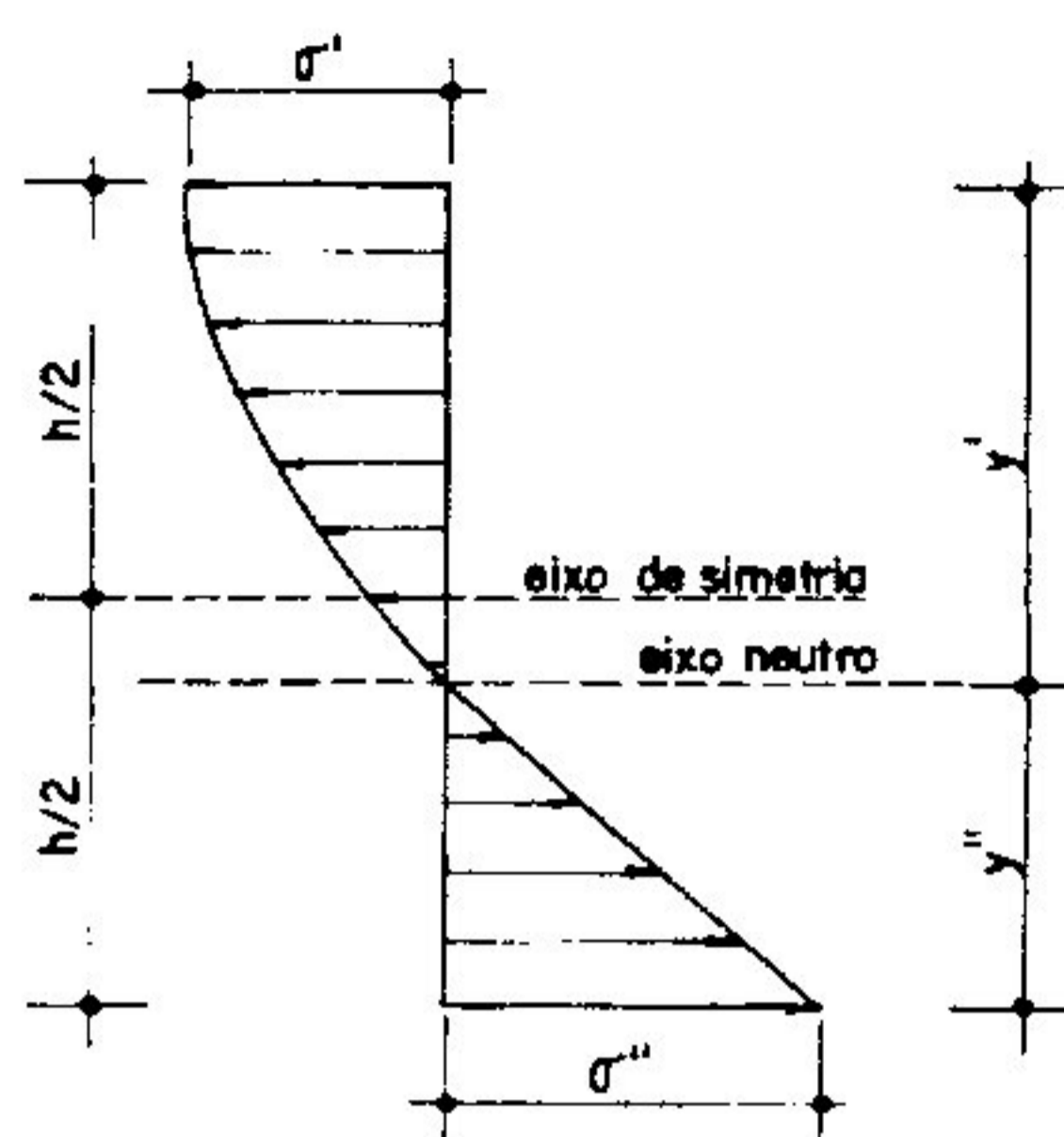


Figura 2.3 - Distribuição de Tensões Normais conforme Suenson

Hansen [04], em 1946, apresentou algumas expressões para vigas de madeira laminada de seção transversal composta do tipo I ou caixão cuja largura do flange correspondia à cinco vezes a espessura da alma e cuja altura do flange correspondia à dez vezes a espessura da alma. Concluiu ser necessário maiores informações sobre o enpenamento lateral e a capacidade de carga destas vigas.

Ramos [05], em 1961, descreveu um método para determinar a distribuição de tensões na flexão em vigas de madeira quando algumas dessas tensões excedem o limite de proporcionalidade. De acordo com a figura 2.4, Ramos admitiu uma simplificação do diagrama de tensões semelhante ao de Ross e Thunell, onde a linha neutra encontra-se abaixo do eixo de simetria da viga.

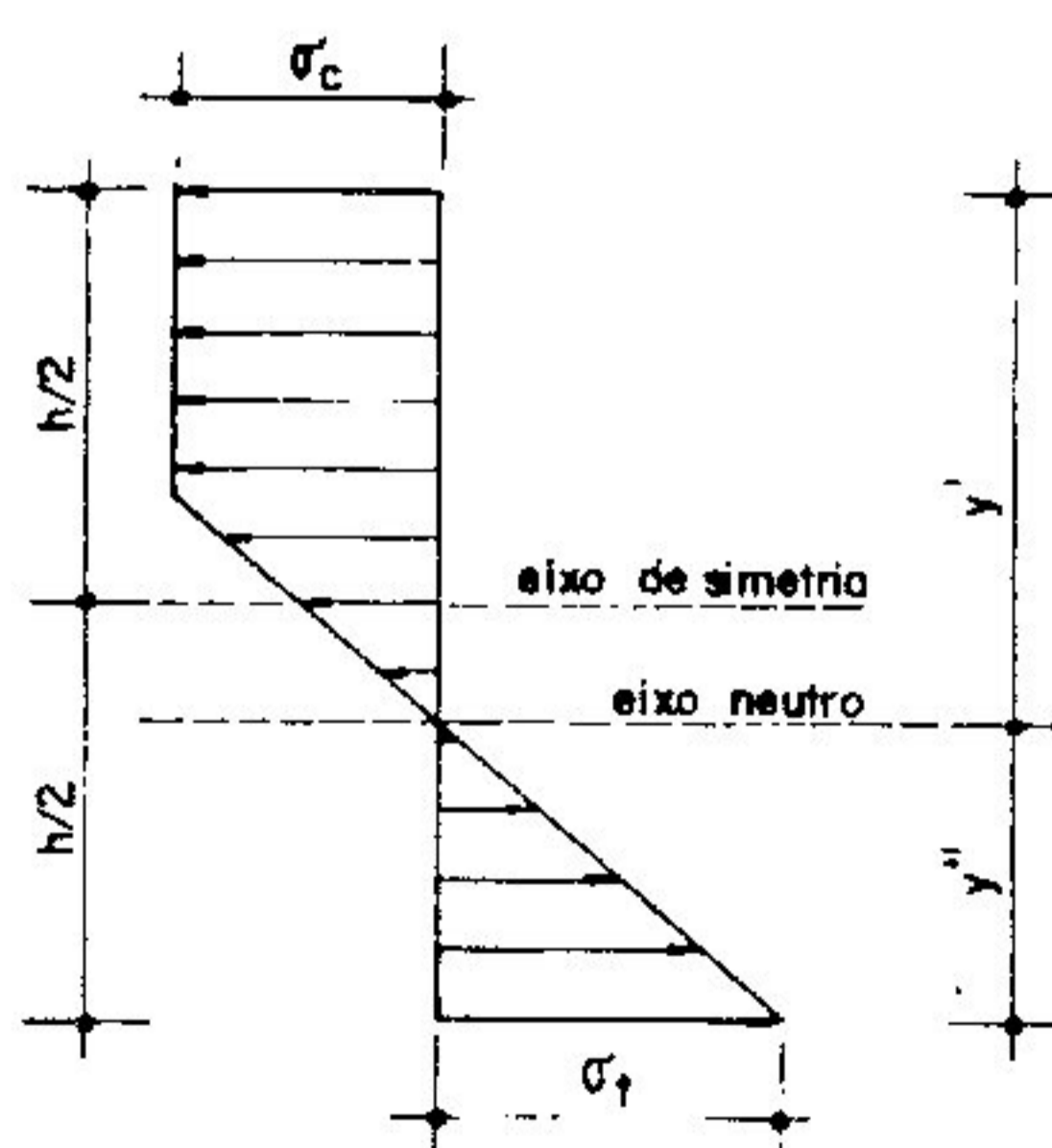


Figura 2.4 - Distribuição de Tensões Normais conforme Ramos

Doyle [06], em 1964, estudou a resistência e o comportamento de ligações formadas por duas chapas de 5/8" de madeira laminada contendo, internamente, uma peça de madeira maciça. Os testes foram realizados para diferentes inclinações das fibras das chapas laminadas com exposição fora e dentro do laboratório e com controle atmosférico num prazo de 13 meses.

A ruptura por efeito cortante se deu na madeira laminada em todas as ligações. As ligações expostas à diferentes condições atmosféricas sofreram uma variação de 3 a 15% na resistência última. Ligações sujeitas à tensões da ordem de 25% da resistência última não foram prejudicadas após 13 meses.

Goodman [07], em 1968, derivou as equações que governam as vigas compostas por duas camadas pelas considerações de equilíbrio. No contato entre as duas camadas, o escorregamento existente é igual à diferença das deformações integrada ao longo do comprimento da viga composta. Em virtude da diferença das deformações na interface aparece uma força normal que é absorvida pelos conectores. Com as equações de equilíbrio (somatório de forças horizontais e momentos), e assumindo uma mesma curvatura para a seção composta, foi possível solucionar o problema.

Kuenzi e Wilkinson [08], em 1971, desenvolveram pesquisa capaz de prever as deformações e tensões em vigas de madeira composta de elementos rigidamente interligados por adesivo. O resultado deste estudo serviu para reduzir o tamanho das peças estruturais utilizadas em projetos. Os dados experimentais demonstraram uma grande concordância com a teoria para vigas compostas de duas ou três camadas.

Ramaker e Davister [09], em 1972, pesquisaram vigas compostas do tipo I formadas de alma de várias lâminas de madeira dura colada e flange de madeira maciça interligados por adesivo. O carregamento aplicado foi semelhante ao de telhados. Concluíram poder prever o comportamento destas peças estruturais.

Em 1973, Zakic [10] pesquisou a configuração do diagrama tensão-deformação para vigas de madeira sujeitas à flexão simples e propôs a distribuição da figura 2.5, que estabelece uma distribuição parabólica (segundo grau) para as tensões normais na região comprimida e uma distribuição linear (primeiro grau) para as tensões na região tracionada de uma viga de madeira submetida a momento fletor.

Para descrever a forma do diagrama de tensões normais, Zakic determinou as seguintes equações:

$$x = (\sigma_c \cdot z^2) / (\xi^2 \cdot h^2) - (2 \cdot \sigma_c \cdot z) / (\xi \cdot h) \quad (\text{região comprimida})$$

$$x = (\sigma_t \cdot z) / [h \cdot (1 - \xi)] \quad (\text{região tracionada})$$

onde, σ_c : tensão máxima de compressão na ruptura

σ_t : tensão máxima de tração na ruptura

h : altura da seção

ξ : fator que define a região comprimida da seção

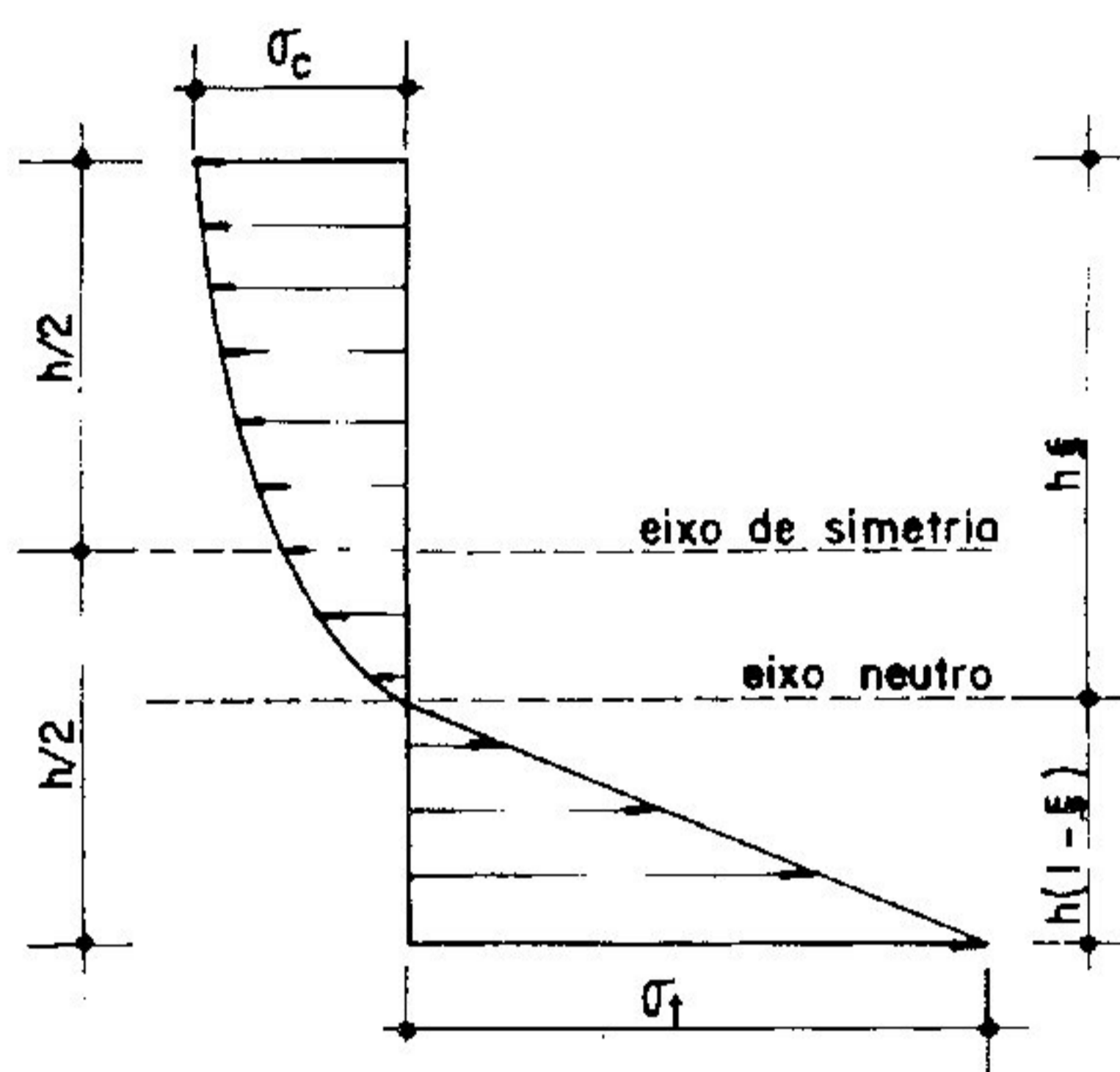
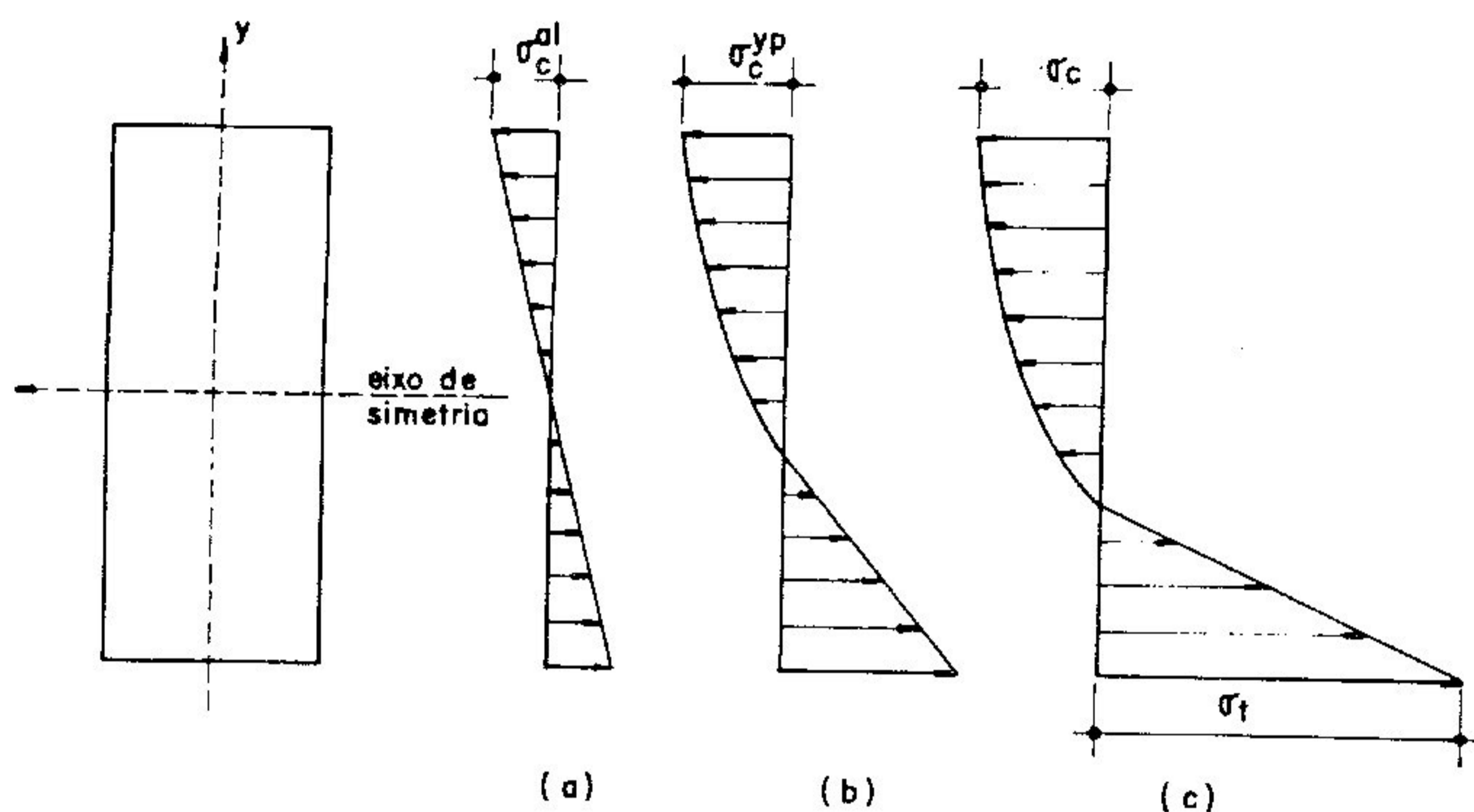


Figura 2.5- Distribuição de Tensões Normais na Ruptura conforme Zakic

Trabalhando com estas equações, Zakic relacionou o momento fletor interno no limite elástico M_{el} com o momento fletor interno no limite plástico M_{pl} , alcançando para uma relação de $\sigma_t = 3 \cdot \sigma_c$ o fator $\eta = 1,76$, ou seja, $M_{pl} = 1,76 \cdot M_{el}$.

De acordo com a figura 2.6, Zakic, observou que o eixo de tensões nulas posiciona-se, cada vez mais, abaixo da linha média da seção transversal à medida que aumentam-se as tensões normais na viga.



- (a) Fase elástica
- (b) Além da fase elástica
- (c) Ruptura

Figura 2.6 - Distribuição de Tensões Normais conforme Zakic

Hellmeister [11], em 1973, sugeriu uma distribuição de tensões na flexão com tensão constante na zona comprimida e variação linear na zona tracionada como mostra a figura 2.7.

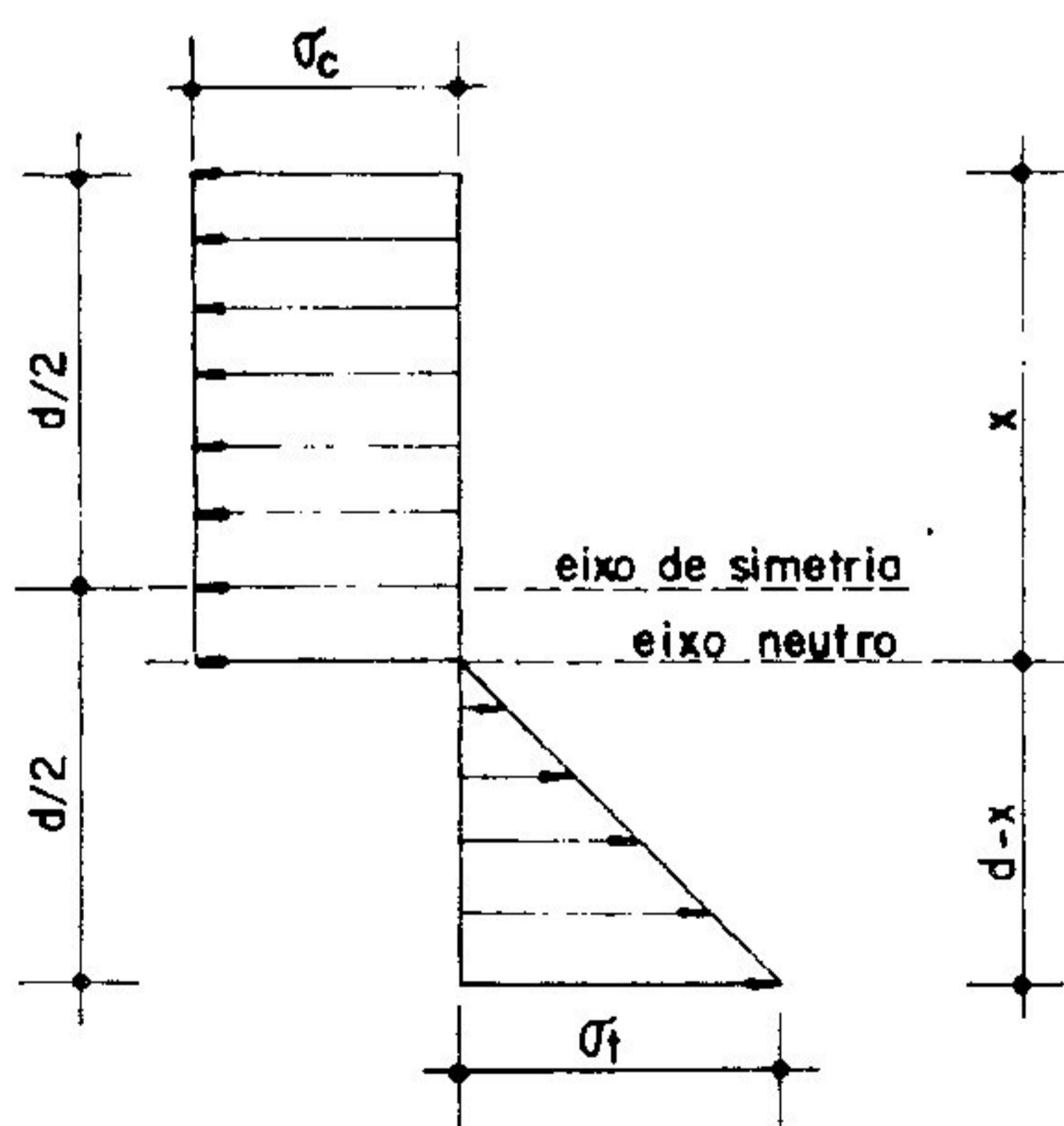


Figura 2.7 - Distribuição de Tensões Normais conforme Hellmeister

Thompson [12], em 1975, desenvolveu uma aproximação pelo método dos elementos finitos para vigas compostas com conector elástico linear. Matrizes de rigidez foram derivadas considerando-se a energia potencial total do sistema segundo as parcelas de deformação axial e de flexão de cada camada, o trabalho feito pelo carregamento externo e a energia de deformação associada com a deformação dos conectores. Os resultados experimentais apresentaram boa concordância com o modelo teórico desenvolvido.

Wagner Munoz [13], em 1979, formulou as equações diferenciais que governam o comportamento de vigas compostas de madeira formadas por dois ou três elementos solicitados à momento fletor simples. Posteriormente, apresentou, também, as equações para peças compostas solicitadas à compressão.

Zakic [14], em 1983, apresentou uma análise das tensões de cisalhamento de vigas de madeira laminada colada no regime elasto-plástico e desenvolveu um método teórico para cálculo das tensões últimas de cisalhamento. A validade do método teórico foi verificada utilizando testes em 16 modelos. Os resultados dos testes confirmam a teoria. É provado que a teoria elástica na qual os critérios de projetos de vigas de madeira fletidas são baseados não explicam adequadamente o verdadeiro comportamento estrutural destas vigas no regime elasto-plástico.

Kamiya [15], em 1983, desenvolveu uma teoria básica para a análise não-linear na flexão simples de peças em camadas pregadas. Pelo procedimento analítico é necessário um computador eletrônico devido ao cálculo numérico repetitivo e um simples procedimento para prever o comportamento aproximado sem o computador também é apresentado. A validade de ambos procedimentos é examinada conduzindo a excelentes resultados quando comparados com os dados experimentais.

Devido à ligação entre os dois componentes, Kamiya, apresentou o diagrama de deformação da figura 2.8 admitindo que as tensões axiais devido à força F em qualquer seção da viga composta são uniformemente distribuídas além do carregamento externo e a disposição dos pregos serem simétricos em relação ao meio do vão da viga.

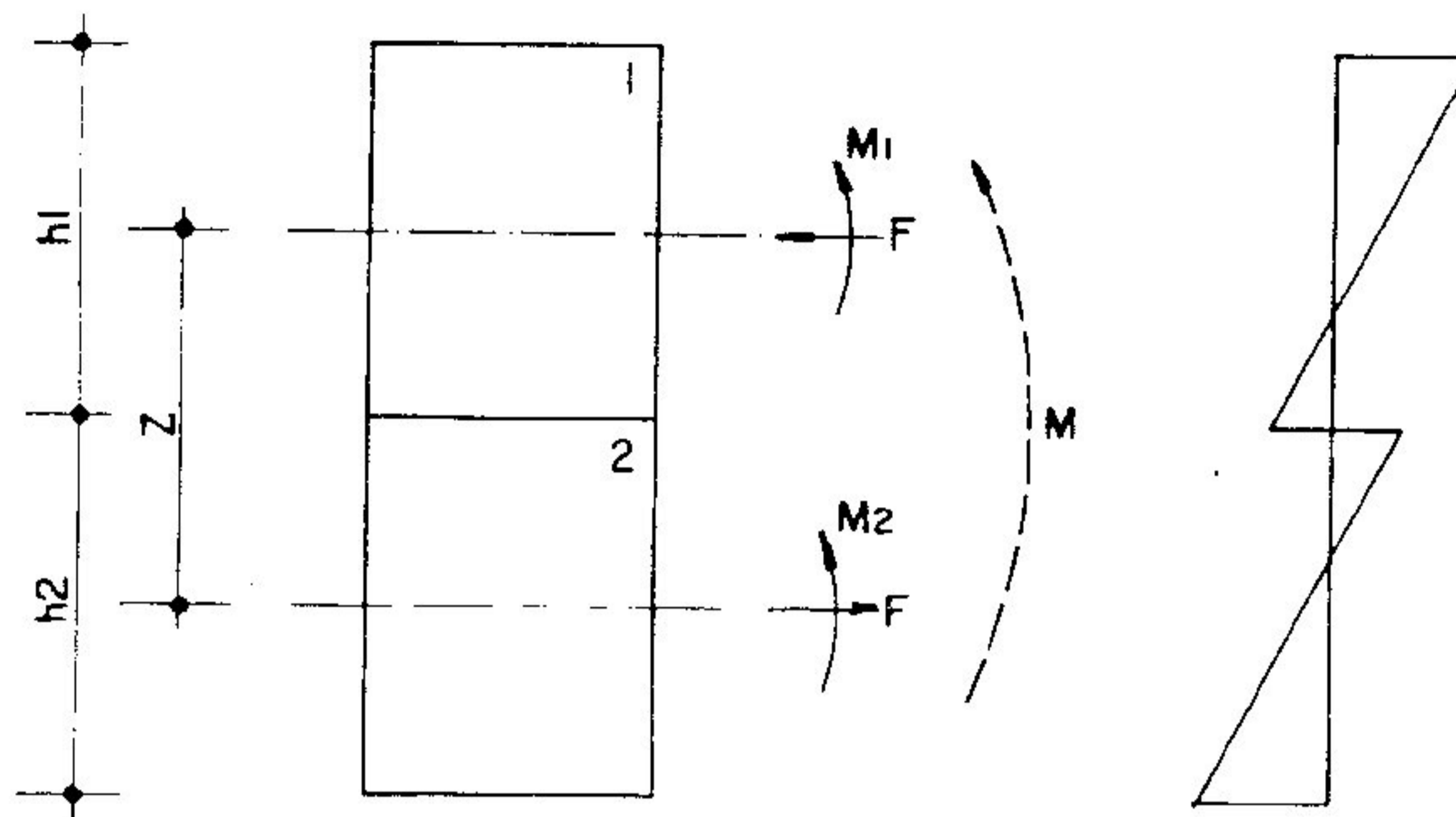


Figura 2.8 - Esforços e Deformações para Viga com Dois Componentes conforme Kamiya

onde, M : momento externo devido ao carregamento;
 M_1 : momento interno na peça superior (centróide);
 M_2 : momento interno na peça inferior (centróide);
 F : força externa causada pela resistência dos pregos.

Kamiya equilibrou o momento externo com os momentos internos, atribuiu uma mesma curvatura para a seção global e, no contato entre as camadas, fez o escorregamento igual à diferença entre as deformações das peças, determinando assim as seguintes equações:

$$M = M_1 + M_2 + Fz$$

$$z = h_1/2 + h_2/2$$

$$(1/r) = (M_1/E_1I_1) = (M_2/E_2I_2) = (M_1 + M_2)/(E_1I_1 + E_2I_2)$$

$$\gamma = \int_x^{L/2} \varepsilon_1 dx - \int_x^{L/2} \varepsilon_2 dx$$

onde, E_1 e E_2 : módulos de elasticidade longitudinal das camadas 1 e 2

I_1 e I_2 : momentos de inércia das camadas 1 e 2.

ε_1 e ε_2 : deformações no contato entre as camadas 1 e 2

Kamiya [16], em 1983, desenvolveu um procedimento para prognosticar o comportamento não-linear da flexão de componentes de pequena espessura pregados. Esses componentes podem ser considerados como um tipo de viga composta pregada. Quando sujeitos à cargas externas, as forças no plano das placas não são uniformemente distribuídas sobre a largura da placa. Por causa disso, o procedimento analítico para prever o comportamento não-linear à flexão de viga composta pregada desenvolvido na primeira parte de seu estudo não é diretamente dirigido para o componente. Entretanto, a utilização de uma largura efetiva, assumindo tensões uniformemente distribuídas na largura da placa, torna o procedimento aplicável para o componente. Em outras palavras, o componente pode ser considerado como uma viga composta pregada com uma largura efetiva. A largura efetiva é obtida pela teoria de Amana e Booth de 1967. Os experimentos que foram conduzidos para examinar a validade do procedimento mostraram excelente conformidade com os resultados experimentais.

Lara Pinto [17], em 1983, estudou experimentalmente na flexão, a distribuição das tensões normais em peças de seção retangular na fase elástica e na ruptura. Foi verificada a influência da variação da altura do corpo de prova e a influência da umidade e densidade.

Leichti e Tang [18], em 1988, estudaram vigas compostas do tipo I e chegaram à conclusão que a história do carregamento não influencia no mecanismo de ruptura em ensaios destrutivos.

Leichti, Falk e Laufenberg, [19], em 1989, apresentaram uma revisão da literatura de vigas compostas de madeira pré-fabricada do tipo I. Os resultados experimentais e analíticos das investigações ilustram o comportamento dos materiais, das ligações e da performance destas vigas.

Chahud [20], em 1989, desenvolveu estudo referente à distribuição de deformações longitudinais bem como das tensões normais em uma peça de seção retangular submetida a momento fletor durante a fase elástica de solicitação. Constatou que a distribuição das deformações e das tensões normais tanto na região tracionada quanto na região comprimida é linear.

Posteriormente, são apresentadas considerações sobre a posição da linha neutra destas vigas. Pode-se observar que os pontos de tensões normais nulas não coincidem com os pontos médios da altura da seção transversal e que sendo assim, constituem uma variável aleatória com distribuição normal de frequência.

Finalmente, Chahud, propôs uma nova sistemática para o dimensionamento de peças de madeira de seção retangular submetidas a momento fletor conduzindo à seções praticamente equivalentes às obtidas no cálculo utilizado pela NBR 7190.

Parra [21], em 1989, realizou um trabalho com vigas compostas de madeira maciça de seção transversal em forma de T com relação vão/altura, $l/h=21$, para verificar a redução do momento de inércia da seção em função da eficácia apenas parcial da solidarização entre alma e mesa feita através de ligação pregada.

Inicialmente, o número de pregos da ligação na viga composta eram três, um em cada posição referente ao apoio e um no centro. Em seguida, o número de pregos passava a cinco, com a inclusão de um prego nos quartos dos vãos. Passava-se para nove, com inclusão de um prego nos oitavos dos vãos, assim sucessivamente, até ser atingido o número de sessenta e cinco pregos.

O carregamento na viga durante os ensaios foi conduzido na faixa elástica do experimento, a uma taxa de 10 MPa por minuto e registro das deformações a cada 30 segundos.

Os módulos de elasticidade longitudinal tanto para a mesa quanto para a alma foram determinados pelo ensaio de flexão e, posteriormente, foi calculado o módulo de elasticidade da seção composta por simples ponderação dos momentos de inércia das peças.

O cálculo do momento de inércia reduzido, I_r , feito por Parra, foi obtido através da expressão:

$$I_r = (P.l^3)/(48.f.E_f)$$

onde, I_r : momento de inércia reduzido

P : carga concentrada de ensaio (meio do vão da viga)

l : vão teórico da viga composta

f : flecha da viga medida no meio do vão

E_f : módulo de elasticidade longitudinal da viga composta

Conhecendo-se o momento de inércia teórico da seção T, I_t , calculado facilmente, pois não se consideram as perdas provenientes das ligações, Parra determinou o "rendimento" ou "eficácia" da seção através da relação I_r/I_t . Os dados experimentais conduziram Parra à uma relação entre as variáveis em estudo, ou seja, o número de pregos, n , e a relação, I_r/I_t , à seguinte expressão:

$$(I_r/I_t) = 0,0068n + 0,503 \quad (n < 65)$$

Calixto [22], em 1991, em sua tese de doutorado, desenvolveu uma aproximação pelo método dos elementos finitos para peças compostas formadas por dois elementos interligados por conectores. A formulação desenvolvida considerou a não-linearidade física do conector e a não-linearidade geométrica da estrutura. Matrizes de rigidez foram derivadas através da energia potencial total do sistema, obtendo-se assim, as seguintes parcelas: matriz elástica, matriz geométrica e matriz do conector.

O equacionamento em questão resultou na elaboração de um software denominado FLOOR que permite ao usuário várias soluções do problema através de diferentes análises, que vão desde uma análise linear global até uma completa análise não-linear da estrutura.

Finalmente, Calixto realizou testes em colunas e vigas para posteriormente confrontá-los com os resultados computacionais. Comparando-os, graficamente, pode-se comprovar a boa concordância dos dados experimentais com a formulação teórica desenvolvida.

Mendonça Passos [23], em 1992, realizou pesquisa experimental sobre vigas de seção composta T para duas espécies de madeira, a Castanheira (nativa) e o *Pinus Elliottii* (de reflorestamento) tendo o parafuso auto-atarraxante, fabricado com aço baixo carbono, como elemento de união das peças.

Foi determinado o módulo de elasticidade longitudinal, E , para cada elemento de alma e mesa por intermédio do ensaio de flexão. Posteriormente, determinou-se o módulo de elasticidade da viga composta, E_t , através da ponderação dos momentos de inércia das peças.

A seguir, Mendonça Passos realizou ensaios para a obtenção do momento de inércia real das vigas compostas, I_r , variando-se o espaçamento dos parafusos. Com isso, foi possível determinar a eficácia do conjunto para cada variação dos parafusos.

Finalmente, foram registrados, experimentalmente, os valores dos momentos de ruptura das vigas, descrevendo-se os tipos de ruptura nas peças e para melhor avaliação do comportamento das vigas, foram realizados ensaios nas ligações parafusadas através da metodologia de trabalho desenvolvida pelo prof. Stamato em 1967.

2.3 - Elemento de Ligação

Luchese e Stamato [24], em 1967, realizaram vários ensaios para a determinação das cargas admissíveis nas ligações parafusadas utilizando peças de peroba-rosa. Os corpos de prova foram montados com pinos com o intuito de evitar o atrito causado pelo aperto do parafuso. Foram realizados vários ensaios com o carregamento paralelo e perpendicular às fibras que possibilitaram a fixação das cargas admissíveis.

Morris [25], em 1973, apresentou um estudo do módulo de escorregamento para ligações pregadas e demonstrou que tal módulo é apenas função do diâmetro do prego e pode ser determinado através da expressão:

$$k = 350d \text{ (valores em N/mm)}$$

McLain [26], em 1975, propôs uma expressão para a curva carga-escorregamento de ligações pregadas do tipo logarítmica baseado em dados experimentais da seguinte forma: $F = A \log(1 + B\Delta)$, onde A e B são dois parâmetros que dependem do peso específico dos elementos adjacentes.

Foschi e Bonac [27], em 1977, desenvolveram uma expressão para a curva carga-escorregamento de ligações pregadas do tipo exponencial. A fórmula possui três parâmetros chamados de: k , P_0 e P_1 , que representam a módulo tangente inicial, a interceção do módulo tangente último com o eixo das ordenadas e o módulo tangente último respectivamente. A figura 2.9 ilustra, graficamente, a obtenção destes três parâmetros para caracterização do elemento de ligação. Tal relação é dada por:

$$F = (P_0 + P_1\Delta)[1 - \exp(-k\Delta/P_0)]$$

Mantilla Carrasco [28], em 1983, realizou pesquisa sobre ligações pregadas apresentando informações a respeito de pregos, sua fundamentação teórica além de experimentação para demonstração de sua eficiência como elemento de ligação. O estudo experimental de peças de madeira de Peroba Rosa foi realizado com carregamento paralelo às fibras e possibilitou a obtenção de valores de profundidade de penetração, de espaçamentos e da relação espessura da madeira e diâmetro do prego.

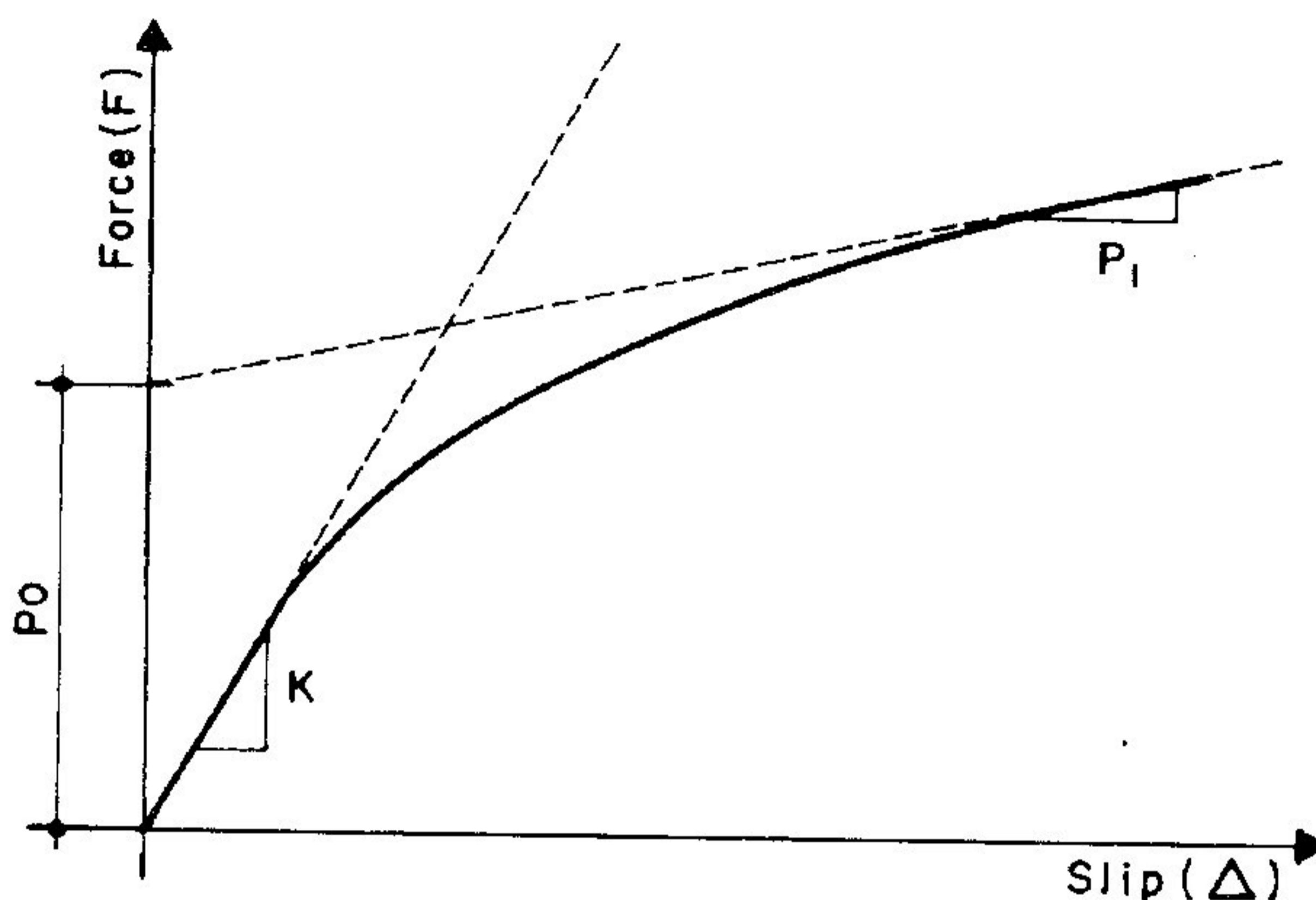


Figura 2.9 - Parâmetros da Curva de Foschi

Malhotra e Thomas [29], em 1984, investigaram o efeito do afastamento da interface das ligações pregadas com múltiplos pregos no comportamento da relação carga-escorregamento. Foi constatado que no limite proporcional do escorregamento, a resistência da ligação com um afastamento entre as peças da ordem de 0,53 mm é cerca de 39% maior que da ligação com um afastamento de 1,61 mm e que no escorregamento último, é da ordem de 23%

No congresso Trada [30], em 1985, foi apresentada uma revisão de vários tipos de conectores mecânicos utilizados em estruturas de madeira. Descreveu para cada tipo de conector, os modelos encontrados comercialmente, além de recomendações de ordem prática, tais como, profundidade de penetração, arrancamento, quantidade, diâmetro, tipos de ligações, etc.

McLain [31], em 1987, apresentou um completo resumo para vários sistemas possíveis de conexões abordando aspectos de montagem, valores admissíveis de projeto, problemas comuns, implicações, etc. Para ligações pregadas, são apresentadas várias funções empíricas para descrever as curvas carga-escorregamento de ligações submetidas à carregamento lateral.

2.4 - Normalização

2.4.1 - Normas para Dimensionamento à Flexão

2.4.1.1.- Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira - NBR 7190 - ABNT-1951 [32]

Esta Norma estabelece as condições a serem obedecidas no projeto e execução de estruturas de madeiras, tais como pontes e pontilhões, coberturas, pisos e cimbramentos mas não se aplica às estruturas de madeira laminada ou compensada.

Para cálculo das tensões nas bordas de vigas compostas de seção transversal retangular cheia, entarugadas e endentadas, o item 22 desta Norma, estabelece que $\sigma = M/W$.

onde, $W = 0.85 bd^2/6$ no caso de dois elementos

$W = 0,70 bd^2/6$ no caso de três elementos

sendo, σ : tensão normal

M: momento fletor

W: módulo resistente à flexão

A tensão admissível na flexão simples conforme o item 54 não deverá exceder:

$\sigma_f = 0,15 \sigma_F$ - peças de seção retangular

$\sigma_f = 0,15 \sigma_F (0,5 + 0,5\beta)$ - peças de seção I e caixão

sendo, $\beta = \gamma (b - b_0)/b + b_0/b$

γ : função da relação d_c/d_0 dada na tabela 1 da NBR 7190

b : largura das mesas das vigas de seção composta

b_0 : largura da alma da viga I ou a soma das larguras das almas de uma viga caixão

d_0 : altura total da seção transversal das vigas de seção composta

d_c : espessura da mesa comprimida

σ_f : limite de resistência da madeira verde na flexão estática

O item 55 estabelece que as tensões de tração na borda tracionada nas peças solicitadas à flexão simples não devem ultrapassar à $\sigma_t = 0,15 \sigma_F$

O item 66 limita os esforços admissíveis nas ligações no menor dos seguintes valores:

- 50% do limite de proporcionalidade
- 20% do limite de resistência
- esforço correspondente ao deslizamento relativo de 1,5 mm entre as peças ligadas

O item 68 desta Norma, que trata sobre ligações pregadas, dispõe que na falta de experiências com os materiais a utilizar, o esforço admissível em pregos com penetração na peça, do lado da ponta, de pelo menos 2/3 de seu comprimento total, poderá ser calculado pela expressão: $F = k\delta^3/2$, sendo δ o diâmetro do prego em mm e F em kgf, onde $k=4,5$ para madeira com peso específico menor que $0,65 \text{ g/cm}^3$ e $k=7,5$ para madeira com peso específico maior que $0,65 \text{ g/cm}^3$. Para o caso de madeira verde, F deve ser reduzido de 75% e para pregação de topo, a redução será de 60%.

Na ausência de furação prévia, recomenda-se que o diâmetro do prego não ultrapasse 1/6 da espessura da tábuca menos espessa, sendo que essas regras aplicam-se aos casos em que não haja mais de 10 pregos numa mesma linha paralela ao esforço e em que os espaçamentos dos pregos sejam pelo menos 10δ na direção das fibras, 5δ normalmente às fibras, 5δ em relação às arestas, menos do lado comprimido, onde esta distância não deverá ser inferior a 12δ .

2.4.1.2 - Norma para Construcciones de Madera - Calculo y Ejecucion DIN 1052 - 1973 [33]

Esta Norma é utilizada para estruturas com madeira e chapas de madeira compensada, respeitando-se as recomendações das Normas DIN 96, 97, 104, 436, 440, 570, 571, 1050, 1055, 1080, 1151, 4074, 4110, 4112, 4115, 4420, 7961, 17100, 52183, 68140, 68141, 68704, 68705, 68800.

Para flexão simples em peças de seção T, I ou caixão, o item 5.4 estabelece que para vigas de seção composta, com alma continua de madeira maciça, devem ser calculadas, em virtude da rigidez dos elementos de solidarização, segundo as expressões:

$$\sigma = \pm (M/I_w)(h_s/2)(I_s/I_{sn})$$

$$\sigma_1 = \pm (M/I_w)[\gamma \cdot a_1 \cdot (F_1/F_{1n}) \pm (h_1/2)(I_1/I_{1n})]$$

$$\sigma_{a1} = \pm (M/I_w) \cdot \gamma \cdot a_1 \cdot (F_1/F_{1n})$$

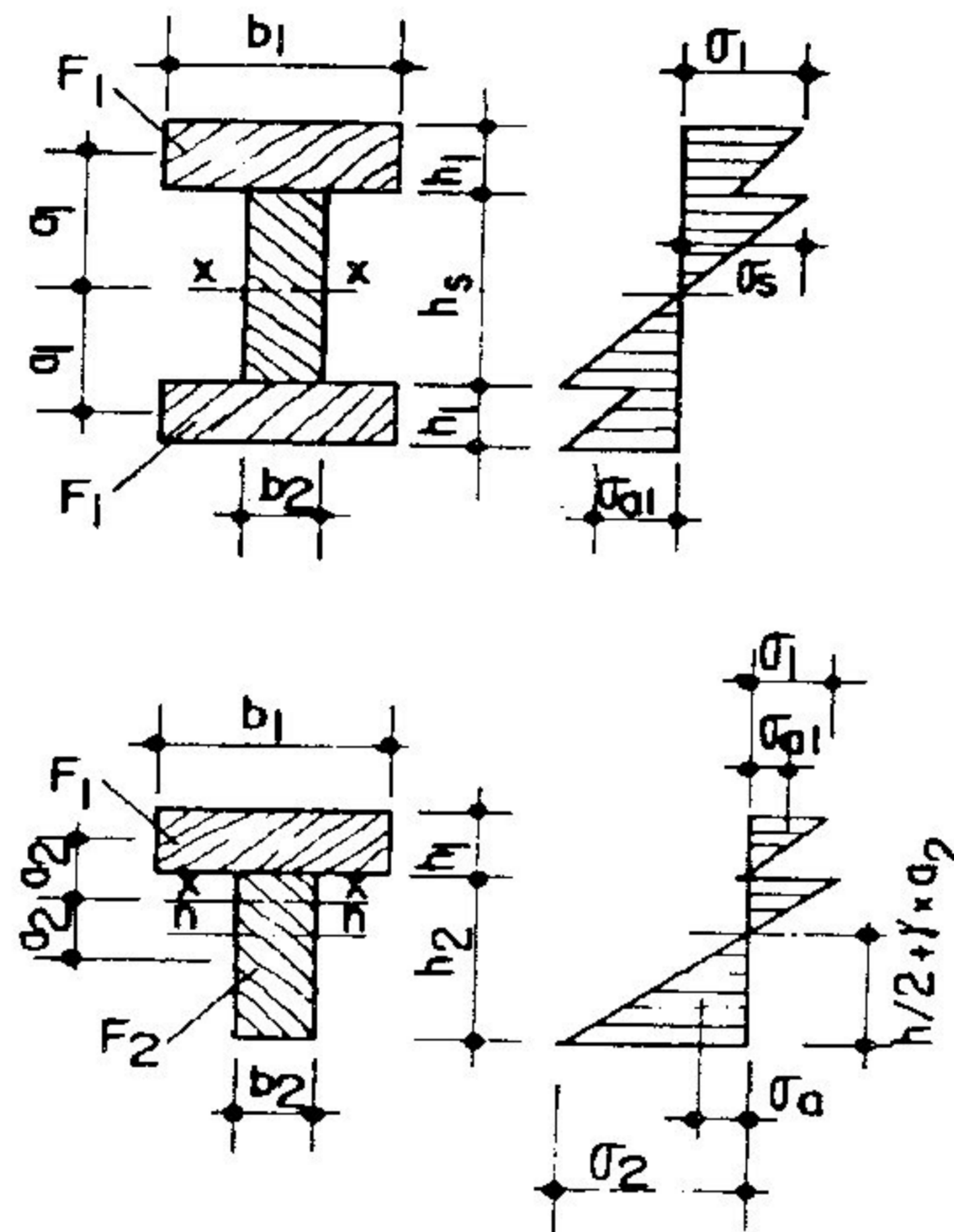


Figura 2.10 - Parâmetros para Vigas I e T

sendo, M : momento fletor

σ_s : tensão atuante na borda da alma da seção

σ_1 : tensão atuante na borda da mesa da seção

σ_{a1} : tensão atuante no centro de gravidade da mesa da seção

h_s : altura da alma

a_1 : distância do centro de gravidade da seção ao centro de gravidade da mesa comprimida

h_1 : espessura da mesa

I_s : momento de inércia total da alma da seção

I_{sn} : momento de inércia reduzido em função do tipo de elemento empregado na solidarização da alma da seção

I_1 : momento de inércia total da mesa da seção

I_{1n} : momento de inércia reduzido em função do tipo de elemento de solidarização empregado da mesa da seção

I_w : momento de inércia total da seção composta dado por:

$$I_w = \sum_{i=1}^n I_i + \gamma \sum_{i=1}^n F_i \cdot a_i^2$$

F_1 : área total da mesa da seção

F_{1n} : área reduzida da mesa da seção

γ : valor da redução do momento de inércia total, dado por:

$$\gamma = 1/(1+k)$$

com, $k = (\pi^2 \cdot E \cdot F_1 \cdot e') / (l^2 \cdot C)$ para seção I e caixão

$k = (\pi^2 \cdot E \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot e') / [l^2 \cdot (F_1 + F_2) \cdot C]$ para seção T

sendo, E : módulo de elasticidade da madeira

F_1 : área da seção transversal da mesa da seção

F_2 : área da seção transversal da alma da seção

e' : distância média entre os elementos de ligação empregados

l : distância entre os apoios

C : módulo de translação do elemento de ligação empregado (fornecido no próprio texto da Norma para diversos tipos possíveis de elementos)

No item 11.3, dispõe sobre ligações pregadas, indicando na tabela 14 desta Norma, para vários pregos comerciais, os valores mínimos da espessura das peças de madeira de uma ligação, a profundidade mínima de penetração do prego na madeira e a carga lateral admissível da ligação. A tabela 15, desta Norma, mostra as distâncias mínimas de pregos entre si e dos pregos às bordas das ligações.

2.4.1.3 - National Design Specification for Wood Construction Recommended Practice for Structural Design by National Forest Products Association - 1986 [34]

Esta Norma regulamenta o projeto de estruturas de madeira maciça serrada, madeira laminada colada e madeira roliça

O item 3.1.5, menciona que, para construções envolvendo a composição de materiais como madeira-concreto, madeira-aço e madeira-chapas de compensado, as vigas deverão ser projetadas de acordo com a prática na engenharia, não havendo referência específica para viga de seção composta.

O item 8.8 descreve todas as recomendações construtivas para ligações que possuam pregos como elementos de ligação.

2.4.1.4 - Common Unified Rules for Timber Structures - Eurocode n.5 1988 [35]

Este código descreve os princípios para projeto de estruturas de madeira sólida e laminada colada.

No item 5.2.4 prescreve que para peças estruturais compostos por partes conectadas, a influência do escorregamento da ligação deve ser considerada. Para o módulo de escorregamento a tabela 5.2.4a, desta Norma, preve alguns valores que podem ser utilizados.

No item 5.3.2 que trata de ligações pregadas com carregamento lateral, preve que a capacidade de carga no plano cortante destas ligações pode ser determinada por: $R_k = kd^\beta$, onde d é o diâmetro do prego e os parâmetros k e β dependem dentre outras coisas, do tipo de prego, da espécie de madeira e do processo de fabricação. Para pregos com características de resistência à tração de pelo menos 600 MPa, os seguintes valores de k , para pregos com diâmetro acima de 6 mm podem ser utilizados:

$$k = 6,0 \rho^{1/2} \text{ e } \beta = 1,6 \text{ sem pré-furação}$$

$$k = 7,5 \rho^{1/2} \text{ e } \beta = 1,6 \text{ com pré-furação}$$

sendo ρ a densidade da madeira em Kg/m^3

Valores mínimos de penetração e espaçamentos de pregos, também, são fornecidos no item 5.3.2 para ligações envolvendo duas ou três peças de madeira.

2.4.1.5 - American Institute of Timber Construction Timber Construction Manual, third edition 1985 [36]

Este manual foi desenvolvido para prover o estado-da-arte e recomendações de construções de madeira do tipo serrada e laminada colada utilizados na engenharia.

Na seção 5, parte II, vários valores recomendados para a limitação dos deslocamentos em vigas de todos os tipos, considerando-se apenas o carregamento acidental e, também, a soma deste com o peso próprio da estrutura são especificados.

A tabela 6.36, deste manual, pode ser utilizada para a determinação dos valores de projeto das cargas laterais e da profundidade de penetração dos pregos para os quatro grupos existentes

2.4.2 - Resistência da Madeira à Flexão

A obtenção da resistência à flexão da madeira é feita através de ensaios de pequenos corpos de prova cuja metodologia pode mudar de acordo com as Normas adotadas em cada país.

Ensaio em peças de dimensões estruturais são também realizados em determinados países para maior análise do comportamento do material como elemento estrutural.

A seguir, veremos alguns métodos de ensaios adotados em cinco países, a saber: Alemanha Ocidental, Brasil, Estados Unidos, França, Inglaterra, e Portugal.

2.4.2.1 - Alemanha Ocidental: DIN 52-186 [37]

- a) comprimento do corpo de prova: $L = l + 3h$
- b) distância entre apoios: $l > 3h$
- c) corpo de prova: $b = h = (20 \pm 1) \text{ mm}$
- d) módulo de resistência à flexão: σ

$$\sigma = (3Fl)/(2bh^2) \quad \text{para carga centrada}$$

$$\sigma = 3F(l-l')/(3bh^2) \quad \text{para duas cargas}$$

- e) esquema de ensaio:

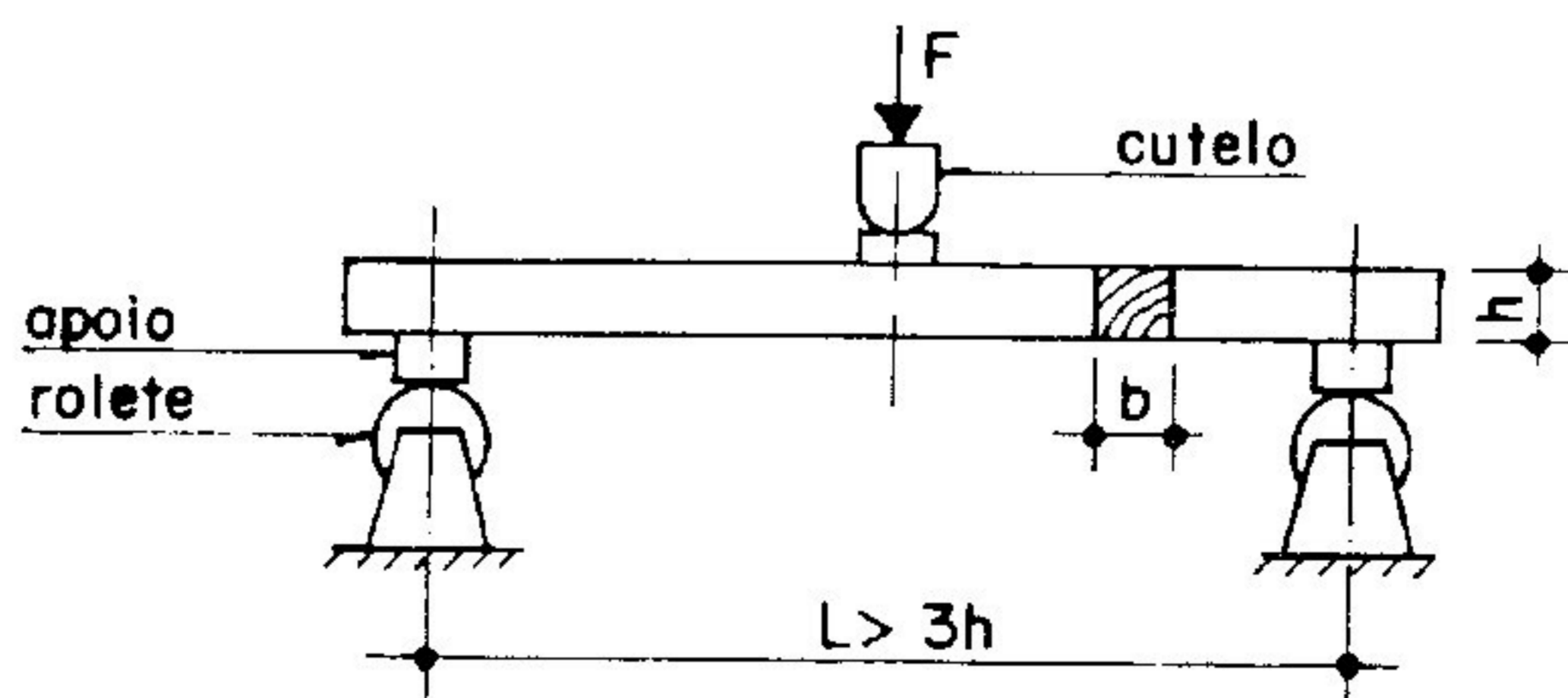


Figura 2.11 - Esquema de Ensaio para Carga Centrada

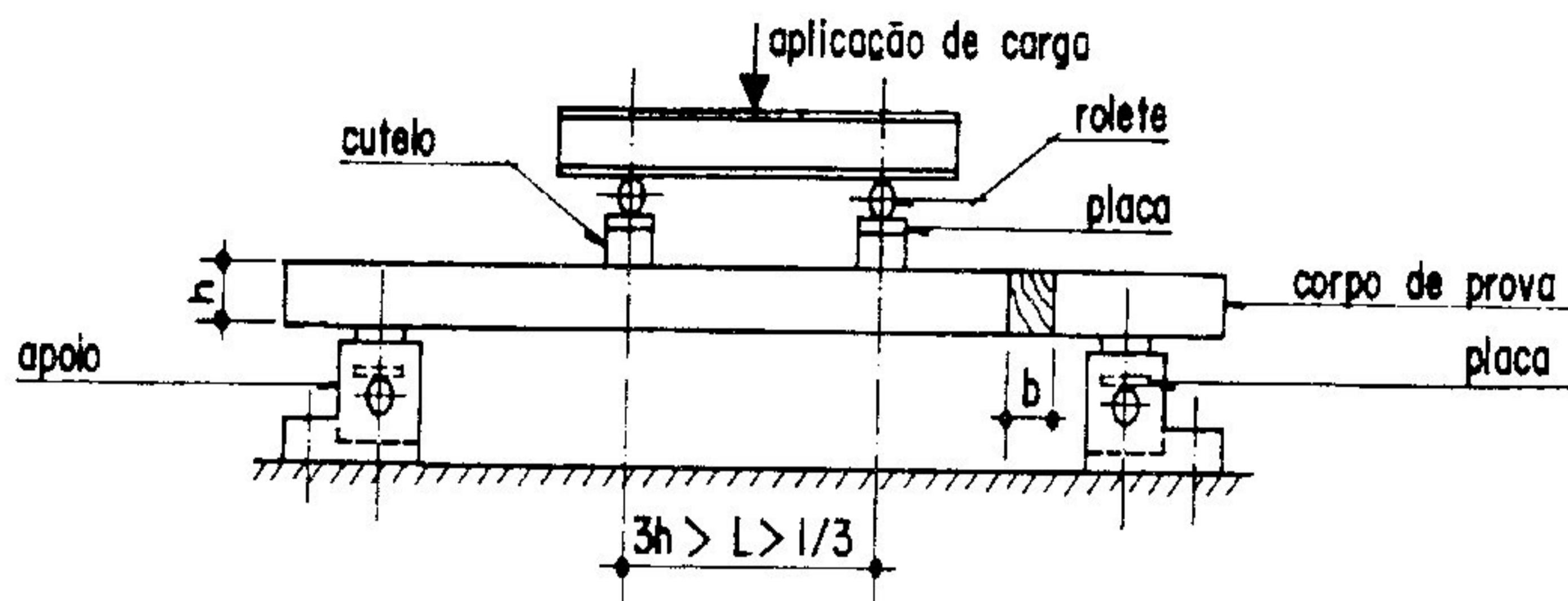


Figura 2.12 - Esquema de Ensaio para Duas Cargas

2.4.2.2 - Brasil: NBR 6230 [38]

- a) número de corpos de prova: 80, sendo 40 com umidade acima do ponto de saturação e 40 secos no ar
- b) corpo de prova: $(2 \times 2 \times 30) \text{ cm}^3$
- c) módulo de resistência à flexão: σ

$$\sigma = (3PL)/(2bh^2)$$

- d) esquema de ensaio:

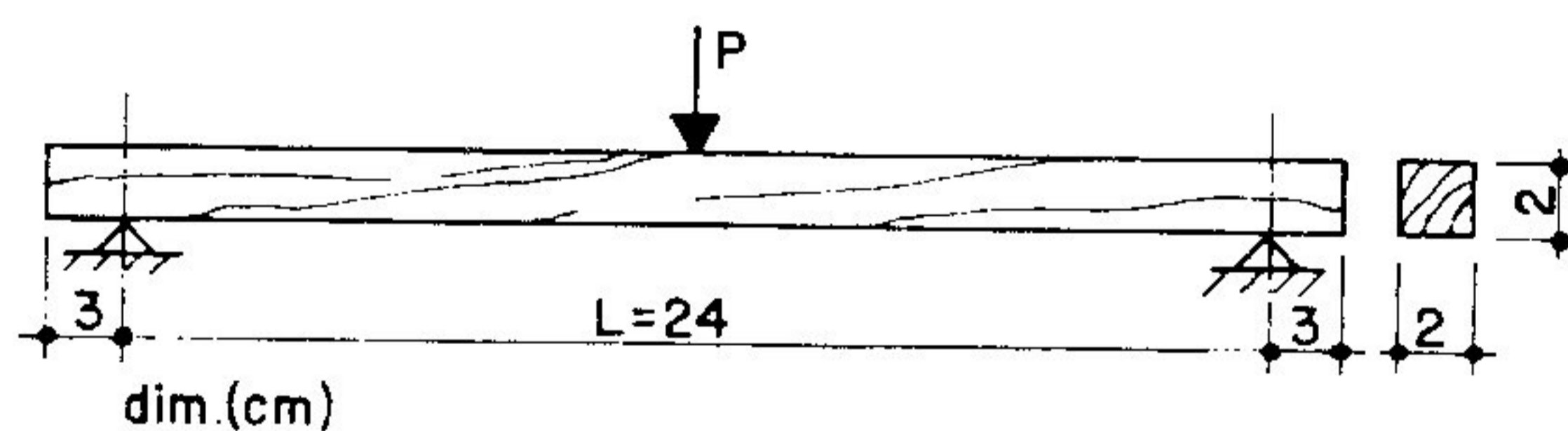


Figura 2.13 - Esquema de Ensaio segundo a NBR 6230

2.4.2.3 - Estados Unidos:

2.4.2.3.1 - ASTM D143 - Flexão Estática em Pequenos Corpos de Prova [39]

- a) distância entre apoios: 70 cm
- b) corpo de prova: (5 x 5 x 76) cm³
- c) módulo de resistência: MOR

$$\text{MOR} = (3PL)/(2bh^2)$$

- d) esquema de ensaio:

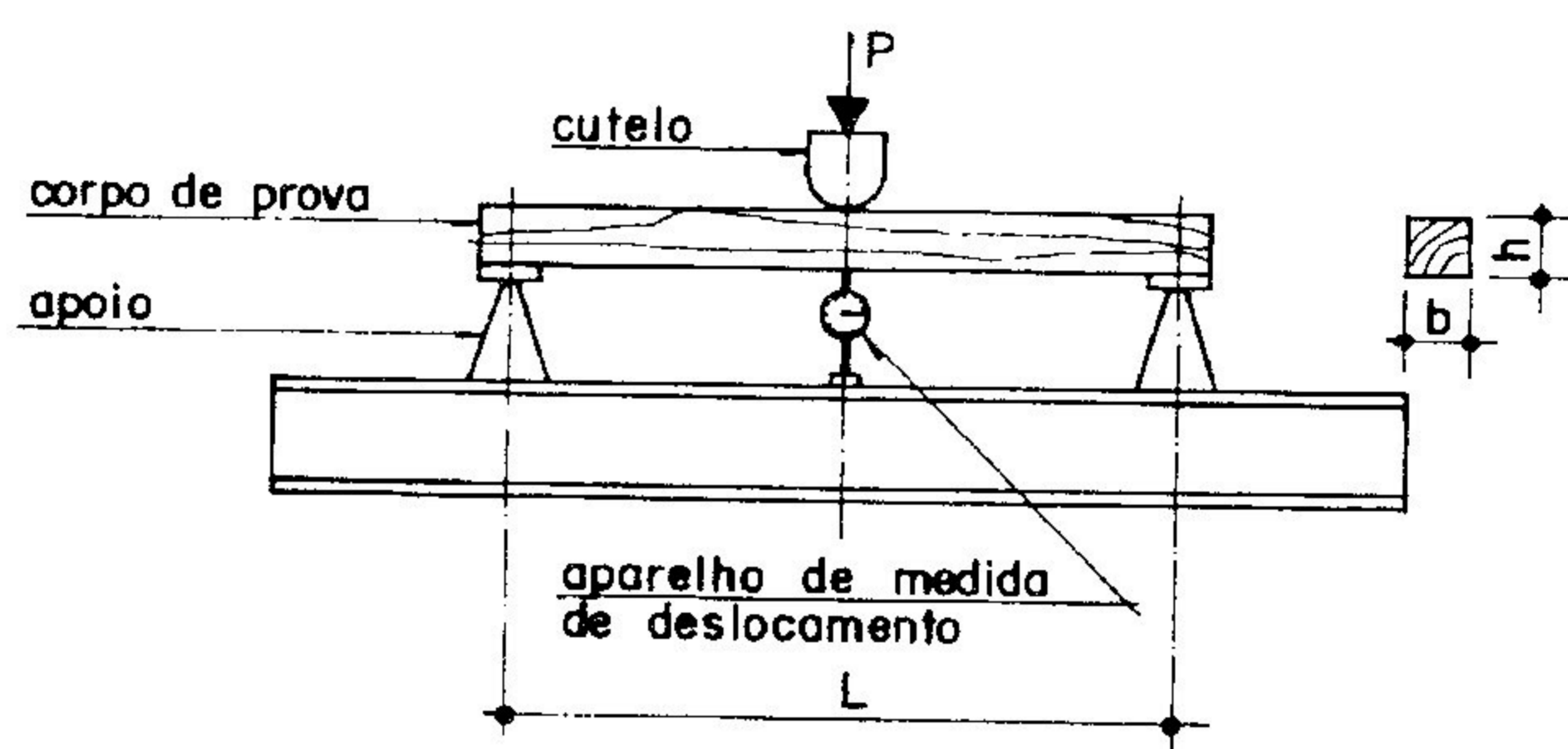


Figura 2.14 - Esquema de ensaio segundo ASTM D143

2.4.2.3.2 - ASTM D198 - Flexão Estática em Peças de Dimensões Estruturais [40]

- a) comprimento de corpo de prova: l
- b) corpo de prova: (b x h) > (5 x 5) cm²
- c) módulo de resistência à flexão: MOR

$$\text{MOR} = (3Pa)/(bh^2)$$

d) esquema de ensaio:

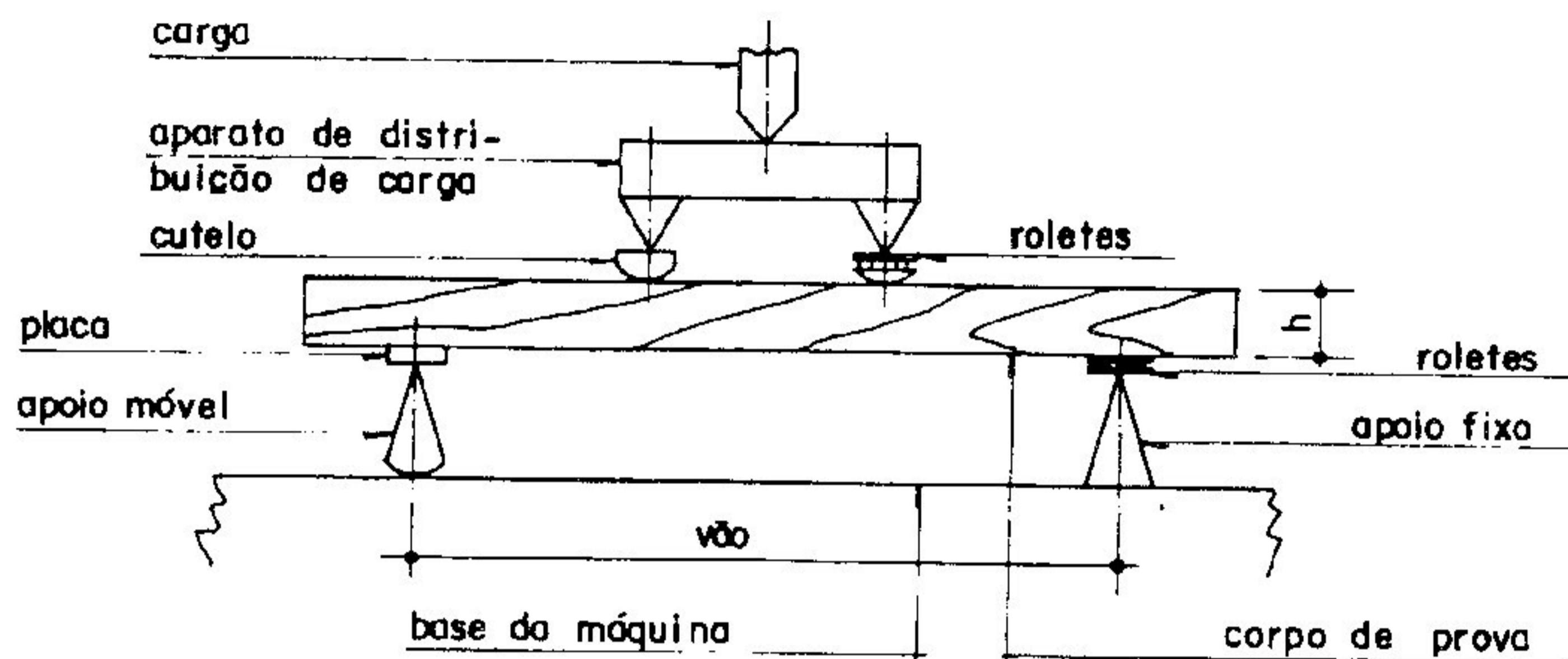


Figura 2.15 - Esquema de Ensaio segundo ASTM D198

2.4.2.4 - França: AFNOR - B5-28 [41]

- a) distância entre apoios: 28 cm
- b) corpo de prova: $(2 \times 2 \times 30) \text{ cm}^3$
- c) módulo de resistência à flexão: F_H

$$F_H = (3PL)/(2bh^{10/6})$$

d) esquema de ensaio:

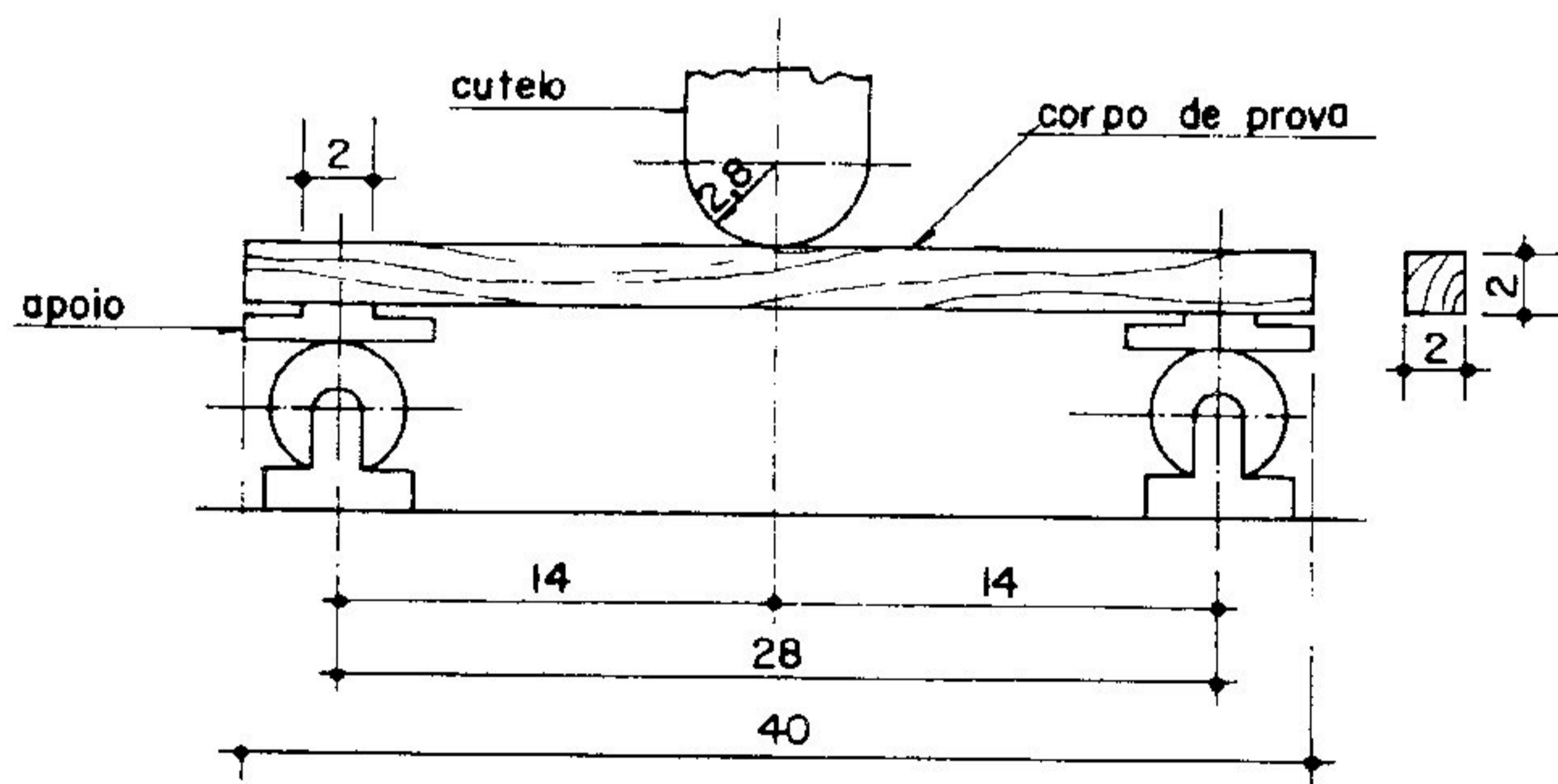


Figura 2.16 - Esquema de Ensaio segundo AFNOR B5-28

2.4.2.5 - Inglaterra: BS 5820 [42]

- a) comprimento de corpo de prova: $(18d + 150)$ mm
- b) distância entre apoios: $18d$
- c) corpo de prova: $(b \times d)$ mm², sem valores fixos
- d) módulo de ruptura à flexão: f_m

$$f_m = F_{\max}/(2w)$$

- e) esquema de ensaio:

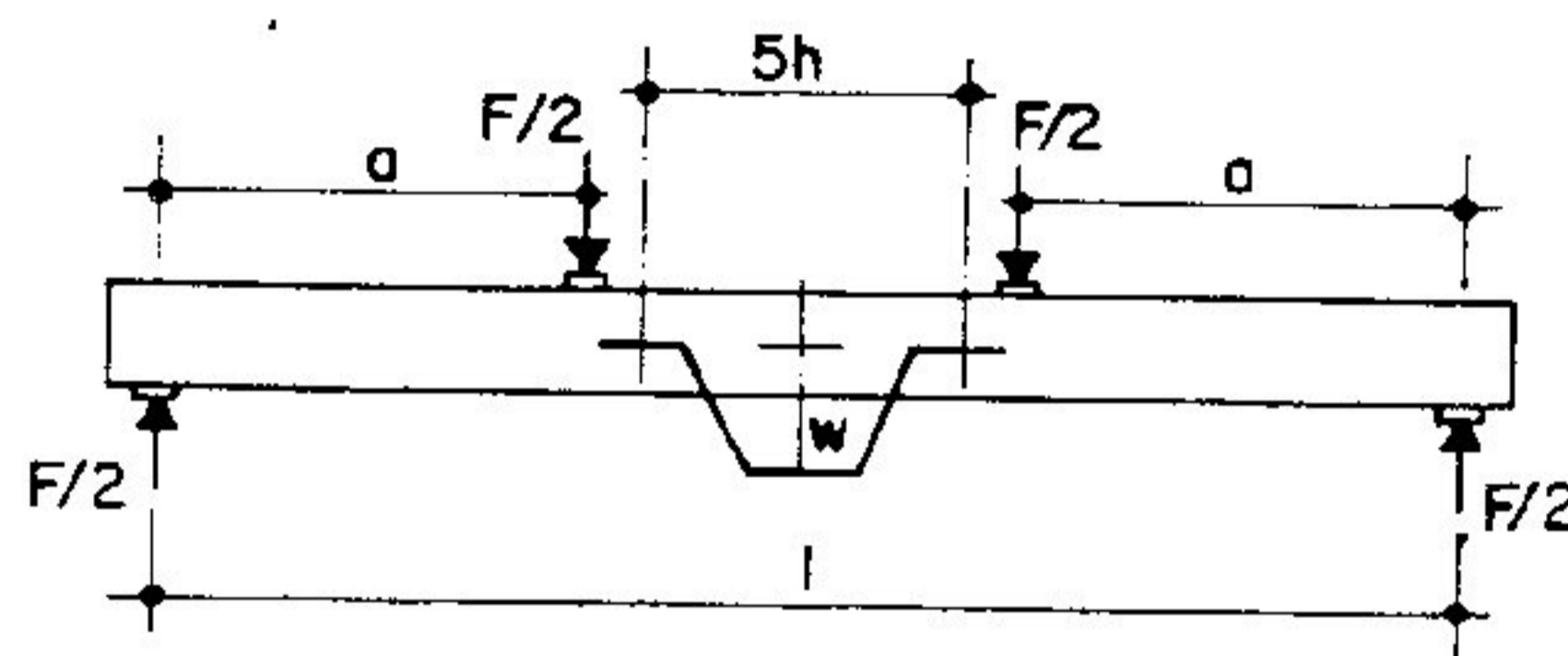


Figura 2.17 - Esquema de Ensaio segundo BS 5820

2.4.2.6 - Portugal: E.74 [43]

- a) corpo de prova: idem AFNOR B5-28
- b) módulo de resistência à flexão: σ_{FR} (idem B5-28)
- c) esquema de ensaio: idem AFNOR B5-28

CAPÍTULO 3

COMPOSIÇÃO DAS VIGAS DE SEÇÃO T

3.1 - Equipamentos

A parte experimental deste trabalho, ou seja, preparo das peças de madeira, montagem das vigas compostas, realização dos ensaios e coleta de dados, foi realizada através dos equipamentos do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES), da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EEUFMG).

Os equipamentos utilizados para o preparo das peças foram, basicamente: serra-circular, serra-de-fita, plaina, parafusadeira horizontal e as ferramentas convencionais de carpintaria.

Para a realização dos ensaios foi utilizado um pórtico de aplicação de carga composto por um cilindro hidráulico associado a um anel dinamométrico com capacidade de 300 kN. Aparelhos de apoio nas extremidades das vigas forneceram a vinculação isostática desejada (um apoio articulado fixo e outro apoio articulado móvel).

As medições de deslocamentos (vertical e horizontal) foram realizadas através de relógios comparadores com precisão de 10^{-2} mm para o deslocamento vertical no meio do vão e 10^{-3} mm para o deslocamento horizontal ou escorregamento entre mesa e alma no final da viga.

As deformações nos pontos estratégicos das peças da viga composta, na seção do meio do vão, foram obtidas pela colagem de extensômetros elétricos de resistência de, aproximadamente, 120Ω (kc-70-a1-11). Os valores das deformações se observaram através de uma mala de extensometria com precisão de 10^{-6} e capacidade para dez canais.

A largura e altura da seção transversal das peças ao longo do comprimento das vigas foram medidas através de um paquímetro com precisão de 10^{-1} mm.

3.2 - Peças Estruturais das Vigas de Madeira

O Angelim Pedra foi a espécie de madeira utilizada para a fabricação das vigas compostas de madeira. Esta espécie de madeira nativa no Brasil apresenta alta resistência mecânica, alto índice de homogeneidade e excelente comportamento estrutural.

Todas as peças de madeira já se encontravam disponíveis no LAEES antes mesmo do início da pesquisa, foram aproveitadas sem a necessidade de aquisição de outras espécies e já se encontravam há tempo suficiente para garantir que a hipótese da madeira em equilíbrio ao ar fosse efetivamente obedecida.

As dimensões das vigas compostas de madeira em seção do tipo T foram obtidas de peças com bitolas comerciais visando assim um melhor aproveitamento do material.

Para a determinação das dimensões das vigas em seção T seguiu-se, aproximadamente, as seguintes proporções: largura da alma igual a duas vezes a altura da mesa, largura da mesa igual a altura da alma. A relação vão/altura total da peça, l/h , para todas as vigas foi sempre maior que vinte e um para minorar a influência de deformações de cisalhamento nos deslocamentos verticais.

Seguindo-se as proporções mencionadas, o perfil T apresentou uma seção transversal composta de uma alma com dimensões de, aproximadamente, $(60 \times 140) \text{ mm}^2$ e uma mesa com dimensões de, aproximadamente, $(140 \times 30) \text{ mm}^2$.

No processo de obtenção das peças estruturais, as tábuas foram serradas ao meio para constituir, cada uma, duas mesas, enquanto que uma peça de seção retangular era utilizada para a formação da alma. Ambas as peças foram aplainadas para possibilitar uma homogeneidade das dimensões da seção retangular ao longo do comprimento das vigas. Em nenhum momento, houve a preocupação de se obter um fino acabamento das peças; objetivando-se assim, a racionalização da mão-de-obra empregada.

Os corpos-de-prova foram construídos em escala real, ou seja, em verdadeira grandeza, constituindo um total de seis mesas e seis almas para a composição de seis vigas que ficaram estocadas na oficina do LAEES, em umidade e temperatura ambiente.

As dimensões das peças estruturais, largura e altura, foram medidas ao longo do comprimento das mesmas de 500 em 500 mm. Os valores

indicados nas tabelas 3.1 e 3.2, representam a média de todos os valores obtidos para cada peça.

Mesas	b_m	h_m
-	(mm)	
M01	139,0	36,2
M02	138,7	35,5
M03	139,2	30,1
M04	138,3	31,0
M05	139,1	30,8
M06	138,7	28,9

Tabela 3.1 - Dimensões das Mesas

onde, b_m : largura das mesas ; h_m : altura das mesas

Almas	b_a	h_a
-	(mm)	
A01	59,5	139,5
A02	60,7	139,9
A03	60,2	139,5
A04	59,7	140,8
A05	60,5	140,0
A06	60,9	140,2

Tabela 3.2 - Dimensões das Almas

onde, b_a : largura das almas ; h_a : altura das almas

3.3 - Elemento de Ligação

Na escolha do elemento de ligação, procurou-se aquele que oferecesse principalmente facilidade na montagem dos perfis compostos. Sendo assim, aptou-se pela ligação pregada formada por pregos de bitolas e tamanhos comerciais.

O diâmetro do prego segundo Mantilla Carrasco atendeu à relação $6 < \lambda < 10$, sendo λ a relação entre a menor espessura da madeira (no caso, a espessura da mesa), e o diâmetro do prego. Tal relação atendeu plenamente as prescrições da norma brasileira NBR 7190, item 68, que recomenda que o diâmetro do prego seja menor ou igual a um sexto da menor espessura das peças estruturais.

Escolhido o diâmetro do prego, o comprimento comercial adotado foi aquele que atendesse às recomendações do Eurocode n.5, item 5.3.2, onde a penetração do prego na alma da viga deve ser maior ou igual a doze diâmetros para ligações que envolvem duas peças de madeira..

Finalmente, o prego comercial adotado para as vigas compostas foi o prego de fabricação da Siderúrgica Mendes Junior, (21x42) com diâmetro de, aproximadamente, 5 mm e comprimento de, aproximadamente, 95 mm conforme a figura 3.1

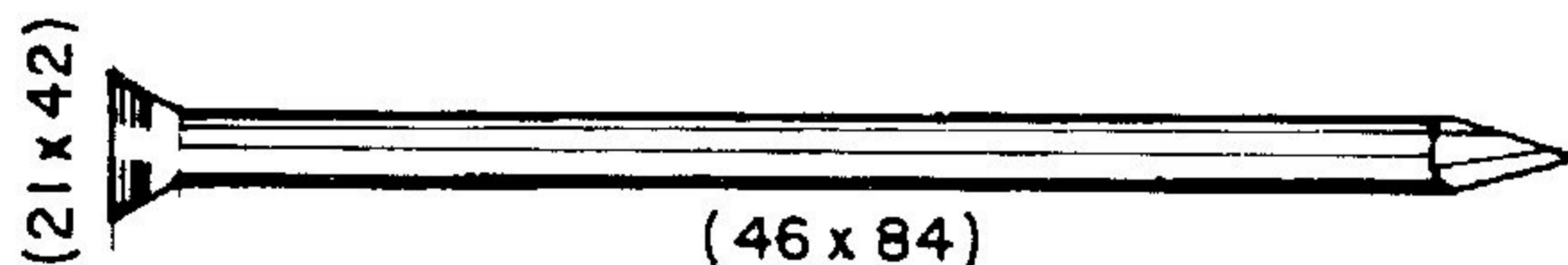


Figura 3.1 - Pregos Comerciais (21x42)

3.4 - Montagem das Vigas Compostas

Escolhido o elemento de ligação das peças de madeira, conforme descrito no item anterior, o passo seguinte foi especificar o espaçamento deste elemento ao longo do comprimento da viga composta. Em virtude da relação l/h (vão sobre altura total da viga) ser maior que vinte e um, obviamente, o principal objetivo foi a minimização dos deslocamentos verticais das vigas. Para isto, a solução foi adotar um grande número de pregos para se obter uma rigidez real do perfil composto o mais próximo possível da rigidez teórica da seção T. A hipótese de variar o número de pregos ao longo da viga foi descartada em função da possível perda de extensômetros proveniente do processo de choque do martelo durante a penetração dos pregos.

Conforme a tabela 15 da DIN 1052 e do item 5.3.2 do Eurocode n.5, o espaçamento mínimo entre eixos dos pregos é prescrito como sendo igual a, aproximadamente, cinco vezes o seu diâmetro para esforço paralelo às fibras. A norma brasileira, NBR 7190, item 42, determina que o espaçamento mínimo de parafusos seja quatro vezes o seu diâmetro. Diante do comprimento de, aproximadamente, 4400 mm das vigas, tornou-se inviável a realização de se adotar um espaçamento desta ordem. Então, buscou-se no trabalho do prof. Mantilla Carrasco, que prevê um espaçamento mínimo em torno de dez diâmetros para ligações pregadas. Sendo assim, o espaçamento dos pregos para este trabalho ficou sendo de 10 x 5mm, ou seja, 50mm..

Escolhido o espaçamento dos pregos, as peças, mesas e almas foram marcadas para início da pré-furação. Inicialmente, todas as seis mesas foram riscadas à lápis de 50 em 50 mm na face superior que continha a sua etiqueta devidamente numerada. Após isto, as almas foram postas em contato com as mesas para se obter a mesma marcação, garantindo que o prego ao atravessar a mesa encontrasse na alma a posição correta.

Para se equilibrar o fluxo de cisalhamento ao longo do contato entre mesa e alma apenas uma linha de pregos foi executada. Os pregos foram dispostos simetricamente em relação ao eixo da peça tomando-se o cuidado de se deixar entre dois pregos subsequentes um afastamento de um centímetro entre eixos para se evitar o aparecimento de um plano preferencial de fendilhamento da madeira durante a cravação dos pregos de acordo com a figura 3.2

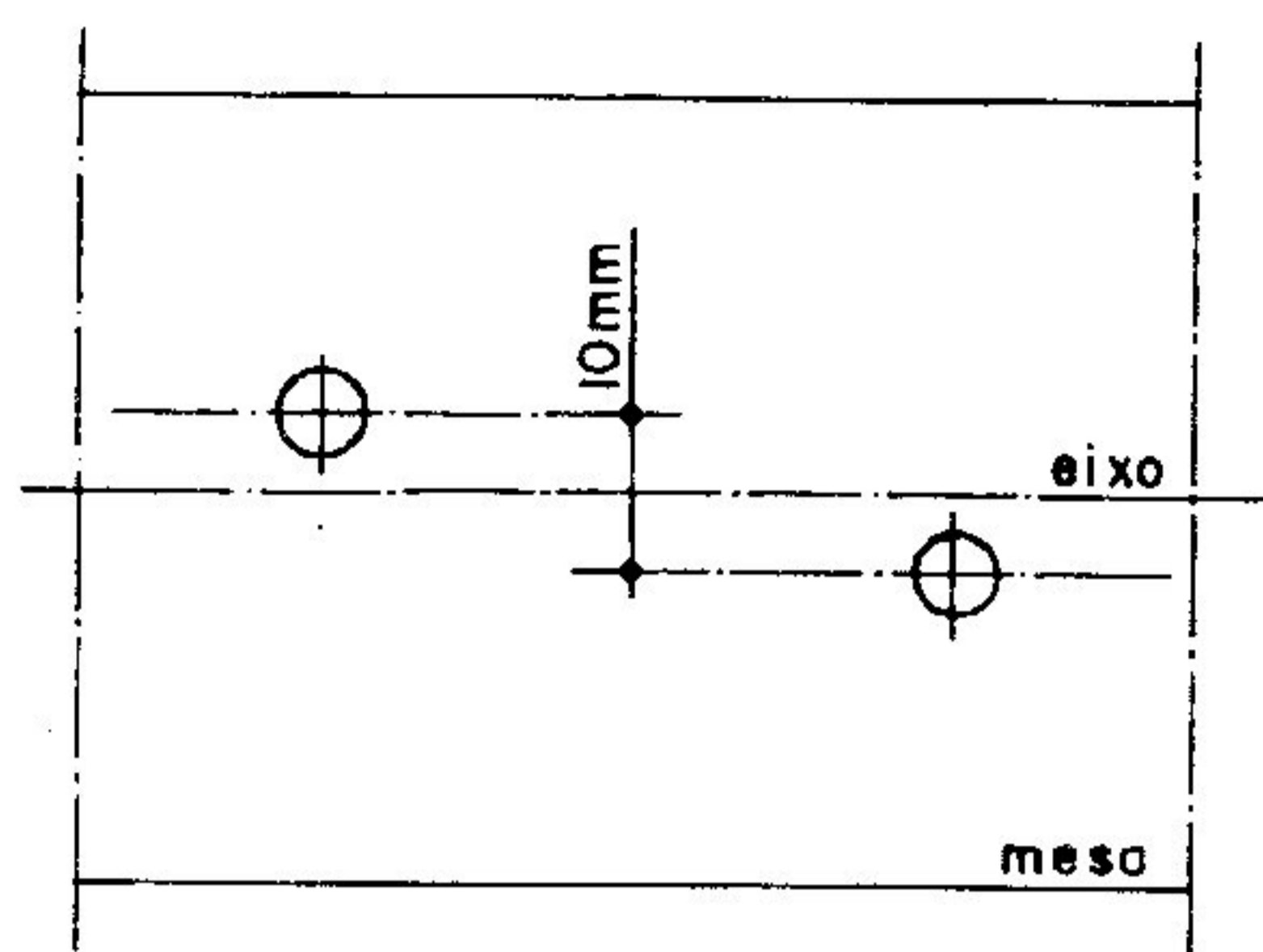


Figura 3.2 - Vista Superior - Defasagem dos Pregos ao Longo da Viga

Foram respeitadas as distâncias mínimas do centro dos pregos às extremidades das peças para esforços paralelos às fibras em ambos os apoios segundo a norma brasileira NBR 7190 em seu item 42 que estabelece cerca de quatro vezes o diâmetro do conector. Para as vigas compostas, o espaçamento adotado foi de 50 mm conforme mostrado na figura 3.3

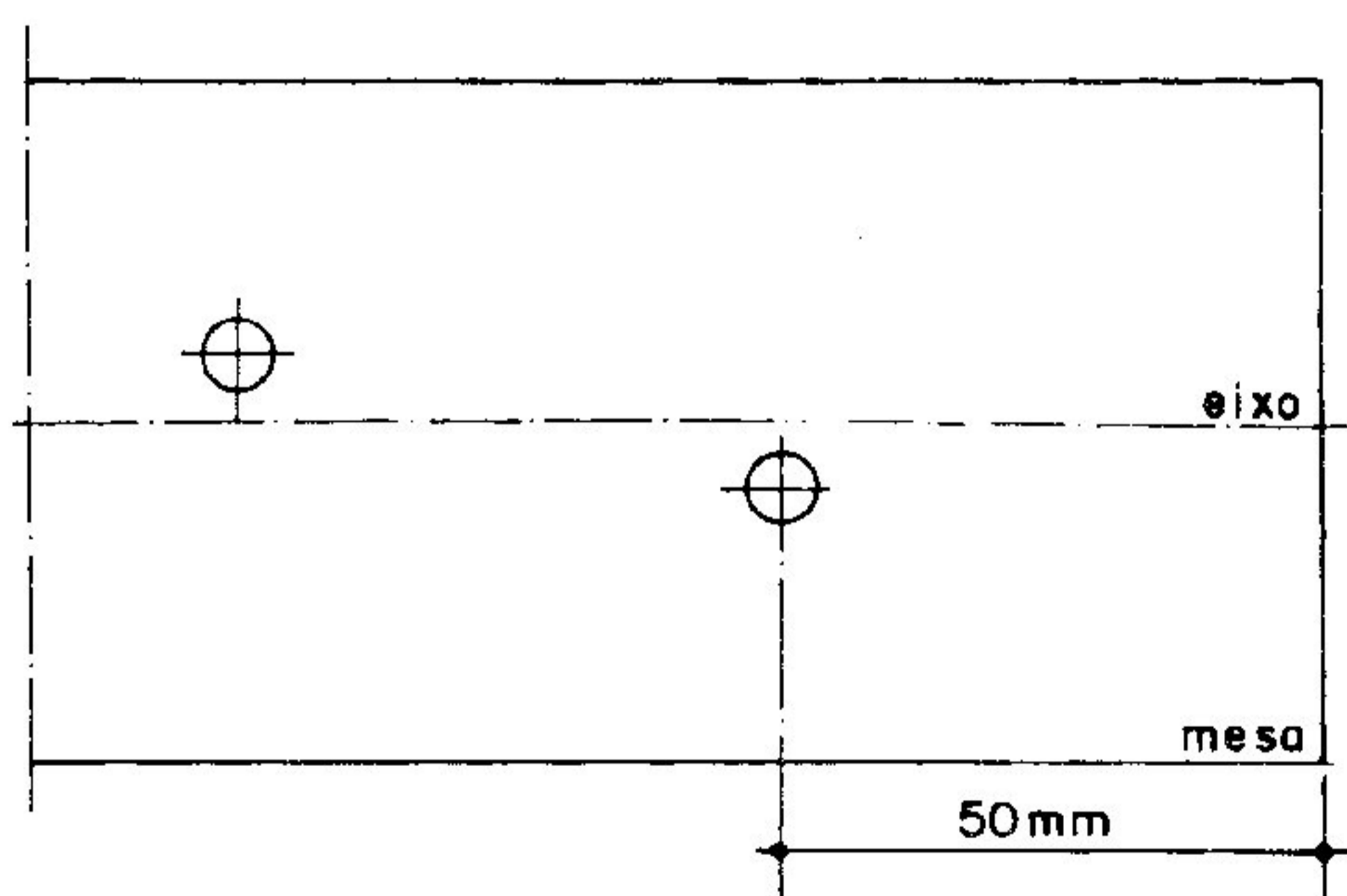


Figura 3.3 - Vista Superior - Distância do Último Prego às Extremidades da Viga

O diâmetro de perfuração das mesas foi levemente maior que o diâmetro do prego de tal forma que possibilitasse a livre passagem do mesmo. A pré-furação da alma conforme prescreve a norma americana NDS, ítem 8.81.5 foi em torno de 90% do diâmetro do prego de acordo com a classificação do grupo I desta norma que se aplica ao estudo em questão.

Com a máquina de perfuração horizontal na posição de iniciar a pré-furação, todos os furos numa mesma linha foram primeiramente executados em todas as peças utilizando uma broca de diâmetro de, aproximadamente, 5,1mm para as mesas e 4,3mm para as almas. Deslocando-se a posição original das brocas de perfuração, de dez milímetros, novamente, todas as peças foram levadas à máquina para conclusão dos furos restantes. O processo descrito acima possibilitou que ao longo do comprimento das peças os furos das mesas coincidiram com os furos das almas com incrível precisão. Isto pode ser constatado durante a cravação dos pregos nas almas das vigas compostas.

A face superior das almas foi devidamente preenchida ao longo de toda a sua extensão com uma fina camada de parafina para possibilitar o escorregamento da mesa em relação à alma e garantir o efetivo trabalho dos pregos na absorção das tensões de cisalhamento.

Antes do início da união da mesa com a alma tomou-se o devido cuidado de manter a posição da peça do mesmo lado que fora ensaiada individualmente para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal. Este cuidado foi importante para que no cálculo do módulo de elasticidade longitudinal da seção composta, E_t , os valores individuais dos módulos das peças, eventualmente, não pudessem mudar (ver ensaios preliminares no capítulo 4).

A tabela 3.3, a seguir, apresenta as dimensões das peças para composição das vigas além da posição do centro de gravidade da seção composta, y_{cg} , o vão teórico, l e a relação vão sobre altura total da viga, l/h .

A figura 3.4 mostra o aspecto da seção transversal das peças, mesa e alma, das vigas compostas.

Vigas	b_m	h_m	b_a	h_a	y_{cg}^*	l	l/h
-	(mm)						-
V01	139,0	36,2	59,5	139,5	102,9	4400	25,0
V02	138,7	35,5	60,7	139,9	102,2	4400	25,1
V03	139,2	30,1	60,2	139,5	98,0	4300	25,4
V04	138,3	31,0	59,7	140,8	99,4	4400	25,6
V05	139,1	30,8	60,5	140,0	98,7	4300	25,2
V06	138,7	28,9	60,9	140,2	97,1	4400	26,0

(*) - medido a partir da face inferior da viga (considerando-se a peça como se fosse uma viga maciça)

Tabela 3.3 - Dimensões das Vigas Compostas

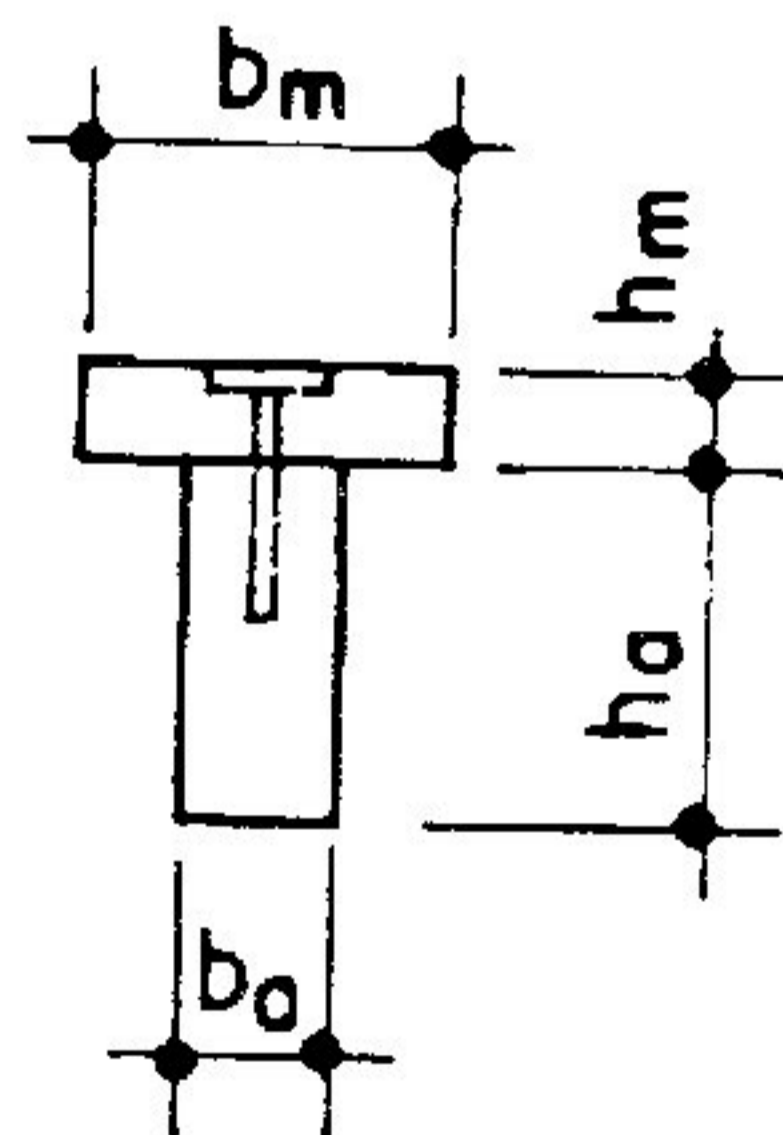


Figura 3.4 - Seção Transversal das Vigas

CAPÍTULO 4

ENSAIOS PRELIMINARES

4.1 - Determinação do Módulo de Elasticidade Longitudinal das Peças

Os elementos de composição das vigas T, ou seja, mesa e alma, foram ensaiados, isoladamente, para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal à flexão. Para isto, foi realizado o ensaio de flexão estática com uma carga centrada no meio do vão das peças. Todos os ensaios foram conduzidos na faixa elástica de sollicitação do material, não se atingindo, em nenhum momento, o limite de proporcionalidade da madeira.

O lado superior de cada peça foi devidamente marcado por M01, M02, M03, M04, M05 e M06 para identificação das mesas e por A01, A02, A03, A04, A05 e A06 para identificação das almas. Durante a execução dos ensaios tomou-se sempre o cuidado de garantir que estas marcações estivessem voltadas para cima convencionalmente. Posteriormente, o mesmo cuidado foi tomado durante a montagem das vigas compostas, com o interesse de se garantir que a posição da peça isolada fosse a mesma na composição.

O módulo de elasticidade longitudinal das peças foi determinado pela expressão clássica do deslocamento vertical no meio do vão de uma viga biapoiada submetida à uma carga centrada neste ponto, ou seja, $f = (P.l^3/48.E.I)$, desprezando-se o efeito da força cortante. Essa expressão pode ser reescrita explicitando-se o módulo de elasticidade $E = (P.l^3/48.I.f)$,

onde: P : carga no meio do vão da peça;

l : vão da peça (igual a 3 metros para todas as vigas);

I : momento de inércia da seção transversal da peça em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade e é paralelo à sua base (ver tabela 4.1);

f : deslocamento vertical no meio do vão da peça;

E : módulo de elasticidade longitudinal da peça.

Mesas	I	Almas	I
-	(x10 ⁴ mm ⁴)	-	(x10 ⁴ mm ⁴)
M01	54,95	A01	1346,04
M02	51,71	A02	1385,03
M03	31,63	A03	1361,88
M04	34,33	A04	1388,68
M05	33,87	A05	1383,43
M06	27,90	A06	1398,56

Tabela 4.1 - Momentos de Inércia das Peças

As leituras dos deslocamentos verticais foram realizadas com as cargas de (24, 48, 72 e 96) N para as mesas e com (458, 916, 1374, 1832, 2290 e 2748) N para as almas devido à diferença de rigidez das peças. Três ciclos de carregamento foram aplicados em cada peça ensaiada, obtendo-se assim, três valores de deslocamento vertical para cada carga. Com a média dos três deslocamentos verticais, foi determinado um módulo de elasticidade denominado E_i (ver tabelas 4.2 a 4.13). O módulo de elasticidade longitudinal de cada peça, foi determinado pela média dos n valores de E_i . Os módulos de elasticidade das mesas receberam a terminologia E_{mi} e das almas E_{ai} (ver tabela 4.14).

O carregamento aplicado foi sempre perpendicular ao eixo de menor inércia para as mesas (ver figura 4.1), enquanto que para as almas, foi sempre perpendicular ao eixo de maior inércia (ver figura 4.2) conforme a posição de cada peça na composição das vigas T. O nível de carregamento das mesas foi bem inferior aos das almas em função das diferentes rigidezes e, propositadamente, se encontrou muito abaixo do limite de proporcionalidade da madeira.

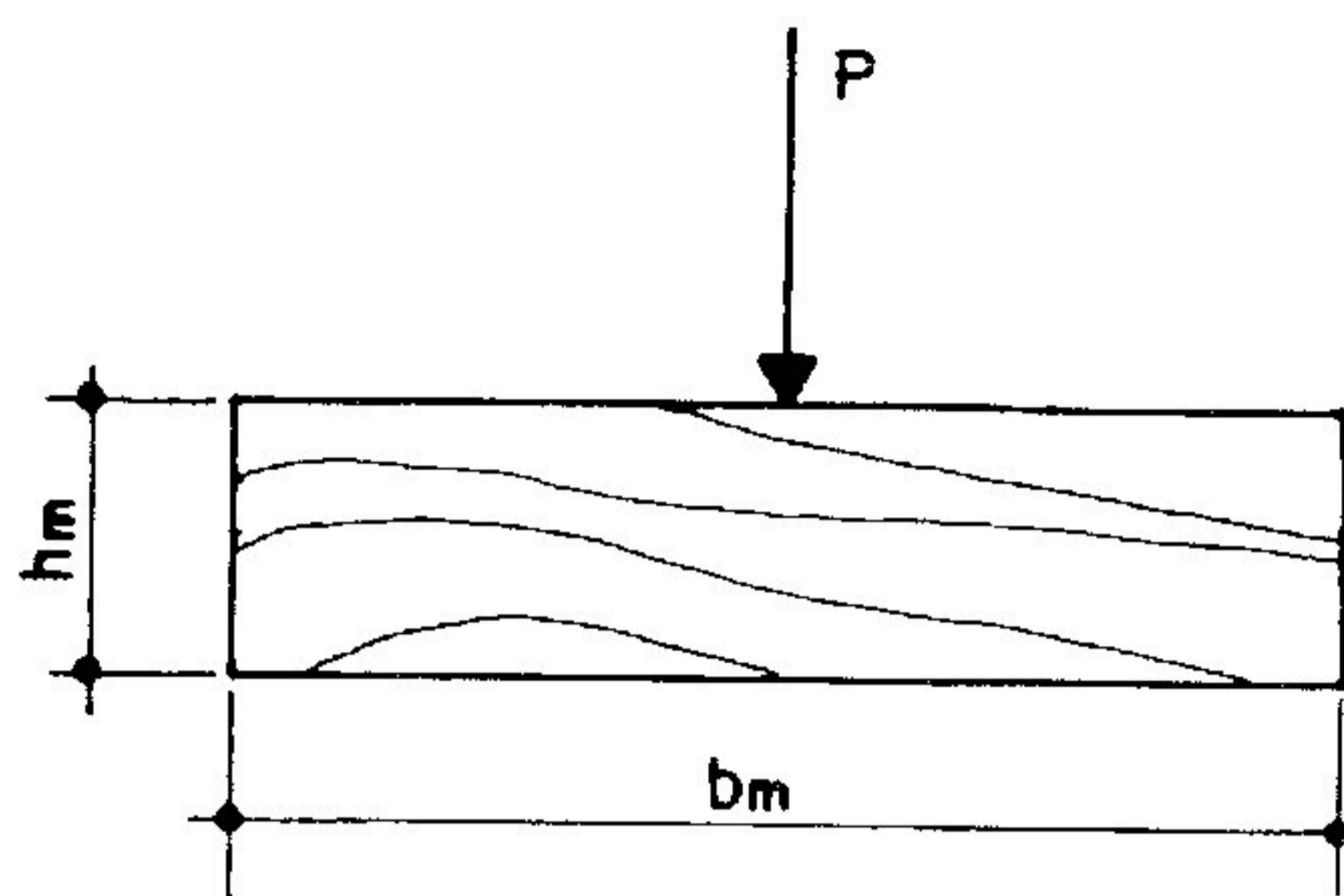


Figura 4.1 - Posição da Carga no Ensaio das Mesas

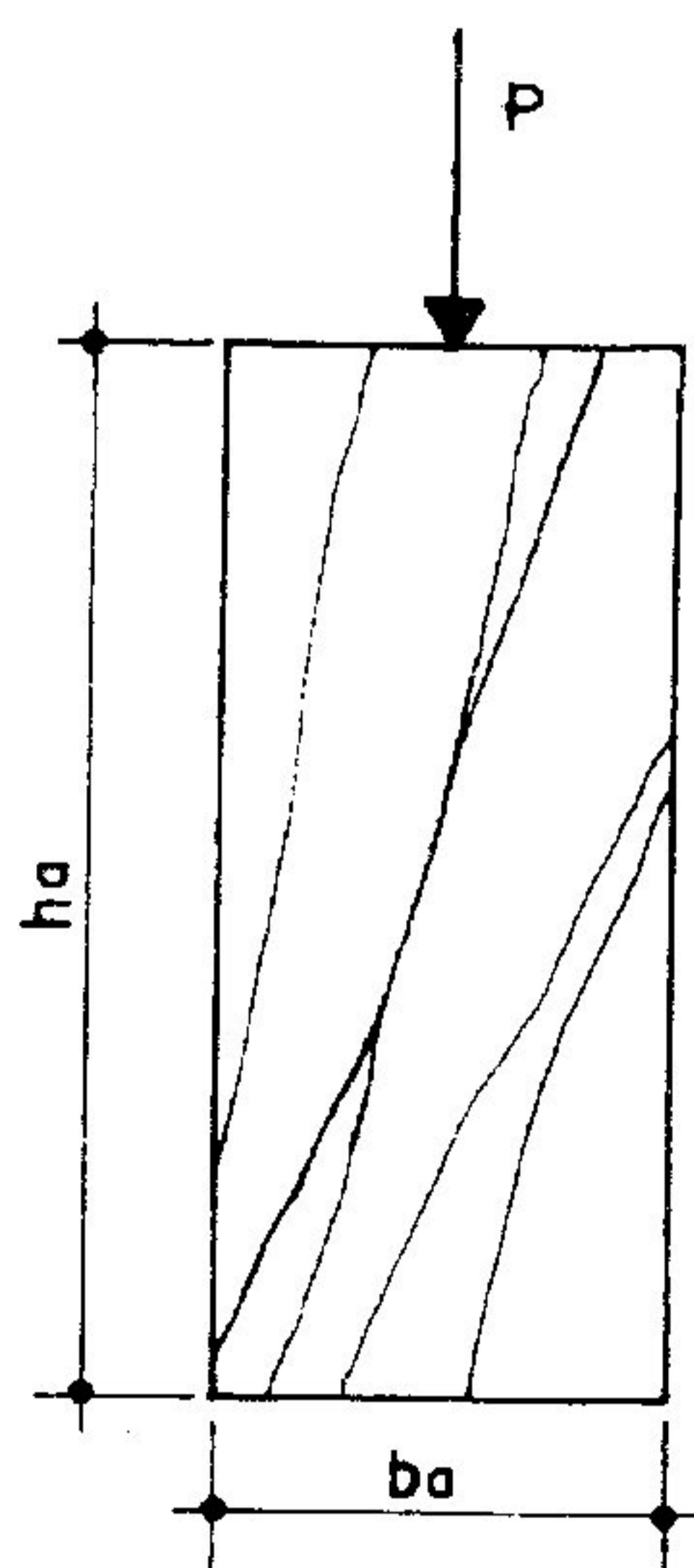


Figura 4.2 - Posição da Carga no Ensaio das Almas

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	216	223	219	219	11220
48	441	447	445	444	11070
72	671	674	677	674	10940
96	903	906	907	905	10860

Tabela 4.2 - Deslocamentos Verticais f_j e Módulos de Elast. E_i de M01

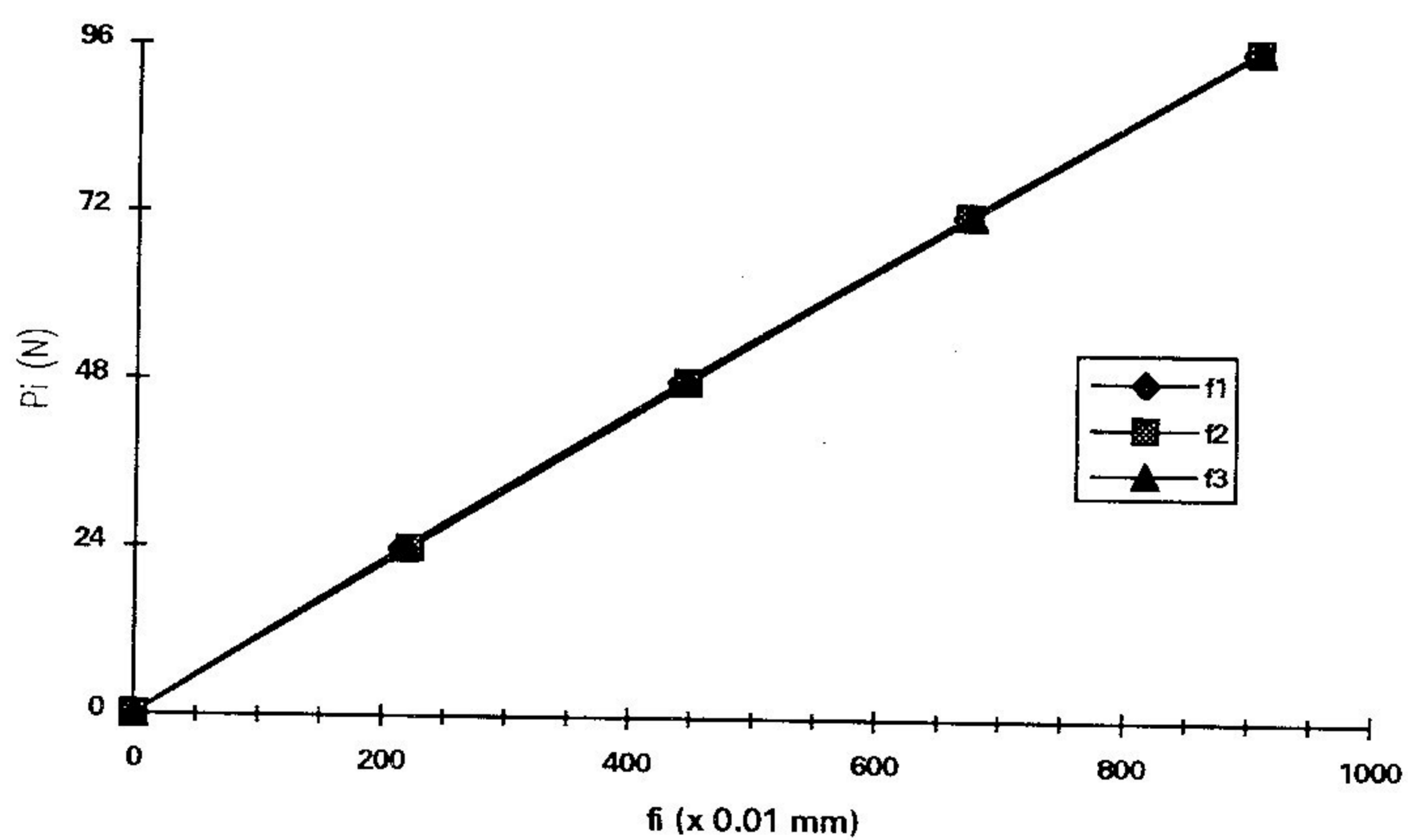


Gráfico 4.1.- Curva Carga-Desl. Vert. de M01

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	319	317	327	321	8130
48	641	637	641	640	8160
72	965	965	967	966	8110
96	1290	1290	1285	1288	8110

Tabela 4.3 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de M02

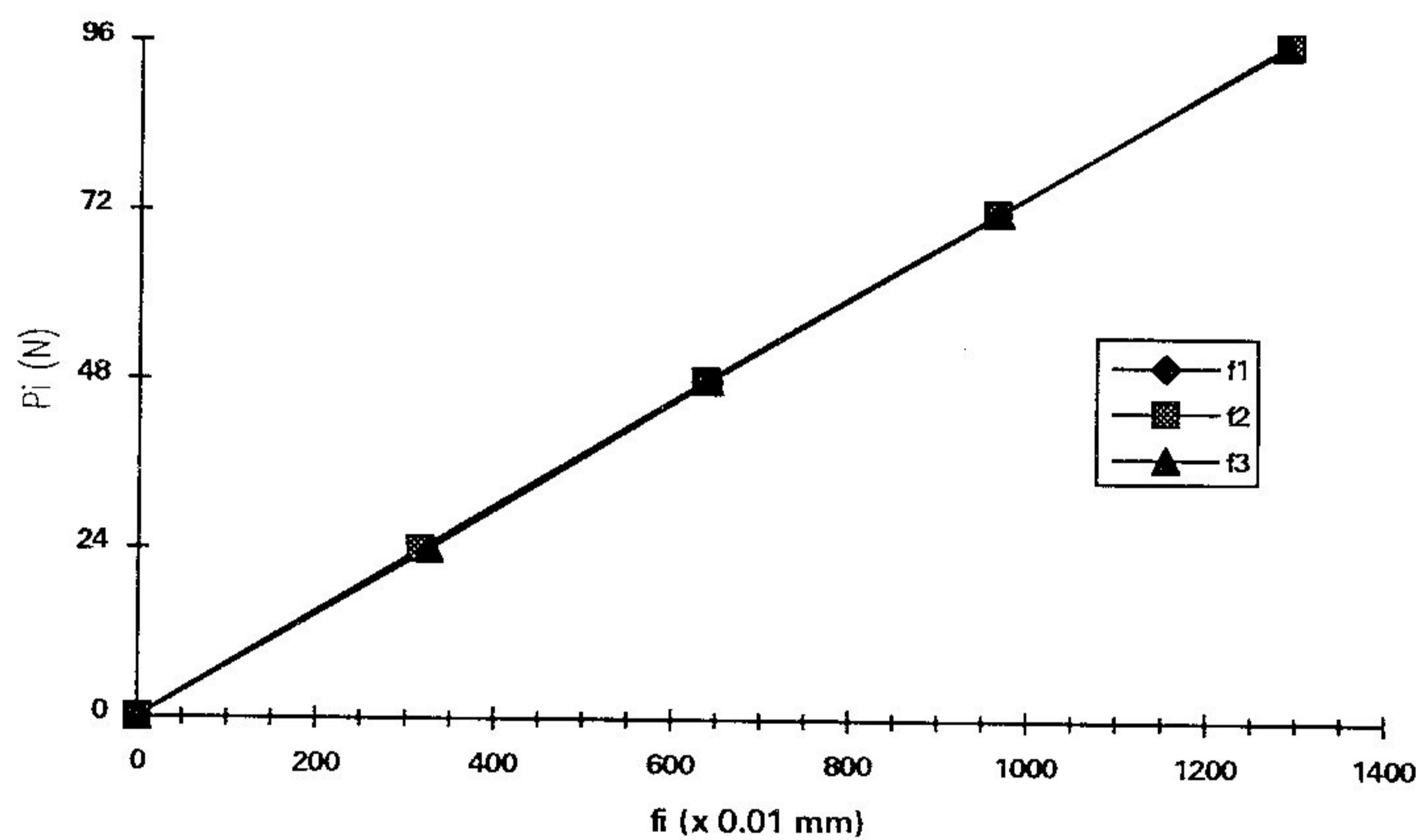


Gráfico 4.2.- Curva Carga-Desl. Vert. de M02

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	299	295	297	297	14370
48	605	595	602	601	14200
72	915	903	911	910	14070
96	1223	1218	1219	1220	13990

Tabela 4.4 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de M03

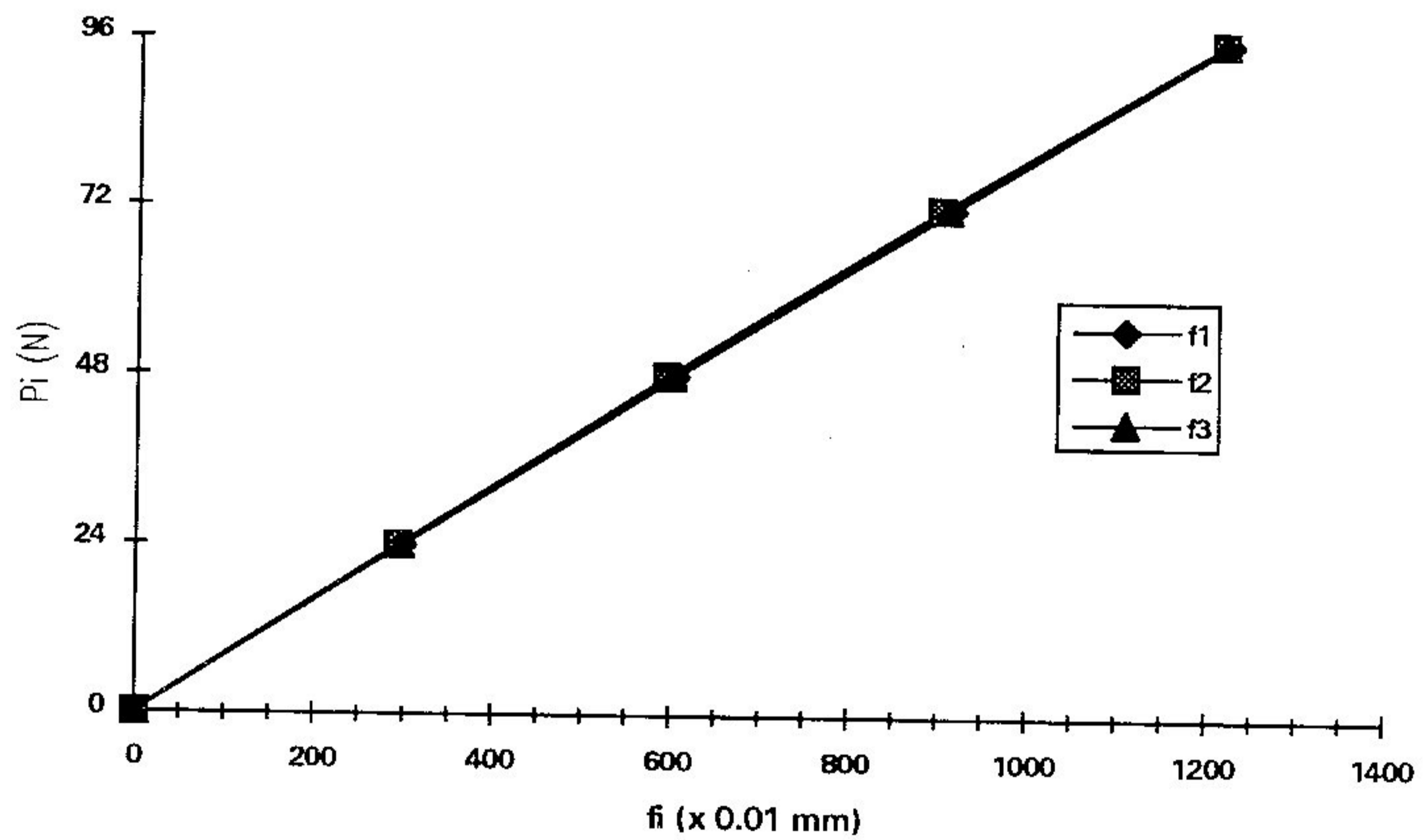


Gráfico 4.3.- Curva Carga-Desl. Vert. de M03

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	398	403	394	398	9880
48	800	803	795	799	9840
72	1209	1213	1203	1208	9770
96	1622	1621	1615	1619	9720

Tabela 4.5 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de M04

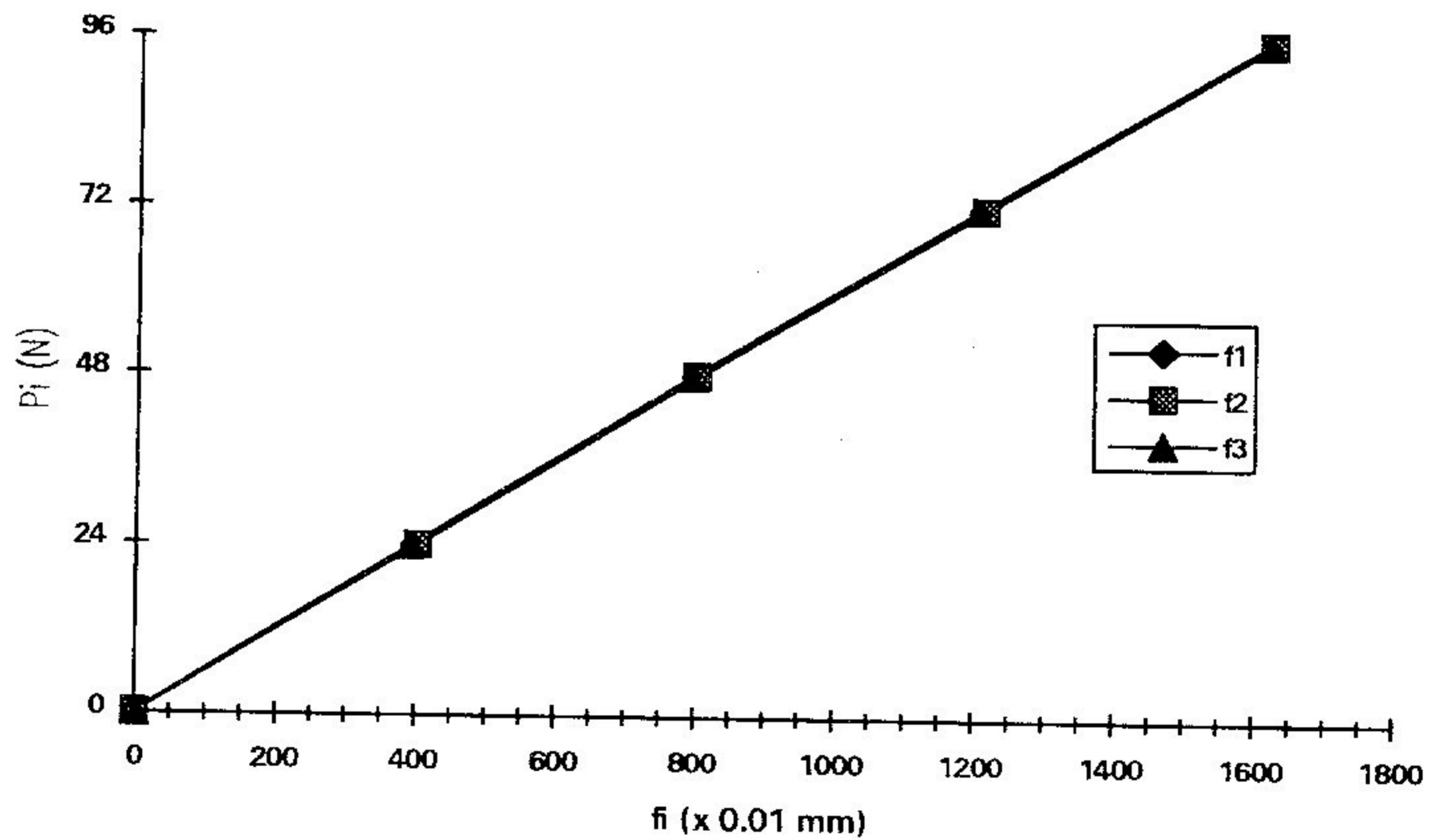


Gráfico 4.4 - Curva Carga-Desl. Vert. de M04

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	272	273	274	273	14600
48	547	544	547	546	14600
72	825	821	823	823	14530
96	1103	1102	1107	1104	14440

Tabela 4.6 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de M05

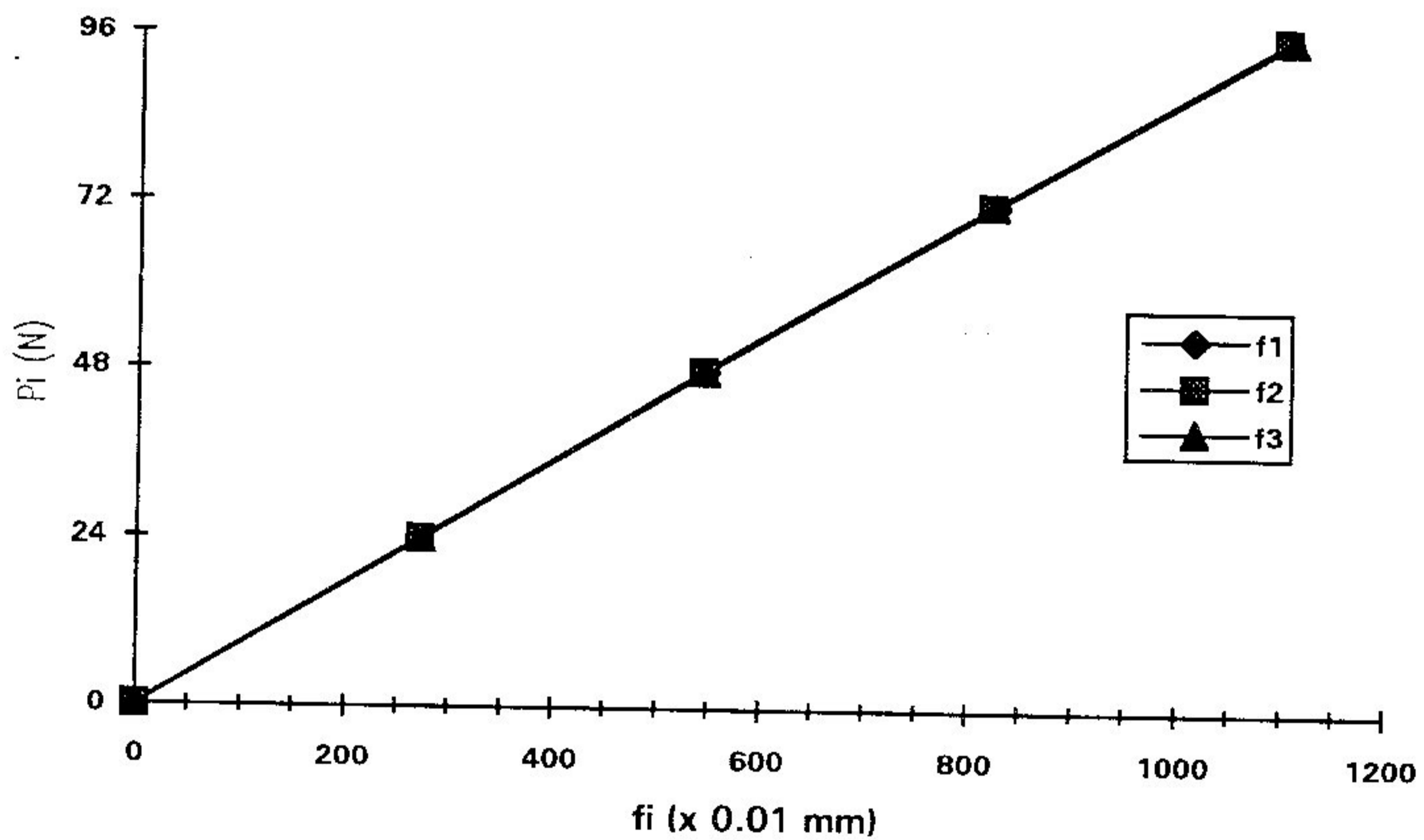


Gráfico 4.5 - Curva Carga-Desl. Vert. de M05

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
24	306	300	296	301	16080
48	597	593	592	594	16290
72	902	893	894	896	16200
96	1204	1196	1197	1199	16140

Tabela 4.7 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de M06

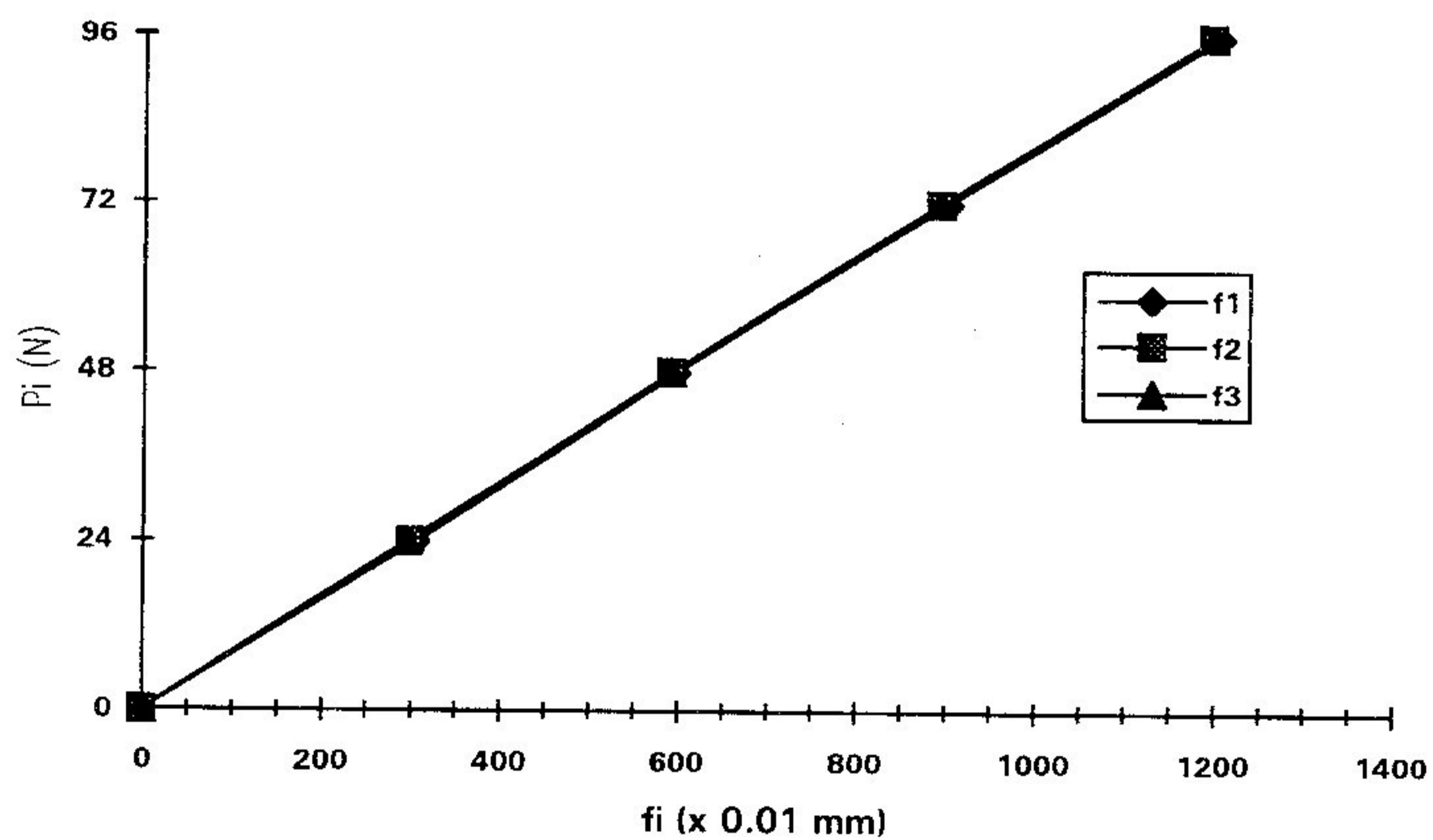


Gráfico 4.6 - Curva Carga-Desl. Vert. de M06

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
458	275	276	283	278	6880
916	497	495	487	493	7760
1374	670	668	687	685	8510
1832	860	848	837	848	9030
2290	1036	1003	995	1011	9470
2748	1209	1181	1175	1188	9670

Tabela 4.8 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A01

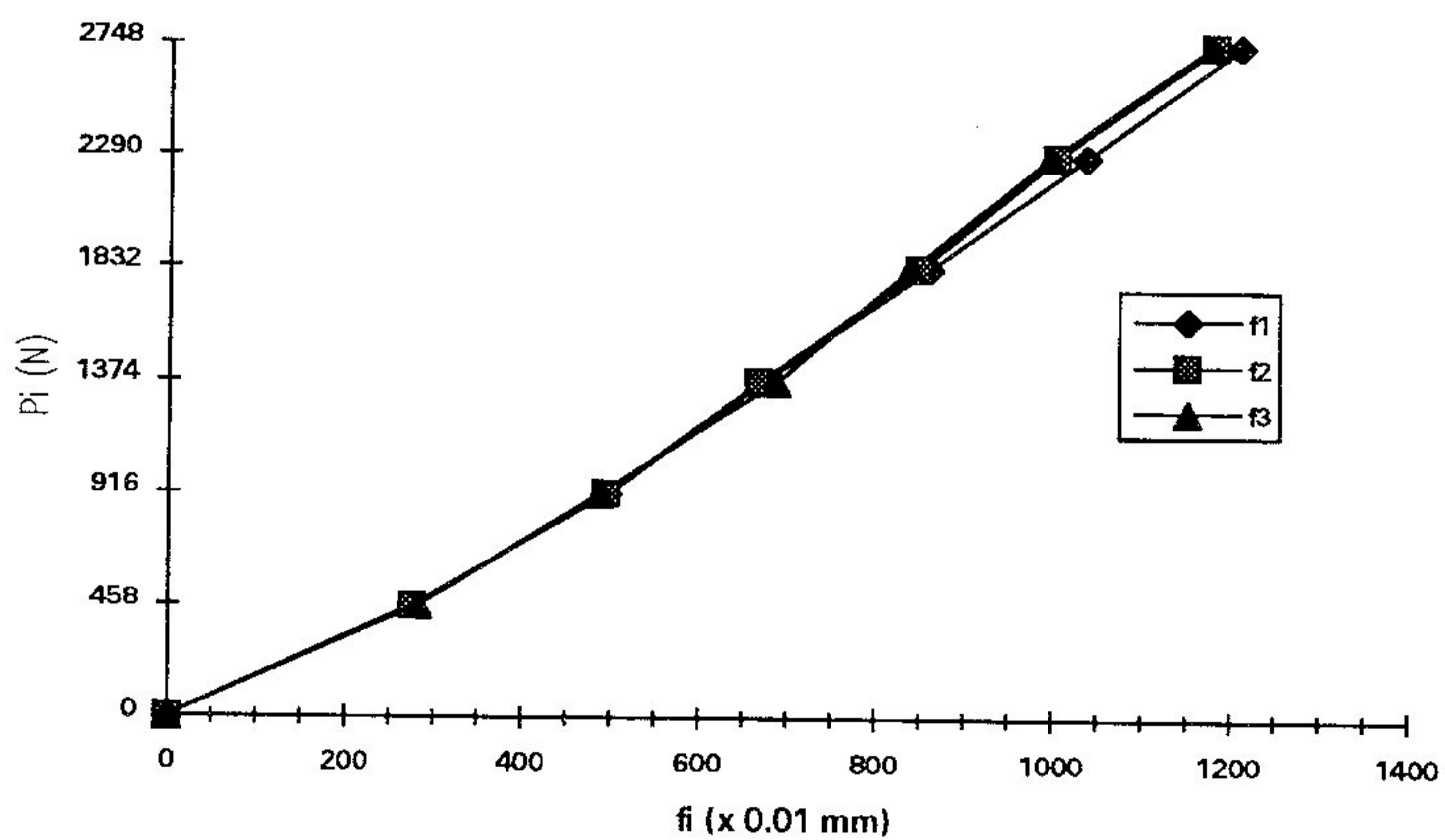


Gráfico 4.7 - Curva Carga-Desl. Vert. de A01

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
458	336	341	324	334	5570
916	585	585	550	573	6490
1374	820	815	790	808	6910
1832	1060	1045	1035	1047	7110
2290	1278	1270	1250	1266	7350
2748	1472	1479	1467	1473	7580

Tabela 4.9 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A02

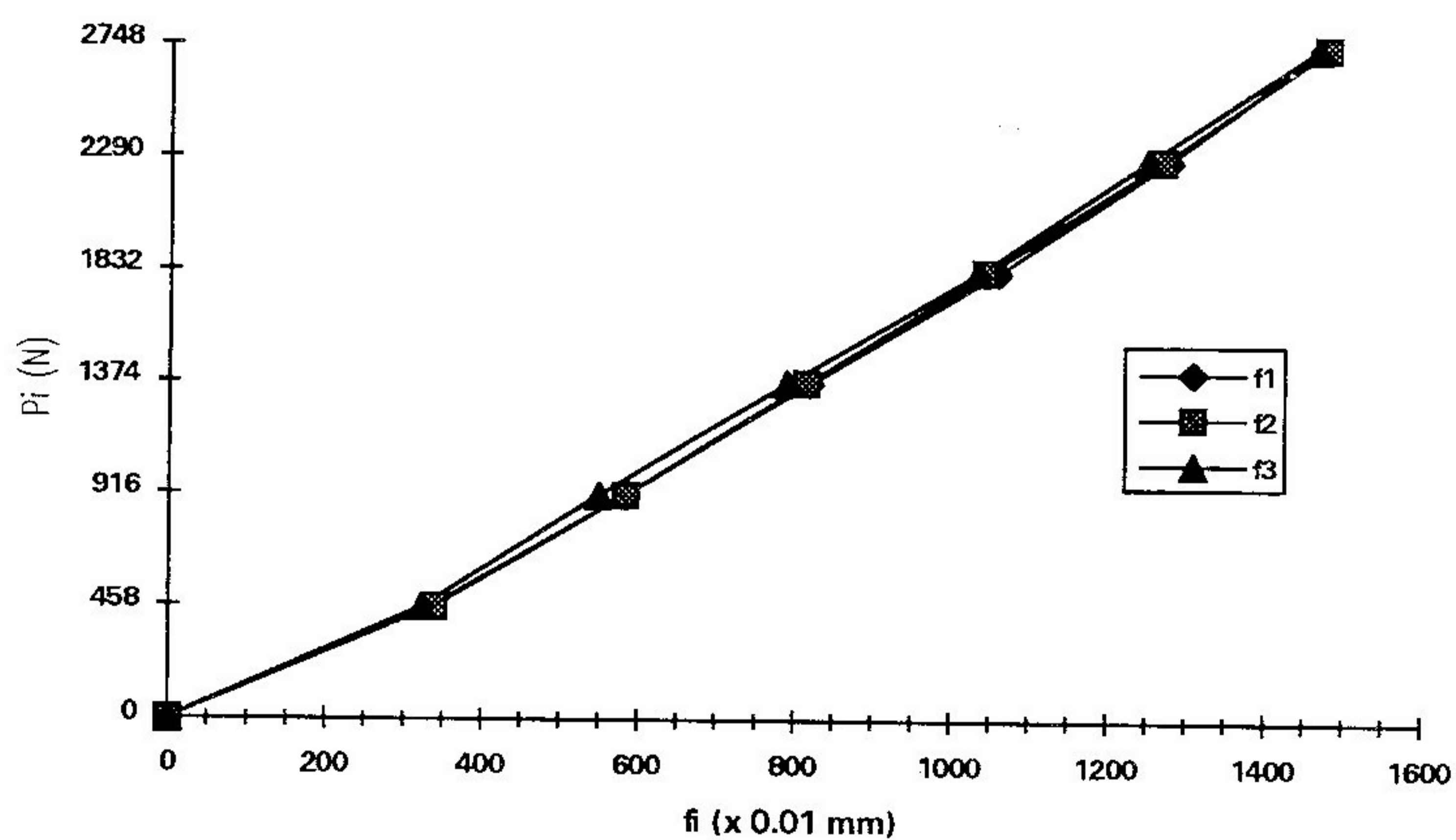


Gráfico 4.8- Curva Carga-Desl. Vert. de A02

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
458	333	335	322	330	5730
916	559	552	545	552	6850
1374	758	770	762	763	7440
1832	999	982	977	986	7670
2290	1209	1199	1194	1201	7880
2748	1421	1415	1395	1410	8050

Tabela 4.10 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A03

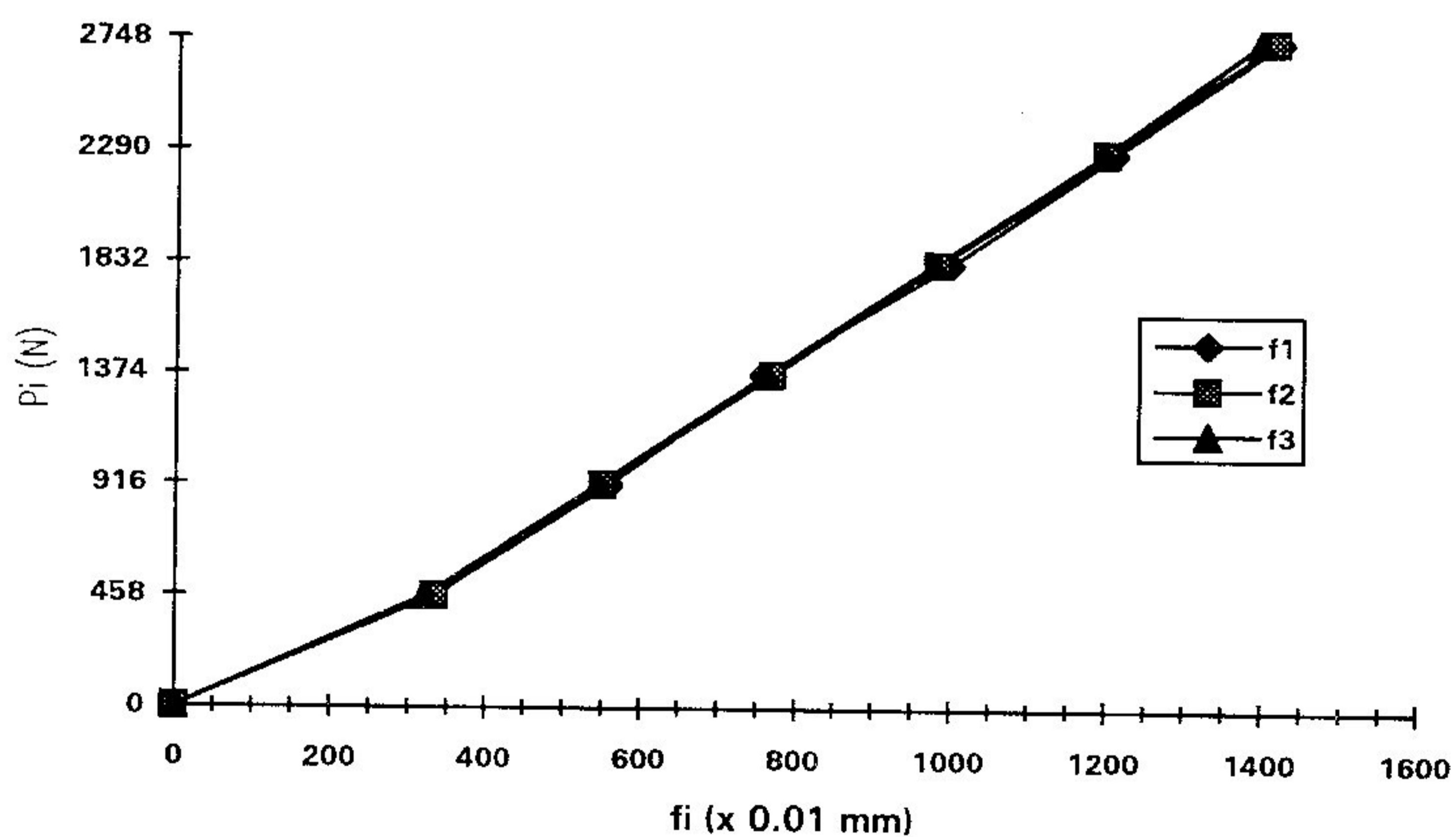


Gráfico 4.9 - Curva Carga-Desl. Vert. de A03

Pi	f ₁	f ₂	f ₃	f	E _i
(N)	(x10 ⁻² mm)				(N/mm ²)
458	314	294	286	298	6230
916	516	501	500	506	7330
1374	739	717	713	723	7700
1832	930	914	916	920	8070
2290	1137	1121	1113	1124	8250
2748	1326	1309	1299	1311	8490

Tabela 4.11 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A04

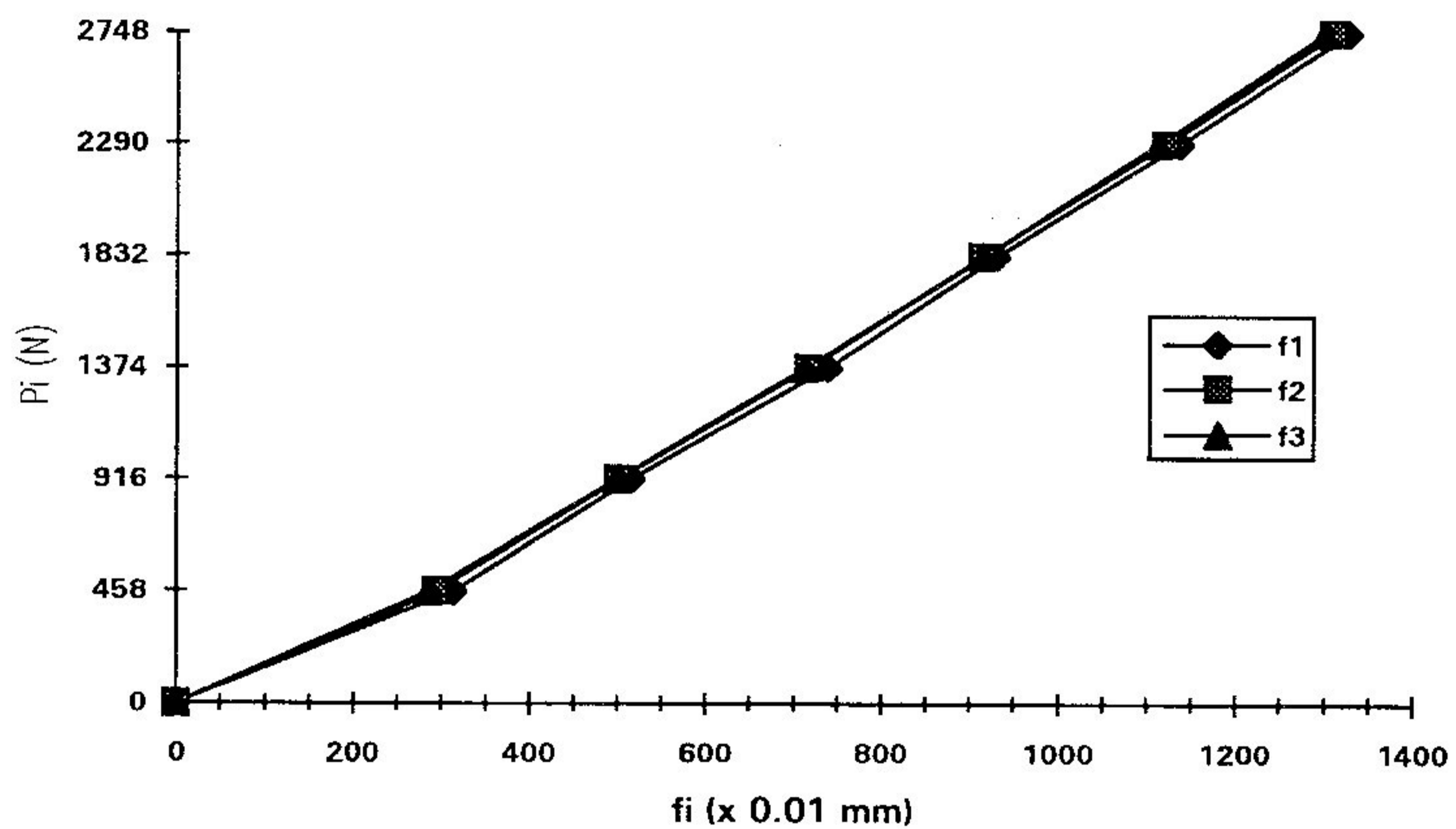


Gráfico 4.10- Curva Carga-Desl. Vert. de A04

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
458	337	277	275	296	6290
916	531	477	457	488	7630
1374	697	628	640	655	8530
1832	885	808	829	841	8860
2290	1080	990	1011	1027	9070
2748	1252	1195	1199	1215	9200

Tabela 4.12 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A05

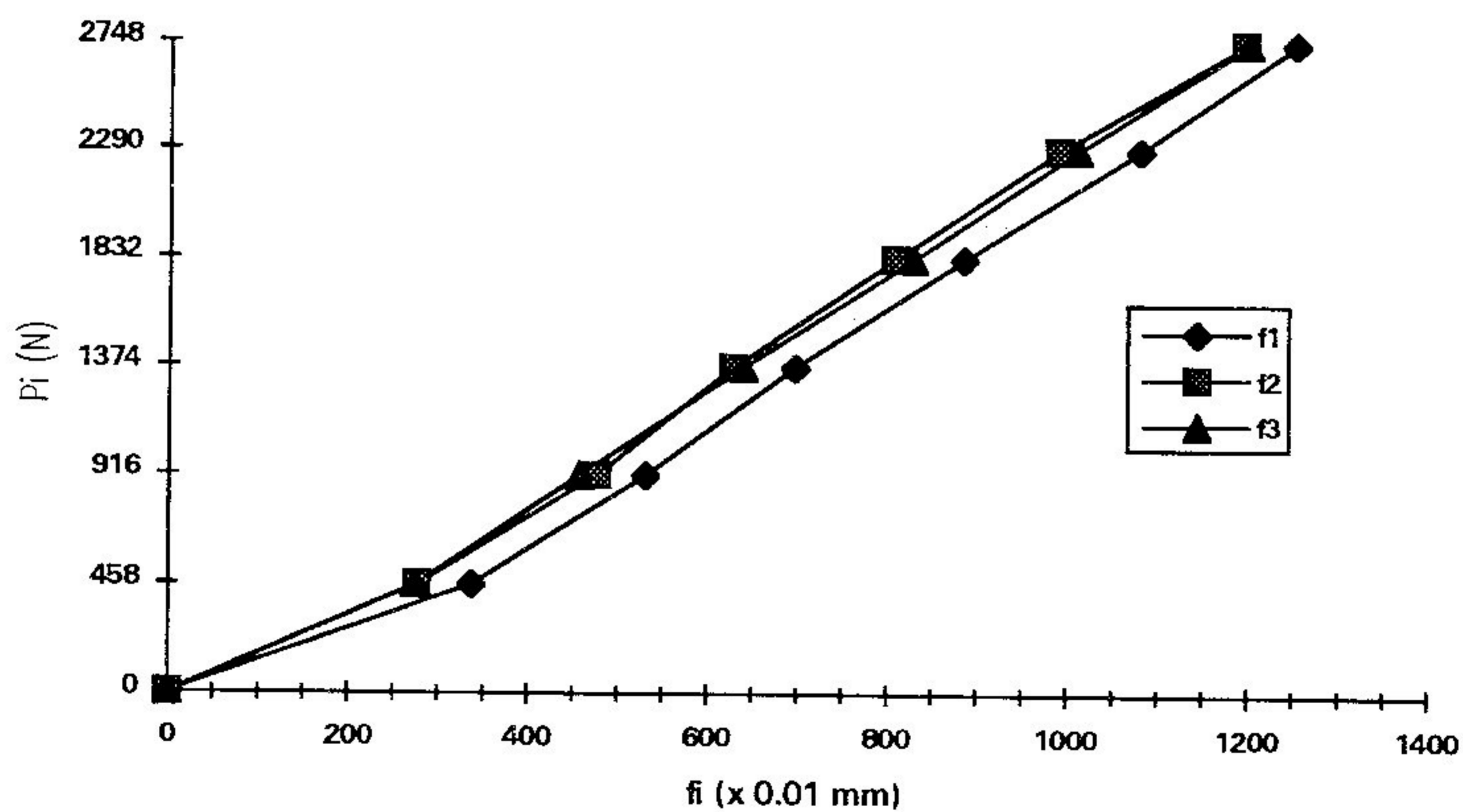


Gráfico 4.11 - Curva Carga-Desl. Vert. de A05

P_i	f_1	f_2	f_3	f	E_i
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$				(N/mm^2)
458	254	244	252	250	7370
916	410	414	422	415	8880
1374	575	611	597	594	9300
1832	759	778	783	773	9530
2290	927	944	909	927	9940
2748	1066	1108	1078	1084	10200

Tabela 4.13 - Deslocamentos Verticais f_i e Módulos de Elast. E_i de A06

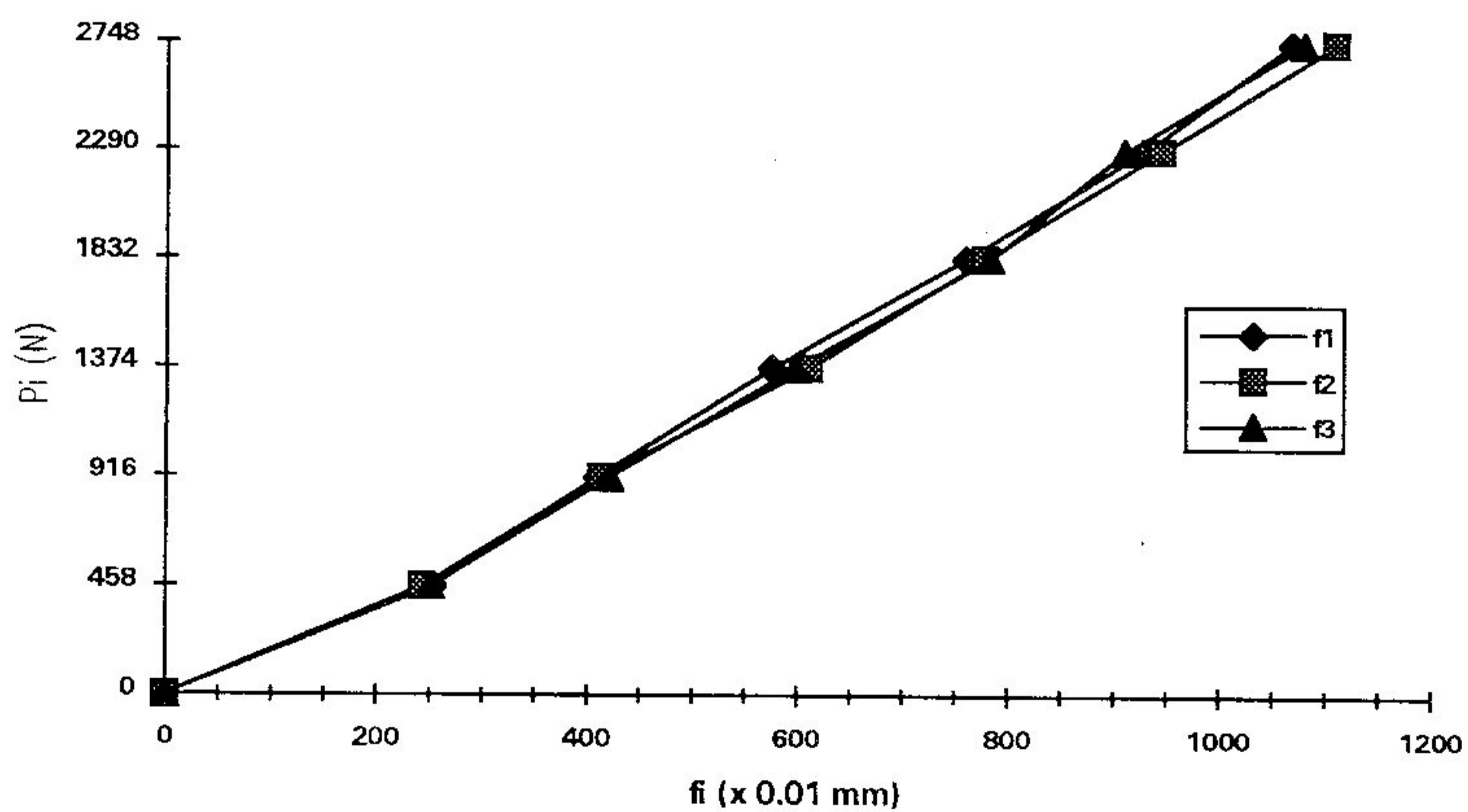
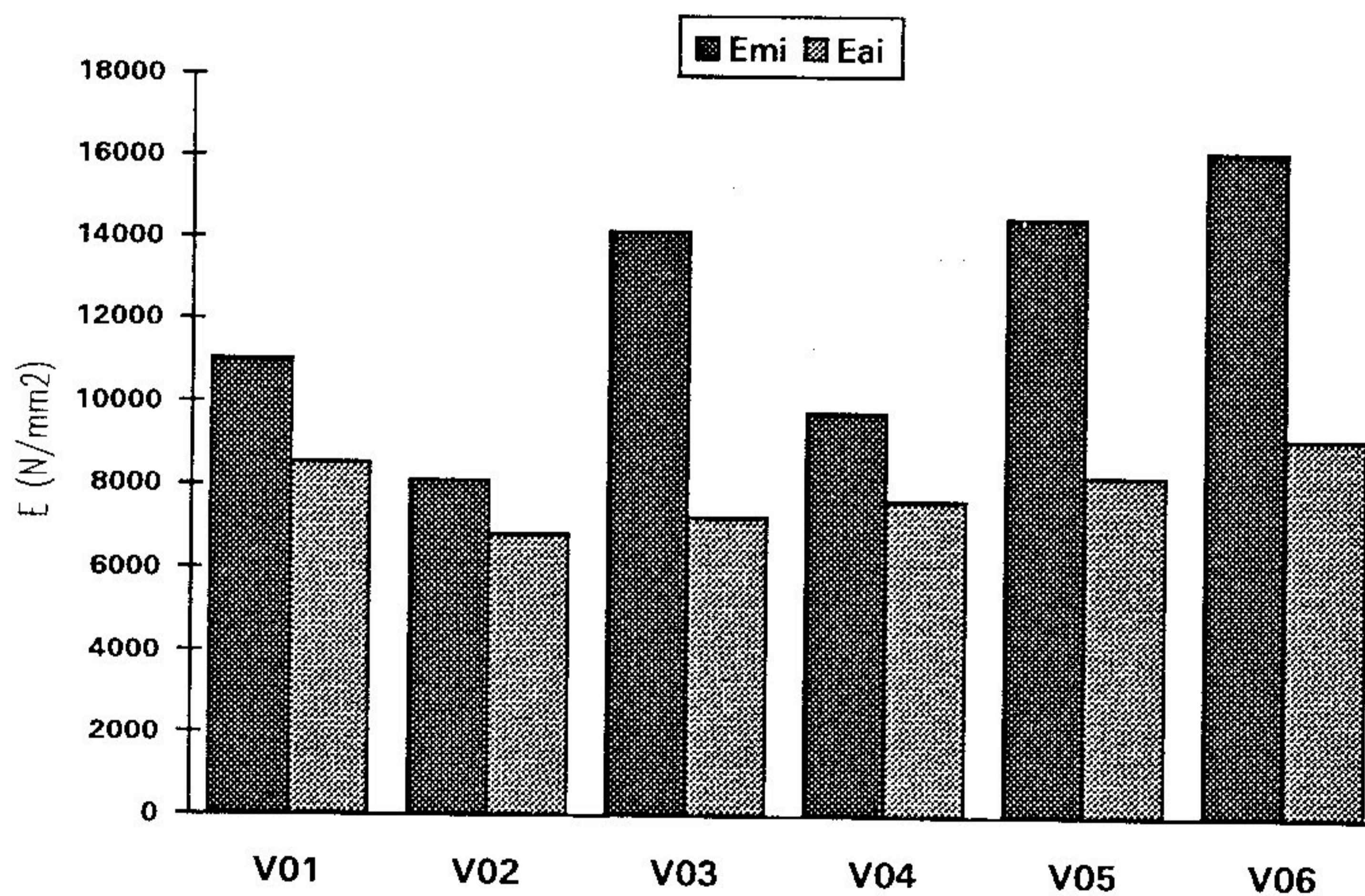


Gráfico 4.12 - Curva Carga-Desl. Vert. de A06

Vigas	Emi	Eai
-	(N/mm ²)	
V01	11020	8550
V02	8130	6840
V03	14160	7270
V04	9800	7680
V05	14540	8260
V06	16180	9200

Tabela 4.14 - Módulos de Elasticidade Longitudinal das Peças



Histograma 4.1 - Módulos de Elasticidade Longitudinal das Peças

4.2 - Determinação dos Parâmetros da Curva de Foschi para a Ligação

Testes para a caracterização da ligação entre mesa e alma das vigas compostas foram realizados através da construção de pequenos corpos-de-prova contendo três peças retangulares de madeira maciça interligadas pelo mesmo elemento de ligação das vigas. O interesse deste estudo foi determinar os parâmetros da curva de Foschi (conforme apresentado no item 2.3), ou seja, a rigidez inicial da ligação, K , a rigidez final da ligação, P_1 , e o ponto de interseção da reta de P_1 com o eixo das ordendas, P_0 .

A espécie de madeira foi a mesma utilizada para as vigas, ou seja, o Angelim e os corpos-de prova extraídos das mesmas peças que constituíram as mesas e as almas. Os corpos-de-prova indicados na figura 4.3 foram dimensionados segundo o seguinte critério: as peças 1 e 3 ficaram com a dimensão da base próxima da altura das mesas, h_m , ou seja, 35 mm, enquanto que a base da peça 2 foi fixada como sendo igual a duas vezes este valor, ou seja, $2 \times h_m = 70$ mm para que as tensões de compressão nas peças de madeira fossem, teoricamente, as mesmas. A espessura das peças igual a 40 mm foi para respeitar a distância dos pregos às bordas segundo a NBR 7190 que recomenda um valor igual a, aproximadamente, quatro vezes o diâmetro do prego. Finalmente, a altura dos corpos-de -prova foi arbitrada para possibilitar a realização dos ensaios.

Dois pregos foram cravados, um de cada lado do corpo de prova com o mesmo afastamento utilizado para as vigas, ou seja, 50 mm. Ao lado de cada prego foi instalado um relógio comparador com precisão de 0.001 mm e curso total de 5mm para medição dos escorregamentos entre as peças de madeira

A cravação dos pregos foi realizada objetivando-se eliminar ao máximo a distância entre as peças de madeira, tomando-se o mesmo cuidado de passar parafina entre as peças conforme descrito na montagem das vigas. Além disso, nos contatos prensa/corpo-de-prova e corpo-de-prova/mesa-de-ensaio foi colocado uma peça de madeira de pequena espessura com módulo de elasticidade inferior ao do Angelim, afim de se obter uma regularização da superfície de contato das peças a serem ensaiadas.

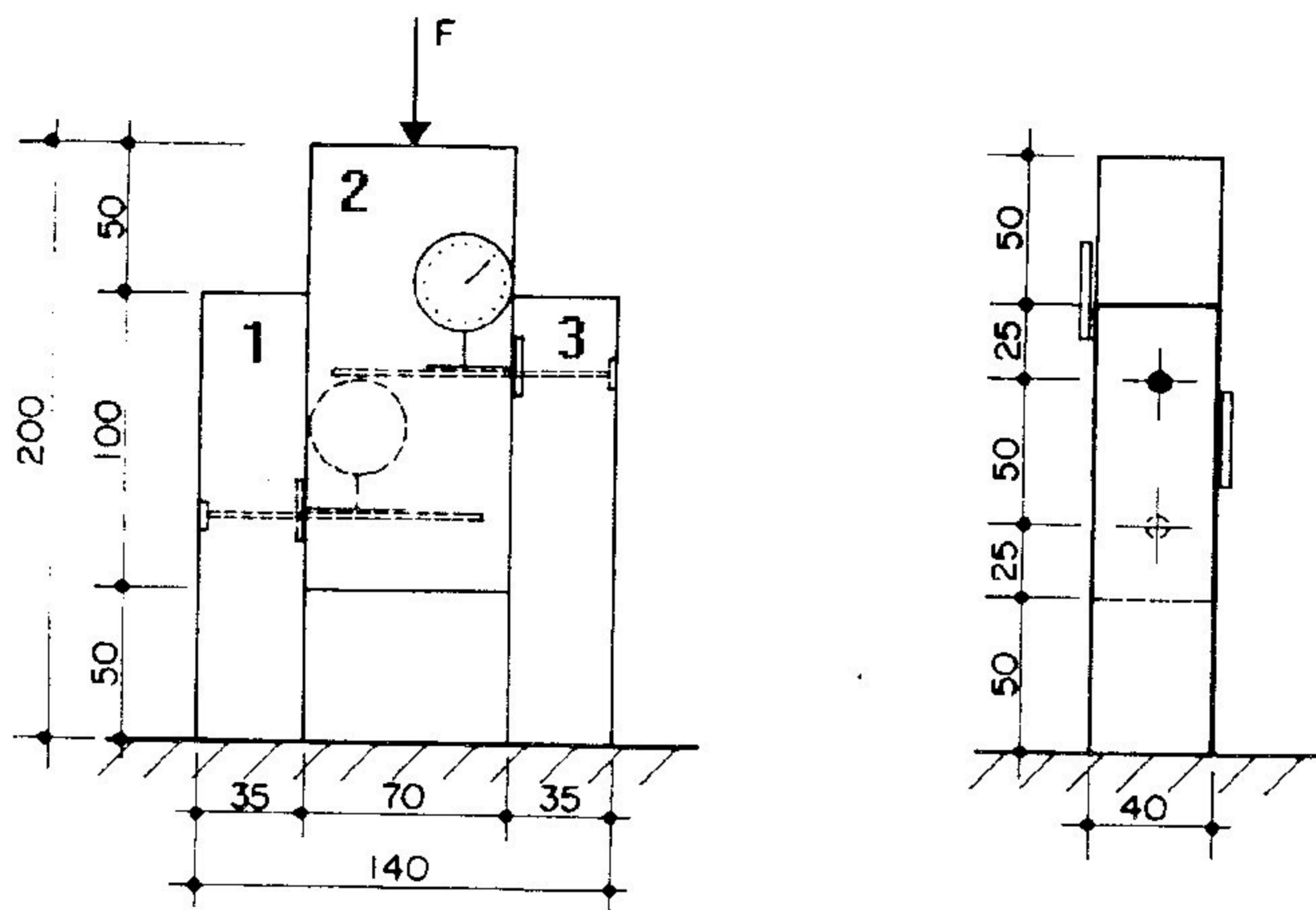


Figura 4.3 - Dimensões dos Corpos-de-Prova (em milímetros)

Para a realização dos ensaios, centrava-se a carga do cilindro hidráulico na peça 2. As peças 1 e 3 forneciam no contato com a mesa de ensaio as reações de apoio de mesma ordem de grandeza, ou seja, metade da carga total aplicada. À medida que as peças de madeira eram comprimidas, registravam-se os escorregamentos nos dois relógios instalados bem próximos de cada prego. A variação de carga foi de 246 N para cada leitura realizada até se atingir a carga total de 2460 N onde ocorria, na maioria dos casos, a ruptura da ligação. O valor do escorregamento para uma determinada carga foi obtido pela média dos dois valores coletados. As tabelas 4.15 e 4.16 apresentam todos os dados experimentais enquanto que o gráfico 4.13 os representa através das curvas carga-escorregamento. Deve-se observar que para cada deslocamento, o valor da carga correspondeu, obviamente, à metade da carga aplicada pelo cilindro hidráulico.

Os parâmetros de regressão linear, K , P_1 , P_0 , foram determinados para as doze curvas da seguinte forma: ignorou-se sempre a primeira leitura de deslocamento afim de possibilitar uma melhor acomodação das peças da ligação, em seguida, arbitrariamente, com os próximos seis pontos fez-se a determinação de K (é importante mencionar que no princípio do ensaio, a rigidez inicial é bem

definida devido a linearidade alcançada entre os diversos pontos). À medida que a rigidez inicial é reduzida, ao longo da realização do ensaio, aumenta-se, progressivamente, a sua velocidade de variação. Portanto, tornou-se muito difícil a determinação da rigidez final e para se encontrar P_1 e P_0 , tomou-se apenas os dois últimos pontos de cada curva (todos os dados podem ser vistos na tabela 4.17).

Finalmente, foi possível caracterizar a ligação das vigas através da média de todos os parâmetros encontrando-se, os seguintes valores:

$$K = 3463 \text{ N/mm}$$

$$P_1 = 595 \text{ N/mm}$$

$$P_0 = 1573 \text{ N}$$

De posse destes parâmetros, foi possível plotar a curva exponencial de Foschi para a ligação (ver gráfico 4.14). Para a verificação desta curva característica junto aos dados experimentais de cada curva de prova, todos os pontos foram inseridos no gráfico 4.15 (os pontos com simbologia de um quadrado representam a curva de Foschi).

Cargas	Escorregamentos					
(N)	(x10 ⁻³ mm)					
-	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05	CP06
123	133	125	136	85	189	88
246	194	202	152	130	276	179
369	232	262	205	170	353	230
492	259	319	235	210	389	276
615	284	367	273	250	444	317
738	305	408	299	280	474	355
861	337	444	325	320	502	393
984	375	487	349	369	538	432
1107	420	526	374	404	572	473
1230	460	569	403	451	600	517
1353	509	611	427	504	639	564
1476	566	669	455	557	686	629
1599	628	725	500	634	731	692
1722	705	789	535	699	783	767
1845	770	872	580	779	846	853
1968	849	957	627	879	925	944
2091	956	1070	749	980	1018	1057
2214	1109	1197	792	1131	1138	1209
2337	1292	1405	925	1337	1270	1497
2460	1591	1640	1052	1567	1563	1694

Tabela 4.15 - Deslocamentos dos Corpos de Prova CP01 a CP06

Cargas	Escorregamentos					
(N)	(x10 ⁻³ mm)					
-	CP07	CP08	CP09	CP10	CP11	CP12
123	75	33	21	60	101	90
246	180	95	61	90	212	151
369	223	131	101	133	290	208
492	257	162	131	143	345	276
615	292	187	206	150	399	346
738	326	211	234	158	440	398
861	360	234	283	177	481	463
984	398	261	335	208	515	518
1107	445	287	390	233	558	584
1230	494	325	453	269	595	642
1353	543	356	512	307	631	715
1476	609	393	604	322	675	813
1599	657	442	680	406	710	931
1722	733	495	818	484	750	1000
1845	807	555	934	570	792	1143
1968	895	635	1069	662	844	1342
2091	994	734	1212	743	911	1542
2214	1104	885	1399	1009	1031	1716
2337	1243	1027	1555	1161	1192	2019
2460	1479	1156	1705	1373	1484	2354

Tabela 4.16 - Deslocamentos dos Corpos de Prova CP07 a CP12

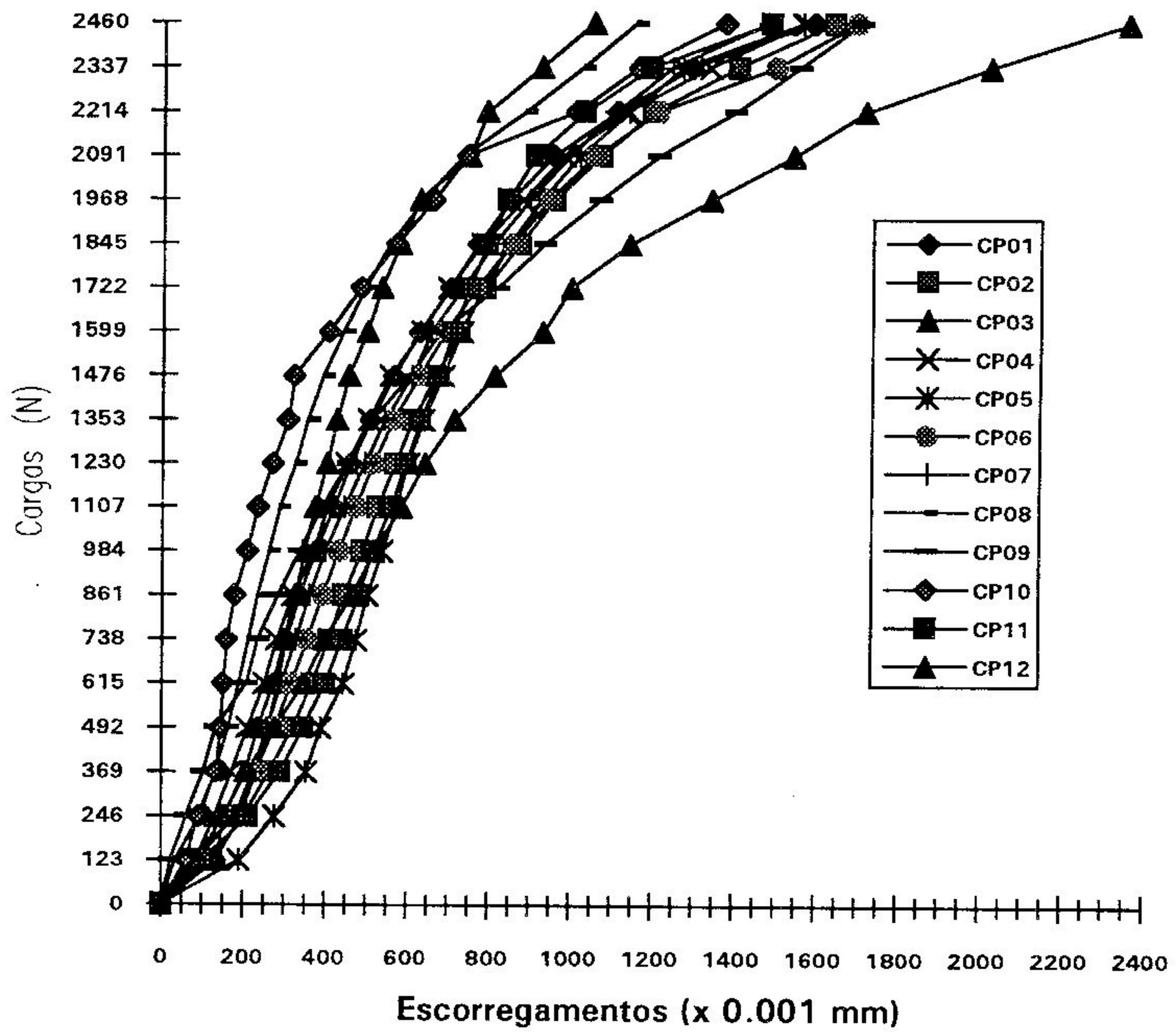


Gráfico 4.13 - Curvas Carga-Escorregamento dos Corpos de Prova CP01 a CP12

CP	K	P ₁	P ₀
-	(N/mm)		(N)
01	4455	411	1806
02	2513	523	1602
03	3574	968	1441
04	3255	534	1622
05	2698	419	1804
06	2886	624	1402
07	3454	521	1689
08	4447	953	1358
09	2682	820	1062
10	7341	580	1663
11	2293	421	1835
12	1954	367	1596

Tabela 4.17 - Parâmetros das Curvas

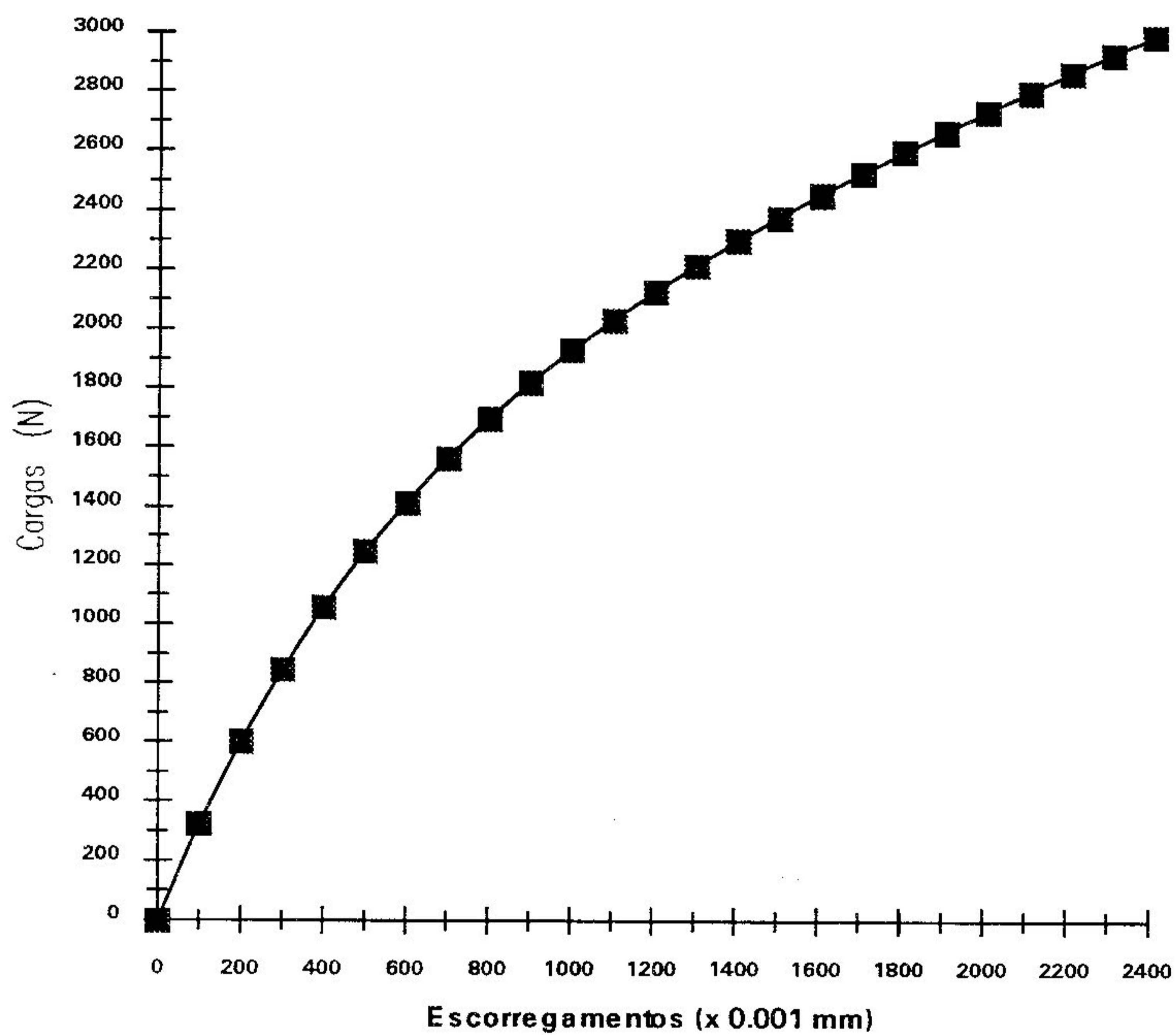


Gráfico 4.14 - Curva Carga-Escorregamento de Foschi

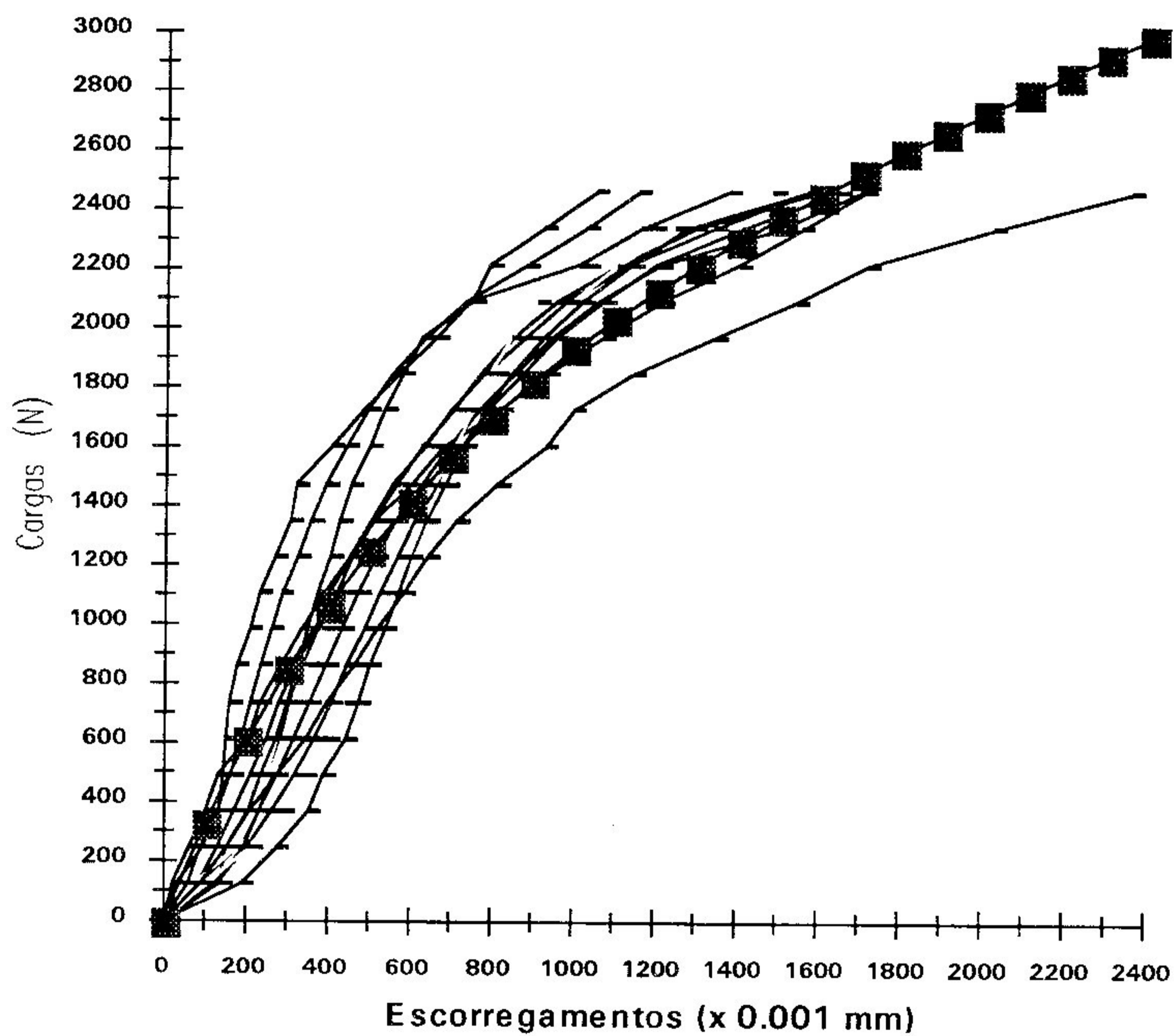


Gráfico 4.15 - Curvas Carga-Escorregamento dos CPs e de Foschi

CAPÍTULO 5

ENSAIOS PRINCIPAIS

5.1 - Ensaio das Vigas Compostas de Madeira

Os ensaios de flexão das vigas compostas foram realizados pela aplicação de duas cargas concentradas equidistantes do meio do vão das peças de, aproximadamente, 500 mm cada uma. A carga do cilindro hidráulico transmitiu o esforço a uma viga metálica biapoada sobre a viga T de acordo com a figura 5.1.

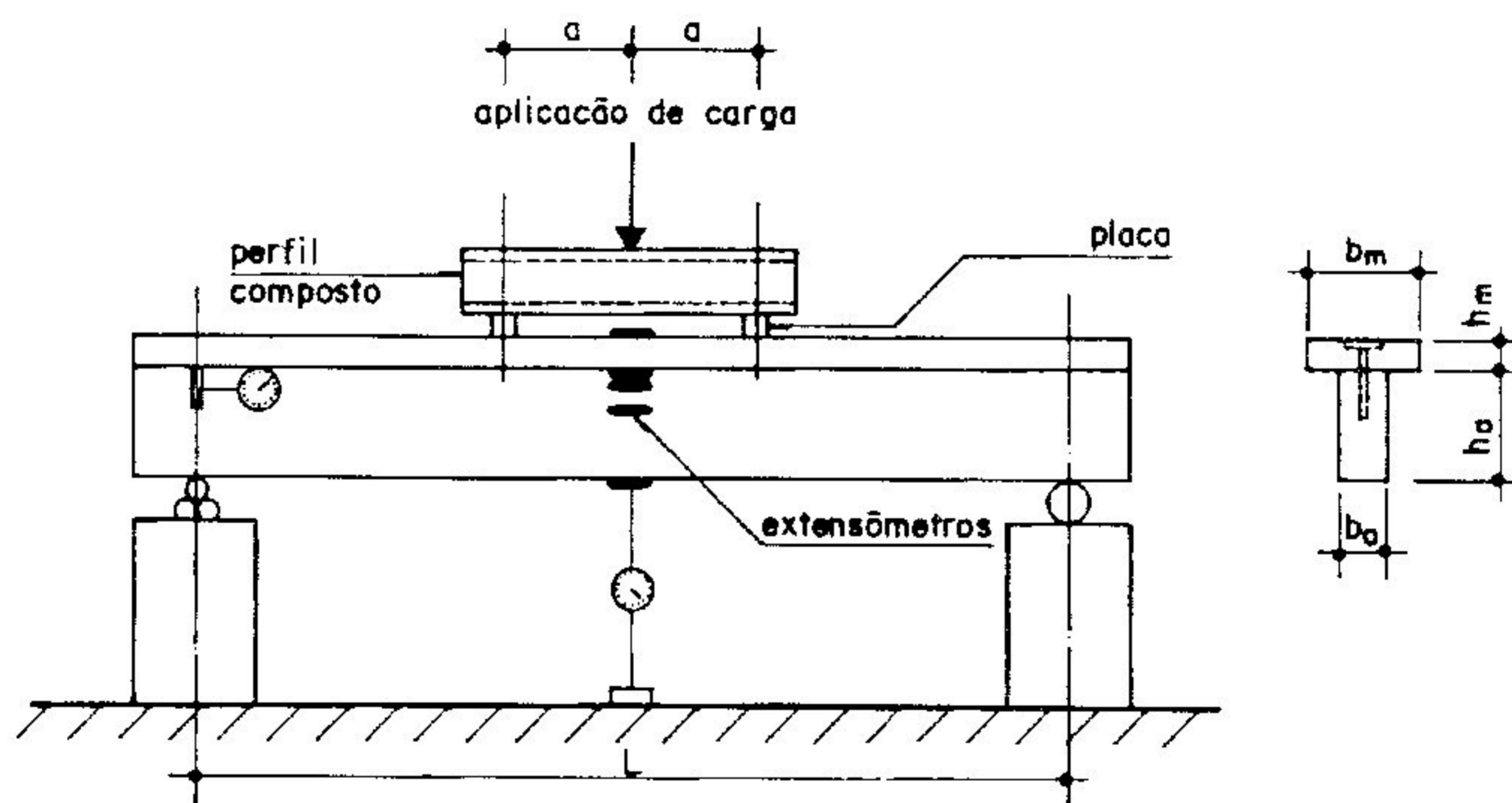


Figura 5.1 - Esquema de Ensaio de Flexão das Vigas Compostas

Entre as duas cargas aplicadas na viga, onde em toda esta região, existe um momento fletor constante, colocou-se extensômetros elétricos de resistência ao longo da seção transversal do meio do vão. Os seguintes pontos foram considerados como sendo extratécnicos para a coleta das deformações longitudinais das peças, a saber: face superior e face inferior das mesas; face lateral superior e face inferior das almas; centro de gravidade da seção composta sempre posicionado na face lateral das almas conforme a figura 5.2 (é importante mencionar que esta distribuição assimétrica dos extensômetros foi em função da disponibilidade de material do laboratório). Entre os extensômetros, ao longo da seção transversal T, foi admitido uma variação linear das deformações longitudinais. Finalmente, um extensômetro foi colado em um pedaço de madeira de mesma espécie das vigas para levar em consideração a influência da temperatura durante a realização dos ensaios.

Medições de deslocamentos verticais foram realizadas apenas na seção do meio do vão das vigas compostas com a instalação de um relógio comparador com precisão de 10^{-2} mm e curso de 50 mm. Outro relógio foi instalado no final das vigas para medição dos escorregamentos entre mesa e alma com precisão de 10^{-3} mm e curso de 5 mm.

Na fase elástica de solicitação do material, as vigas compostas foram carregadas e descarregadas 3 vezes. O ciclo de carregamento foi aplicado continuamente realizando-se leituras de deslocamentos e deformações para cada intervalo de, aproximadamente, 458N de variação de carga até atingir o nível máximo de carregamento de $7 \times 458 = 3206$ N (este valor máximo de carregamento foi escolhido para que as deformações residuais nas peças de madeira fossem desprezadas). A partir daí, aplicava-se o quarto e último ciclo de carregamento com registro dos mesmos dados realizados anteriormente. Neste quarto ciclo, ao se atingir a carga de 3205N, o acréscimo de carga para a realização das leituras de deslocamentos e deformações passou a ser de 3×458 N = 1374N até atingir a ruptura das vigas.

Um intervalo de tempo de 30 minutos entre dois ensaios era sempre respeitado para minimizar as deformações e deslocamentos residuais das peças. A aquisição dos dados em cada aparelho foi realizada manualmente por um técnico de laboratório que coletava os dados durante todo o experimento.

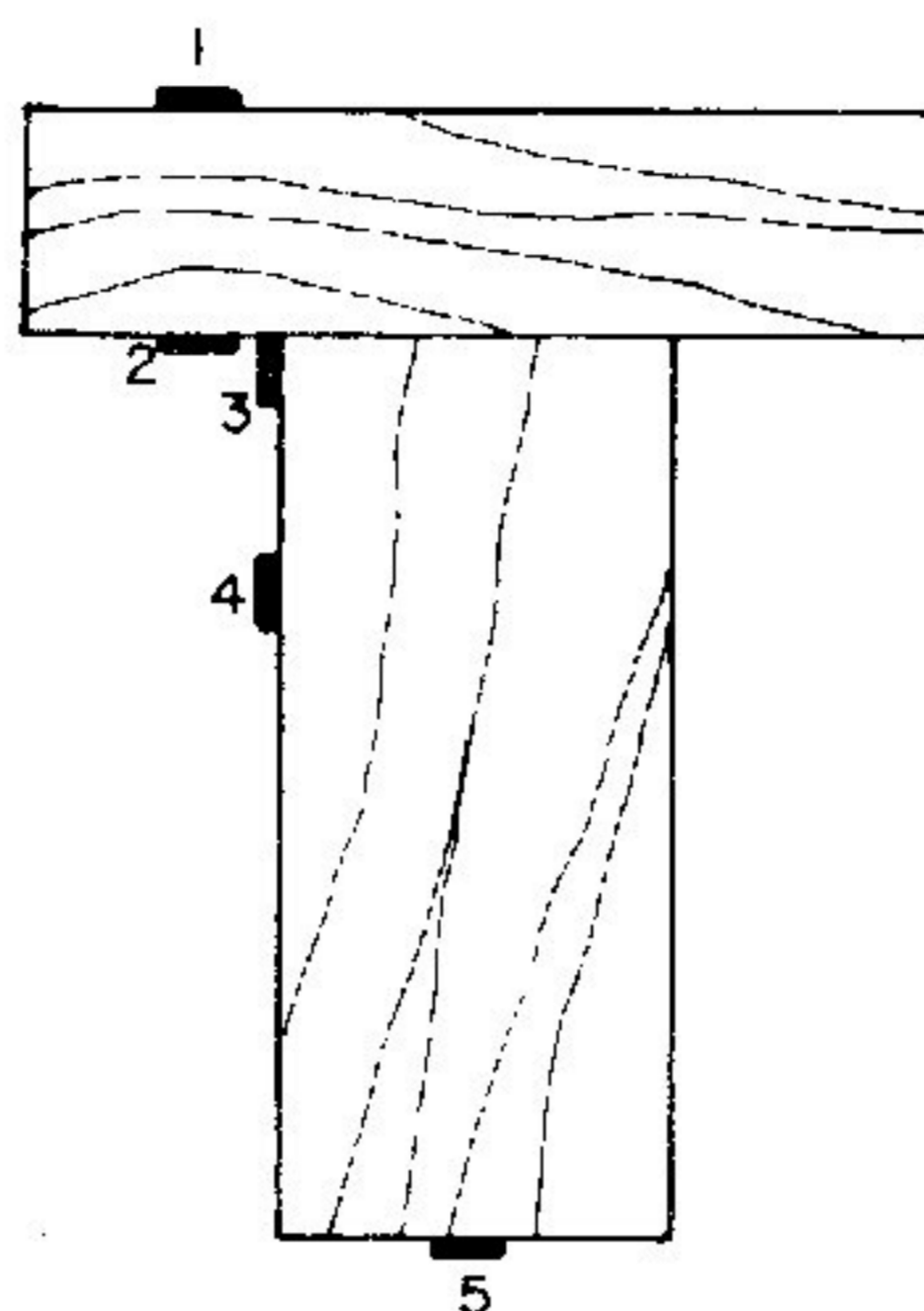


Figura 5.2 - Lay-out dos Extensômetros ao Longo da Seção T

5.2 - Determinação da Rigidez Real das Vigas Compostas $(EI)_r$

A partir dos resultados dos deslocamentos verticais das vigas, na fase elástica de solicitação, foi possível a determinação da rigidez real da seção composta, utilizando-se a expressão clássica de deslocamento vertical máximo para uma viga com duas cargas concentradas simétricas em relação ao meio do vão reescrita da seguinte forma:

$$(EI)_r = P.b.(3l^2-4b^2)/(48.f)$$

onde, P : Carga do cilindro hidráulico;

l : distância entre apoios (ver tabela 5.1);

$(EI)_r$: Rigidez Real (igual ao produto do módulo de elasticidade longitudinal pelo momento de inércia da viga);

f : Deslocamento vertical no meio do vão da viga devido à P ;

b : Distância do ponto de aplicação da carga ao apoio mais próximo (ver tabela 5.1).

Vigas	l	b
-	(mm)	
V01	4400	1700
V02	4400	1700
V03	4300	1650
V04	4400	1700
V05	4300	1625
V06	4400	1700

Tabela 5.1 - Valores de l e b para as Vigas

De posse dos quatro deslocamentos verticais de cada viga, f_i , de acordo com as tabelas 5.2 a 5.7, foi determinado o deslocamento médio denominado f . O cálculo do valor de $(EI)_r$ foi realizado através da média dos valores de todos os $(EI)_{ri}$ relativos a cada carga aplicada e seu deslocamento médio correspondente. A rigidez teórica $(EI)_t$ para cada viga foi determinada pelo produto do módulo de elasticidade longitudinal da alma pelo momento de inércia teórico da seção homogeneizada. A eficiência da ligação das peças, pode ser avaliada pela relação $(EI)_r/(EI)_t$ atingindo valores superiores a 80% conforme mostrado na tabela 5.8.

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	(x 10^{-2} mm)					
458	325	393	378	371	367	-
916	521	605	580	565	568	201
1374	847	810	805	785	812	244
1832	930	1014	1012	992	987	175
2290	1143	1217	1216	1194	1193	206
2747	1355	1426	1428	1394	1401	208
3206	1556	1649	1647	1596	1612	211

Tabela 5.2 - Deslocamentos Verticais de V01

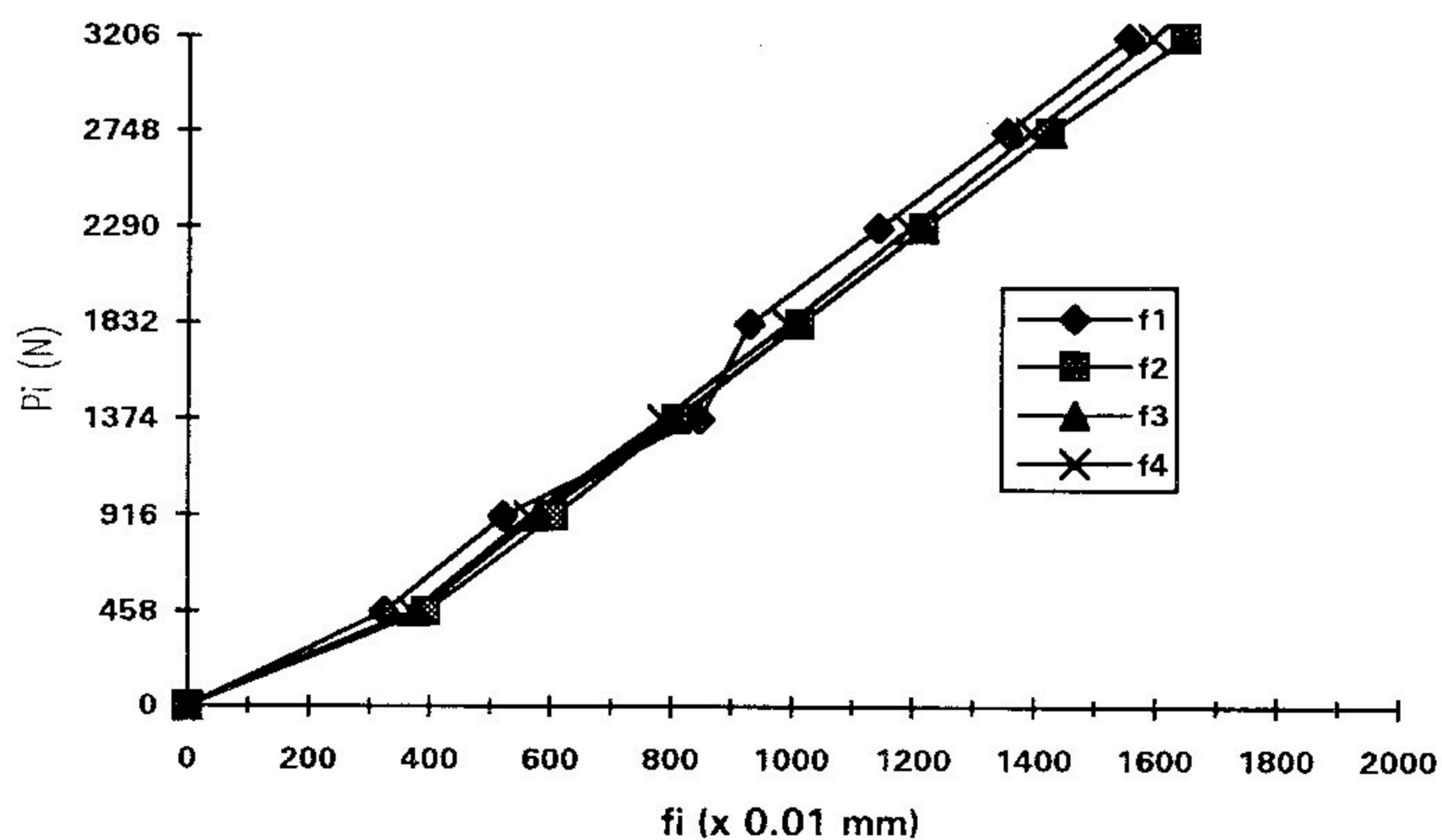


Gráfico 5.1 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V01

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$					
458	362	405	406	429	401	-
916	621	661	716	670	667	266
1374	875	921	949	928	918	251
1832	1152	1157	1205	1185	1175	257
2290	1318	1418	1437	1415	1397	222
2747	1688	1683	1701	1679	1688	291
3206	1955	1898	1946	1939	1935	247

Tabela 5.3 - Deslocamentos Verticais de V02

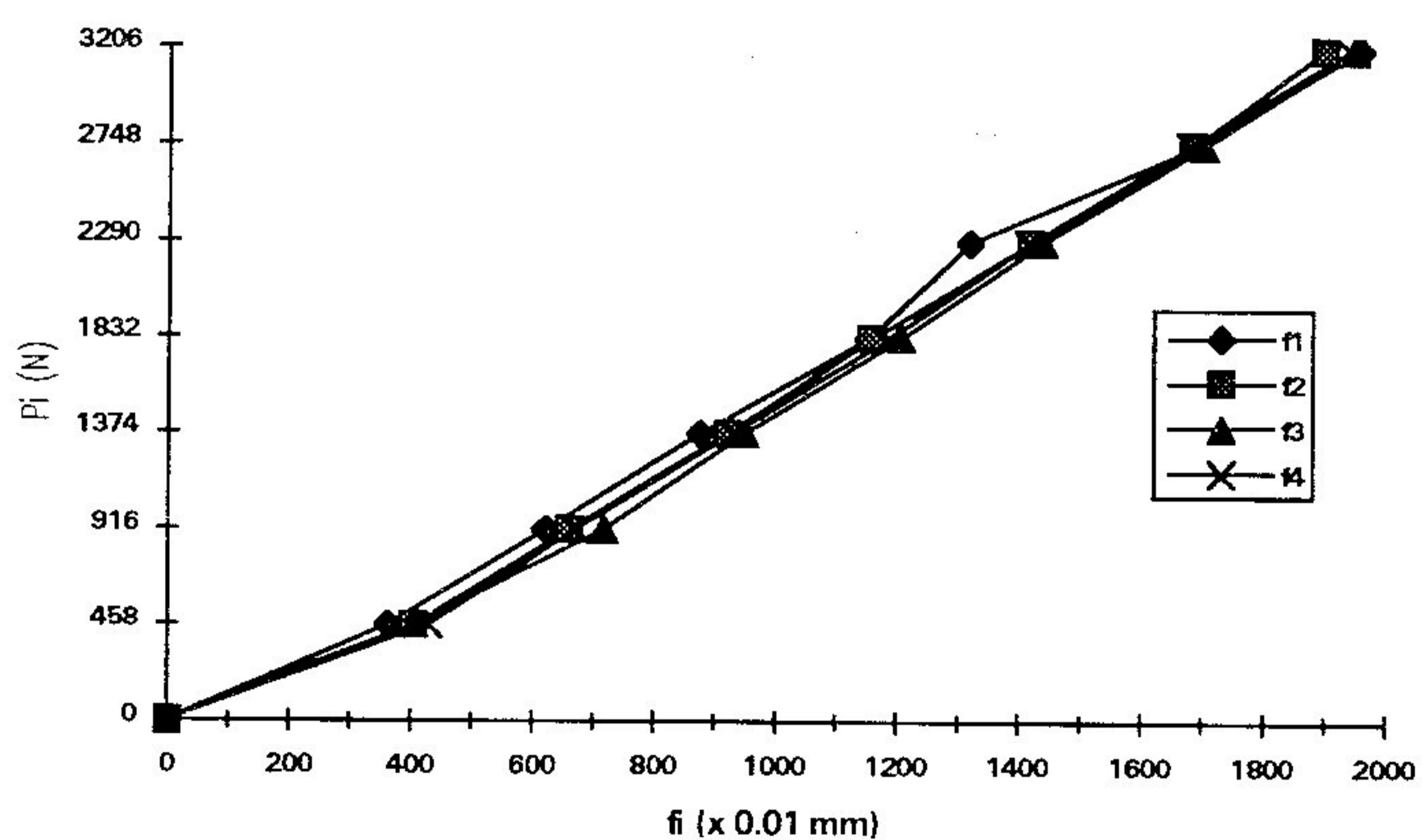


Gráfico 5.2 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V02

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	$(\times 10^{-2} \text{ mm})$					
458	254	386	339	354	333	-
916	505	599	548	564	554	221
1374	739	805	750	761	764	210
1832	899	1000	955	949	951	187
2290	1132	1224	1178	1170	1176	225
2747	1350	1429	1260	1372	1353	177
3206	1574	1641	1594	1607	1604	251

Tabela 5.4 - Deslocamentos Verticais de V03

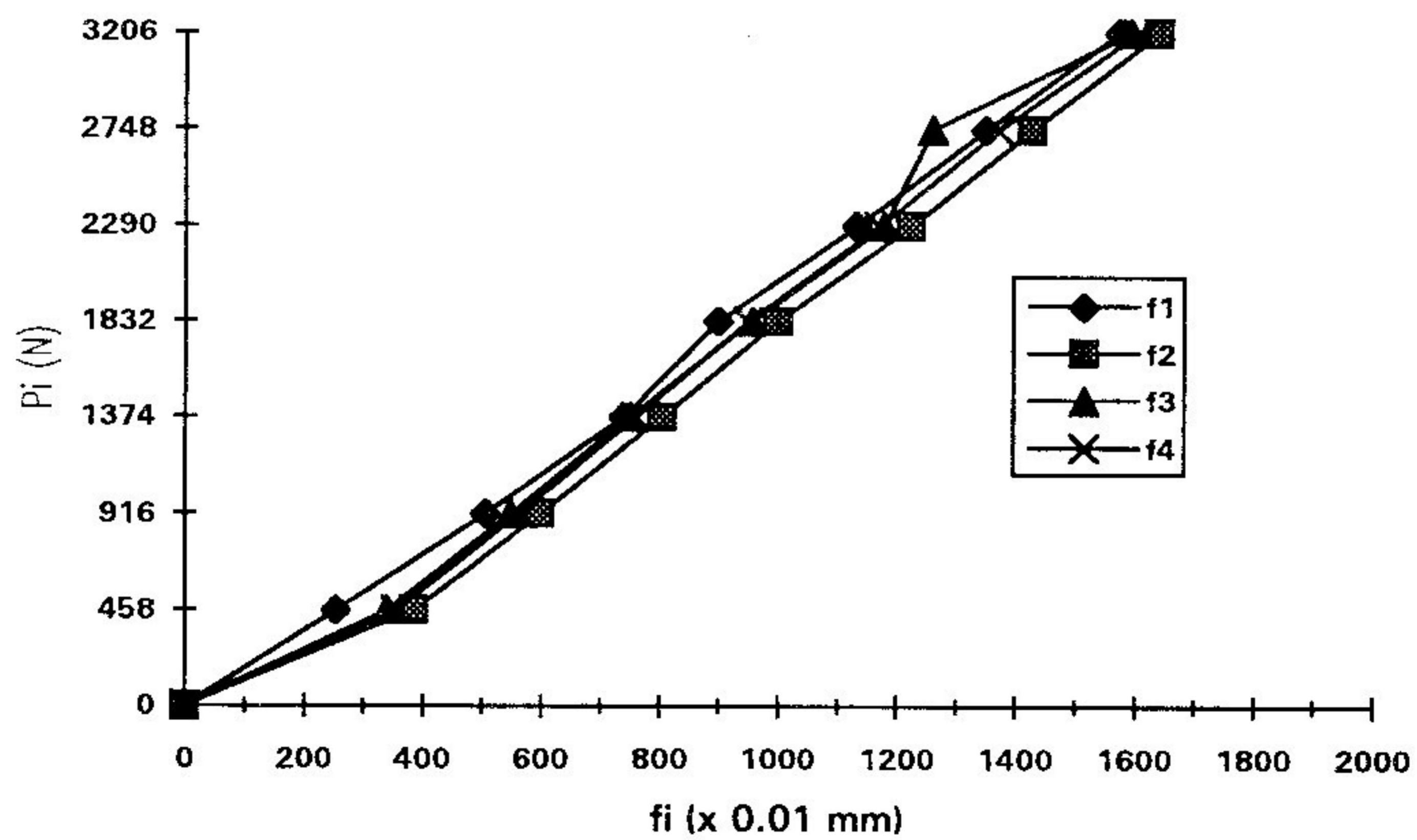


Gráfico 5.3 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V03

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	(x 10^{-2} mm)					
458	419	440	687	428	419	-
916	700	707	662	704	693	274
1374	947	967	917	976	952	259
1832	1204	1198	1139	1189	1183	231
2290	1481	1452	1417	1446	1449	266
2747	1765	1629	1630	1707	1683	234
3206	1998	1960	1936	1965	1965	282

Tabela 5.5 - Deslocamentos Verticais de V04

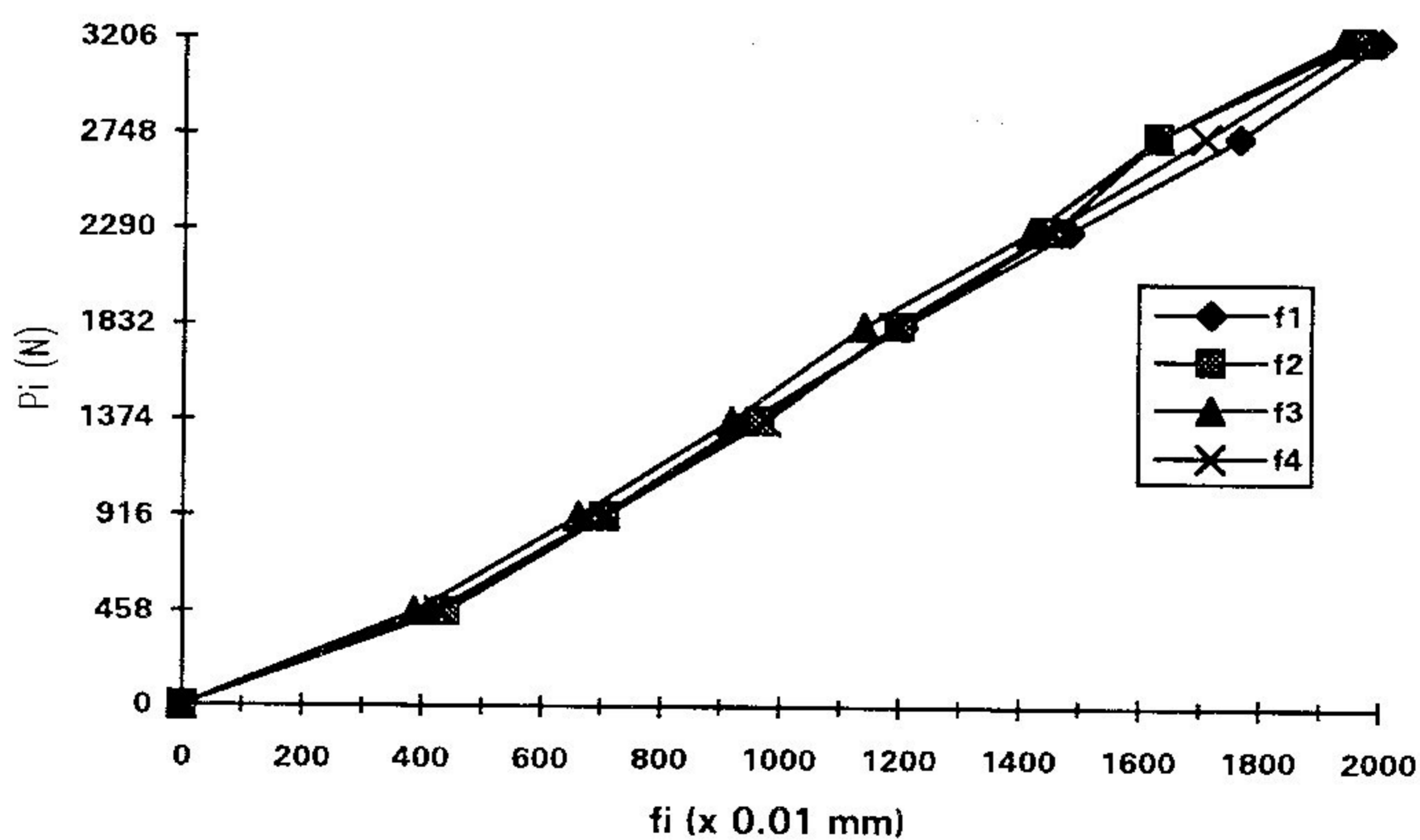


Gráfico 5.4 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V04

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	(x 10^{-2} mm)					
458	278	361	305	249	298	-
916	506	585	540	454	521	223
1374	699	745	700	659	701	180
1832	868	962	909	840	895	194
2290	1080	1146	1112	1041	1095	200
2747	1300	1363	1289	1374	1332	237
3206	1497	1541	1487	1630	1539	207

Tabela 5.6 - Deslocamentos Verticais de V05

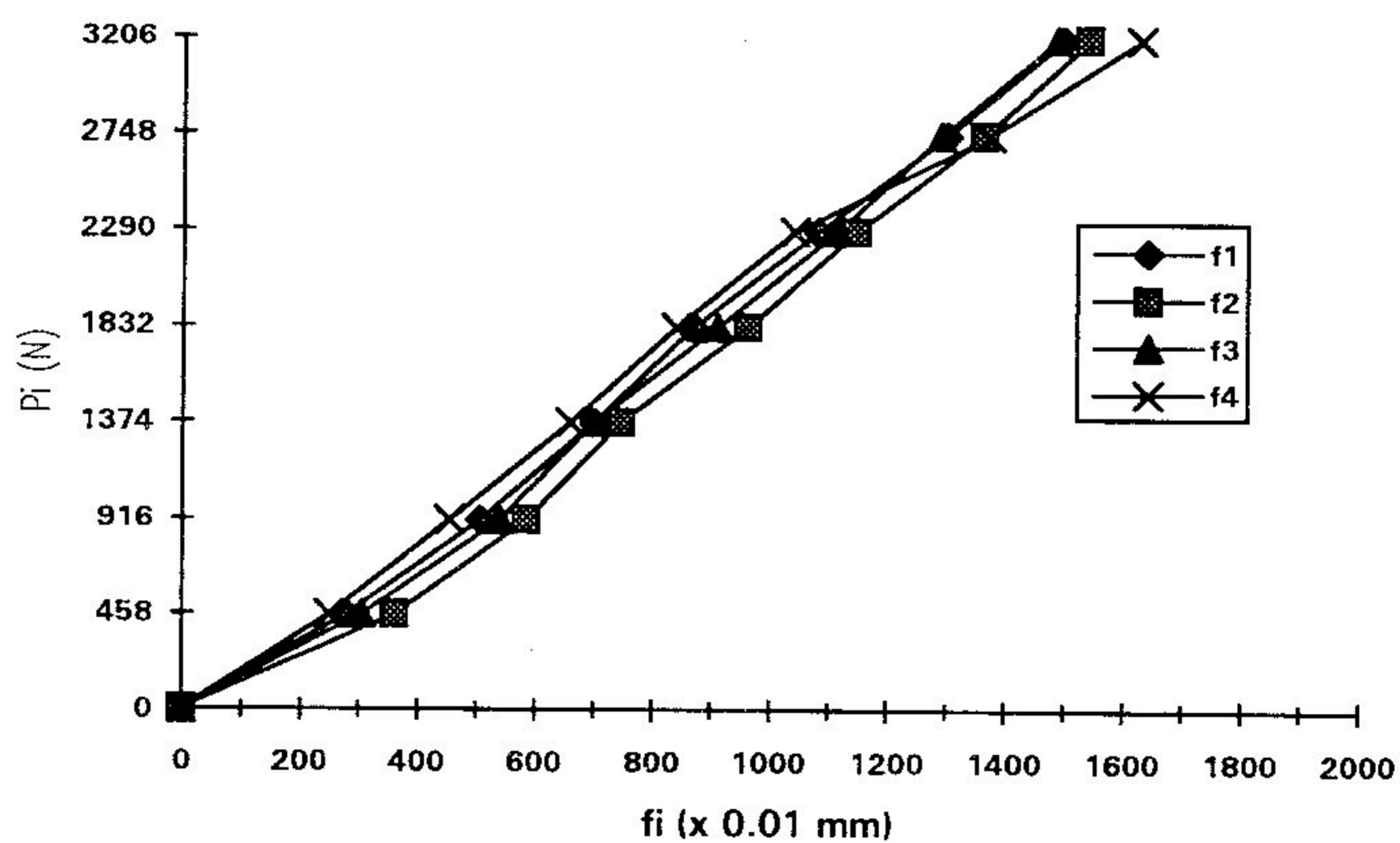


Gráfico 5.5 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V05

P_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f	Δf
(N)	$(x 10^{-2} \text{ mm})$					
458	283	284	307	274	287	-
916	469	487	510	488	489	202
1374	658	662	702	667	672	183
1832	864	850	880	871	866	194
2290	1079	1069	1098	1057	1076	210
2747	1282	1254	1277	1244	1264	188
3206	1469	1453	1448	1414	1446	182

Tabela 5.7 - Deslocamentos Verticais de V06

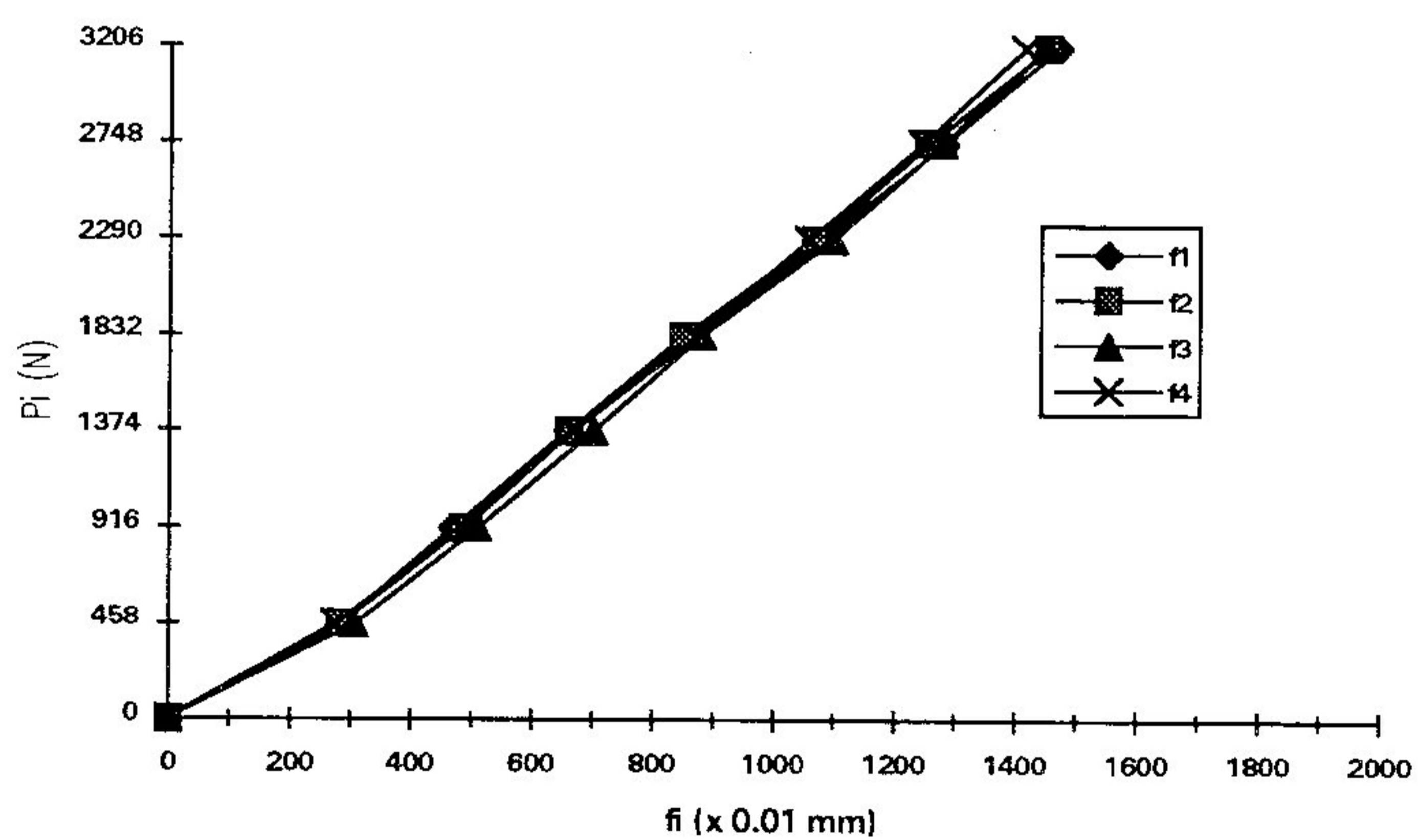
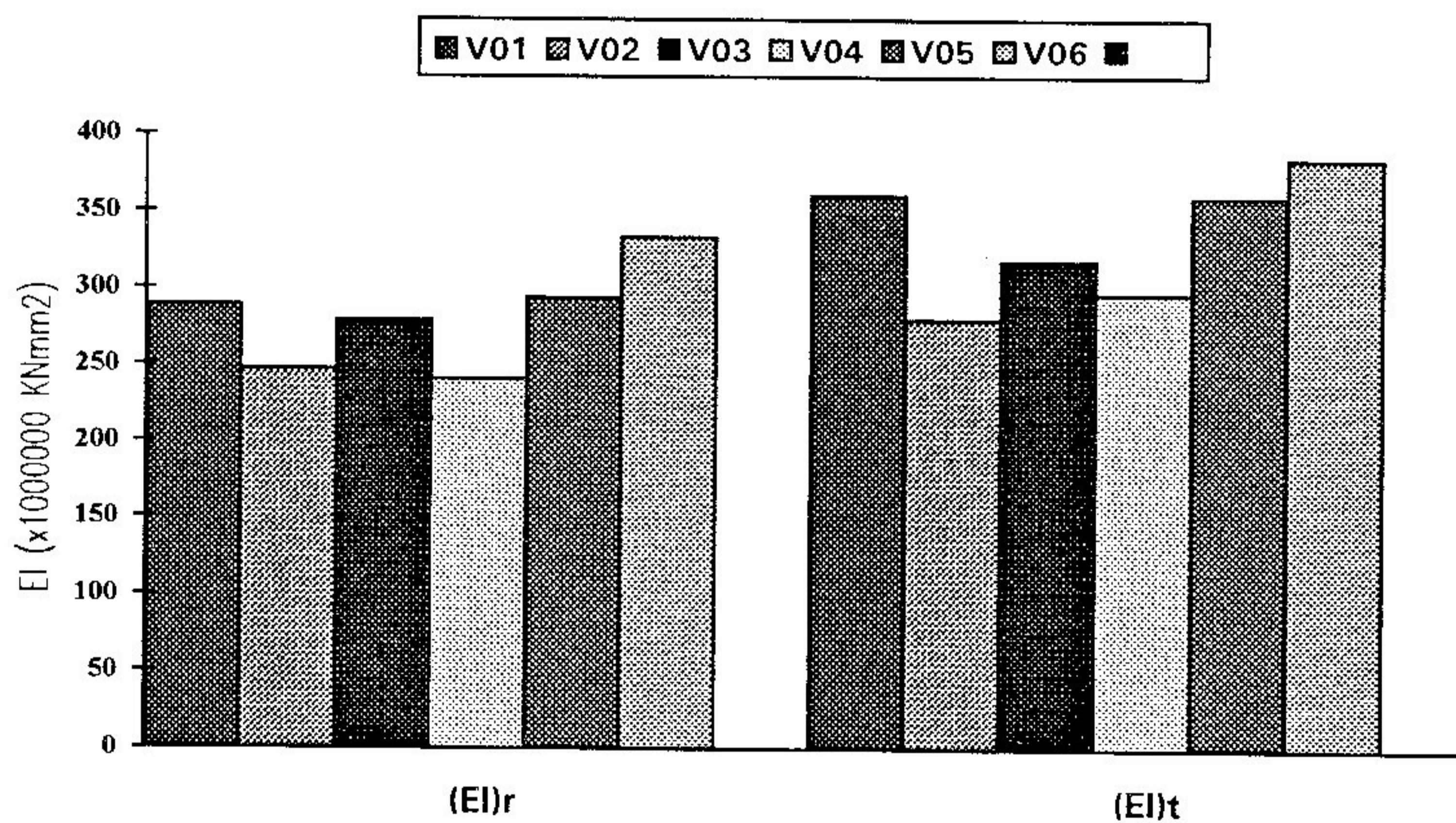


Gráfico 5.6 - Curvas Carga-Desl. Vert. para a Viga V06

Vigas	$(EI)_r$	$(EI)_t$	$(EI)_r/(EI)_t$
-	$(\times 10^6 \text{ KN.mm}^2)$		(%)
V01	289	361	80
V02	247	280	88
V03	279	318	88
V04	241	297	81
V05	294	360	82
V06	333	385	86

Tabela 5.8- Rigidezes Reais e Teóricas e Eficiência da Ligação



Histograma 5.1 - Rigidezes Reais e Teóricas das Vigas

5.3 - Traçado das Curvas Carga-Deslocamento das Vigas Compostas

O objetivo deste item é registrar os valores do deslocamento vertical no meio do vão de cada viga e do deslocamento horizontal no final das vigas até atingir valores próximos da ruptura por ruína das mesmas. A carga associada ao deslocamento medido é relativa à carga do cilindro hidráulico tanto para a configuração das tabelas quanto para o traçado dos gráficos.

O deslocamento vertical medido através do relógio comparador instalado imediatamente abaixo da alma das vigas não foi capaz de registrar todos os deslocamentos até a ruptura das peças de madeira por questão de segurança do aparelho. De maneira semelhante, os deslocamentos horizontais também não foram apanhados até o instante da ruptura, pois o relógio comparador com precisão de 0,001 mm, registrava, a partir de um certo ponto, escorregamentos contínuos, difíceis de serem medidos manualmente em determinado instante pelo laboratorista.

É importante mencionar que em função dos pequenos valores dos esmagamentos ocorridos nos apoios, os valores dos deslocamentos verticais não foram alterados nos resultados apresentados neste capítulo.

A seguir, estão apresentadas as tabelas com os valores de carga e deslocamentos coletados durante os ensaios para todas as vigas. A terminologia adotada foi: f para caracterizar os deslocamentos verticais e e para os deslocamentos horizontais relativos. Os gráficos que se seguem, definem claramente o comportamento destes deslocamentos ao longo do carregamento aplicado.

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	371	-	5	-
916	565	194	16	11
1374	785	220	36	20
1832	992	207	56	20
2290	1194	202	78	22
2748	1394	200	97	19
3206	1596	202	113	16
4580	2012	416	165	52
5954	2894	882	305	140
7328	3568	674	418	113
8702	4276	708	550	132
10076	4968	692	680	130
11450	5699	731	865	185
12824	6448	749	1070	205
14198	7298	850	1350	280
15572	8148	850	1640	290
16946	9027	879	2000	360

Tabela 5.9 - Deslocamentos da Viga V01 - Ensaio 4

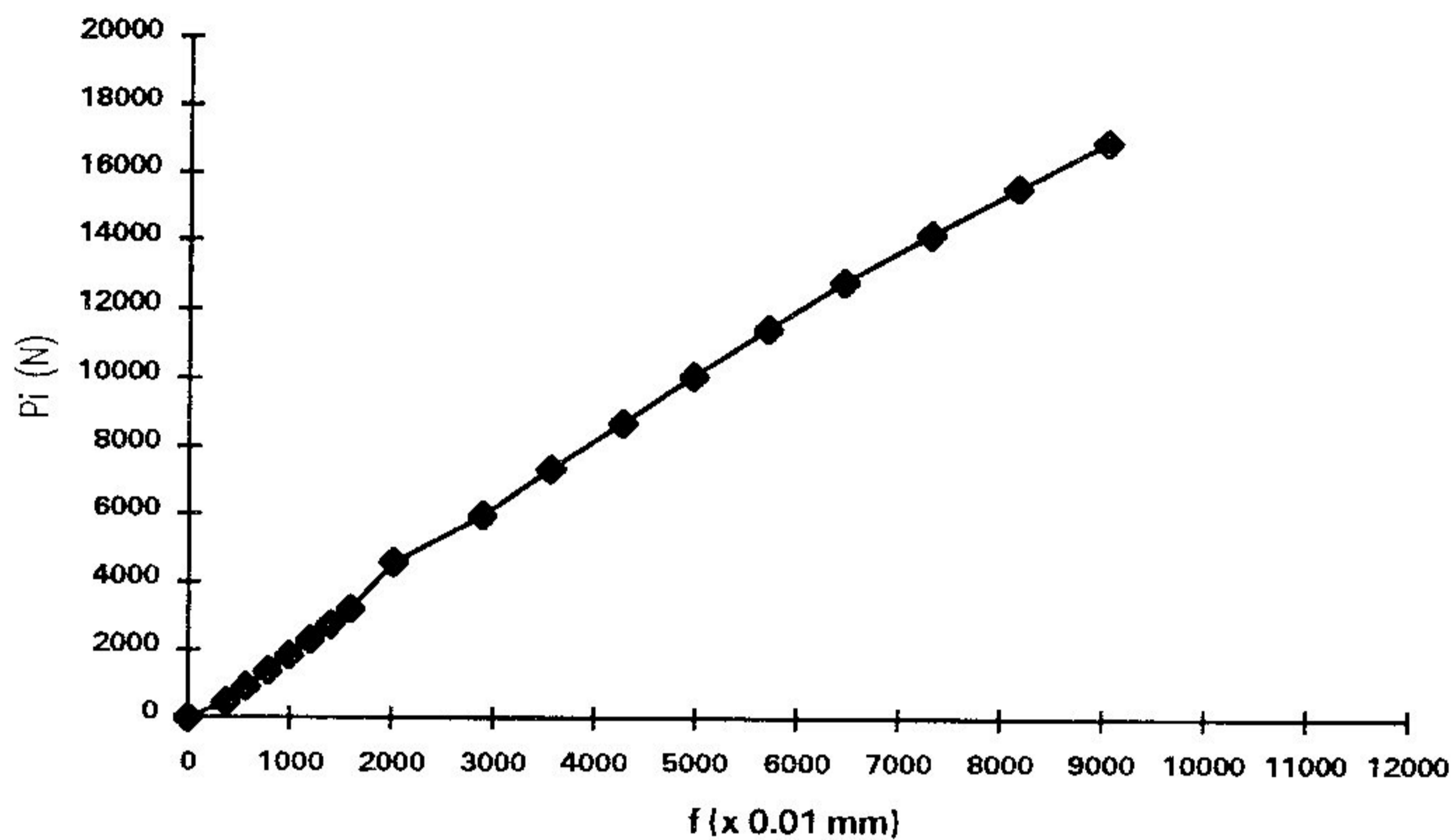


Gráfico 5.7 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V01 - Ensaio 4

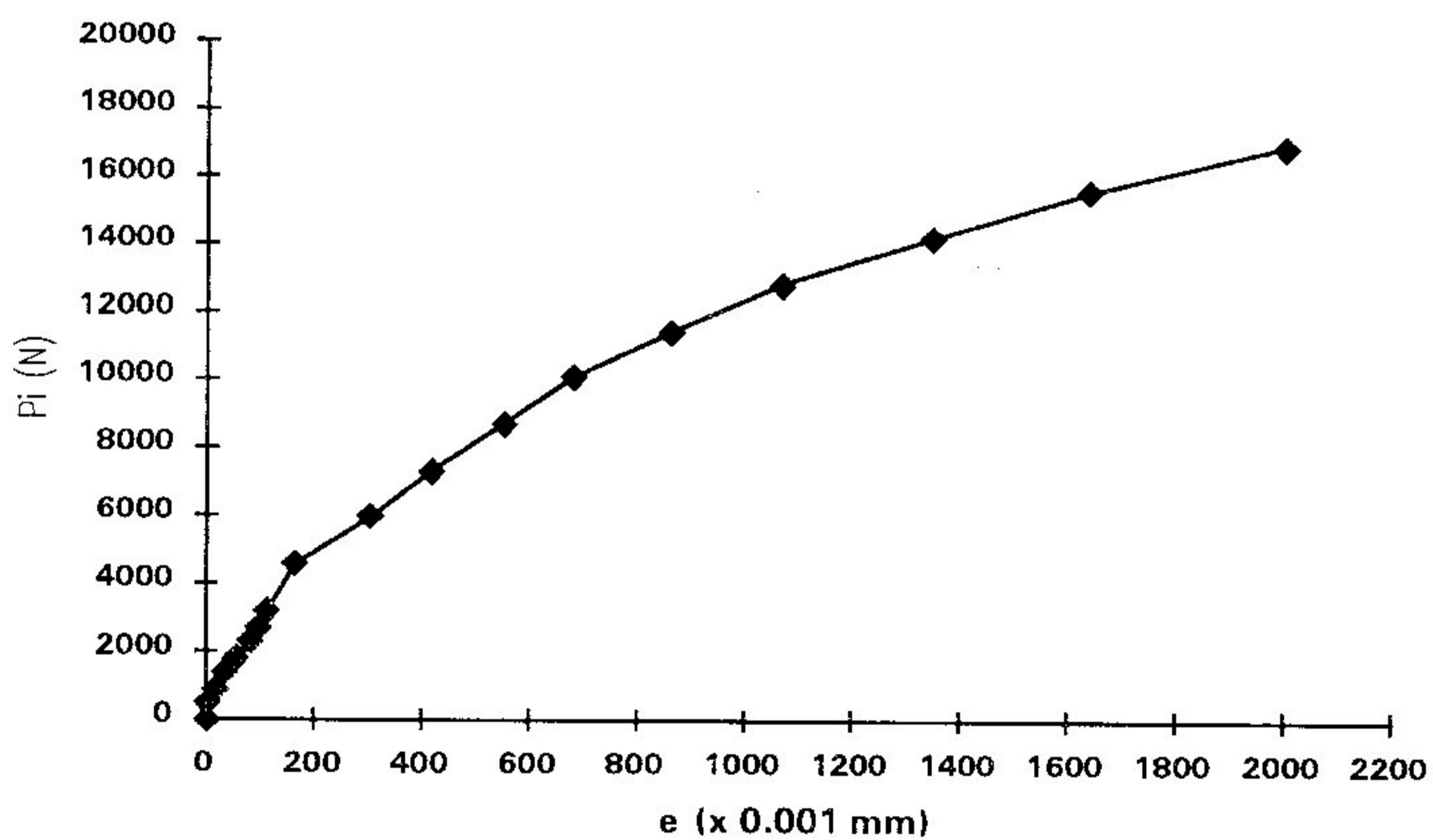


Gráfico 5.8 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V01 - Ensaio 4

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	429	-	1	-
916	670	241	7	6
1374	928	258	23	16
1832	1185	257	42	19
2290	1415	230	59	17
2748	1679	264	78	19
3206	1939	260	97	19
4580	2729	790	190	93
5954	3583	854	309	119
7328	4461	878	445	136
8702	5268	807	549	104
10076	6167	899	720	171
11450	7060	893	880	160
12824	7962	902	1050	170
14198	8863	901	1260	210
15572	9852	989	1530	270
16946	11100	1248	1810	280

Tabela 5.10 - Deslocamentos da Viga V02 - Ensaio 4

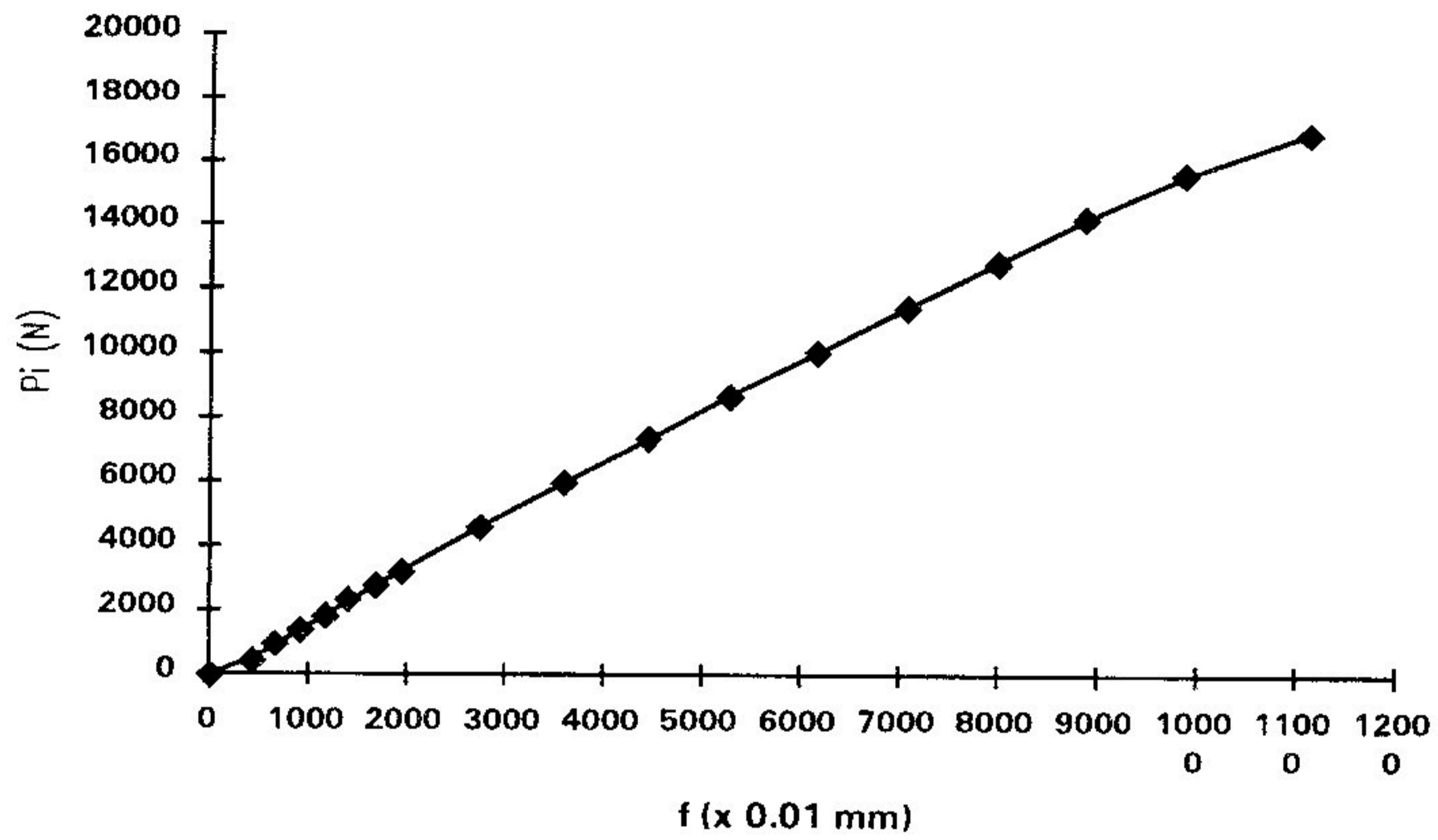


Gráfico 5.9 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V02 - Ensaio 4

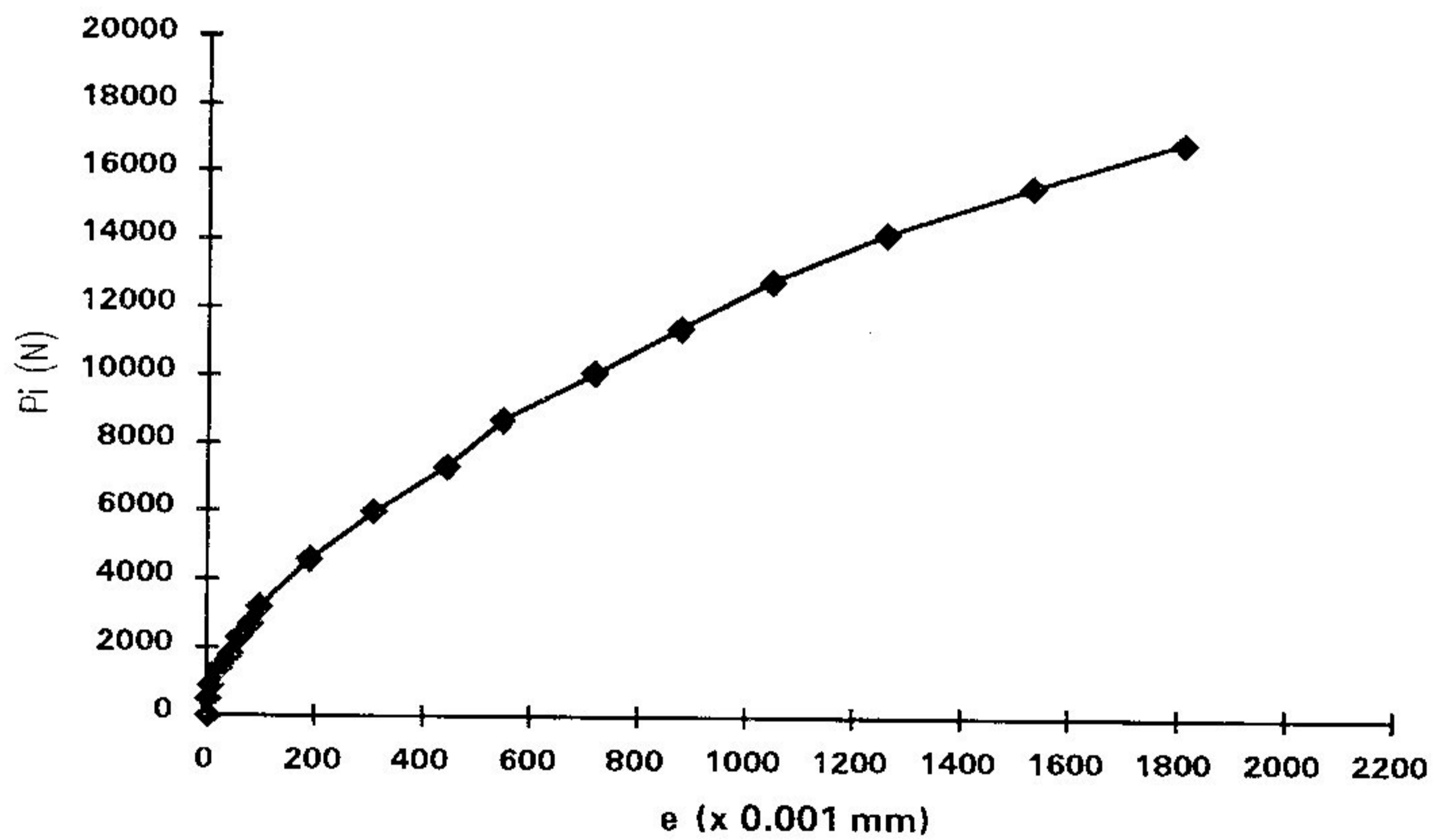


Gráfico 5.10 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V02 - Ensaio 4

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	354	-	1	-
916	564	210	2	1
1374	761	197	8	6
1832	949	188	14	6
2290	1170	221	21	7
2748	1372	202	29	8
3206	1607	235	62	33
4580	2204	597	76	14
5954	2911	707	132	56
7328	3582	671	205	73
8702	4311	729	325	120
10076	5030	719	490	165
11450	5692	662	650	160
12824	6468	776	840	190
14198	7295	827	1080	240
15572	8153	858	1360	280
16946	8999	846	1710	350
18320	10045	1046	2120	410

Tabela 5.11 - Deslocamentos da Viga V03 - Ensaio 4

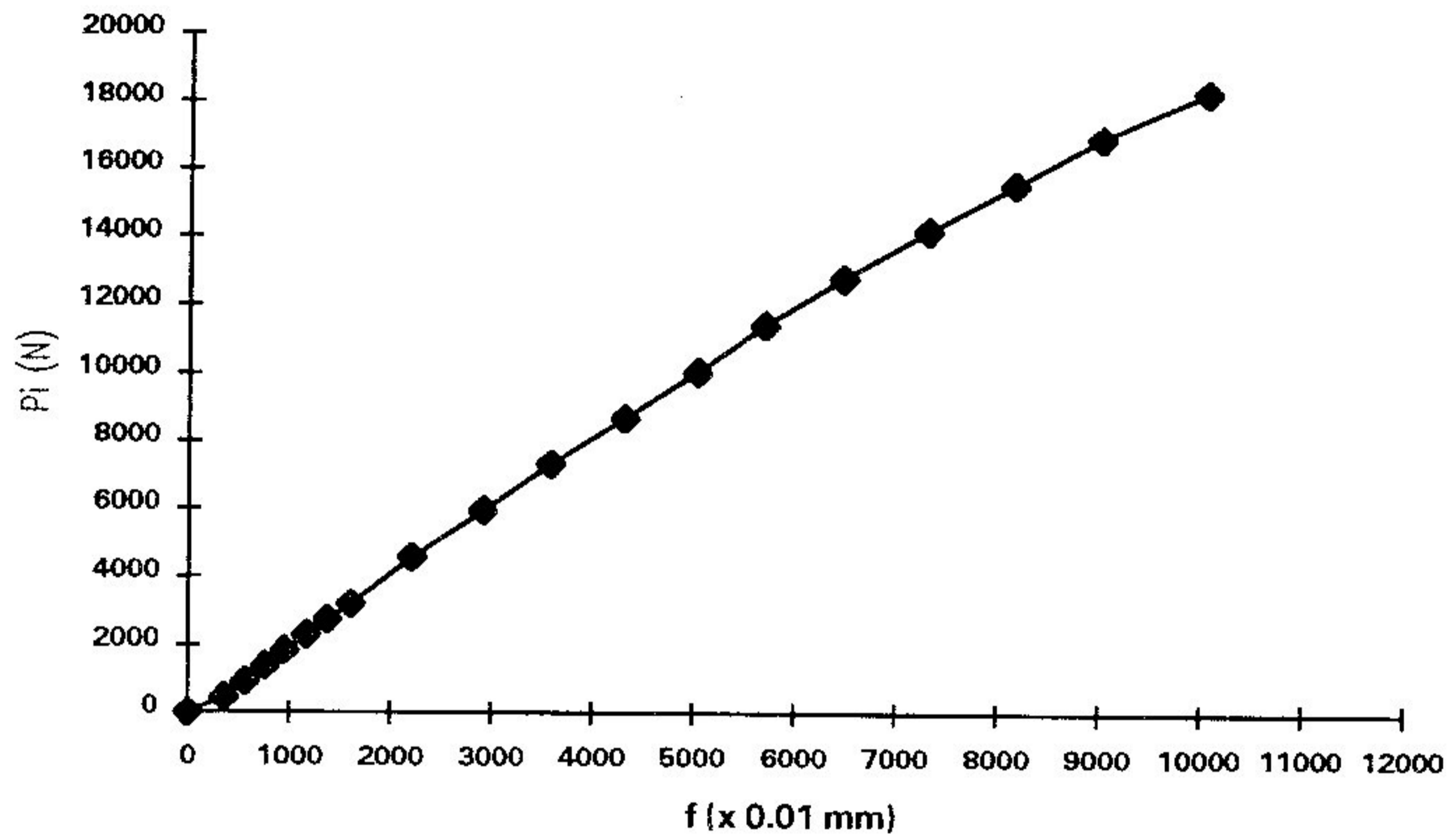


Gráfico 5.11 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V03 - Ensaio 4

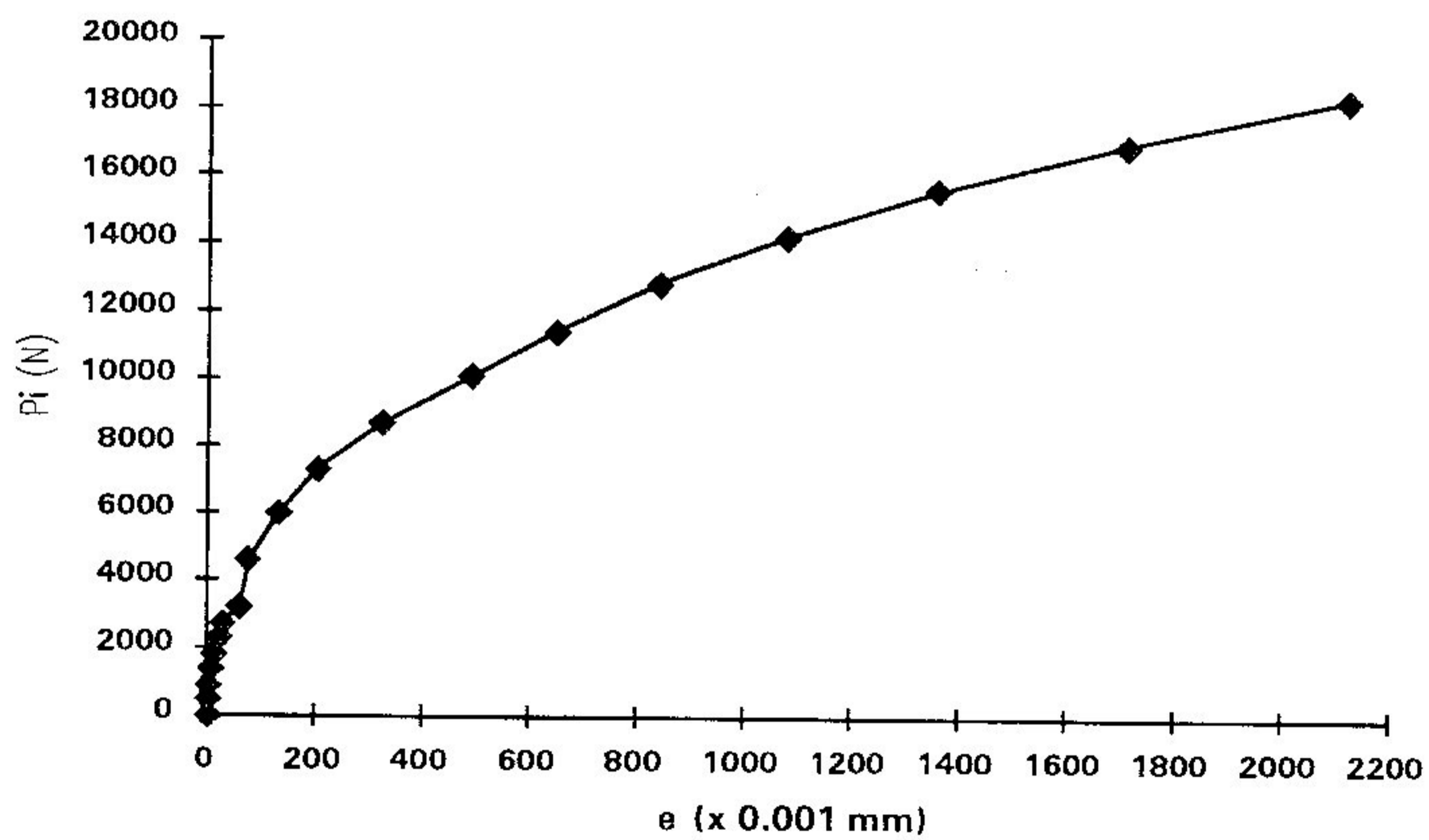


Gráfico 5.12 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V03 - Ensaio 4

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	428	-	0	-
916	704	276	0	0
1374	976	272	1	1
1832	1189	213	4	3
2290	1446	257	13	9
2748	1707	261	25	12
3206	1965	258	38	13
4580	2770	805	127	89
5954	3661	891	250	123
7328	4494	833	371	121
8702	-	-	495	124
10076	-	-	643	148
11450	-	-	810	167
12824	-	-	998	188
14198	-	-	1190	192

Tabela 5.12 - Deslocamentos da Viga V04 - Ensaio 4

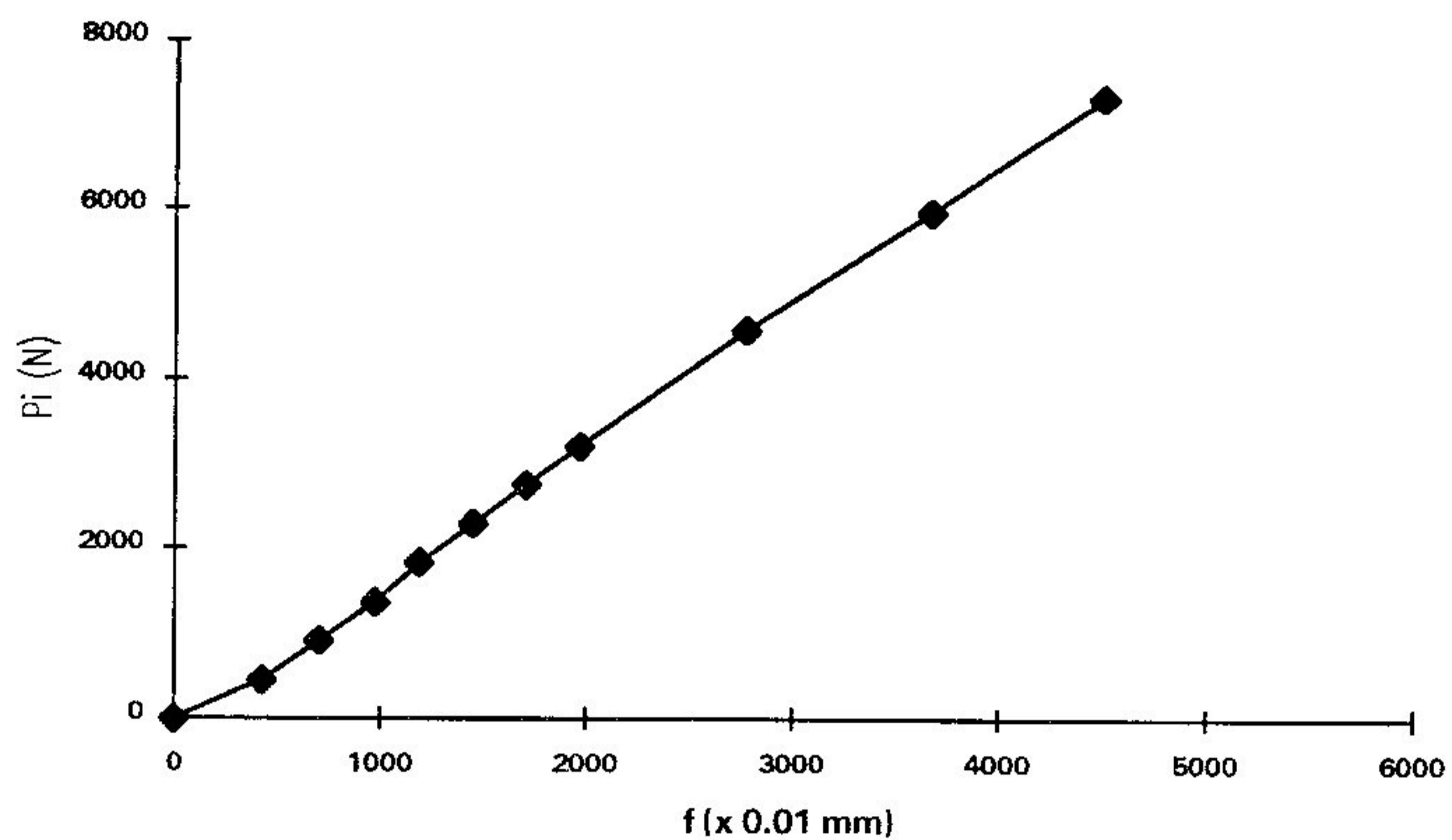


Gráfico 5.13 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V04 - Ensaio 4

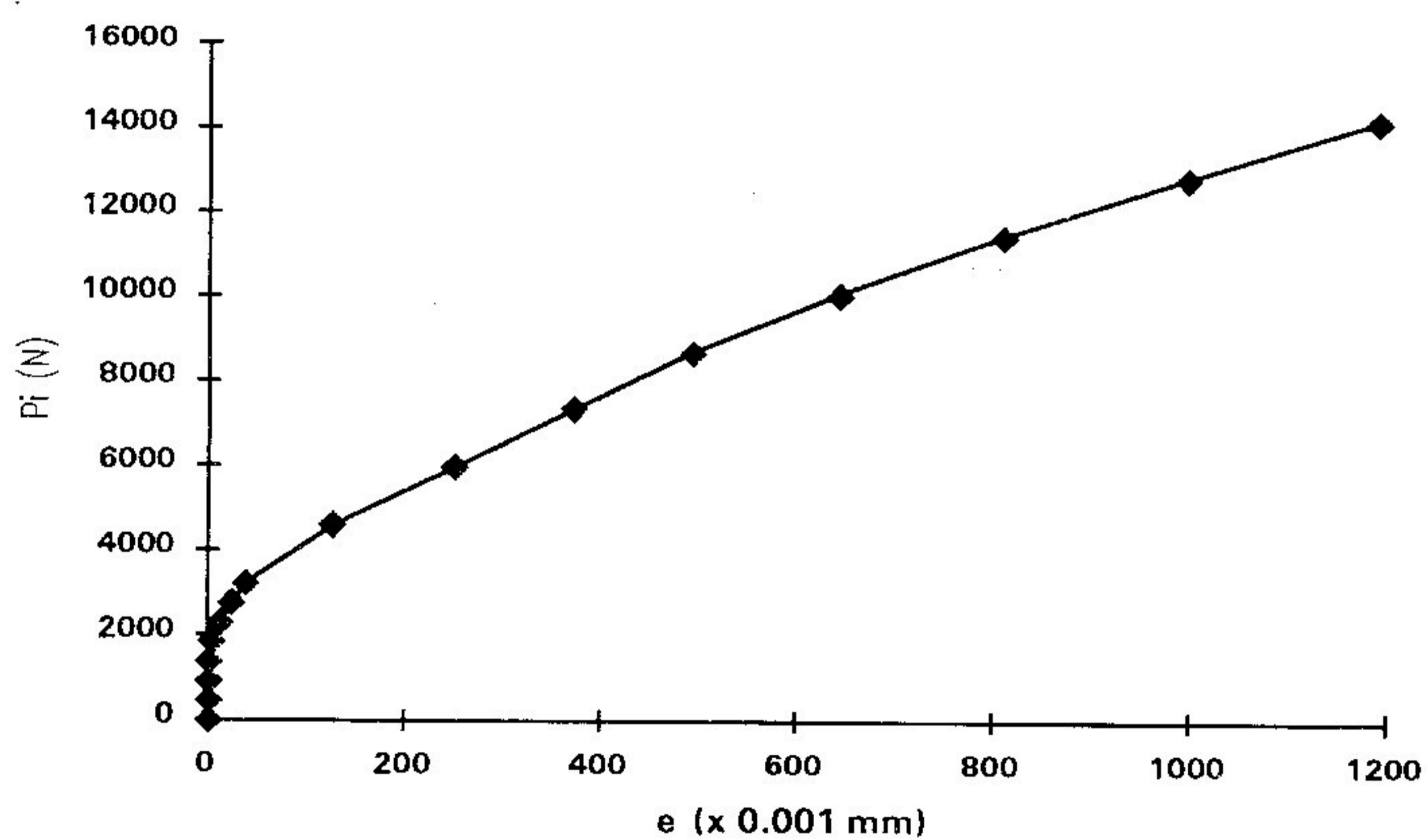


Gráfico 5.14 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V04 - Ensaio 4

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	249	-	1	-
916	454	205	6	5
1374	659	205	22	16
1832	840	181	39	17
2290	1041	201	57	18
2748	1374	333	78	21
3206	1630	256	92	14
4580	2045	415	173	81
5954	2702	657	282	109
7328	3361	659	415	133
8702	4010	649	577	162
10076	4723	713	732	155
11450	5436	713	940	208
12824	6205	769	1168	228
14198	6975	770	1432	264
15572	7855	880	1750	318
16946	8779	924	2135	385

Tabela 5.13 - Deslocamentos da Viga V05 - Ensaio 4

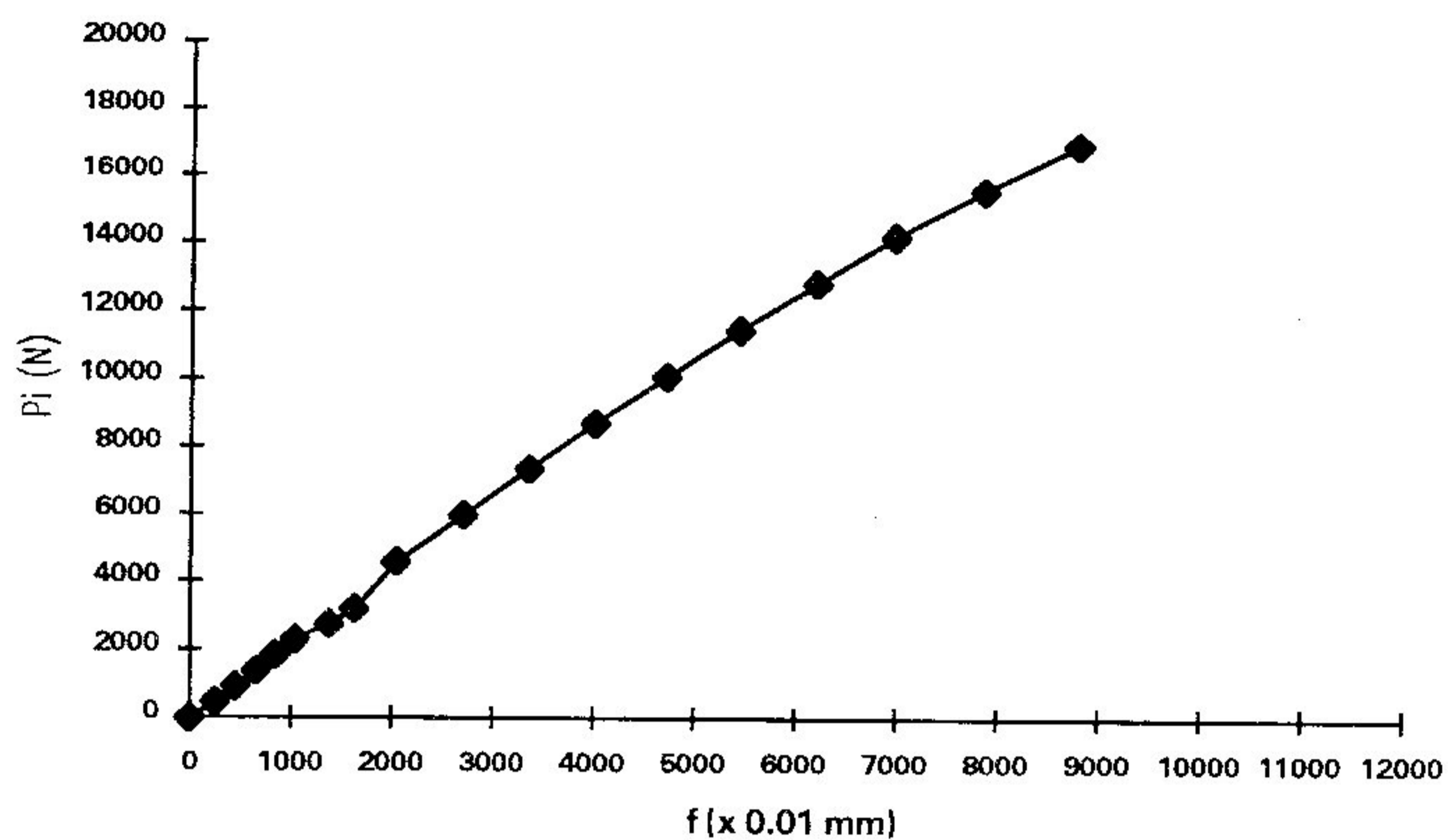


Gráfico 5.15 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V05 - Ensaio 4

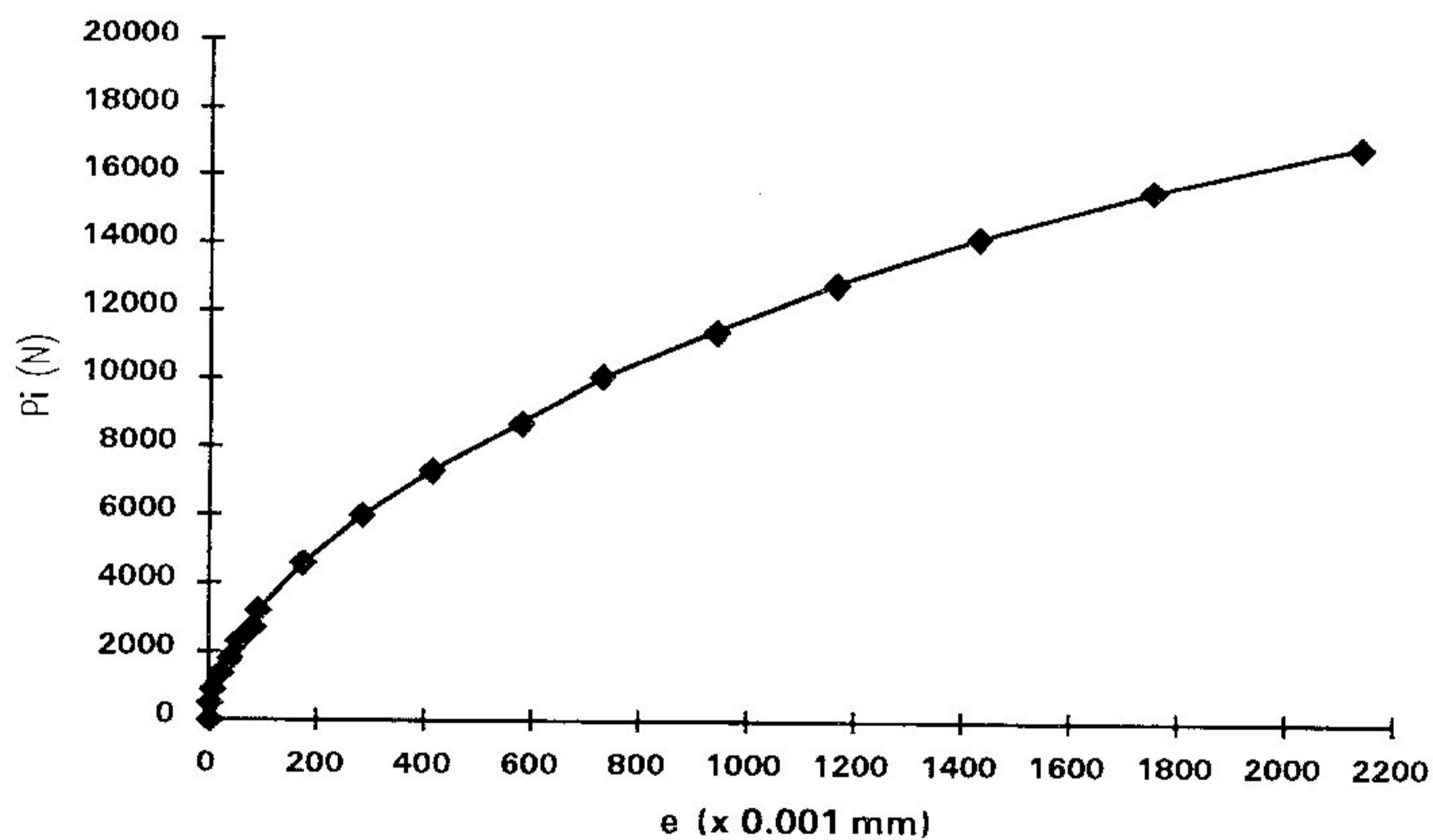


Gráfico 5.16 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V05 - Ensaio 4

Pi	f	Δf	e	Δe
(N)	(x 10 ⁻² mm)		(x 10 ⁻³ mm)	
458	274	-	0	-
916	488	214	1	1
1374	667	179	4	3
1832	871	204	9	5
2290	1057	186	14	5
2748	1244	187	19	5
3206	1414	170	23	4
4580	1941	527	60	37
5954	2669	728	145	85
7328	3291	622	235	90
8702	3971	680	385	150
10076	4645	674	560	175
11450	5356	711	755	195
12824	6071	715	980	225
14198	6825	754	1235	255
15572	7648	823	1530	295
16946	8574	826	1935	405
18320	9441	867	2260	325

Tabela 5.14 - Deslocamentos da Viga V06 - Ensaio 4

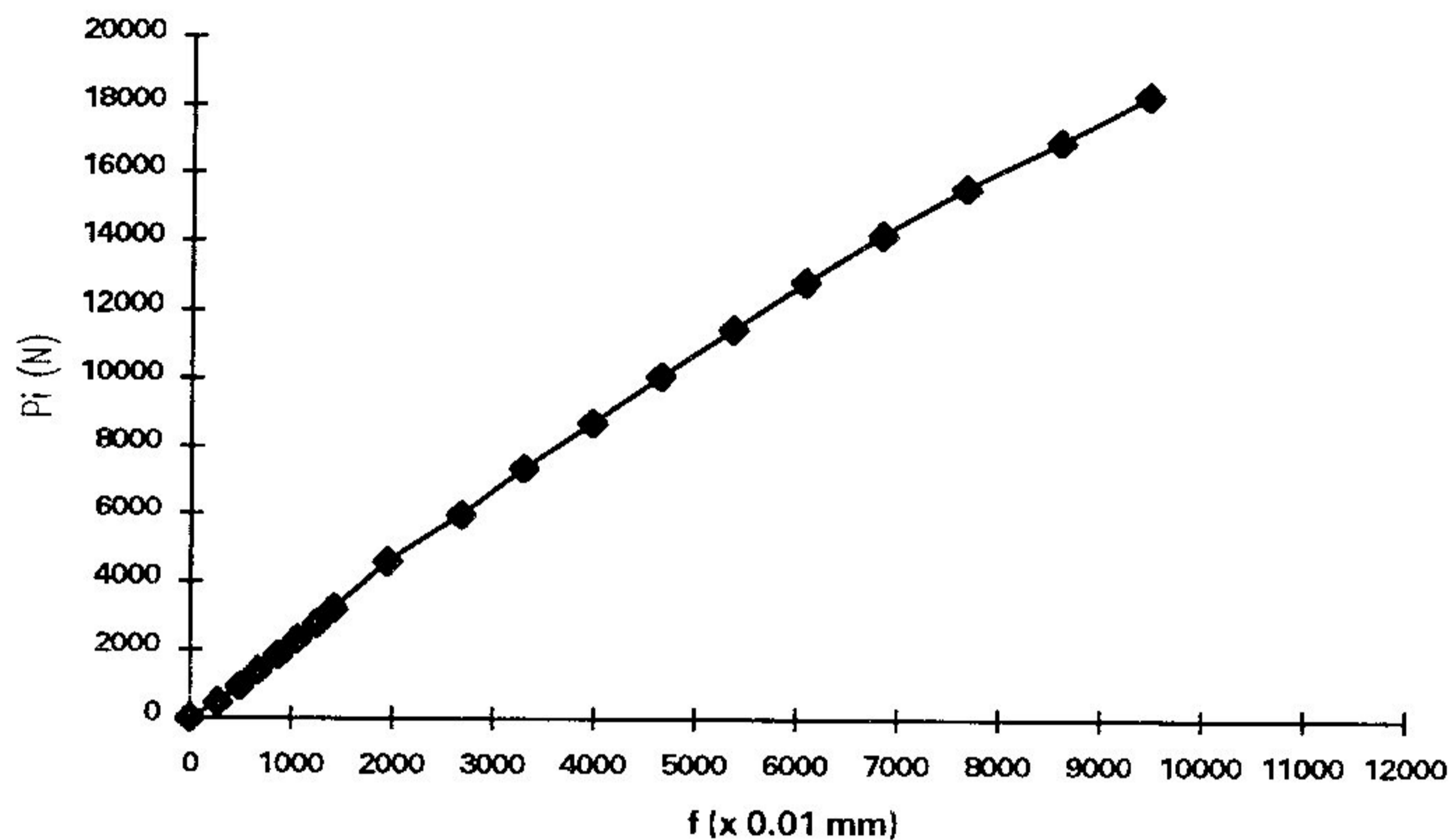


Gráfico 5.17 - Curva Carga-Deslocamento Vertical para V06 - Ensaio 4

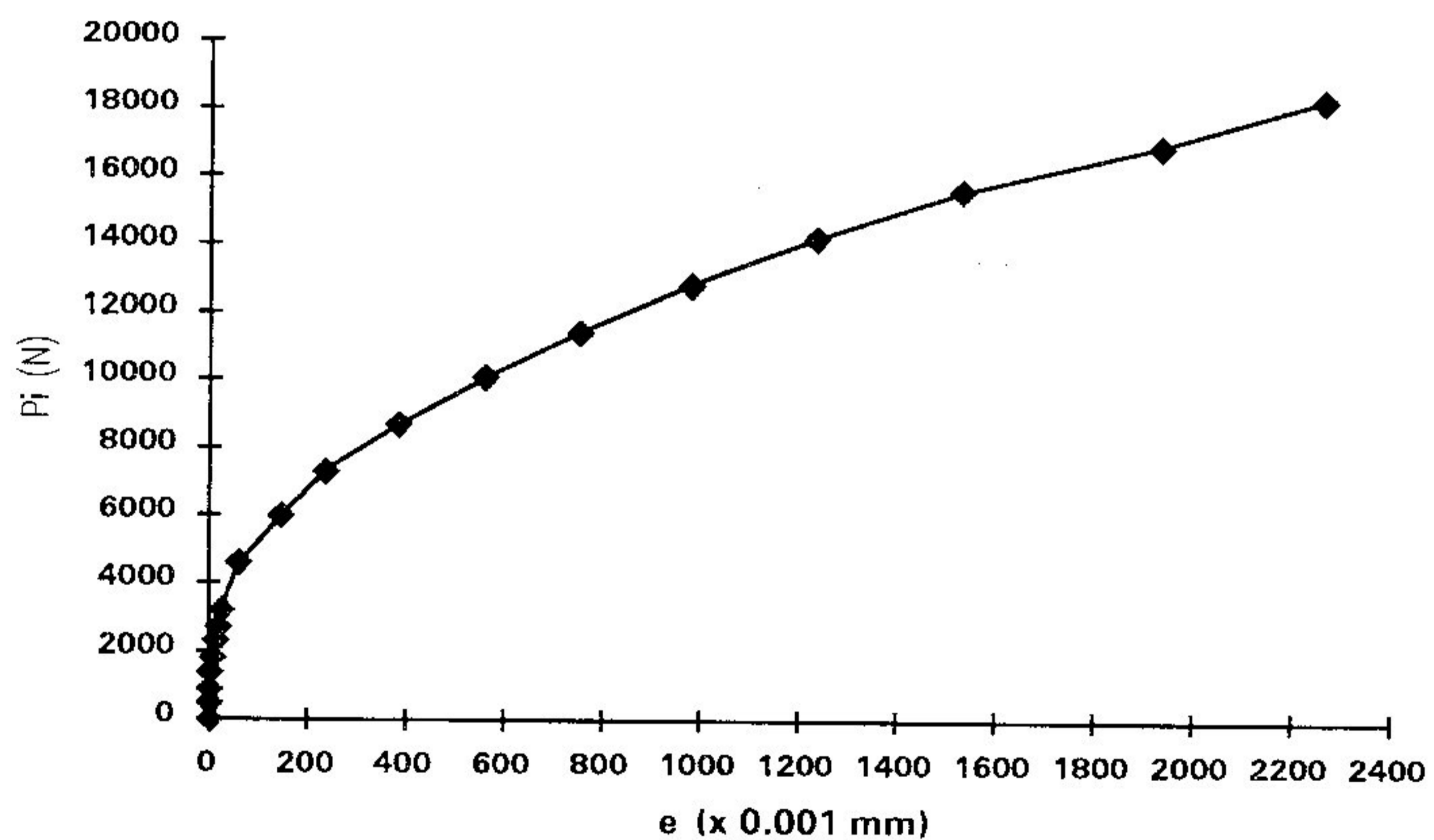


Gráfico 5.18 - Curva Carga-Deslocamento Horizontal para V06 - Ensaio 4

5.4 - Traçado dos Diagramas de Deformações ao longo da Seção Composta

Com os dados das deformações, na fase elástica de solicitação do material, obtidos por intermédio de três ensaios, conforme descrito no início deste capítulo, traçou-se, graficamente, os diagramas de deformações ao longo da altura da seção transversal compostas para todas as vigas.

Os diversos pontos mostrados nos diagramas, a seguir, foram caracterizados por um determinado símbolo (triângulo, círculo, cruz, etc) para mostrar a configuração do diagrama variando com uma determinada carga de ensaio. Para uma mesma carga, estes pontos estratégicos foram interligados linearmente afim de considerar a hipótese inicial de variação linear das deformações ao longo da seção composta. Apesar de ocorrer, fisicamente, um pequeno afastamento entre os extensômetros situados entre o fundo da mesa e o topo da alma, algo em torno de cinco milímetros, foi admitido um mesmo ponto para a plotagem destas deformações nos diagramas. Por isso, pode-se observar, para cada carga de ensaio, dois valores de deformações neste ponto resultantes da descontinuidade das peças

É importante salientar que os valores plotados em todos os diagramas que se seguem, foram devidamente compensados pelo valor das deformações devido à pequena variação de temperatura do ambiente.

Foi convencionado para as deformações de tração valores positivos e para as deformações de compressão valores negativos. A seguinte terminologia foi adotada para as deformações:

- ϵ_1 : deformação longitudinal no topo das mesas no meio do vão das vigas;
- ϵ_2 : deformação longitudinal no fundo das mesas no meio do vão das vigas;
- ϵ_3 : deformação longitudinal no topo das almas no meio do vão das vigas;
- ϵ_4 : deformação longitudinal no centro de gravidade da seção do meio do vão;
- ϵ_5 : deformação longitudinal no fundo das almas no meio do vão das vigas;
- ϵ_6 : deformação longitudinal em uma peça de madeira de mesma espécie.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-115	-43	-48	-14	150	2
916	-176	-66	-72	-15	235	5
1374	-246	-98	-103	-18	338	5
1832	-299	-120	-125	-20	417	2
2290	-364	-150	-158	-27	514	3
2748	-420	-179	-189	-30	603	1
3206	-479	-199	-215	-35	690	2

Tabela 5.15 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 1

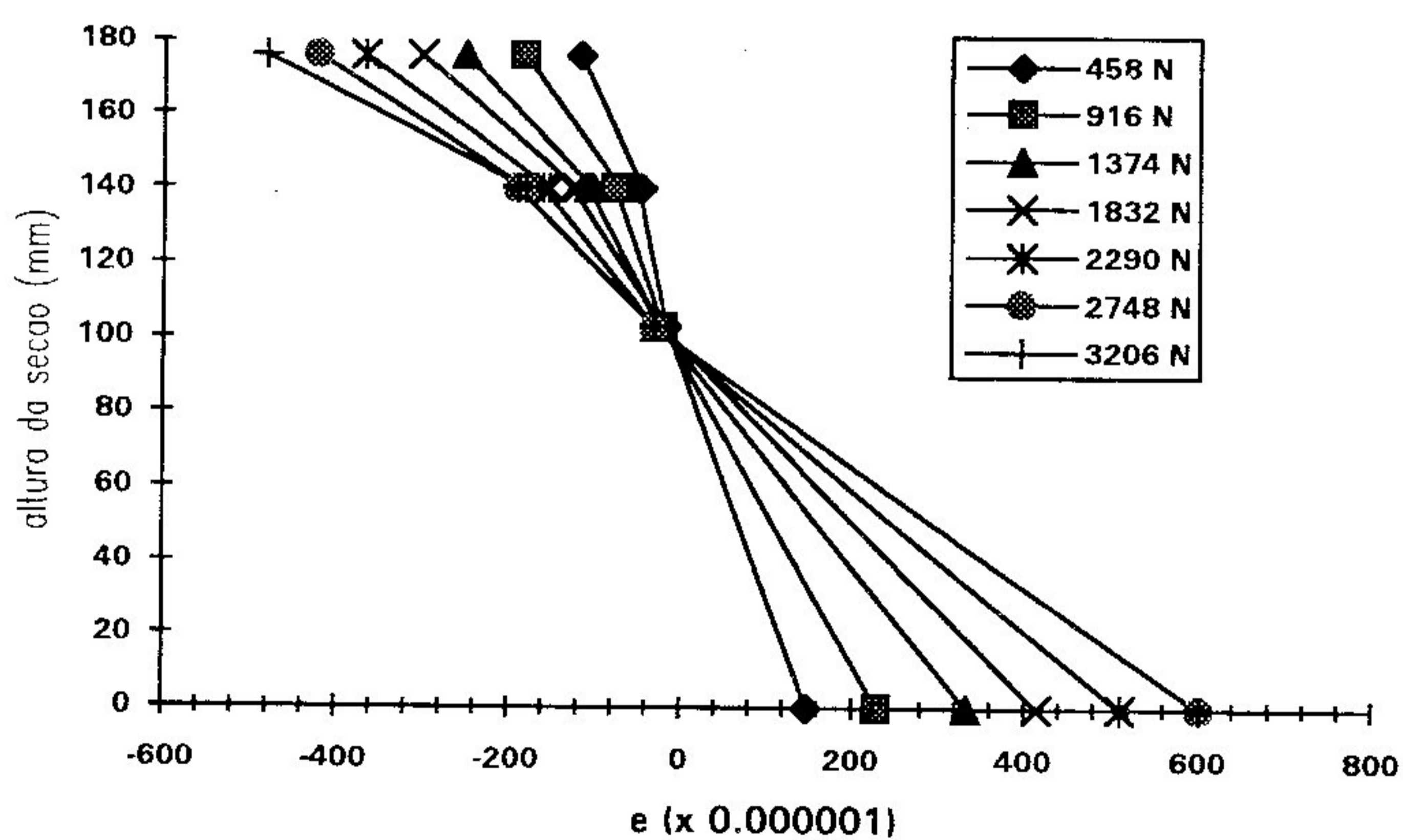


Diagrama 5.1 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 1

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-140	-60	-52	-23	185	2
916	-201	-88	-82	-18	272	4
1374	-263	-111	-113	-23	368	7
1832	-323	-144	-139	-27	455	6
2290	-384	-164	-173	-28	545	7
2748	-443	-189	-198	-35	635	8
3206	-503	-217	-233	-40	738	7

Tabela 5.16 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 2

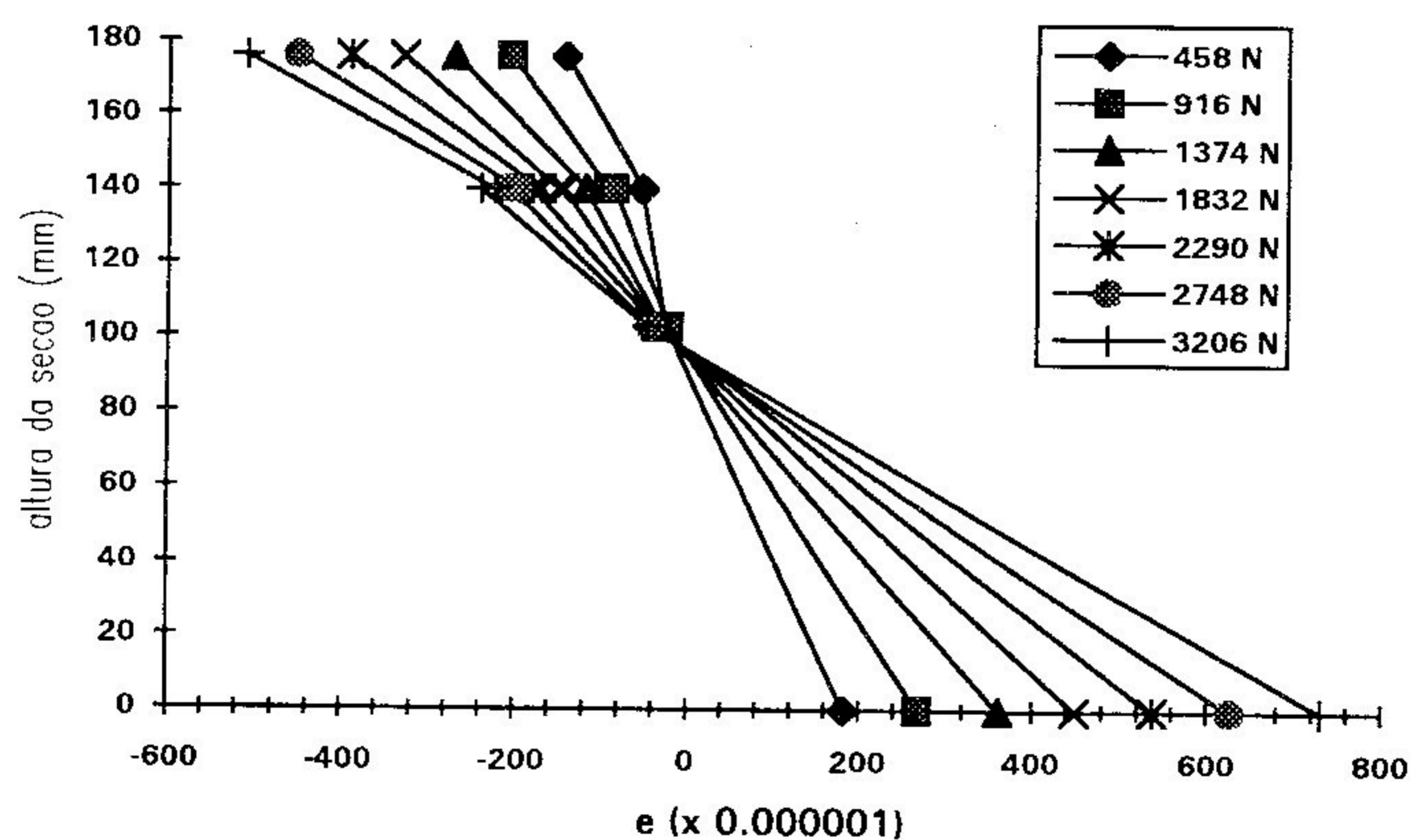


Diagrama 5.2 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 2

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-117	-59	-57	-16	168	3
916	-175	-87	-85	-17	255	4
1374	-236	-114	-116	-22	354	12
1832	-298	-143	-147	-28	442	10
2290	-359	-167	-179	-25	553	7
2748	-402	-196	-206	-30	641	42
3206	-460	-224	-242	-36	734	58

Tabela 5.17 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 3

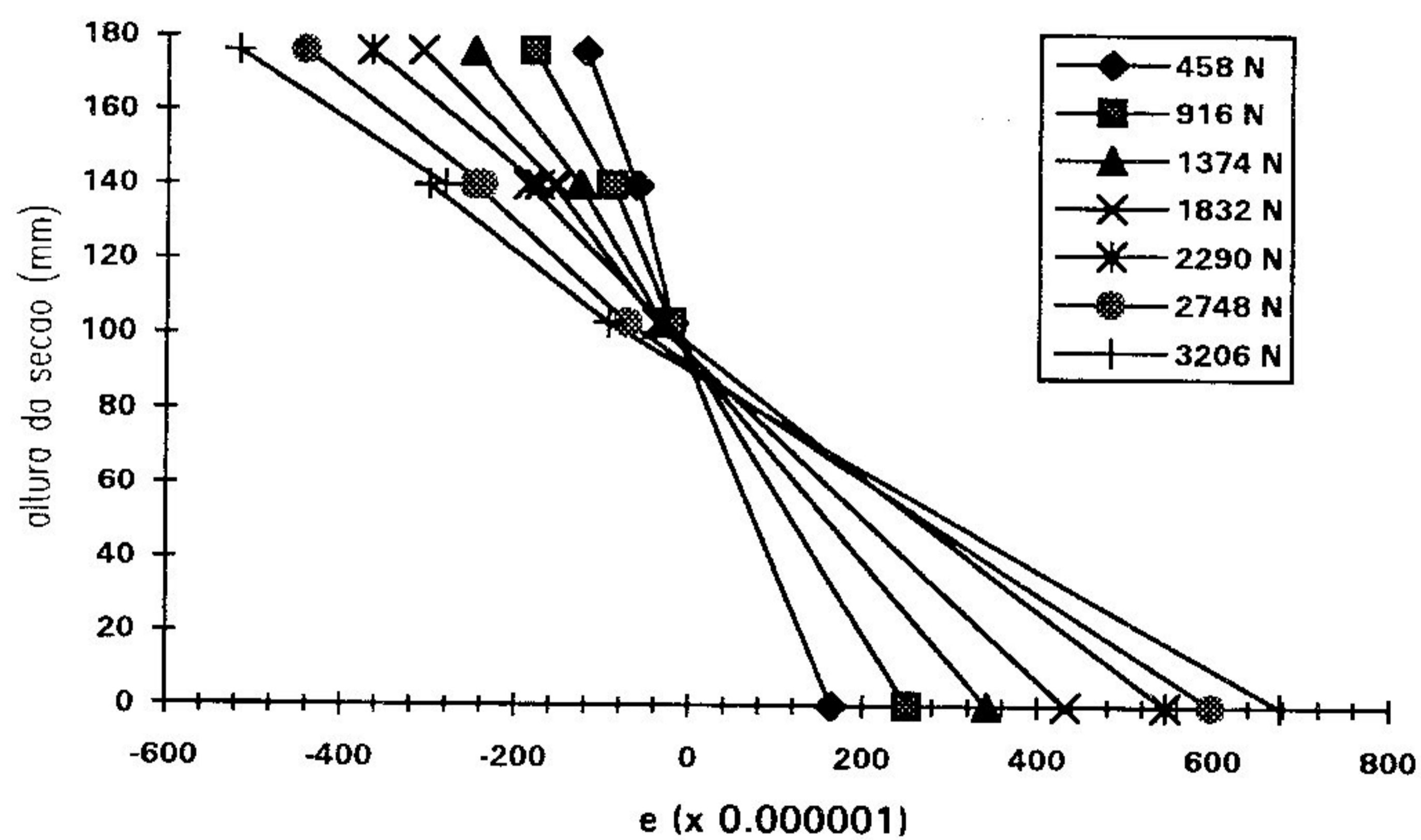


Diagrama 5.3 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 3

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	$(x 10^{-6})$					
458	-141	-55	-60	3	135	12
916	-225	-100	-100	3	292	11
1374	-310	-138	-138	2	401	11
1832	-400	-175	-177	2	521	11
2290	-488	-215	-218	4	636	10
2748	-578	-245	-252	1	755	10
3206	-662	-278	-299	0	870	12

Tabela 5.18 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 1

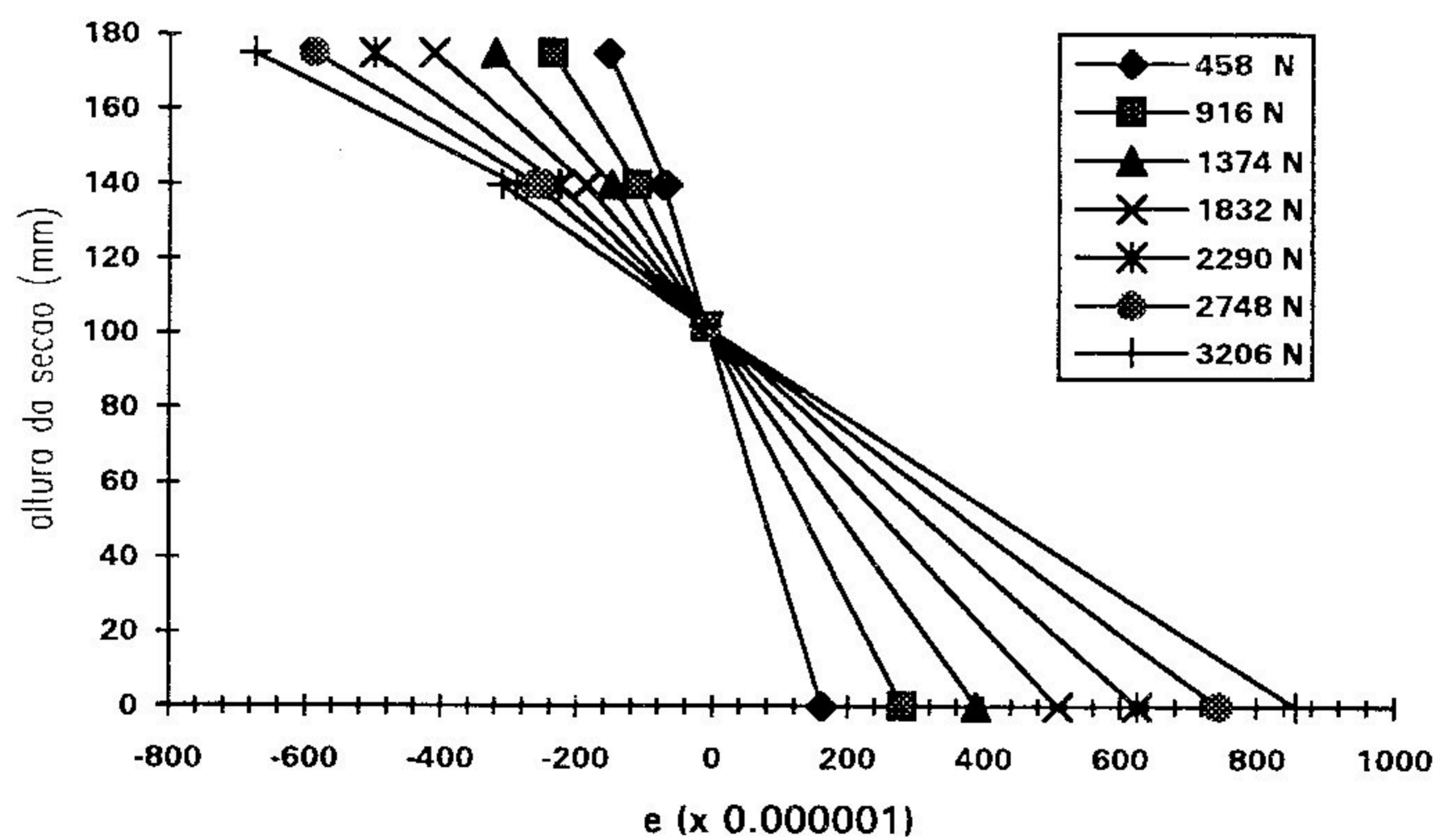


Diagrama 5.5 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 1

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-160	-41	-70	10	205	22
916	-244	-83	-110	11	321	18
1374	-332	-124	-150	10	440	22
1832	-413	-159	-189	11	545	21
2290	-502	-199	-228	11	666	21
2748	-588	-233	-266	12	787	23
3206	-661	-268	-300	12	882	20

Tabela 5.19 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 2

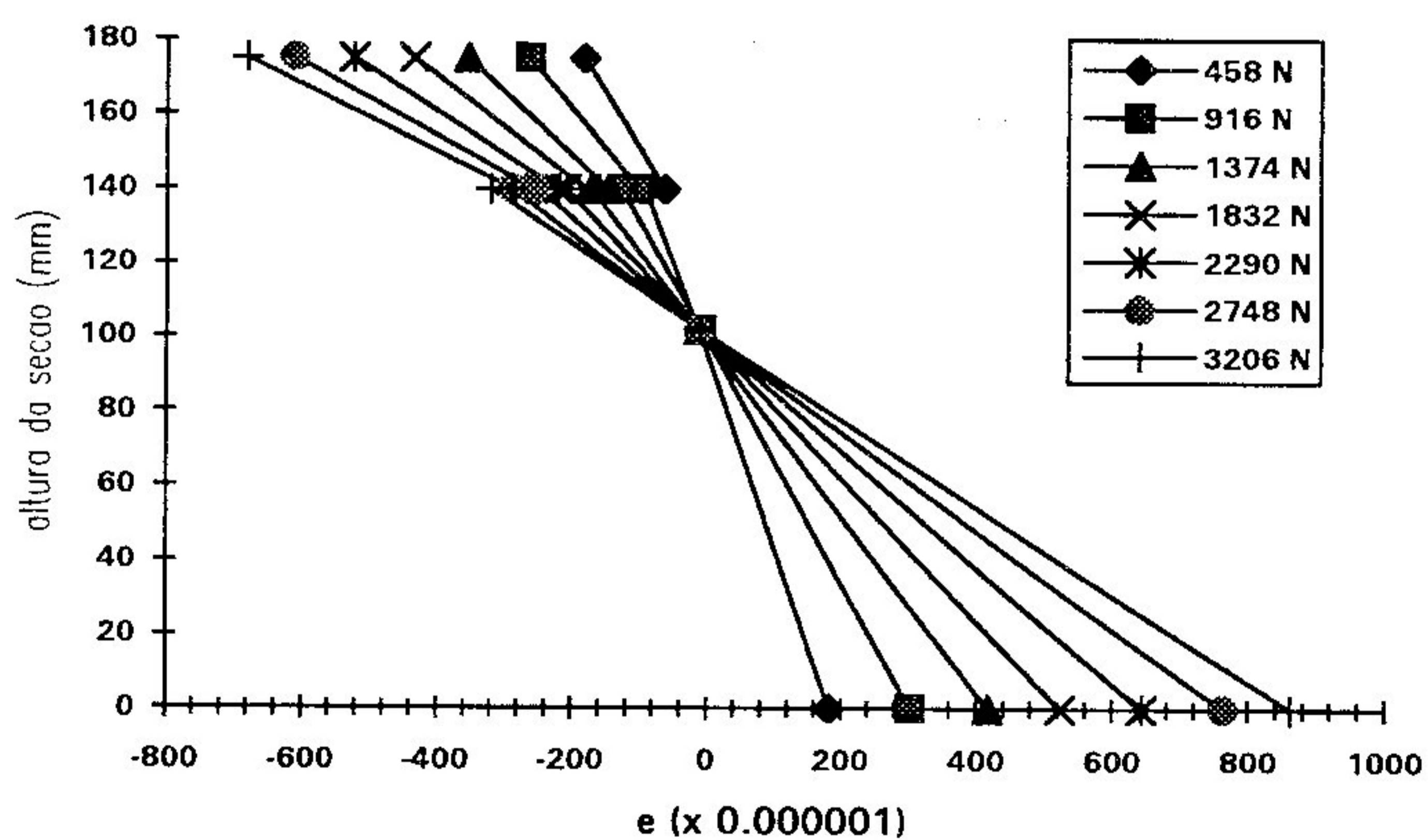


Diagrama 5.6 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 2

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-147	-69	-65	6	200	0
916	-253	-117	-111	5	337	0
1374	-333	-150	-148	5	444	0
1832	-416	-189	-187	5	558	0
2290	-500	-225	-224	3	666	0
2748	-589	-263	-260	5	785	0
3206	-670	-300	-300	5	895	0

Tabela 5.20 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 3

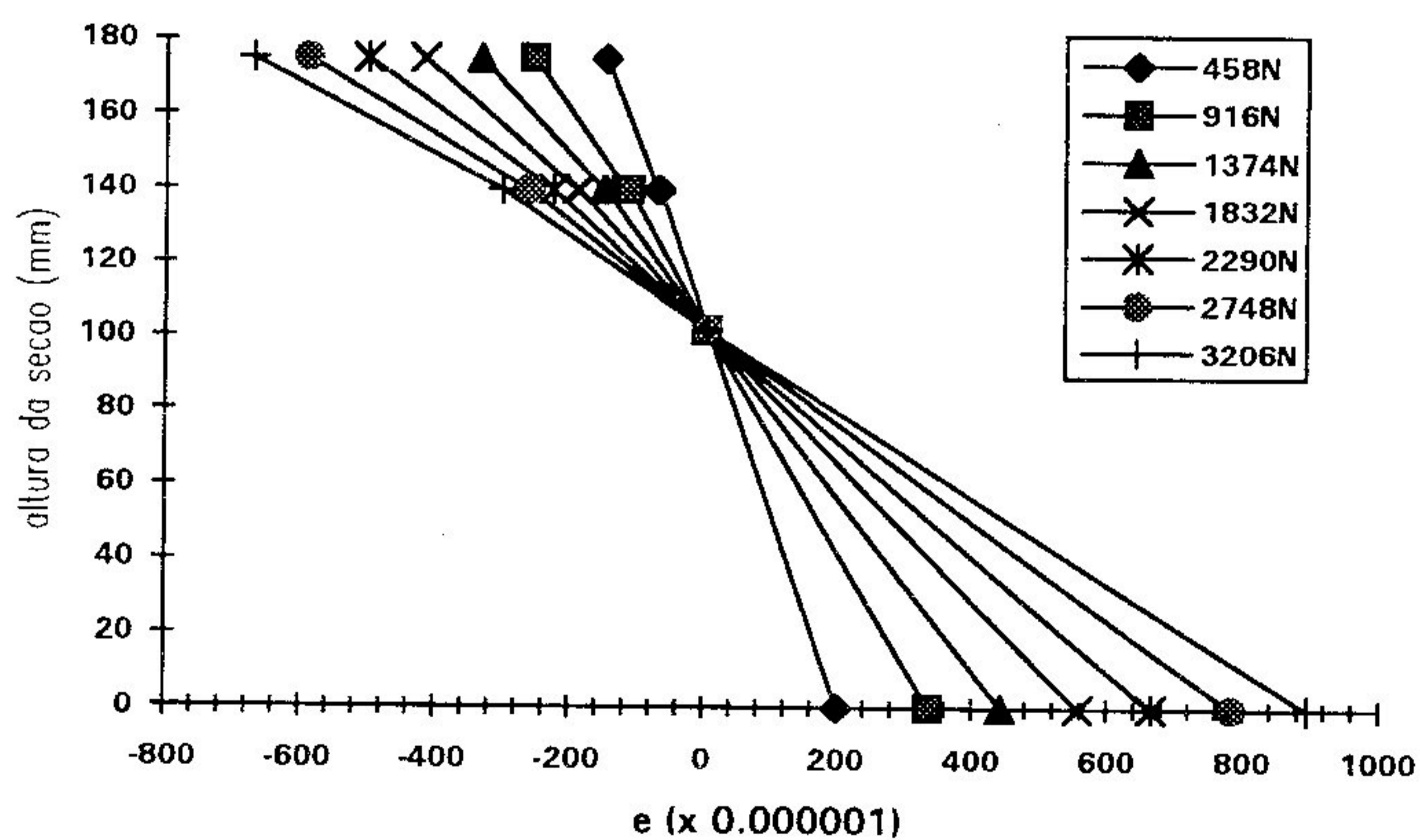


Diagrama 5.7 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 3

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-98	-50	-32	-9	127	2
916	-176	-96	-66	-11	242	5
1374	-246	-137	-100	-16	345	0
1832	-291	-160	-120	-20	415	2
2290	-356	-197	-148	-26	518	7
2748	-420	-227	-177	-30	610	6
3206	-488	-260	-207	-39	708	9

Tabela 5.21 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 1

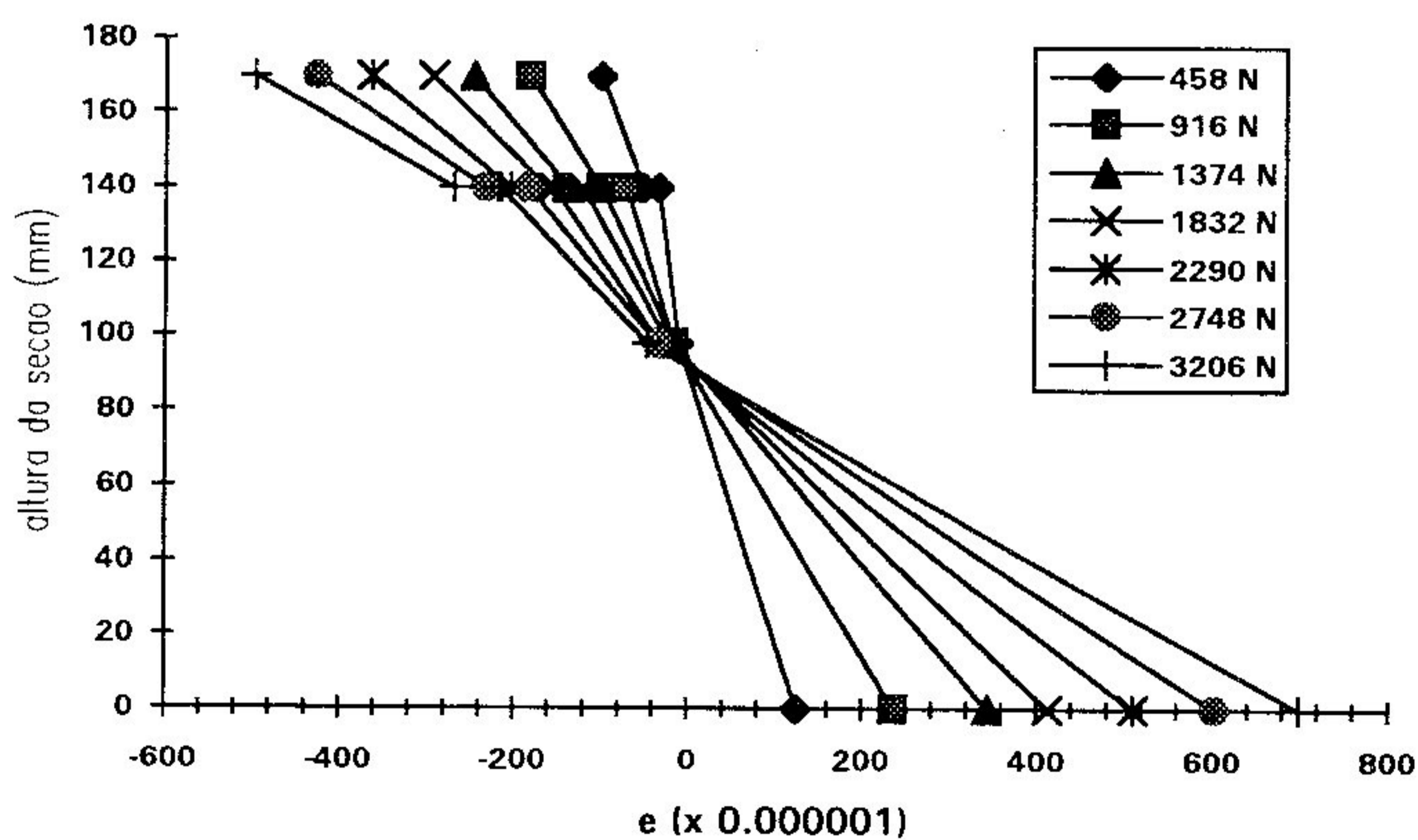


Diagrama 5.8 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 1

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-129	-75	-57	-8	186	-28
916	-191	-109	-84	-7	287	-20
1374	-254	-144	-112	-13	384	-15
1832	-311	-179	-139	-19	473	-10
2290	-378	-217	-166	-20	575	-8
2748	-440	-258	-192	-25	670	-5
3206	-502	-282	-219	-30	764	-7

Tabela 5.22 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 2

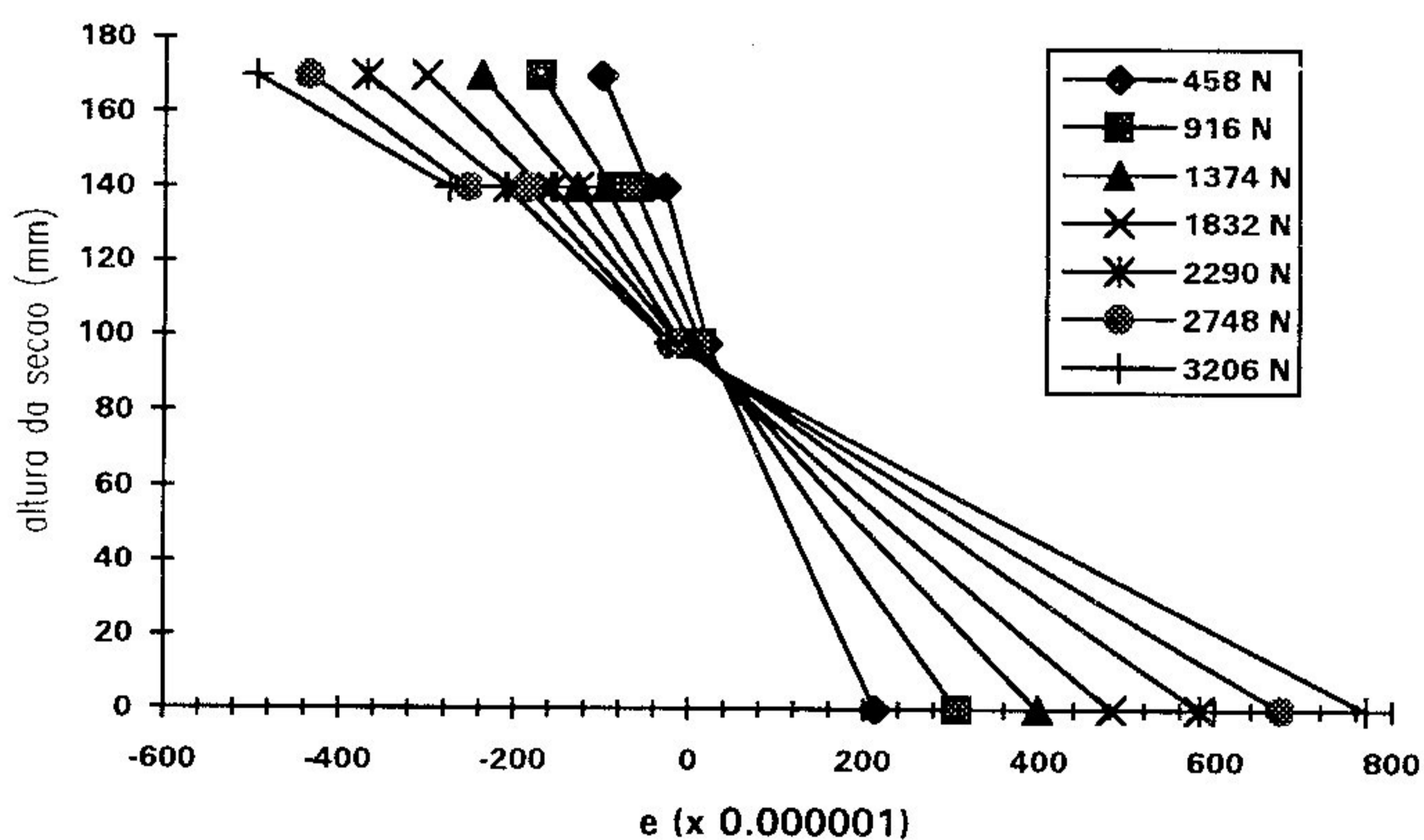


Diagrama 5.9 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 2

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-111	-61	-30	-6	166	2
916	-173	-100	-60	-9	267	0
1374	-234	-136	-88	-16	362	0
1832	-296	-164	-111	-15	457	0
2290	-366	-204	-140	-24	560	0
2748	-420	-234	-163	-30	643	-3
3206	-490	-270	-196	-33	750	-5

Tabela 5.23 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 3

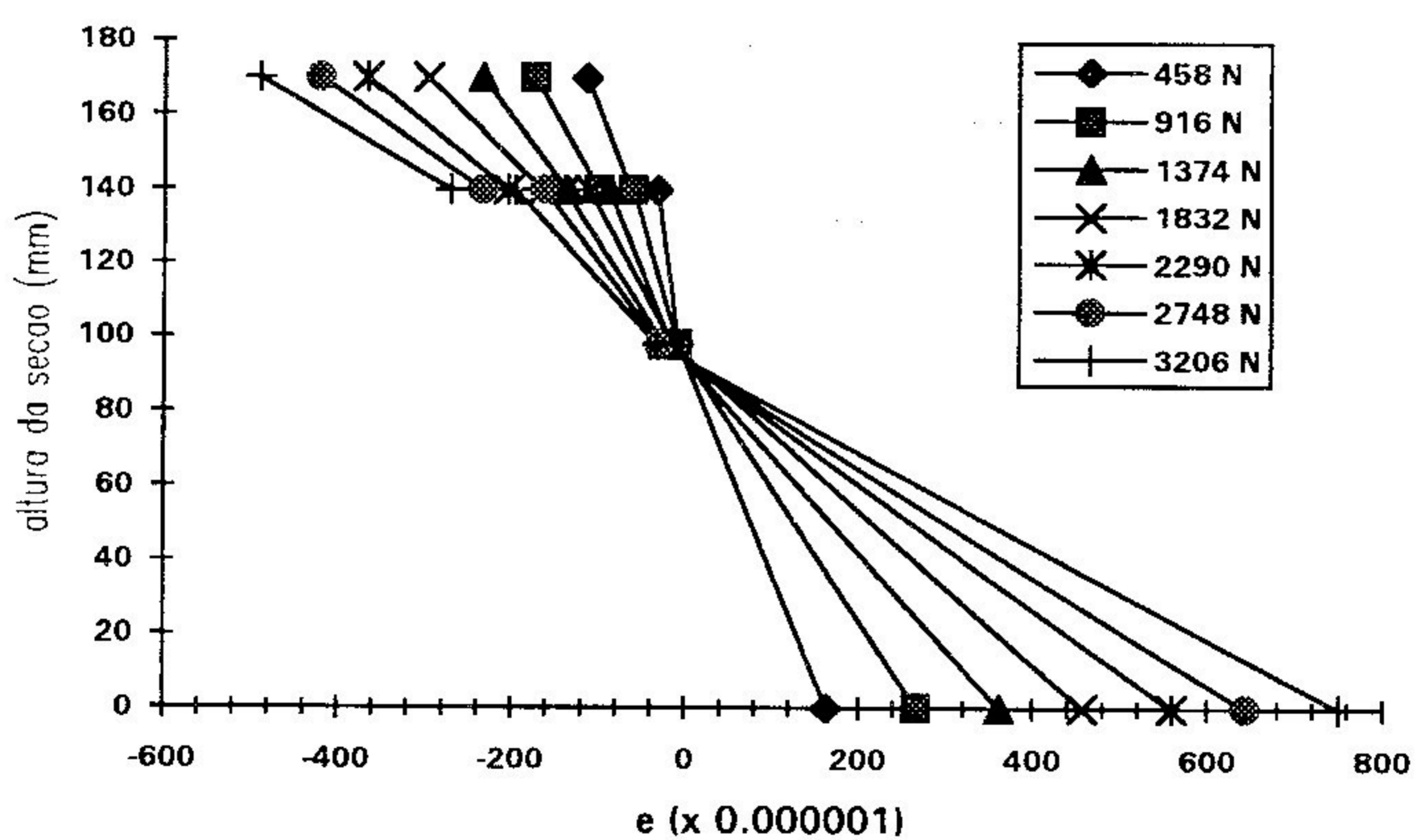


Diagrama 5.10 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 3

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-122	-40	-50	0	193	3
916	-200	-75	-90	-10	320	0
1374	-280	-112	-130	-20	418	2
1832	-356	-145	-170	-32	526	5
2290	-434	-178	-215	-46	641	2
2748	-510	-210	-261	-60	754	0
3206	-541	-237	-306	-77	858	2

Tabela 5.24 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 1

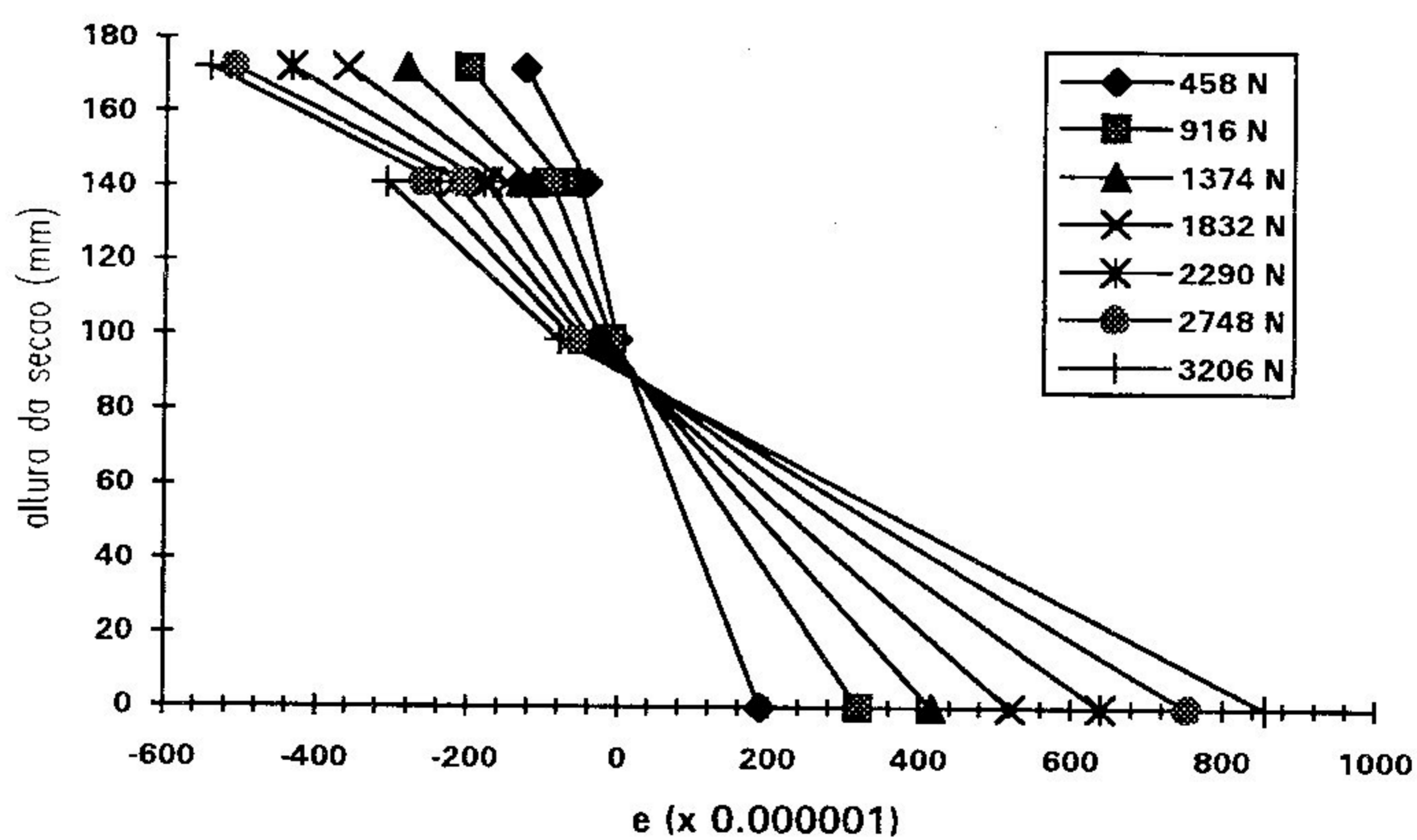


Diagrama 5.11 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 1

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-117	-45	-53	2	196	10
916	-194	-80	-89	-5	311	10
1374	-271	-110	-129	-15	421	3
1832	-343	-140	-171	-22	519	5
2290	-420	-180	-207	-35	624	6
2748	-500	-211	-253	-52	746	10
3206	-575	-243	-294	-65	835	9

Tabela 5.25 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 2

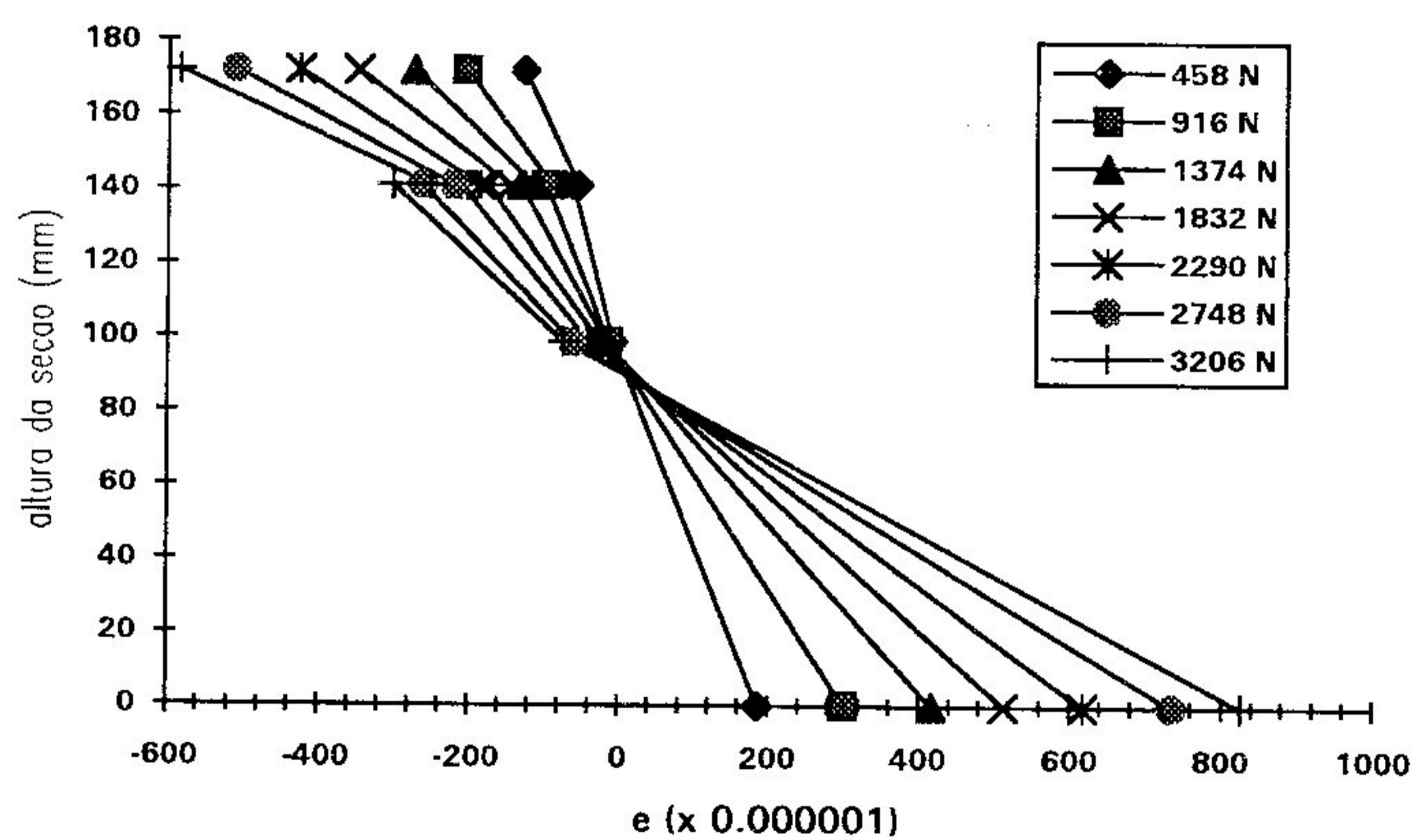


Diagrama 5.12 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 2

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	$(\times 10^{-6})$					
458	-115	-45	-45	-7	169	0
916	-195	-82	-87	-15	285	4
1374	-266	-116	-129	-21	394	0
1832	-333	-148	-165	-33	490	0
2290	-414	-177	-205	-45	606	0
2748	-480	-204	-241	-54	703	0
3206	-570	-248	-293	-67	828	0

Tabela 5.26 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 3

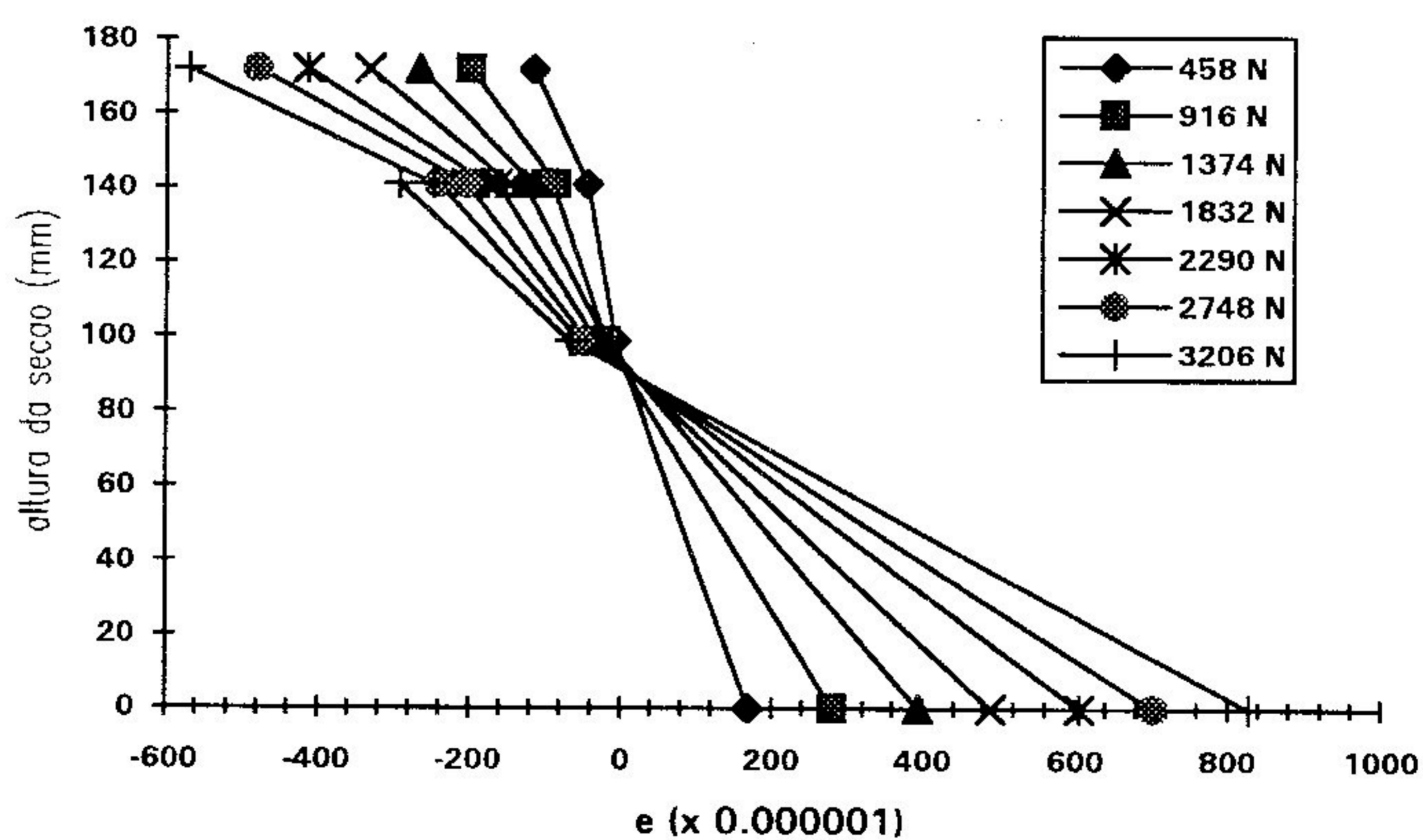


Diagrama 5.13 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 3

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-93	-40	-32	3	136	0
916	-162	-80	-63	7	240	0
1374	-222	-119	-88	5	330	0
1832	-270	-147	-114	3	404	0
2290	-335	-185	-145	3	500	0
2748	-402	-223	-180	-4	594	0
3206	-460	-253	-210	-9	680	0

Tabela 5.27 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 1

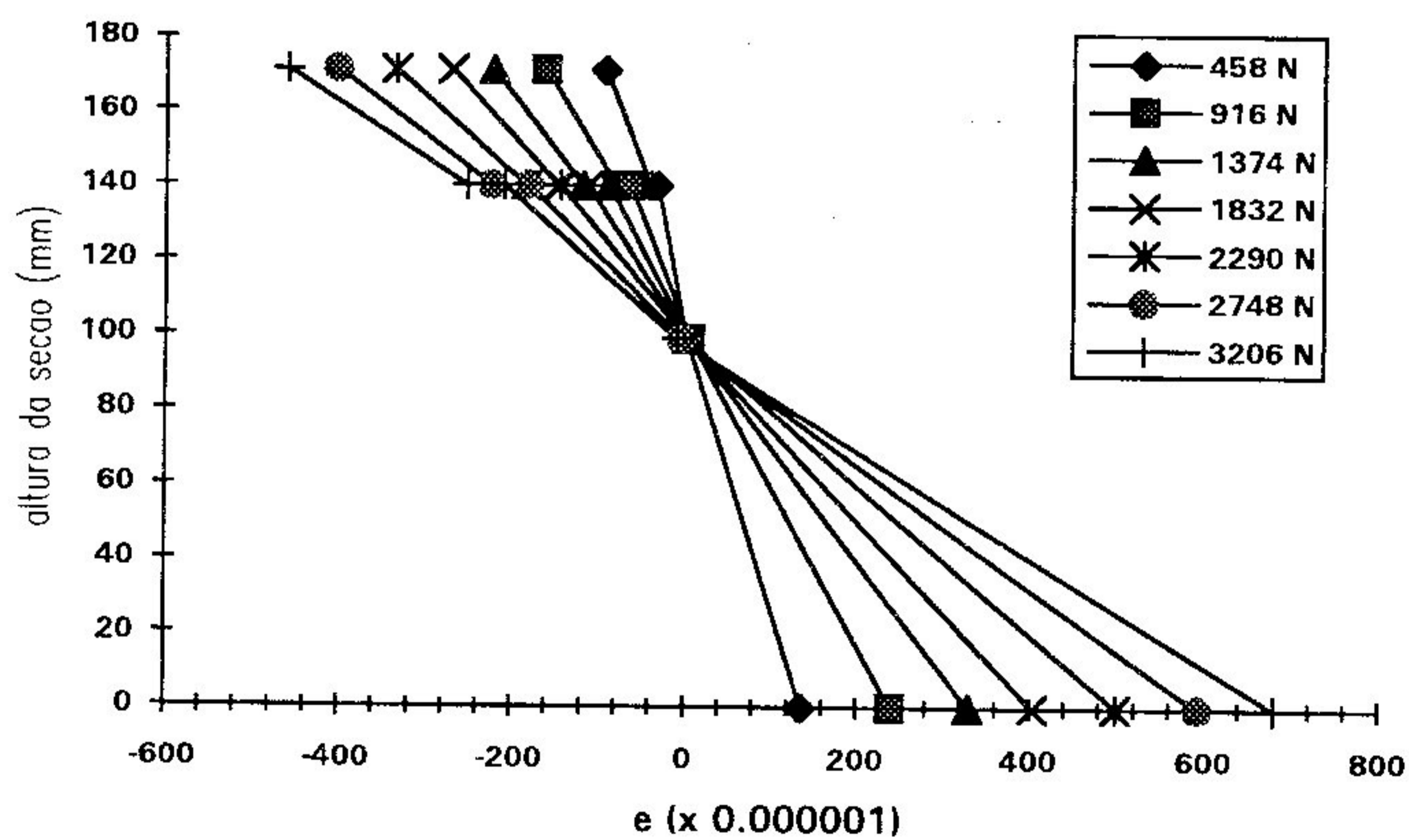


Diagrama 5.14 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 1

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-113	-64	-46	1	166	-6
916	-179	-105	-77	3	270	10
1374	-227	-136	-104	-1	343	2
1832	-294	-174	-134	-4	439	0
2290	-351	-207	-161	-6	523	7
2748	-418	-245	-197	-10	620	21
3206	-474	-276	-223	-16	700	26

Tabela 5.28 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 2

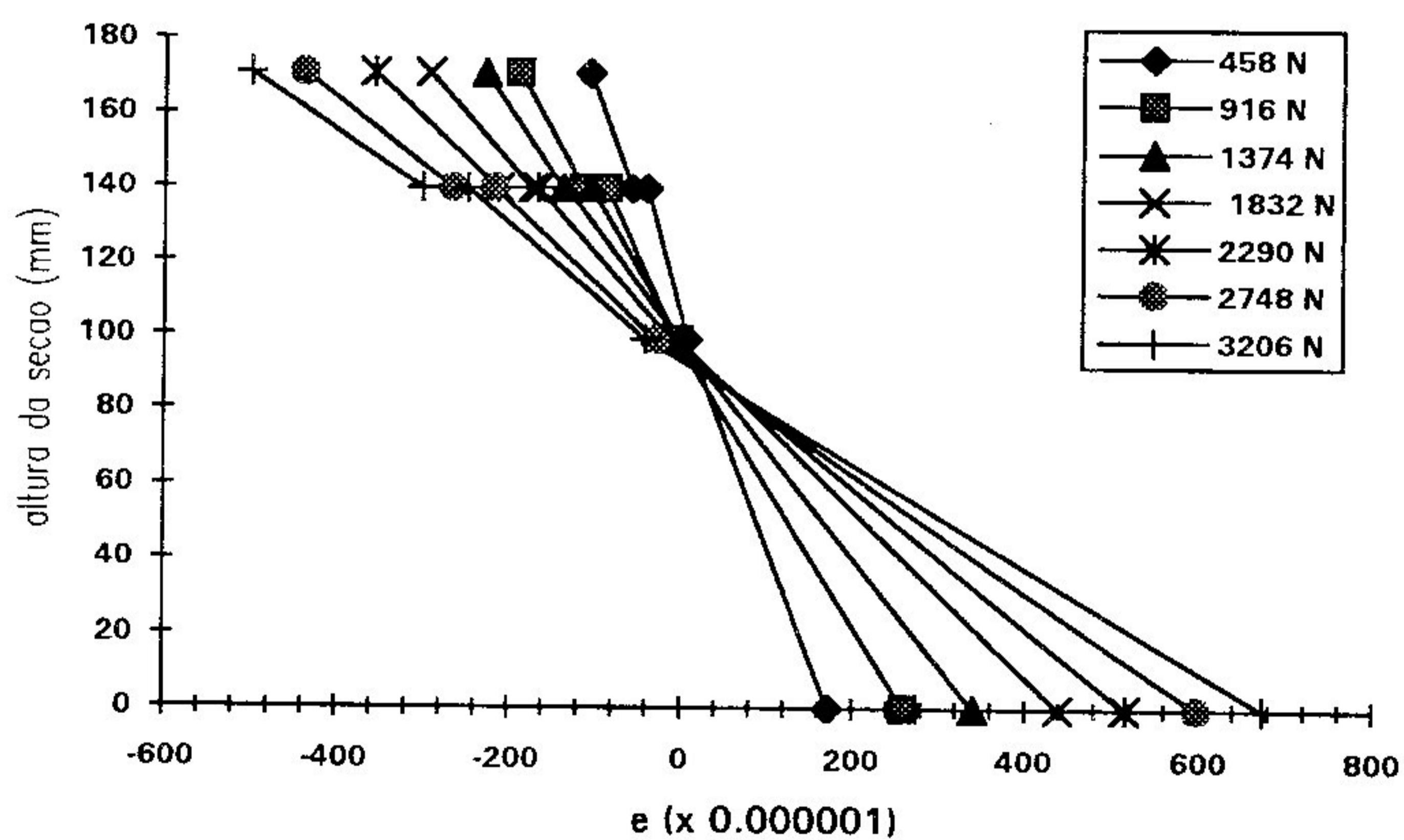


Diagrama 5.15 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 2

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-106	-50	-38	7	148	-9
916	-172	-92	-70	8	251	-7
1374	-220	-120	-92	5	321	-16
1832	-290	-159	-122	4	420	0
2290	-350	-195	-153	2	510	-33
2748	-405	-229	-179	0	587	-34
3206	-468	-262	-210	-5	676	-35

Tabela 5.29 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 3

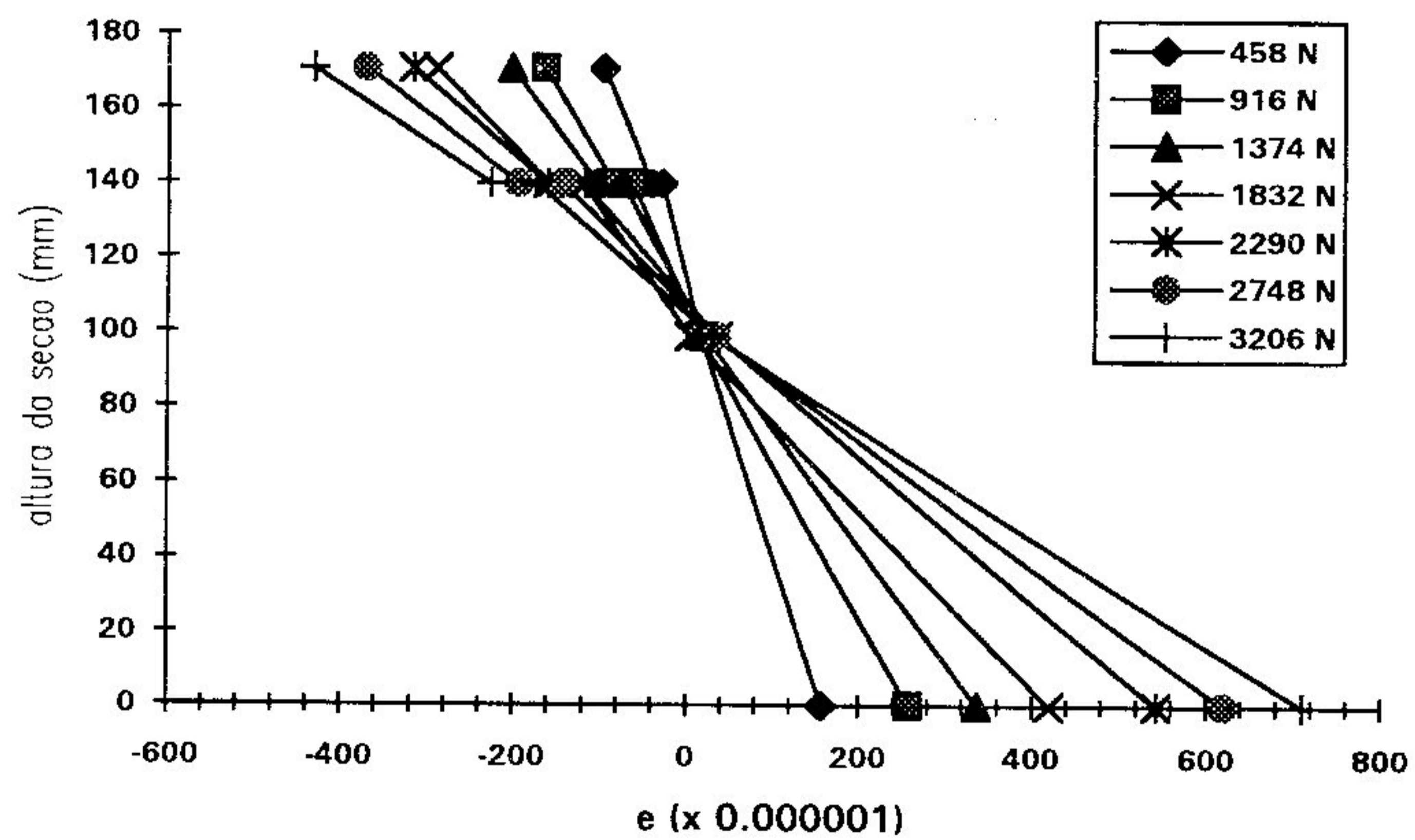


Diagrama 5.16 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 3

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-127	-40	-27	5	148	1
916	-212	-70	-47	5	240	0
1374	-248	-105	-75	6	335	2
1832	-318	-133	-58	4	433	0
2290	-386	-165	-73	0	530	0
2748	-444	-190	-100	-4	624	0
3206	-483	-217	-125	-7	710	0

Tabela 5.30 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 1

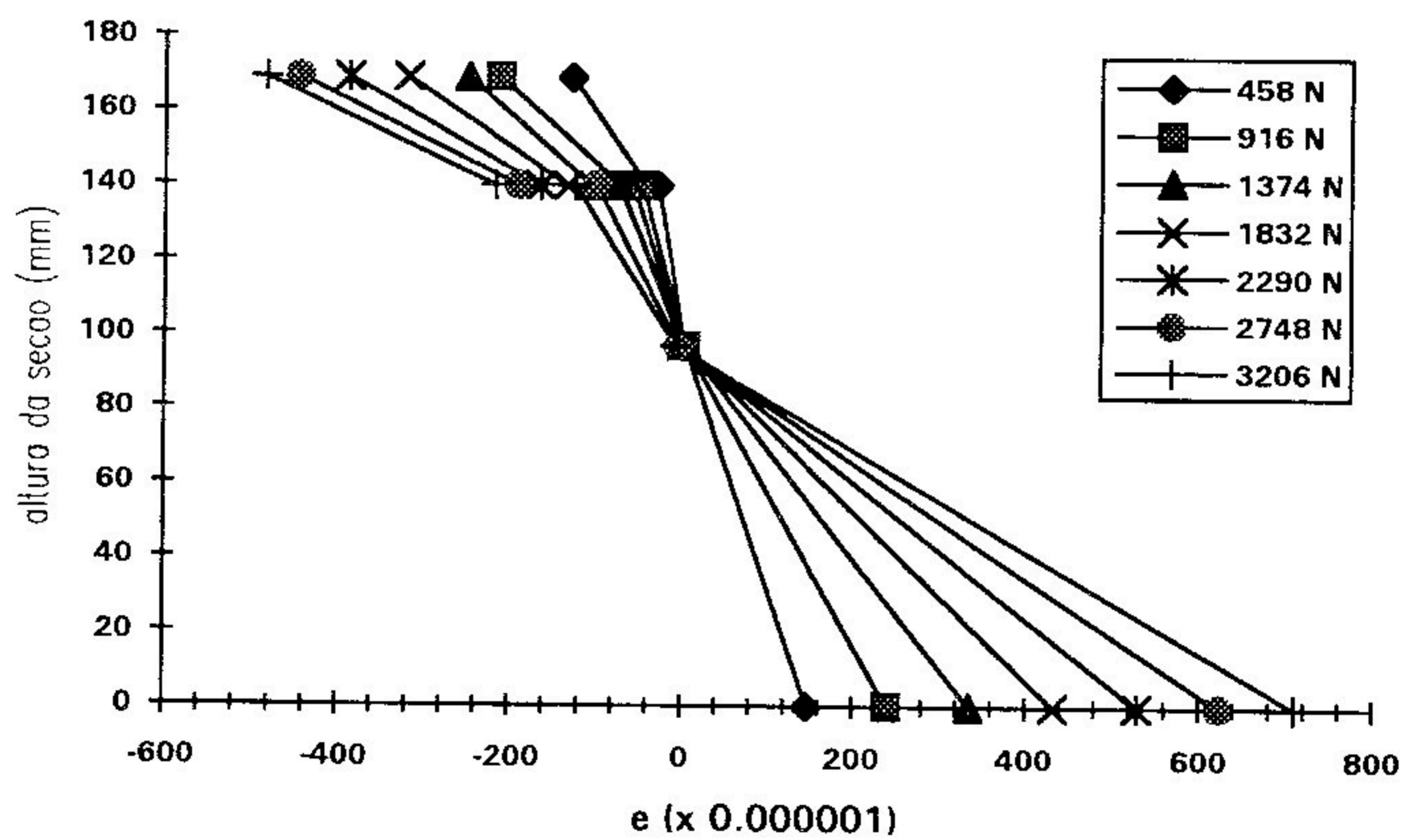


Diagrama 5.17 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 1

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-122	-40	-30	7	150	0
916	-212	-75	-56	8	250	0
1374	-271	-105	-80	8	340	2
1832	-320	-135	-105	7	425	1
2290	-393	-170	-138	1	528	0
2748	-437	-195	-163	2	616	0
3206	-472	-226	-190	-2	715	3

Tabela 5.31 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 2

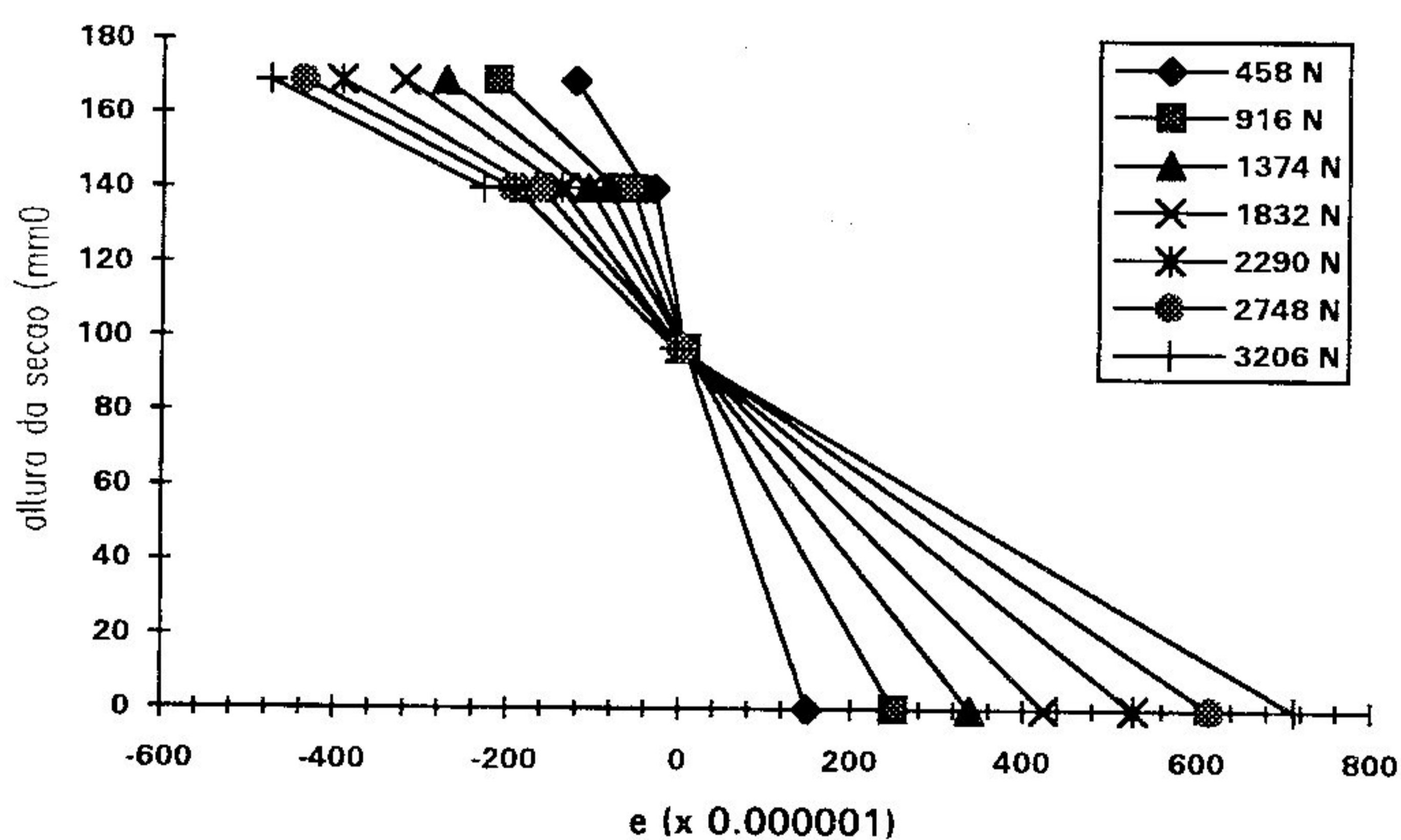


Diagrama 5.18 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 2

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-92	-44	-43	7	163	1
916	-148	-77	-70	7	257	0
1374	-209	-109	-93	4	350	0
1832	-261	-136	-115	3	437	0
2290	-325	-169	-144	2	544	3
2748	-378	-197	-167	0	629	0
3206	-433	-224	-189	0	710	0

Tabela 5.32 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 3

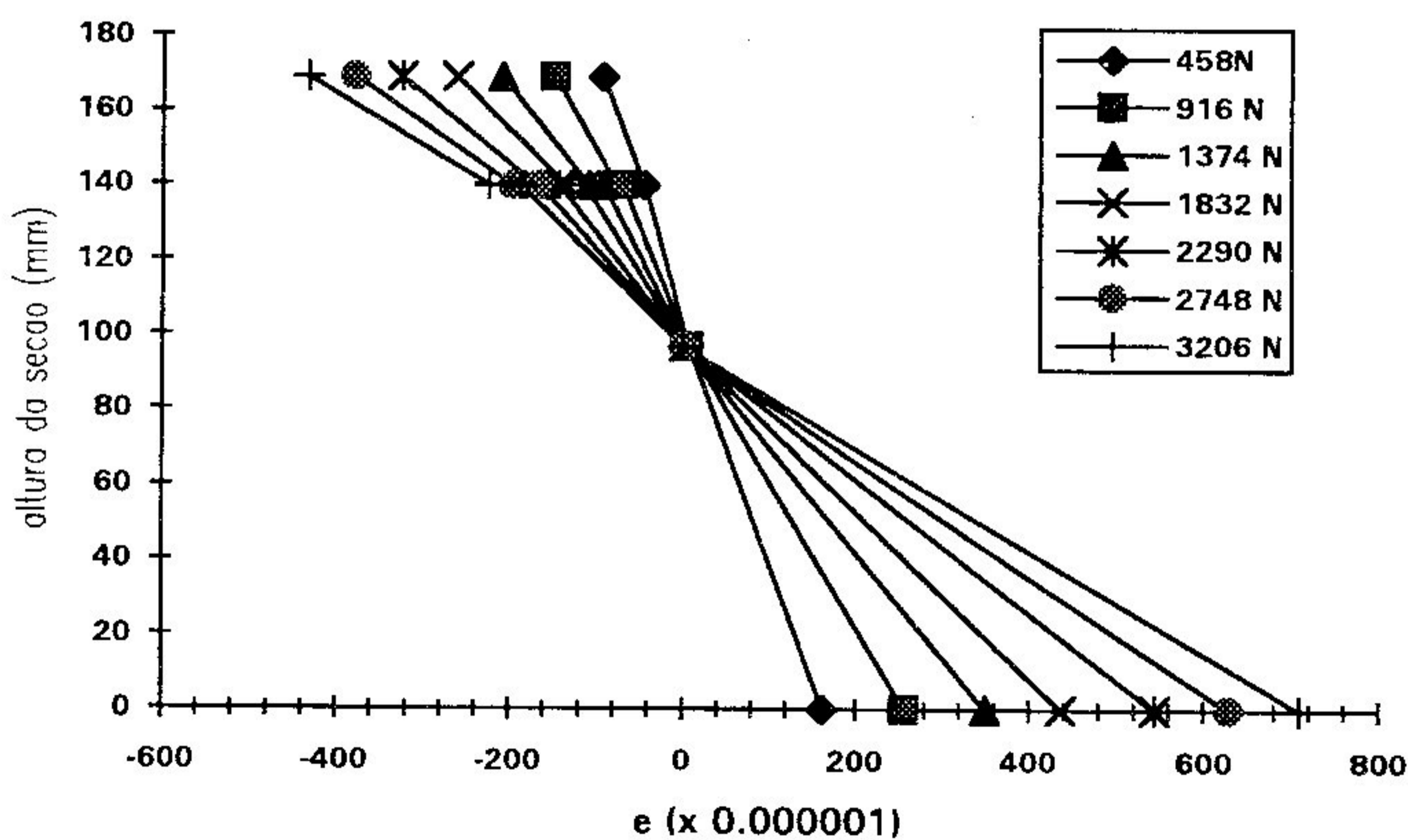


Diagrama 5.19 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 3

5.5 - Traçado das Curvas Carga-Deformação das Vigas Compostas

O presente item objetiva apresentar o comportamento das deformações de compressão e tração coletadas ao longo da seção transversal das vigas compostas durante a realização dos ensaios de número quatro, ou seja, onde o carregamento atinge a ruptura por ruína das peças. Além disso, alguns diagramas de deformação para algumas cargas de valor elevado, também foram plotados para cada viga.

De maneira análoga ao descrito para os deslocamentos verticais e horizontais, as deformações próximas da ruptura das peças não foram coletadas. Devido à grande variação de velocidade dos valores destas deformações observados durante a realização dos ensaios para cargas mais elevadas, tornou-se meramente impossível a obtenção das deformações que eram realizadas, manualmente, pela leitura dos canais da mala de extensometria.

As tabelas, diagramas e gráficos seguem a mesma sistemática descrita nos itens anteriores.

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-127	-58	-60	-2	173	-10
916	-179	-79	-87	-6	260	-10
1374	-243	-108	-118	-10	345	-15
1832	-304	-135	-149	-17	442	-21
2290	-361	-160	-178	-20	532	-21
2748	-420	-185	-208	-25	619	-20
3206	-470	-210	-238	-28	709	-10
4580	-585	-260	-295	-33	885	-10
5954	-809	-344	-435	-70	1244	-11
7328	-964	-404	-548	-100	1511	-15
8702	-1128	-460	-664	-131	1795	-9
10076	-1277	-510	-788	-175	2050	0
11450	-1439	-566	-917	-205	2350	0
12824	-1577	-608	-1055	-250	2630	0
14198	-1730	-647	-1220	-310	2950	0
15572	-1875	-680	-1390	-375	3250	0
16946	-2000	-696	-1585	-460	3550	-10
18320	-2140	-719	-1811	-549	3920	-13
19694	-2310	-731	-2040	-653	4280	-13
25190	-2760	-632	-3260	-745	5800	-12

Tabela 5.33 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 4

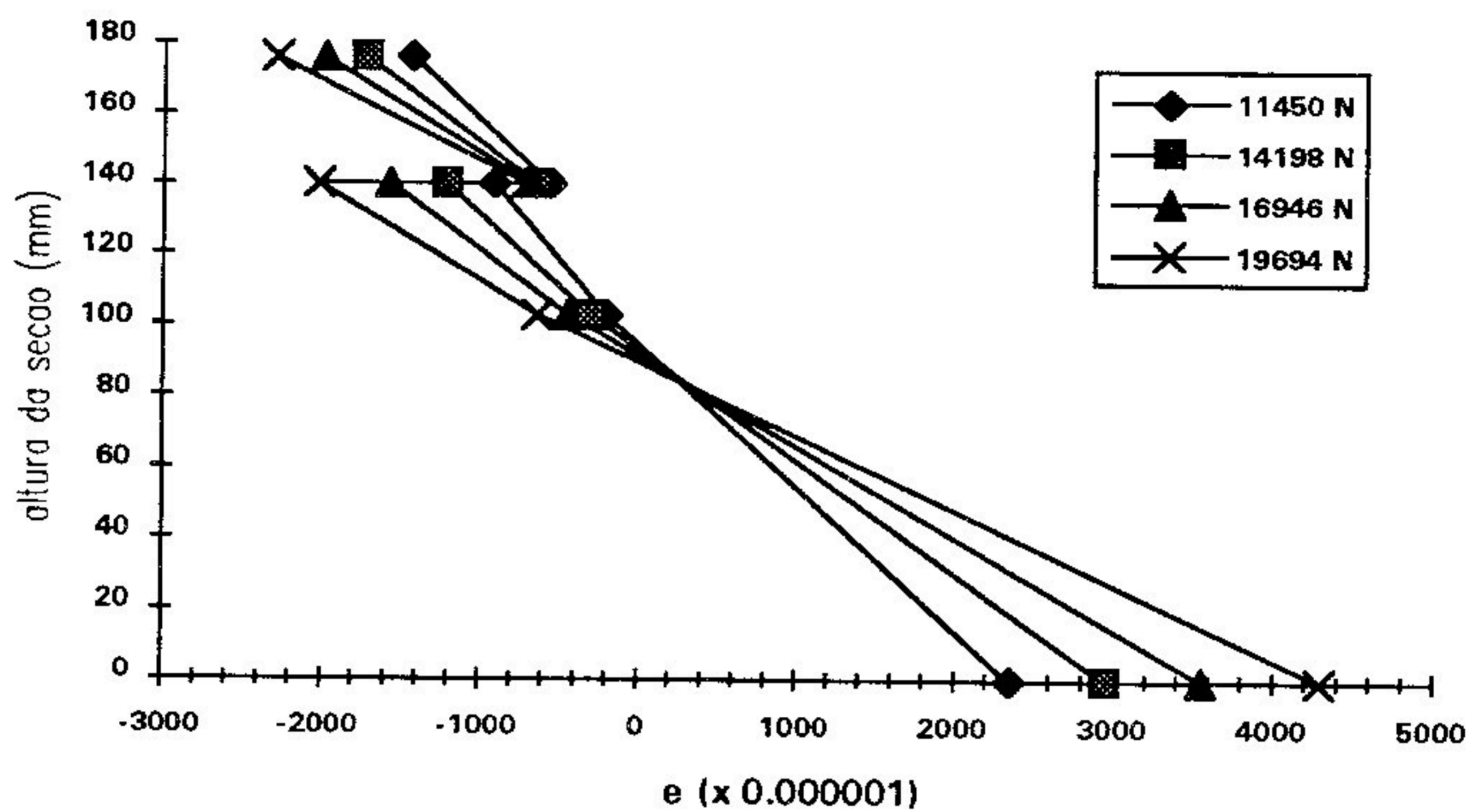


Diagrama 5.20 - Deformações da Viga V01 - Ensaio 4

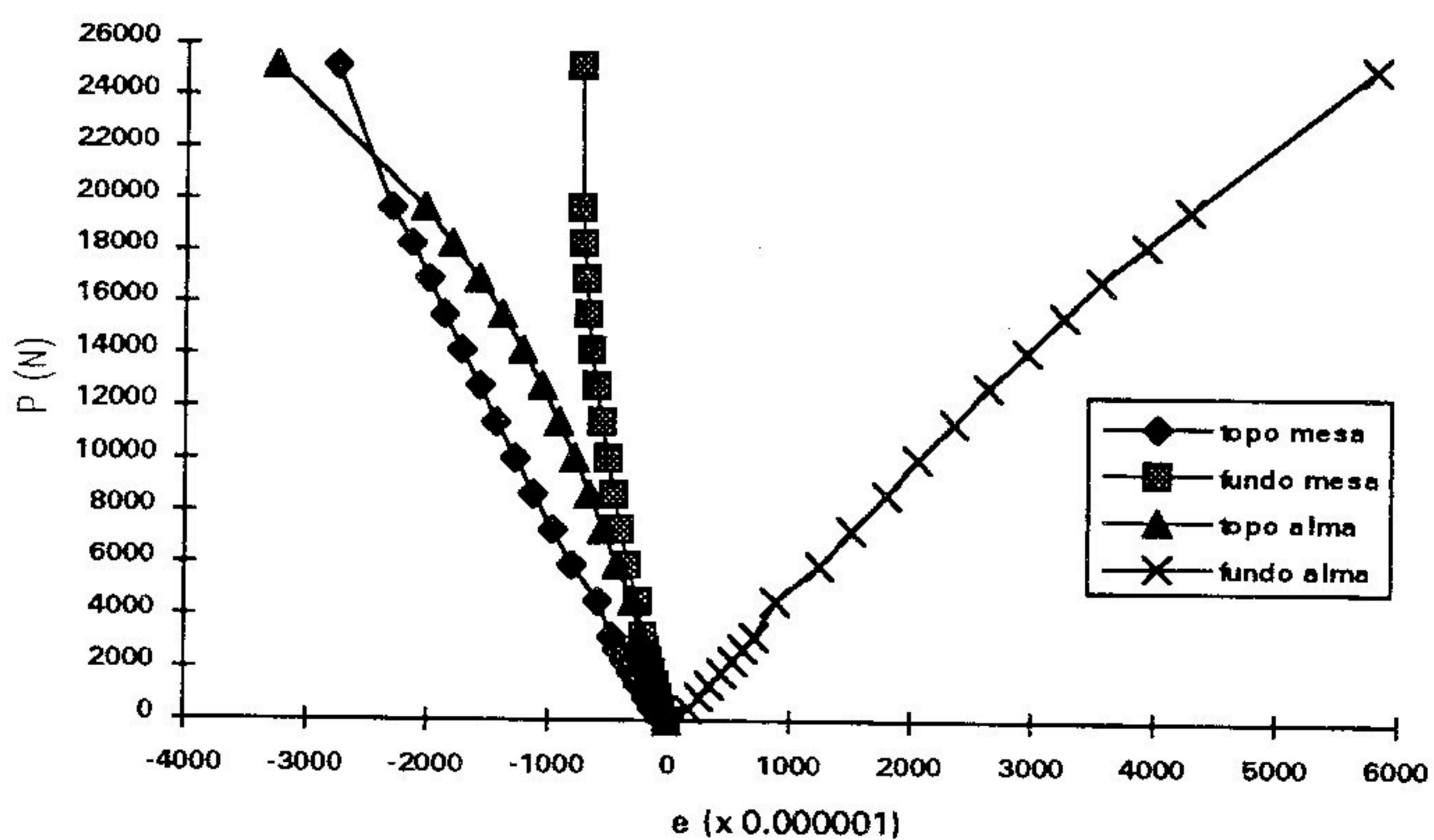


Gráfico 5.19 - Curvas Carga-Deformações da Viga V01 - Ensaio 4

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-170	-70	-70	12	204	5
916	-248	-110	-107	10	316	8
1374	-331	-147	-150	8	432	5
1832	-424	-186	-186	1	550	5
2290	-511	-223	-223	0	650	7
2748	-594	-257	-264	1	772	5
3206	-682	-300	-304	4	890	3
4580	-940	-400	-434	-9	1230	5
5954	-1196	-505	-586	-30	1594	5
7328	-1457	-603	-754	-45	1965	5
8702	-1698	-697	-906	-77	2300	5
10076	-1955	-792	-1076	-110	2670	5
11450	-2205	-880	-1250	-140	3020	5
12824	-2453	-971	-1425	-185	3370	5
14198	-2675	-1050	-1617	-228	3720	6
15572	-2968	-1150	-1865	-295	4150	5
16946	-3220	-1240	-2100	-378	4540	4
18320	-3506	-1330	-2410	495	4980	2

Tabela 5.34 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 4

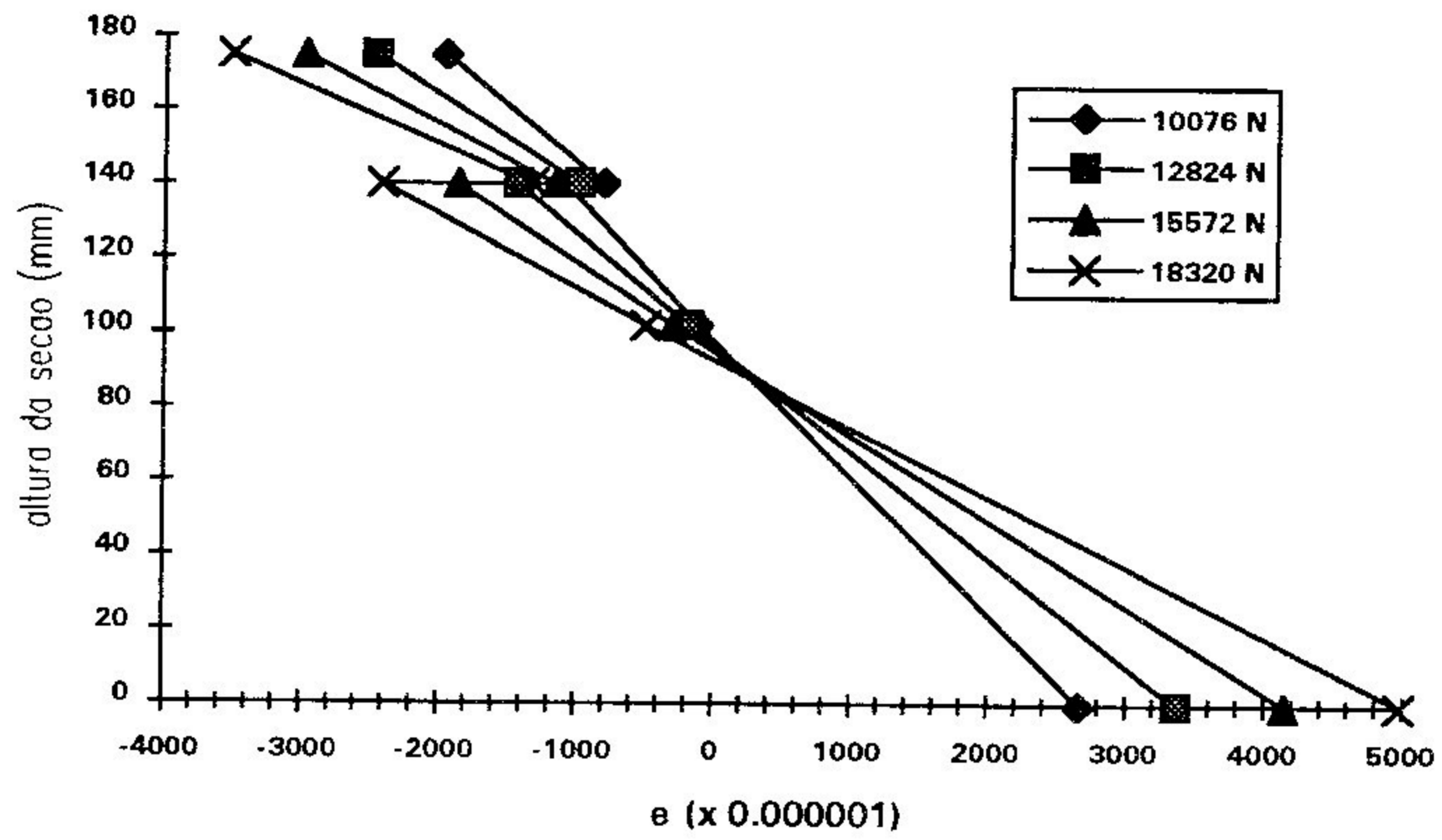


Diagrama 5.21 - Deformações da Viga V02 - Ensaio 4

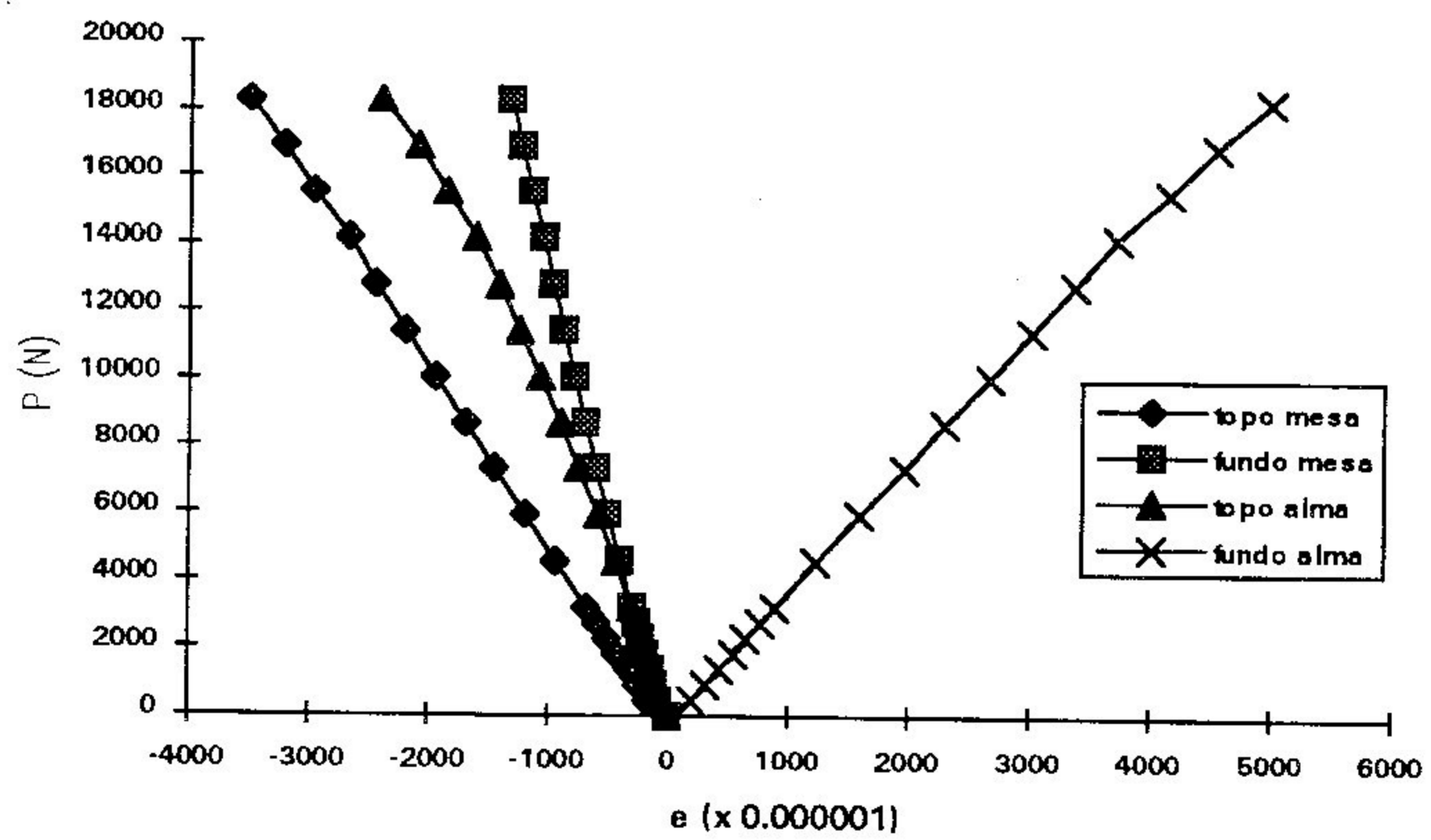


Gráfico 5.20 - Curvas Carga-Deformações da Viga V02 - Ensaio 4

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-118	-60	-60	-10	182	0
916	-187	-100	-78	-8	280	0
1374	-243	-131	-103	-10	370	0
1832	-300	-166	-126	-15	456	0
2290	-365	-200	-156	-19	560	0
2748	-426	-234	-185	-25	650	0
3206	-486	-255	-220	-43	741	0
4580	-654	-355	-310	-53	1024	0
5954	-850	-449	-420	-100	1325	0
7328	-1019	-523	-538	-142	1611	0
8702	-1202	-600	-660	-187	1922	0
10076	-1361	-656	-800	-252	2211	0
11450	-1522	-732	-920	-298	2500	0
12824	-1706	-800	-1065	-372	2802	0
14198	-1883	-859	-1218	-448	3115	0
15572	-2045	-907	-1387	-540	3427	0
16946	-2195	-937	-1577	-652	3750	0
18320	-2322	-952	-1776	-772	4050	0
19694	-2575	-1013	-2019	-918	4470	0
21068	-2733	-1013	-2287	-1099	4850	0
22442	-2930	-1008	-2625	-1328	5300	0

Tabela 5.35 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 4

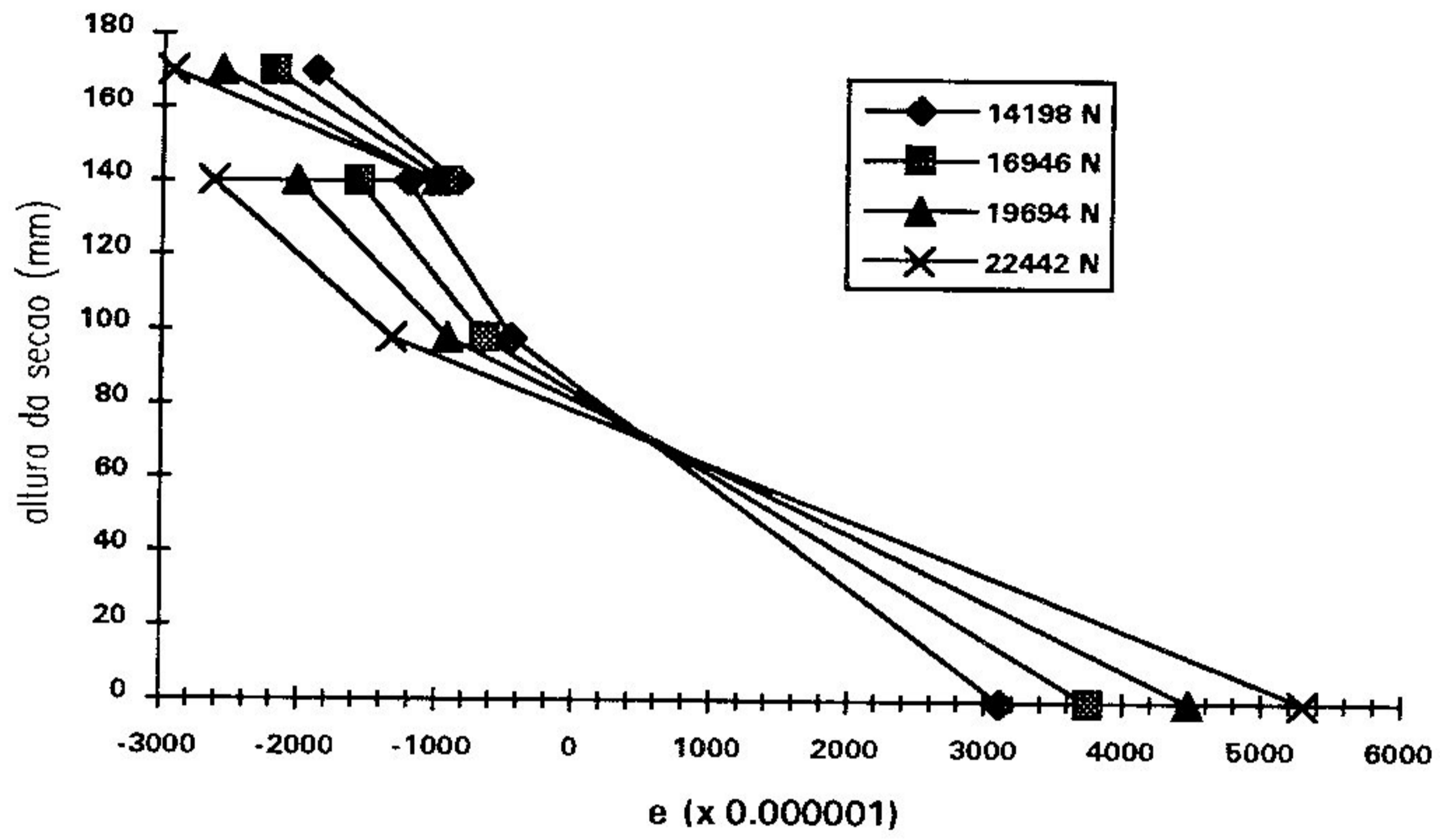


Diagrama 5.22 - Deformações da Viga V03 - Ensaio 4

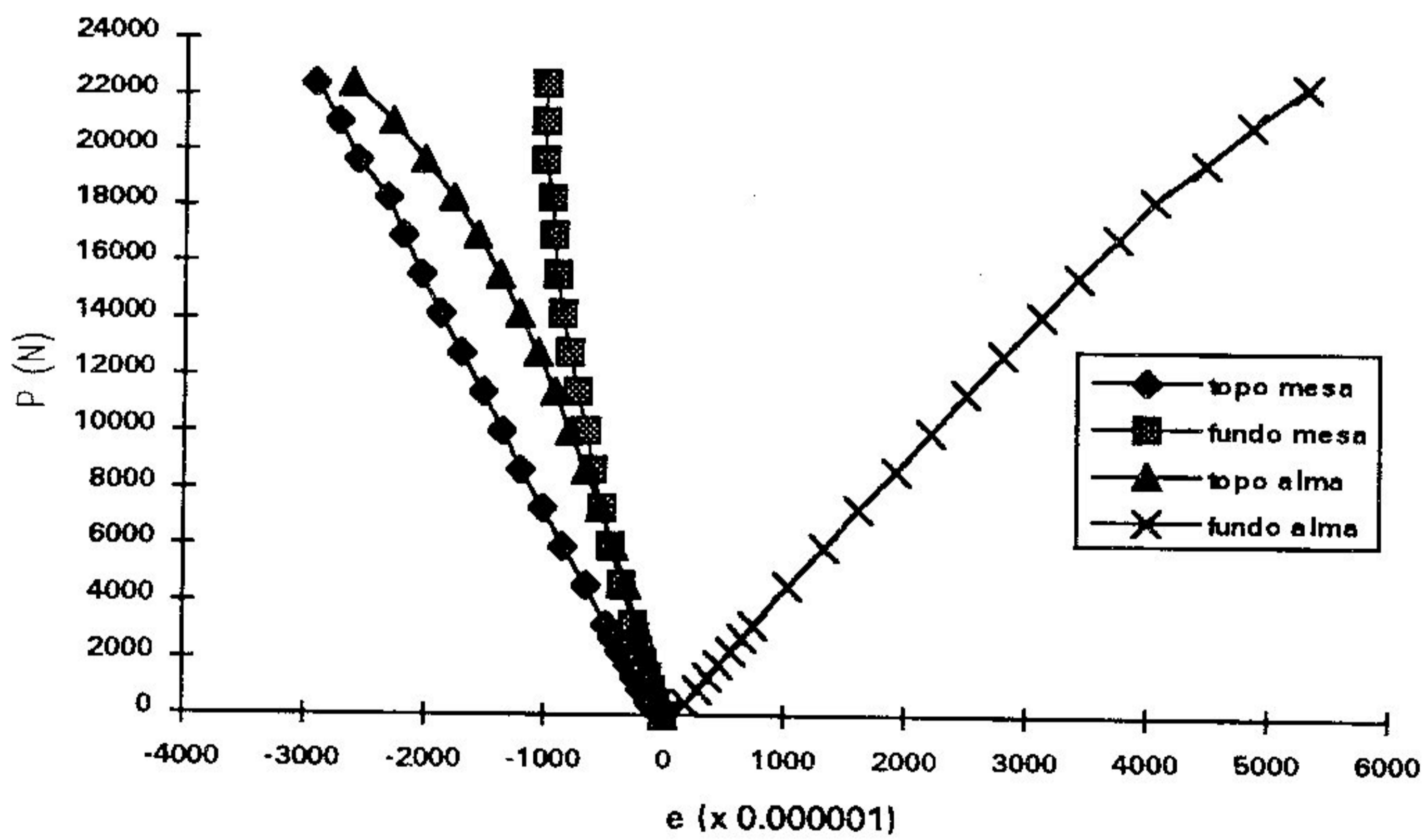


Gráfico 5.21 - Curvas Carga-Deformações da Viga V03 - Ensaio 4

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-120	-38	-45	-6	200	10
916	-205	-75	-85	-15	323	4
1374	-290	-110	-127	-28	440	5
1832	-360	-158	-163	-36	531	-26
2290	-440	-169	-206	-52	641	-20
2748	-514	-205	-250	-70	753	-20
3206	-590	-241	-294	-82	860	-22
4580	-814	-336	-439	-120	1190	-19
5954	-1049	-419	-603	-180	1548	-14
7328	-1262	-498	-760	-240	1870	-11
8702	-1490	-585	-932	-309	2197	-18
10076	-1708	-661	-1113	-371	2537	-18
11450	-1925	-733	-1305	-445	2865	-18
12824	-2130	-795	-1500	-520	3195	-13
14198	-2354	-860	-1724	-610	3540	-6

Tabela 5.36 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 4

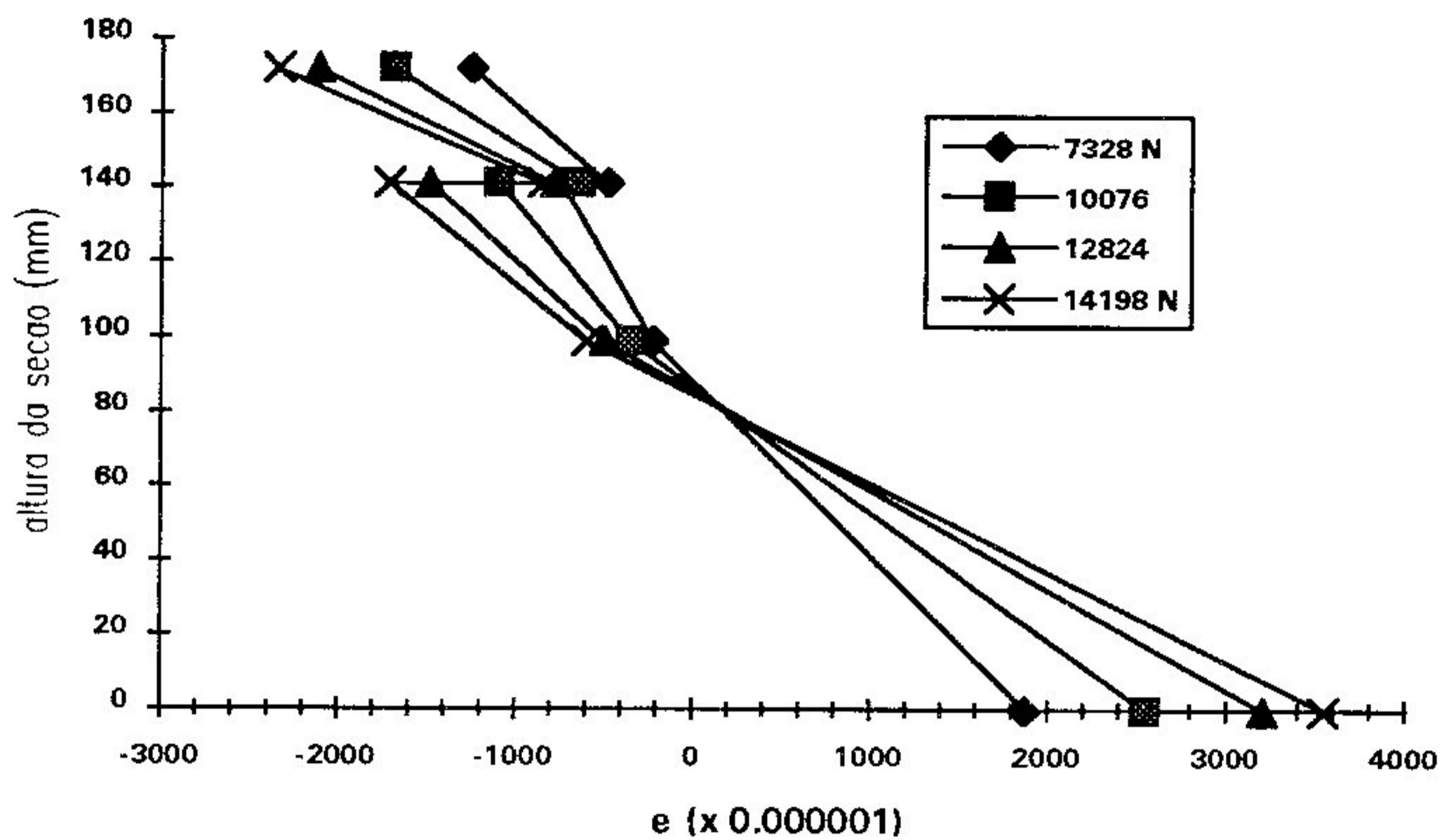


Diagrama 5.23 - Deformações da Viga V04 - Ensaio 4

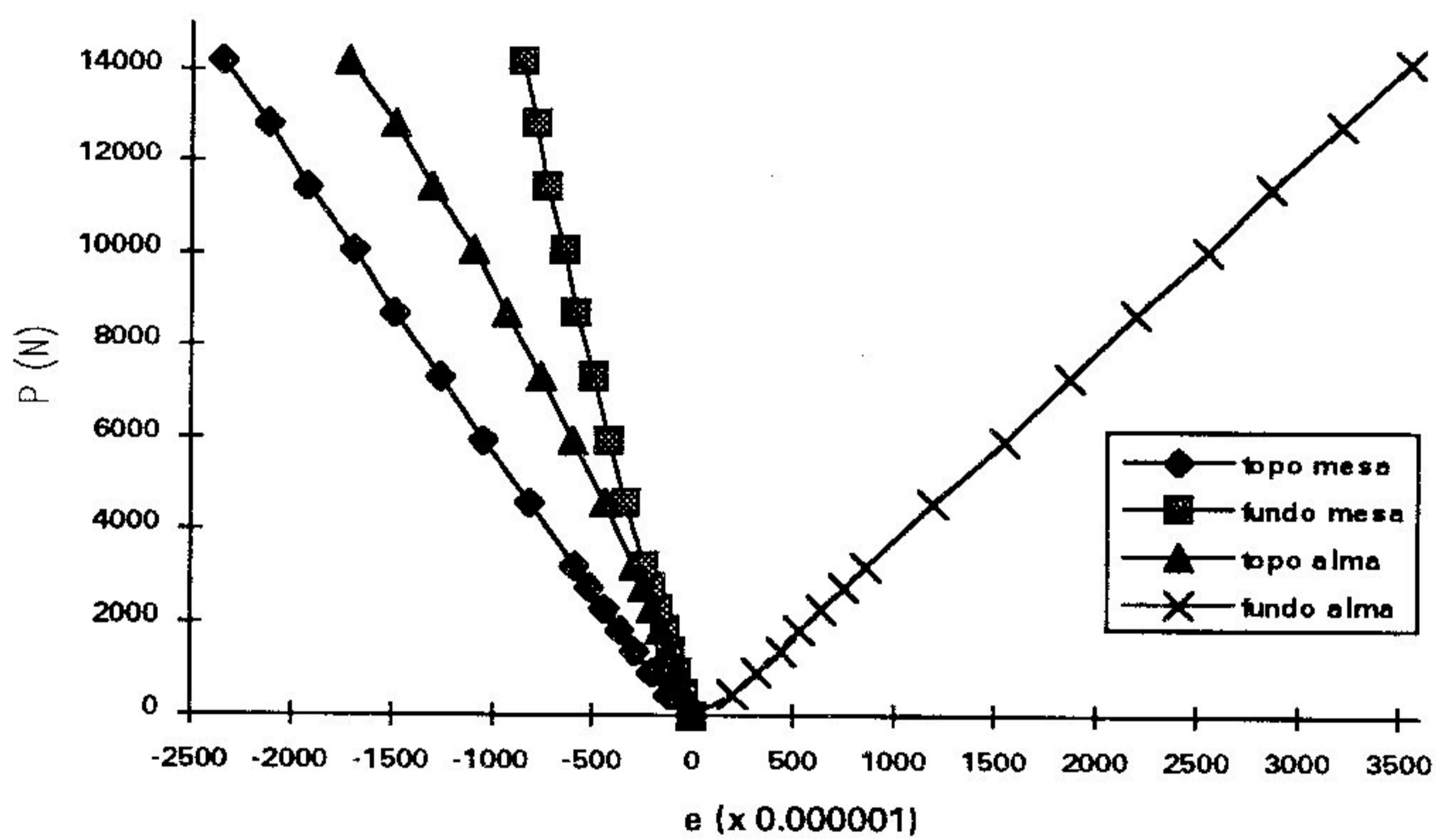


Gráfico 5.22 - Curvas Carga-Deformações da Viga V04 - Ensaio 4

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-78	-47	-20	4	122	0
916	-139	-83	-45	5	213	-11
1374	-202	-123	-77	1	305	-11
1832	-260	-152	-100	0	389	-21
2290	-320	-190	-137	0	478	-35
2748	-393	-234	-169	-4	582	-45
3206	-443	-260	-192	-8	650	-41
4580	-622	-356	-290	-33	916	-29
5954	-799	-447	-408	-61	1193	-38
7328	-970	-532	-530	-93	1467	-40
8702	-1132	-607	-659	-130	1730	-51
10076	-1308	-688	-808	-174	2005	-50
11450	-1468	-756	-960	-224	2280	-44
12824	-1639	-826	-1115	-284	2570	-55
14198	-1785	-874	-1292	-350	2850	-57
15572	-1954	-926	-1476	-423	3160	-52

Tabela 5.37 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 4

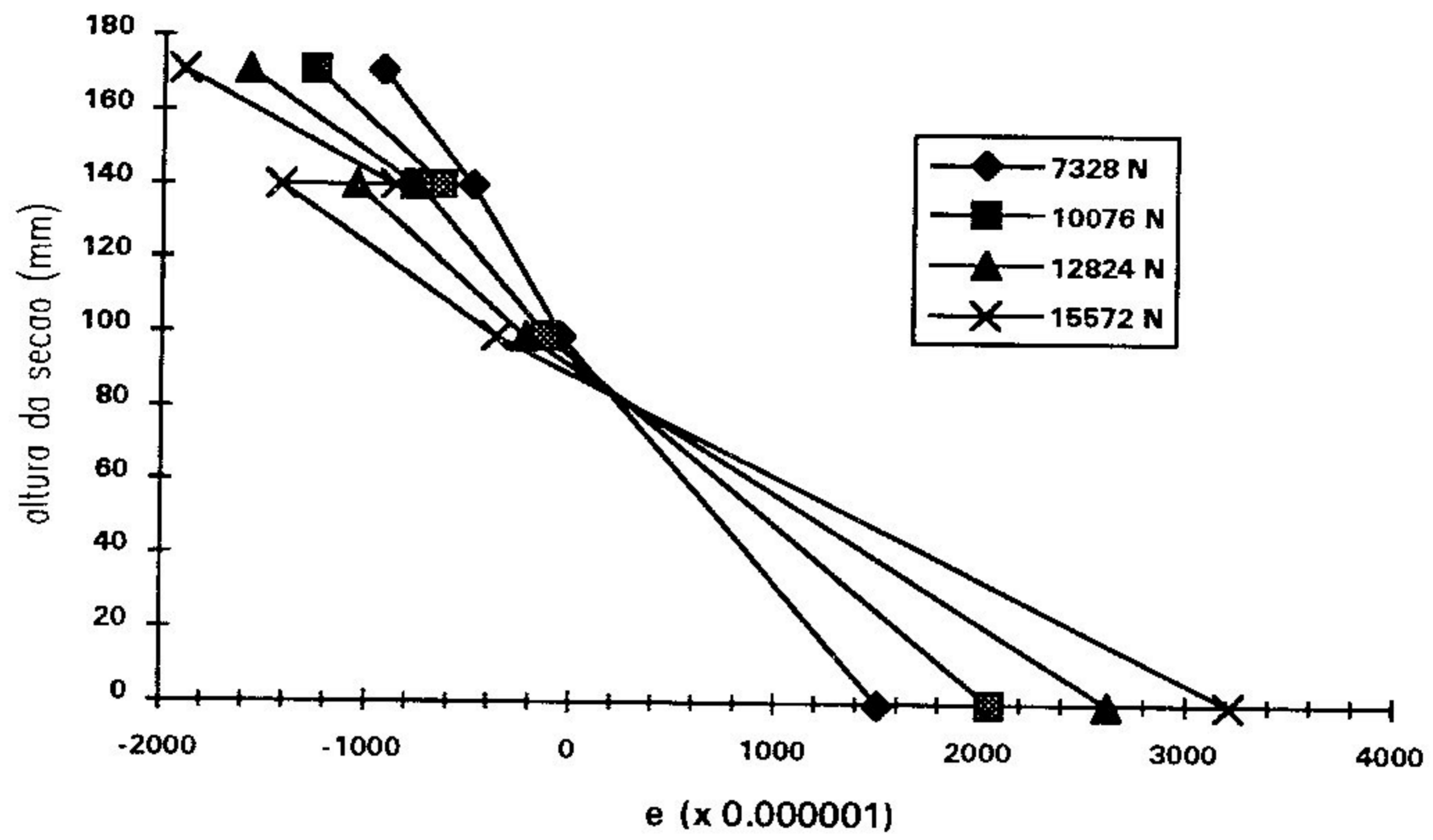


Diagrama 5.24 - Deformações da Viga V05 - Ensaio 4

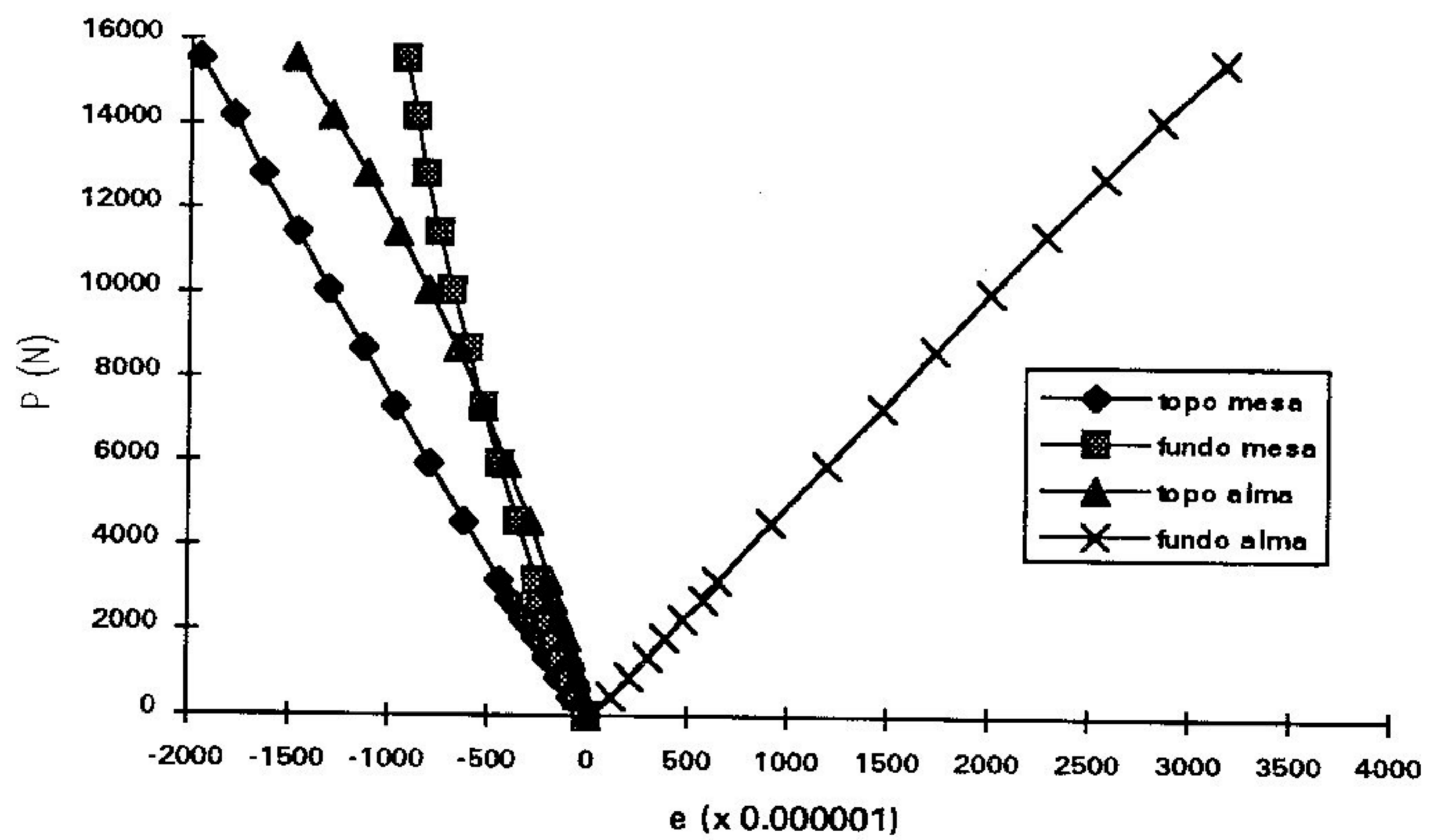


Gráfico 5.23 - Curvas Carga-Deformações da Viga V05 - Ensaio 4

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
(N)	(x 10 ⁻⁶)					
458	-82	-37	-28	10	150	7
916	-133	-56	-43	11	264	7
1374	-192	-88	-67	13	365	6
1832	-250	-119	-95	12	463	6
2290	-307	-147	-130	11	553	8
2748	-360	-174	-161	12	645	5
3206	-409	-200	-192	10	730	8
4580	-585	-280	-279	-5	1006	7
5954	-732	-350	-373	-24	1296	8
7328	-888	-422	-467	-48	1560	6
8702	-1048	-488	-570	-78	1860	8
10076	-1203	-552	-683	-112	2150	9
11450	-1360	-611	-810	-150	2450	9
12824	-1512	-669	-933	-193	2750	10
14198	-1665	-720	-1067	-240	3050	10
15572	-1823	-768	-1223	-298	3370	11
16946	-1969	-797	-1410	-378	3730	12
18320	-2106	-806	-1644	-470	4070	12
19694	-2244	-816	-1877	-563	4410	12
21068	-2455	-875	-2106	-653	4870	12
22442	-2560	-856	-2358	-777	5260	5
23816	-2674	-834	-2599	-914	5600	10

Tabela 5.38 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 4

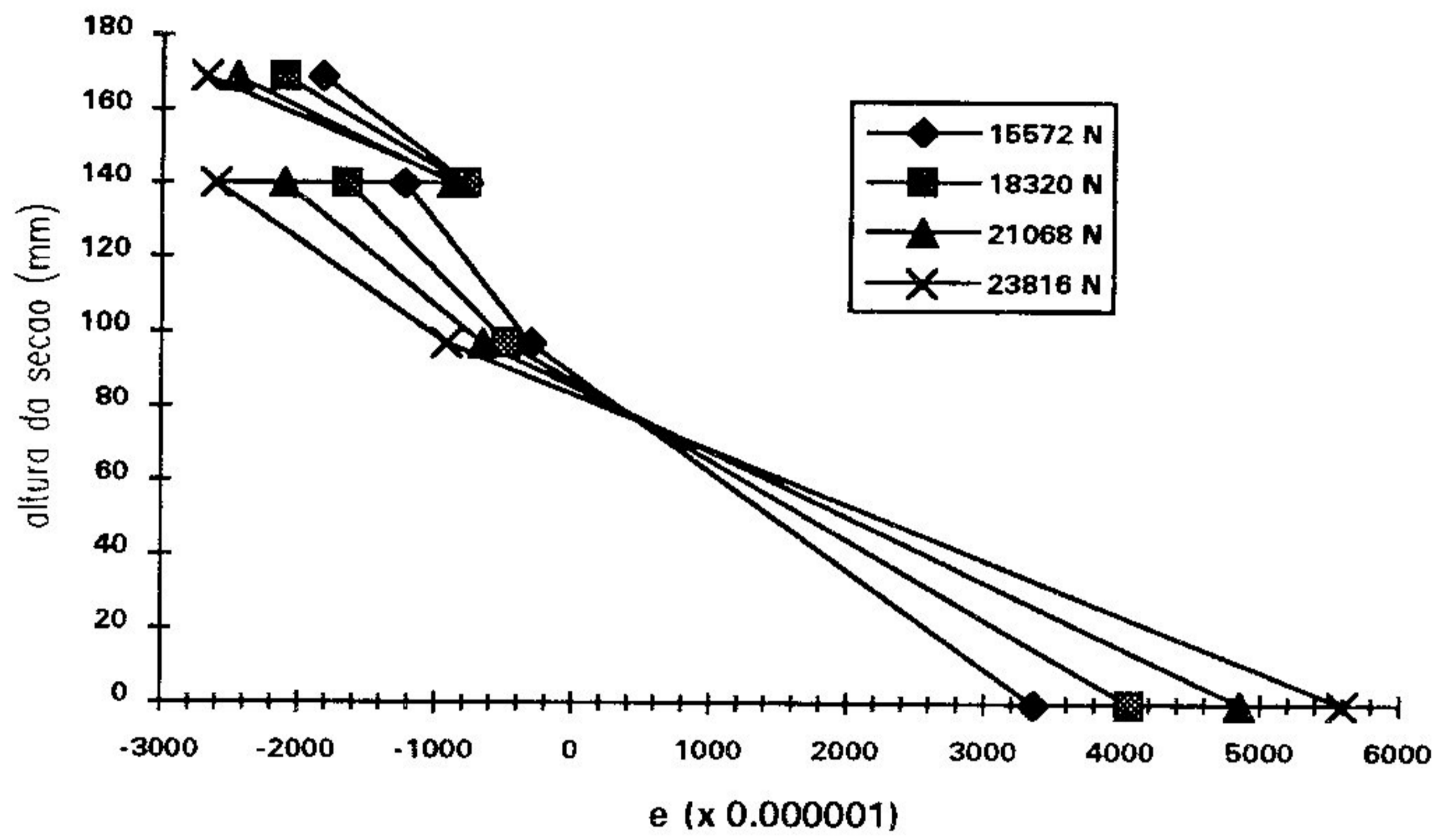


Diagrama 5.25 - Deformações da Viga V06 - Ensaio 4

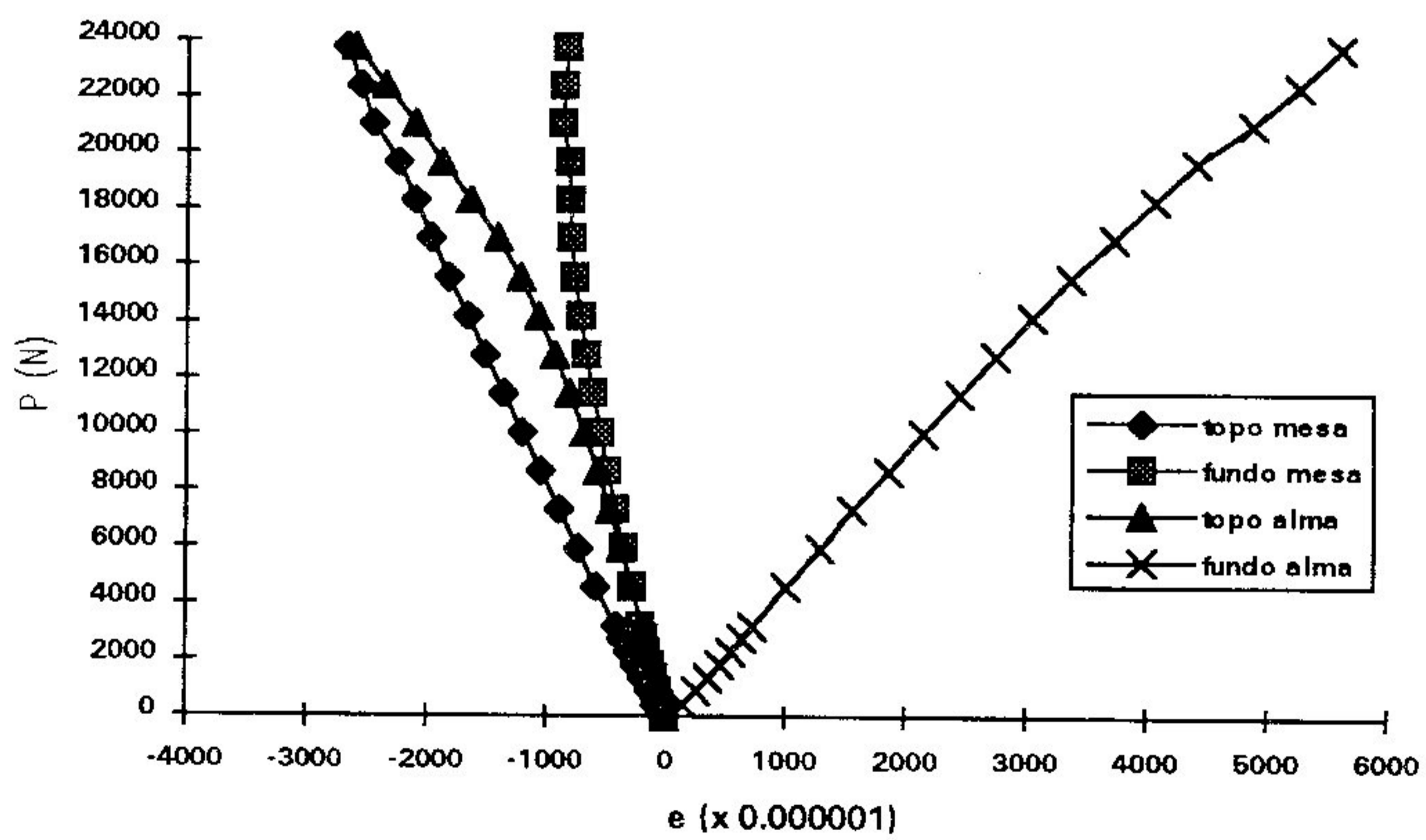


Gráfico 5.24 - Curvas Carga-Deformações da Viga V06 - Ensaio 4

5.6 - Cargas de Ruptura por Ruína das Vigas Compostas

Finalmente, a título de informação, foram registrados os valores das cargas de ruptura por ruína de todas as vigas compostas relativas às cargas aplicadas pelo cilindro hidráulico. Como pode ser observado, os valores de deslocamentos e deformações apresentados nas tabelas deste capítulo, para algumas vigas, referem-se à cargas bem próximas das indicadas na tabela 5.39.

Viga	Carga de Ruptura (N)
V01	26000
V02	19000
V03	24000
V04	21000
V05	18000
V06	25000

Tabela 5.39 - Cargas de Ruptura por Ruína das Vigas Compostas

CAPÍTULO 6

SOLUÇÃO APROXIMADA DO PROBLEMA

6.1 - Introdução

O objetivo principal deste capítulo é buscar soluções aproximadas para as vigas compostas do estudo em questão através de softwares e hardwares existentes e disponíveis no Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC) do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG (DEES). Para isto, foram utilizados dois programas distintos, a saber: o software comercial de análise estrutural SAP 90 e o software FLOOR desenvolvido pelo professor adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, José Márcio Fonseca Calixto, em sua tese de doutorado.

Para a modelagem das vigas, buscou-se no capítulo 4 (referente aos ensaios preliminares) as dimensões e propriedades das peças de madeira e do elemento de ligação. A magnitude e os pontos de aplicação das cargas adotados para cada viga, tiveram os mesmos valores registrados no capítulo 5 (referente aos ensaios principais). Portanto, os mesmos dados de laboratório foram introduzidos nos arquivos de entrada de dados das vigas em ambos os sistemas.

A seguir, serão descritos detalhes e particularidades da discretização das vigas de madeira para ambos os programas. A seguinte terminologia foi adotada neste capítulo para facilitar a identificação dos dados pelo leitor:

- f_i : deslocamento vertical no meio do vão da viga i ;
- e_i : deslocamento horizontal relativo no final da viga i ;
- ε_1 : deformação longitudinal no topo das mesas no meio do vão;
- ε_2 : deformação longitudinal no fundo das mesas no meio do vão;
- ε_3 : deformação longitudinal no topo das almas no meio do vão;
- ε_4 : deformação longitudinal no fundo das almas no meio do vão;
- A. Ñ L: análise não-linear do programa BEAM;
- A. L. : análise linear do programa BEAM.

6.2 - Solução Via Software FLOOR

O software FLOOR, elaborado pelo prof. Calixto na Universidade do Texas, em Austin, foi aproveitado para a análise das vigas compostas do presente trabalho. Trata-se de um programa voltado especificamente para estruturas reticuladas de seção composta formada por duas camadas de materiais interligados por um tipo de conector. Possui recursos de não-linearidade física do conector e geométrica da estrutura. Como o estudo em questão, foi desenvolvido para a análise de vigas, apenas algumas rotinas do programa foram utilizadas, criando-se assim, um sub-programa específico para o caso denominado BEAM.

As vigas compostas foram discretizadas de 100 em 100 milímetros para se obter uma boa aproximação dos resultados. Para cada viga foram utilizados os módulos de elasticidade longitudinal das peças de madeira e os parâmetros da curva de Foschi que caracterizam o elemento de ligação de acordo com os valores mencionados no capítulo 4. Dentre as análises oferecidas pelo programa, somente as de número 3 e 4, ou seja, análise linear completa e análise não-linear apenas do conector foram realizadas por serem estas as de interesse do trabalho. O processamento das vigas foi realizado numa workstation da HP com um consumo de tempo de apenas alguns segundos de processamento para cada viga.

O elemento finito deste programa apresenta oito graus de liberdade: dois deslocamentos horizontais relativos a cada camada, um deslocamento vertical e uma rotação relativos à seção composta. Além disso, foram fornecidos, na saída de dados do programa, para cada elemento, o escorregamento entre camadas e as tensões no topo e fundo de cada peça. As tensões longitudinais, para a seção do meio do vão, foram divididas pelo módulo de elasticidade longitudinal da respectiva peça obtendo-se os valores das deformações.

As tabelas 6.1 e 6.2 indicam os valores dos deslocamentos verticais, f_i , para as diversas cargas aplicadas pelo cilindro hidráulico e, analogamente, as tabelas 6.3 e 6.4 indicam os deslocamentos horizontais relativos ou escorregamentos no final das vigas. Na sequência, estão apresentadas as tabelas 6.5 a 6.16 que mostram as deformações longitudinais no meio do vão das vigas. Observando-se as tabelas referentes à análise não-linear, pode-se constatar que para cargas mais elevadas, alguns valores de deslocamentos e deformações não foram registrados devido à singularidade da matriz não linear do conector.

Pi	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
(N)	(x 10 ⁻² mm)					
458	239	298	252	282	225	227
916	480	597	506	565	451	454
1374	721	897	761	850	678	683
1832	963	1197	1017	1135	906	913
2290	1207	1499	1274	1421	1135	1143
2748	1451	1802	1533	1708	1365	1376
3206	1697	2107	1793	1997	1597	1609
4580	2443	3027	2582	2869	2300	2318
5954	3203	3963	3389	3755	3019	3041
7328	3981	4915	4217	4657	3755	3782
8702	4779	5887	5069	5579	4513	4544
10076	5601	6885	5950	6522	5295	5330
11450	6450	7910	6864	7492	6106	6144
12824	7331	9119	8019	8494	6946	6986
14198	8527	-	9180	9790	-	-
15572	9602	-	10390	-	-	-
16946	10780	-	-	-	-	-

Tabela 6.1 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão das Vigas - A. Ñ L.

Pi	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
(N)	(x 10 ⁻² mm)					
458	239	298	252	281	224	226
916	478	596	504	562	448	452
1374	717	894	756	843	672	678
1832	956	1192	1008	1124	896	904
2290	1195	1490	1260	1405	1120	1130
2748	1434	1788	1512	1686	1344	1356
3206	1673	2086	1764	1967	1568	1582
4580	2390	2980	2520	2810	2240	2260
5954	3107	3874	3276	3653	2912	2938
7328	3824	4768	4032	4496	3584	3616
8702	4541	5662	4788	5339	4256	4294
10076	5258	6556	5544	6182	4928	4972
11450	5975	7450	6300	7025	5600	5650
12824	6692	8344	7056	7868	6272	6328
14198	7409	9238	7812	8711	6944	7006
15572	8126	10132	8568	9554	7616	7684
16946	8843	11026	9324	10397	8288	8362
18320	-	-	10080	-	-	9040

Tabela 6.2 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão das Vigas - A. L

Pi	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆
(N)	(x 10 ⁻³ mm)					
458	25	25	26	24	26	26
916	51	50	54	50	53	52
1374	78	76	82	76	80	79
1832	106	104	112	103	109	108
2290	135	132	143	131	139	138
2748	165	162	175	160	170	168
3206	196	193	209	190	203	200
4580	298	293	318	289	308	304
5954	414	408	444	401	429	422
7328	548	539	591	530	567	558
8702	701	692	761	678	726	713
10076	879	870	959	849	910	893
11450	1084	1077	1189	1047	1122	1098
12824	1320	1477	1657	1278	1362	1331
14198	1876	-	2126	1818	-	-
15572	2302	-	2645	-	-	-
16946	2828	-	-	-	-	-

Tabela 6.3 - Escorregamentos no Final das Vigas - A. Ñ L.

Pi	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆
(N)	(x 10 ⁻³ mm)					
458	25	24	26	24	25	25
916	50	48	52	48	50	50
1374	75	72	78	72	75	75
1832	100	96	104	96	100	100
2290	125	120	130	120	125	125
2748	150	144	156	144	150	150
3206	175	168	182	168	175	175
4580	250	240	260	240	250	250
5954	325	312	338	312	325	325
7328	400	384	416	384	400	400
8702	475	456	494	456	475	475
10076	550	528	572	528	550	550
11450	625	600	650	600	625	625
12824	700	672	728	672	700	700
14198	775	744	806	744	775	775
15572	850	816	884	816	850	850
16946	925	888	962	888	925	925
18320	-	-	1040	-	-	1000

Tabela 6.4 - Escorregamentos no Final das Vigas - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-72	-28	-46	123
916	-143	-55	-92	247
1374	-215	-83	-138	371
1832	-286	-110	-185	495
2290	-358	-137	-232	619
2748	-430	-164	-279	743
3206	-501	-191	-327	868
4580	-715	-270	-473	1243
5954	-929	-347	-623	1620
7328	-1143	-422	-779	2001
8702	-1356	-493	-940	2385
10076	-1568	-560	-1110	2773
11450	-1780	-624	-1288	3166
12824	-1991	-682	-1478	3566
14198	-2193	-689	-1771	4024
15572	-2399	-715	-2028	4461
16946	-2601	-724	-2319	4917

Tabela 6.5 - Deformações no Meio do Vão de V01 - A. Ñ L.

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-72	-28	-46	123
916	-144	-56	-92	246
1374	-216	-84	-138	369
1832	-288	-112	-184	492
2290	-360	-140	-230	615
2748	-432	-168	-276	738
3206	-504	-196	-322	861
4580	-720	-280	-460	1230
5954	-936	-364	-598	1599
7328	-1152	-448	-736	1968
8702	-1368	-532	-874	2337
10076	-1584	-616	-1012	2706
11450	-1800	-700	-1150	3075
12824	-2016	-784	-1288	3444
14198	-2232	-868	-1426	3813
15572	-2448	-952	-1564	4182
16946	-2664	-1036	-1702	4551
18320	-2880	-1120	-1840	4920
19694	-3096	-1204	-1978	5289
25190	-3960	-1540	-2530	6765

Tabela 6.6 - Deformações no Meio do Vão de V01 - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-95	-42	-58	153
916	-190	-83	-117	305
1374	-285	-124	-176	458
1832	-380	-165	-235	611
2290	-475	-206	-295	764
2748	-570	-247	-355	918
3206	-665	-288	-415	1071
4580	-949	-408	-598	1534
5954	-1233	-526	-786	1998
7328	-1516	-642	-978	2465
8702	-1798	-755	-1176	2936
10076	-2080	-864	-1382	3411
11450	-2361	-969	-1595	3890
12824	-2634	-1044	-1865	4400

Tabela 6.7 - Deformações no Meio do Vão de V02 - A. Ñ L.

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-95	-42	-58	152
916	-190	-84	-116	304
1374	-285	-126	-174	456
1832	-380	-168	-232	608
2290	-475	-210	-290	760
2748	-570	-252	-348	912
3206	-665	-294	-406	1064
4580	-950	-420	-580	1520
5954	-1235	-546	-754	1976
7328	-1520	-672	-928	2432
8702	-1805	-798	-1102	2888
10076	-2090	-924	-1276	3344
11450	-2375	-1050	-1450	3800
12824	-2660	-1176	-1624	4256
14198	-2945	-1302	-1798	4712
15572	-3230	-1428	-1972	5168
16946	-3515	-1554	-2146	5624
18320	-3800	-1680	-2320	6080

Tabela 6.8 - Deformações no Meio do Vão de V02 - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-68	-28	-46	139
916	-135	-55	-93	279
1374	-203	-83	-140	418
1832	-271	-110	-188	558
2290	-338	-137	-236	698
2748	-406	-164	-284	838
3206	-474	-191	-333	979
4580	-676	-270	-483	1402
5954	-879	-346	-638	1828
7328	-1080	-420	-800	2258
8702	-1282	-492	-969	2693
10076	-1482	-559	-1149	3132
11450	-1682	-621	-1339	3578
12824	-1877	-652	-1612	4069
14198	-2072	-679	-1891	4565
15572	-2265	-699	-2188	5069

Tabela 6.9 - Deformações no Meio do Vão de V03 - A. Ñ L.

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-68	-28	-46	139
916	-136	-56	-92	278
1374	-204	-84	-138	417
1832	-272	-112	-184	556
2290	-340	-140	-230	695
2748	-408	-168	-276	834
3206	-476	-196	-322	973
4580	-680	-280	-460	1390
5954	-884	-364	-598	1807
7328	-1088	-448	-736	2224
8702	-1292	-532	-874	2641
10076	-1496	-616	-1012	3058
11450	-1700	-700	-1150	3475
12824	-1904	-784	-1288	3892
14198	-2108	-868	-1426	4309
15572	-2312	-952	-1564	4726
16946	-2516	-1036	-1702	5143
18320	-2720	-1120	-1840	5560
19694	-2924	-1204	-1978	5977
21068	-3128	-1288	-2116	6394
22442	-3332	-1372	-2254	6811

Tabela 6.10 - Deformações no Meio do Vão de V03 - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-86	-42	-59	142
916	-173	-84	-118	285
1374	-259	-125	-178	428
1832	-345	-167	-238	571
2290	-431	-208	-298	714
2748	-517	-249	-359	858
3206	-603	-290	-420	1001
4580	-861	-412	-605	1434
5954	-1118	-531	-794	1868
7328	-1374	-649	-988	2305
8702	-1629	-763	-1188	2745
10076	-1885	-872	-1403	3199
11450	-2136	-980	-1610	3638
12824	-2386	-1081	-1836	4093
14198	-2610	-1114	-2185	4609

Tabela 6.11 - Deformações no Meio do Vão de V04 - A. Ñ L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-86	-42	-60	143
916	-172	-84	-120	286
1374	-258	-126	-180	429
1832	-344	-168	-240	572
2290	-430	-210	-300	715
2748	-516	-252	-360	858
3206	-602	-294	-420	1001
4580	-860	-420	-600	1430
5954	-1118	-546	-780	1859
7328	-1376	-672	-960	2288
8702	-1634	-798	-1140	2717
10076	-1892	-924	-1320	3146
11450	-2150	-1050	-1500	3575
12824	-2408	-1176	-1680	4004
14198	-2666	-1302	-1860	4433

Tabela 6.12 - Deformações no Meio do Vão de V04 - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-62	-26	-43	121
916	-123	-51	-87	242
1374	-185	-76	-131	363
1832	-247	-102	-175	485
2290	-308	-127	-219	607
2748	-370	-152	-264	729
3206	-431	-176	-310	851
4580	-616	-249	-448	1219
5954	-800	-320	-592	1589
7328	-984	-389	-741	1963
8702	-1167	-454	-898	2341
10076	-1349	-516	-1062	2723
11450	-1531	-574	-1236	3111
12824	-1712	-628	-1421	3504

Tabela 6.13 - Deformações no Meio do Vão de V05 - A. Ñ L.

P_i	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-62	-26	-43	121
916	-124	-52	-86	242
1374	-186	-78	-129	363
1832	-248	-104	-172	484
2290	-310	-130	-215	605
2748	-372	-156	-258	726
3206	-434	-182	-301	847
4580	-620	-260	-430	1210
5954	-806	-338	-559	1573
7328	-992	-416	-688	1936
8702	-1178	-494	-817	2299
10076	-1364	-572	-946	2662
11450	-1550	-650	-1075	3025
12824	-1736	-728	-1204	3388
14198	-1922	-806	-1333	3751
15572	-2108	-884	-1462	4114

Tabela 6.14 - Deformações no Meio do Vão de V05 - A. L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-60	-26	-45	116
916	-119	-53	-91	233
1374	-179	-79	-136	349
1832	-238	-105	-183	466
2290	-298	-130	-229	583
2748	-357	-156	-276	700
3206	-417	-181	-323	817
4580	-594	-256	-468	1171
5954	-772	-329	-618	1527
7328	-948	-400	-773	1886
8702	-1124	-468	-935	2250
10076	-1299	-532	-1105	2617
11450	-1473	-592	-1285	2990
12824	-1646	-647	-1475	3368

Tabela 6.15 - Deformações no Meio do Vão de V06 - A. Ñ L.

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-60	-26	-45	116
916	-120	-52	-90	232
1374	-180	-78	-135	348
1832	-240	-104	-180	464
2290	-300	-130	-225	580
2748	-360	-156	-270	696
3206	-420	-182	-315	812
4580	-600	-260	-450	1160
5954	-780	-338	-585	1508
7328	-960	-416	-720	1856
8702	-1140	-494	-855	2204
10076	-1320	-572	-990	2552
11450	-1500	-650	-1125	2900
12824	-1680	-728	-1260	3248
14198	-1860	-806	-1395	3596
15572	-2040	-884	-1530	3944
16946	-2220	-962	-1665	4292
18320	-2400	-1040	-1800	4640
19694	-2580	-1118	-1935	4988
21068	-2760	-1196	-2070	5336
22442	-2940	-1274	-2205	5684
23816	-3120	-1352	-2340	6032

Tabela 6.16 - Deformações de V06 - A. L.

6.3 - Solução Via Software SAP 90

O software comercial SAP 90, versão 5.31, é um programa de análise estrutural linear compatível com a linha IBM PC que utiliza o método dos elementos finitos para problemas genéricos na área de engenharia estrutural.

Para a modelagem das vigas compostas foram utilizados dois tipos distintos de elementos. O elemento FRAME, próprio para estruturas formadas por barras, foi utilizado para a discretização dos pregos. O elemento SHELL específico para a discretização de estruturas laminares foi utilizado para as peças de madeira sob a forma de membrana.

Uma fila composta de elementos SHELL (tipo 1) de 5 em 5 centímetros (espaçamento adotado entre os pregos) formaram as mesas e duas filas de mesmo espaçamento foram necessárias para a formação das almas para deixar o elemento finito com uma relação entre base e altura não superior a dois (recomendado por muitos autores na modelagem de estruturas para minimizar erros de aproximação que possam inviabilizar a malha gerada). As dimensões e o módulo de elasticidade das peças de madeira foram retiradas das tabelas do capítulo 4 e inseridos na entrada de dados do programa.

Entre os nós localizados no fundo das mesas e os nós do topo das almas das vigas foi deixado um espaçamento de 1 mm na vertical para constituir um pequeno afastamento entre as peças. Ao longo do comprimento das vigas, estes pontos foram ligados pelo elemento FRAME para simular as ligações das peças. Estas barras foram modeladas com área da seção transversal nula para eliminar o aparecimento de esforço axial, momento de inércia relativo à seção circular do prego e módulo de elasticidade determinado através da expressão $K = 3EI/L^3$, reescrita da seguinte forma : $E = KL^3/3I$

onde, K : coeficiente de rigidez inicial de Foschi determinado no cap. 4;

L : espaçamento adotado entre mesa e alma das vigas igual a 1 mm;

I : momento de inércia da seção transversal do prego igual a $\pi r^4/4$;

E : módulo de elasticidade longitudinal da barra de ligação.

É importante mencionar que outros coeficientes de rigidez foram pesquisados para simular o funcionamento da ligação, ou seja, as condições de contorno do elemento FRAME foram também consideradas birotuladas ou biengastadas. Porém, a melhor simulação dos resultados computacionais com os resultados experimentais foi atingida considerando-se a relação $KL^3/3I$.

Para simular o contato físico existente entre mesa e alma das vigas, o comando CONSTRAINTS foi utilizado para impor aos pontos de qualquer seção transversal ao longo de todo o comprimento das peças, o mesmo deslocamento vertical. Além disso, também para estes pontos foi imposto uma mesma curvatura.

Todos os nós possuíram apenas três graus de liberdade, ou seja, duas translações e uma rotação relativos ao plano vertical e longitudinal das vigas. O primeiro nó situado no fundo das almas foi restringido verticalmente para formar o apoio articulado móvel e o último nó foi restringido horizontalmente e verticalmente para formar o apoio articulado fixo através do comando RESTRAINTS.

O carregamento externo foi aplicado aos nós equidistantes do meio do vão das vigas (conforme espaçamentos indicados no capítulo 5) através de cargas concentradas localizadas no topo das mesas com valor igual à metade da carga do cilindro hidráulico.

Para as vigas de 4400 mm de comprimento foram gerados 264 elementos do tipo SHELL e 89 elementos do tipo FRAME, com o aparecimento de um sistema de 1158 equações. O processamento das vigas foi realizado num micro computador 486 de 33 MHz e consumiu para cada viga um tempo total de, aproximadamente, 1 minuto.

O arquivo de saída de dados com extensão .F4F registrou os valores das forças por unidade de comprimento nos quatro nós dos elementos SHELL. Para transformar estes valores em deformações, simplesmente, dividimos estas forças pelas espessuras e pelo módulo de elasticidade longitudinal da respectiva peça. O arquivo de saída de dados com extensão .SOL registrou os valores dos deslocamentos verticais e horizontais dos nós dos elementos, interessando-se apenas para o trabalho, a flecha máxima no meio do vão e a diferença dos deslocamentos horizontais no final das vigas no contato mesa e alma.

A figura 6.1 mostra os primeiros elementos situados a partir do apoio de uma das vigas indicando a estrutura indeformada e também após o carregamento aplicado. Como se pode constatar, ao longo da seção transversal, todos os pontos se deslocaram com um mesmo valor de deslocamento vertical e tiveram uma mesma rotação. Entre as peças, os deslocamentos horizontais não foram os mesmos ocasionando o aparecimento dos já conhecidos escorregamentos. A figura 6.2 mostra uma fatia da viga situada no meio do vão das vigas. Da mesma forma, ocorreram os mesmos deslocamentos verticais

mencionados anteriormente, apenas não se registrando, praticamente, nenhum escorregamento entre as peças.

A tabela 6.17 indica os valores dos deslocamentos verticais, f_i , para as diversas cargas no meio do vão das vigas e, analogamente a tabela 6.18 indica os deslocamentos horizontais relativos ou escorregamentos no final das vigas. Na sequência, foram colocadas as tabelas 6.19 a 6.24 que mostram as deformações longitudinais no meio do vão das vigas.

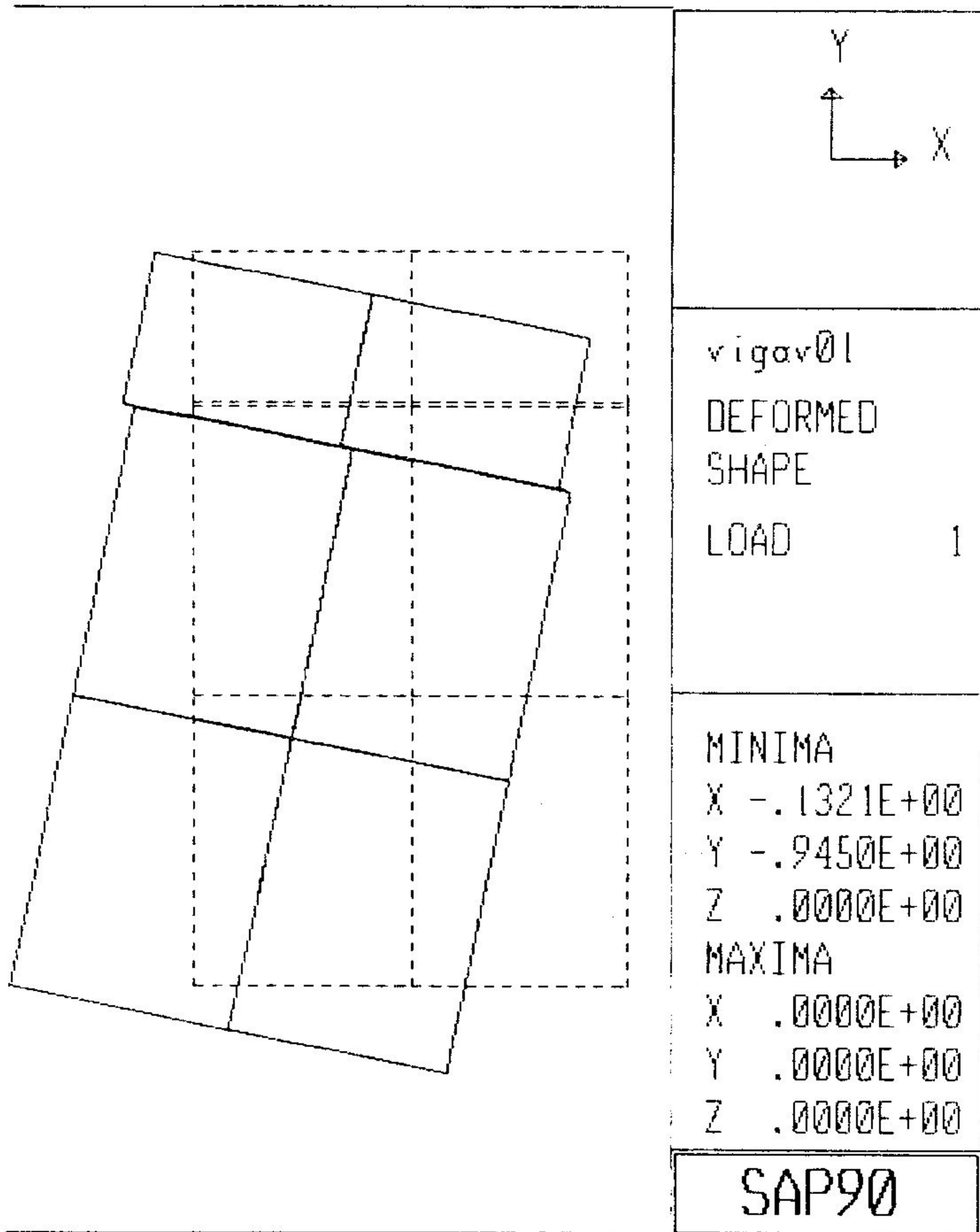


Figura 6.1 - Deformação da Viga V01 no Apoio Esquerdo

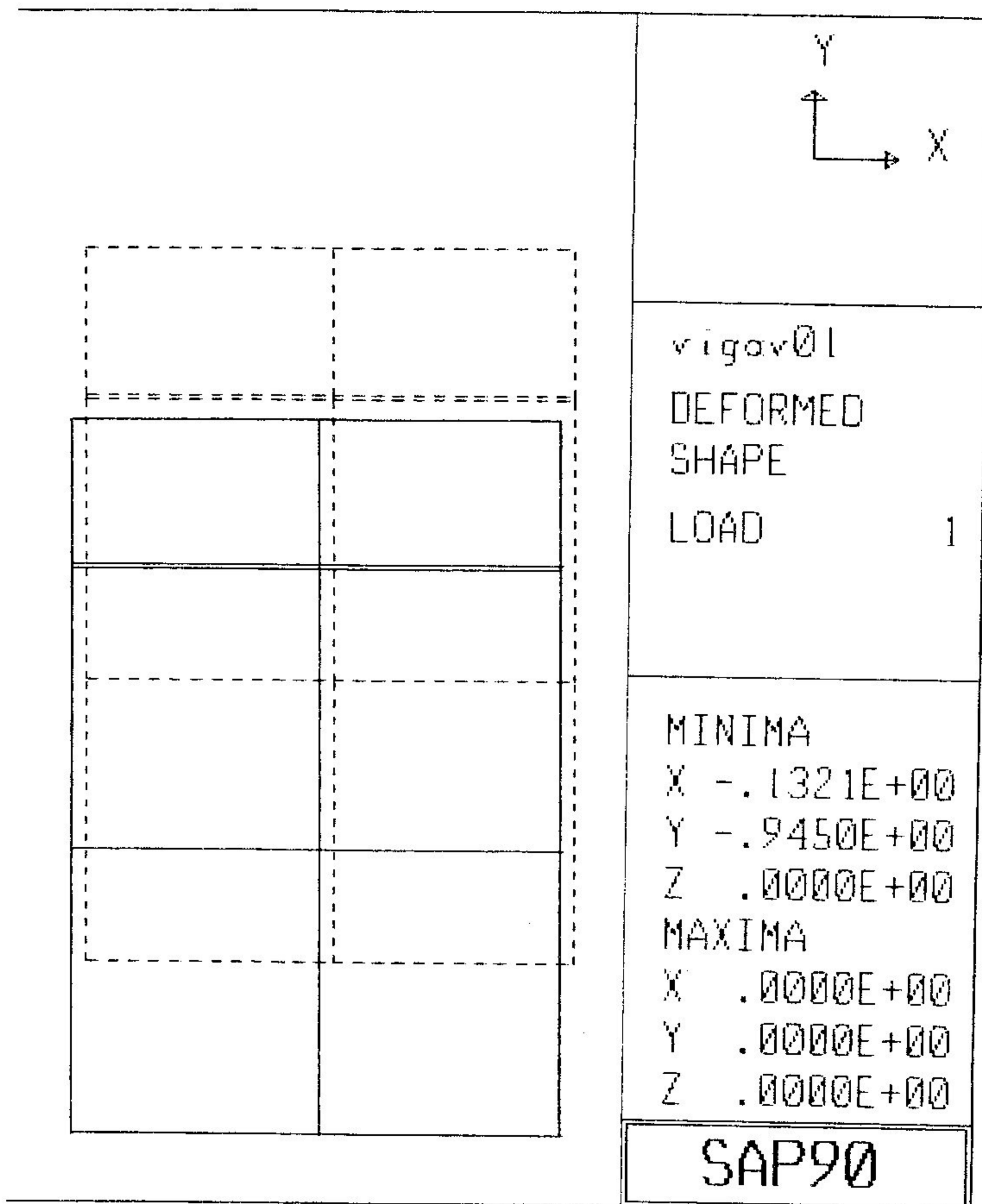


Figura 6.2 - Deformação da Viga V01 no Meio do Vão

Pi	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
(N)	(x 10 ⁻² mm)					
458	237	294	249	279	224	224
916	474	588	498	558	448	448
1374	711	882	747	837	672	672
1832	948	1176	996	1116	896	896
2290	1185	1470	1245	1395	1120	1120
2748	1422	1764	1494	1674	1344	1344
3206	1659	2058	1743	1953	1568	1568
4580	2370	2940	2490	2790	2240	2240
5954	3081	3822	3237	3627	2912	2912
7328	3792	4704	3984	4464	3584	3584
8702	4503	5586	4731	5301	4256	4256
10076	5214	6468	5478	6138	4928	4928
11450	5925	7350	6225	6975	5600	5600
12824	6636	8232	6972	7812	6272	6272
14198	7347	9114	7719	8649	6944	6944
15572	8058	9996	8466	9486	7616	7616
16946	8769	10878	9213	10323	8288	8288
18320	-	-	9960	-	-	8960

Tabela 6.17 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão das Vigas - SAP90

Pi	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆
(N)	(x 10 ⁻³ mm)					
458	21	20	22	20	22	22
916	42	40	44	40	44	44
1374	63	60	66	60	66	66
1832	84	80	88	80	88	88
2290	105	100	110	100	110	110
2748	126	120	132	120	132	132
3206	147	140	154	140	154	154
4580	210	200	220	200	220	220
5954	273	260	286	260	286	286
7328	336	320	352	320	352	352
8702	399	380	418	380	418	418
10076	462	440	484	460	484	484
11450	525	500	550	500	550	550
12824	588	560	616	540	616	616
14198	651	620	682	620	682	682
15572	714	680	748	680	748	748
16946	777	740	814	740	814	814
18320	-	-	880	-	-	880

Tabela 6.18 - Escorregamentos no Final das Vigas - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-71	-28	-45	122
916	-142	-56	-90	244
1374	-213	-84	-135	366
1832	-284	-112	-180	488
2290	-355	-140	-225	610
2748	-426	-168	-270	732
3206	-497	-196	-315	854
4580	-710	-280	-450	1220
5954	-923	-364	-585	1586
7328	-1136	-448	-720	1952
8702	-1349	-532	-855	2318
10076	-1562	-616	-990	2684
11450	-1775	-700	-1125	3050
12824	-1988	-784	-1260	3416
14198	-2201	-868	-1395	3782
15572	-2414	-952	-1530	4148
16946	-2627	-1036	-1665	4514
18320	-2840	-1120	-1800	4880
19694	-3053	-1204	-1935	5246
25190	-3905	-1540	-2475	6710

Tabela 6.19 - Deformações no Meio da Vão de V01 - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-95	-42	-57	151
916	-190	-84	-114	302
1374	-285	-126	-171	453
1832	-380	-168	-228	604
2290	-475	-210	-285	755
2748	-570	-252	-342	906
3206	-665	-294	-399	1057
4580	-950	-420	-570	1510
5954	-1235	-546	-741	1963
7328	-1520	-672	-912	2416
8702	-1805	-798	-1083	2869
10076	-2090	-924	-1254	3322
11450	-2375	-1050	-1425	3775
12824	-2660	-1176	-1596	4228
14198	-2945	-1302	-1767	4681
15572	-3230	-1428	-1938	5134
16946	-3515	-1554	-2109	5587
18320	-3800	-1680	-2280	6040

Tabela 6.20 - Deformações no Meio do Vão de V02 - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-67	-28	-45	138
916	-134	-56	-90	276
1374	-201	-84	-135	414
1832	-268	-112	-180	552
2290	-335	-140	-225	690
2748	-402	-168	-270	828
3206	-469	-196	-315	966
4580	-670	-280	-450	1380
5954	-871	-364	-585	1794
7328	-1072	-448	-720	2208
8702	-1273	-532	-855	2622
10076	-1474	-616	-990	3036
11450	-1675	-700	-1125	3450
12824	-1876	-784	-1260	3864
14198	-2077	-868	-1395	4278
15572	-2278	-952	-1530	4692
16946	-2479	-1036	-1665	5106
18320	-2680	-1120	-1800	5520
19694	-2881	-1204	-1935	5934
21068	-3082	-1288	-2070	6348
22442	-3283	-1372	-2205	6762

Tabela 6.21 - Deformações no Meio do Vão de V03 - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-86	-42	-58	141
916	-172	-84	-116	282
1374	-258	-126	-174	423
1832	-344	-168	-232	564
2290	-430	-210	-290	705
2748	-516	-252	-348	846
3206	-602	-294	-406	987
4580	-860	-420	-580	1410
5954	-1118	-546	-754	1833
7328	-1376	-672	-928	2256
8702	-1634	-798	-1102	2679
10076	-1892	-924	-1276	3102
11450	-2150	-1050	-1450	3525
12824	-2408	-1176	-1624	3948
14198	-2666	-1302	-1798	4371

Tabela 6.22 - Deformações no Meio do Vão de V04 - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-62	-26	-43	122
916	-124	-52	-86	244
1374	-186	-78	-129	366
1832	-248	-104	-172	488
2290	-310	-130	-215	610
2748	-372	-156	-258	732
3206	-434	-182	-301	854
4580	-620	-260	-430	1220
5954	-806	-338	-559	1586
7328	-992	-416	-688	1952
8702	-1178	-494	-817	2318
10076	-1364	-572	-946	2684
11450	-1550	-650	-1075	3050
12824	-1736	-728	-1204	3416
14198	-1922	-806	-1333	3782
15572	-2108	-884	-1462	4148

Tabela 6.23 - Deformações no Meio do Vão de V05 - SAP90

P_i	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-59	-27	-44	115
916	-118	-54	-88	230
1374	-177	-81	-132	345
1832	-236	-108	-176	460
2290	-295	-135	-220	575
2748	-354	-162	-264	690
3206	-413	-189	-308	805
4580	-590	-270	-440	1150
5954	-767	-351	-572	1495
7328	-944	-432	-704	1840
8702	-1121	-513	-836	2185
10076	-1298	-594	-968	2530
11450	-1475	-675	-1100	2875
12824	-1652	-756	-1232	3220
14198	-1829	-837	-1364	3565
15572	-2006	-918	-1496	3910
16946	-2183	-999	-1628	4255
18320	-2360	-1080	-1760	4600
19694	-2537	-1161	-1892	4945
21068	-2714	-1242	-2024	5290
22442	-2891	-1323	-2156	5635
23816	-3068	-1404	-2288	5980

Tabela 6.24 - Deformações no Meio do Vão de V06 - SAP90

CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

7.1 - Introdução

Este capítulo reúne todos os dados descritos no capítulo 5, a nível experimental, relativos ao ensaio de número 4, ou seja, aquele que levou todas as vigas à ruptura e todos os resultados computacionais do capítulo 6 de maneira a possibilitar uma análise comparativa global.

Através das tabelas que se seguem, será possível quantificar as diferenças dos valores de deslocamentos e deformações alcançados em cada análise. As tabelas 7.1 a 7.12 mostram todos os valores dos deslocamentos verticais no meio do vão e horizontais relativos ou escorregamentos entre mesa e alma no final das vigas compostas. As tabelas 7.13 a 7.36 relacionam todas as deformações nos pontos principais das peças relativas à seção do meio do vão.

Para cada viga, foram traçadas as curvas dos deslocamentos para visualização do caminhamento obtido ao longo do carregamento aplicado. Analogamente, a seguir, o mesmo procedimento foi adotado para as deformações das vigas, separando-se para cada gráfico, os pontos estratégicos da seção, ou seja, topo da mesa, fundo da mesa, topo da alma e fundo da alma. As seguintes abreviações para as diversas análises foram adotadas neste capítulo, a saber:

- A. Ñ L. : análise não-linear do programa BEAM
- A. L. : análise linear do programa BEAM
- ENSAIO : dados experimentais (capítulo 5 - ensaio 4)
- SAP90 : análise linear do programa SAP 90

7.2 - Deslocamentos

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	371	239	239	237
916	565	480	478	474
1374	785	721	717	711
1832	992	963	956	948
2290	1194	1207	1195	1185
2748	1394	1451	1434	1422
3206	1596	1697	1673	1659
4580	2012	2443	2390	2370
5954	2894	3203	3107	3081
7328	3568	3981	3824	3792
8702	4276	4779	4541	4503
10076	4968	5601	5258	5214
11450	5699	6450	5975	5925
12824	6448	7331	6692	6636
14198	7298	8527	7409	7347
15572	8148	9602	8126	8058
16946	9027	10780	8843	8769

Tabela 7.1- Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V01

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	5	25	25	21
916	16	51	50	42
1374	36	78	75	63
1832	56	106	100	84
2290	78	135	125	105
2748	97	165	150	126
3206	113	196	175	147
4580	165	298	250	210
5954	305	414	325	273
7328	418	548	400	336
8702	550	701	475	399
10076	680	879	550	462
11450	865	1084	625	525
12824	1070	1320	700	588
14198	1350	1876	775	651
15572	1640	2302	850	714
16946	2000	2828	925	777

Tabela 7.2- Escorregamento no Final de V01

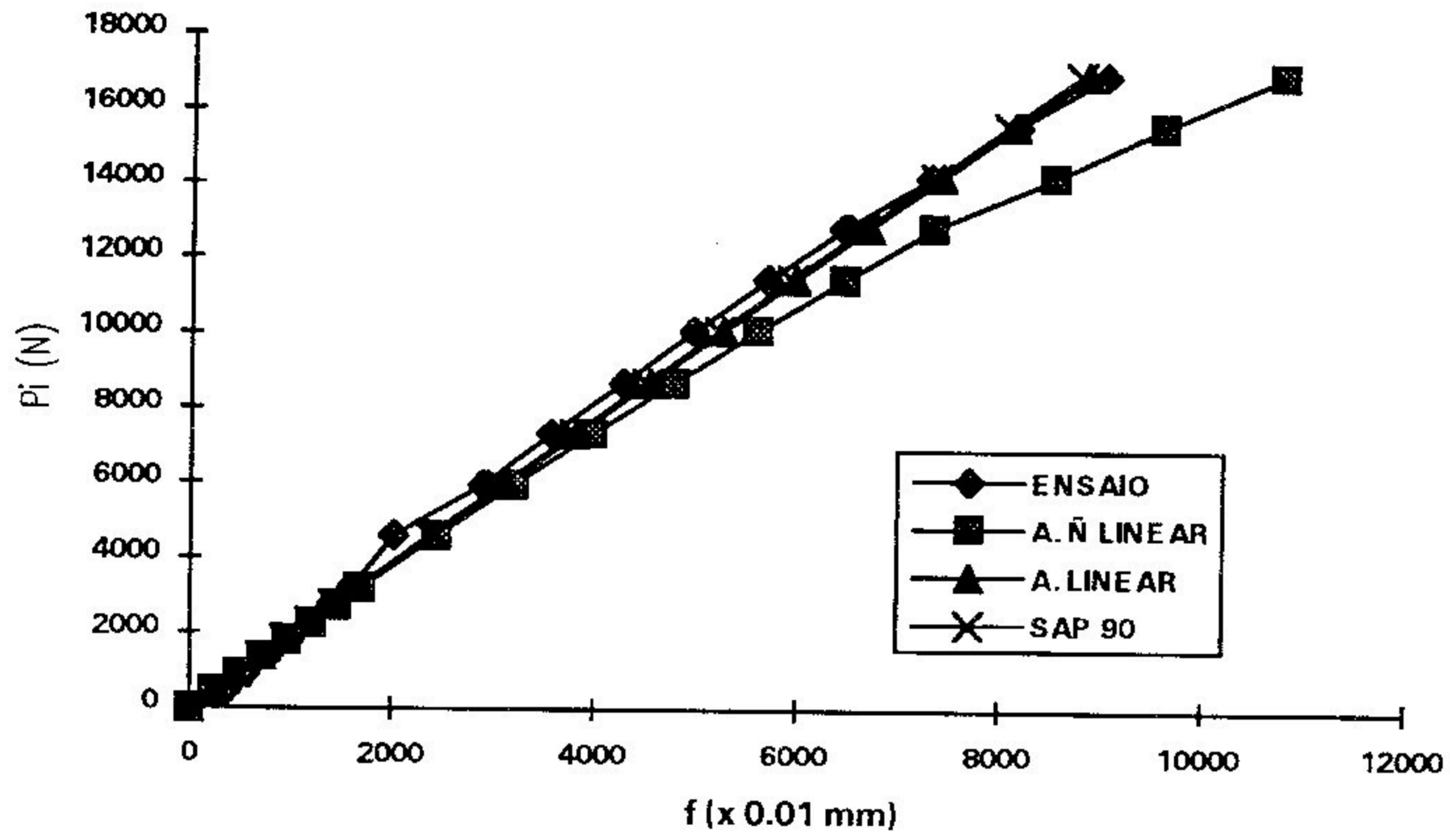


Gráfico 7.1- Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V01

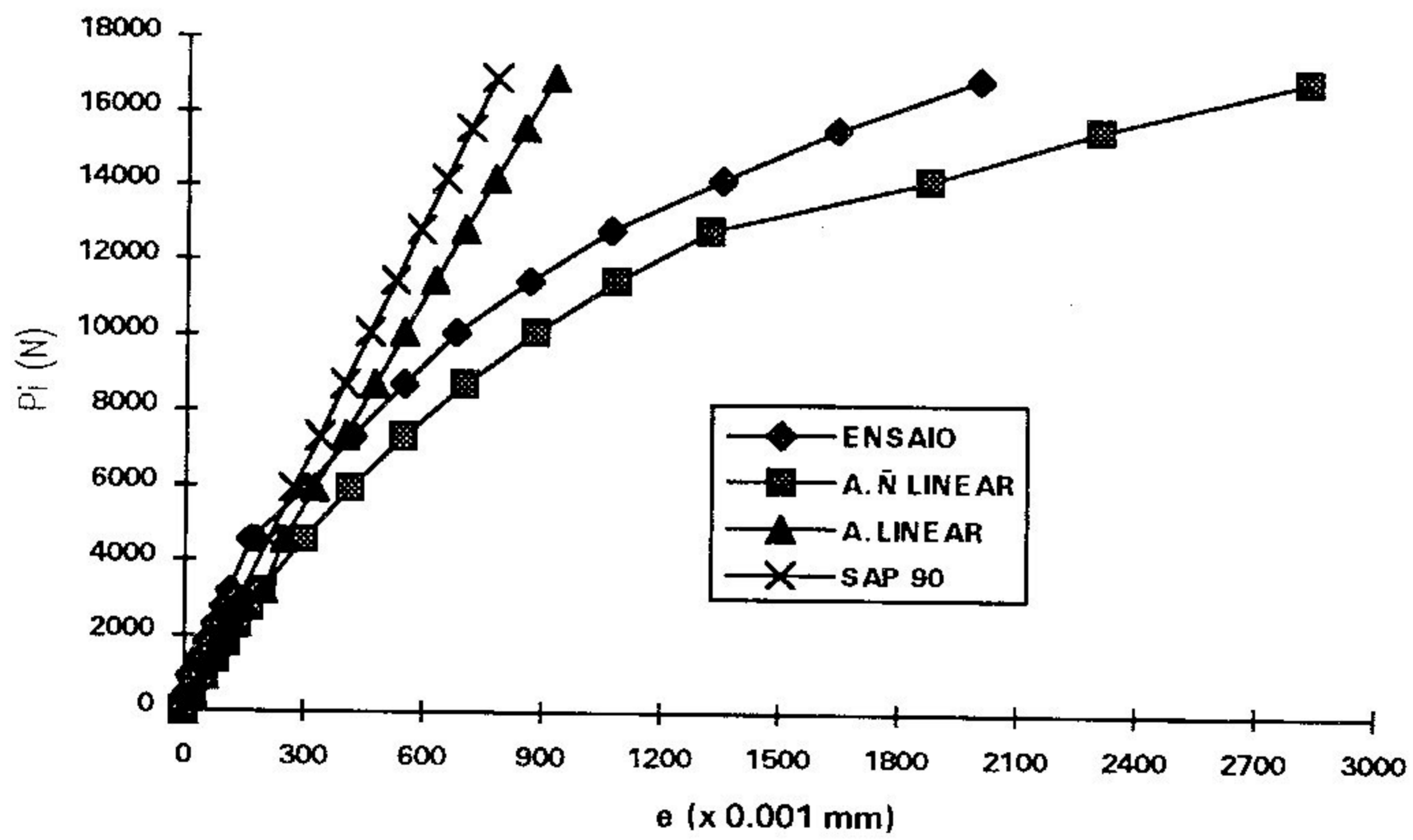


Gráfico 7.2 - Curvas Carga Deslocamento Horizontal de V01

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	429	298	298	294
916	670	597	596	588
1374	928	897	894	882
1832	1185	1197	1192	1176
2290	1415	1499	1490	1470
2748	1679	1802	1788	1764
3206	1939	2107	2086	2058
4580	2729	3027	2980	2940
5954	3583	3963	3874	3822
7328	4461	4915	4768	4704
8702	5268	5887	5662	5586
10076	6167	6885	6556	6468
11450	7060	7910	7450	7350
12824	7962	9119	8344	8232
14198	8863	-	9238	9114
15572	9852	-	10132	9996
16946	11100	-	11026	10878

Tabela 7.3 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V02

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	1	25	24	20
916	7	50	48	40
1374	23	76	72	60
1832	42	104	96	80
2290	59	132	120	100
2748	78	162	144	120
3206	97	193	168	140
4580	190	293	240	200
5954	309	408	312	260
7328	445	539	384	320
8702	549	692	456	380
10076	720	870	528	440
11450	880	1077	600	500
12824	1050	1477	672	560
14198	1260	-	744	620
15572	1530	-	816	680
16946	1810	-	888	740

Tabela 7.4 - Escorregamentos no Final de V02

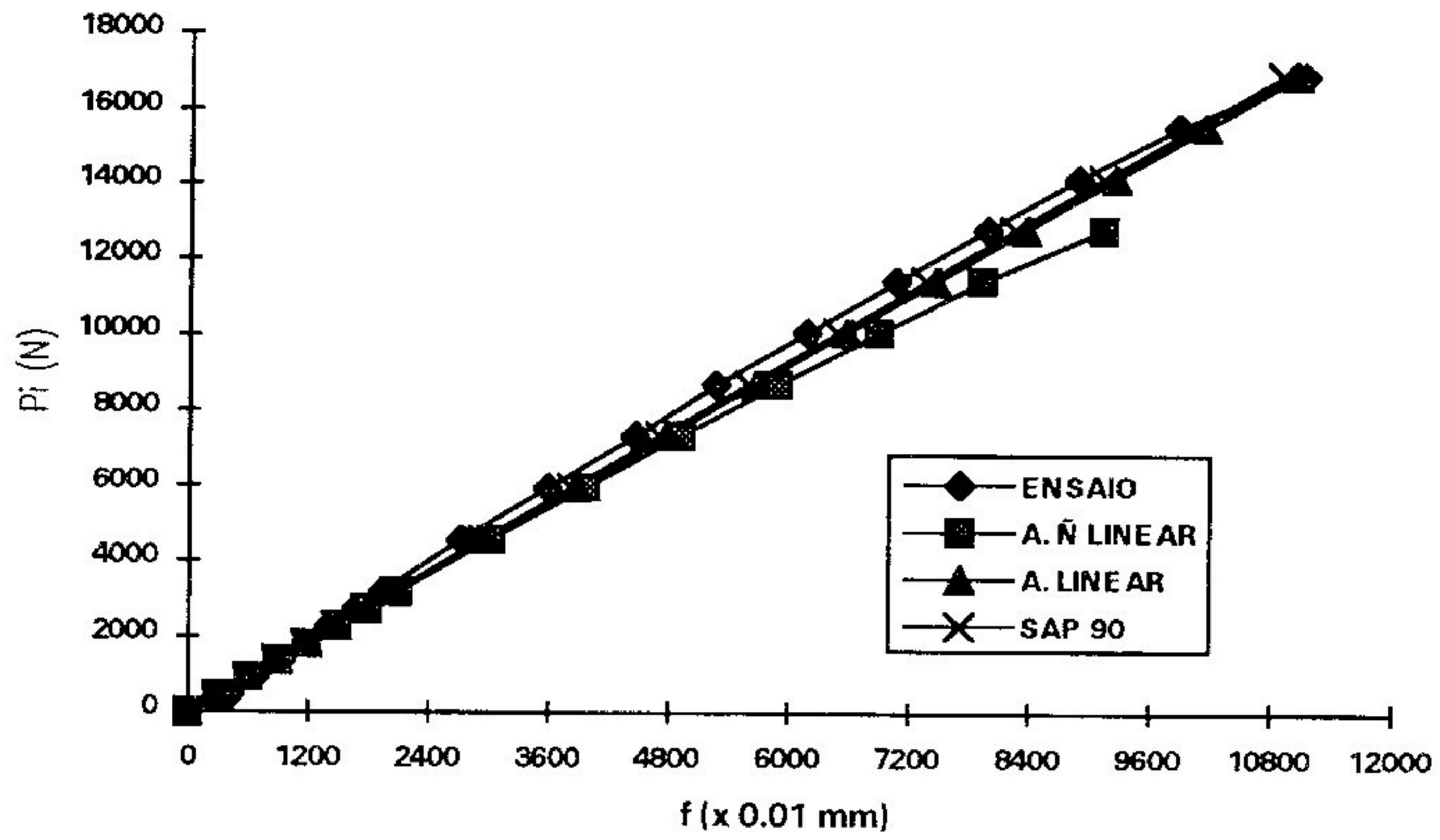


Gráfico 7.3 - Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V02

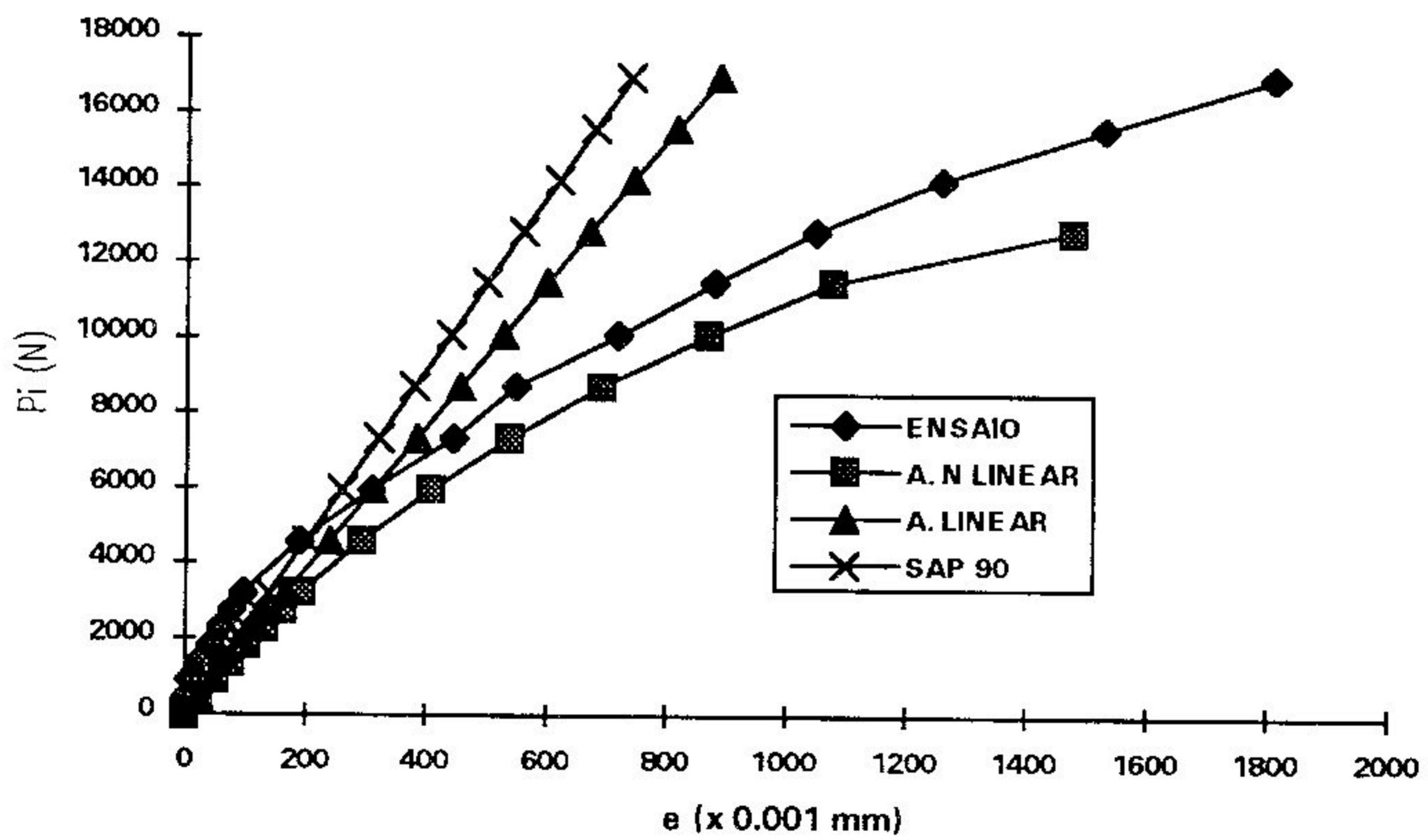


Gráfico 7.4 - Curvas Carga-Deslocamento Horizontal de V02

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	354	252	252	249
916	564	506	504	498
1374	761	761	756	747
1832	949	1017	1008	996
2290	1170	1274	1260	1245
2748	1372	1533	1512	1494
3206	1607	1793	1764	1743
4580	2204	2582	2520	2490
5954	2911	3389	3276	3237
7328	3582	4217	4032	3984
8702	4311	5069	4788	4731
10076	5030	5950	5544	5478
11450	5692	6864	6300	6225
12824	6468	8019	7056	6972
14198	7295	9180	7812	7719
15572	8153	10390	8568	8466
16946	8999	-	9324	9213
18320	10045	-	10080	9960

Tabela 7.5 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V03

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	1	26	26	22
916	2	54	52	44
1374	8	82	78	66
1832	14	112	104	88
2290	21	143	130	110
2748	29	175	156	132
3206	62	209	182	154
4580	76	318	260	220
5954	132	444	338	286
7328	205	591	416	352
8702	325	761	494	418
10076	490	959	572	484
11450	650	1189	650	550
12824	840	1657	728	616
14198	1080	2126	806	682
15572	1360	2645	884	748
16946	1710	-	962	814
18320	2120	-	1040	880

Tabela 7.6 - Escorregamentos no Final de V03

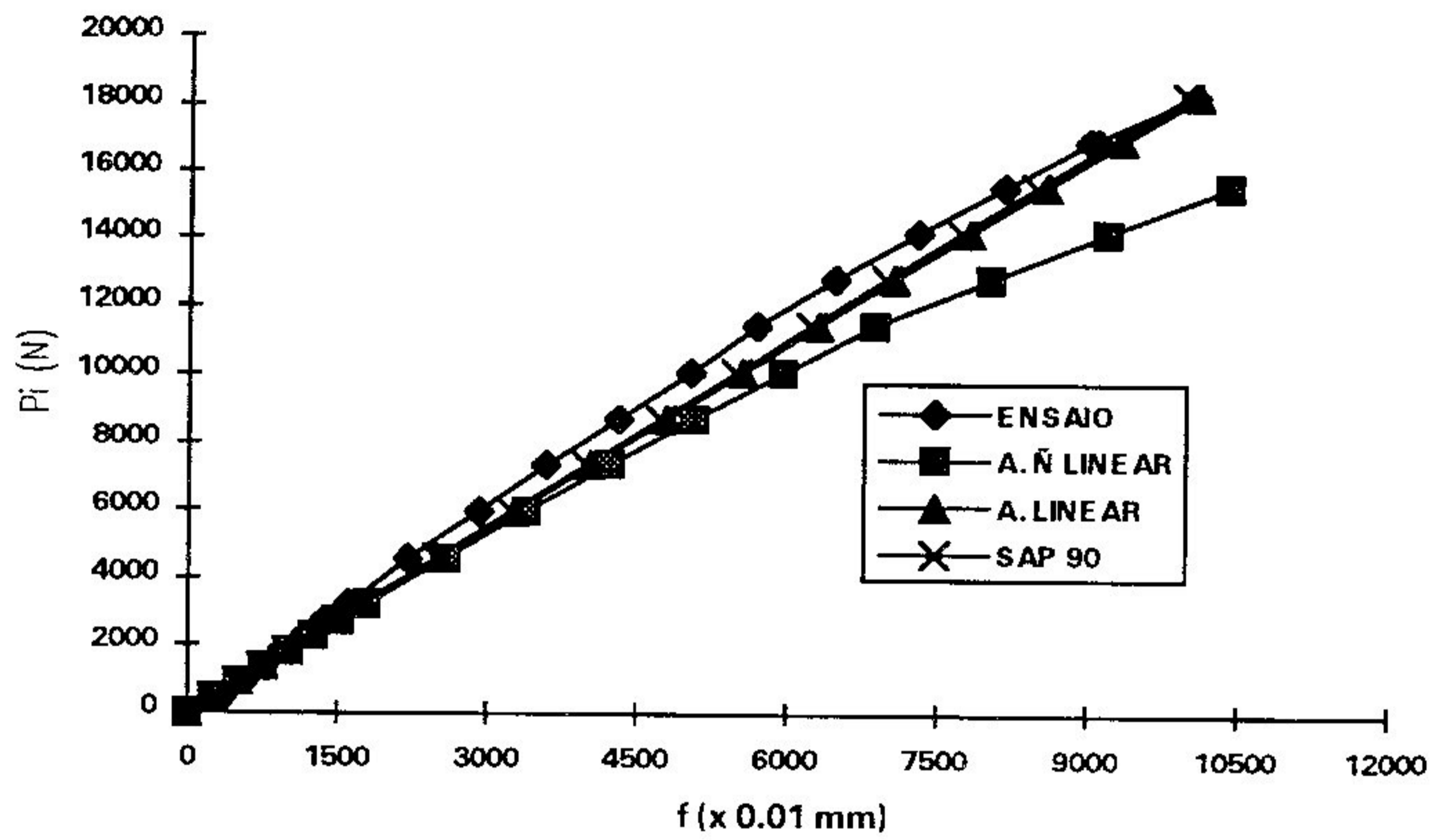


Gráfico 7.5 - Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V03

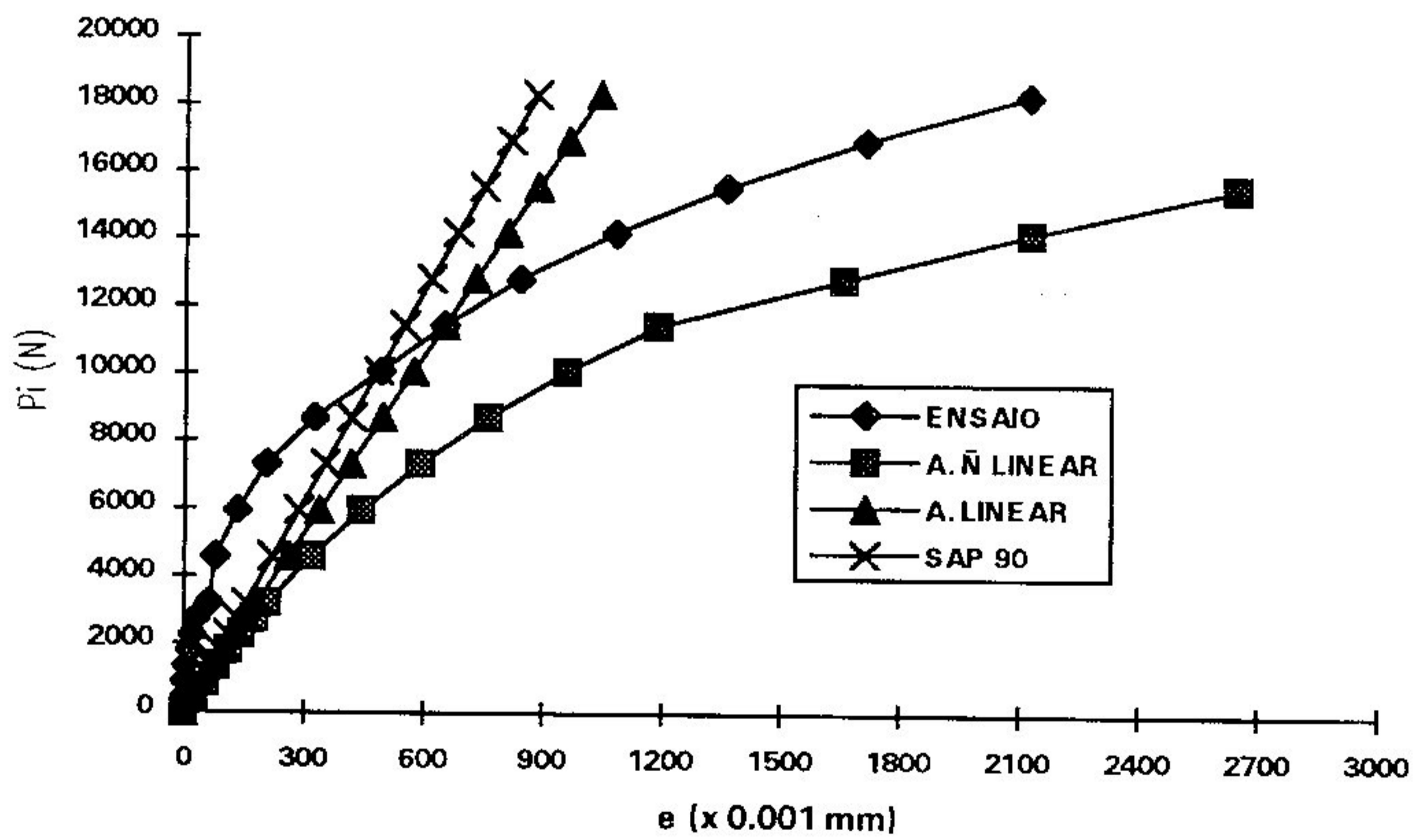


Gráfico 7.6 - Curvas Carga-Deslocamento Horizontal de V03

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	428	282	281	279
916	704	565	562	558
1374	976	850	843	837
1832	1189	1135	1124	1116
2290	1446	1421	1405	1395
2748	1707	1708	1686	1674
3206	1965	1997	1967	1953
4580	2770	2869	2810	2790
5954	3661	3755	3653	3627
7328	4494	4657	4496	4464
8702	-	5579	5339	5301
10076	-	6526	6182	6138
11450	-	7492	7025	6975
12824	-	8560	7868	7812
14198	-	9790	8711	8649

Tabela 7.7 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V04

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	0	24	24	20
916	0	50	48	40
1374	1	76	72	60
1832	4	103	96	80
2290	13	131	120	100
2748	25	160	144	120
3206	38	190	168	140
4580	127	289	240	200
5954	250	401	312	260
7328	371	530	384	320
8702	495	678	456	380
10076	643	853	528	440
11450	810	1047	600	500
12824	998	1348	672	560
14198	1190	1818	744	620

Tabela 7.8 - Escorregamentos no Final de V04

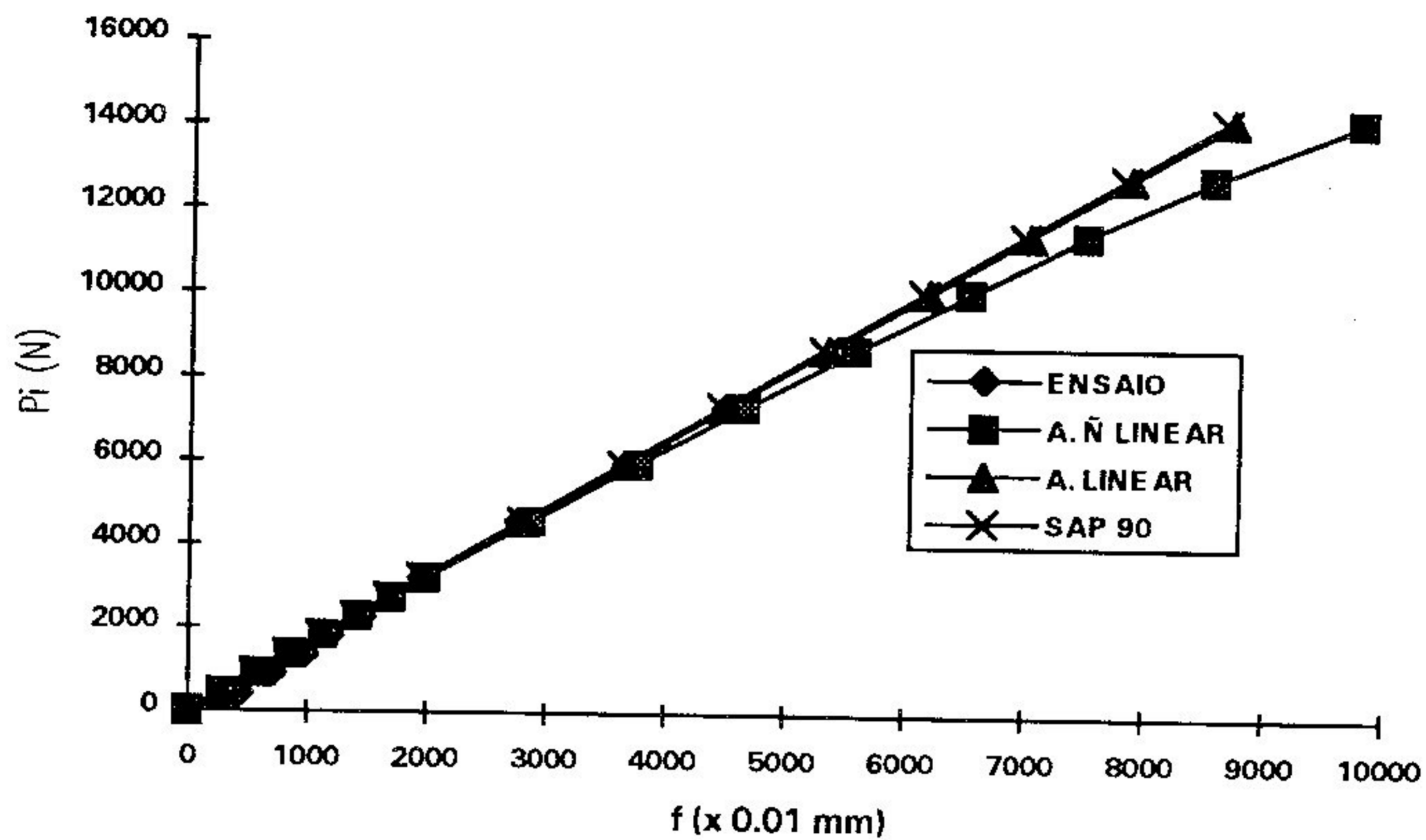


Gráfico 7.7 - Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V04

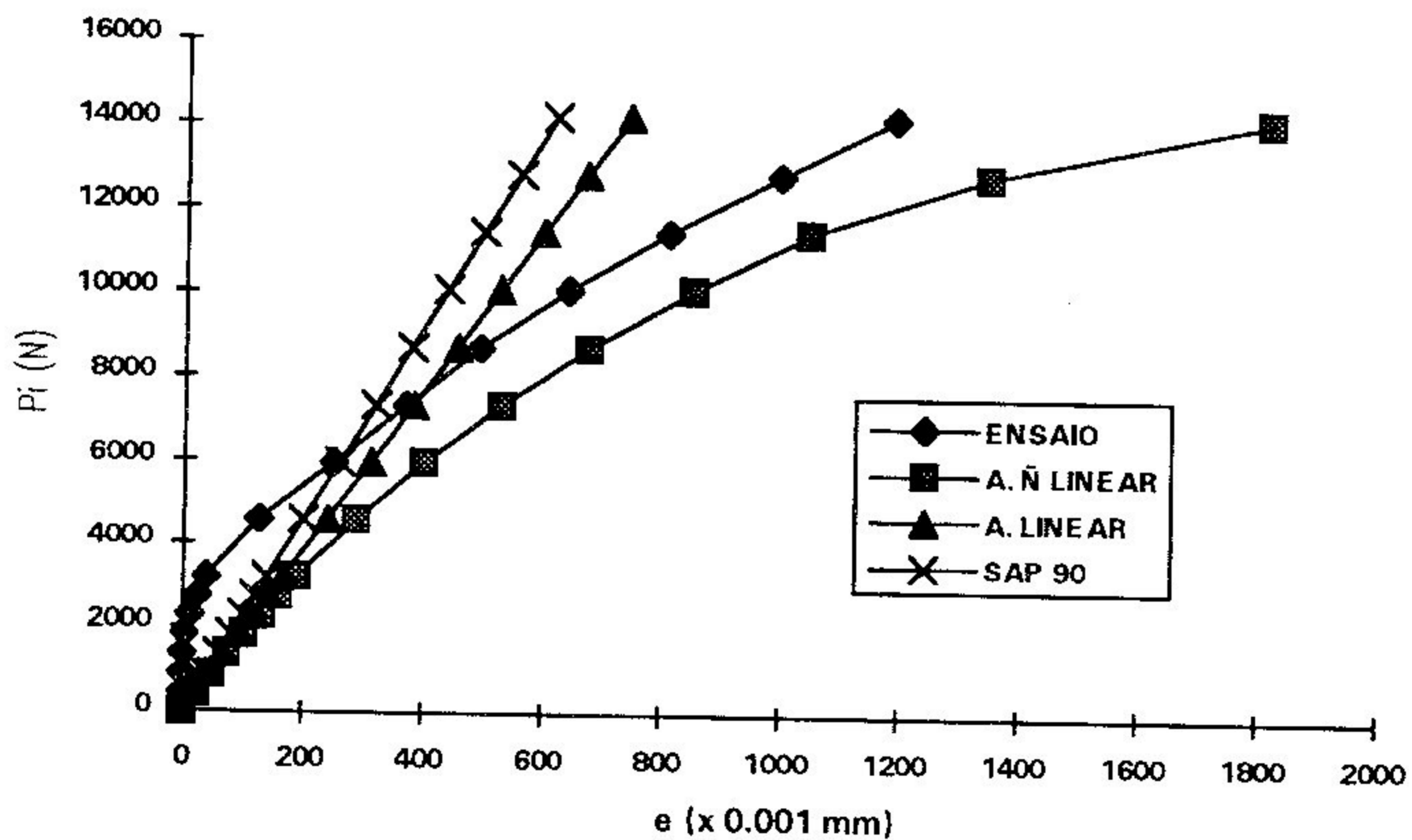


Gráfico 7.8 - Curvas Carga-Deslocamento Horizontal de V04

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	249	225	224	224
916	454	451	448	448
1374	659	678	672	672
1832	840	906	896	896
2290	1041	1135	1120	1120
2748	1374	1365	1344	1344
3206	1630	1597	1568	1568
4580	2045	2300	2240	2240
5954	2702	3019	2912	2912
7328	3361	3755	3584	3584
8702	4010	4513	4256	4256
10076	4723	5295	4928	4928
11450	5436	6106	5600	5600
12824	6205	6946	6272	6272
14198	6975	-	6944	6944
15572	7855	-	7616	7616
16946	8779	-	8288	8288

Tabela 7.9 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V05

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	1	26	25	22
916	6	53	50	44
1374	22	80	75	66
1832	39	109	100	88
2290	57	139	125	110
2748	78	170	150	132
3206	92	203	175	154
4580	173	308	250	220
5954	282	429	325	286
7328	415	567	400	352
8702	577	726	475	418
10076	732	910	550	484
11450	940	1122	625	550
12824	1168	1362	700	616
14198	1432	-	775	682
15572	1750	-	850	748
16946	2135	-	925	814

Tabela 7.10 - Escorregamento no Final de V05

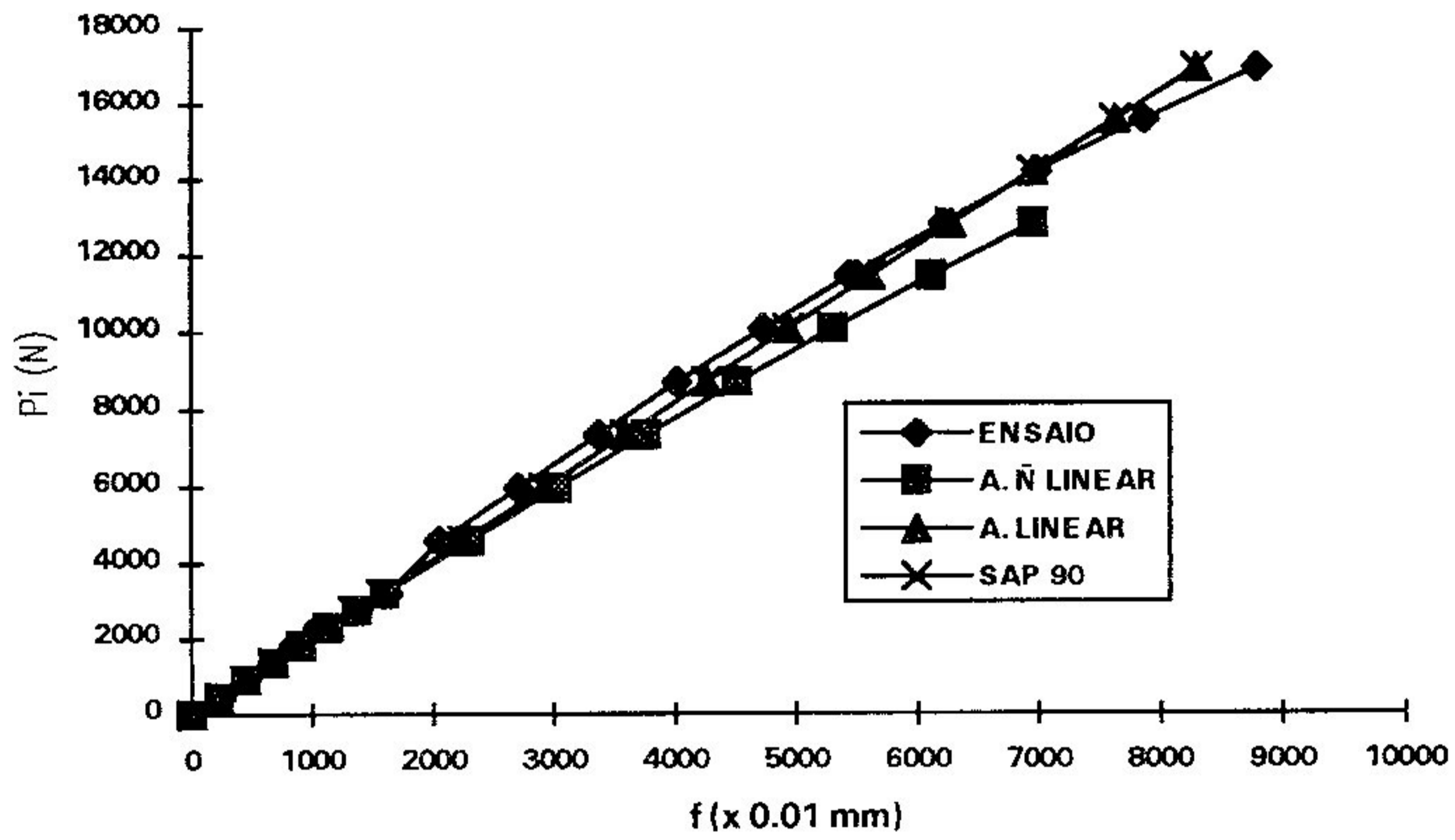


Gráfico 7.9 - Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V05

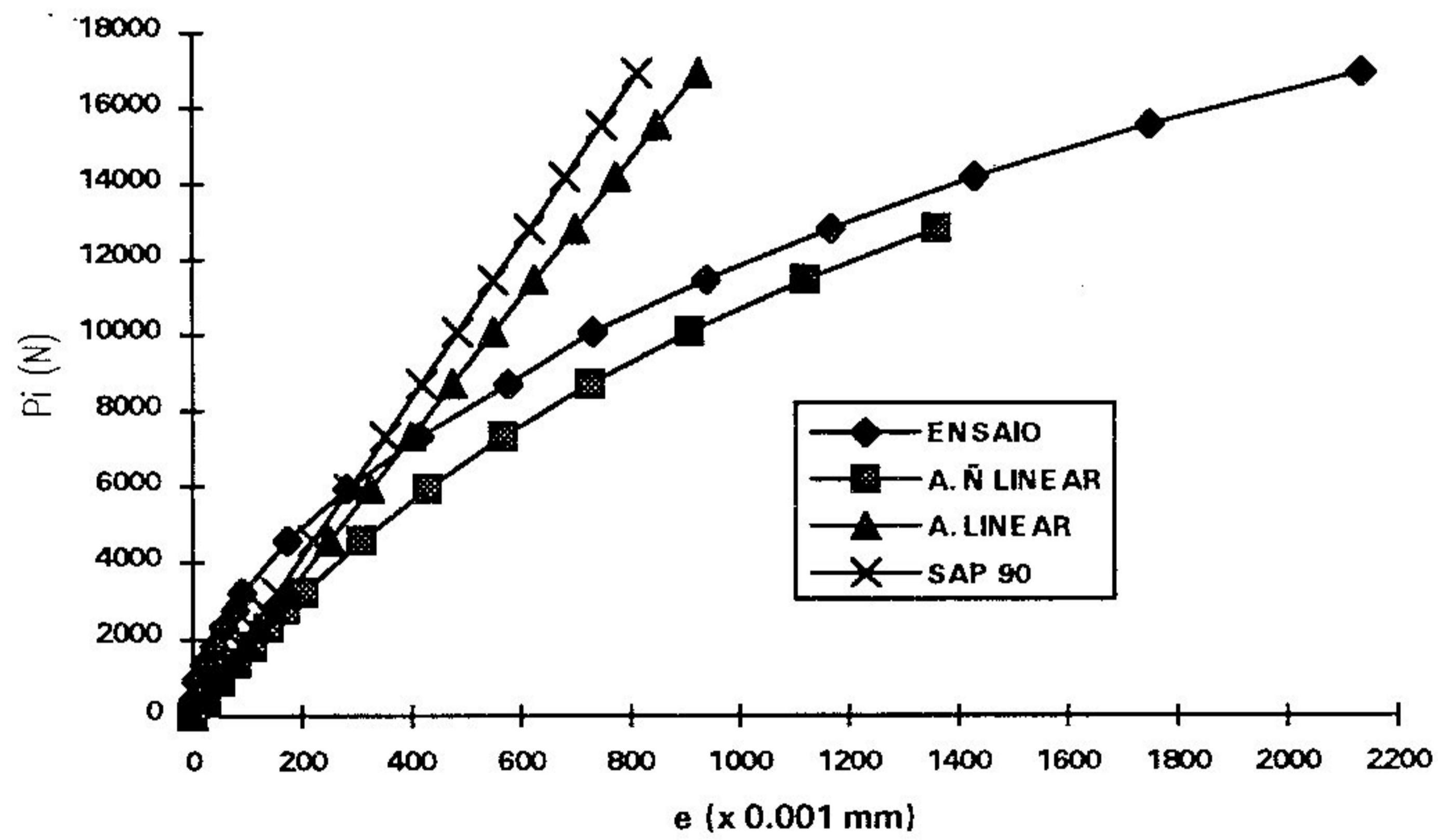


Gráfico 7.10 - Curvas Carga-Deslocamento Horizontal de V05

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻² mm)			
458	274	227	226	224
916	488	454	452	448
1374	667	683	678	672
1832	871	913	904	896
2290	1057	1143	1130	1120
2748	1244	1376	1356	1344
3206	1414	1609	1582	1568
4580	1941	2318	2260	2240
5954	2669	3041	2938	2912
7328	3291	3782	3616	3584
8702	3971	4544	4294	4256
10076	4645	5330	4972	4928
11450	5356	6144	5650	5600
12824	6071	6986	6328	6272
14198	6825	-	7006	6944
15572	7648	-	7684	7616
16946	8574	-	8362	8288
18320	9441	-	9040	8960

Tabela 7.11 - Deslocamentos Verticais no Meio do Vão de V06

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻³ mm)			
458	0	26	25	22
916	1	52	50	44
1374	4	79	75	66
1832	9	108	100	88
2290	14	138	125	110
2748	19	168	150	132
3206	23	200	175	154
4580	60	304	250	220
5954	145	422	325	286
7328	235	558	400	352
8702	385	713	475	418
10076	560	893	550	484
11450	755	1098	625	550
12824	980	1331	700	616
14198	1235	-	775	682
15572	1530	-	850	748
16946	1935	-	925	814
18320	2260	-	1000	880

Tabela 7.12 - Escorregamentos no Final de V06

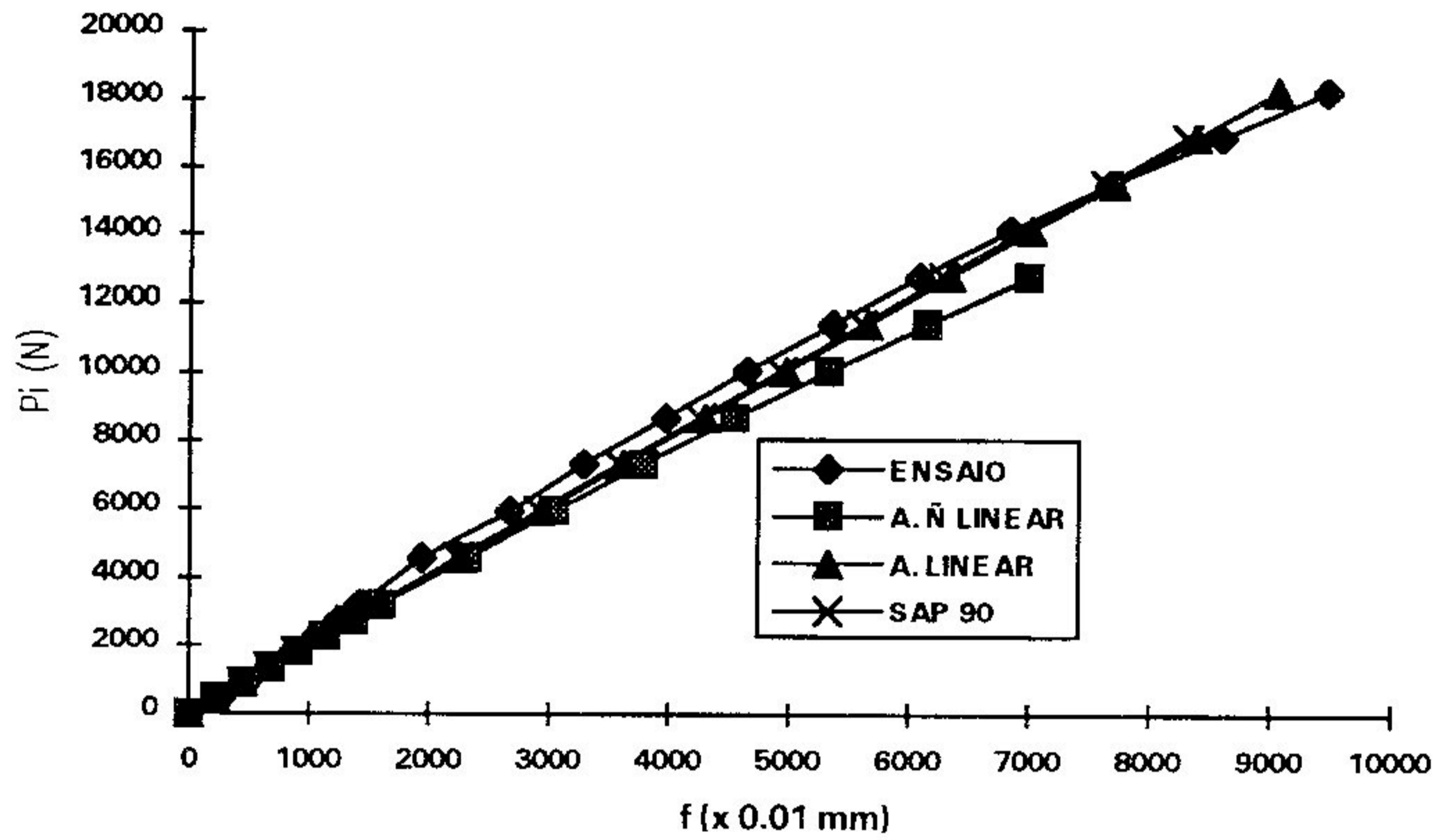


Gráfico 7.11 - Curvas Carga-Deslocamento Vertical de V06

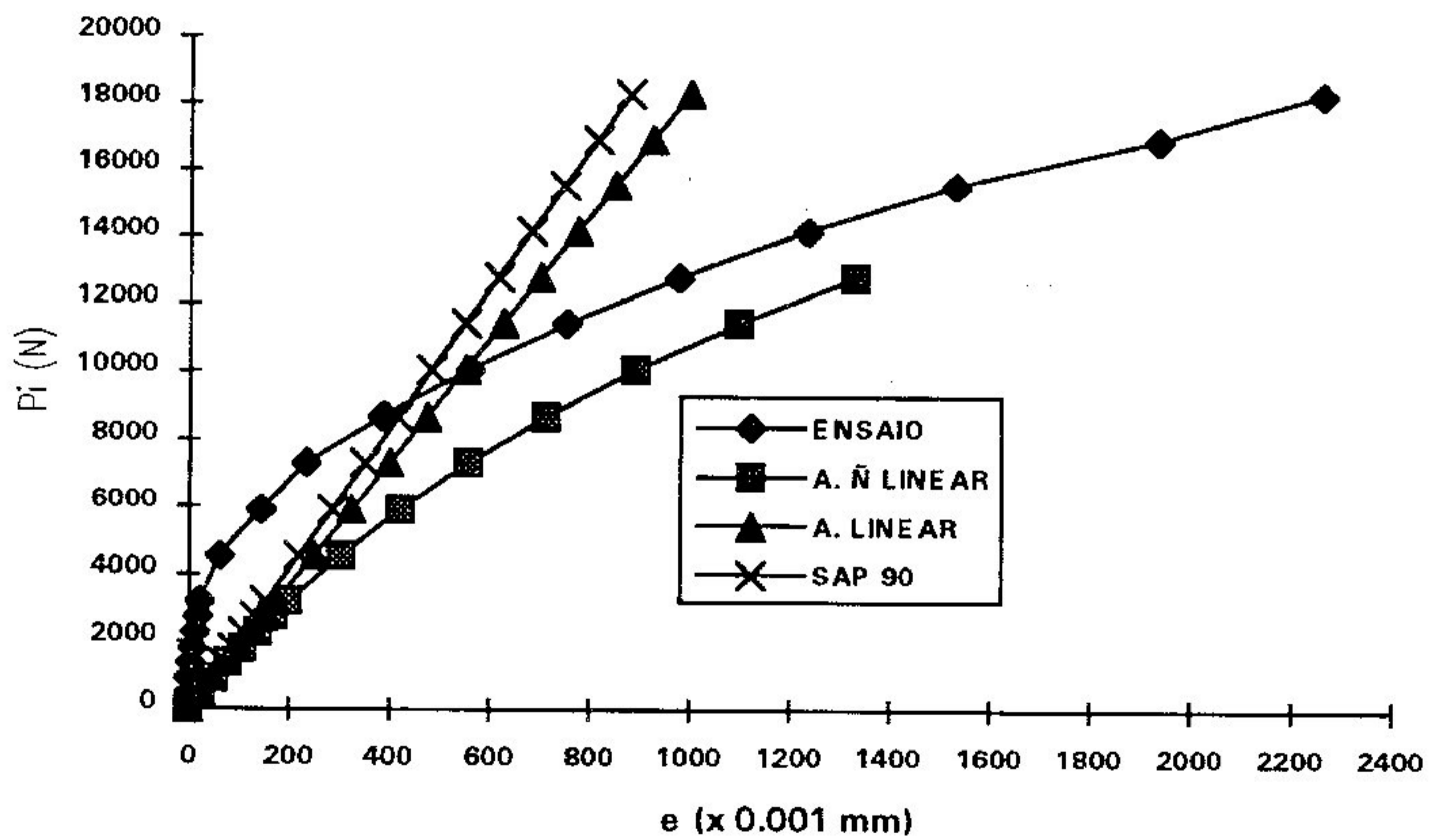


Gráfico 7.12 - Curvas Carga-Deslocamento Horizontal de V06

7.3 - Deformações

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-117	-72	-72	-71
916	-169	-143	-144	-142
1374	-228	-215	-216	-213
1832	-283	-286	-288	-284
2290	-340	-358	-360	-355
2748	-400	-430	-432	-426
3206	-460	-501	-504	-497
4580	-575	-715	-720	-710
5954	-798	-929	-936	-923
7328	-949	-1143	-1152	-1136
8702	-1119	-1356	-1368	-1349
10076	-1277	-1568	-1584	-1562
11450	-1439	-1780	-1800	-1775
12824	-1577	-1991	-2016	-1988
14198	-1730	-2193	-2232	-2201
15572	-1875	-2399	-2448	-2414
16946	-1990	-2601	-2664	-2627
18320	-2127	-	-2880	-2840
19694	-2297	-	-3096	-3053
25190	-2748	-	-3960	-3905

Tabela 7.13 - Deformações no Meio do Vão de V01 - Topo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-48	-28	-28	-28
916	-69	-55	-56	-56
1374	-93	-83	-84	-84
1832	-114	-110	-112	-112
2290	-139	-137	-140	-140
2748	-165	-164	-168	-168
3206	-200	-191	-196	-196
4580	-250	-270	-280	-280
5954	-333	-347	-364	-364
7328	-389	-422	-448	-448
8702	-451	-493	-532	-532
10076	-510	-560	-616	-616
11450	-566	-624	-700	-700
12824	-608	-682	-784	-784
14198	-647	-689	-868	-868
15572	-680	-715	-952	-952
16946	-686	-724	-1036	-1036
18320	-706	-	-1120	-1120
19694	-718	-	-1204	-1204
25190	-620	-	-1540	-1540

Tabela 7.14 - Deformações no Meio do Vão de V01 - Fundo da Mesa

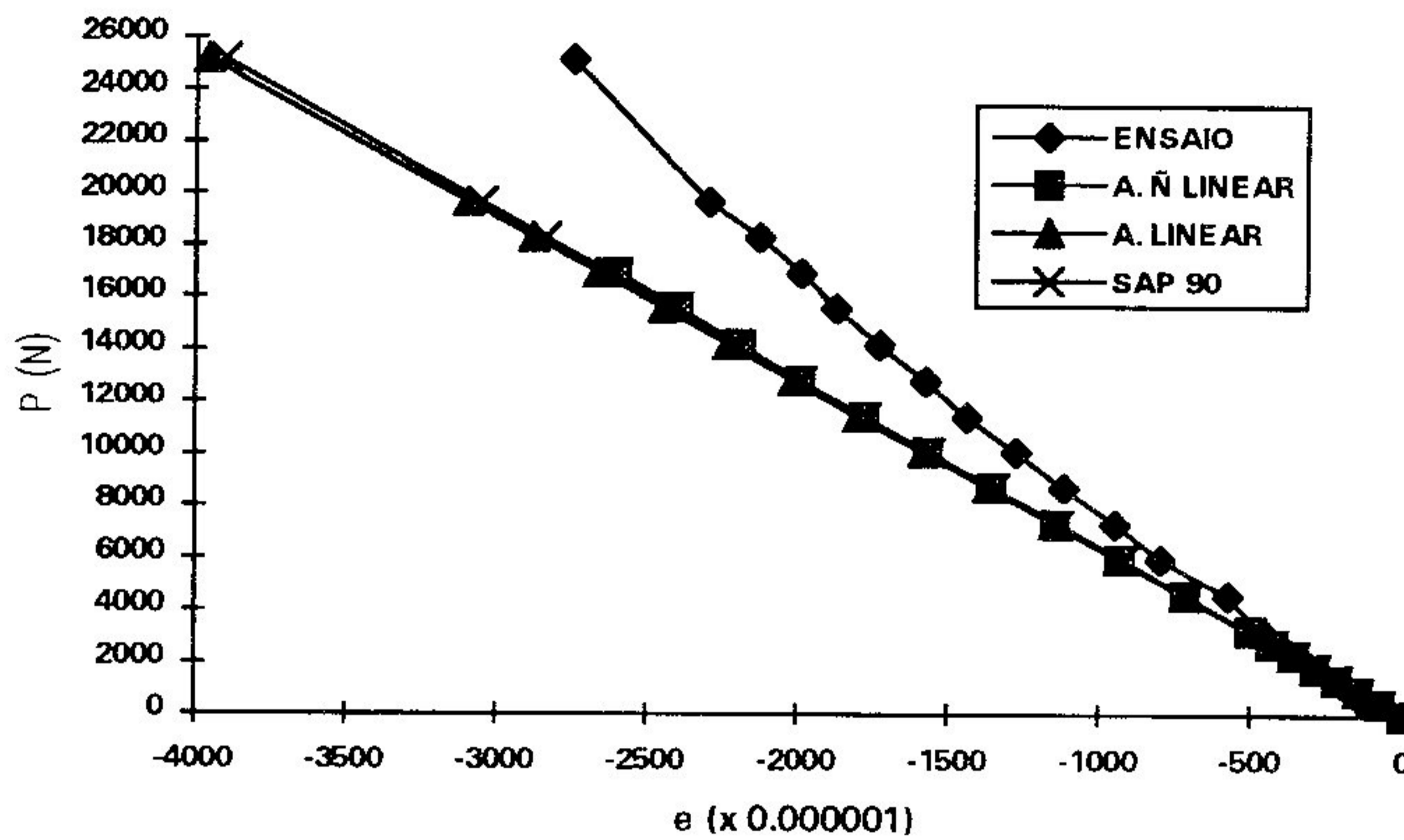


Gráfico 7.13 - Deformações de V01 - Topo da Mesa

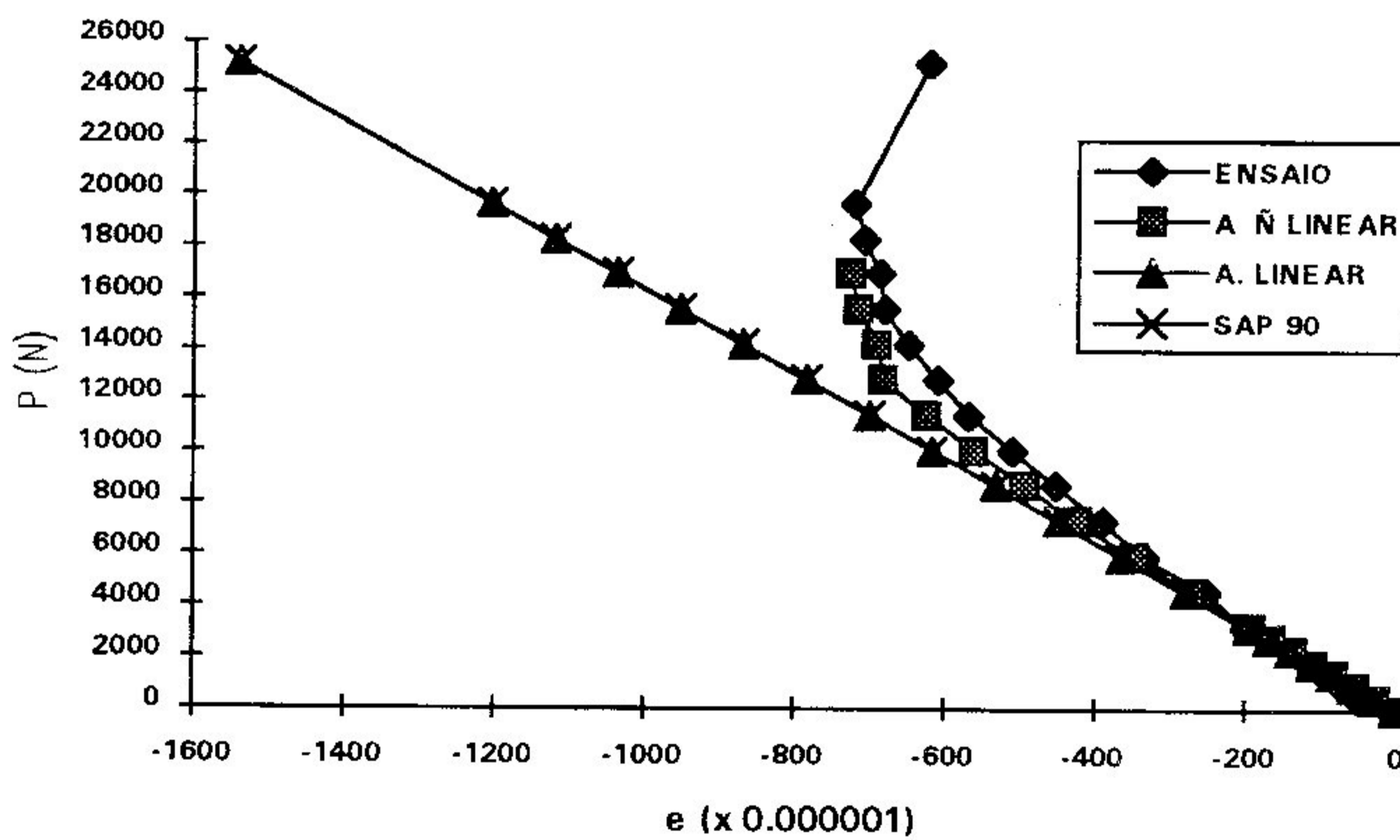


Gráfico 7.14 - Deformações de V01 - Fundo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-50	-46	-46	-45
916	-77	-92	-92	-90
1374	-103	-138	-138	-135
1832	-128	-185	-184	-180
2290	-157	-232	-230	-225
2748	-188	-279	-276	-270
3206	-228	-327	-322	-315
4580	-285	-473	-460	-450
5954	-424	-623	-598	-585
7328	-533	-779	-736	-720
8702	-655	-940	-874	-855
10076	-788	-1110	-1012	-990
11450	-917	-1288	-1150	-1125
12824	-1055	-1478	-1288	-1260
14198	-1220	-1771	-1426	-1395
15572	-1390	-2028	-1564	-1530
16946	-1575	-2319	-1702	-1665
18320	-1798	-	-1840	-1800
19694	-2027	-	-1978	-1935
25190	-3248	-	-2530	-2475

Tabela 7.15 - Deformações no Meio do Vão de V01 - Topo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	183	123	123	122
916	270	247	246	244
1374	360	371	369	366
1832	463	495	492	488
2290	553	619	615	610
2748	639	743	738	732
3206	719	868	861	854
4580	895	1243	1230	1220
5954	1255	1620	1599	1586
7328	1526	2001	1968	1952
8702	1804	2385	2337	2318
10076	2050	2773	2706	2684
11450	2350	3166	3075	3050
12824	2630	3566	3444	3416
14198	2950	4024	3813	3782
15572	3250	4461	4182	4148
16946	3560	4917	4551	4514
18320	3933	-	4920	4880
19694	4293	-	5289	5246
25190	5812	-	6765	6710

Tabela 7.16 - Deformações no Meio do Vão de V01 - Fundo da alma

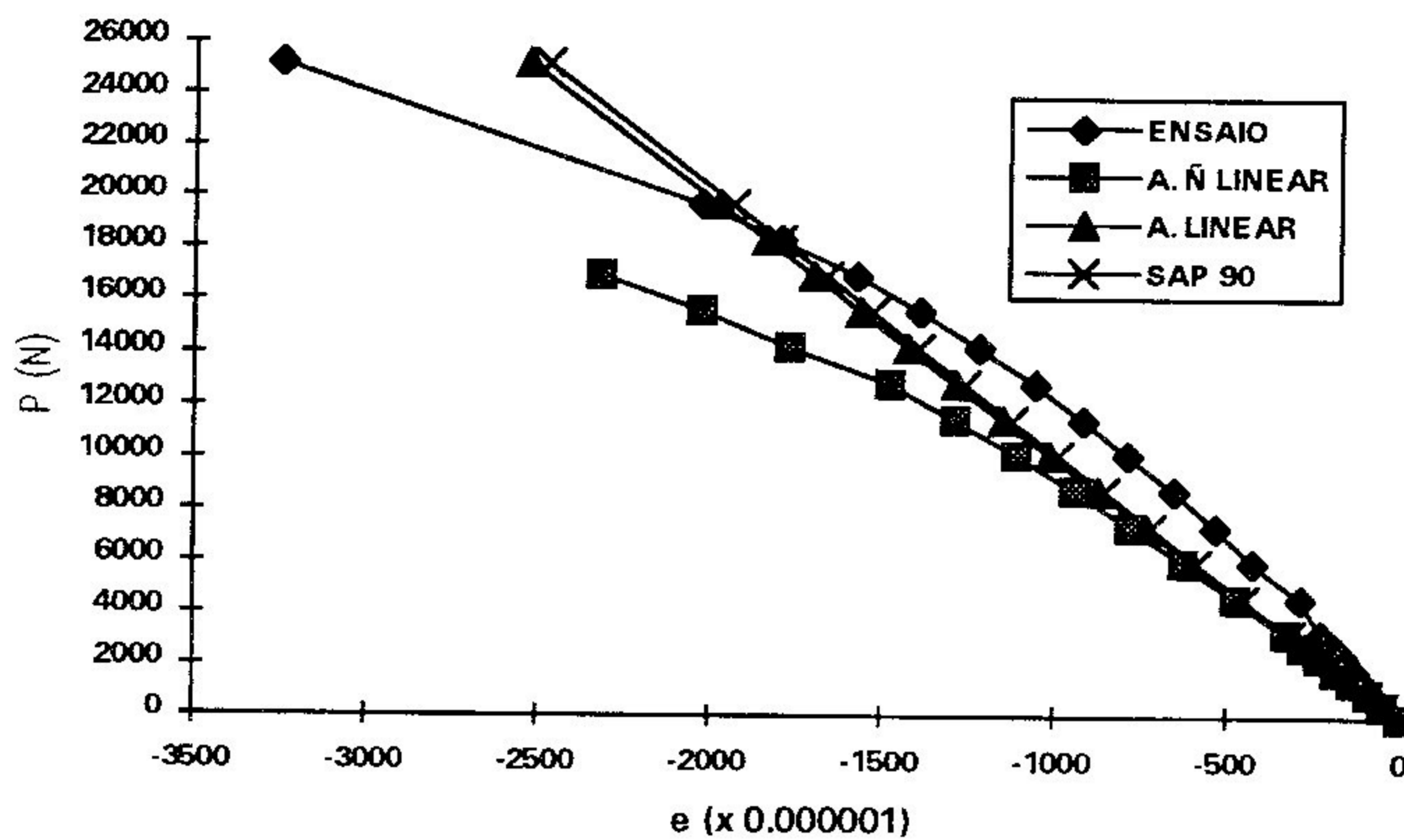


Gráfico 7.15 - Deformações de V01 - Topo da Alma

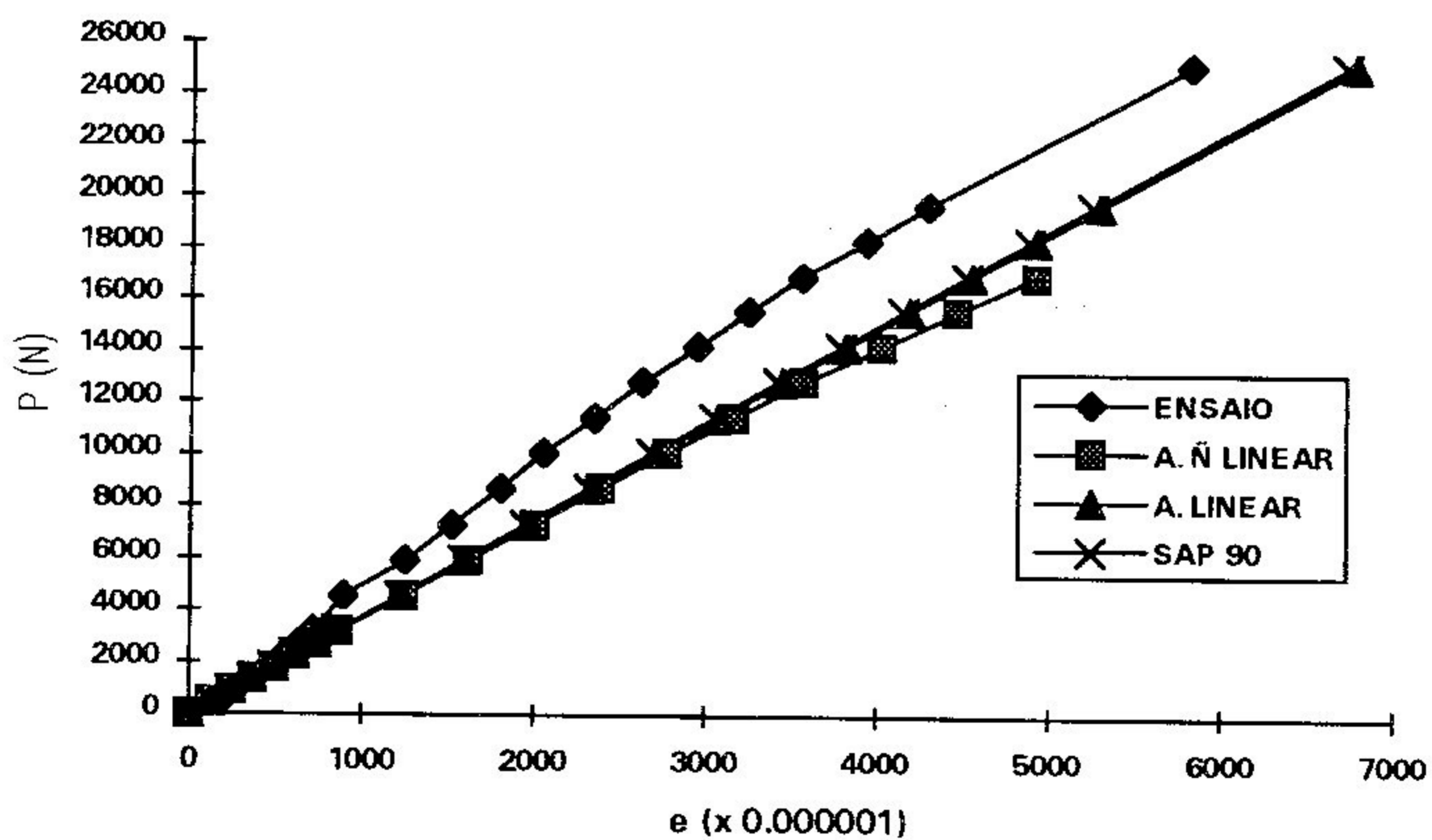


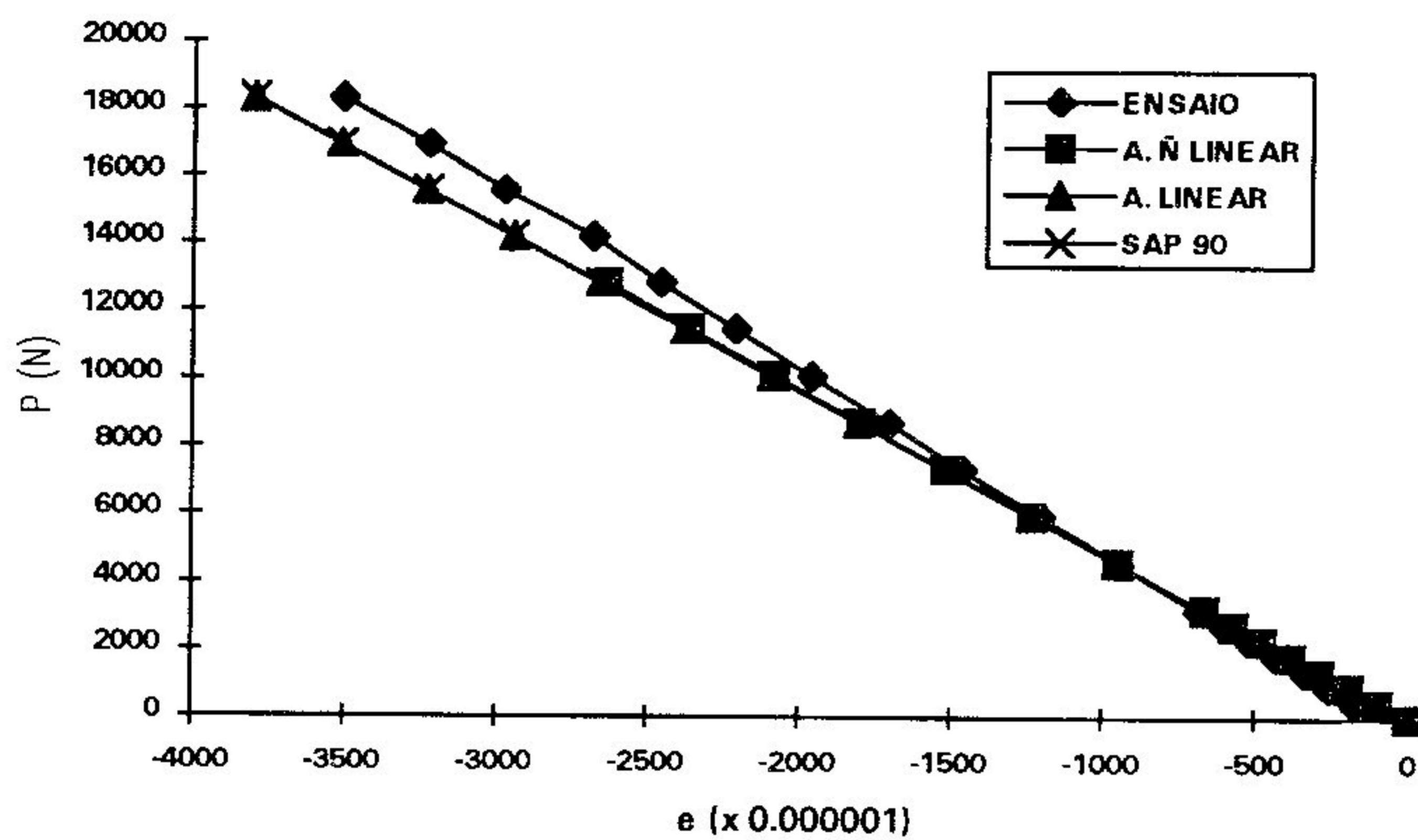
Gráfico 7.16 - Deformações de V01 - Fundo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-175	-95	-95	-95
916	-256	-190	-190	-190
1374	-336	-285	-285	-285
1832	-429	-380	-380	-380
2290	-518	-475	-475	-475
2748	-601	-570	-570	-570
3206	-685	-665	-665	-665
4580	-945	-949	-950	-950
5954	-1201	-1233	-1235	-1235
7328	-1462	-1516	-1520	-1520
8702	-1703	-1798	-1805	-1805
10076	-1960	-2080	-2090	-2090
11450	-2210	-2361	-2375	-2375
12824	-2458	-2634	-2660	-2660
14198	-2681	-	-2945	-2945
15572	-2973	-	-3230	-3230
16946	-3224	-	-3515	-3515
18320	-3508	-	-3800	-3800

Tabela 7.17 - Deformações no Meio do Vão de V02 - Topo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-75	-42	-42	-42
916	-118	-83	-84	-84
1374	-152	-124	-126	-126
1832	-191	-165	-168	-168
2290	-230	-206	-210	-210
2748	-262	-247	-252	-252
3206	-303	-288	-294	-294
4580	-405	-408	-420	-420
5954	-510	-526	-546	-546
7328	-608	-642	-672	-672
8702	-702	-755	-798	-798
10076	-797	-864	-924	-924
11450	-885	-969	-1050	-1050
12824	-976	-1044	-1176	-1176
14198	-1056	-	-1302	-1302
15572	-1155	-	-1428	-1428
16946	-1244	-	-1554	-1554
18320	-1332	-	-1680	-1680

Tabela 7.18 - Deformações no Meio do Vão de V02 - Fundo da Mesa



o 7.17 - Deformações de V02 - Topo da Mesa

Gráfico

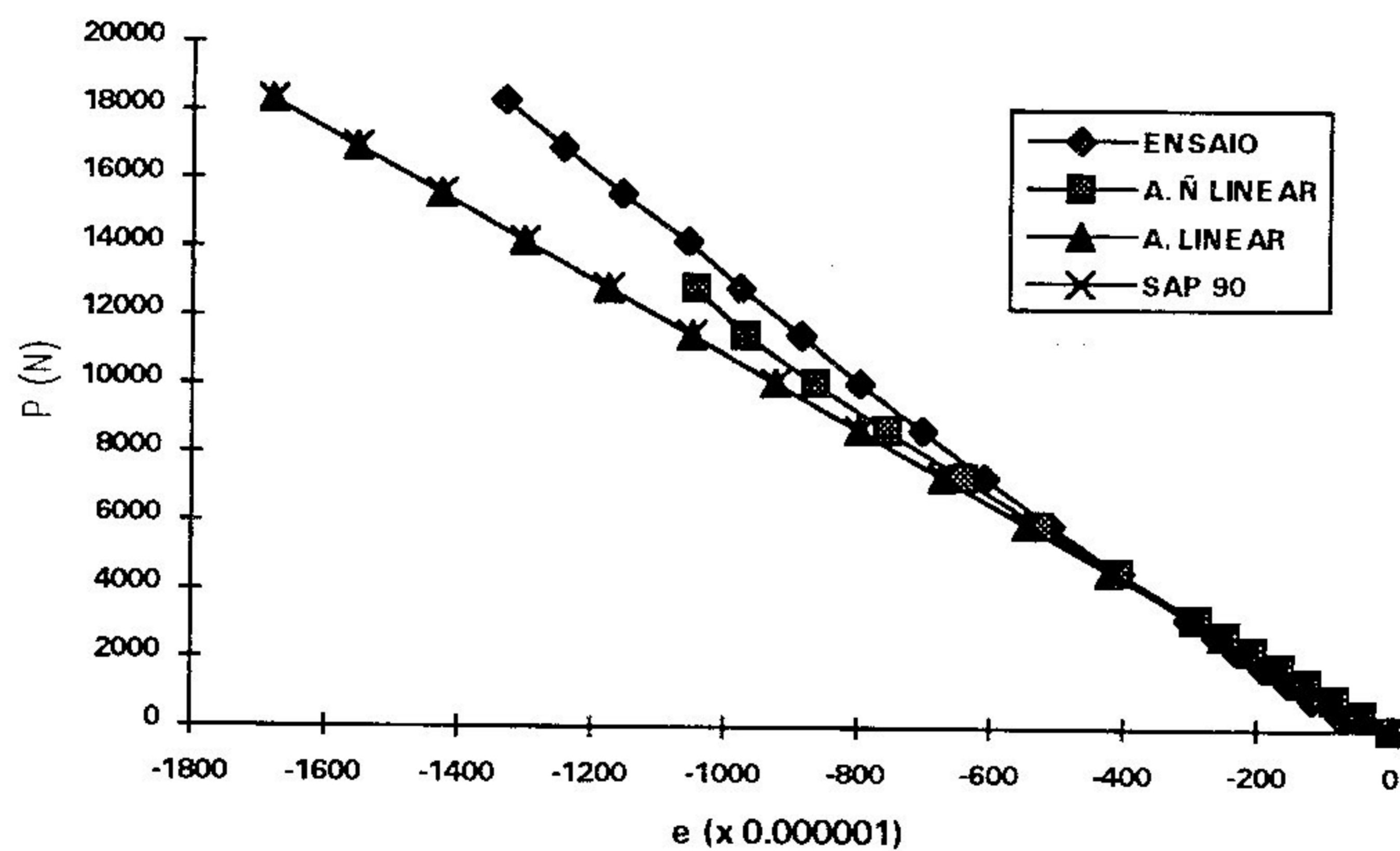


Gráfico 7.18 - Deformações de V02 - Fundo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-75	-58	-58	-57
916	-115	-117	-116	-114
1374	-155	-176	-174	-171
1832	-191	-235	-232	-228
2290	-230	-295	-290	-285
2748	-269	-355	-348	-342
3206	-307	-415	-406	-399
4580	-439	-598	-580	-570
5954	-591	-786	-754	-741
7328	-759	-978	-928	-912
8702	-911	-1176	-1102	-1083
10076	-1081	-1382	-1276	-1254
11450	-1255	-1595	-1450	-1425
12824	-1430	-1865	-1624	-1596
14198	-1623	-	-1798	-1767
15572	-1870	-	-1972	-1938
16946	-2104	-	-2146	-2109
18320	-2412	-	-2320	-2280

Tabela 7.19 - Deformações no Meio do Vão de V02 - Topo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	199	153	152	151
916	308	305	304	302
1374	427	458	456	453
1832	545	611	608	604
2290	643	764	760	755
2748	767	918	912	906
3206	887	1071	1064	1057
4580	1225	1534	1520	1510
5954	1589	1998	1976	1963
7328	1960	2465	2432	2416
8702	2295	2936	2888	2869
10076	2665	3411	3344	3322
11450	3015	3890	3800	3775
12824	3365	4400	4256	4228
14198	3714	-	4712	4681
15572	4145	-	5168	5134
16946	4536	-	5624	5587
18320	4978	-	6080	6040

Tabela 7.20 - Deformações no Meio do Vão de V02 - Fundo da Alma

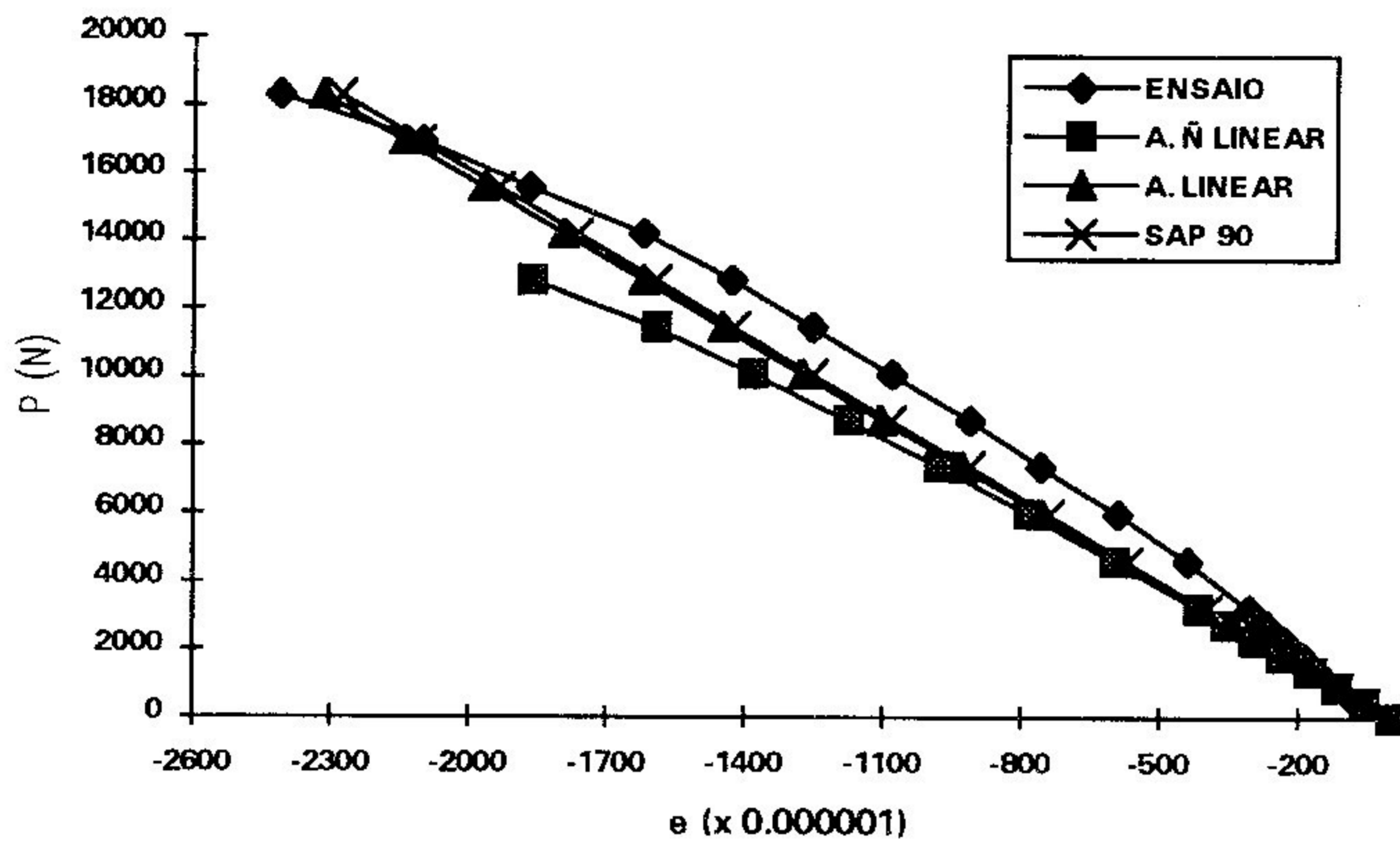


Gráfico 7.19 - Deformações de V02 - Topo da Alma

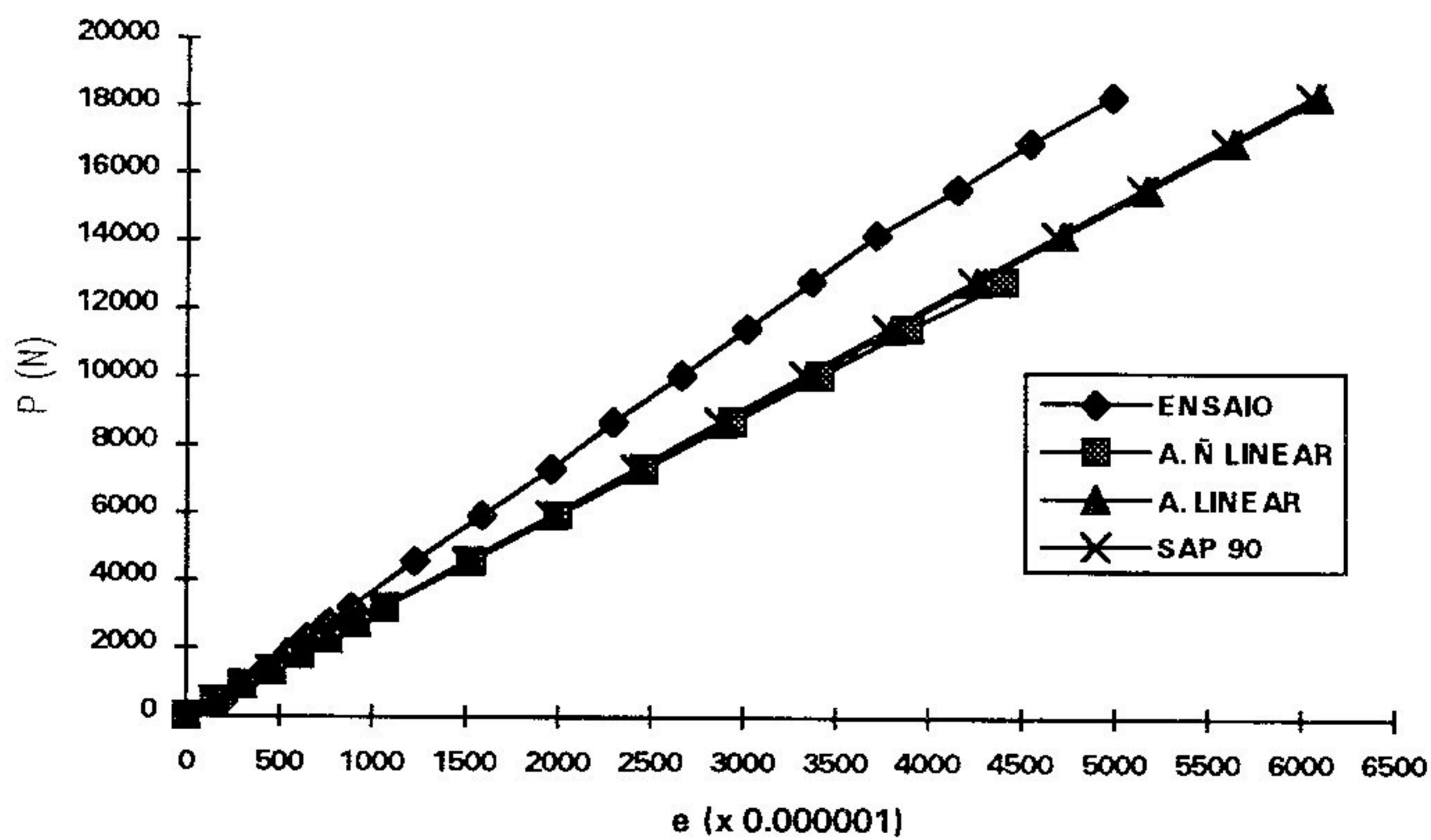


Gráfico 7.20 - Deformações de V02 - Fundo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-118	-68	-68	-67
916	-187	-135	-136	-134
1374	-243	-203	-204	-201
1832	-300	-271	-272	-268
2290	-365	-338	-340	-335
2748	-426	-406	-408	-402
3206	-486	-474	-476	-469
4580	-654	-676	-680	-670
5954	-850	-879	-884	-871
7328	-1019	-1080	-1088	-1072
8702	-1202	-1282	-1292	-1273
10076	-1361	-1482	-1496	-1474
11450	-1522	-1682	-1700	-1675
12824	-1706	-1877	-1904	-1876
14198	-1883	-2072	-2108	-2077
15572	-2045	-2265	-2312	-2278
16946	-2195	-	-2516	-2479
18320	-2322	-	-2720	-2680
19694	-2575	-	-2924	-2881
21068	-2733	-	-3128	-3082
22442	-2930	-	-3332	-3283

Tabela 7.21 - Deformações no Meio no Vão de V03 - Topo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-60	-28	-28	-28
916	-100	-55	-56	-56
1374	-131	-83	-84	-84
1832	-166	-110	-112	-112
2290	-200	-137	-140	-140
2748	-234	-164	-168	-168
3206	-255	-191	-196	-196
4580	-355	-270	-280	-280
5954	-449	-346	-364	-364
7328	-523	-420	-448	-448
8702	-600	-492	-532	-532
10076	-656	-559	-616	-616
11450	-732	-621	-700	-700
12824	-800	-652	-784	-784
14198	-859	-679	-868	-868
15572	-907	-699	-952	-952
16946	-937	-	-1036	-1036
18320	-952	-	-1120	-1120
19694	-1013	-	-1204	-1204
21068	-1013	-	-1288	-1288
22442	-1008	-	-1372	-1372

Tabela 7.22 - Deformações no Meio do Vão de V03 - Fundo da Mesa

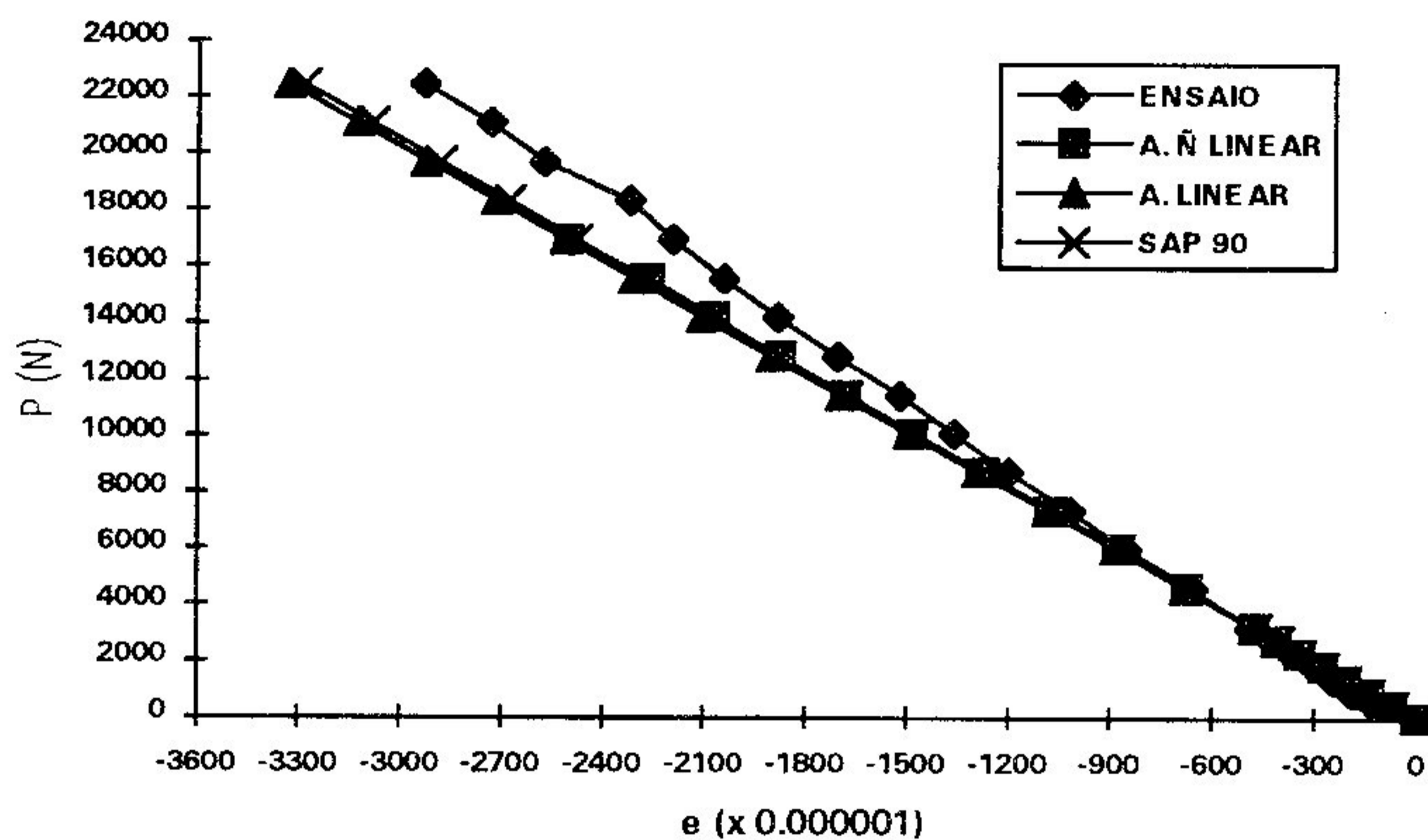


Gráfico 7.21 - Deformações de V03 - Topo da Mesa

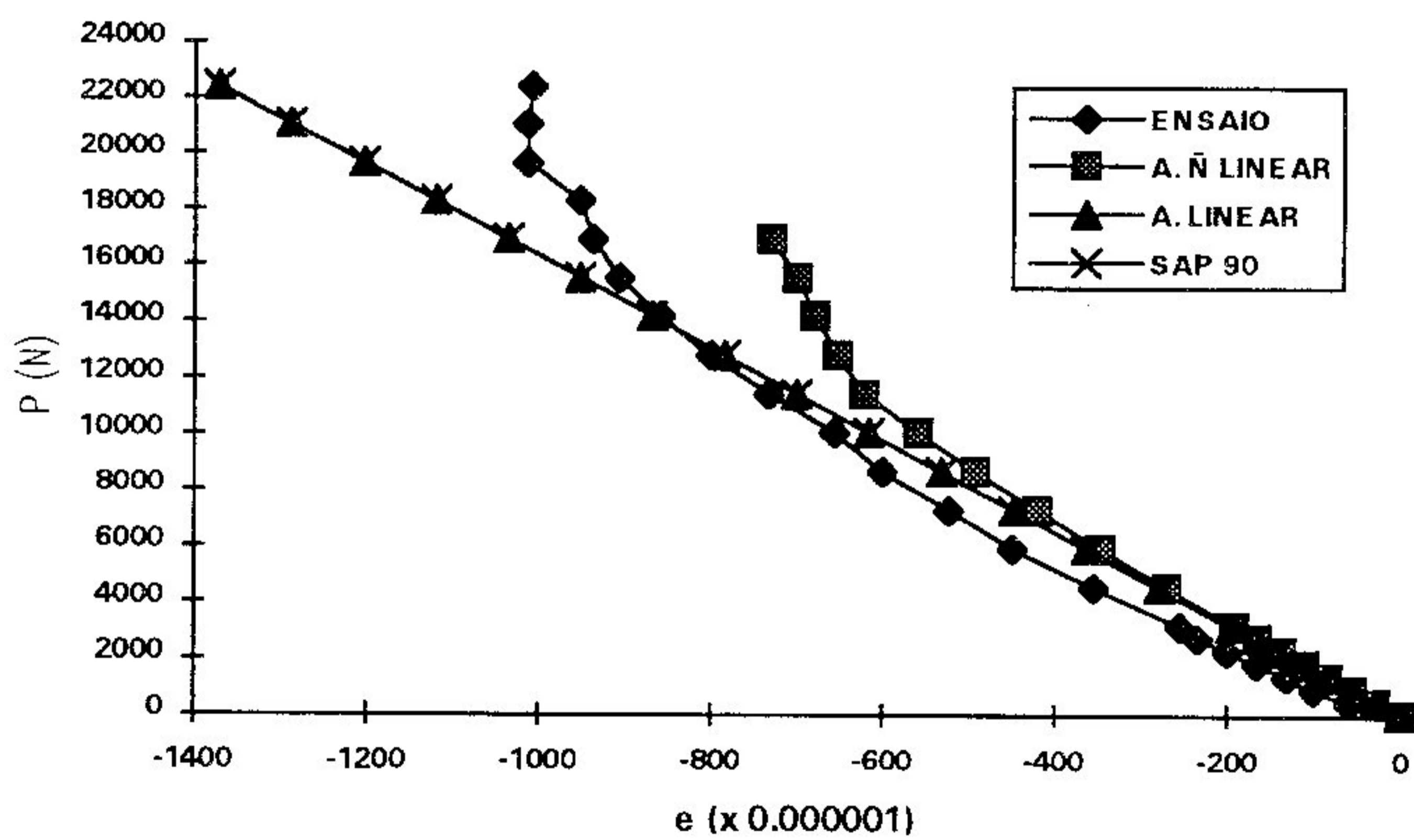


Gráfico 7.22 - Deformações de V03 - Fundo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-60	-46	-46	-45
916	-78	-93	-92	-90
1374	-103	-140	-138	-135
1832	-126	-188	-184	-180
2290	-156	-236	-230	-225
2748	-185	-284	-276	-270
3206	-220	-333	-322	-315
4580	-310	-483	-460	-450
5954	-420	-638	-598	-585
7328	-538	-800	-736	-720
8702	-660	-969	-874	-855
10076	-800	-1149	-1012	-990
11450	-920	-1339	-1150	-1125
12824	-1065	-1612	-1288	-1260
14198	-1218	-1891	-1426	-1395
15572	-1387	-2188	-1564	-1530
16946	-1577	-	-1702	-1665
18320	-1776	-	-1840	-1800
19694	-2019	-	-1978	-1935
21068	-2287	-	-2116	-2070
22442	-2625	-	-2254	-2205

Tabela 7.23 - Deformações no Meio do Vão de V03 - Topo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	182	139	139	138
916	280	279	278	276
1374	370	418	417	414
1832	456	558	556	552
2290	560	698	695	690
2748	650	838	834	828
3206	741	979	973	966
4580	1024	1402	1390	1380
5954	1325	1828	1807	1794
7328	1611	2258	2224	2208
8702	1922	2693	2641	2622
10076	2211	3132	3058	3036
11450	2500	3578	3475	3450
12824	2802	4069	3892	3864
14198	3115	4565	4309	4278
15572	3427	5069	4726	4692
16946	3750	-	5143	5106
18320	4050	-	5560	5520
19694	4470	-	5977	5934
21068	4850	-	6394	6348
22442	5300	-	6811	6762

Tabela 7.24 - Deformações no Meio do Vão de V03 - Fundo da Alma

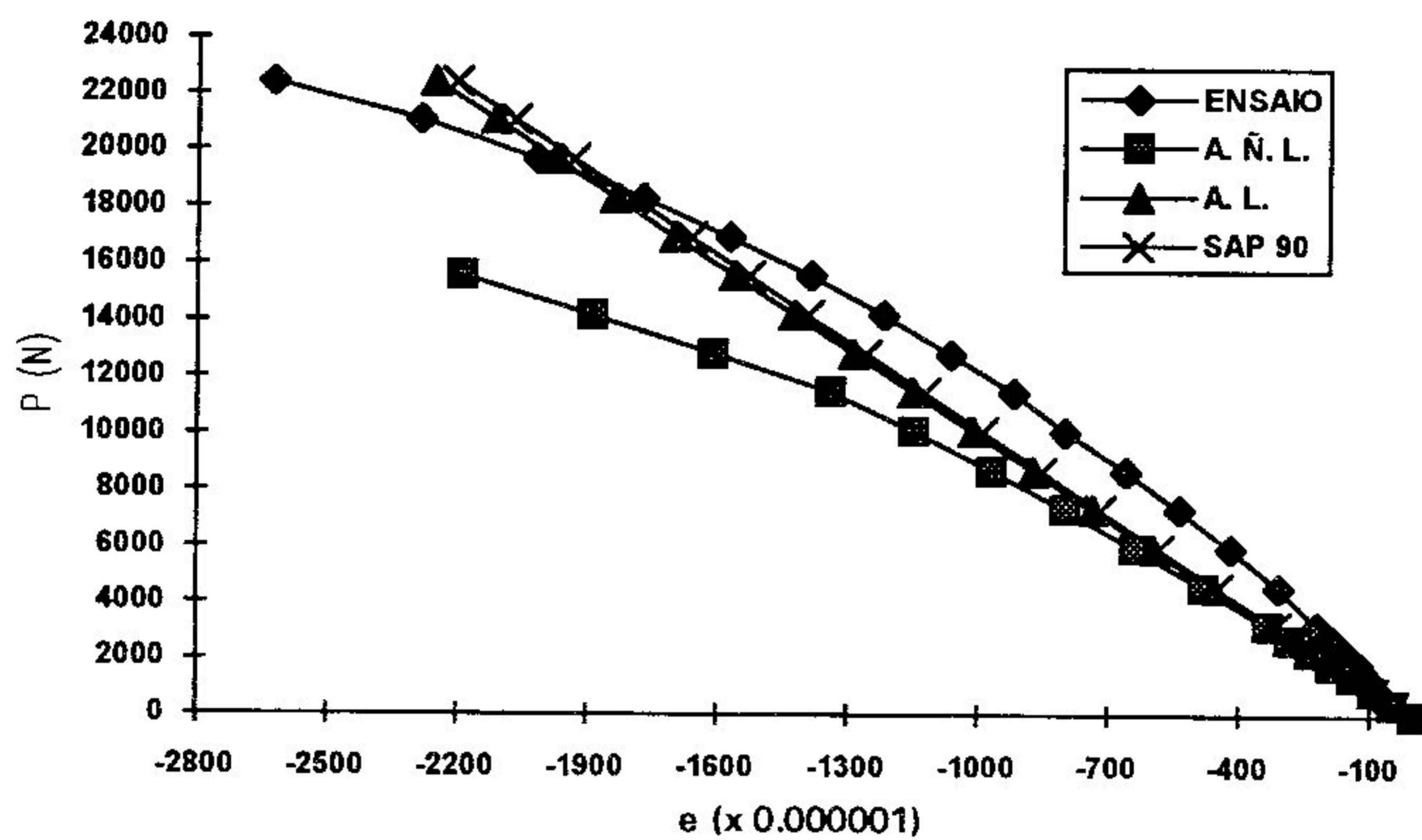


Gráfico 7.23 - Deformações de V03 - Topo da Alma

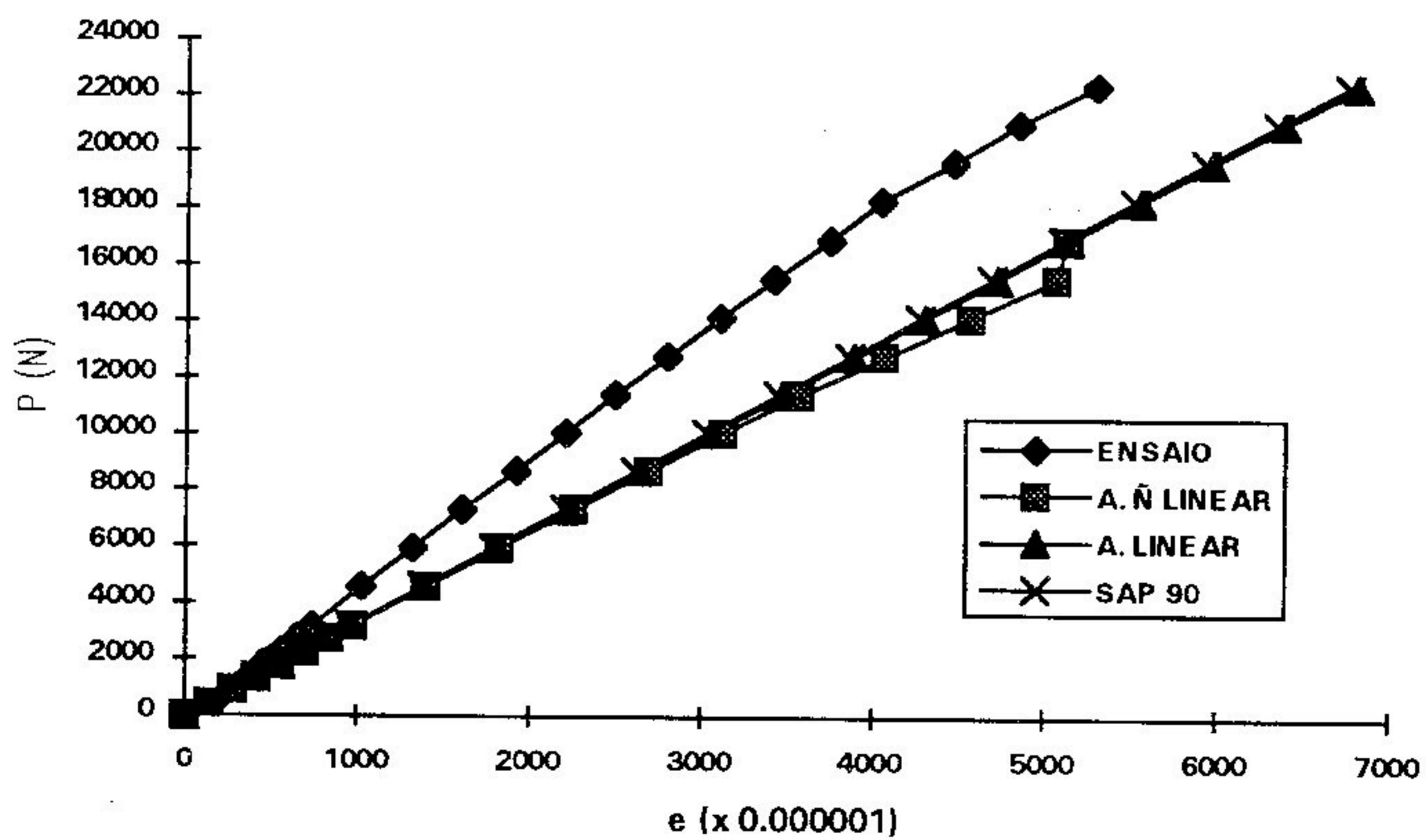


Gráfico 7.24 - Deformações de V03 - Fundo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-130	-86	-86	-86
916	-209	-173	-172	-172
1374	-295	-259	-258	-258
1832	-334	-345	-344	-344
2290	-420	-431	-430	-430
2748	-494	-517	-516	-516
3206	-568	-603	-602	-602
4580	-795	-861	-860	-860
5954	-1035	-1118	-1118	-1118
7328	-1251	-1374	-1376	-1376
8702	-1472	-1629	-1634	-1634
10076	-1690	-1885	-1892	-1892
11450	-1907	-2136	-2150	-2150
12824	-2117	-2386	-2408	-2408
14198	-2348	-2610	-2666	-2666

Tabela 7.25 - Deformações no Meio do Vão de V04 - Topo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-48	-42	-42	-42
916	-79	-84	-84	-84
1374	-115	-125	-126	-126
1832	-132	-167	-168	-168
2290	-149	-208	-210	-210
2748	-185	-249	-252	-252
3206	-219	-290	-294	-294
4580	-317	-412	-420	-420
5954	-405	-531	-546	-546
7328	-487	-649	-672	-672
8702	-567	-763	-798	-798
10076	-643	-872	-924	-924
11450	-715	-980	-1050	-1050
12824	-782	-1081	-1176	-1176
14198	-854	-1114	-1302	-1302

Tabela 7.26 - Deformações no Meio do Vão de V04 - Fundo da Mesa

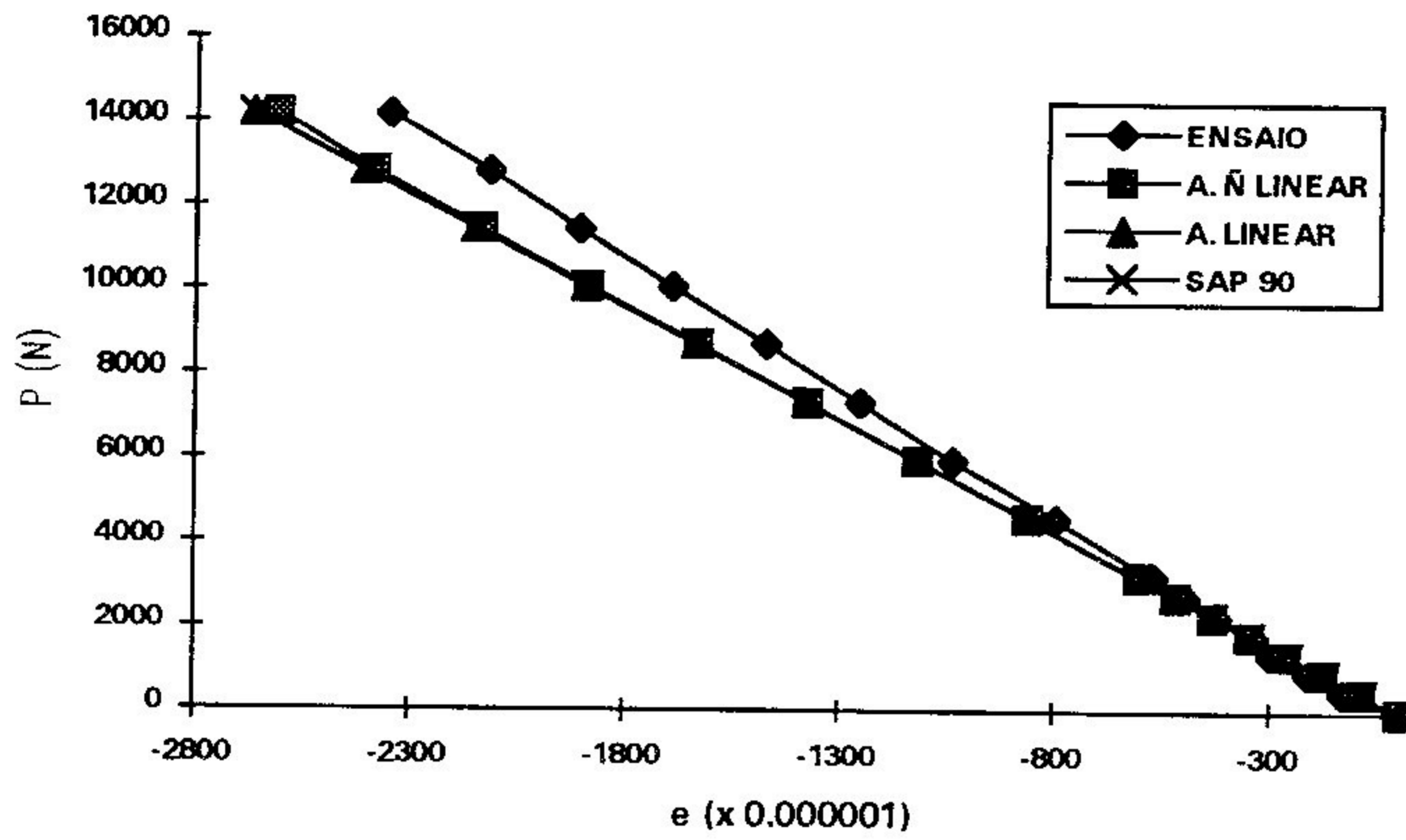


Gráfico 7.25 - Deformações de V04 - Topo da Mesa

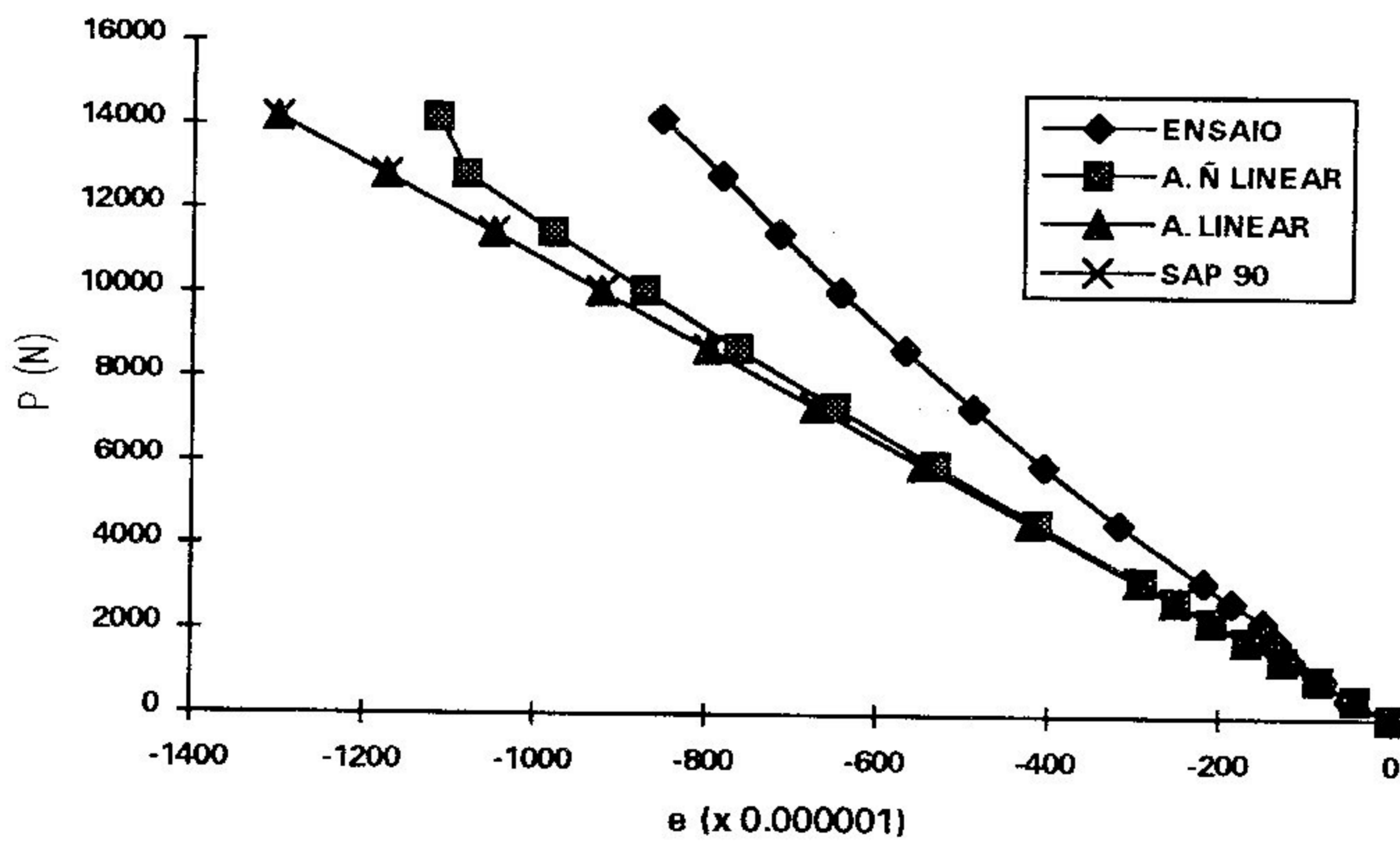


Gráfico 7.26 - Deformações de V04 - Fundo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-55	-59	-60	-58
916	-89	-118	-120	-116
1374	-132	-178	-180	-174
1832	-137	-238	-240	-232
2290	-186	-298	-300	-290
2748	-230	-359	-360	-348
3206	-272	-420	-420	-406
4580	-420	-605	-600	-580
5954	-589	-794	-780	-754
7328	-749	-988	-960	-928
8702	-914	-1188	-1140	-1102
10076	-1095	-1403	-1320	-1276
11450	-1287	-1610	-1500	-1450
12824	-1487	-1836	-1680	-1624
14198	-1718	-2185	-1860	-1798

Tabela 7.27 - Deformações no Meio do Vão de V04 - Topo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	190	142	143	141
916	319	285	286	282
1374	335	428	429	423
1832	557	571	572	564
2290	661	714	715	705
2748	773	858	858	846
3206	882	1001	1001	987
4580	1209	1434	1430	1410
5954	1562	1868	1859	1833
7328	1881	2305	2288	2256
8702	2215	2745	2717	2679
10076	2555	3199	3146	3102
11450	2883	3638	3575	3525
12824	3208	4093	4004	3949
14198	3546	4609	4433	4371

Tabela 7.28 - Deformações no Meio do Vão de V04 - Fundo da Alma

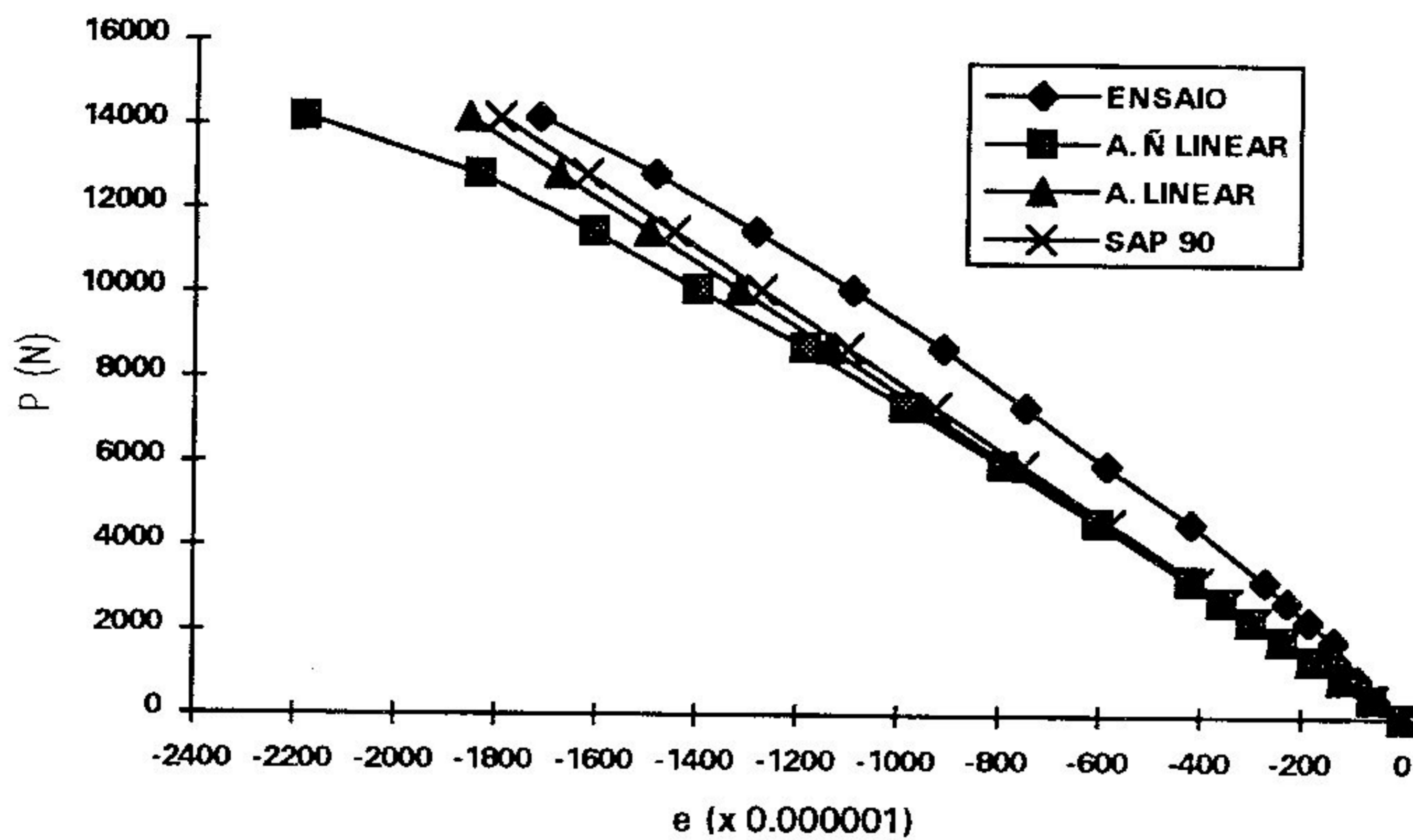


Gráfico 7.27 - Deformações de V04 - Topo da Alma

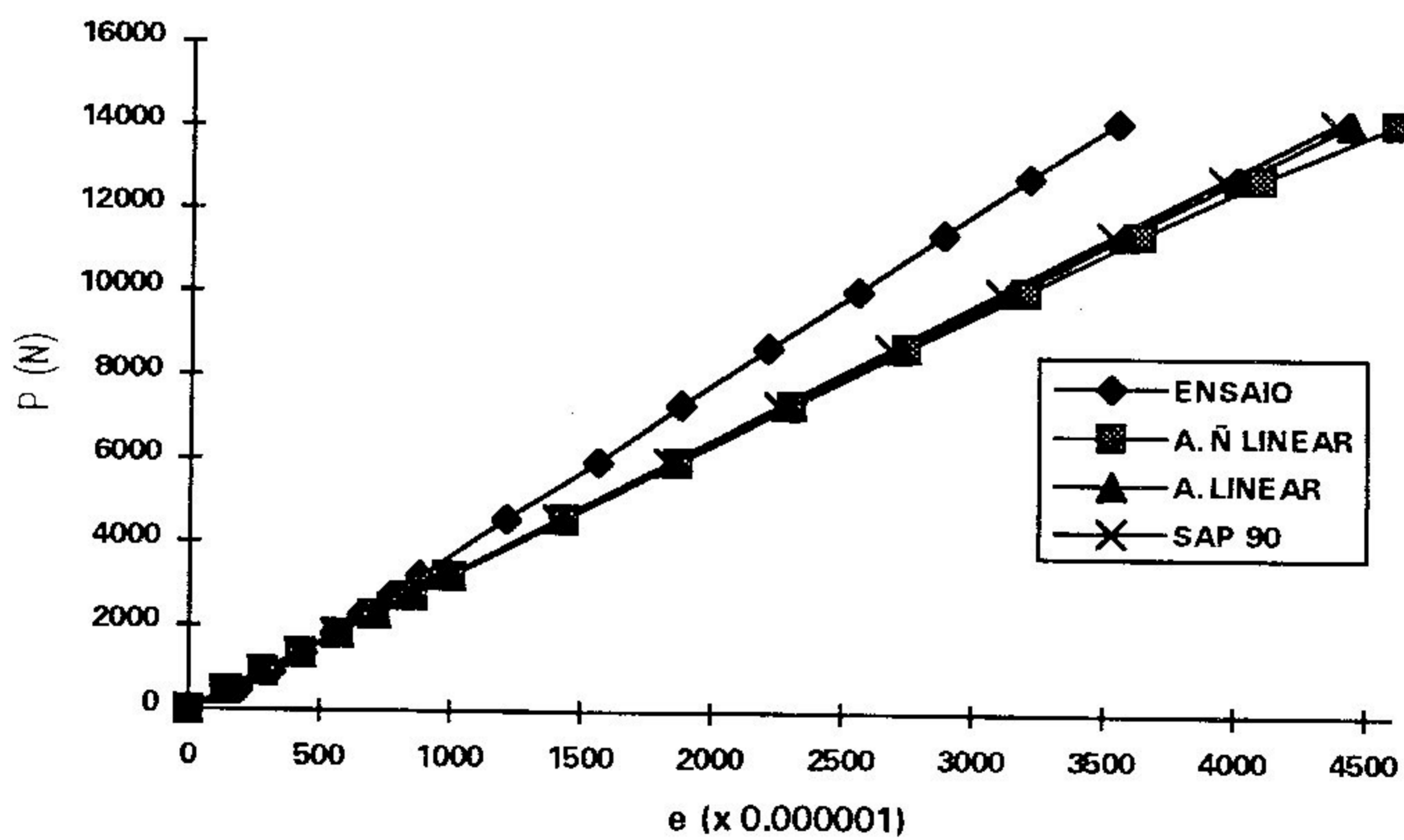


Gráfico 7.28 - Deformações de V04 - Fundo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-78	-62	-62	-62
916	-128	-123	-124	-124
1374	-191	-185	-186	-186
1832	-239	-247	-248	-248
2290	-285	-308	-310	-310
2748	-348	-370	-372	-372
3206	-402	-431	-434	-434
4580	-593	-616	-620	-620
5954	-761	-800	-806	-806
7328	-930	-984	-992	-992
8702	-1081	-1167	-1178	-1178
10076	-1258	-1349	-1364	-1364
11450	-1424	-1531	-1550	-1550
12824	-1584	-1712	-1736	-1736
14198	-1728	-	-1922	-1922
15572	-1902	-	-2108	-2108

Tabela 7.29 - Deformações no Meio do Vão de V05 - Topo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-47	-26	-26	-26
916	-72	-51	-52	-52
1374	-112	-76	-78	-78
1832	-131	-102	-104	-104
2290	-155	-127	-130	-130
2748	-189	-152	-156	-156
3206	-219	-176	-182	-182
4580	-327	-249	-260	-260
5954	-409	-320	-338	-338
7328	-492	-389	-416	-416
8702	-556	-454	-494	-494
10076	-638	-516	-572	-572
11450	-712	-574	-650	-650
12824	-771	-628	-728	-728
14198	-817		-806	-806
15572	-874		-884	-884

Tabela 7.30 - Deformações no Meio do Vão de V05 - Fundo da Mesa

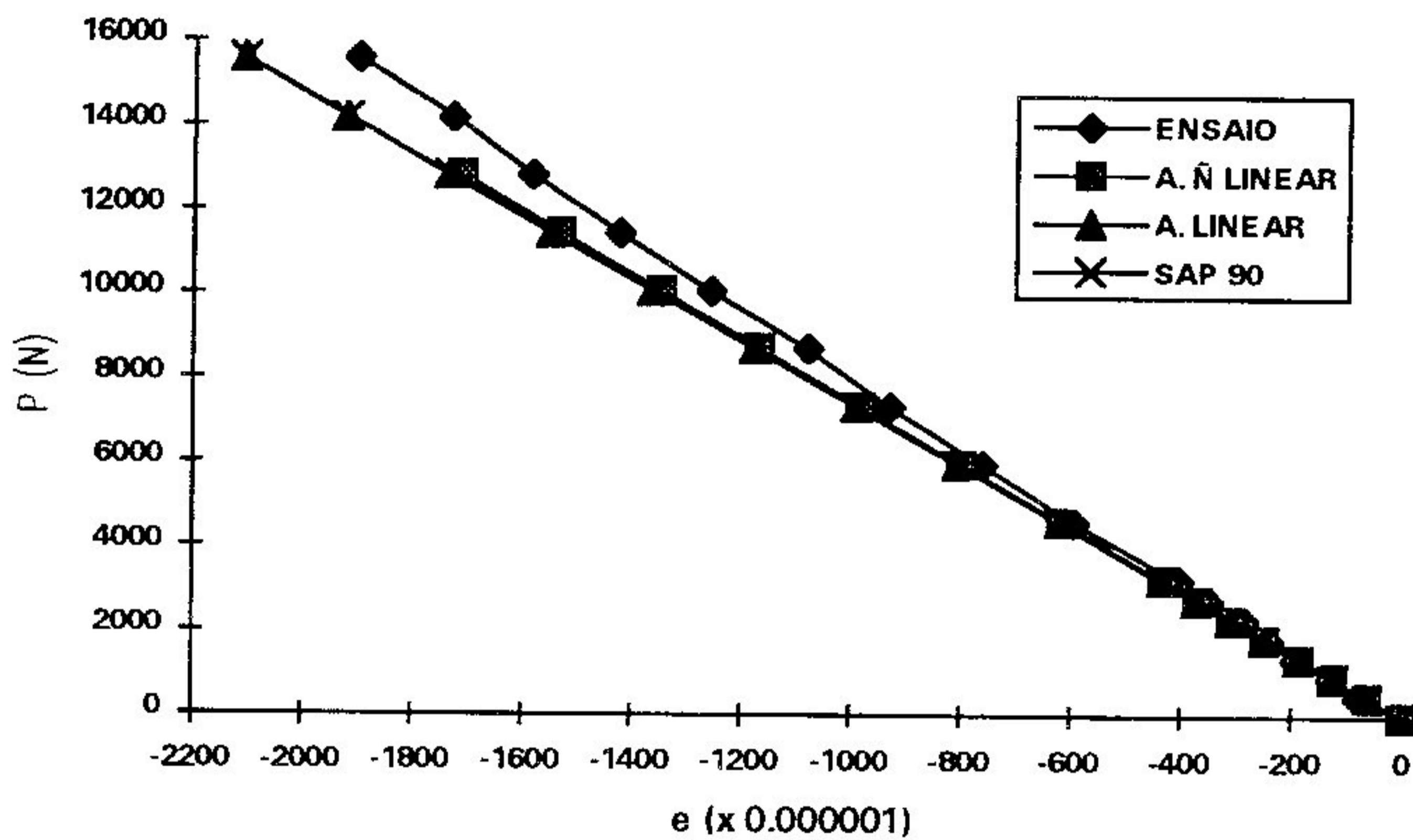


Gráfico 7.29 - Deformações de V05 - Topo da Mesa

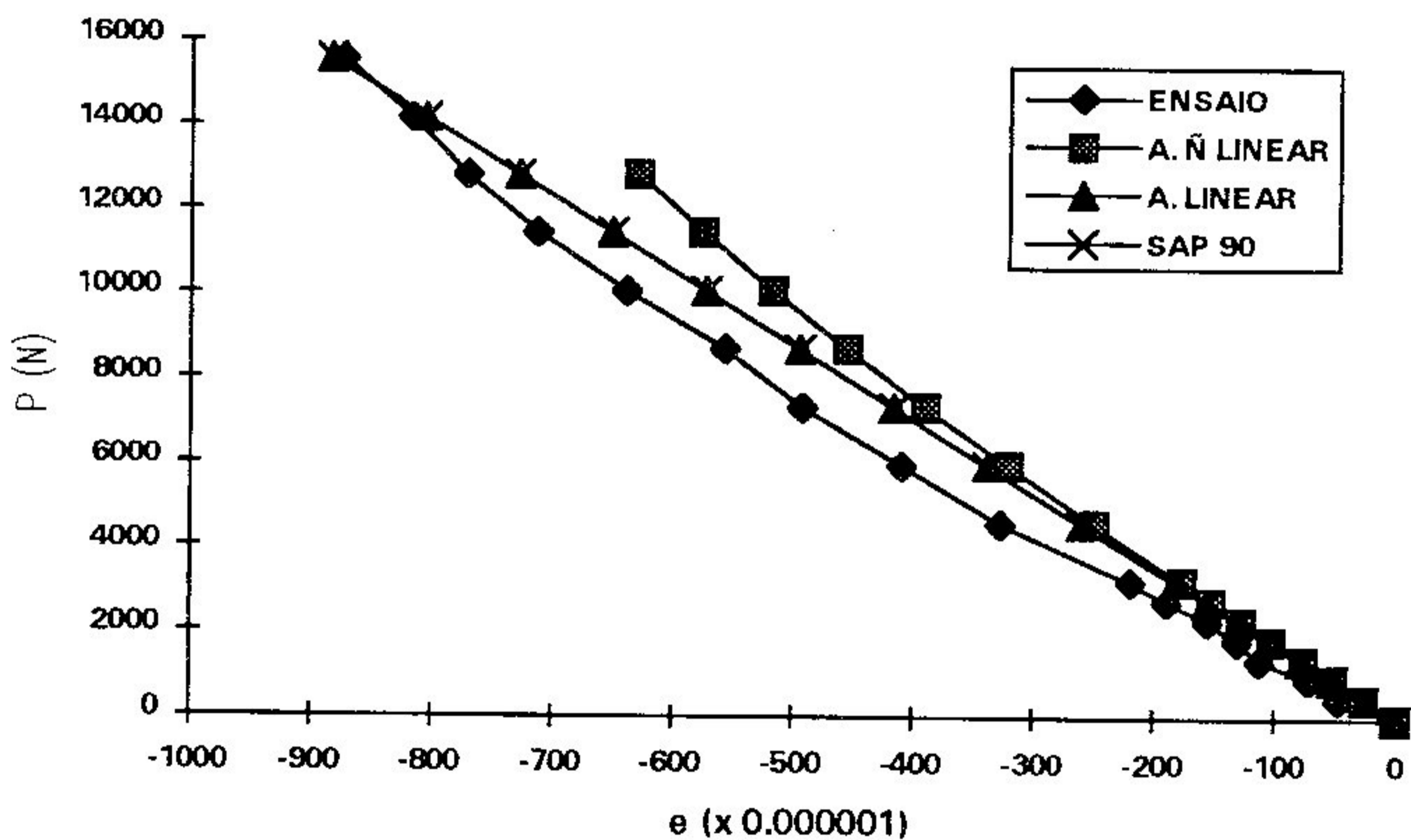


Gráfico 7.30 - Deformações de V05 - Fundo da Mesa

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-20	-43	-43	-43
916	-34	-87	-86	-86
1374	-66	-131	-129	-129
1832	-79	-175	-172	-172
2290	-102	-219	-215	-215
2748	-124	-264	-258	-258
3206	-151	-310	-301	-301
4580	-261	-448	-430	-430
5954	-370	-592	-559	-559
7328	-490	-741	-688	-688
8702	-608	-898	-817	-817
10076	-758	-1062	-946	-946
11450	-916	-1236	-1075	-1075
12824	-1060	-1421	-1204	-1204
14198	-1235	-	-1333	-1333
15572	-1424	-	-1462	-1462

Tabela 7.31 - Deformações de V05 - Topo da Alma

Pi	ENSAIO	A. Ñ. L.	A. L.	SAP90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	122	121	121	122
916	224	242	242	244
1374	316	363	363	366
1832	410	485	484	488
2290	513	607	605	610
2748	627	729	726	732
3206	691	851	847	854
4580	945	1219	1210	1220
5954	1231	1589	1573	1586
7328	1507	1963	1936	1952
8702	1781	2341	2299	2318
10076	2055	2723	2662	2684
11450	2324	3111	3025	3050
12824	2625	3504	3388	3416
14198	2907	-	3751	3782
15572	3212	-	4114	4148

Tabela 7.32 - Deformações no Meio do Vão de V05 - Fundo da Alma

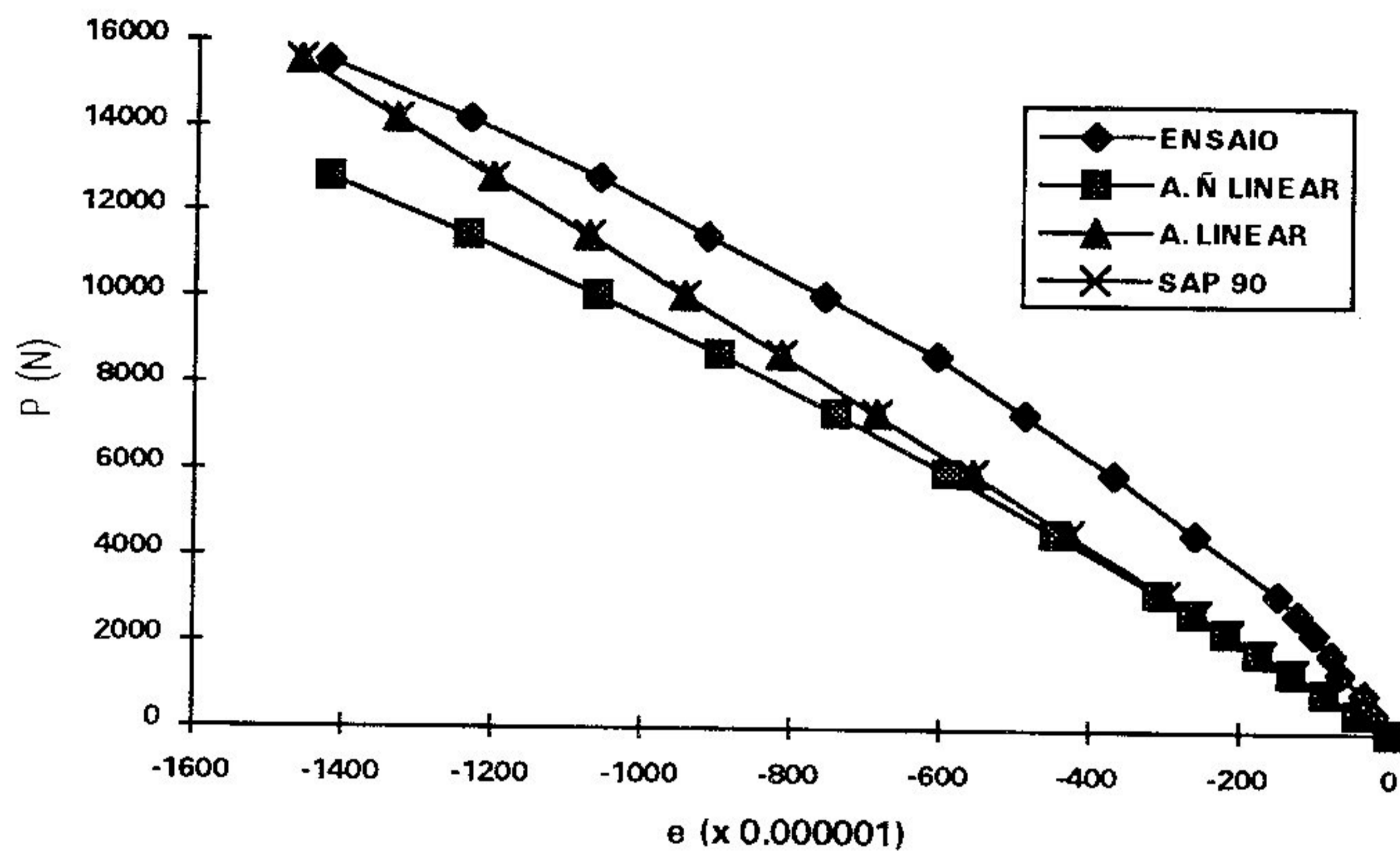


Gráfico 7.31 - Deformações de V05 - Topo da Alma

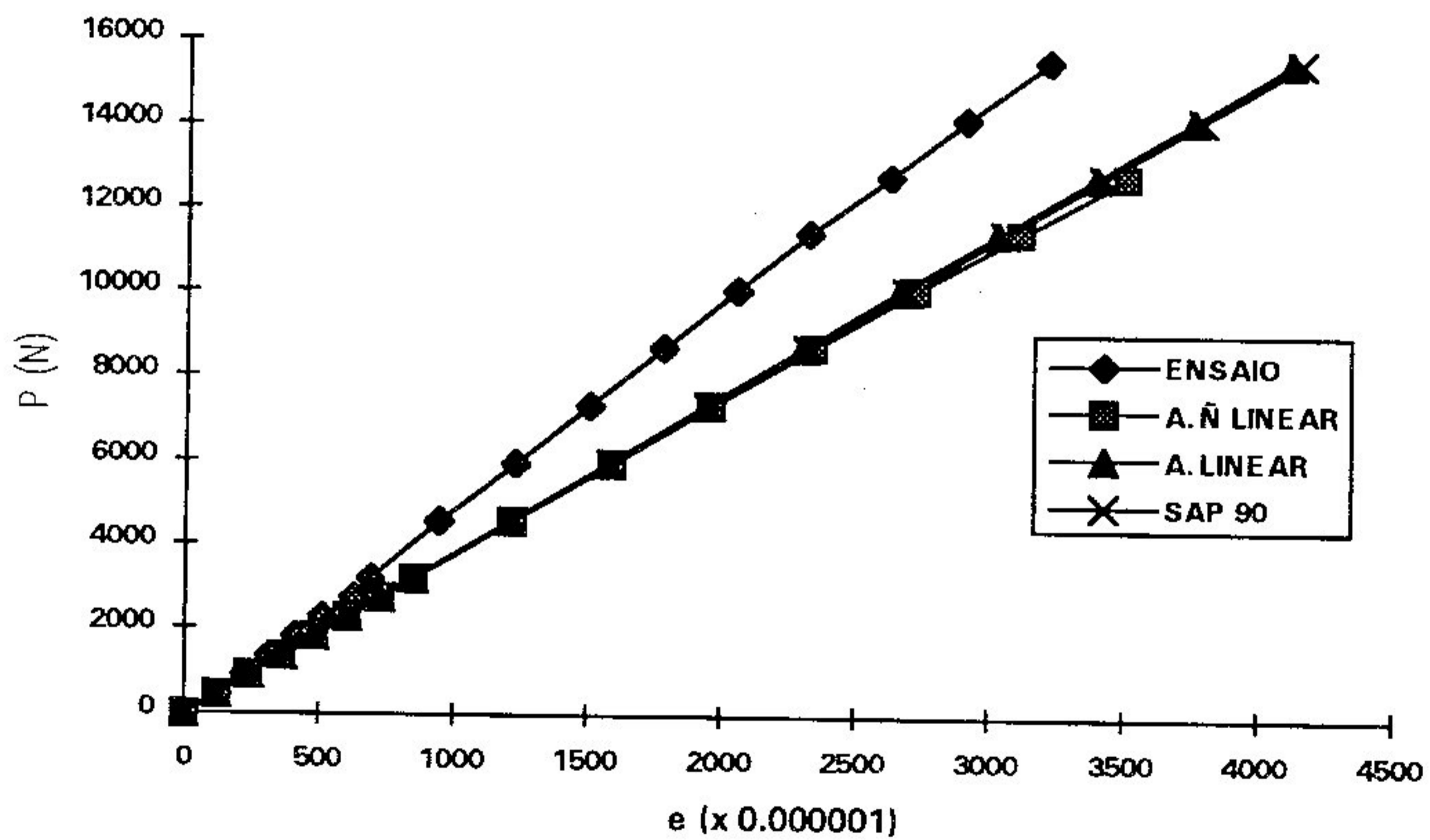


Gráfico 7.32 - Deformações de V05 - Fundo da Alma

P _i	ENSAIO	A. Ñ L.	A. L.	SAP 90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-89	-60	-60	-59
916	-140	-119	-120	-118
1374	-198	-179	-180	-177
1832	-256	-238	-240	-236
2290	-315	-298	-300	-295
2748	-365	-357	-360	-354
3206	-417	-417	-420	-413
4580	-592	-594	-600	-590
5954	-740	-772	-780	-767
7328	-894	-948	-960	-944
8702	-1056	-1124	-1140	-1121
10076	-1212	-1299	-1320	-1298
11450	-1369	-1473	-1500	-1475
12824	-1522	-1646	-1680	-1652
14198	-1675	-	-1860	-1829
15572	-1834	-	-2040	-2006
16946	-1981	-	-2220	-2183
18320	-2118	-	-2400	-2360
19694	-2256	-	-2580	-2537
21068	-2467	-	-2760	-2714
22442	-2565	-	-2940	-2891
23816	-2684	-	-3120	-3068

Tabela 7.33 - Deformações no Meio do Vão de V06 - Topo da Mesa

P _i	ENSAIO	A. Ñ L.	A. L.	SAP 90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-44	-26	-26	-27
916	-63	-53	-52	-54
1374	-94	-79	-78	-81
1832	-125	-105	-104	-108
2290	-155	-130	-130	-135
2748	-179	-156	-156	-162
3206	-208	-181	-182	-189
4580	-287	-256	-260	-270
5954	-358	-329	-338	-351
7328	-428	-400	-416	-432
8702	-496	-468	-494	-513
10076	-561	-532	-572	-594
11450	-620	-592	-650	-675
12824	-679	-647	-728	-756
14198	-730	-	-806	-837
15572	-779	-	-884	-918
16946	-809	-	-962	-999
18320	-818	-	-1040	-1080
19694	-828	-	-1118	-1161
21068	-887	-	-1196	-1242
22442	-861	-	-1274	-1323
23816	-844	-	-1352	-1404

Tabela 7.34 - Deformações no Meio do Vão de V06 - Fundo da Mesa

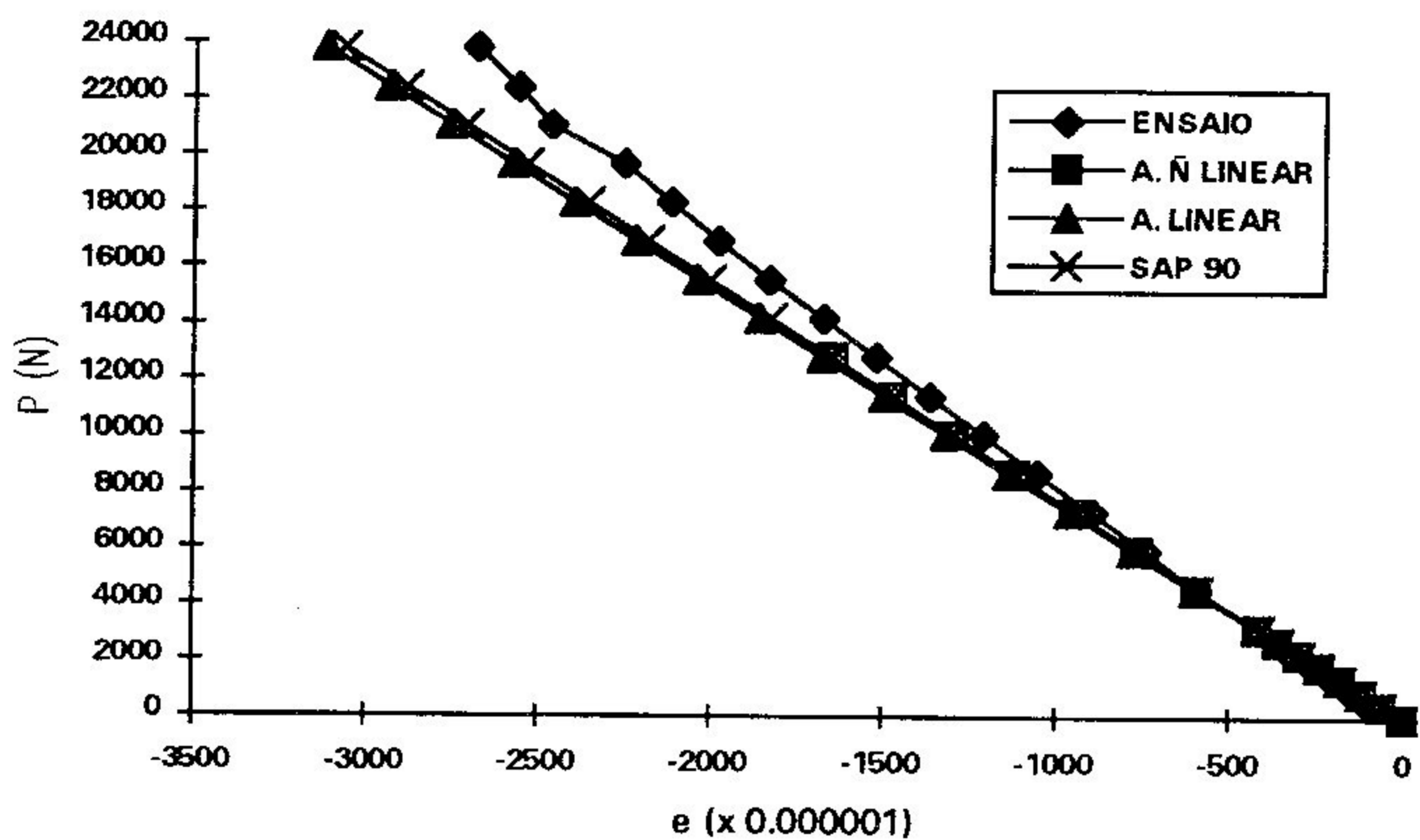


Gráfico 7.33 - Deformações de V06 - Topo da Mesa

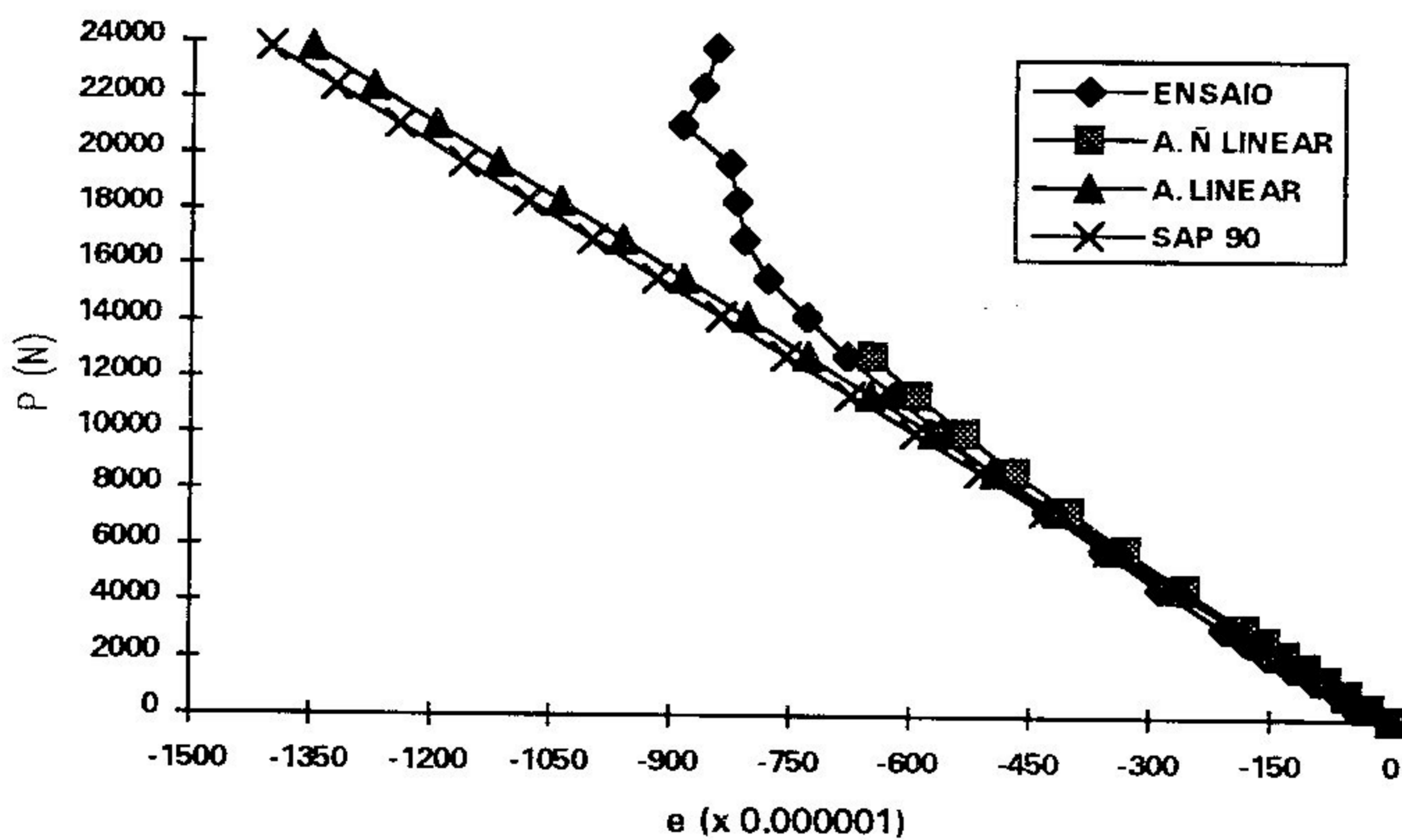


Gráfico 7.34 - Deformações de V06 - Fundo da Mesa

P _i	ENSAIO	A. Ñ L.	A. L.	SAP 90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	-35	-45	-45	-44
916	-50	-91	-90	-88
1374	-73	-136	-135	-132
1832	-101	-183	-180	-176
2290	-138	-229	-225	-220
2748	-166	-276	-270	-264
3206	-200	-323	-315	-308
4580	-286	-468	-450	-440
5954	-381	-618	-585	-572
7328	-473	-773	-720	-704
8702	-578	-935	-855	-836
10076	-692	-1105	-990	-968
11450	-819	-1285	-1125	-1100
12824	-943	-1475	-1260	-1232
14198	-1077	-	-1395	-1364
15572	-1234	-	-1530	-1496
16946	-1422	-	-1665	-1628
18320	-1656	-	-1800	-1760
19694	-1889	-	-1935	-1892
21068	-2118	-	-2070	-2024
22442	-2363	-	-2205	-2156
23816	-2609	-	-2340	-2288

Tabela 7.35 - Deformações no Meio do Vão de V06 - Topo da Alma

P _i	ENSAIO	A. Ñ L.	A. L.	SAP 90
(N)	(x 10 ⁻⁶)			
458	143	116	116	115
916	257	233	232	230
1374	359	349	348	345
1832	457	466	464	460
2290	545	583	580	575
2748	640	700	696	690
3206	722	817	812	805
4580	999	1171	1160	1150
5954	1288	1527	1508	1495
7328	1554	1886	1856	1840
8702	1852	2250	2204	2185
10076	2141	2617	2552	2530
11450	2441	2990	2900	2875
12824	2740	3368	3248	3220
14198	3040	-	3596	3565
15572	3359	-	3944	3910
16946	3718	-	4292	4255
18320	4058	-	4640	4600
19694	4398	-	4988	4945
21068	4858	-	5336	5290
22442	5255	-	5684	5635
23816	5590	-	6032	5980

Tabela 7.36 - Deformações no Meio do Vão de V06 - Fundo da Alma

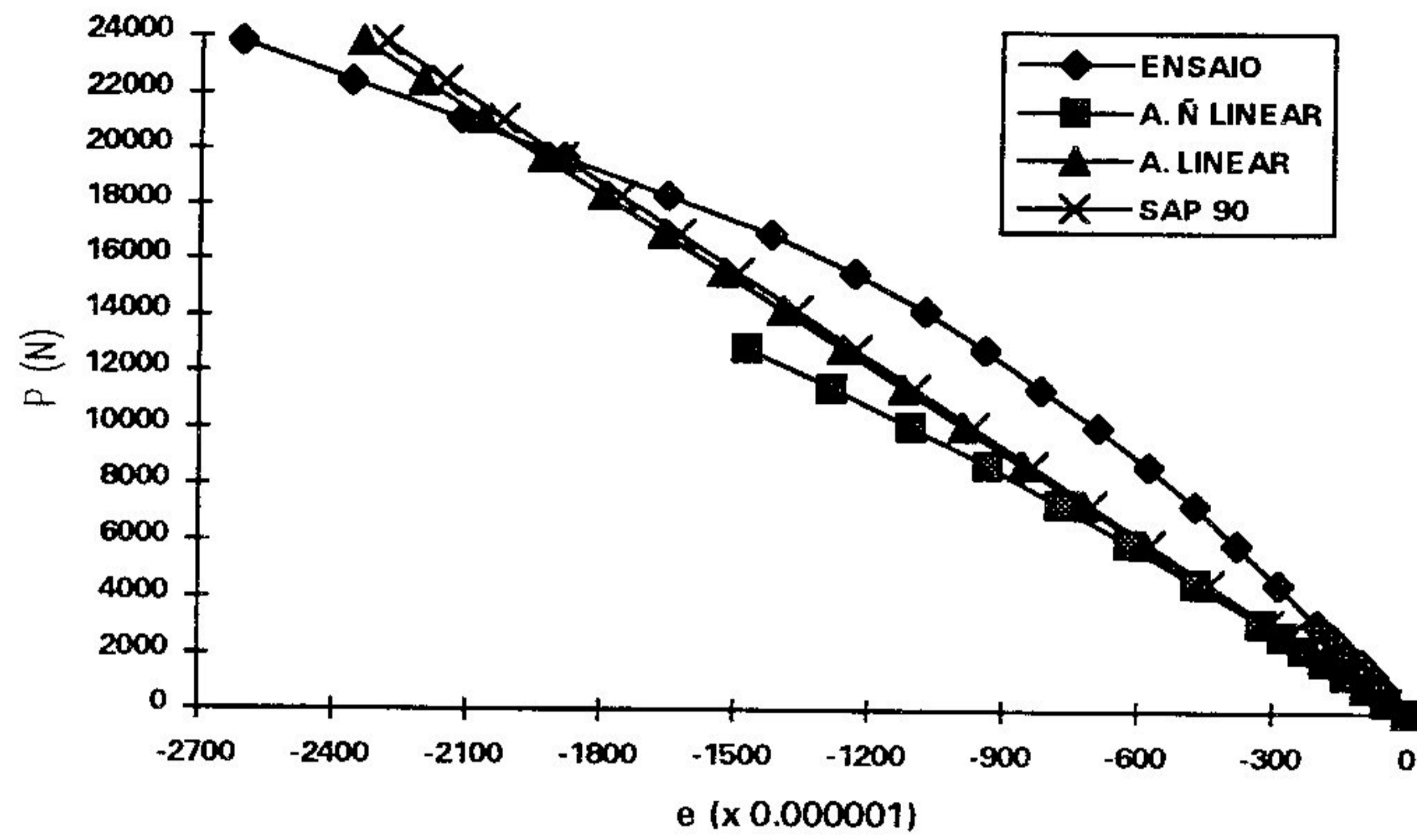


Gráfico 7.35 - Deformações de V06 - Topo da Alma

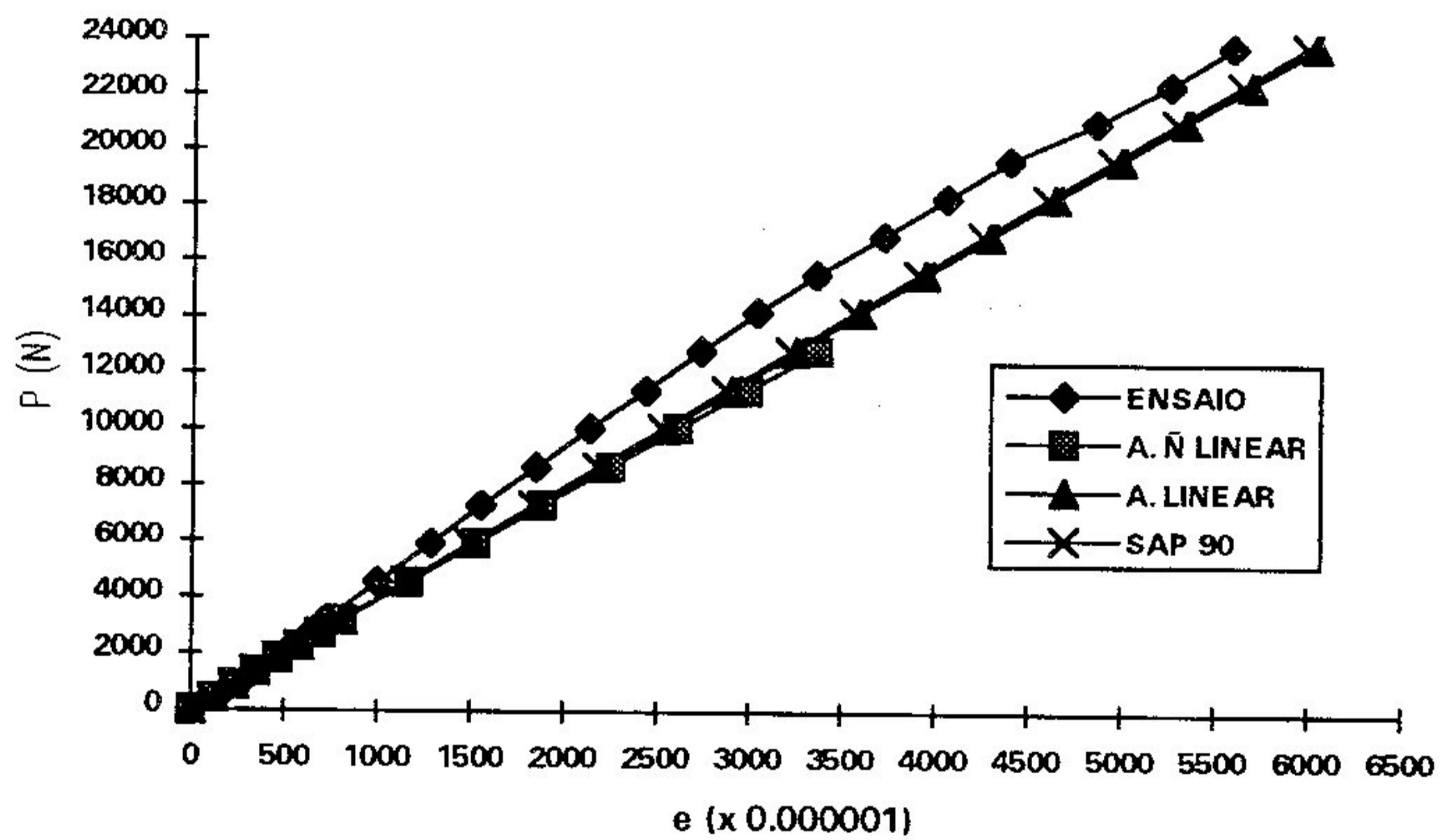


Gráfico 7.36 - Deformações de V06 - Fundo da Alma

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica, na experimentação realizada, nas aproximações alcançadas e na apresentação global dos resultados, estão resumidas, a seguir, as conclusões finais do trabalho:

- 1 - Devido à linearidade das curvas carga-deslocamento vertical obtidas nos três ensaios para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal das peças isoladas, os valores encontrados tornam-se válidos.
- 2 - Nos ensaios das ligações para a determinação dos parâmetros de Foschi, tornou-se extremamente difícil o registro com grande precisão dos escorregamentos finais devido à falta de equipamentos computadorizados, o que não invalidam os resultados obtidos.
- 3 - A eficiência das ligações, ou seja, a razão da rigidez real $(EI)_r$ pela rigidez teórica $(EI)_t$ atingiu valores superiores a 80%, alcançando 88% para as vigas V02 e V03. A mesma ordem de grandeza foi atingida no trabalho "Vigas de seção composta T, tendo o parafuso como elemento de solidarização" de Maria Estânia Mendonça Passos. Vale ressaltar que os valores obtidos pela engenheira referem-se a espécies de madeiras distintas das estudadas neste trabalho.
- 4 - Apreciando-se as curvas carga-deslocamento do capítulo 5, pode-se constatar uma grande linearidade dos deslocamentos verticais ao longo do carregamento. O mesmo não ocorre aos escorregamentos que visivelmente apresentam um comportamento não-linear.
- 5 - Os diagramas de deformações ao longo da seção transversal das vigas, na fase elástica de solicitação, apresentam uma boa continuidade aproximando-se de

uma viga maciça. À medida que o carregamento é aumentado, constata-se cada vez mais, a descontinuidade deste diagrama entre o fundo das mesas e o topo das almas.

- 6 - Todos os valores experimentais de deslocamentos e deformações próximos às cargas de ruptura foram de difícil obtenção devido à falta de equipamentos computadorizados no laboratório.
- 7 - A análise linear do software SAP90 ficou muito próxima da análise linear do software BEAM (A.L.), tanto para os deslocamentos quanto para as deformações.
- 8 - Para os deslocamentos verticais, todas as análises realizadas ficaram bem próximas dos valores obtidos nos ensaios. Com o aumento do carregamento, A.Ñ.L. apresenta valores maiores que as demais aproximações, inclusive maiores que os valores experimentais.
- 9 - Para os escorregamentos relativos, inicialmente, todas as análises registraram valores bem superiores aos dos ensaios. Aumentando-se o carregamento, os valores convergiam para um determinado ponto intermediário e voltavam a se dispersar. Fica evidente que a A.Ñ.L. atingiu valores mais próximos dos experimentais para as cargas finais.
- 10 - Para as primeiras cargas, as deformações registradas nas diversas análises se aproximam bastante dos valores experimentais. À medida que o carregamento se eleva, ocorre o seguinte:
 - 10.1 - Para o topo das mesas, as análises aproximadas continuam muito próximas, adquirindo valores cada vez mais superiores aos dos ensaios.
 - 10.2 - Para o fundo das mesas, a A.Ñ.L. acompanha melhor os valores experimentais.
 - 10.3 - Para o topo das almas, as análises lineares acompanham melhor os valores experimentais.

- 10.4 - Para o fundo das almas, todas as soluções aproximadas registram valores bem superiores aos dos ensaios, porém próximos entre si.
- 11 - À medida que o carregamento era aumentado durante a realização dos ensaios, a posição da linha neutra da seção composta se posicionava, cada vez mais, abaixo do centro de gravidade da seção conforme mostrado nas tabelas do capítulo 5.
- 12 - É importante resaltar que os modelos de análise linear utilizados só possuem validade para as condições de contorno especificadas neste trabalho.
- 13 - Com relação à revisão bibliográfica, fica justificado a realização deste trabalho por fornecer mais informações frente à grande variedade de espécie de madeiras nativas existentes na região Amazônica. (superior a 3000 espécies).
- 14 - Finalmente, é interessante observar que em todas as comparações, as análises aproximadas registraram valores superiores aos medidos em laboratório com exceção dos escorregamentos relativos lineares. Portanto, a utilização de um dos dois programas computacionais apresentados, conduzirá a valores de deslocamento vertical e de deformações a favor da segurança, podendo ser recomendado para fins de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - KOLLMANN, F. F. L. & CÔTÉ, W. A. - Principles of Wood Science and Technology. Germany, Springer-Verlag, 1968. cap. 7, p.222.
- [02] - KOLLMANN, F. F. L. & CÔTÉ, W. A. - Principles of Wood Science and Technology. Germany, Springer-Verlag, 1968. cap. 7, p.363.
- [03] - KOLLMANN, F. F. L. & CÔTÉ, W. A. - Principles of Wood Science and Technology. Germany, Springer-Verlag, 1968. cap. 7, p.364.
- [04] - HANSEN, H. J. - Design of Plywood I-Beams, ASCE, 1946, paper n.2317, p.955-969.
- [05] - RAMOS, A. N. - A Preliminary Study of the Feasibility of Plastic Concept of design in Wood Structures. Doctoral Thesis in Civil Engineering, University of Wisconsin, 1961.
- [06] - DOYLE, D. V. - Performance of Nail Glued Joints of Plywood to Solid Wood, USDA-FS-FPL Madison, Wis., FPL-042, 1964, 28p.
- [07] - GOODMAN, J. R. & POPOV. E. P. Layered Beam Systems with Interlayer Slip ASCE Structural Division Journal, vol. 94, n.11, 1968. p 2535-2547
- [08] - KUENZI, E. W, & WILKINSON, T. L. - Composite Beams-Effect of Adhesive or Fastener Rigidity, USDA-FS-FPL Madison, Wis.,FPL-152, 1971. 22p.
- [09] - RAMAKER, T. J. & DAVISTER, M. D.. Predicting Performance of Hardboard in I-beams USDA-FS-FPL Madison, Wis., FPL-185, 1972. 12p.
- [10] - ZAKIC, B. D. - Inelastic Bending of Wood Beams. Journal of the Structural Division, ASTM, 99 (10), 1973. p.2079-2095.

- [11] - HELLMEISTER, J. C. - Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1973. p.89 (Tese Doutor-Engenheiro).
- [12] - TOMPSON, E. G. GOODMAN, J. R. AND VANDERBILT, M. D.. "Finite Element Analysis of Layered Wood Systems", Journal of the Structural Division, ASCE, vol 101, 1975. p 2659-2672.
- [13] - WAGNER MUNOZ, M.. El Fundamento de las Especificaciones de La Norma Alemana DIN 1052 Relativas Al Diseno de Piezas Estructurales de Madera de Seccion Transversal Compuesta Solicitadas a Flexion y a Compression. Informe n. 45, Chile, 1970, 111p.
- [14] - ZAKIC, B. D. - Shearing Stress in Plastic Bending of Wood Beams. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1983. p.1042-1060.
- [15] - KAMIYA, F. - Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams Wood and Fiber Science 17(1), 1983. p 117-131.
- [16] - KAMIYA, F. - Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part II. Nailed Stressed-Skin Components, 1983. p 170-183.
- [17] - LARA PINTO, M. -Flexão em Peças de Madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983. 126p. Dissertação (Mestre Engenharia de Estruturas).
- [18] - LEICHTI, R. J. & TANG, R. C. Comparative Performance of Long-Term Loaded Wood Composite I-Beams and Sawn Lumber Wood and Fiber Science 21(2), Oregon, 1989. p.142-154.
- [19] - LEICHTI, R. J., FALK, R. H. & LAUFENBERG, T. L.. Prefabricated Wood Composite I-Beams, A Literature Review USDA-FS-FPL Wood and Fiber Science 22(1), 1990. p. 62-79.

- [20] - CHAHUD, E. - Módulo de Elasticidade Longitudinal e Proposta para o Cálculo de Peças Fletidas. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1989. 148p. Dissertação (Doutor-Engenharia de Estruturas).
- [21] - PARRA, J. C. - Introdução ao Estudo do Comportamento de Peças de Seção Composta de Madeira, na Flexão, Solidarizadas por Pregos. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1989. 36p.
- [22] - CALIXTO, J. M. F. A Geometrically Nonlinear One Dimensional Element for Analyzing Layered Systems with Interlayer Slip. Dissertation presented to the University of Texas at Austin, Texas, 1991, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. 240p.
- [23] - MENDONÇA PASSOS, M. E. - Vigas de Seção Composta T, tendo o Parafuso como Elemento de Solidarização, 1992. 126p. Dissertação (Mestre Engenharia de Estruturas).
- [24] - LUCHESE, J. A. e STAMATO, M. C. Ligações de Peças de Peroba Rosa com Parafusos de Aço. São Carlos, Publicação n.147, 1967, 42 p.
- [25] - MORRIS, E. N..Application of the Slip Modulus in the Design of Nailed Joints. Journal Engineering Wood Science, 1973. p 17-21
- [26] - MCLAIN, T. E.. "Curvilinear Load-Slip Relations in Laterally-Loaded Nailed Joints". Dissertation presented to the Colorado State University in Fort Collins, Colorado, 1975, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
- [27] - FOSCHI, R. O. & BONAC, T.. Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails Wood Science, 9(3), 1977. p 118-123.
- [28] - MANTILLA CARRASCO, E. V.. Ligações de Peças Estruturais de Madeira por Pregos - I Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (EBRAMEM), EESC-LAMEM, São Carlos, 1983. 48p.

- [29] - MALHOTRA, S. K. & THOMAS, B.. Effect of Interface Gap on Load Slip Characteristics of Timber Joints Fabricated with Multiple-Nails Malhotra and Thomas, 1984. p 104-112.
- [30] - TRADA Wood Information Mechanical Fasteners for Structural Timber Work, 1985. 12p.
- [31] - McLAIN, T. E. Mechanical Fastening of Structural Wood Members Design and Research Status Structural Wood Research, Virginia, 1987. p.33-70.
- [32] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira NBR 7190, Rio de Janeiro, ABNT, 1951.
- [33] - DEUSTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG Construciones de Madera Calculo y Ejecucion DIN 1052 Bilbao, Ed. Balzola, 1973.
- [34] NATIONAL SPECIFICATION FOR WOOD CONSTRUCTION Recommended Praticce for Structural Design by National Forest Products Association Washington, 1986.
- [35] - EUROCODE N.5 Common Unified Rules for Timber Structural, Luxemburg, 1988.
- [36] - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber Construction Manual, 1985.
- [38] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Ensaio Físicos e Mecanicos de Madeiras NBR 6230, Rio de Janeiro, ABNT, 1940.
- [39] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Standart Methods of Testing small clear specimens of Timber. Philadelphia, ASTM, 1952. (ASTM designation D 143-52).

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber Construction Manual, 1985.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Standart Methods of Testing small clear specimens of Timber. Philadelphia, ASTM, 1952. (ASTM designation D 143-52).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira NBR 7190, Rio de Janeiro, ABNT, 1951.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Ensaio Físicos e Mecanicos de Madeiras NBR 6230, Rio de Janeiro, ABNT, 1940.
- BEGHTEL, S. C. & NORRIS, C. B..Strength of Wood Beams of Rectangular Cross Section as Affected by Span-Depth Ratio USDA-FS-FPL, Mad., Wis. (1910), 1959.
- CALIXTO, J. M. F. A Geometrically Nonlinear One Dimensional Element for Analyzing Layered Systems with Interlayer Slip. Dissertation presented to the University of Texas at Austin, Texas, 1991, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. 240p.
- CHAHUD, E. - Módulo de Elasticidade Longitudinal e Proposta para o Cálculo de Peças Fletidas. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1989. 148p. Dissertação (Doutor-Engenharia de Estruturas).
- DEUSTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG Construciones de Madera Calculo y Ejecucion DIN 1052 Bilbao, Ed. Balzola, 1973.
- DOYLE, D. V. - Performance of Nail Glued Joints of Plywood to Solid Wood, USDA-FS-FPL Madison, Wis., FPL-042, 1964, 28p.
- ETHINGTON, R. L.. Stiffness and Bending Strength of Beams Laminated two Species of Wood. USDA-FS-FPL, Mad., Wis.,(2156), 1960.

- EUROCODE N.5 Common Unified Rules for Timber Structural, Luxemburg, 1988.
- FOSCHI, R. O. & BONAC, T.. Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails Wood Science, 9(3), 1977. p 118-123.
- GOODMAN, J. R. & POPOV. E. P. Layered Beam Systems with Interlayer Slip ASCE Structural Division Journal, vol. 94, n.11, 1968. p 2535-2547.
- HANSEN, H. J. - Design of Plywood I-Beams, ASCE, 1946, paper n.2317, p.955-969.
- HELLMEISTER, J. C. - Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1973. p.89 (Tese Doutor-Engenheiro).
- KAMIYA, F. - Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams Wood and Fiber Science 17(1), 1983. p 117-131.
- KAMIYA, F. - Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part II. Nailed Stressed-Skin Components, 1983. p 170-183.
- KOLLMANN, F. F. L. & CÔTÉ, W. A. - Principles of Wood Science and Technology. Germany, Springer-Verlag, 1968. cap. 7
- KUENZI, E. W, & WILKINSON, T. L. - Composite Beams-Effect of Adhesive or Fastener Rigidity, USDA-FS-FPL Madison, Wis.,FPL-152, 1971. 22p.
- LARA PINTO, M. -Flexão em Peças de Madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983. 126p. Dissertação (Mestre Engenharia de Estruturas).
- LEICHTI, R. J. & TANG, R. C. Comparative Performance of Long-Term Loaded Wood Composite I-Beams and Sawn Lumber Wood and Fiber Science 21(2), Oregon, 1989. p.142-154.

- LEICHTI, R. J., FALK, R. H. & LAUFENBERG, T. L.. Prefabricated Wood Composite I-Beams, A Literature Review USDA-FS-FPL Wood and Fiber Science 22(1), 1990. p. 62-79.
- LIU, J. Y. & SOLTS, L. A.. Lateral Resistance of Nailed Joints A Test Method Madison, Forest Products Journal vol 34 n.1, 1984. p.55-60.
- LUCHESE, J. A. e STAMATO, M. C. Ligações de Peças de Peroba Rosa com Parafusos de Aço. São Carlos, Publicação n.147, 1967, 42 p.
- MALHOTRA, S. K. & THOMAS, B.. Effect of Interface Gap on Load Slip Characteristics of Timber Joints Fabricated with Multiple-Nails Malhotra and Thomas, 1984. p 104-112.
- MANTILLA CARRASCO, E. V.. Ligações de Peças Estruturais de Madeira por Pregos - I Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (EBRAMEM), EESC-LAMEM, São Carlos, 1983. 48p.
- MARCH, H. W. & KUENZI, E. W. & KOMMERS, W. J.. Method of Measuring the Shearing Moduli in Wood USDA-FS-FPL Mad., Wis, 1942.
- MARCH, H. W. Stress-Strain Relations in Wood and Plywood Considered as Orthotropic Materials. USDA-FS-FPL, Mad., Wis. s/d.
- McLAIN, T. E.. "Curvilinear Load-Slip Relations in Laterally-Loaded Nailed Joints". Dissertation presented to the Colorado State University in Fort Collins, Colorado, 1975, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
- McLAIN, T. E. Mechanical Fastening of Structural Wood Members Design and Research Status Structural Wood Research, Virginia, 1987. p.33-70.
- MENDONÇA PASSOS, M. E. -Vigas de Seção Composta T, tendo o Parafuso como Elemento de Solidarização, 1992. 126p. Dissertação (Mestre Engenharia de Estruturas).

MORRIS, E. N..Aplication of the Slip Modulus in the Design of Nailed Joints.
Journal Engineering Wood Science, 1973. p 17-21

NATIONAL SPECIFICATION FOR WOOD CONSTRUCTION Recommended
Pratice for Structural Design by National Forest Products Association
Washington, 1986.

NEWLIN, J. A. & TRAYER, G. W.. Deflexion of Beams With Special
Reference to Shear Deformation. USDA-FS-FPL, Mad., Wis. (1816), 1962.

PARRA, J. C. - Introdução ao Estudo do Comportamento de Peças de Seção
Composta de Madeira, na Flexão, Solidarizadas por Pregos. São Carlos,
Escola de Engenharia de São Carlos, 1989. 36p.

RAMAKER, T. J. & DAVISTER, M. D.. Predicting Performance of Hardboard
in I-beams USDA-FS-FPL Madison, Wis., FPL-185, 1972. 12p.

RAMOS, A. N. - A Preliminary Study of the Feasibility of Plastic Concept of
design in Wood Structures. Doctoral Thesis in Civil Engineering, University
of Wisconsin, 1961.

TOMPSON, E. G. GOODMAN, J. R. AND VANDERBILT, M. D.. "Finite
Element Analysis of Layered Wood Systems", Journal of the Structural
Division, ASCE, vol 101, 1975. p 2659-2672.

TRADA Wood Information Mechanical Fasteners for Structural Timber Work,
1985. 12p.

WAGNER MUNOZ, M.. El Fundamento de las Especificaciones de La Norma
Alemana DIN 1052 Relativas Al Diseno de Piezas Estructurales de Madera
de Seccion Transversal Compuesta Solicitadas a Flexion y a Compression.
Informe n. 45, Chile, 1970, 111p.

WILKINSON, T. L.. Theoretical Lateral Resistence of Nailed Joints Madison,
Wis, Journal of the Structural Division Proceeding of the American Society
of Civil Engineers, 1971. p.1381-1399.

WILKINSON, T. L.. Analysis of Nailed Joints With Dissimilar Member USDA-FS-FPL, Madison, Wis, Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1972. p 2005-2013.

WILSON, E. L. & HABIBULLAH, A.. A Series of Computer Programs for the Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, SAP90, Users Manual, CSI, 1989.

ZAKIC, B. D. - Inelastic Bending of Wood Beams. Journal of the Structural Division, ASTM, 99 (10), 1973. p.2079-2095.

ZAKIC, B. D. - Shearing Stress in Plastic Bending of Wood Beams. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1983. p.1042-1060.