

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são realizadas as avaliações da rigidez efetiva, deformações, tensões e força de ruptura das vigas compostas testadas. Também são feitas comparações entre os métodos de dimensionamento da normas NBR 7190 e EUROCODE 5, para alguns casos comuns de vigas compostas.

### 5.1 – Rigidez Efetiva

A apresentação dos resultados experimentais dos ensaios das vigas em forma de diagramas força x flecha, permite uma visualização clara do desempenho estrutural. Os gráficos assim apresentados, possibilitam uma comparação do comportamento da rigidez de cada viga. Nestes diagramas, para cada viga são indicadas quatro curvas teóricas (Rígida, Livre, NBR e EC5) além dos valores experimentais obtidos dos ensaios.

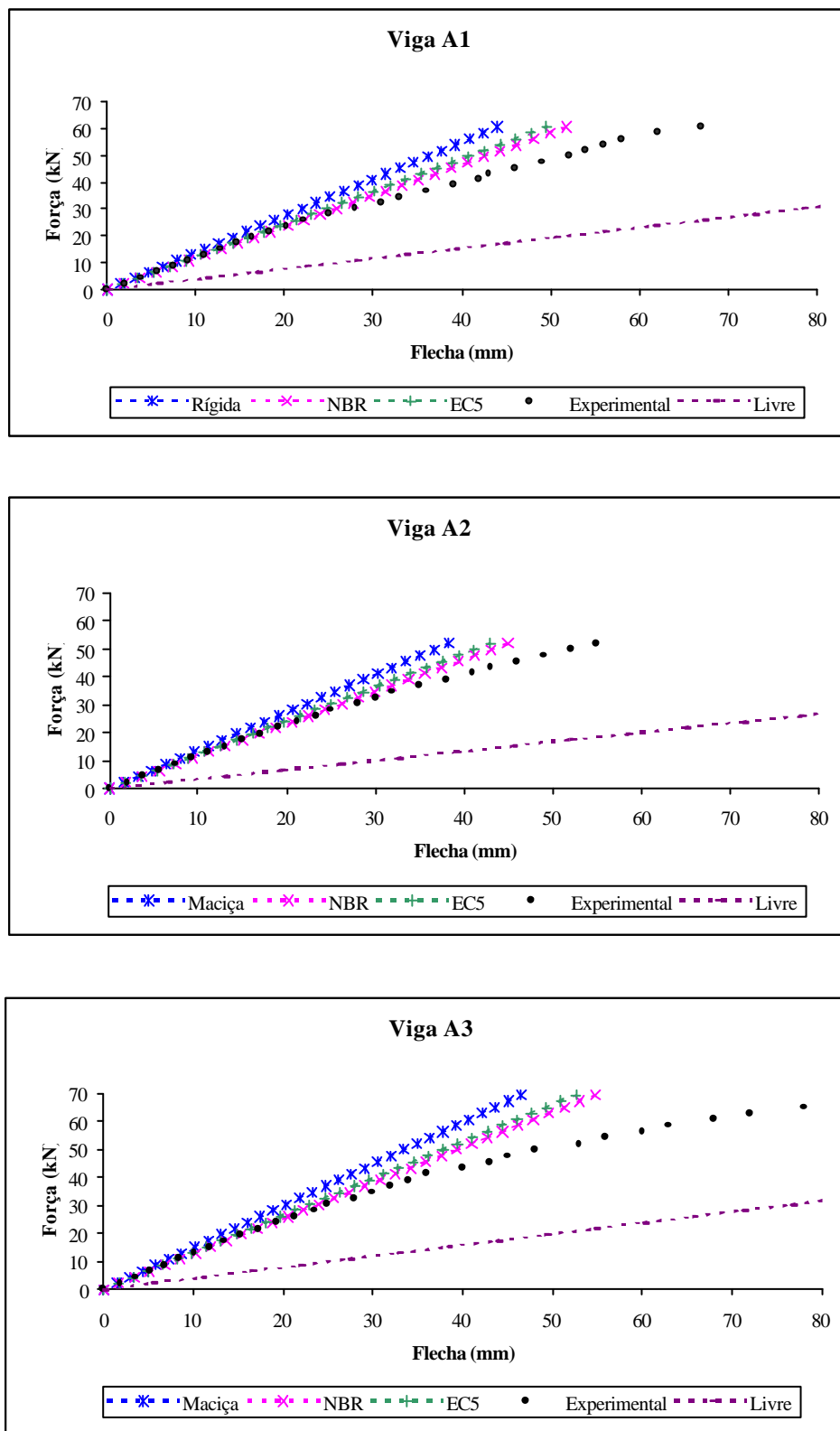
A curva "Rígida" mostra o comportamento da viga composta sob a ótica da teoria clássica da resistência dos materiais, considerando-se uma seção transformada onde a ligação é perfeitamente rígida, adotando para os módulos de elasticidade os valores obtidos dos ensaios de flexão estática preliminares de cada peça ( $E_{M, flecha}$ ).

O comportamento teórico da viga, supondo não haver ligação entre as mesas e a alma, é representado pela curva "Livre". Novamente é considerada a teoria clássica de flexão de vigas adotando os valores  $E_{M, flecha}$  para o módulo de elasticidade à flexão.

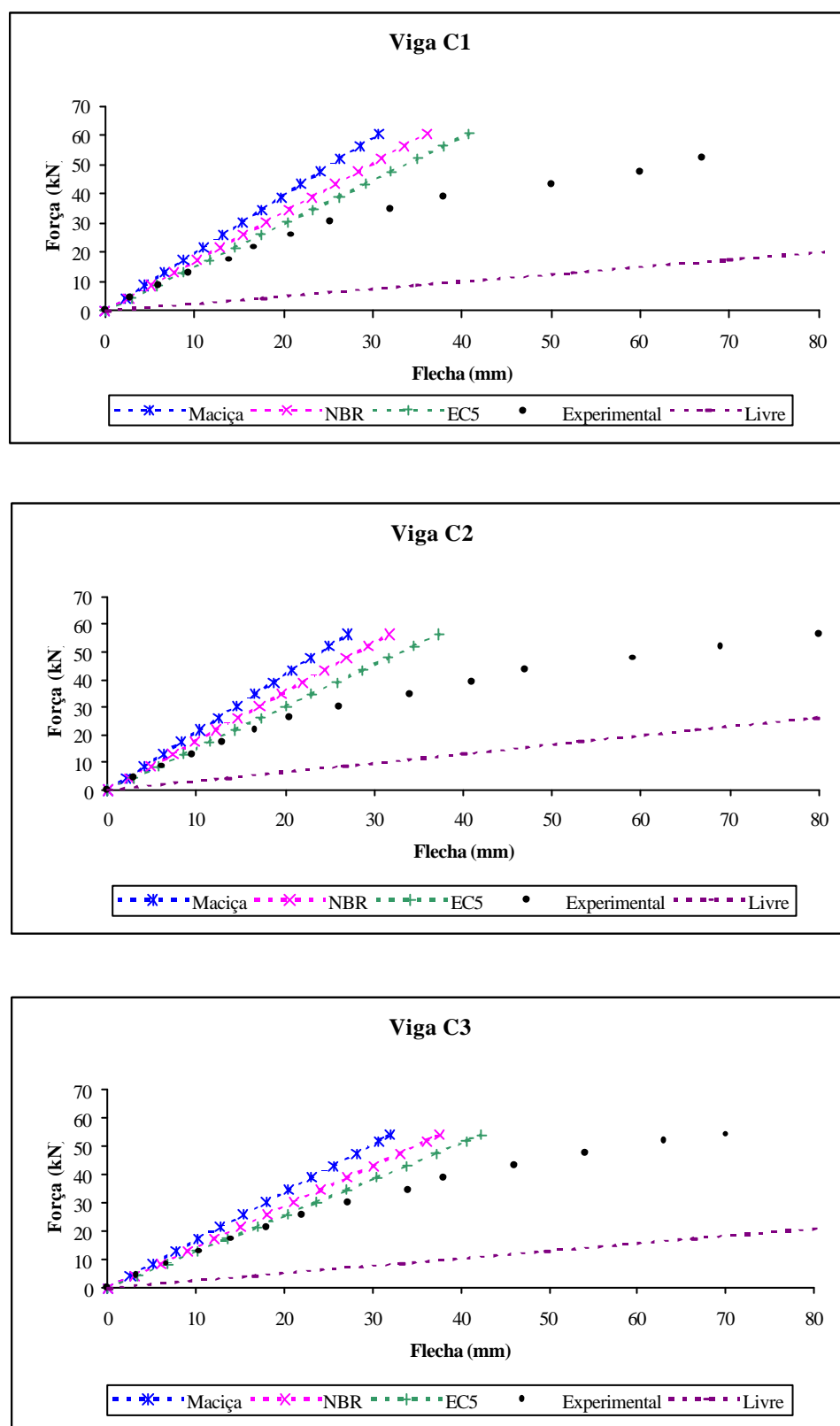
Também são apresentados, nas curvas "NBR" e "EC5", os comportamentos da viga de acordo com os procedimentos de cálculo indicados pelas normas NBR 7190/97 e EUROCODE 5/93, respectivamente.

A curva "NBR" foi obtida com a redução da rigidez da viga composta considerando ligação rígida  $(EI)_{Rig.}$  calculado pela multiplicação do coeficiente de eficiência ( $\alpha_r = 0,85$ ). A curva "EC5" foi calculada pelo método de dimensionamento do EUROCODE 5 apresentado no

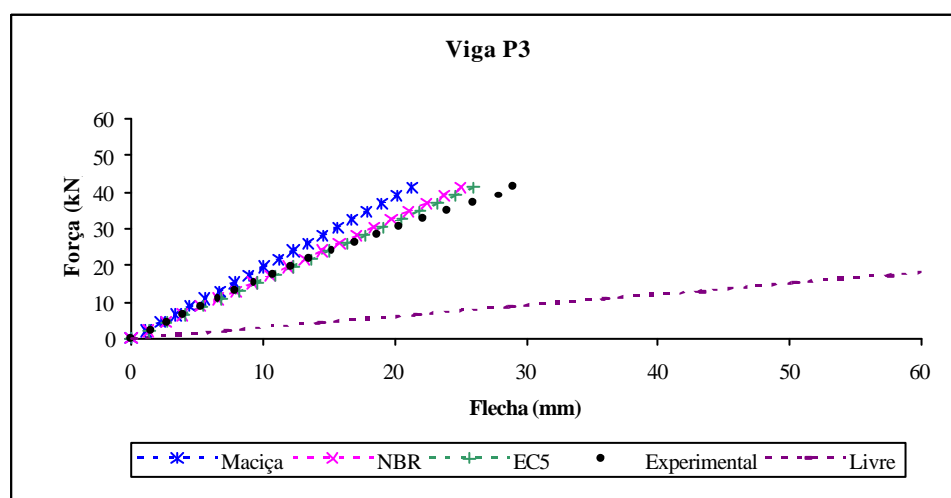
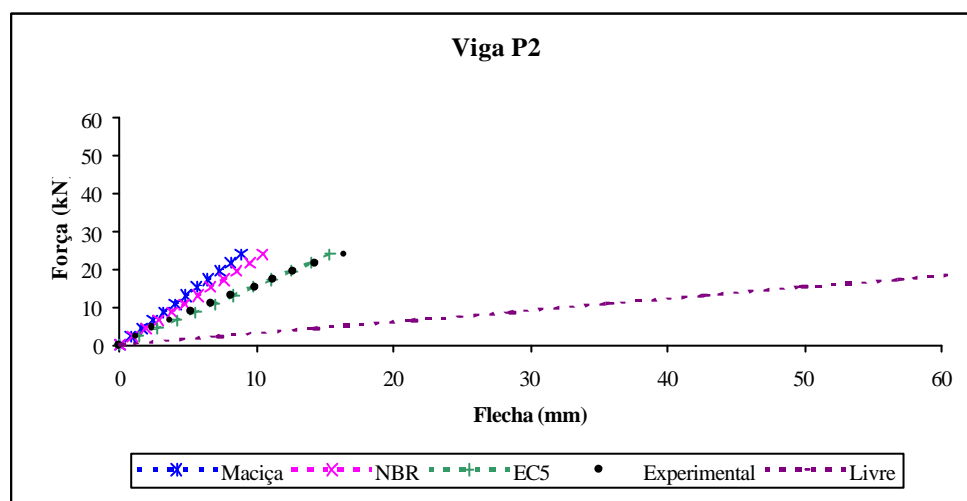
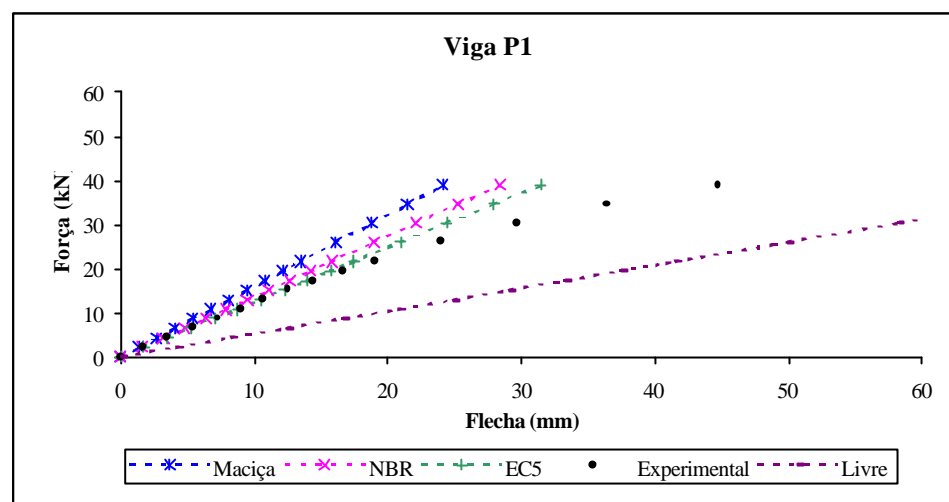
item 2.5.3 do capítulo Revisão Bibliográfica. O valor do módulo de deslizamento (K) foi obtido com a equação do  $K_{ser}$  do método do EUROCODE 5.



**Figura 48** – Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Angelim.



**Figura 49** – Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Cedrilho.



*Figura 50 – Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Pinus.*

Observando os diagramas das figuras 48, 49 e 50, pode-se notar uma melhor aproximação dos valores teóricos do EUROCODE 5 com os valores obtidos nos ensaios, principalmente nos instantes iniciais (até a flecha de  $L/200$ ), em comparação aos valores teóricos fornecidos pela NBR 7190/97. Nota-se também que, a partir de certo momento, o sistema composto perde eficiência gradativamente. Neste valor de força aplicada, a não linearidade do comportamento dos conectores começa a influenciar o comportamento do conjunto, ou seja, desse ponto em diante a teoria linear do EUROCODE 5 e da NBR7190/97 torna-se inadequada para prever os deslocamentos e os esforços atuantes.

Na tabela 21 encontram-se os valores de rigidez à flexão e os respectivos valores dos coeficientes de eficiência ( $\alpha$ ) para cada uma das vigas compostas. A coluna ( $\alpha_{EC5}$ ) indica os valores do coeficiente de eficiência calculado pela equação 111, segundo a metodologia proposta pelo EUROCODE 5. A coluna ( $\alpha_{exp}$ ) indica os valores do coeficiente de eficiência calculado pela equação 112.

$$\alpha_{EC5} = \frac{(EI)_{EC5}}{(EI)_{rig}} \quad (111)$$

$$\alpha_{exp} = \frac{(EI)_{exp}}{(EI)_{rig}} \quad (112)$$

Para o cálculo da rigidez à flexão experimental foi utilizada a regressão linear dos valores de força x flecha obtidos nos ensaios, até a flecha limite de  $L/200$  (eq. 113).

$$(EI)_{exp} = \frac{\Delta F}{\Delta d} \cdot \frac{23 \cdot L^3}{1296} \quad (113)$$

Também é apresentado o valor do erro entre a estimativa do EUROCODE 5 e os resultados experimentais (vide equação 114). O sinal (-) indica que o valor de rigidez à flexão, obtido experimentalmente, foi menor que o estimado teoricamente pelo método do EUROCODE 5.

$$\frac{(EI)_{exp} - (EI)_{EC5}}{(EI)_{EC5}} \cdot 100 \quad (114)$$

Observando os valores dos erros, na tabela 21, verifica-se que os resultados experimentais apresentaram boa concordância em relação a rigidez à flexão teórica. Apenas nas vigas C1 e C2 são observadas diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais, com valores de rigidez aquém dos experimentais, significando que os resultados teóricos estão um pouco contra a segurança.

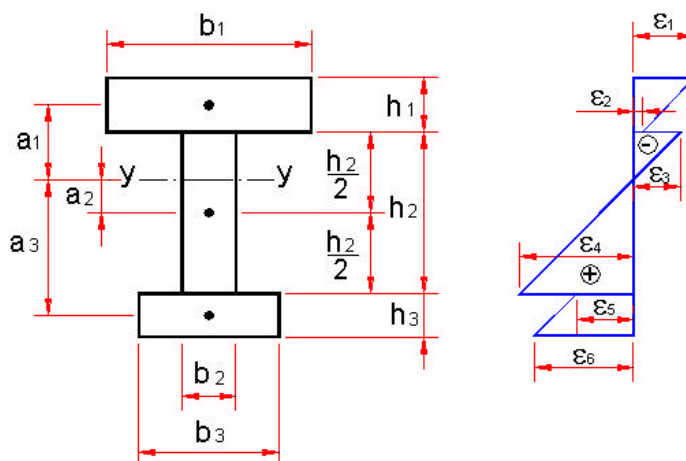
De modo geral, o método do EUROCODE 5 demonstra ser satisfatório para a estimar o valor da rigidez efetiva à flexão, para qualquer situação de ligação entre os elementos.

**Tabela 21:** Rigidez à flexão e coeficiente de eficiência das vigas compostas.

Viga	$(EI)_{\text{ríg.}}$ (kN.cm <sup>2</sup> )	$(EI)_{\text{EC5}}$ (kN.cm <sup>2</sup> )	$(EI)_{\text{exp.}}$ (kN.cm <sup>2</sup> )	$\alpha_{\text{EC5}}$	$\alpha_{\text{exp.}}$	Erro (%)
A1	12389321	10993965	10660463	0,89	0,86	-3,0
A2	12221476	10877689	10355724	0,89	0,85	-4,8
A3	13384421	11837396	11445233	0,88	0,86	-3,3
C1	20779163	15630796	13454931	0,75	0,65	-13,9
C2	21980521	15881122	13743379	0,72	0,66	-13,5
C3	17817781	13465536	12731707	0,76	0,72	-5,5
P1	7733260	5943941	5789292	0,77	0,75	-2,6
P2	28208205	16389020	16527848	0,58	0,59	0,8
P3	20336034	16663170	17017367	0,82	0,84	2,1

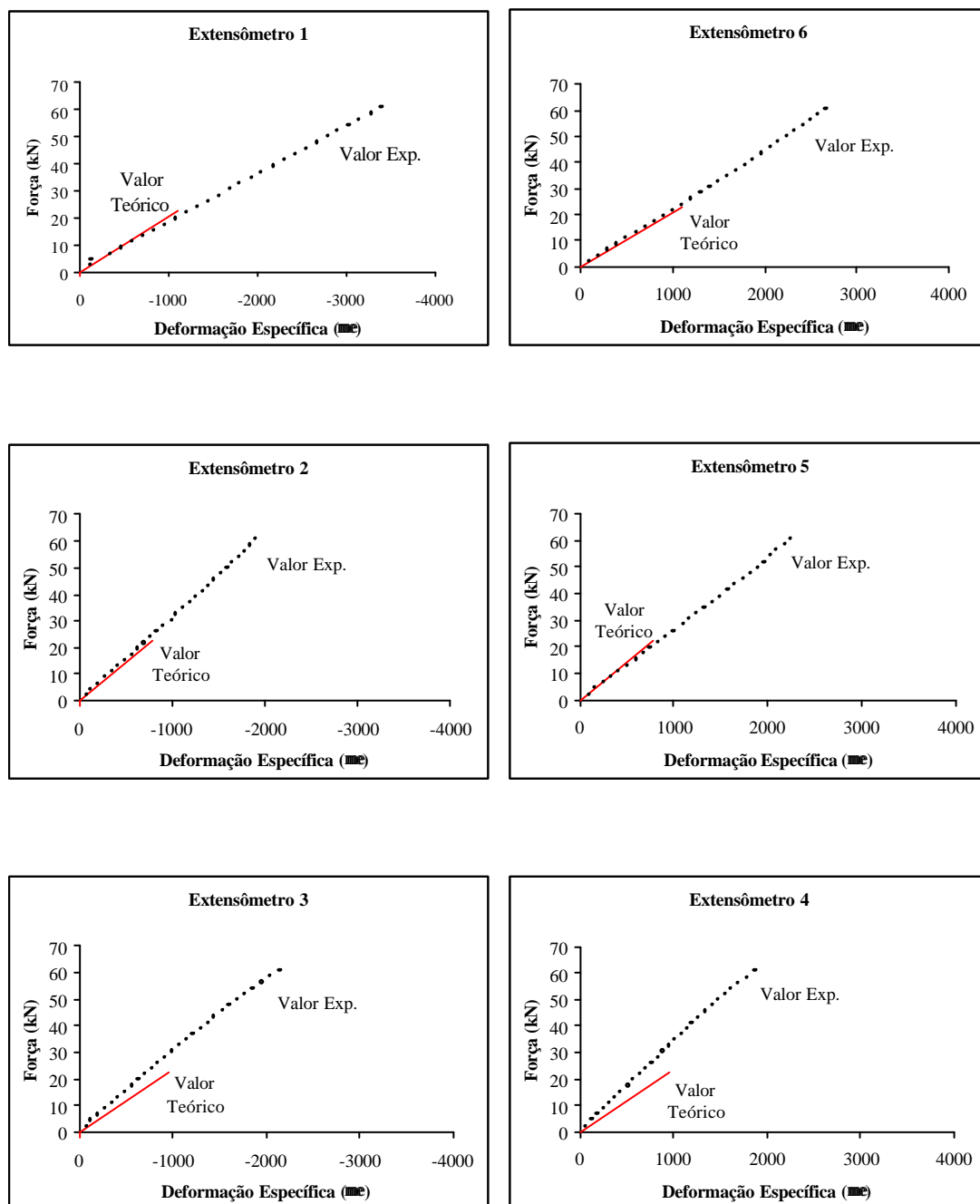
## 5.2. Deformações e Tensões

A seguir são apresentados os resultados obtidos de leituras de deformação dos extensômetros elétricos posicionados na região central das vigas. Algumas vigas foram instrumentadas com seis extensômetros que registravam os valores  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$  e  $\varepsilon_6$  a cada novo incremento de força (ver figura 51).



**Figura 51** – Diagrama de deformação para uma seção I genérica.

Os resultados são apresentados em forma de diagramas força x deformação para cada extensômetro. Para efeito de comparação, os valores teóricos obtidos da formulação do EUROCODE 5 também são indicados em cada diagrama até a força limite correspondente a flecha de  $L/200$ .



*Figura 52 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga A1.*

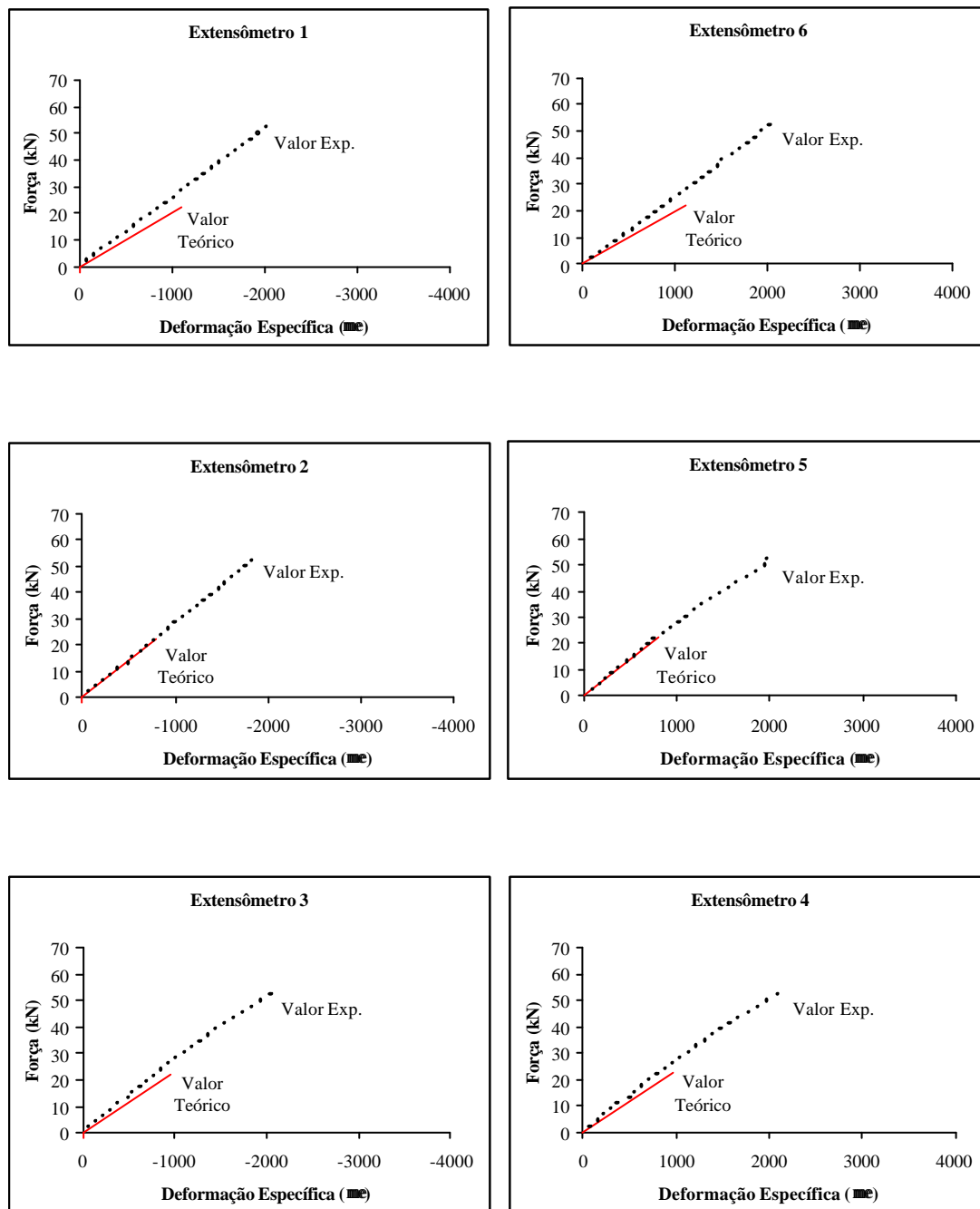
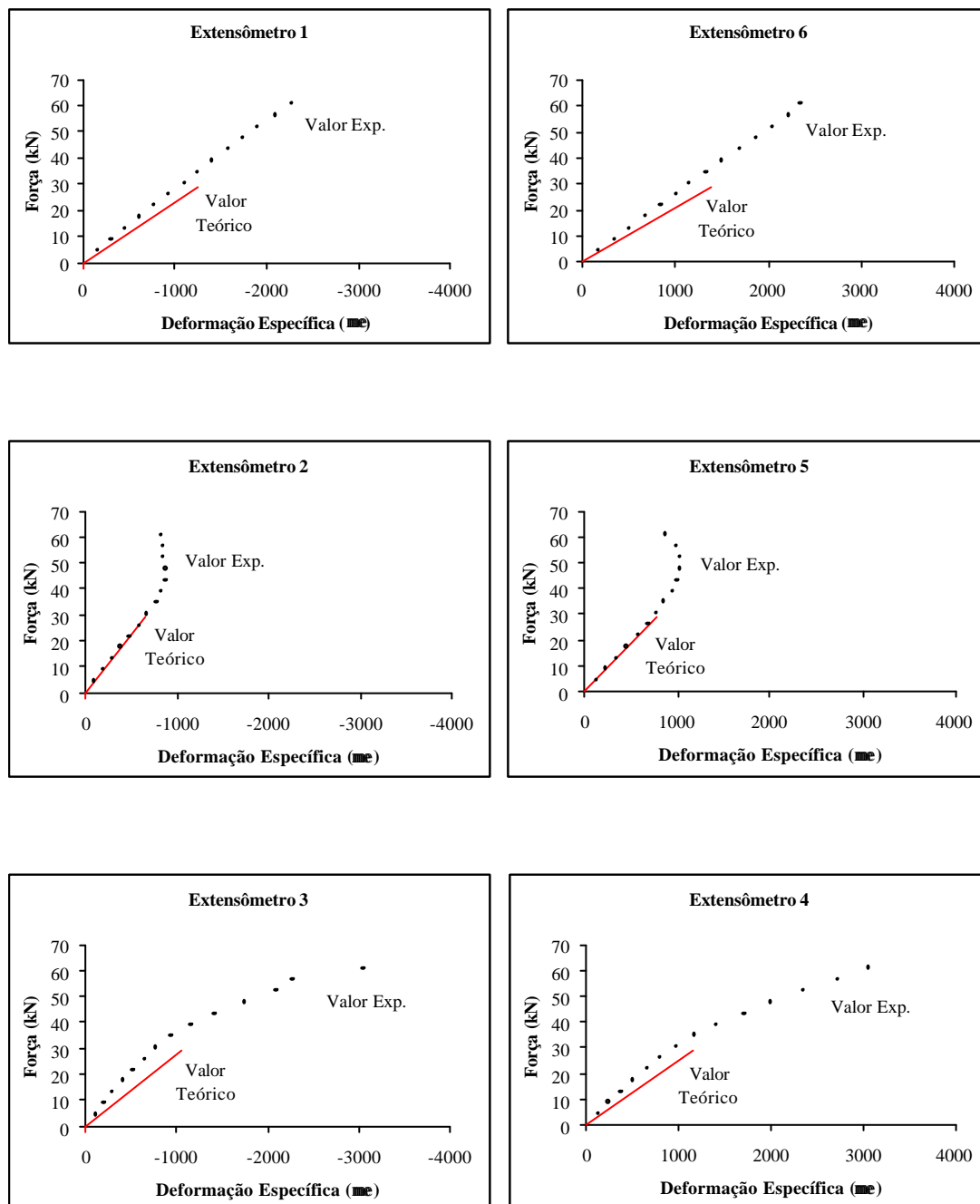
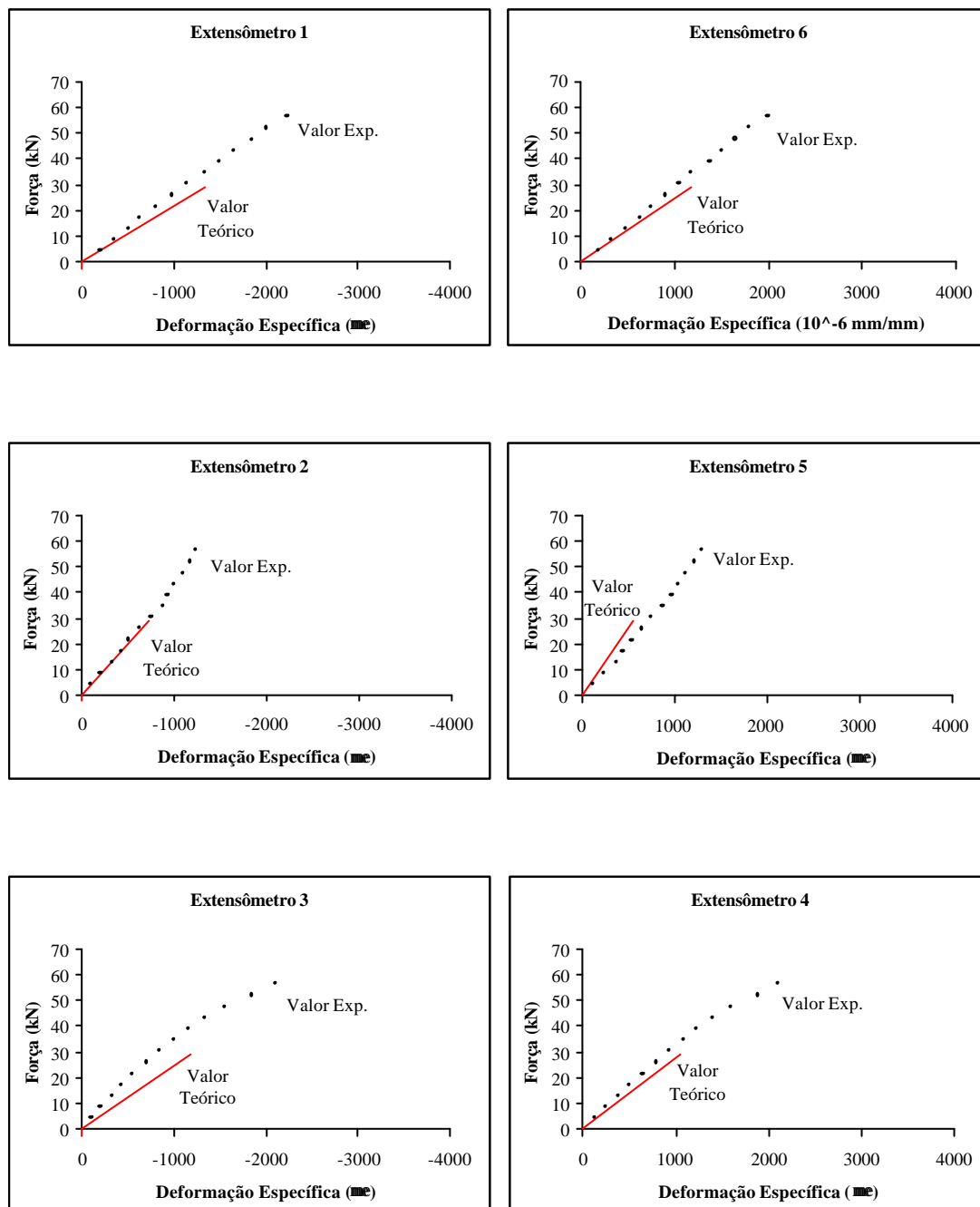


Figura 53 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga A2.





*Figura 54 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga C1.*



*Figura 55 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga C2.*

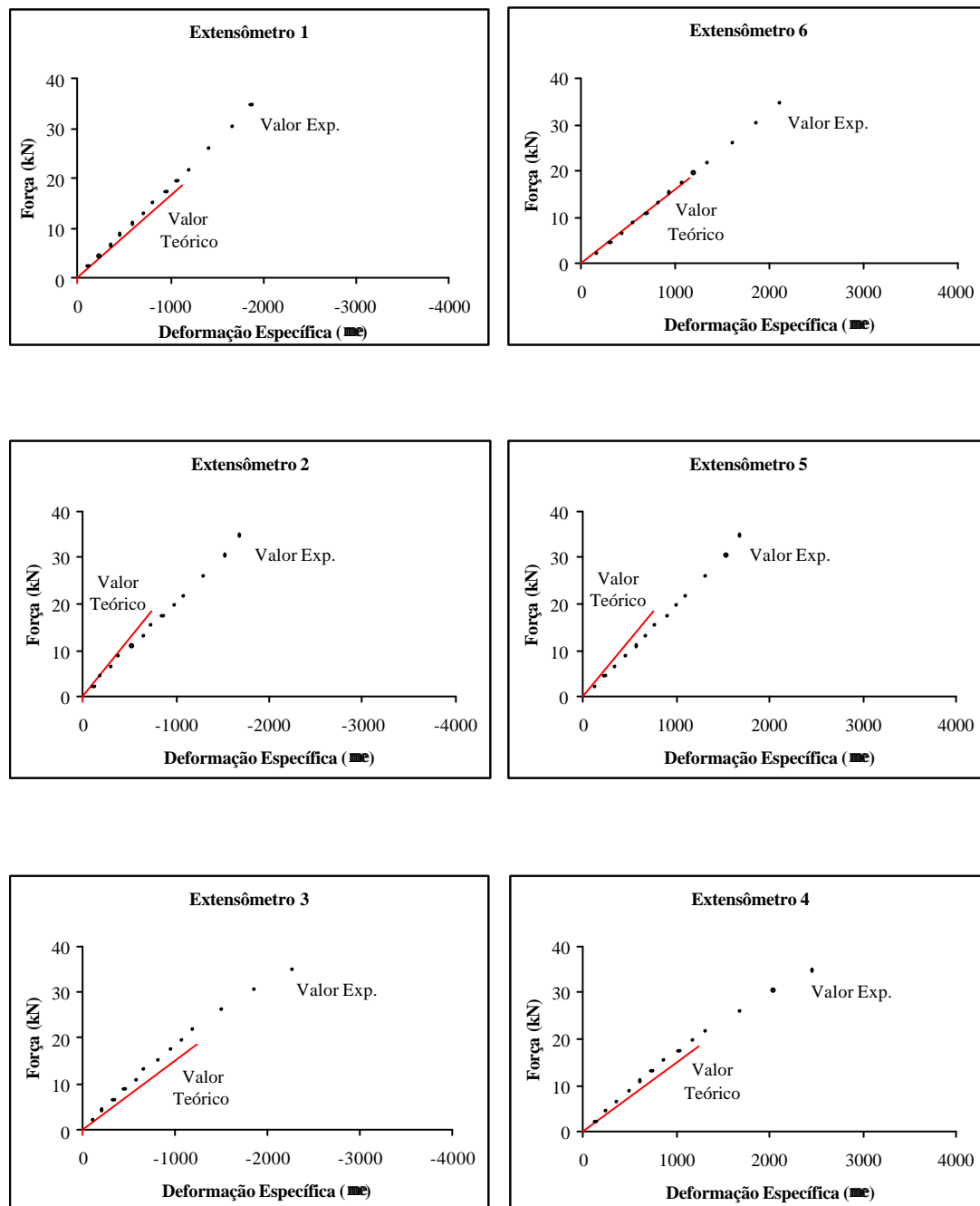
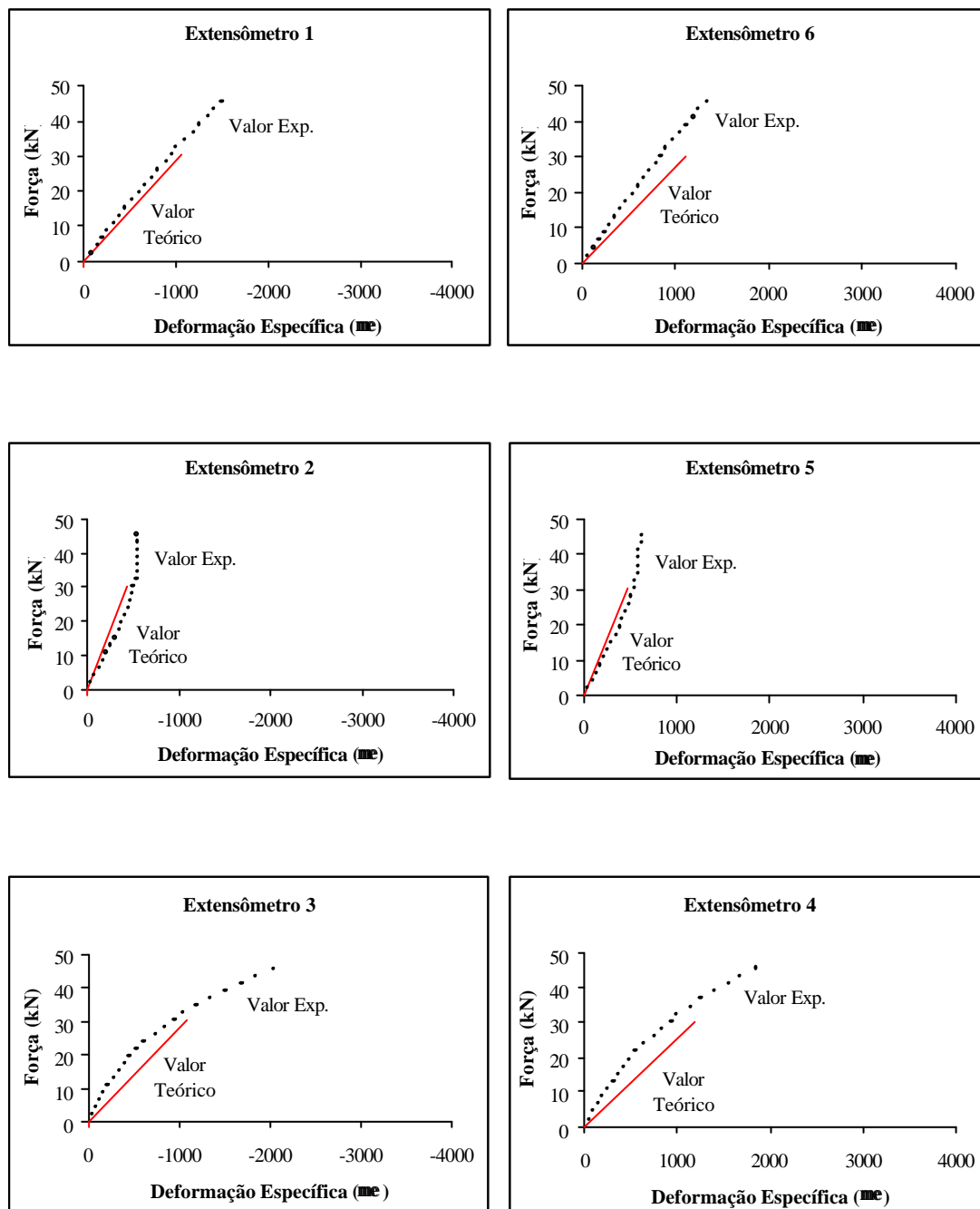


Figura 56 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga P1.



*Figura 57 – Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga P2.*

Observando os diagramas de deformações das vigas de Angelim Pedra Verdadeiro (A1 e A2), Cedrilho (C1 e C2) e Pinus Hondurensis (P1 e P2), nota-se uma excelente convergência dos resultados experimentais e teóricos, principalmente para os extensômetros posicionados nas mesas ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_5$  e  $\epsilon_6$ ). Já os extensômetros posicionados nas almas ( $\epsilon_3$  e  $\epsilon_4$ ) indicam, em todos os casos, valores de deformações menores que os teóricos considerando um mesmo valor de força aplicada.

Fica também evidenciado, para todos os casos, o fenômeno de perda gradativa de eficiência. A figura 54 ilustra muito bem o comportamento de uma viga composta pregada após o regime linear.

Verifica-se que as curvas teóricas se aproximaram das experimentais, principalmente para valores de flechas inferiores ao limite de  $L/200$ , estabelecido pela NBR 7190/97 para os carregamentos usuais das construções correntes. A partir desse limite, verifica-se que as vigas apresentam uma redução da rigidez, devido ao comportamento não linear da ligação, comportamento este que não é representado pela curva teórica considerada, a qual tem comportamento exclusivamente elástico.

A partir de certo valor da força, o módulo de deslizamento ( $K$ ) da ligação diminui, influenciando na rigidez global  $(EI)_{ef}$  da viga. Nota-se uma diminuição no incremento de tensões nas mesmas, sobrecarregando a alma. Este fenômeno fica mais evidente nos casos em que há menor taxa de ligação entre os elementos. Nas vigas de Angelim, que apresentaram coeficiente de eficiência experimental ( $\alpha_{exp.}$ ) de 0,86 e 0,85, e na viga de Pinus P1, com 0,75, o fenômeno é pouco notado. Já para as vigas de Cedrilho, com coeficientes 0,65 e 0,66, e para viga de Pinus P2, com 0,59, o fenômeno é mais acentuado.

A seguir são apresentados os diagramas de tensões e deformações para cada viga, indicando os resultados experimentais e comparando-os com os obtidos da formulação do EUROCODE 5. As tensões e deformações apresentadas nas figuras 58, 59, 60, 61, 62 e 63 referem-se aos valores obtidos através de extensômetros elétricos posicionados na seção transversal central, para o nível de força aplicada que produzia uma flecha teórica de  $L/200$  considerando regime elástico.

Os valores de tensões tanto experimentais quanto teóricos foram obtidos utilizando os valores de módulo de elasticidade à flexão obtidos de experimentação preliminar indicados na tabela 4 do capítulo de resultados (colunas  $E_{M, ext. sup.}$  e  $E_{M, ext. inf.}$ ).













