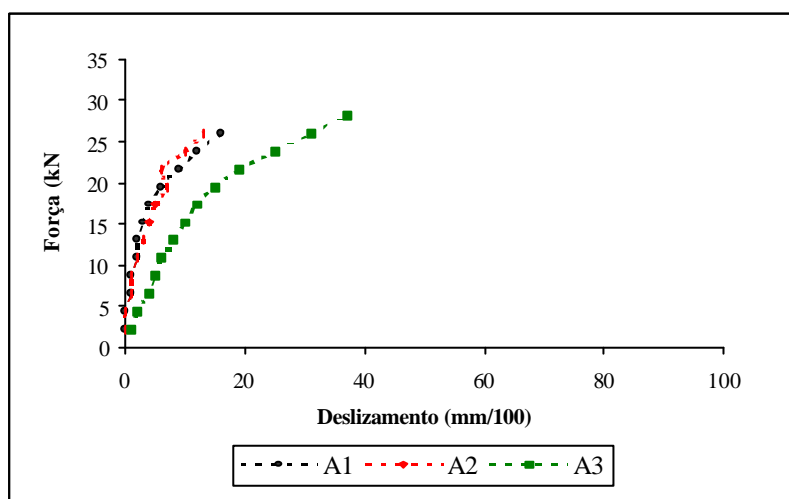


Pode-se observar boa aproximação entre os resultados experimentais e teóricos dos diagramas de deformações e tensões.

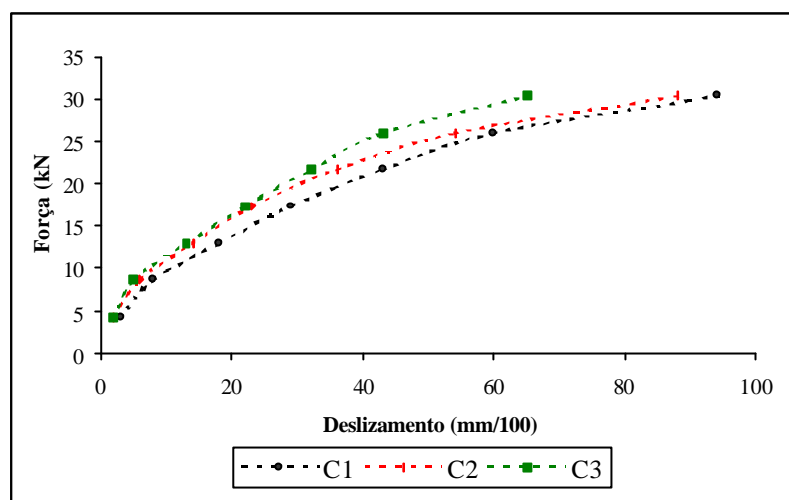
O deslizamento na superfície de contato é confirmado ao avaliar os resultados das deformações registradas mediante os extensômetros elétricos. Até mesmo para os primeiros estágios de carregamento, foi constatada a descontinuidade no diagrama de tensões.

### 5.3 Deslizamento entre as Peças

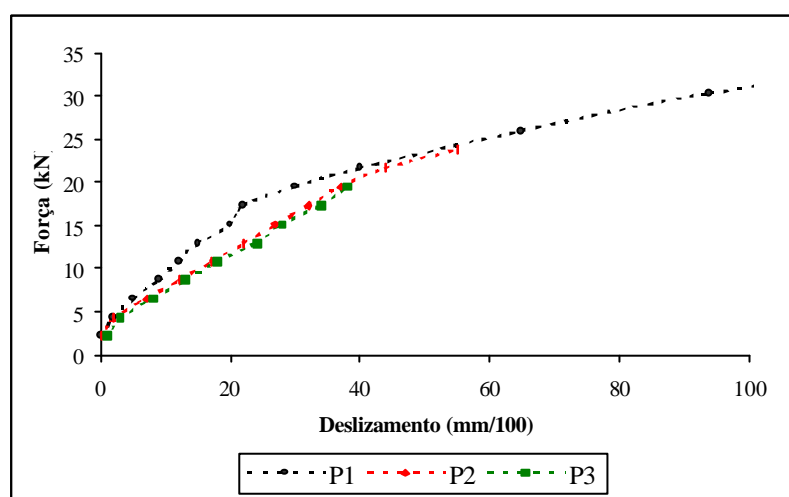
As figuras 64, 65 e 66 ilustram os valores experimentais de deslizamento máximo entre as mesas e almas em função do nível de força aplicado. Estes resultados experimentais foram obtidos por meio de medições do relógio comparador posicionado na extremidade das vigas.



**Figura 64** – Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Angelim.



**Figura 65** – Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Cedrilho.



**Figura 66** – Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Pinus.

## 5.4 Força de Ruptura

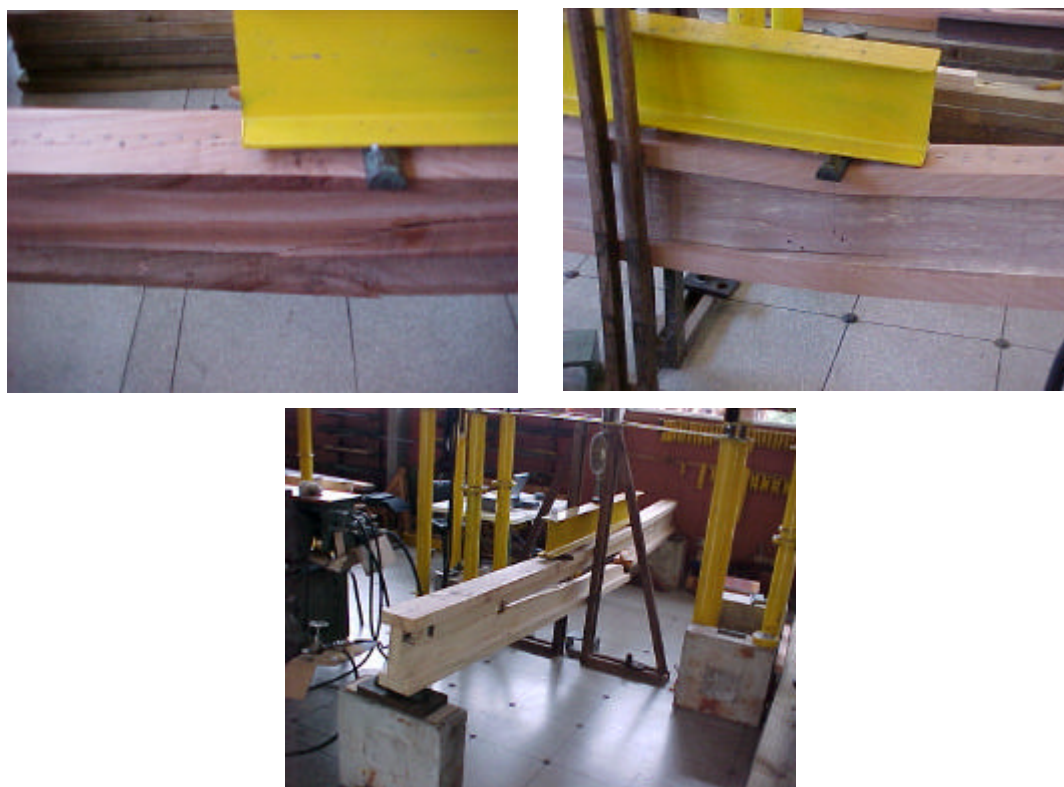
Em relação aos estados limites últimos, foram comparados os valores de força máxima calculados teoricamente pelo método do EUROCODE 5 e NBR 7190/97, e comparados com os resultados experimentais obtidos.

Tanto para o método do EUROCODE 5 quanto para o método da NBR 7190/97, todas as vigas ensaiadas apresentaram a ligação como ponto crítico.

A tabela 28 e os diagramas das figuras 67, 68 e 69 ilustram os valores teóricos da forças obtidas. Também apresenta o valor experimental, correspondente à ruptura da peça, bem como o modo de ruptura observado.

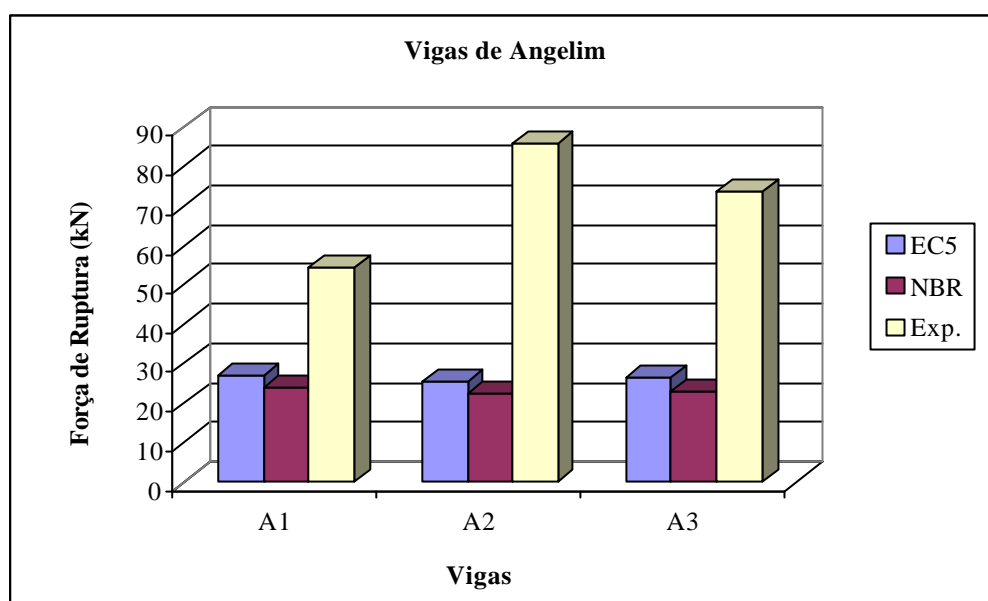
**Tabela 28** – *Comparação da força de ruptura teórica e experimental.*

Vigas	Força de Ruptura (kN)			Modo de Ruptura
	EC5	NBR	Exp.	
A1	26,97	23,80	54,49	Tração mesa inferior
A2	25,31	22,60	86,04	Tração inferior alma
A3	26,74	23,00	73,60	Tração inferior alma
C1	29,74	23,60	70,89	Tração inferior alma
C2	31,53	24,10	63,86	Tração inferior alma
C3	30,72	20,50	63,31	Tração inferior alma
P1	31,11	22,60	38,96	Tração inferior alma
P2	33,99	25,00	61,69	Tração mesa inferior
P3	67,11	55,90	55,74	Tração inferior alma

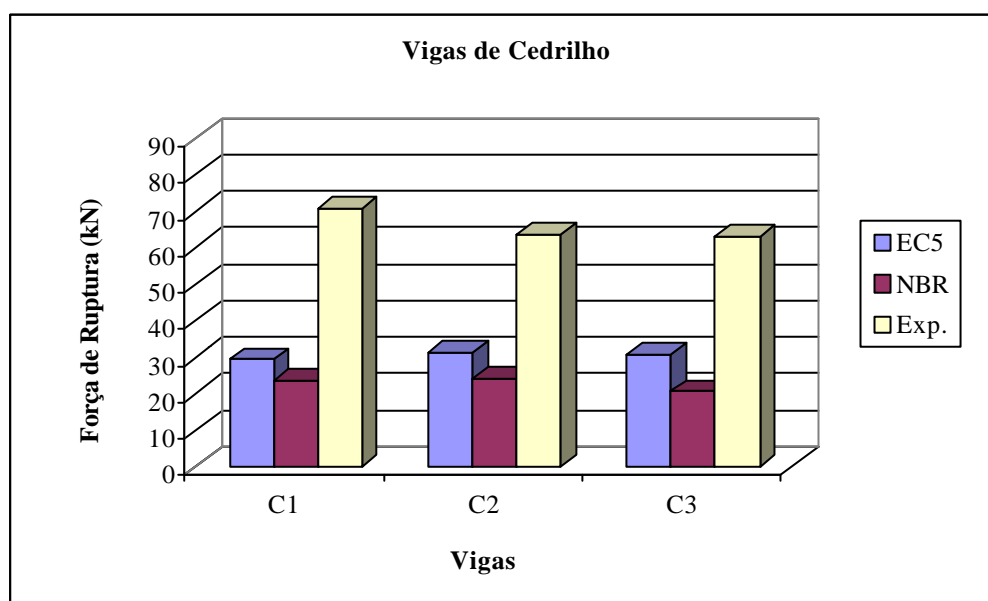


**Figura 67** – *Modo de ruptura das vigas compostas.*

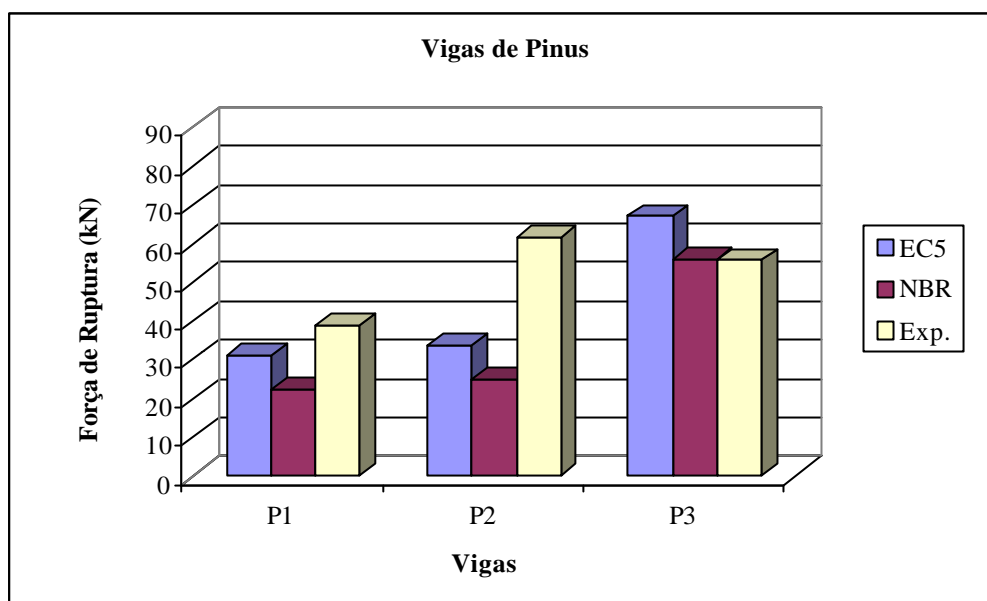
A figura 67 ilustra o modo de ruptura típico das vigas compostas ensaiadas.



**Figura 68** – Diagrama de força de ruptura das vigas de Angelim.



**Figura 69** – Diagrama de força de ruptura das vigas de Cedrilho.



**Figura 70** – Diagrama de força de ruptura das vigas de Pinus.

Observando os diagramas das figuras 68, 69, e 70 nota-se que os resultados experimentais de força de ruptura obtidos são muito superiores aos teóricos, para a maioria dos casos. Isto indica uma reserva de capacidade das vigas, em função da redistribuição de esforços entre os elementos de ligação, devido à flexibilidade dos mesmos.

Os valores de ruptura experimentais das vigas de Angelim são 102%, 240% e 175%, respectivamente vigas A1, A2 e A3, quando comparados com os teóricos obtidos do cálculo do EUROCODE 5. As grandes diferenças têm fundamento na consideração do estado de ruptura da viga. Tanto o método do EUROCODE 5 quanto o método da NBR consideram, para estes exemplos particulares de vigas, que, quando a ligação mais solicitada (extremo da viga) atinge sua capacidade máxima, a viga atingiu o estado limite último. Entretanto, pode ser observado que, após este ponto, ocorre uma redistribuição de esforços, devido a alta flexibilidade dos conectores, garantindo maior capacidade resistente para o elemento estrutural. Por fim, a ruptura das vigas foi caracterizada por de tração na mesa inferior ou tração na alma, por flexão.

Apenas na viga P3 o valor teórico foi superior ao experimental. Para esta viga foram colocados muitos pregos (prego 22 x 48 cada 2,4 cm). O fato de ser utilizado pouco espaçamento entre os pregos introduz uma região crítica na parte inferior da alma, induzindo à falha por tração. Isto indica que deve ser tomado um cuidado especial quando se projetam vigas com alta taxa de conexão.

Comparando os valores teóricos da capacidade resistente obtidos pela norma EUROCODE 5 e NBR7190/97, nota-se que esta conduz a valores inferiores. Isto é devido ao fato da norma brasileira considerar o fluxo de cisalhamento como se a viga fosse maciça. Já a norma europeia admite uma redução no valor do fluxo de cisalhamento, em função da eficiência da conexão. No caso da viga C3, a diferença na resistência chegou a 50%.

## 5.5 Ensaio de Ligações

A tabela 29 apresenta os resultados dos ensaios de ligações comparados com os valores teóricos do EUROCODE 5 e NBR 7190/97. Pode ser observado que os valores de módulo de deslizamento obtidos experimentalmente foram muito superiores aos estimados pelo EUROCODE 5.

Os corpos-de-prova das vigas P1, A1, A2 e A3 foram ensaiados com carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga. Para estes corpos-de-prova, o valor do módulo de deslizamento foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos  $(F_{10\%}; \delta_{10\%})$  e  $(F_{50\%}; \delta_{50\%})$  correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência máxima da ligação ( $R_u$ ) no último ciclo de carregamento. Os valores de módulo de deslizamento experimental obtidos para as vigas A1, A2 e A3 são em média 100% superiores aos indicados pelo EUROCODE 5. A viga P1 apresenta módulo de deslizamento experimental 60% superior ao teórico.

*Tabela 29: Resultados dos ensaios de ligação.*

Viga	Rigidez		Resistência		
	Teórico (EC5)	Experimental	Teórico (NBR)	Experimental	
	$K_{ser}$ (N/mm)	K (N/mm)	$R_k$ (N)	$R_{2\%}$ (N)	$R_u$ (N)
<b>A1</b>	5592	10850	1220	2550	5110
<b>A2</b>	6301	10970	1220	2570	6070
<b>A3</b>	6129	13358	1220	2560	6000
<b>C1</b>	5411	28625	2260	2420	6700
<b>C2</b>	4458	18000	2260	2310	6560
<b>C3</b>	4355	19820	2260	2450	6580
<b>P1</b>	3291	5274	2110	2400	4050
<b>P2</b>	3095	2363	2350	2200	3920
<b>P3</b>	3220	10401	2350	1780	3710

Os corpos-de-prova das vigas P3, C1, C2 e C3 foram ensaiados com carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga. Para estes corpos-de-prova, o valor do módulo de deslizamento foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos  $(F_{5\%}; \delta_{5\%})$  e  $(F_{25\%}; \delta_{25\%})$  correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência máxima convencional ( $R_{2\%}$ ) no último ciclo de carregamento. Os resultados obtidos indicam diferenças na força de ruptura na ordem de 250%.

Os corpos-de-prova da viga P2 foram ensaiados com carregamento monotônico crescente sem ciclo. Para estes corpos-de-prova o valor do módulo de deslizamento foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos  $(F_{5\%}; \delta_{5\%})$  e  $(F_{25\%}; \delta_{25\%})$  correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência máxima convencional ( $R_{2\%}$ ). O valor registrado experimentalmente indica melhor concordância com o teórico, 23% para P2.

Quanto à força de ruptura das ligações, observou-se uma boa concordância entre os valores experimentais  $R_{2\%}$  e os valores teóricos indicados pela NBR 7190/97, a menos dos casos da espécie de Angelim, nos quais o valor máximo da força aplicada durante o ciclo foi muito alto, interferindo no método da NBR para estimar a resistência.

## 5.6 Comparação entre os Critérios de Dimensionamento

Os resultados obtidos na experimentação realizada permitem concluir que o critério do EC5 se mostra adequado. Com o intuito de comparar o critério da NBR7190/97, que é método simplificado, com o do EC5, são feitos dois exemplos de dimensionamento de peças de seção composta com seções comerciais.

Os dados de projetos das vigas compostas, incluindo geometria da seção, vão, tipo de conector e classe de resistência da madeira, são indicados na tabela 30.

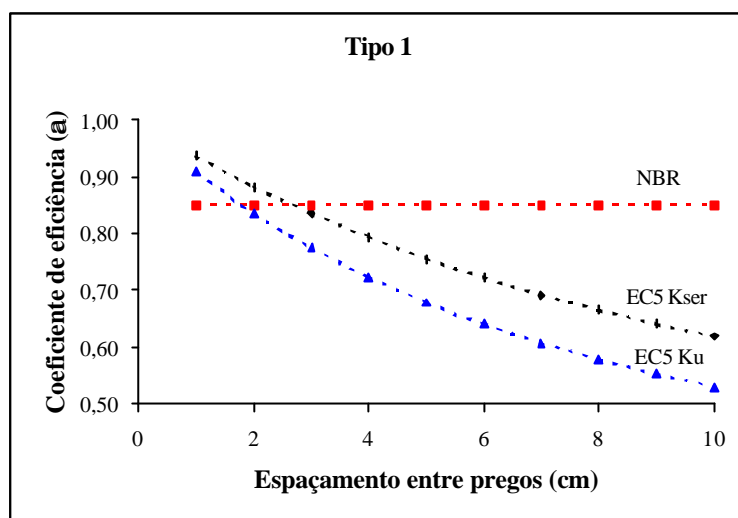
Tabela 30: Dados de projeto das vigas compostas.

Dados	Tipo 1	Tipo 2
Geometria		
Vão	500 cm	
Madeira	Dicotiledônea Classe C40 $f_{c0,k} = 40 \text{ MPa}$ ..... $f_{c0,d} = 16 \text{ MPa}$ $f_{v,k} = 6 \text{ MPa}$ ..... $f_{v,d} = 1,87 \text{ MPa}$ $E_{c0,m} = 19500 \text{ MPa}$ ..... $E_{c0,d} = 10920 \text{ MPa}$ $E_M = 17550 \text{ MPa}$ ..... $E_{M,d} = 9828 \text{ MPa}$ $\rho_{ap 12\%} = 950 \text{ kg/m}^3$	
Pregos	22 x 48	18 x 30
Espaçamento entre pregos	Variável	

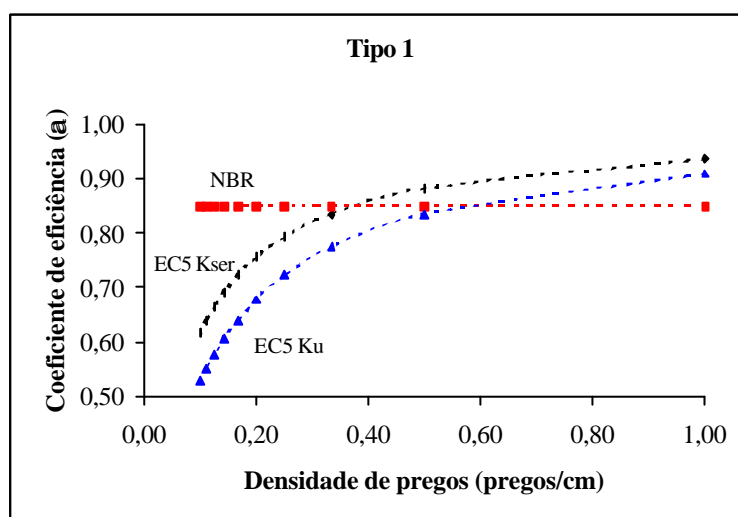
O espaçamento entre pregos varia do espaçamento mínimo admitido pela NBR 7190 até o espaçamento de 10 cm.

Nas figuras 71, 72, 73 e 74 é mostrada a variação do valor do coeficiente de eficiência para as vigas Tipo 1 e 2, em função da quantidade de pregos. Para cada tipo de viga são construídos dois gráficos. O primeiro apresenta na abcissa o espaçamento entre os pregos, e o segundo, a densidade de pregos por centímetro de comprimento.



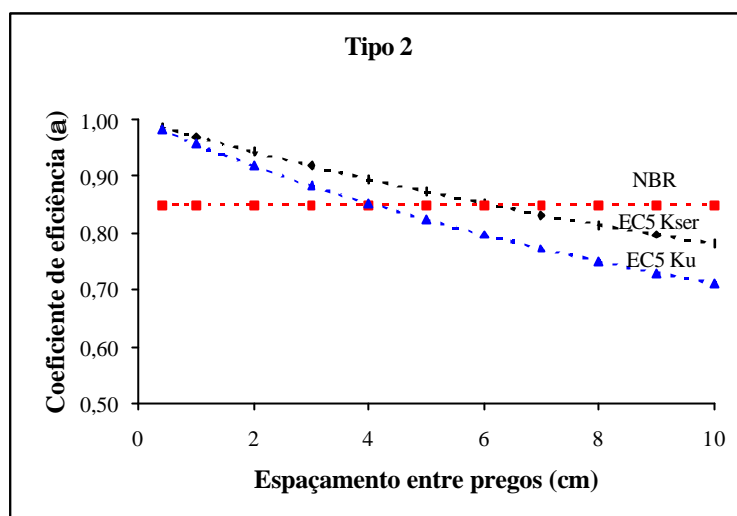


**Figura 71** – Coeficiente de eficiência x espaçamento entre pregos – Viga Tipo 1.

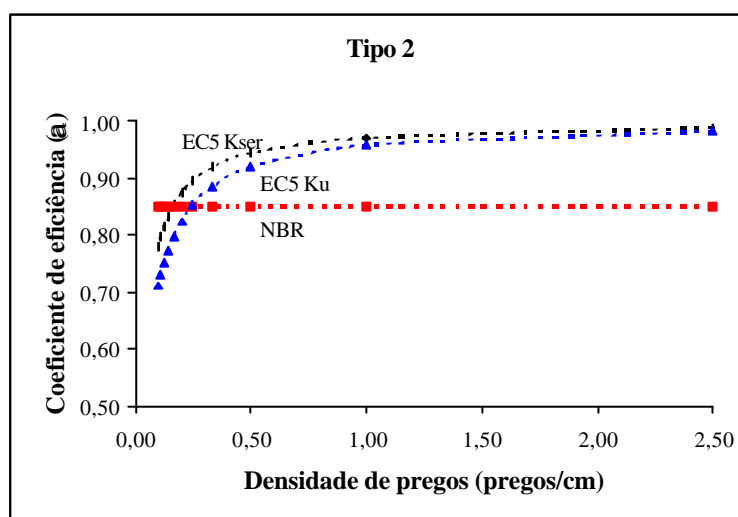


**Figura 72** – Coeficiente de eficiência x densidade de pregos – Viga Tipo 1

Estes gráficos ilustram uma das principais diferenças entre os critérios de dimensionamento da norma brasileira e europeia. A norma brasileira admite um coeficiente de eficiência constante independente do tipo e quantidade de conectores, já o critério da norma europeia considera esta variação.



**Figura 73** – Coeficiente de eficiência x espaçamento entre pregos – Viga Tipo 2



**Figura 74** – Coeficiente de eficiência x densidade de pregos – Viga Tipo 2

A seguir são apresentados os diagramas de carga permanente distribuída em função do espaçamento entre pregos e densidade de pregos. São apresentadas curvas para cada um dos estados limites. As verificações foram efetuadas para o estado limite de utilização (flecha – curva  $\delta$ ) e para os estados limites últimos (tensão normal, tensão de cisalhamento e força no conector –  $\sigma$ ,  $\tau$  e  $F$ , respectivamente).



