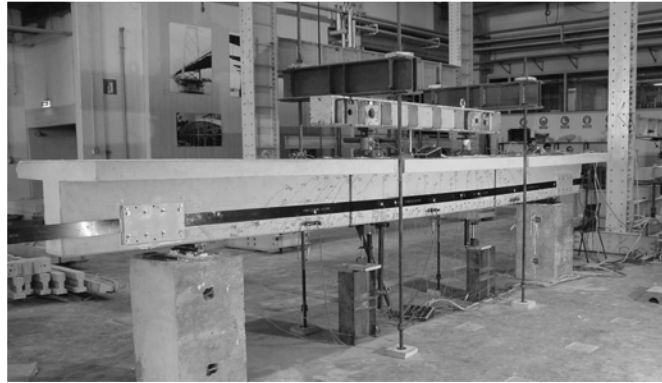




ICIST

Reforço à flexão de vigas com Laminados de CFRP Pré-esforçados



Paulo França



ICIST

Introdução

- Apresenta-se uma solução de reforço à flexão de vigas com laminados de carbono (CFRP) pré-esforçados;
- Discutem-se os resultados obtidos nos ensaios realizados em vigas à escala real com o referido sistema;
- Modelação numérica das vigas ensaiadas e da aplicação deste sistema de reforço noutras situações;
- Apresentam-se as conclusões.



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

ICIST

Reforço com CFRP Pré-Esforçado

- O sistema utilizado foi concebido para o reforço de lajes com laminados de CFRP Pré-Esforçados;
- Dispõe de duas chapas de ancoragem nas extremidades do laminado fixadas ao betão por intermédio de 8 conectores;
- A sua aplicação em vigas obriga à colocação nas faces laterais para evitar a intersecção dos conectores com as armaduras;
- A perda de braço no momento resistente é compensado pela utilização de material nas duas faces das vigas;
- Garras metálicas nas extremidades do laminado garantem, por atrito, a fixação do mesmo durante a aplicação do pré-esforço.



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

ICIST

Propriedades dos Materiais

- Betão C20/25:

		Capacidade resistente à compressão do betão								
		Valor médio aos 28 dias				Valor médio no dia do ensaio				
Viga	Betonagem	Amostras	Cubo (MPa)	Cilind. (MPa)	Ensaio	Dias	Amostras	Cubo (MPa)	Cilind. (MPa)	
B1.6	B1.6-R	03-02-03	3	31,6	25,3	18-06-03	135	3	39,3	31,5
	B1.6-SW	30-01-03	3	30,2	24,2	21-06-03	142	3	39,1	31,3
B1.5	B1.5-R	14-02-03	1	32,6	26,1	23-06-03	129	-	-	-
	B1.5-SO	18-02-03	1	38,2	30,6	24-06-03	126	-	-	-
B2.6	B2.6-R	05-11-03	3	26,5	21,2	03-02-04	90	3	33,3	26,6
	B2.6-SW	27-02-03	1	31,7	25,4	28-05-03	90	-	-	-
B2.5	B2.5-R	25-02-03	1	29,8	23,8	17-02-04	357	-	-	-
	B2.5-SO-D	05-03-03	-	-	-	26-05-03	82	-	-	-
	B2.5-SO1	03-03-03	1	27,4	21,9	25-06-03	114	6	30,5	24,4
	B2.5-SO2	06-03-03	1	31,2	25,0	01-07-03	117	-	-	-

- Aço com $f_{yk} = 400$ MPa:

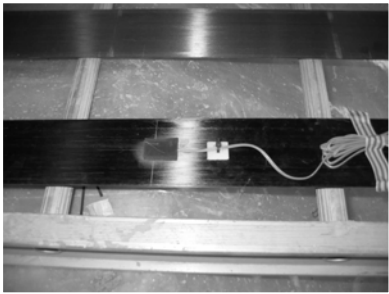

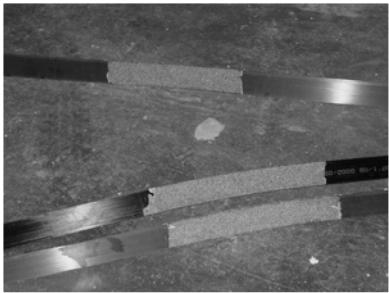

ϕ (mm)	f_t (MPa)				f_t (MPa)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
25	542,2	540,1	522,3	534,8	568,9	567,7	561,6	566,0
20	489,6	488,0	479,9	485,8	607,5	605,9	598,0	603,8
16	452,8	442,8	459,6	451,7	577,1	569,6	573,8	573,5
10	444,7	444,3	438,3	442,4	559,7	561,9	535,0	552,2
8	448,6	431,8	442,0	440,8	570,8	555,8	534,6	553,7
6	464,0	454,2	464,3	460,8	579,0	573,7	585,0	579,2

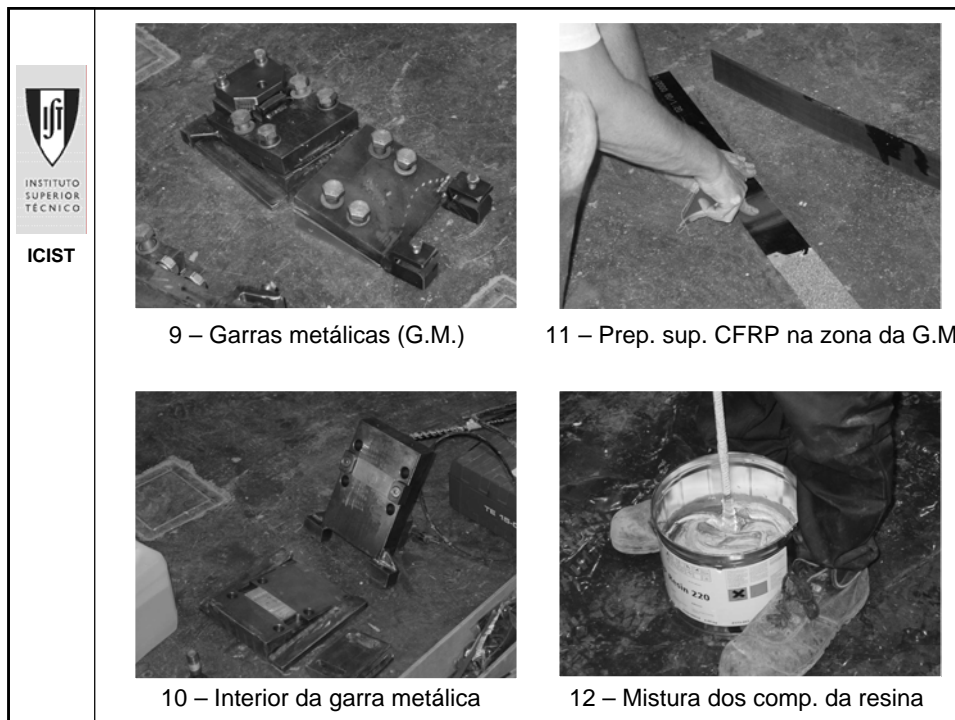
- Laminado CFRP:



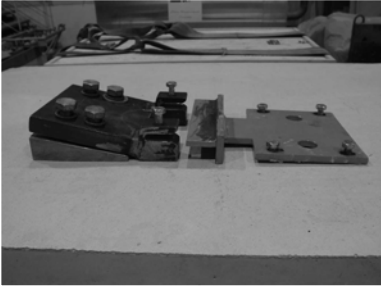
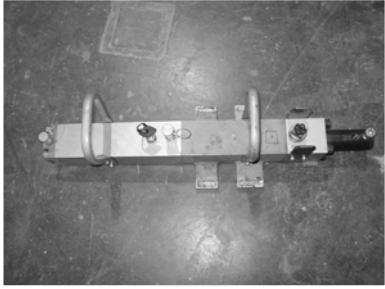
Laminado	b_t (mm) x t_t (mm)	A_t (cm ²)	E_t (GPa)	σ_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} (‰)
S&P CFK 150/2000 - 80x1,2	80 x 1,2	0,96	160	2500	15,6

nº de série	E_t (GPa)	σ_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} (‰)	Utilizado nas vigas
223397	166,0	2759	16,6	B2.5-SO-D e B2.6-SW
251044	170,5	3016	17,7	B1.6-SW, B1.5-SO, B2.5-SO1 e B2.5-SO2

 INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO ICIST	<h2>Processo de Aplicação</h2>	
		
		
	1 – Marcação da posição do laminado	3 – Equip. de aplicação do PE
	2 – Tratamento da superfície	4 – Laminados

 INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO ICIST		
	5 – Extensómetro no laminado	7 – Detecção das armaduras
		
	6 – Atrito melhorado na zona das C.A.	8 – Furação para os conectores



<p>INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO</p> <p>ICIST</p>		
	<p>17 – Colocação da C.A.</p>	<p>19 – Ancoragem passiva montada</p>
		
	<p>18 – Garra da ancoragem passiva</p>	<p>20 – Macaco Hidráulico</p>

<p>INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO</p> <p>ICIST</p>		
	<p>21 – Base do Macaco Hidráulico</p>	<p>23 – Garra da ancoragem activa</p>
		
	<p>22 – Macaco Hidráulico montado</p>	<p>24 – Montagem da base da garra</p>



Aplicação do Pré-esforço

- O PE desejado correspondia a uma extensão de 6‰ no CFRP
- Instrumentação utilizada durante esta fase:
 - 2 extensómetros em cada CFRP
 - Indicador da pressão do óleo
 - 2 testemunhos colados no CFRP a 2m e 4m da ancoragem passiva para medir o alongamento (12mm e 24mm)

ICIST



ICIST

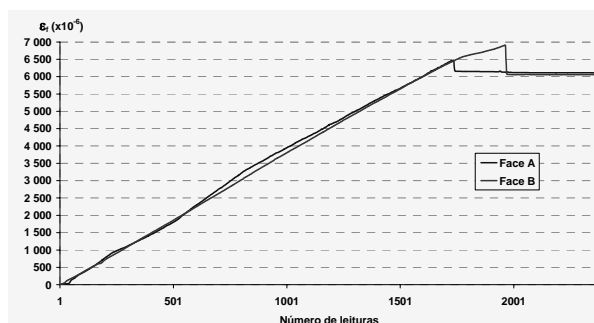
Viga	Lado	ϵ_{p0} (‰)	ΔL (mm)					
			Previsto		Testemunhos			
			x = 2.0 m	x = 4.0 m	x = 2.0 m	Erro	x = 4.0 m	Erro
B1.6-SW	A	6,1	12,2	24,4	18,0	5,8	30,0	5,6
	B	6,1	12,2	24,4	27,0	14,8	39,0	14,6
B1.5-SO	A	6,5	13,0	26,0	19,0	6,0	32,0	6,0
	B	6,8	13,6	27,2	19,0	5,4	32,0	4,8
B2.6-SW	A	460 bars => 6,0	12,0	24,0	-	-	-	-
	B	420 bars => 5,5	11,0	22,0	-	-	-	-
B2.5-SO-D	A	310 bars => 4,1	8,2	16,4	-	-	-	-
	B	310 bars => 4,1	8,2	16,4	-	-	-	-
B2.5-SO1	A	6,2	12,4	24,8	19,0	6,6	32,0	7,2
	B	7,1	14,2	28,4	21,0	6,8	35,0	6,6
B2.5-SO2	A	6,0	12,0	24,0	17,0	5,0	29,0	5,0
	B	6,1	12,2	24,4	18,5	6,3	30,5	6,1

- ♦ Causas do maior alongamento registado pelos testemunhos:
 - Escorregamento entre o CFRP e as garras metálicas;
 - Deformação de alguns conectores que fixam as chapas de anc.




ICIST

- ♦ Alguns casos registaram perda significativa de extensão no CFRP no final da aplicação do PE (quando a válvula de óleo é fechada)





- ♦ A solução é aplicar mais PE para que no final a extensão no CFRP seja a desejada



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO


ICIST

- Um laminado partiu-se longitudinalmente durante a aplicação do PE

- Resultados da aplicação do PE nos 12 laminados:

Viga	Lado	ϵ_{p0} (‰)	E_f (GPa)	σ_{10} (MPa)	A_f (cm ²)	P_0 (kN)
B1.6-SW	A	6,1	170,5	1 040,1	0,96	99,8
	B	6,1	170,5	1 040,1	0,96	99,8
B1.5-SO	A	6,5	170,5	1 108,3	0,96	106,4
	B	6,8	170,5	1 159,4	0,96	111,3
B2.6-SW	A	6,0	166,0	996,0	0,96	95,6
	B	5,5	166,0	913,0	0,96	87,6
B2.5-SO-D	A	4,1	166,0	680,6	0,96	65,3
	B	4,1	166,0	680,6	0,96	65,3
B2.5-SO1	A	6,2	170,5	1 057,1	0,96	101,5
	B	7,1	170,5	1 210,6	0,69	83,2
B2.5-SO2	A	6,0	170,5	1 023,0	0,96	98,2
	B	6,1	170,5	1 040,1	0,96	99,8
Média		5,9	-	995,7	-	92,8



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

ICIST

Ensaaios

- 10 vigas de betão armado com 6,7m de comprimento total e secção transversal T:
 - 4 vigas de referência (em BA iguais às que foram reforçadas)
 - 6 vigas reforçadas
- Vigas simplesmente apoiadas com vãos de 5m e 6m submetidas a 4 pontos de carga
- Características das vigas reforçadas:
 - Com e sem dano inicial
 - Duas percentagens de armadura ordinária ($\rho=1,6\%$ e $\rho=0,6\%$)
 - Ancoragens antes e depois dos apoios



ICIST

Designação das vigas

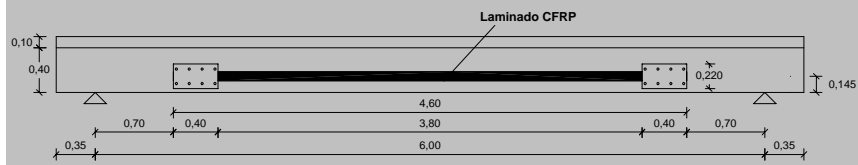
	Viga	ρ (%)	L (m)	Tipo	Ancoragens	Com dano
B1.6	B1.6-R	1,6	6	Referência	-	-
	B1.6-SW	"	"	Reforçada	Antes dos apoios	-
B1.5	B1.5-R	"	5	Referência	-	-
	B1.5-SO	"	"	Reforçada	Depois dos apoios	-
B2.6	B2.6-R	0,6	6	Referência	-	-
	B2.6-SW	"	"	Reforçada	Antes dos apoios	-
B2.5	B2.5-R	"	5	Referência	-	-
	B2.5-SO-D	"	"	Reforçada	Depois dos apoios	Sim
	B2.5-SO1	"	"	"	"	-
	B2.5-SO2	"	"	"	"	-



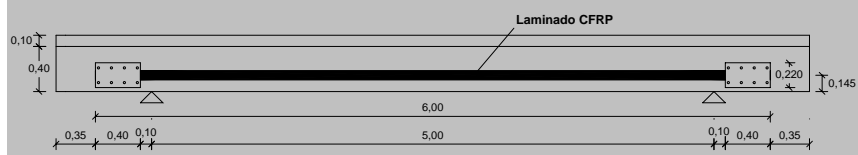
ICIST

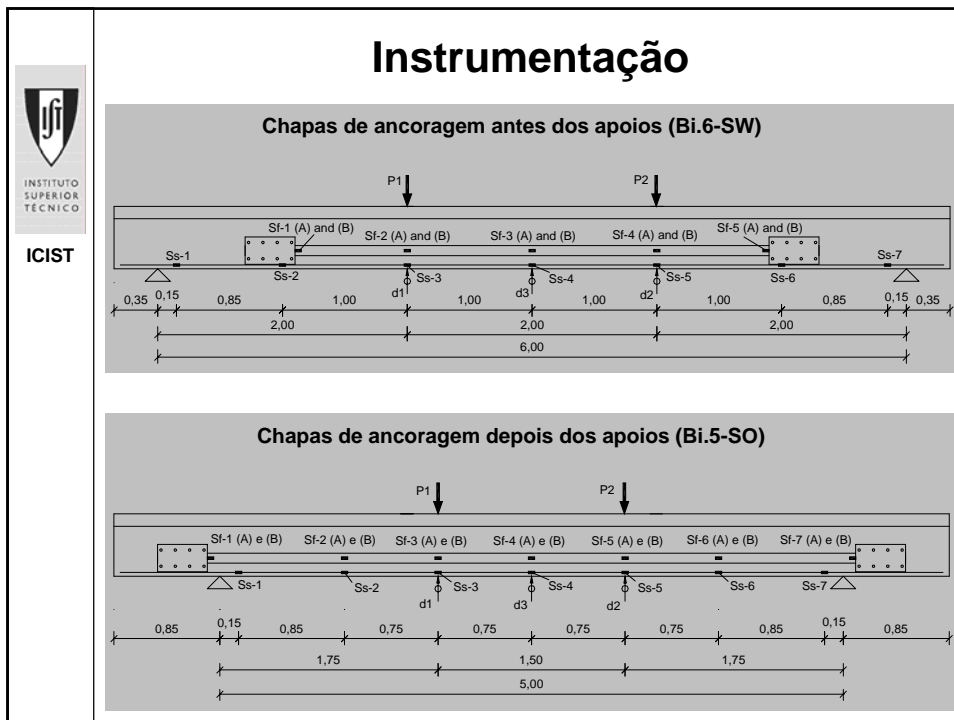
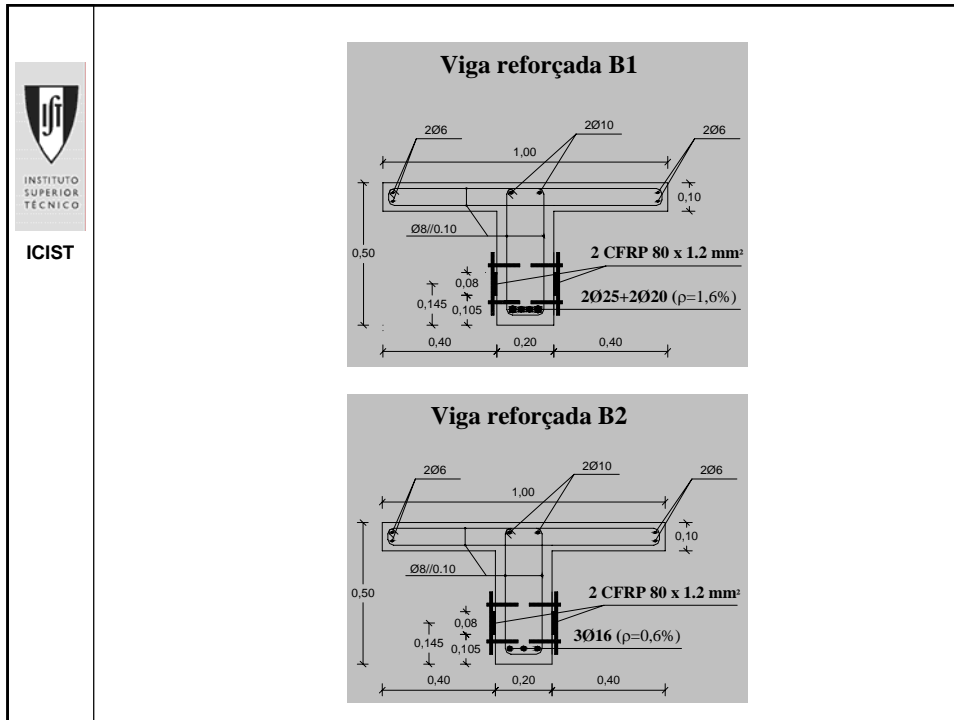
Reforço das vigas

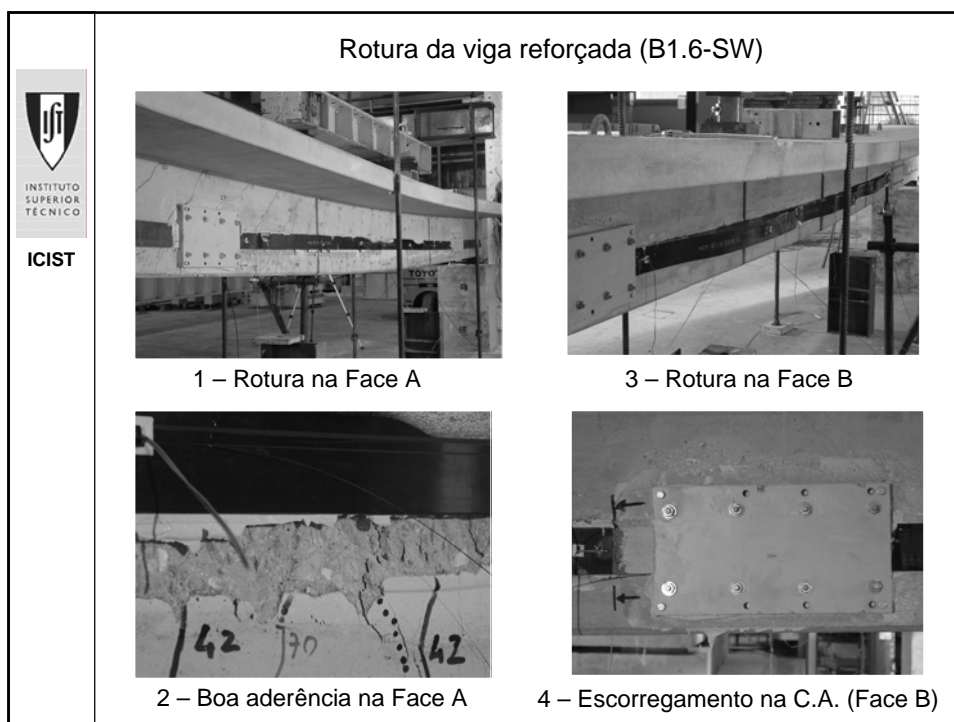
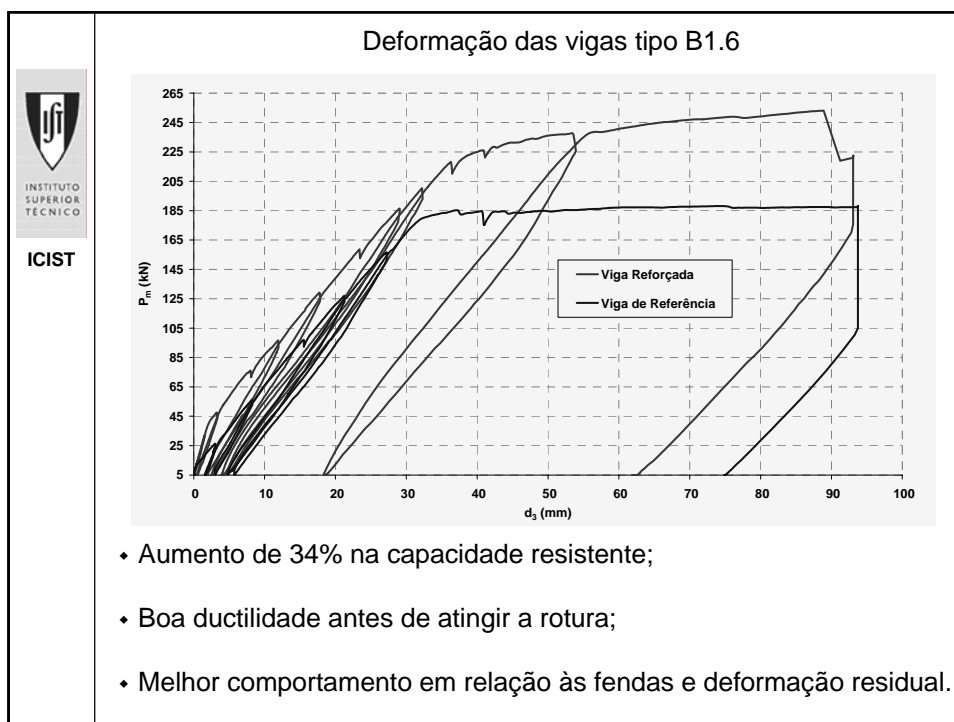
Chapas de ancoragem antes dos apoios (Bi.6-SW)

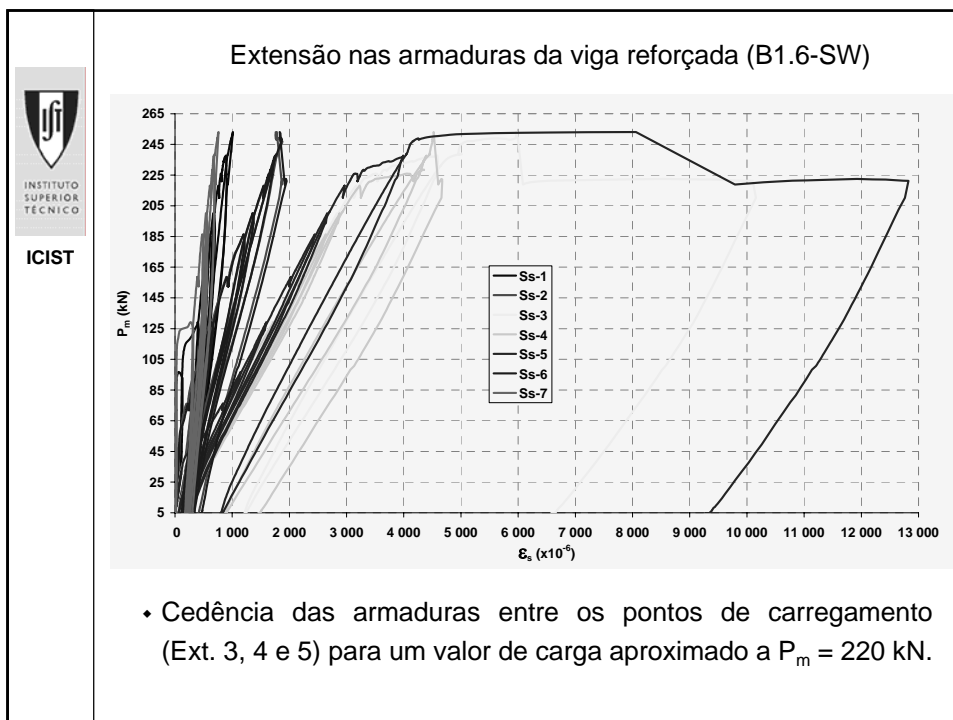
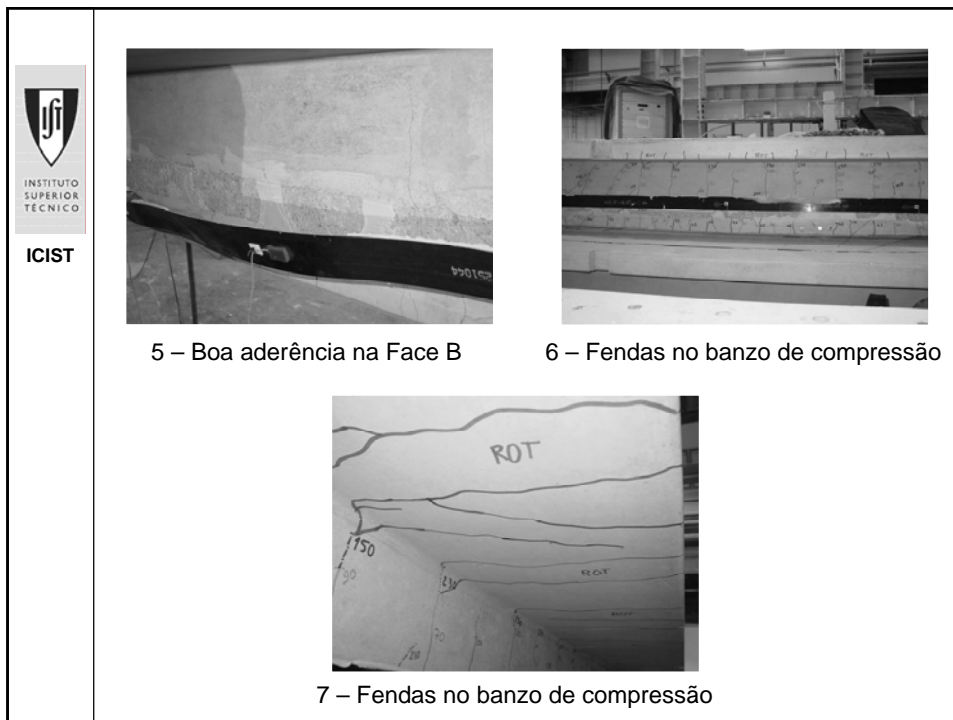


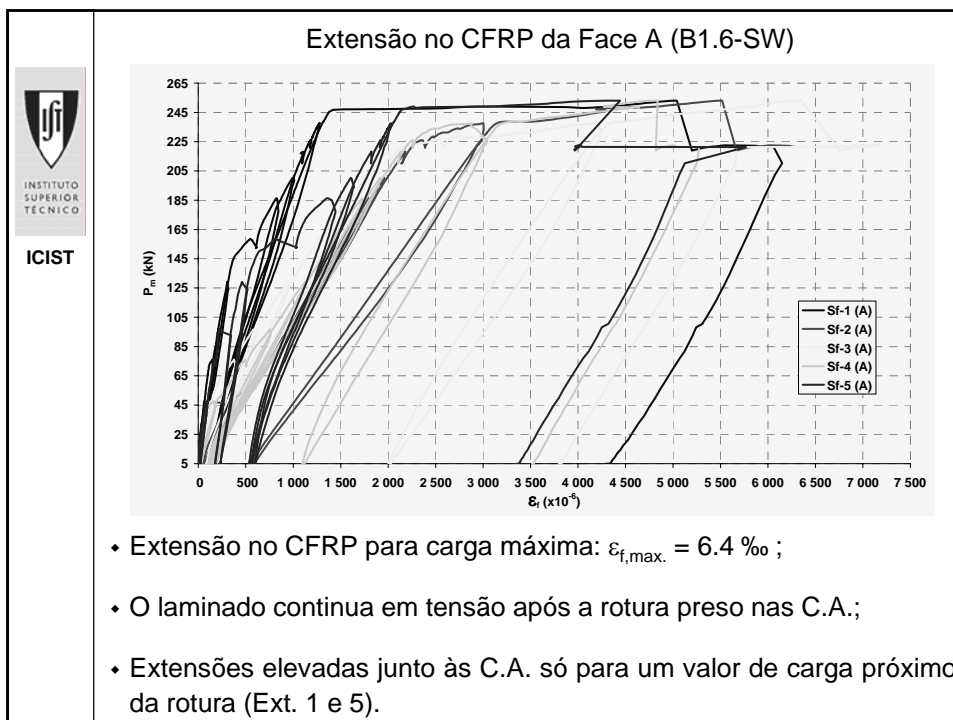
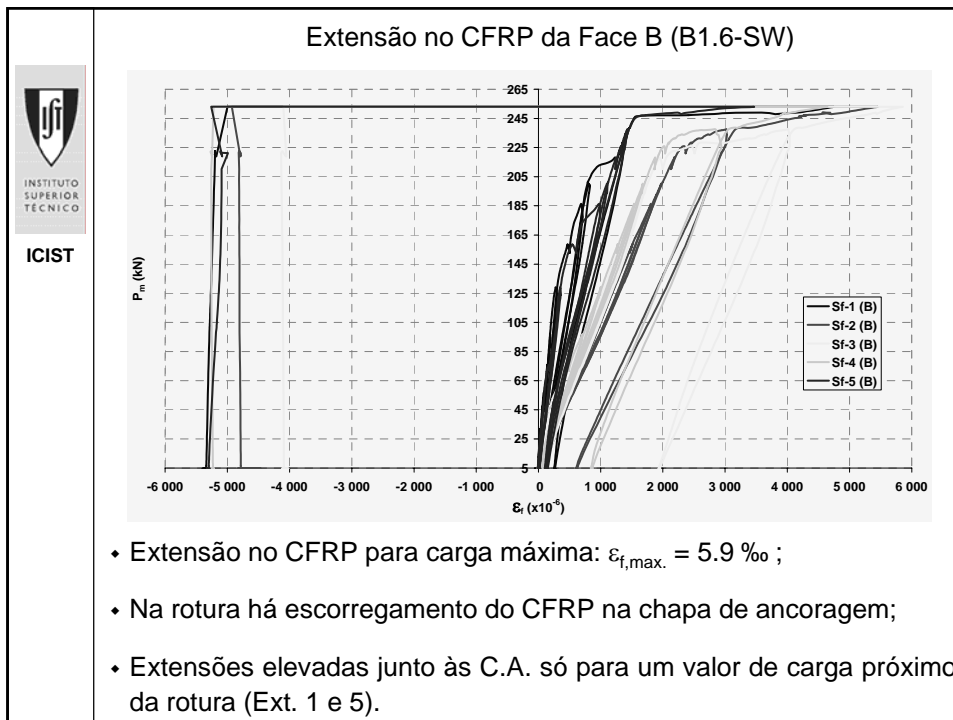
Chapas de ancoragem depois dos apoios (Bi.5-SO)

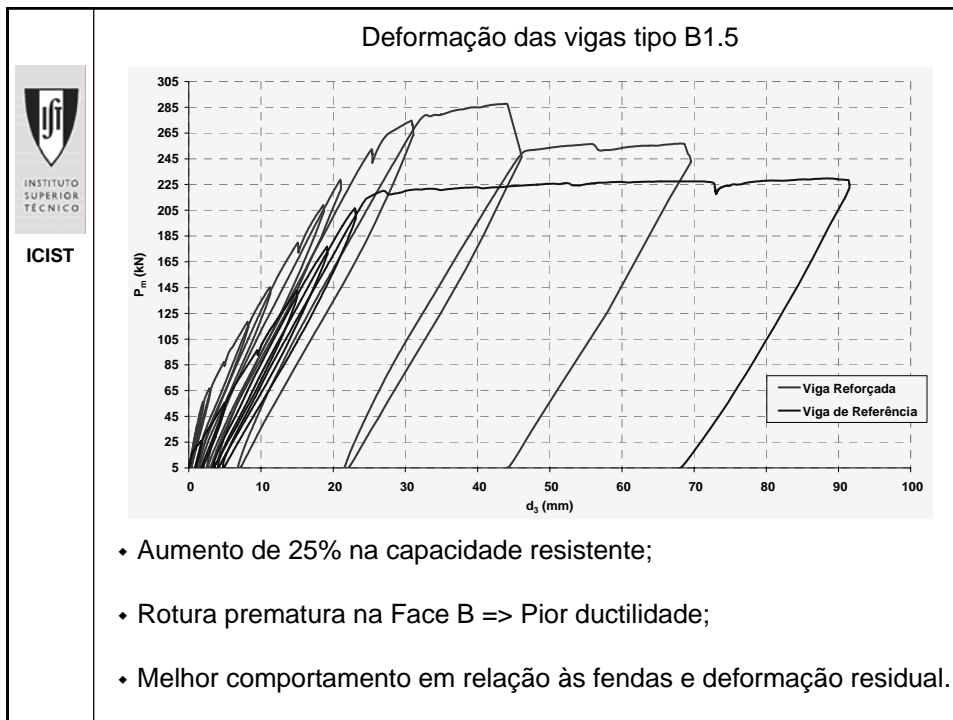


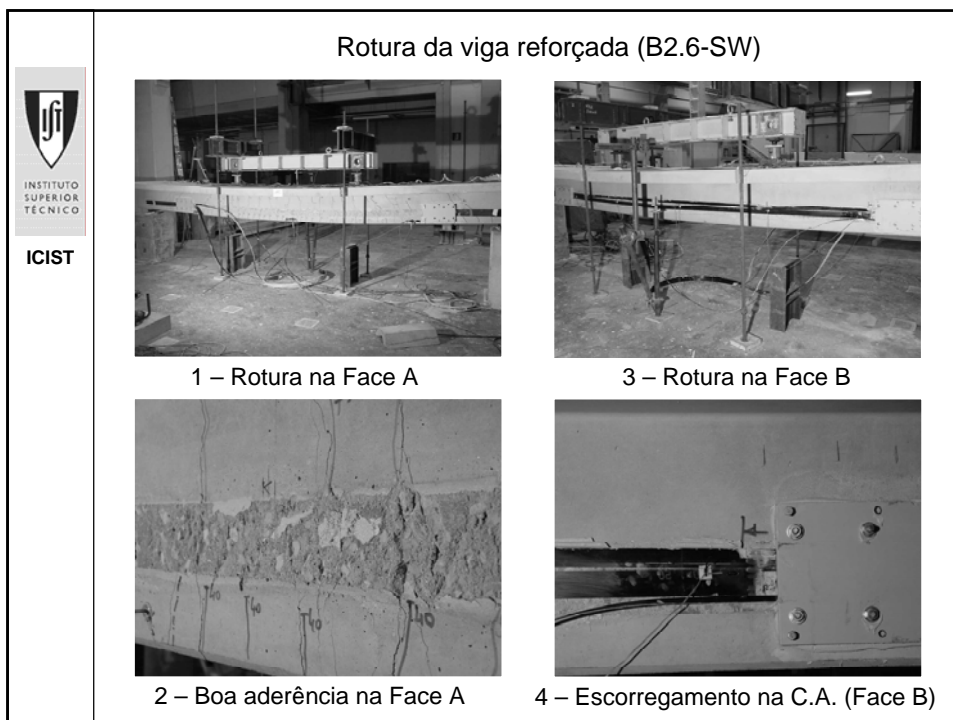
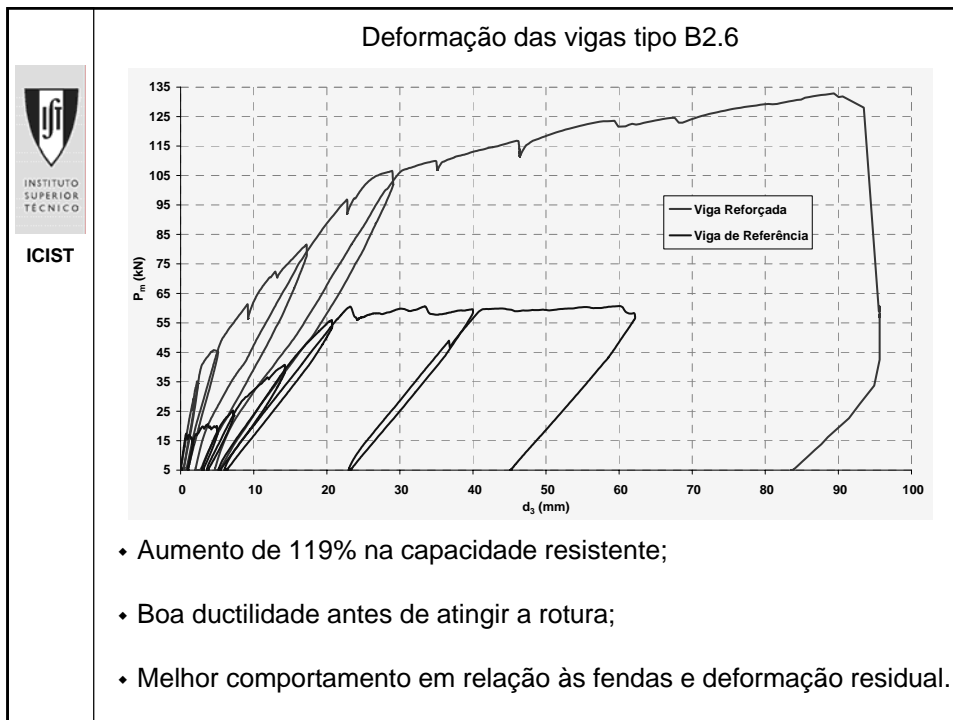


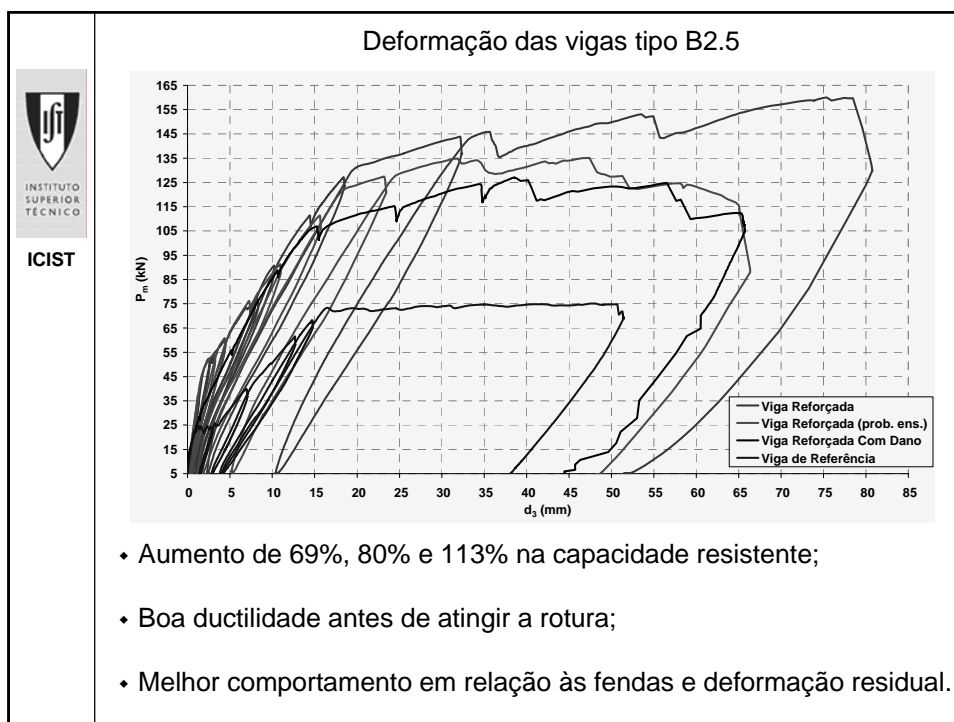
















INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

ICIST

Resumo de resultados


Viga	Lado	Modo de Rotura
B1.6-SW	A	Descolou entre chapas de anc.
	B	Escorregou sob uma das chapas de anc.
B1.5-SO	A	Descolou entre chapas de anc.
	B	Escorregou sob uma das chapas de anc.
B2.6-SW	A	Rotura do laminado
	B	Escorregou sob uma das chapas de anc.
B2.5-SO-D	A	Descolou entre chapas de anc.
	B	Descolou entre chapas de anc.
B2.5-SO1	A	Escorregou sob uma das chapas de anc.
	B	Descolou entre chapas de anc.
B2.5-SO2	A	Escorregou sob uma das chapas de anc.
	B	Descolou entre chapas de anc.

		Carga máxima				
Viga		P1 (kN)	P2 (kN)	P _m (kN)	P _{m,f} / P _{m,Ref}	P _{m,f} - P _{m,Ref} (kN)
B1.6	B1.6-R	187,7	189,3	188,2	-	-
	B1.6-SW	250,6	255,6	253,1	1,34	64,9
B1.5	B1.5-R	229,5	230,0	229,7	-	-
	B1.5-SO	283,2	292,4	287,8	1,25	58,0
B2.6	B2.6-R	59,7	61,6	60,7	-	-
	B2.6-SW	131,7	134,0	132,9	2,19	72,2
B2.5	B2.5-R	73,1	77,2	75,1	-	-
	B2.5-SO-D	130,0	124,0	127,0	1,69	51,9
	B2.5-SO1	134,8	135,7	135,1	1,80	60,0
	B2.5-SO2	160,6	159,7	160,1	2,13	84,9


 INSTITUTO
 SUPERIOR
 TÉCNICO
ICIST

♦ Resultados dos 12 laminados:

Viga	Lado	ϵ_{p0} (‰)	$\Delta\epsilon_f$ (‰)	ϵ_{fu} (‰)	E_f (GPa)	σ_{fu} (MPa)	A_f (cm ²)	F_{tu} (kN)
B1.6-SW	A	6,1	6,4	12,5	170,5	2 131,3	0,96	204,6
	B	6,1	5,9	12,0	170,5	2 046,0	0,96	196,4
B1.5-SO	A	6,5	4,8	11,3	170,5	1 926,7	0,96	185,0
	B	6,8	3,9	10,7	170,5	1 824,4	0,96	175,1
B2.6-SW	A	6,0	6,3	12,3	166,0	2 041,8	0,96	196,0
	B	5,5	5,8	11,3	166,0	1 875,8	0,96	180,1
B2.5-SO-D	A	4,1	4,9	9,0	166,0	1 494,0	0,96	143,4
	B	4,1	4,9	9,0	166,0	1 494,0	0,96	143,4
B2.5-SO1	A	6,2	4,2	10,4	170,5	1 773,2	0,96	170,2
	B	7,1	4,1	11,2	170,5	1 909,6	0,69	131,3
B2.5-SO2	A	6,0	5,0	11,0	170,5	1 875,5	0,96	180,0
	B	6,1	5,0	11,1	170,5	1 892,6	0,96	181,7

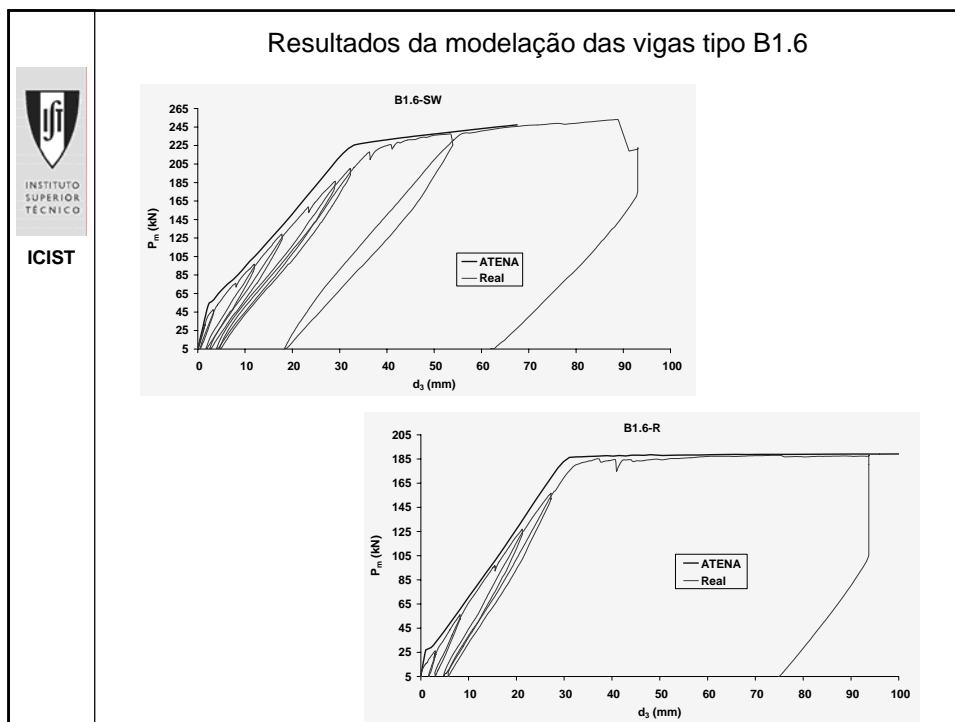
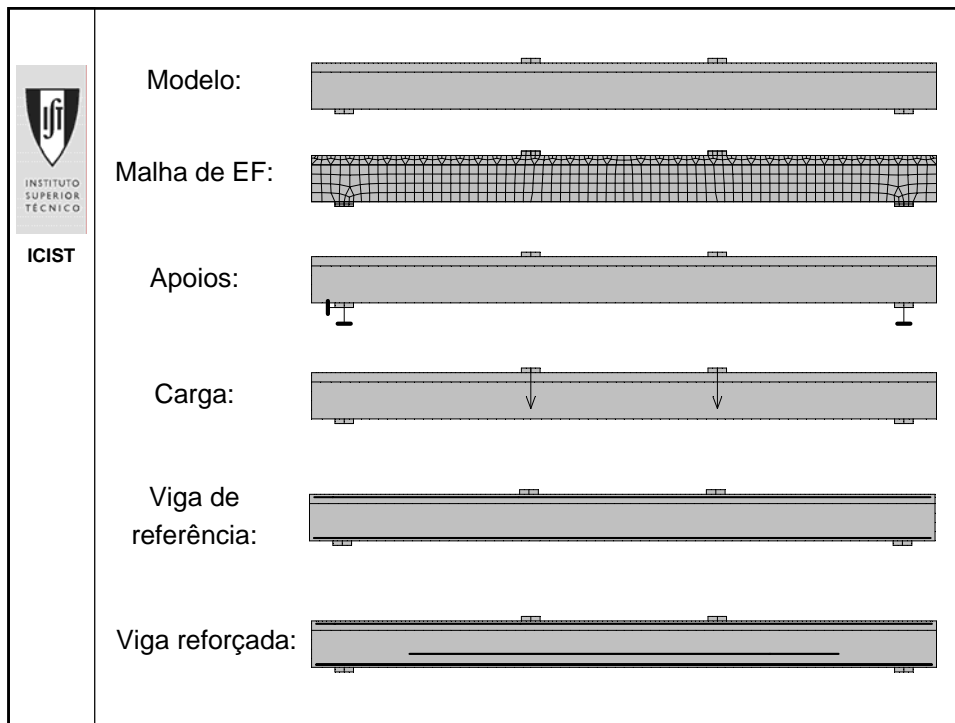

 INSTITUTO
 SUPERIOR
 TÉCNICO
ICIST

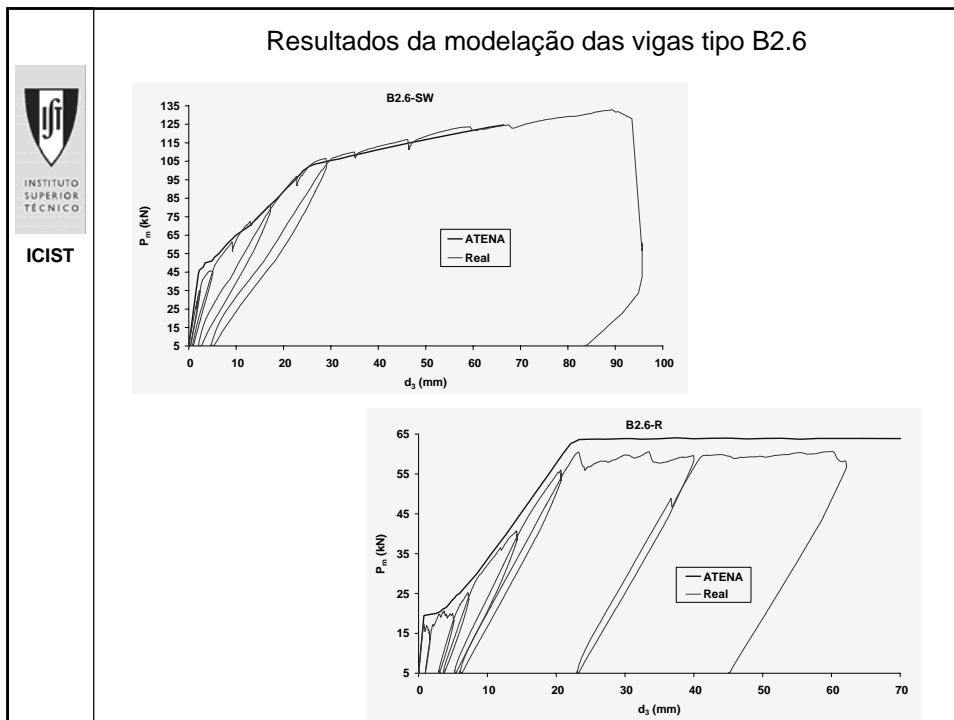
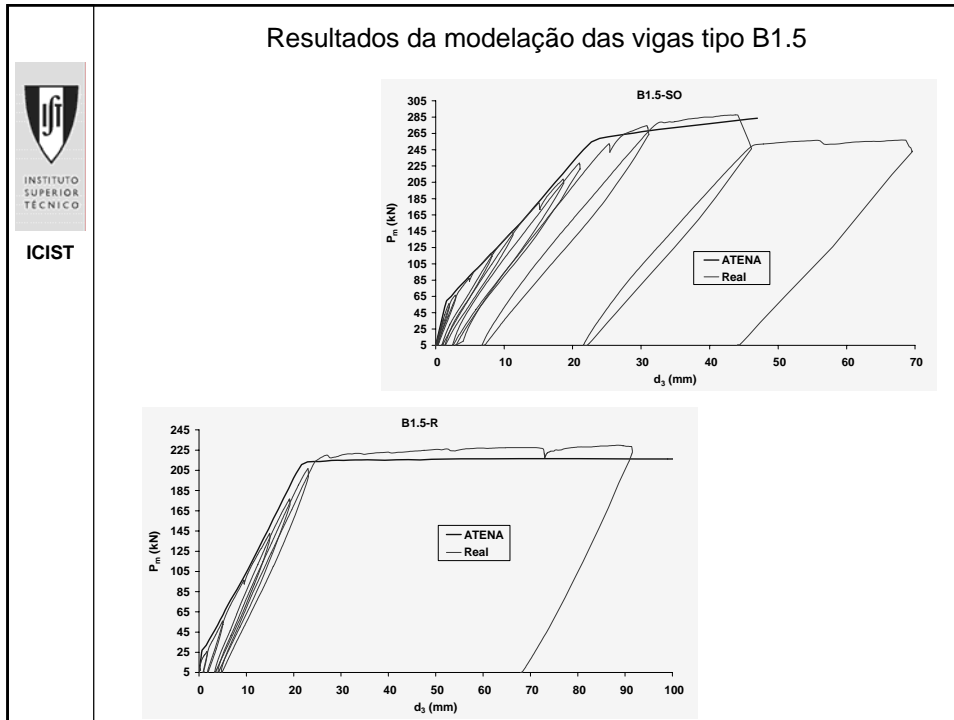
Conclusões dos ensaios

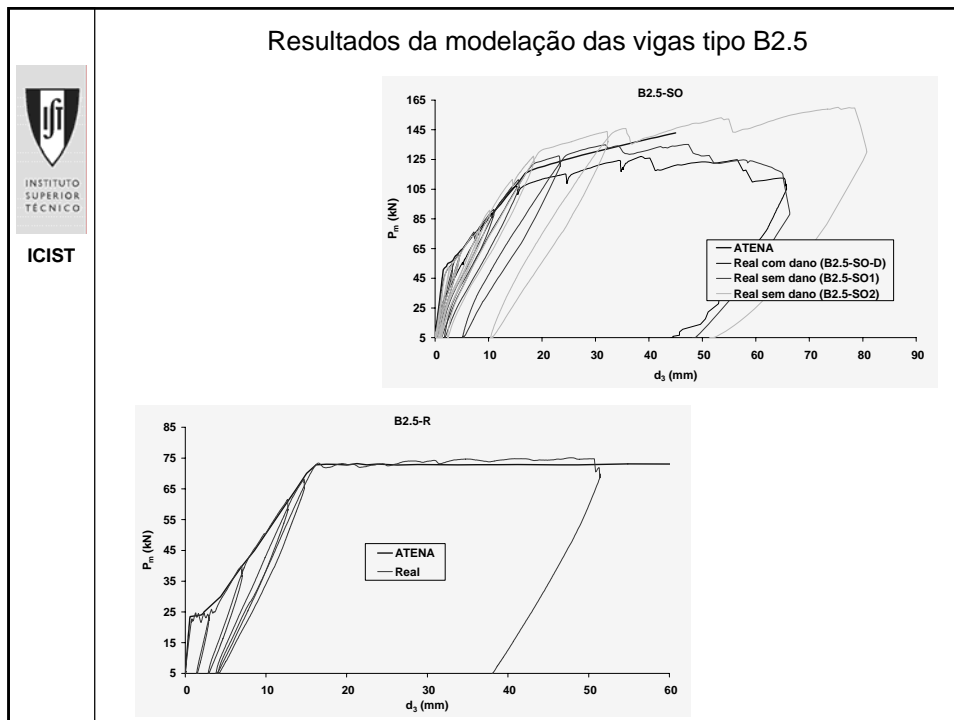
- ♦ Bom aumento na capacidade resistente (34% e 25%) de vigas com elevada percentagem de armadura ordinária;
- ♦ Aumento superior na capacidade resistente (entre 69% e 119%) de vigas com percentagem de armadura ordinária normal;
- ♦ Melhor aproveitamento do material CFRP devido à capacidade de mobilizar extensões máximas superiores (no mínimo 10.0‰ e em alguns casos superior a 12‰);

	ICIST
<h2>Conclusões dos ensaios</h2>	
<ul style="list-style-type: none">• O posicionamento lateral do CFRP não impediu a mobilização de uma boa extensão no mesmo;• Maior vão => Menor curvatura => Maior incremento de extensões;• Boa ductilidade antes de atingir a rotura;• Melhor comportamento em relação à fendilhação;• Possibilidade de reduzir a deformação da estrutura.	

	ICIST
<h2>Modelação das vigas ensaiadas</h2>	
<ul style="list-style-type: none">• Recurso a um programa (ATENA) de elementos finitos para análises planas não lineares de estruturas de betão armado;• Materiais com as propriedades médias;• CFRP com aderência perfeita ao betão => Rotura controlada pela extensão no laminado;• Modelo calibrado => possibilidade de extrapolar para outras situações.	








Modelação de viga contínua reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados

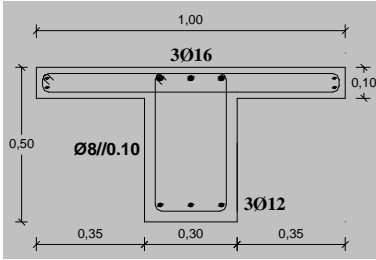
- Avaliar a influência de pré-esforçar os laminados de CFRP em diferentes soluções de reforço com este material;
- Avaliar a capacidade de redistribuição de momentos;
- Comparar com solução idêntica sem pré-esforço;
- Viga simplesmente apoiada de secção em T, com 2 vãos de 6.0m e com carregamento uniformemente distribuído:

The diagram shows a simply supported continuous beam of length 6.00m, subjected to a uniformly distributed load p . The beam has a T-shaped cross-section with a total height of 0.40m and a flange thickness of 0.10m. The beam is supported at two points, one at each end.


- Modelação feita do ponto de vista do dimensionamento;


 INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
ICIST

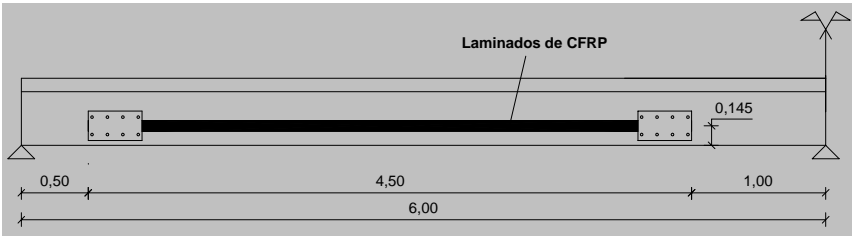
- Betão: C20/25 => $f_{cd} = 13,3 \text{ MPa}$; Aço: A400 => $f_{yd} = 348 \text{ MPa}$;
- Viga de referência em betão armado com $p_{sd} = 20 \text{ kN/m}$:
 - Dimensionada de acordo com distrib. elástica de esforços;
 - $M_{sd}^- = 90,0 \text{ kNm}$ e $M_{sd}^+ = 50,6 \text{ kNm}$.

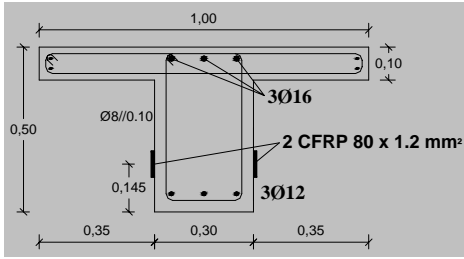


- Laminado de CFRP: S&P CFK 150 / 2000 – 80 x 1,2
- CFRP SEM PE => $\epsilon_{fud} = 6.5 \text{ ‰}$ (Fib – Bulletin 14);
- CFRP PE => $\epsilon_{fud} = 10.0 \text{ ‰}$ (resultado dos ensaios).

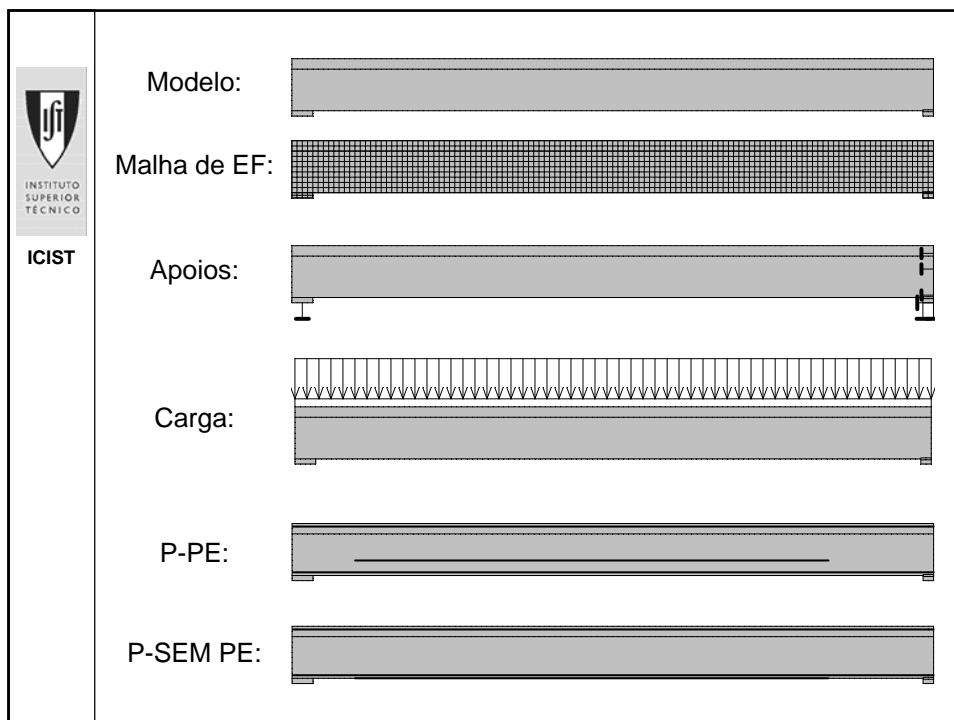
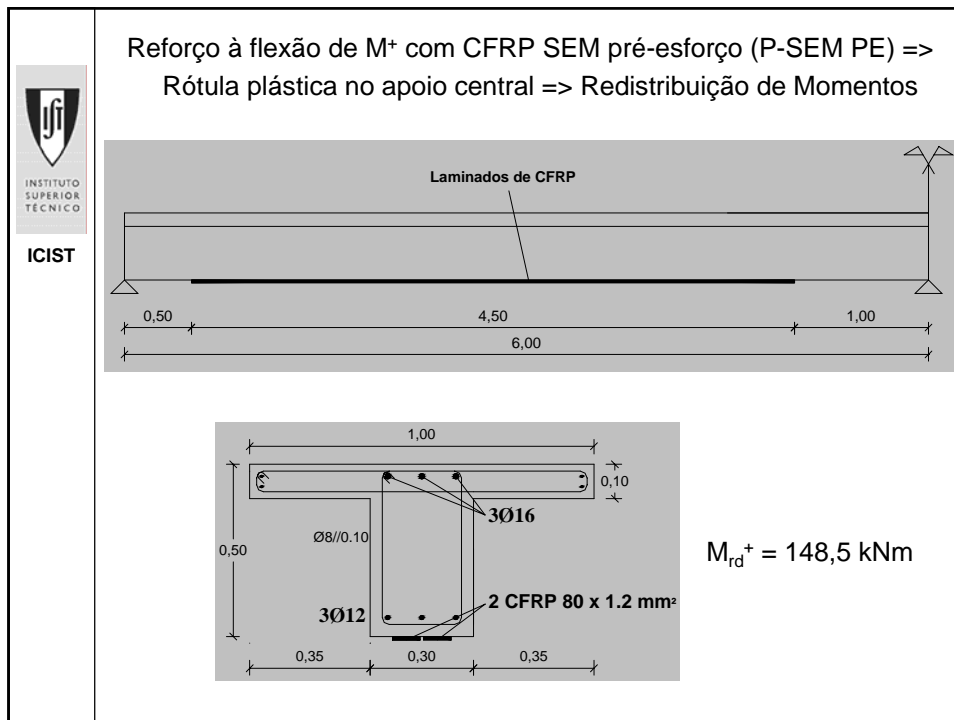

 INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
ICIST


Reforço à flexão de M^+ com CFRP pré-esforçado (P-PE) =>
 Rótula plástica no apoio central => Redistribuição de Momentos





$M_{rd}^+ = 153,9 \text{ kNm}$





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

• Aumento de carga previsto (igual para ambos) e correspondente redistribuição de momentos necessária (elevada):

Viga	M_{rd}^+ (kNm)	ΔM_{sd}^+ (kNm)	Δp_{sd} (kN/m)	p_{sd} (kN/m)	Redistribuição
P-PE	153,9	108,9	24,2	44,2	54,8%
P-SEM PE	148,5	103,5	23,0	43,0	53,5%

ICIST


• Resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos:

Viga	$p_{sd,max}$ (kN/m)			Redistribuição	Modo de Rotura
	Previsão	Obtido	O / P		
P-PE	44,2	45,0	1,8%	55,6%	Esmagamento do betão no apoio central
P-SEM PE	43,0	36,0	-16,3%	44,4%	Esmagamento do betão no apoio central

• Igual modo de rotura mas só P-PE atingiu valor de carga previsto;

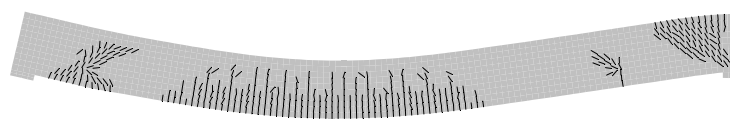
• P-PE suporta carga 25% superior;

• A rótula plástica sobre o apoio central é formada para uma carga superior no caso de P-PE.




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

• Deformada de P-PE para $p = 36$ kN/m:



ICIST

• Deformada de P-SEM PE para $p = 36$ kN/m:

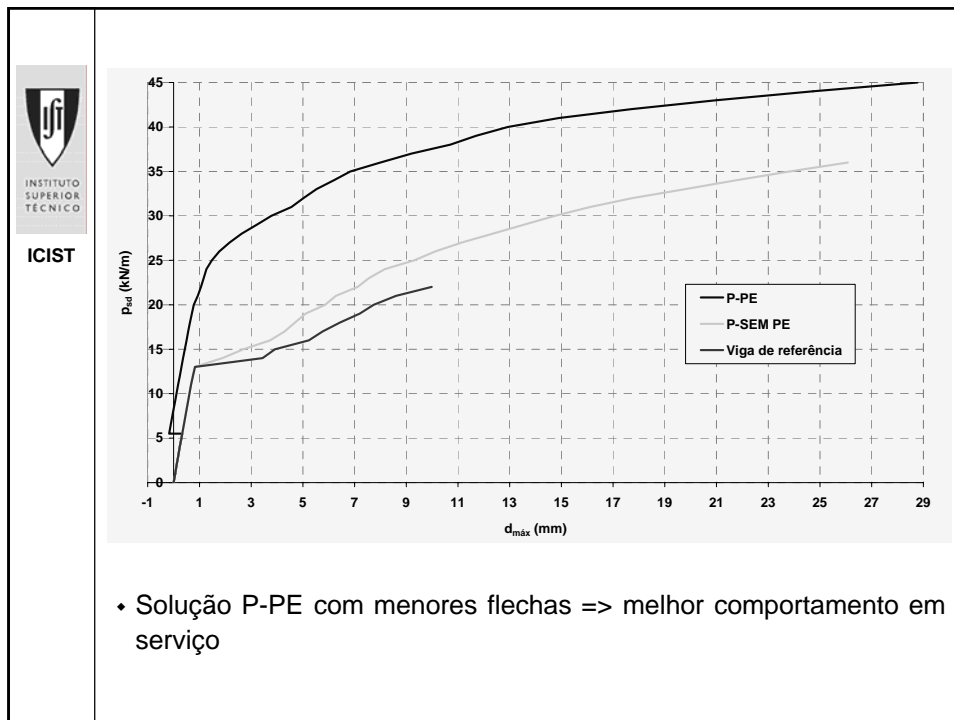


Secção do apoio central		$p_{sd} = 36$ kN/m	$p_{sd} = 45$ kN/m
ϵ_s (e-3)	P-PE	3,8	58,4
	P-SEM PE	66,7	-
ϵ_c (e-3)	P-PE	0,9	3,5
	P-SEM PE	3,3	-
w (mm)	P-PE	0,2	3,2
	P-SEM PE	3,6	-

Secção do vão		$p_{sd} = 36$ kN/m	$p_{sd} = 45$ kN/m
ϵ_r (e-3)	P-PS	6,9	9,4
	P-NoPS	3,8	-

A rótula sobre o apoio central de P-PE tem capacidade de rotação para $p > 36$ kN/m;

Melhor aproveitamento do CFRP na solução P-PE.



- ### Conclusões do exemplo modelado
- ♦ Mesma capacidade resistente prevista mas a solução com PE suportou uma carga máxima 25% superior;
 - ♦ Solução com PE com melhor comportamento em serviço (menor flecha e abertura de fendas para a mesma carga);
 - ♦ Melhor aproveitamento do material CFRP na solução com PE;
 - ♦ O PE aumentou a capacidade de redistribuição de momentos.