

LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Ciclo de Palestras Técnicas 2005-2006

4ª Sessão – P4: 24 de Maio de 2006



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Salvador Dias

Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil

*Estudo inserido no plano de trabalhos de preparação da Tese de Doutoramento
Orientação: Prof. Joaquim Barros (Universidade do Minho)*



2

INDICE GERAL

- 1 – Reforço ao Corte com Compósitos de CFRP
- 2 – Técnica de Reforço NSM
- 3 – Programa Experimental (Estudo comparativo: NSM vs EBR)
 - 3.1 – Concepção dos modelos
 - 3.2 – Caracterização dos materiais
 - 3.3 – Aplicação do reforço de CFRP
 - 3.4 – Sistema de ensaio
 - 3.5 – Apresentação dos resultados
 - 3.6 – Conclusões
- 4 – Aplicação de um modelo analítico
(valores analíticos vs valores experimentais)
- 5 – Investigação em curso



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Porquê reforçar ao corte ?

- ✓ Necessidade de uma mudança do tipo de utilização (aumento das cargas)
- ✓ Eventuais erros de projecto e/ou de construção
- ✓ Redução da resistência dos materiais resultantes da sua degradação
- ✓ Envelhecimento dos materiais
- ✓ Alterações nos códigos de dimensionamento com disposições mais severas
- ✓ Ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo)
- ✓ Mudança do modo de rotura frágil por corte a dúctil por flexão



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

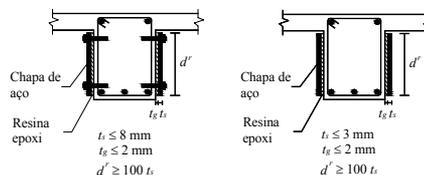


4

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Técnicas de reforço tradicionais

Utilização de armaduras exteriores



- ✓ Técnica com procedimentos bem definidos pela comunidade técnica
- ✓ Envolve materiais de comportamento extensivamente estudado
- ✓ Possibilidade de deterioração da ligação betão-adesivo-aço (corrosividade do aço)
- ✓ Dificuldade de manipulação pesadas chapas especialmente em superfícies curvas
- ✓ Limitação do comprimento das chapas por restrições de transporte podendo dar origem a juntas
- ✓ Necessidade de suportes durante o tempo de cura das colas



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

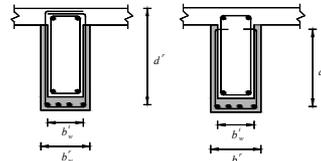
Salvador Dias



1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Técnicas de reforço tradicionais

Encamisamento das secções



- ✓ Técnica com procedimentos bem definidos pela comunidade técnica
- ✓ Envolve materiais de comportamento extensivamente estudado
- ✓ Maior protecção à acção do fogo e à corrosão das armaduras suplementares
- ✓ Aumento das dimensões da secção transversal nem sempre admissível do ponto de vista arquitectónico
- ✓ É necessário um determinado tempo até o betão de encamisamento ganhar resistência e a estrutura reforçada possa ser posta em serviço
- ✓ Necessidade de suportes



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



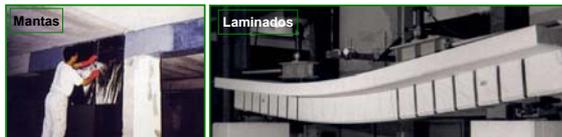
1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Necessidade de desenvolver novas técnicas de reforço :

- Minimização os efeitos na arquitectura
- Aplicação rápida e simples
- Materiais leves com elevadas características mecânicas e de durabilidade

Técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP

Colagem Externa (EBR)
 “Externally Bonded Reinforcement”



Inserção no betão de recobrimento (NSM)
 “Near Surface Mounted”



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



7

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Materiais compósitos de CFRP:

- ✓ **Materiais de elevado desempenho** – soluções de reforço com poucas alterações a nível arquitectónico
- ✓ **Reduzido peso específico** – facilidade de transporte e manuseamento
- ✓ **Disponibilidade com dimensões quase ilimitadas** – elimina a necessidade de juntas
- ✓ **Elevada resistência à corrosão** – aplicação em zonas costeiras
- ✓ **Adaptação a superfícies curvas** – difícil e oneroso de conseguir por exemplo com as chapas metálicas
- ✓ **Fácil e simples execução**

Custos dos materiais e Resistência à acção do fogo



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



8

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP



Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Betão	20-40	5-60	1-3	2400
Aço	200-210	240-690	240-690	7800
Fibras de carbono *	200-800	-	2500-6000	1750-1950

* - Propriedades das fibras de carbono e não do composto.



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

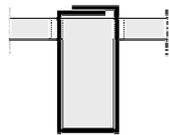
Reforço ao corte com compósitos de CFRP: colocar as fibras orientadas transversalmente ao eixo da viga ou segundo a normal às potenciais fendas de corte



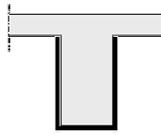
Aumento da capacidade resistente ao esforço transverso

Colagem externa de CFRP - configurações de reforço

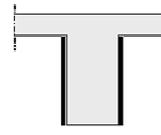
a) Configurações de superfície colada



Envolvendo a secção



Forma em U



Colagem apenas nas faces laterais



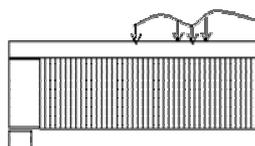
Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

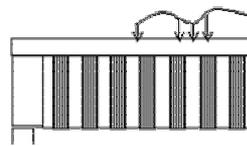
Salvador Dias

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

b) Distribuição do reforço de CFRP

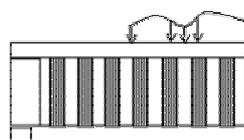


Forma contínua

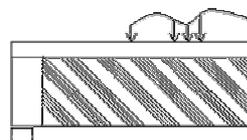


Forma discreta

c) Orientação das fibras



90°



45°



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

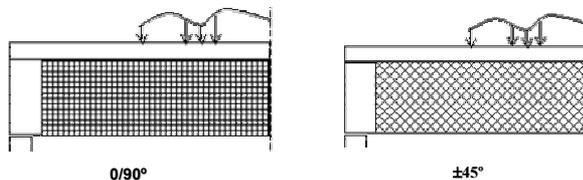
Salvador Dias



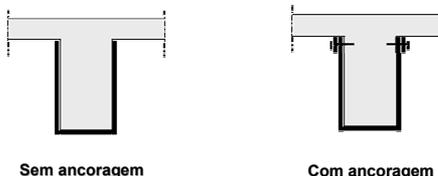
11

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

d) Sobreposição de camadas com orientação diferente das fibras



e) Mecanismos de ancoragem



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



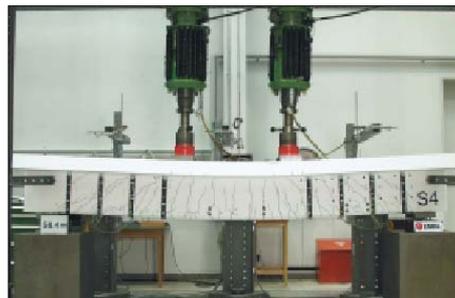
12

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Utilização de laminados em forma de L



Extremidade rugosa



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

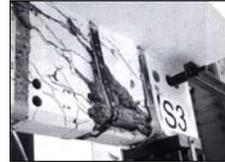


13

1 – Reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP

Colagem externa de CFRP no reforço ao corte (mantas e laminados):

- ✓ Acréscimo da resistência ao corte de vigas de betão armado
- ✓ Modos de ruína prematureos e frágeis (destacamento do reforço)



Níveis baixos da tensão máxima mobilizada nos CFRP

- ✓ Baixa segurança à acção do fogo, às condições ambientais adversas e a actos de vandalismo

Introdução de faixas de laminado de CFRP no betão de recobrimento



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

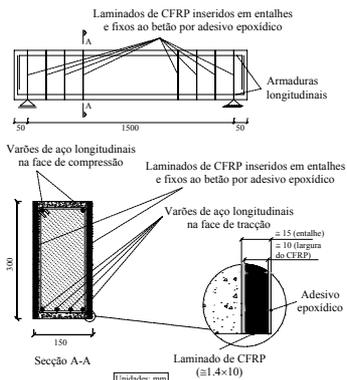
Salvador Dias

2 – Técnica de reforço NSM

Introdução de faixas de laminado de CFRP no betão de recobrimento



Técnica de reforço Near Surface Mounted (NSM)



- ✓ Área de colagem é dupla da mobilizada na técnica da colagem externa



Aumento do grau de fixação do CFRP

- ✓ Não necessita de preparação da superfície
- ✓ Mais fácil de aplicar
- ✓ Maior protecção à acção do fogo, às condições ambientais adversas e actos de vandalismo



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

A – Marcação e abertura dos entalhes



Os entalhes, com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade, são executados com um equipamento que dispõe de um disco de corte e dispositivos de ajuste da profundidade e do alinhamento do entalhe.



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

B – Limpeza dos entalhes



Após a abertura dos entalhes procede-se à sua limpeza por intermédio de jactos de ar



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



17

2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

C – Corte e limpeza dos laminados de CFRP



Corte dos laminados com as dimensões desejadas: **Laminados fornecidos em rolo com a secção transversal de $\approx 1.4 \times 10$ mm² (apenas necessário corte na direcção transversal das fibras)**

Limpeza dos laminados com um desengordurante



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

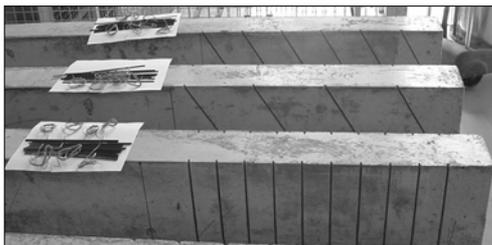


18

2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

D – Inserção dos laminados de CFRP nos entalhes



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

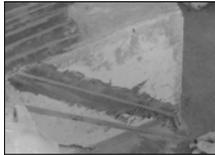
Salvador Dias



2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

D – Inserção dos laminados de CFRP nos entalhes



Aplicação de adesivo no entalhe, aplicação do adesivo no laminado, inserção do laminado de CFRP no entalhe e acabamento final com remoção do adesivo em excesso



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



2 – Técnica de reforço NSM

Técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

Aspecto final da viga após o reforço ao corte usando a técnica NSM



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

Quatro grupos de vigas de betão armado

2 da Série A (L= 1.60 m; b = 0.15 m; h = 0.30 m)

(4φ10 longitudinais na face traccionada/4φ12 longitudinais na face traccionada)

2 da Série B (L= 1.0 m; b = 0.15 m; h = 0.15 m)

(4φ10 longitudinais na face traccionada / 4φ12 longitudinais na face traccionada)

Três formas de incrementar a resistência ao esforço transverso (dimensionamento de forma a rotura ser por corte e para cargas semelhantes):

Estribos de aço convencionais (φ6)

Faixas de manta de CFRP coladas externamente

Laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuadas no betão de recobrimento (verticais e inclinados a 45°)

Em cada grupo existe uma viga de referência apenas com armadura longitudinal



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

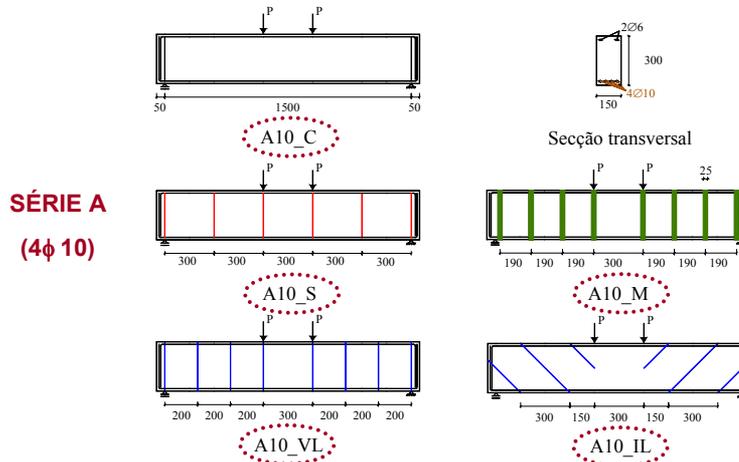
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.1 – Concepção dos modelos



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

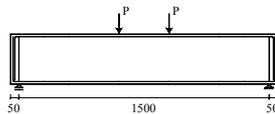
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.1 – Concepção dos modelos

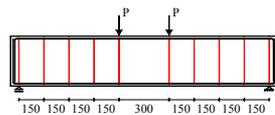
SÉRIE A
(4φ 12)



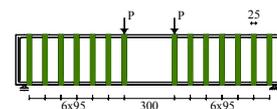
A12_C



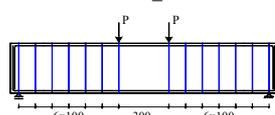
Secção transversal



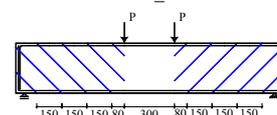
A12_S



A12_M



A12_VL



A12_IL



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

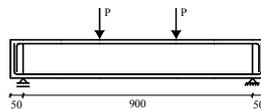
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.1 – Concepção dos modelos

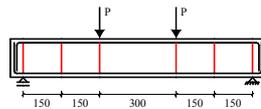
SÉRIE B
(4φ 10)



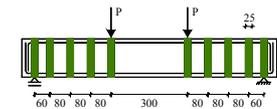
B10_C



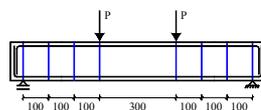
Secção transversal



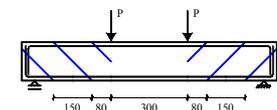
B10_S



B10_M



B10_VL



B10_IL



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

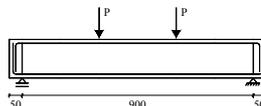
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.1 – Concepção dos modelos

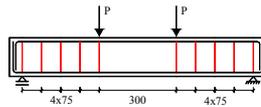
SÉRIE B
(4φ 12)



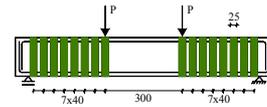
B12_C



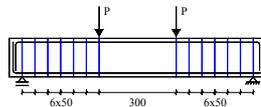
Secção transversal



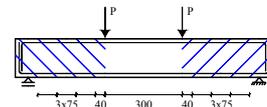
B12_S



B12_M



B12_VL



B12_IL



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.2 – Caracterização dos materiais: **Betão e aço**



Betão



Aço



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



27

3 – Programa Experimental

3.2 – Caracterização dos materiais: **Betão e aço**

	Vigas	28 dias de idade		Data do ensaio das vigas	
Betão	Série A	$f_{cm} = 37.6$ MPa (C30/37)		$f_{cm} = 49.2$ MPa (227 dias de idade)	
	Série B	$f_{cm} = 49.5$ MPa (C40/50)		$f_{cm} = 56.2$ MPa (105 dias de idade)	
	Vigas	$\phi 6$ (longitudinal)	$\phi 6$ (transversal)	$\phi 10$	$\phi 12$
Aço	Série A	$f_{sym} = 622$ MPa	$f_{sym} = 540$ MPa	$f_{sym} = 464$ MPa	$f_{sym} = 574$ MPa
		$f_{sum} = 702$ MPa			$f_{sum} = 672$ MPa
	Série B	$f_{sym} = 618$ MPa			$f_{sym} = 571$ MPa
		$f_{sum} = 691$ MPa	$f_{sum} = 694$ MPa	$f_{sum} = 581$ MPa	$f_{sum} = 673$ MPa



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



28

3 – Programa Experimental

3.2 – Caracterização dos materiais: **CFRP**

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (%)	Espessura (mm)
MBrace Manta C5-30	Primário	12	0.7	30	-
	Resina	54	3	25	-
	Manta	3000	390	8	0.167
MBrace Laminado LM1	Adesivo	-	7	-	-
	Laminado	2200	150	14	1.4



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

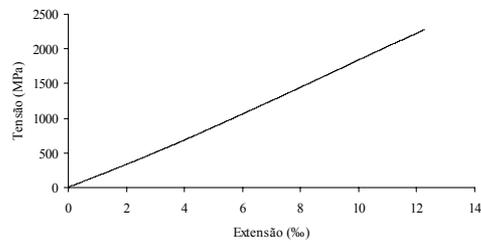
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.2 – Caracterização dos materiais: CFRP



Principais propriedades			
Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Extensão última (%)	Espessura (mm)
2200	150	1.4	1.4
2286	166	1.3	1.4

Valores de catálogo

Valores experimentais



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

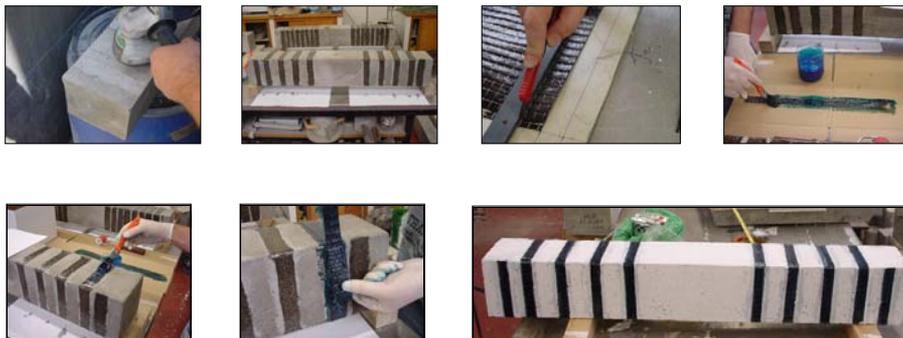
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.3 – Aplicação do reforço de CFRP

Reforço ao corte com mantas de CFRP coladas externamente (EBR)



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.3 – Aplicação do reforço de CFRP

Reforço ao corte com laminados inseridos no betão de recobrimento (NSM)



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

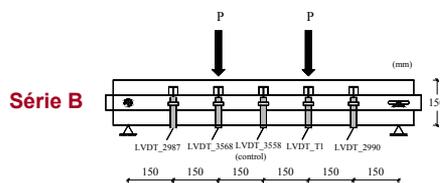
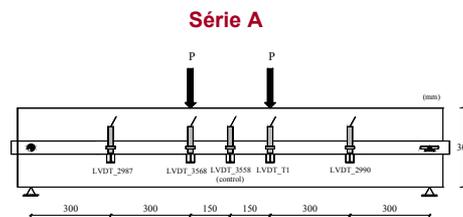
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.4 – Sistema de ensaio



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

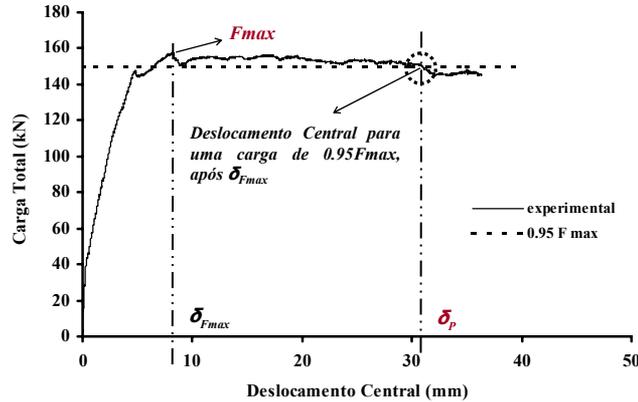
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Dados obtidos das curvas Carga Total vs Deslocamento Central



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

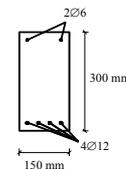
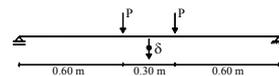
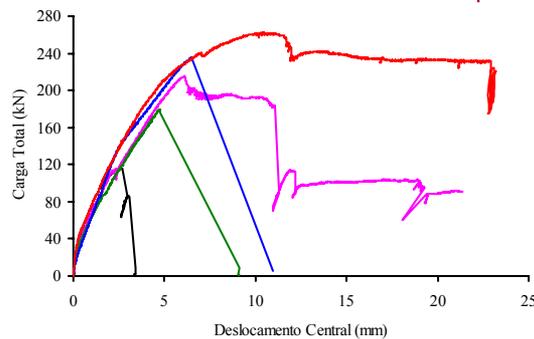
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

SÉRIE A - 4φ12



LEGENDA: A12_C – Sem estribos; A12_S – estribos@0.15m; A12_M – faixas de manta@0.095m; A12_VL – laminados verticais@0.10m; A12_IL – laminados inclinados@0.15m



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

35

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Vigas	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, A12_C}$	$F_{max}/F_{max, A12_S}$
A12_C	-	116.50	1.00	0.54
A12_S	Estribos	215.04	1.85	1.00
A12-M	Manta	179.54	1.54	0.83
A12-VL	Laminados verticais	235.11	2.02	1.09
A12-IL	Laminados inclinados	262.38	2.25	1.22



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

36

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Vigas	Reforço ao corte	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_p, A12_C$	$\delta_p/\delta_p, A12_S$
A12_C	-	2.74	1.00	0.43
A12_S	Estribos	6.34	2.31	1.00
A12-M	Manta	4.91	1.79	0.77
A12-VL	Laminados verticais	6.70	2.45	1.06
A12-IL	Laminados inclinados	11.75	4.29	1.85



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



37

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

SÉRIE A - 4 ϕ 12



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



38

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Reforço ao corte: NSM - Laminados verticais (A12_VL)



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



39

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Reforço ao corte: **NSM - Laminados verticais (A12_VL)**



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



40

3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Reforço ao corte: **NSM - Laminados inclinados a 45° (A12_IL)**



F = 160 kN

F = 230 kN



F = 260 kN (carga máxima)



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

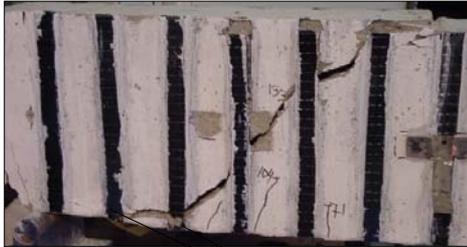
Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Reforço ao corte: Faixas de CFRP coladas externamente (A12_M)



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



3 – Programa Experimental

3.5 – Apresentação dos resultados

Vigas (Série A: 4φ10)	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, A10, C}$	$F_{max}/F_{max, A10, S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_p, A10, C$	$\delta_p/\delta_p, A10, S$
A10_C	-	100.40	1.00	0.59	2.80	1.00	0.17
A10_S	Estribos	169.35	1.69	1.00	16.25	5.80	1.00
A10-M	Manta	122.06	1.22	0.72	3.75	1.34	0.23
A10-VL	Laminados verticais	158.64	1.58	0.94	12.86	4.59	0.79
A10-IL	Laminados inclinados	157.90	1.57	0.93	30.96	11.06	1.91
Vigas (Série A: 4φ12)	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, A12, C}$	$F_{max}/F_{max, A12, S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_p, A12, C$	$\delta_p/\delta_p, A12, S$
A12_C	-	116.50	1.00	0.54	2.74	1.00	0.43
A12_S	Estribos	215.04	1.85	1.00	6.34	2.31	1.00
A12-M	Manta	179.54	1.54	0.83	4.91	1.79	0.77
A12-VL	Laminados verticais	235.11	2.02	1.09	6.70	2.45	1.06
A12-IL	Laminados inclinados	262.38	2.25	1.22	11.75	4.29	1.85
Vigas (Série B: 4φ10)	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, B10, C}$	$F_{max}/F_{max, B10, S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_p, B10, C$	$\delta_p/\delta_p, B10, S$
B10_C	-	74.02	1.00	0.61	2.00	1.00	0.23
B10_S	Estribos	120.64	1.63	1.00	8.53	4.27	1.00
B10-M	Manta	111.14	1.50	0.92	4.40	2.20	0.52
B10-VL	Laminados verticais	131.22	1.77	1.09	6.83	3.42	0.80
B10-IL	Laminados inclinados	120.44	1.63	1.00	4.27	2.14	0.50
Vigas (Série B: 4φ12)	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, B12, C}$	$F_{max}/F_{max, B12, S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_p, B12, C$	$\delta_p/\delta_p, B12, S$
B12_C	-	75.7	1.00	0.48	2.03	1.00	0.40
B12_S	Estribos	159.1	2.10	1.00	5.09	2.51	1.00
B12-M	Manta	143.0	1.89	0.90	3.52	1.73	0.69
B12-VL	Laminados verticais	139.2	1.84	0.87	4.44	2.19	0.87
B12-IL	Laminados inclinados	148.5	1.96	0.93	4.92	2.42	0.97



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



43

3 – Programa Experimental

3.6 – Conclusões

- ✓ CFRP's proporcionam um aumento significativo na resistência ao esforço transversal
- ✓ Laminados inseridos: melhor desempenho em termos de capacidade resistente (**NSM: 83%** **EBR: 54%**)
- ✓ Laminados inseridos: maior incremento de capacidade deformacional (**NSM: 307%** **EBR: 77%**)
- ✓ Laminados inseridos: carga máxima semelhante às vigas estribadas (**NSM: 83%** **Estribos: 82%**)
- ✓ Laminados inseridos: capacidade deformacional superior às vigas estribadas (**NSM: 307%** **Estribos: 272%**)
- ✓ Pós pico: as vigas com laminados inseridos apresentaram capacidade de carga residual superior



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil
Salvador Dias



44

3 – Programa Experimental

3.6 – Conclusões

- ✓ Aumentando a altura da viga os laminados dispostos a 45° são mais eficientes que os laminados inseridos em entalhes verticais
- ✓ Laminados inseridos originam modos de ruína menos frágeis relativamente aos verificados nos modelos com manta externa
- ✓ Técnica de reforço baseada na inserção de laminados no betão de recobrimento das faces laterais da viga: mais fácil e rápida de executar, permite melhor protecção ao fogo, às condições ambientais adversas e a actos de vandalismo

**É VIÁVEL O REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE
BETÃO ARMADO USANDO A TÉCNICA NSM COM
LAMINADOS DE CFRP**



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil
Salvador Dias



4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)

$$V_f = 4 \cdot (a_f + b_f) \cdot \tau_b \cdot L_{tot \min}$$

a_f e b_f são as dimensões da secção transversal do laminado de CFRP

τ_b é o valor médio da tensão de aderência (resistência da ligação colada)

$L_{tot \min}$ é o somatório dos comprimentos de colagem efectivos dos laminados de CFRP (L_i) que atravessam a fenda de corte na posição mais desfavorável

$$L_{tot \min} = \sum_i L_i$$



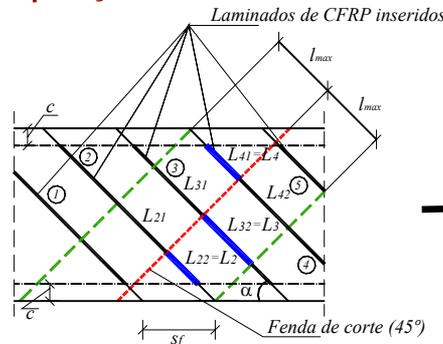
Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

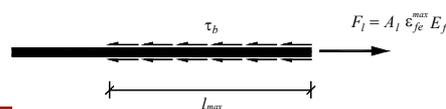


4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)



$$\sum_i L_i = L_2 + L_3 + L_4$$

Limitação da extensão máxima no CFRP $\rightarrow \epsilon_{fe}^{max} \rightarrow l_{max}$



$$l_{max} = \frac{\epsilon_{fe}^{max}}{2} \cdot \frac{a_f \cdot b_f}{a_f + b_f} \cdot \frac{E_f}{\tau_b}$$



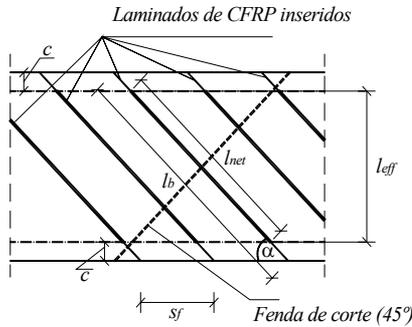
Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)



$$l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha}$$

$$l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c$$

$$N = \frac{l_{eff} (1 + \cot \alpha)}{s_f}$$

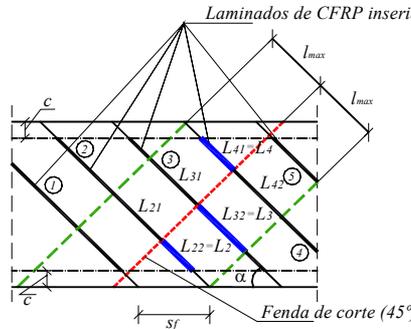


Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)



$$\sum_i L_i = L_2 + L_3 + L_4$$

$$N = \frac{l_{eff} (1 + \cot \alpha)}{s_f} \rightarrow L_i = \begin{cases} \min \left(\frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max} \right) & i = 1, \dots, \frac{N}{2} \\ \min \left(l_{net} - \frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max} \right) & i = \frac{N}{2} + 1, \dots, N \end{cases}$$



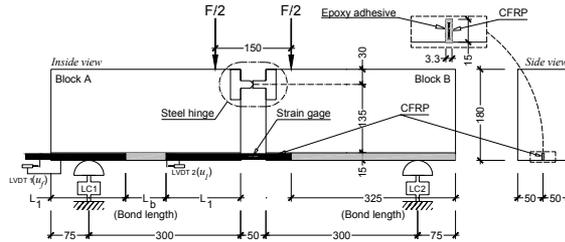
Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)

Valores propostos por Nanni et al.: $\tau_b = 6.9 \text{ MPa}$ e $\epsilon_{fe}^{max} = 4\%$

Ensaio realizado por Sena Cruz e Barros (Universidade do Minho)



$\tau_b = 16.1 \text{ MPa}$

$\epsilon_{fe}^{max} = 5.9\%$



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

4 – Aplicação de um modelo analítico - Modelo de Nanni et al. (2004)

Viga	Valor experimental	Formulação de Nanni et al. (2004)			
		$\epsilon_f = 4.0\%$ e $\tau_b = 6.9 \text{ MPa}$ (Nanni et al.)		$\epsilon_f = 5.9\%$ e $\tau_b = 16.1 \text{ MPa}$ (Novos valores introduzidos por Dias e Barros)	
		V_{fd}^{ana} (kN)	V_f^{exp} / V_{fd}^{ana}	V_{fd}^{ana} (kN)	V_f^{exp} / V_{fd}^{ana}
A10 VL	29.1	10.9	2.67	19.8	1.47
A10 IL	28.8	13.4	2.15	19.8	1.45
A12 VL	59.3	23.9	2.48	39.6	1.50
A12 IL	72.9	33.6	2.17	55.4	1.32
B10 IL	23.2	7.4	3.14	17.3	1.34
B12 VL	31.8	10.5	3.03	19.8	1.61
B12 IL	36.4	18.8	1.94	35.6	1.02

$$V_{fd} = \phi \psi_f V_f$$

$\phi = 0.85$
 $\psi_f = 0.85$

$V_f^{exp} / V_{fd}^{ana} = 2.51$

$V_f^{exp} / V_{fd}^{ana} = 1.39$

Betão: $V_c^{exp} / V_{cd}^{ana} = 1.79$

Aço: $V_{sw}^{exp} / V_{swd}^{ana} = 1.24$



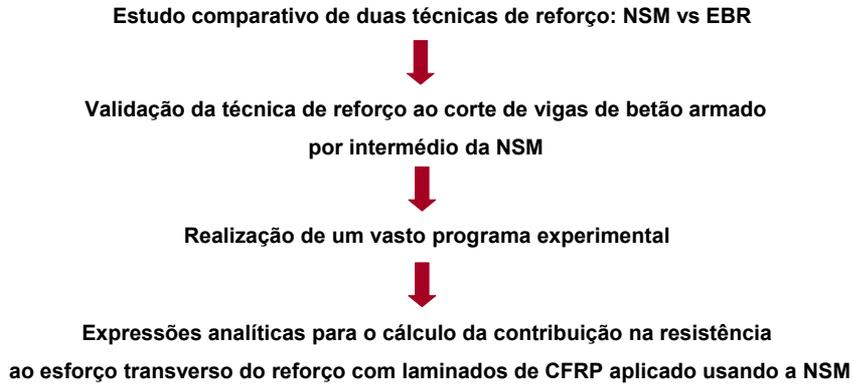
Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM
 Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



51

5 – Investigação em curso



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias



52

5 – Investigação em curso



- ✓ Tipo de betão
- ✓ Percentagem de armadura transversal
- ✓ Percentagem de CFRP
- ✓ Orientação do CFRP
- ✓ Relação entre o vão de corte e a altura da secção transversal



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil

Salvador Dias

LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE Mestrado EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Ciclo de Palestras Técnicas 2005-2006

4ª Sessão – P4: 24 de Maio de 2006



Reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP - Aplicação da técnica NSM

Salvador Dias

**Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil**

*Estudo inserido no plano de trabalhos de preparação da Tese de Doutoramento
Orientação: Prof. Joaquim Barros (Universidade do Minho)*

