



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

A UTILIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP

João Ramôa Correia

Instituto Superior Técnico / ICIST

Universidade Técnica de Lisboa

Temas de Estruturas

UNL, 26 de Novembro de 2012



ÍNDICE:

- 1. OS MATERIAIS PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)**
- 2. CAMPO DE APLICAÇÃO DOS MATERIAIS FRP NA ENGENHARIA CIVIL**
- 3. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DE PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP**
- 4. INVESTIGAGÃO EM CURSO NO IST**
- 5. NOTAS FINAIS**



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

1. OS MATERIAIS PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS

1.1. Os Compósitos ao longo da História

- **5000 a.C.** – Utilização de tijolos reforçados com palha na **Mesopotâmia** para reduzir a fissuração
- **1940** – Aparecimento de compósitos modernos em aplicações estruturais – indústrias **naval** e **aeroespacial**
- **1950** – Introdução de compósitos na indústria **automóvel** e indústria **petrolífera**
- **1960** – Aparecimento dos “**compósitos avançados**” (sobretudo indústria da defesa) e das primeiras aplicações na **construção**



Monsanto House of the Future



Futuro House



Icoshedron Classroom



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

1.1. Os Compósitos ao longo da História

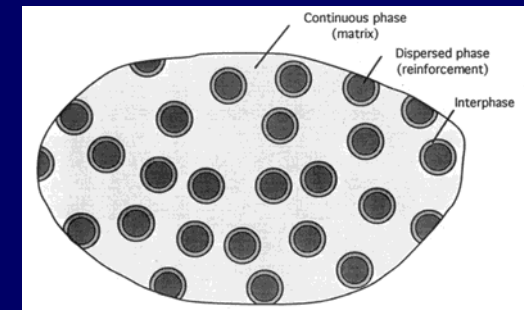
- **1970** – Esforço para reduzir custos de produção e alargamento a outros mercados (ex: desporto)
 - **1980 e 1990:**
 - Evolução tecnológica dos processos de produção (**pultrusão**)
 - Necessidade de **renovação** de infra-estruturas (durabilidade dos materiais tradicionais; aumento das cargas de serviço)
 - Exigência de **velocidades** de construção crescentes
- ⇒ **Aceitação cada vez maior pela indústria da construção**
(crescimento da investigação e desenvolvimento de projectos-piloto)
- 
- Elevada resistência
 - Baixo peso próprio
 - Durabilidade

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

Plásticos reforçados com fibras (FRP) - 2 fases:

1. Fibras de reforço

- Muito resistente
- Frágil



2. Matriz polimérica (resina + filler + aditivos)

- Muito pouco resistente
- Transferência e distribuição das cargas pelas fibras
- Protecção das fibras das acções ambientais
- Mantém as fibras na sua posição (e evita a sua encurvadura quando solicitadas em compressão)

NOTA: FRP – Fiber Reinforced Polymer

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

**Fibras de
reforço**



Vidro (E, S, AR, C)

Carbono

Aramida

Resinas



Termoendurecíveis

(poliéster, viniléster, epóxi, fenólicas)

Termoplásticas

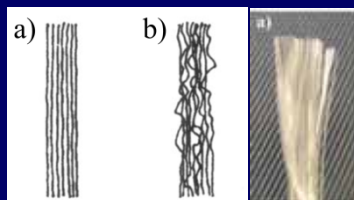
(polietileno, polipropileno)

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

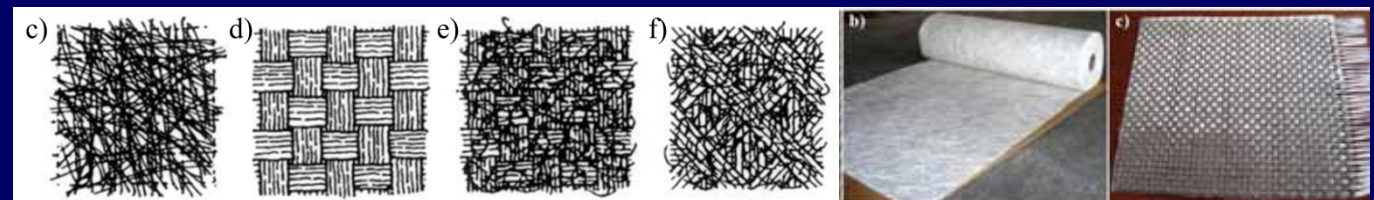
Propriedades e formas das fibras de reforço

Propriedade	Vidro - E	Carbono	Aramida
Resistência [MPa]	2350 - 4600	2600 - 3600	2800 - 4100
Módulo elasticidade [GPa]	73 - 88	200 - 400	70 - 190
Extensão na rotura [%]	2.5 - 4.5	0.6 - 1.5	2.0 - 4.0
Densidade [g/cm ³]	2.6	1.7 - 1.9	1.4

- **Mechas de filamentos contínuos** (*rovings*)
- **Mantas** (*mats, fabrics*) **com filamentos curtos ou contínuos, dispostos aleatoriamente ou direccionados, tecidos ou não**



Rovings



Mats, fabrics

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

Propriedades das matrizes poliméricas

Resinas { **Termoendurecíveis** (poliéster, viniléster, epóxidas)
Termoplásticas (polietileno, polipropileno)

Propriedade	Poliéster	Viniléster	Epóxidas
Resistência [MPa]	20 - 70	68 - 82	60 - 80
Módulo elasticidade [GPa]	2 - 3	3.5	2 - 4
Extensão na rotura [%]	1 - 5	3 - 4	1 - 8
Densidade [g/cm ³]	1.2 - 1.3	1.12 - 1.16	1.2 - 1.3
Temp. transição vítrea [°C]	70 - 120	102 - 150	100 - 270

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

Filler – materiais de enchimento inorgânicos:

- Redução dos custos de produção
- Melhorias de desempenho:
 - Situação de incêndio (conteúdo orgânico ↓)
 - Diminuição da retracção
 - Aumento da dureza
 - Aumento da resistência química

Exs: carbonato de cálcio, caulino, alumina, sulfato de cálcio

⇒ Inflamabilidade ↓

⇒ Produção de fumo ↓

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

Aditivos:

- Melhoria do **processamento**
- Melhorias de **desempenho**:
 - Diminuição da retracção
 - Diminuição do teor em vazios
 - Diminuição da inflamabilidade e produção de fumos tóxicos em situação de incêndio (**retardadores de incêndio**)
 - Aumento da dureza (**elastómeros**)
 - Diminuição da densidade (precursores de espumas)
 - Alteração da cor (**corantes**)
 - Prevenção da perda de cor/brilho devido à radiação UV (**estabilizadores UV**)

1.2. Constituição e propriedades gerais dos FRP

Filosofia de base no desenvolvimento dos FRP:

⇒ Em função dos requisitos específicos, possível combinar:



Várias técnicas de
processamento

→ Diversidade de **fibras de reforço**
(tipo, orientação e teor)

→ Variedade de **polímeros** como matriz

→ **Aditivos** e **filler** na matriz (propriedades específicas)



Strongwell

Perfil híbrido
(fibras C e G)

1.3. Processos de fabrico dos FRP

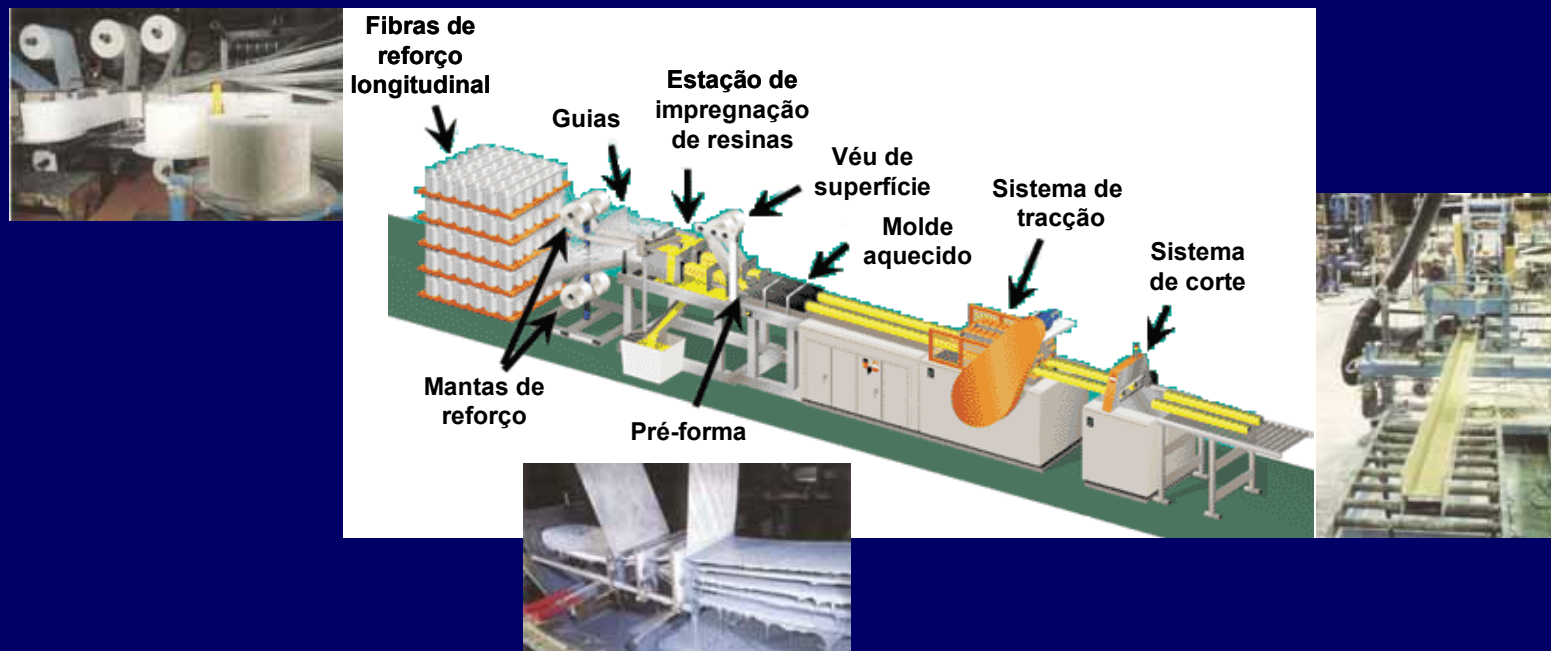
- Pultrusão
- Moldagem manual
- Enrolamento filamentar
- Centrifugação
- Moldagem por transferência de resina (RTM)
- Moldagem por infusão de resina (RIM)
- Moldagem por transferência de resina sob vácuo (VARTM)

1.3. Processos de fabrico dos FRP

Pultrusão

1ª Fase: Impregnação das fibras de reforço e aquisição da forma no interior de um molde, com a matriz no estado líquido

2ª Fase: Solidificação da matriz no molde, resultando um perfil com a geometria pretendida





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

1.3. Processos de fabrico dos FRP

Moldagem manual

Deposição sucessiva de camadas de fibras de reforço e sua posterior impregnação com a matriz polimérica que cura num molde (ou peça a reforçar) com a forma e dimensões pretendidas





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

2. CAMPO DE APLICAÇÃO DOS MATERIAIS FRP NA ENGENHARIA CIVIL

2.1. Utilização estrutural de materiais FRP

Campo de aplicação de materiais FRP



**Armadura
interior de
betão**



Varões de GFRP



**Reparação e
reforço
exterior**



**Laminados e
mantas de CFRP**



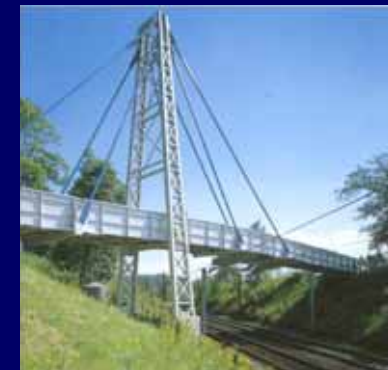
**Estruturas
mistas ou
híbridas**



Perfis e painéis de GFRP

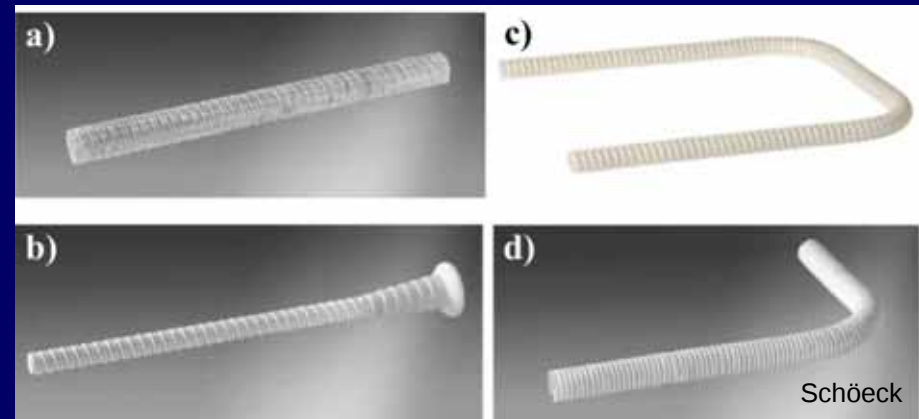
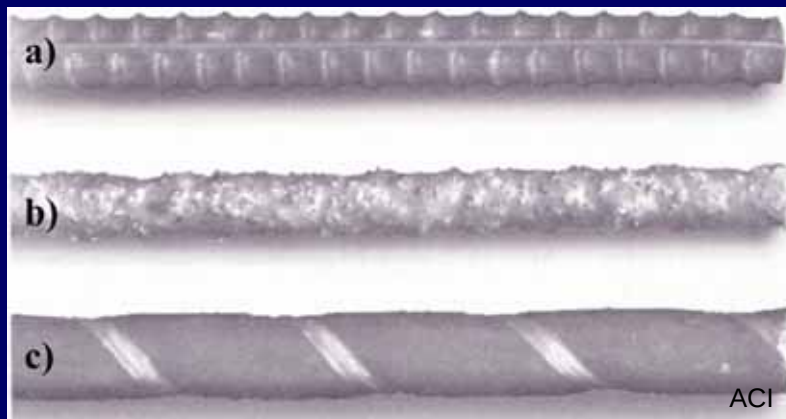


**Estruturas
100%
compósitas**



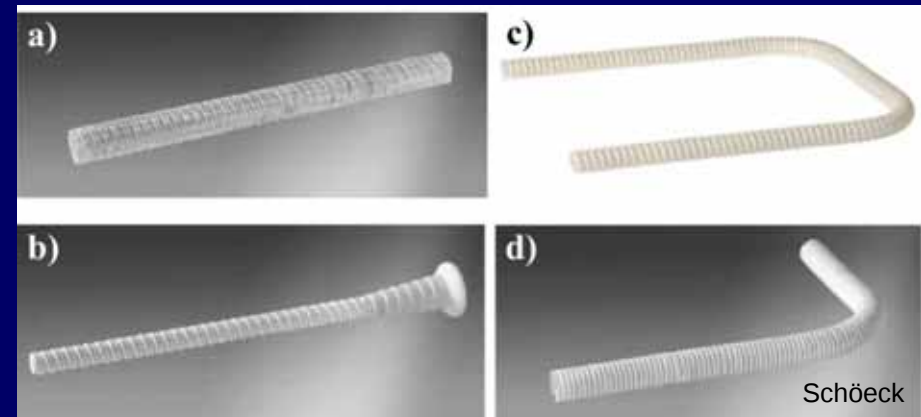
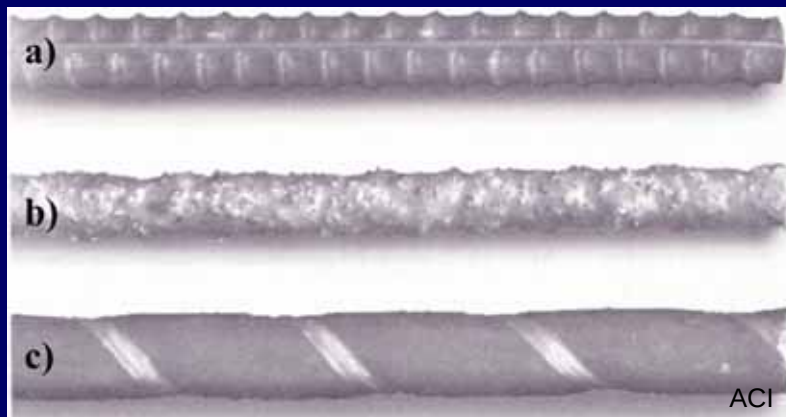
2.2. Varões de GFRP - geometrias e propriedades

- Constituição: Matriz polimérica (**viniléster**) e fibras de reforço axiais
- Diâmetros disponíveis: 6 a 36 mm
- Acabamento superficial: a) **nervurado**;
b) **revestido a areia**; c) **enrolado e revestido a areia**
- Geometria: a) **recta**; b) recta com **cabeça de ancoragem** e dobrada; c) em **U**;
d) em **gancho**



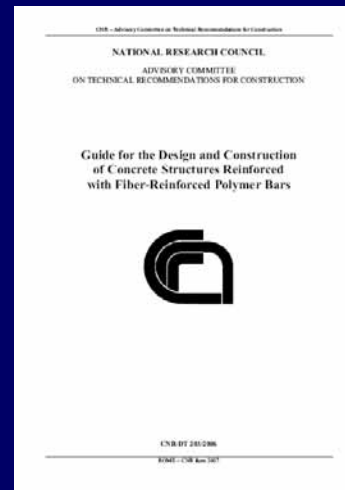
2.2. Varões de GFRP - geometrias e propriedades

Propriedade		GFRP	CFRP	AFRP
Densidade [g/cm ³]		1,25 - 2,10	1,50 - 1,60	1,25 - 1,40
Teor em fibras [%]		50 - 60	50 - 60	-
Coef. de dilatação Térmica [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Axial	6,0 - 10,0	-9,0 a 0,0	-6,0 a -2,0
	Transversal	21,0 - 23,0	74,0 - 104,0	60,0 - 80,0
Resistência à tracção axial [MPa]		483 - 1600	600 - 3690	1720 - 2540
Módulo de elasticidade axial [GPa]		35 - 60	120 - 580	41 - 125
Extensão na rotura axial [%]		1,2 - 3,1	0,5 - 1,7	1,9 - 4,4



2.2. Varões de GFRP - recomendações

- **FIB (2007):** “Fib Bulletin 40 - FRP reinforcement in RC structures”
- **ACI (2006):** “ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”
- **CNR-DT (2007):** “Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars”



2.3. Sistemas de reforço em CFRP - tipologias

- **Laminados:** Laminados de fibras de carbono unidireccionais, já endurecidos (pré-curados, prontos a usar), simplesmente colados com um adesivo de resina epóxida.
- **Mantas:** Manta de fibras contínuas contínuas uni/multi-direccionais, endurecidas *in situ*, aglutinadas e coladas com uma matriz epóxida.

NOTA: Existem ainda **varões** e **cordões/cabos** de CFRP



Laminados de CFRP



Mantas de CFRP



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

**Varões para reforço
de betão**



Christoffersen et al.

**Cabos de pré-esforço
(Verdasio Bridge)**



Keller



2.3. Laminados/mantas de CFRP - propriedades

CFRP	Folhas	Tecidos	Laminados
Quantidade de fibras	200 a 400 g/m ²	300 a 500 g/m ²	200 a 400 g/m ²
Espessura de cálculo	0,11 a 0,23 mm	0,27 a 0,45 mm	1 a 1,4 mm
Espessura do plástico	0,35 a 0,65 mm	0,9 a 1,6 mm	1 a 1,4 mm
Proporção de fibras no plástico	25 a 40 %  (aplicação manual)	20 a 35 % 	65 a 75 %  (lam. industrial.)
Alinhamento das fibras			
Módulo para cálculo	E/1,1	E/1,2	E

Ripper

2.3. Laminados/mantas de CFRP - propriedades

Laminados:

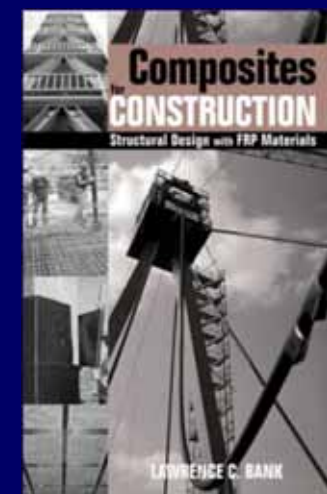
- $E = 165$ a 300 GPa
- $\sigma_u = 1500$ a 3000 MPa
- $\varepsilon_u = 0,5$ a $1,7\%$

Mantas:

- $E = 240$ a 640 GPa (em geral, 240 a 300 GPa)
- $\sigma_u = 2500$ a 3000 MPa
- $\varepsilon_u = 0,4$ a $1,55\%$

2.3. Laminados/mantas de CFRP – recomendações

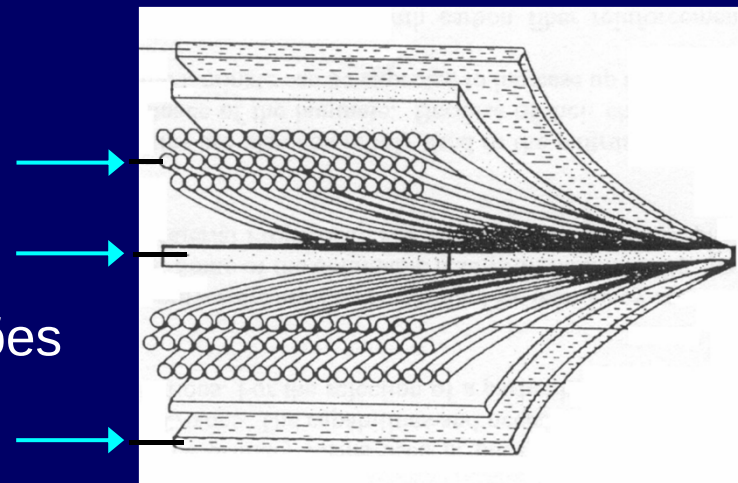
- **FIB (2001):** “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”
- **ACI (2008):** “ACI 440.2R-08 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”
- **CNR-DT (2004):** “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures”



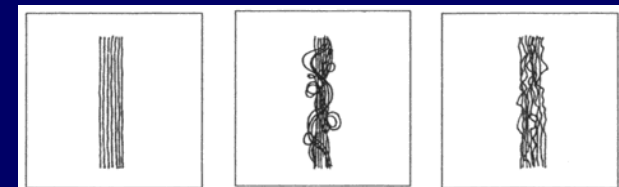
2.4. Perfis de GFRP – constituição e geometrias

- **Fibras de vidro:**

- **Fibras longitudinais** contínuas aglomeradas em mechas
- **Mantas de reforço** com fios (não) tecidos em várias direcções
- **Véu de superfície** com fios dispersos aleatoriamente



Fibras longitudinais



Mantas de reforço



- **Matriz polimérica:**

- Resina (poliéster, viniléster, epóxi)
- Material de enchimento (*filler*)
- Aditivos



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

2.4. Perfis de GFRP – constituição e geometrias



2.4. Perfis de GFRP – constituição e geometrias

Perfis de 1ª Geração

Durante muito tempo copiados da
construção metálica



Problemas de instabilidade
quando sujeitos a
compressões



Perfis de 1ª geração

2.4. Perfis de GFRP – constituição e geometrias

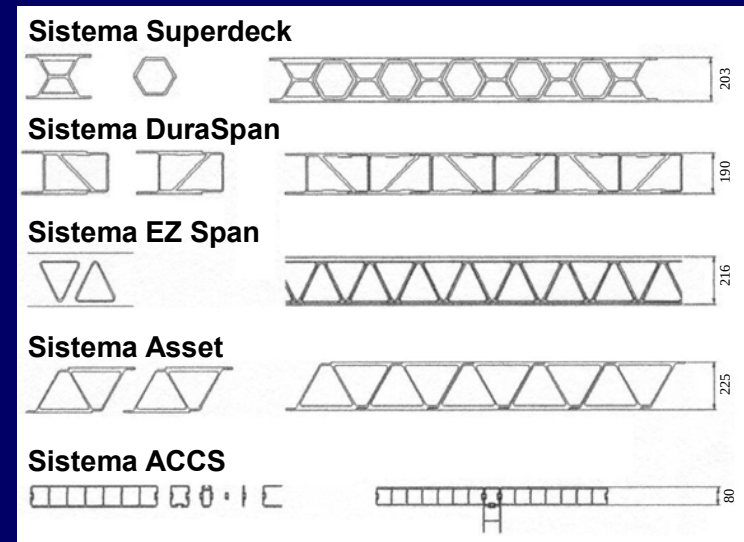
Novos sistemas estruturais

sobretudo para elementos de laje
(construções novas ou substituição)

Painéis ligados a vigas longitudinais
por colagem/aparafusamento



- Baixo peso próprio
- Rápida instalação
- Fácil manutenção





2.4. Perfis de GFRP – propriedades

Propriedade	Un.	Direcção paralela às fibras	Direcção transversal às fibras
Resist. à tracção	MPa	200 – 400	50 – 60
Resist. à compressão	MPa	200 – 400	70 – 140
Resist. ao corte	MPa	25 – 30	
Módulo de elasticidade	GPa	20 – 40	5 – 9
Módulo de distorção	GPa	3 – 4	
Densidade	g/cm ³	1,8 – 1,9	
Teor em fibras	%	50 – 70	

- Comportamento **elástico-linear** até à rotura
- **Tensão de rotura** semelhante/superior à do aço
- **Módulo de elasticidade** 10 a 20% do aço
- **Densidade** 4 vezes inferior à do aço
- **Coefficiente de dilatação térmica** semelhante ao do aço
- **Coefficiente de condutibilidade térmica** muito inferior ao do aço

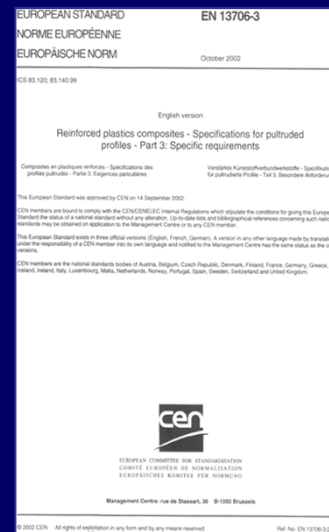
2.4. Perfis de GFRP – regulamentação

- Ainda não existe regulamentação específica oficial
- Dimensionamento baseado em manuais dos fabricantes - tabelas de cálculo (**informação** fornecida **limitada**):
 - **Fiberline** Composites Design Manual (2003)
 - **Strongwell**, Design manual (2008)
 - **Creative Pultrusions**, Pultex Pultrusion Design Manual (2004)



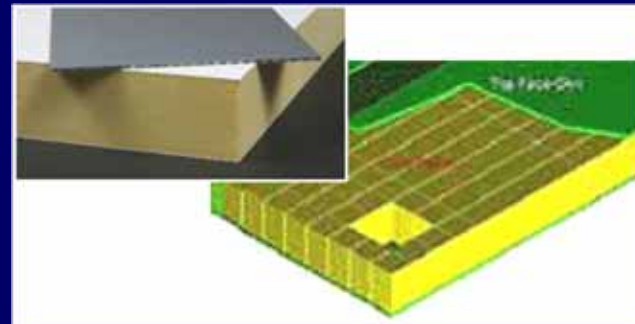
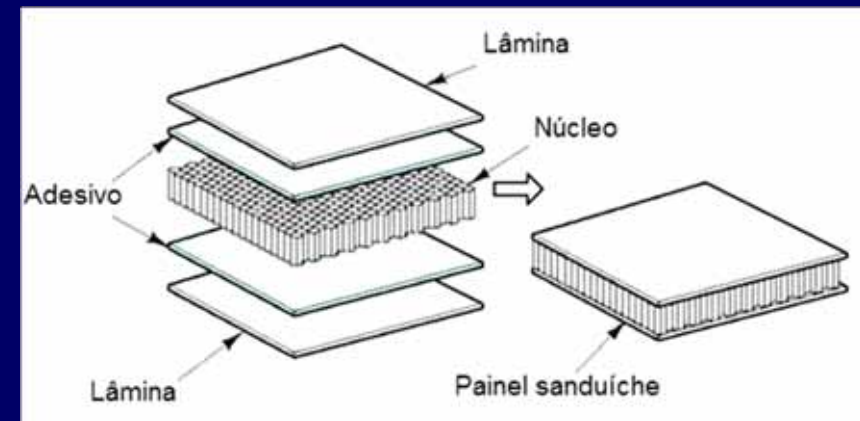
2.4. Perfis de GFRP – regulamentação

- **EUROCOMP** (1996) – Pré-eurocódigo (abordagem semelhante)
- **EN 13706** (2002) – “Reinforced plastics composites – Specifications for pultruded profiles” (2 classes de materiais, especificações para propriedades de materiais e ensaios)
- **CNR-DT 205/2007** (2007) – “Italian guidelines for pultruded profiles”

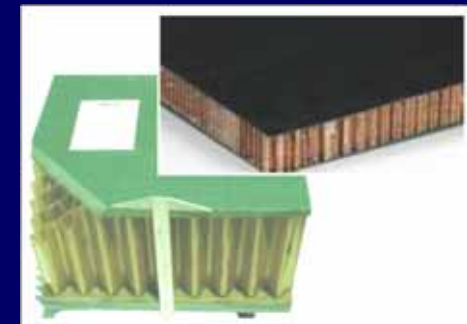


2.5. Painéis sanduíche de GFRP – constituição

- **2 Lâminas exteriores** (finas, rígidas, resistentes)
- **Material de núcleo** (leve, flexível, menos resistente)
- **Adesivo**



Hardcore system



Kansas system



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

3. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DE PERFIS PULTRUDIDOS DE GFRP



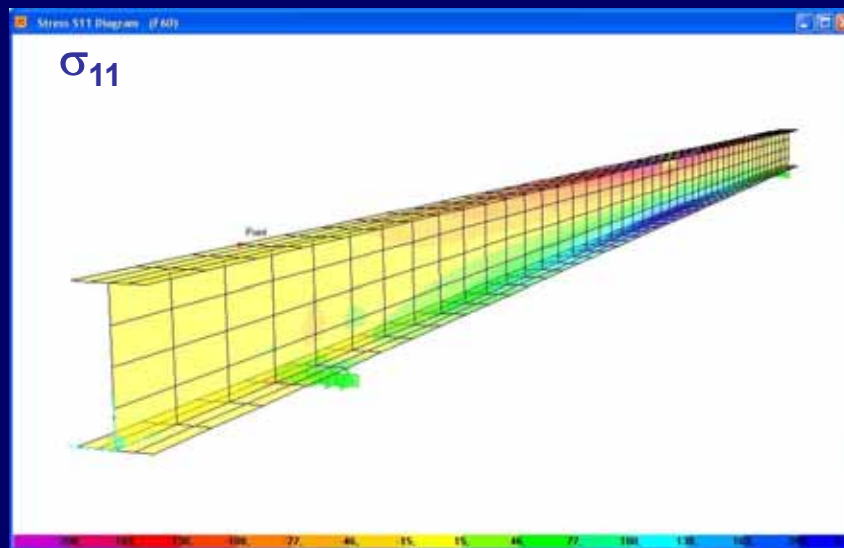
3.1 Princípios Gerais do Dimensionamento

- Comportamento elástico-linear para grandes deformações
- Dimensionamento aos **ELS** condicionado pela **deformabilidade**
- Contribuição do corte para a deformabilidade é importante
- Dimensionamento aos **ELU** condicionado por **fenómenos de instabilidade** (resistência última pouco condicionante)

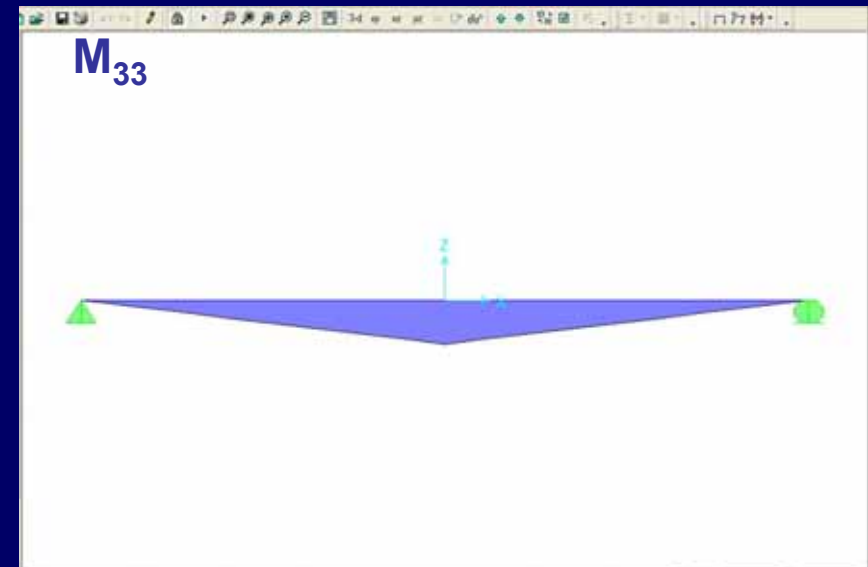
3.2 Comportamento em Serviço

1. Modelos de análise

a) Modelos 2D ou 3D



b) Modelos de viga



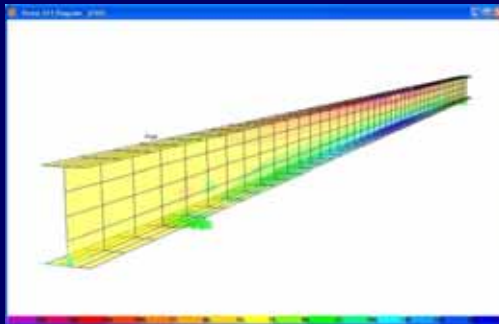
Ortotropia
(complexidade das
distribuições de
tensões/extensões)

Em geral, bons
resultados

“Isotropia aparente” na
direcção longitudinal

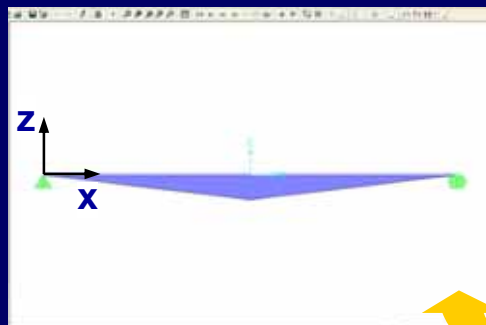
3.2 Comportamento em Serviço

1. Modelos de análise



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

(Comportamento ortotrópico em cada laminado – 9 constantes elásticas...)



E_x, G_x

(“Isotropia aparente”)

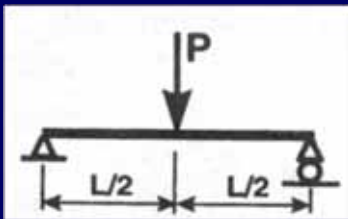
3.2 Comportamento em Serviço

2. Teoria de vigas e influência do corte

$E/G \uparrow$



Em geral, considerar deformabilidade por corte



a) Teoria de Euler



b) Teoria de Timoshenko

$$\delta = \frac{P.L^3}{48 \times EI}$$

$$\delta = \frac{P.L^3}{48 \times EI} + \frac{P.L}{4 \times GA_v}$$



3.2 Comportamento em Serviço

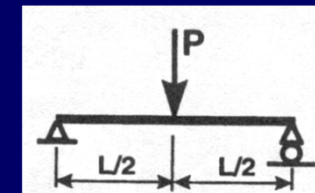
2. Teoria de vigas e influência do corte

Euler

$$\delta = \frac{P.L^3}{48 \times E_a.I}$$

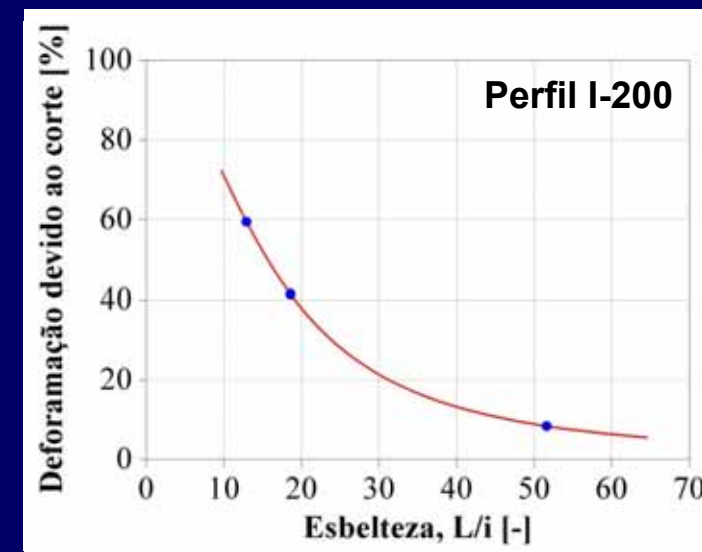
Timoshenko

$$\delta = \frac{P.L^3}{48 \times E_e.I} + \frac{P.L}{4 \times G_e.A_v}$$



$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E_e} \times \left(1 + 12 \times \frac{E_e/G_e}{\left(\frac{L}{i} \right)^2} \right)$$

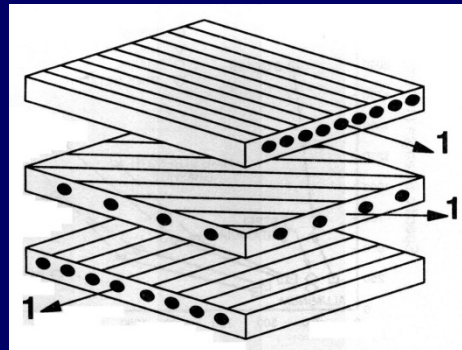
Influência → **E/G** ↑
do corte → **L/i** ↑↑



3.2 Comportamento em Serviço

3. Determinação das constantes elásticas (E e G “efectivos”)

- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|--|
| { | Aço (homogéneo e isotrópico) | ⇒ | Propriedades intrínsecas do material |
| | Perfis de GFRP | ⇒ | Depende em geral, do tipo de secção e arranjo de fibras nas várias camadas do perfil |

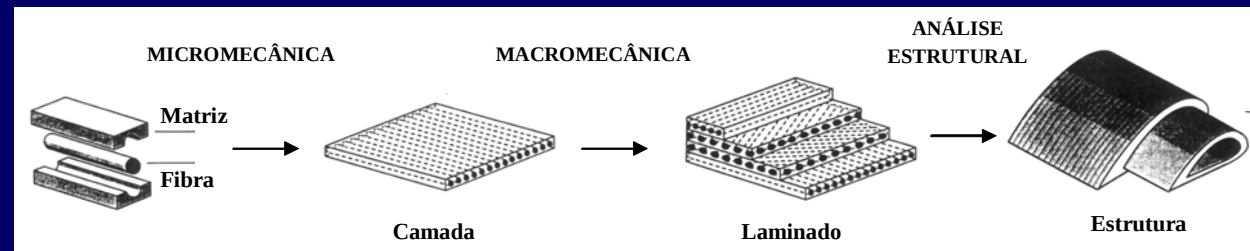


$$E_{\text{provetes}} \neq E_{\text{perfil}}$$

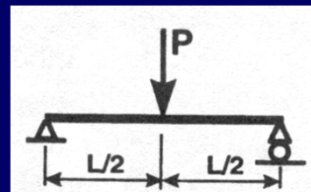
3.2 Comportamento em Serviço

3. Determinação das constantes elásticas (E e G “efectivos”)

Teoria clássica dos compósitos laminados



Ensaio experimentais em perfis – variar L e registar P e δ



$$\delta = \frac{P.L^3}{48 \times E_e I} + \frac{P.L}{4 \times G_e A_v}$$



3.3 Modos de Rotura

1. Estados limites últimos

- Resistência à flexão
- Resistência axial
- Resistência ao corte
- Resistência ao esmagamento
- Encurvadura da alma por flexão
- Encurvadura da alma por corte
- Encurvadura do banzo de compressão
- Encurvadura lateral por flexão-torção
- Encurvadura por flexão

Perfis com secção de **parede fina** (secções I, H, U):
⇒ Fenómenos de **instabilidade** (local ou global)

3.3 Modos de Rotura

DECivil

1. Estados limites últimos

Vigas

- Esbelteza $\uparrow \Rightarrow$ **Encurvadura lateral** por flexão-torção (instabilidade global)
- Esbelteza $\downarrow \Rightarrow$ **Encurvadura local** do banzo comprimido (instabilidade local)

Colunas

- Esbelteza $\uparrow \Rightarrow$ **Encurvadura por flexão** (global)
- Esbelteza $\downarrow \Rightarrow$ **Encurvadura local**
- Esbelteza $\downarrow\downarrow \Rightarrow$ **Esmagamento do material**

3.3 Modos de Rotura

2. Encurvadura lateral em vigas flectidas

- **Fenómeno:** Instabilidade da viga devido a uma combinação de flexão lateral e torção (importante em secções abertas)



- **Expressões do EC3:** Bons resultados para vigas em GFRP (Mottram) adaptadas a um material ortotrópico

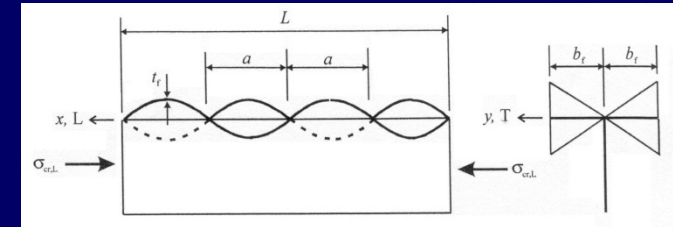
$$M_{cr} = C_1 \times \frac{\pi^2 E_{x,zz} I_{zz}}{(kL)^2} \times \left\{ \left[\left\{ \frac{k}{k_w} \right\}^2 \frac{I_w}{I_{zz}} + \frac{(kL)^2 G_{yz} J}{\pi^2 E_{x,zz} I_{zz}} + (C_2 e)^2 \right]^{0,5} - C_2 e \right\}$$

- **Importância do fenómeno:** $E \downarrow$ e $E/G \uparrow \Rightarrow M_{cr} \ll M_u$

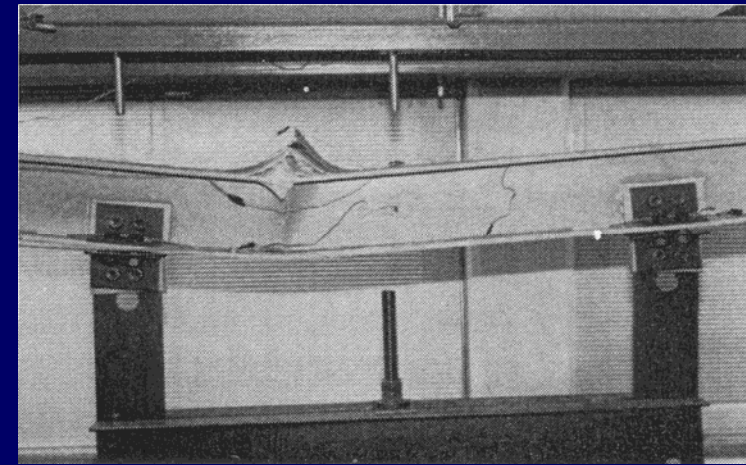
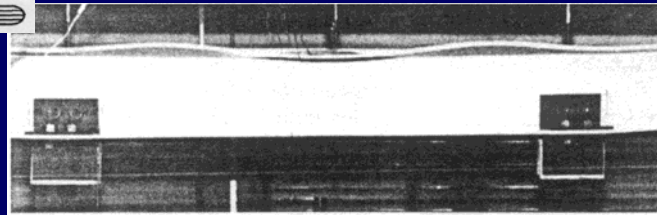
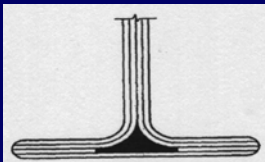
3.3 Modos de Rotura

3. Instabilidade local de elementos comprimidos

- **Fenómeno:** Encurvadura do elemento comprimido num modo que consiste numa sucessão de ondas



- **Rotura:** Grandes deformações no regime de pós-encurvadura
 - ⇒ Rotura do **banzo** comprimido com **delaminação**
 - ⇒ Separação **banzo-alma**



- **Expressões de dimensionamento:** Várias (**Pecce e Cosenza; Kollár**)

3.3 Modos de Rotura

4. Encurvadura de flexão em colunas comprimidas

- **Importância do Fenómeno:** Colunas esbeltas ($L/i > 50$)
- **Expressão de Euler:** Bons resultados para colunas de GFRP (adaptadas a um material ortotrópico)

$$P_E = \frac{\pi^2 \times E_{c,x} \times I_{\min}}{L^2}$$



Deformação por corte
(Zureick e Scott)

$$P_e = P_E \times \eta_s$$

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \frac{n_s \times \pi^2}{\left(\frac{L_{\text{eff}}}{i}\right)^2 \times A} \times \frac{E_{c,x}}{G_{yz}}}$$



3.4. Ligações

- **Aparafusadas**
- **Coladas**
- **Aparafusadas e coladas**
- **“Interlock” ou encaixe mecânico**



Ligações aparafusadas



Ligações coladas



Ligações por “interlock”



3.5 Comportamento ao fogo

→ Resistência ao fogo

- Matrizes combustíveis, mas:
- Baixo coeficiente de **condutibilidade térmica**
- Medidas **passivas**
 - aditivos retardadores de incêndio ou *fillers*
 - resinas resistentes ao fogo (resinas fenólicas)
 - materiais de protecção (tintas intumescentes, materiais inorgânicos projectados, painéis de gesso)
- Medidas **activas** (*sprinklers*, tubagem com água para arrefecimento de elementos estruturais)



3.6 Durabilidade

- Excelente **desempenho** comprovado em ambientes quimicamente agressivos
- **Degradação** devido a agentes ambientais compatível com a sua utilização:
 - Temperatura
 - Humidade
 - Radiação UV
- **Factor decisivo:** Escolha adequada da **matriz**
⇒ Considerar o tipo de ambiente a está sujeita !!!



3.7 Sustentabilidade

- **1.1 Fibra de vidro** – Recurso inextinguível
- **1.2 Matriz polimérica** – Resinas não são reprocessáveis, mas:
 - Resultam de co-produtos da indústria petrolífera
 - Quantidades exigidas praticamente insignificantes
 - Resinas termoendurecíveis $\Rightarrow$ Resinas termoplásticas ?
- **2. Energia requerida na produção** é baixa ($\frac{1}{4}$ aço; $\frac{1}{6}$ alumínio)
- **3. Durabilidade** superior aos materiais tradicionais
- **4. Reciclabilidade** – só com resinas termoplásticas

**Adopção de
resinas termoplásticas**



**Sustentabilidade $\geq$
Materiais tradicionais**



3.8 (Des)Vantagens

Vantagens:

- Baixo peso próprio
- Elevada resistência mecânica
- Elevada resistência à corrosão (durabilidade)
- Fácil manutenção
- Propriedades eléctricas e térmicas

Dificuldades:

- Deformabilidade
- Instabilidade
- Comportamento frágil
- Regulamentação
- Custo inicial
- Comportamento em situação de incêndio

3.9. Aplicações

a) Ponte de Pontresina (1997)



- 2 vigas simplesmente apoiadas treliçadas
- Ligações aparafusadas numa das vigas e coladas na outra (coladas 15% mais rígidas)
- Instalação: 4 horas



b) Ponte de Lérida (2001)

Exigências:

- Manutenção mínima
- Rapidez de montagem
- Sem interferência magnética com a linha eléctrica



- Ponte em arco, 38 m de vão, 6,2 m de altura e 3 m de largura
- Utilizados apenas perfis GFRP
- Rampas de acesso em betão
- Peso total de 19 ton
- Colocação em 3 horas



Alçado



Vista lateral



Vista inferior

b) Ponte de Lérida (2001)

Exigências:

- Manutenção mínima
- Rapidez de montagem
- Sem interferência magnética com a linha eléctrica



- Ponte em arco, 38 m de vão, 6,2 m de altura e 3 m de largura
- Utilizados apenas perfis GFRP
- Rampas de acesso em betão
- Peso total de 19 ton
- Colocação em 3 horas



Ligações aparafusadas (aço inox)



Ensaio de carga

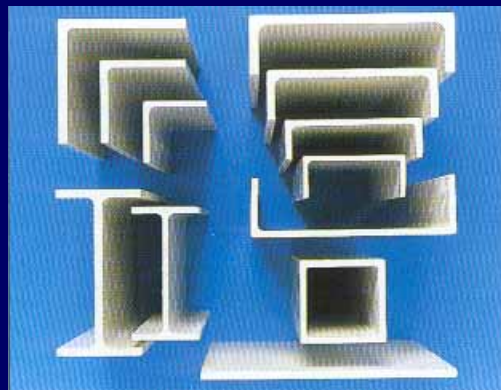


Elevação da ponte

c) Ponte de Kolding (1997)



- Ponte **atirantada** (8 tirantes)
- **40 m de comprimento** (2 tramos de 27 e 13 m)
- Tabuleiro com 3,2 m de largura
- Pilares com 18,5 m de altura
- Peso total **12,5 ton** (50% da solução em aço)
- Custo total 5 a 10% superior ao das soluções alternativas (aço e betão)



Perfis utilizados



Ligações aparafusadas em fábrica



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

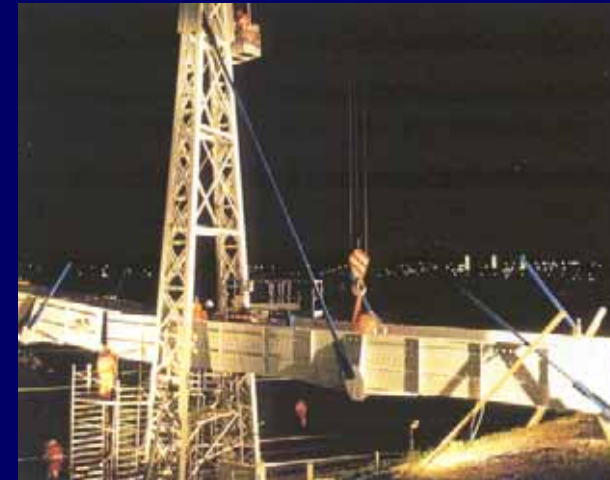
DECivil

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

3.9. Aplicações



Transporte de um tramo de 27 m



Instalação da ponte em 3 peças



Vista inferior da ponte



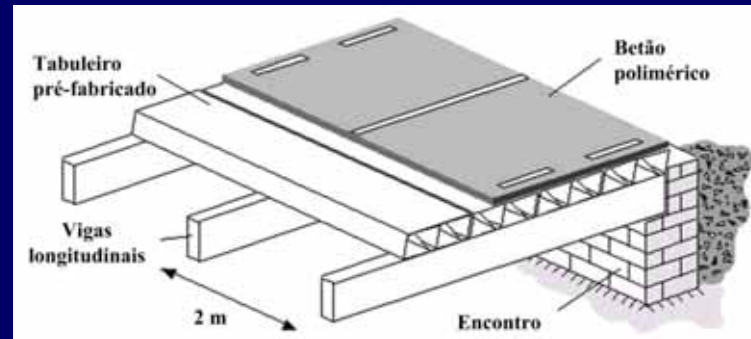
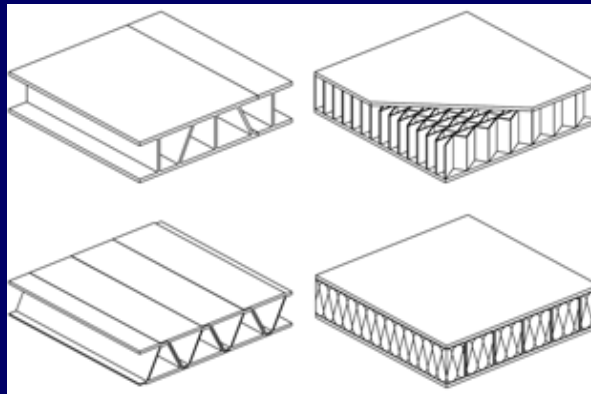
Vista superior – Estação meteorológica no topo dos pilares



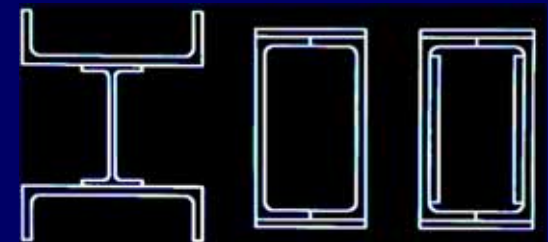
Instrumentação

d) Reabilitação de tabuleiros

Painéis pultrudidos (ou painéis sanduíche) ligados às longarinas da ponte a reabilitar através de colagem ou aparafusamento



e) Eyecatcher Building (1999)



- Edifício mais alto do mundo com **estrutura em FRP** (5 pisos)
- Estrutura – **3 treliças trapezoidais** (ligações coladas e aparafusadas)
- **Fachada** em **painéis sandwich** – isolamento térmico e translucidez (integração de funções)



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

f) Aplicações em Portugal

3.9. Aplicações



Centro Comercial Colombo



Oceanário



Estação do Rossio



Marina de Vilamoura



Escultura, Porto



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4. INVESTIGAÇÃO EM CURSO NO IST



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4.1. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE BETÃO REFORÇADAS COM VARÕES DE GFRP



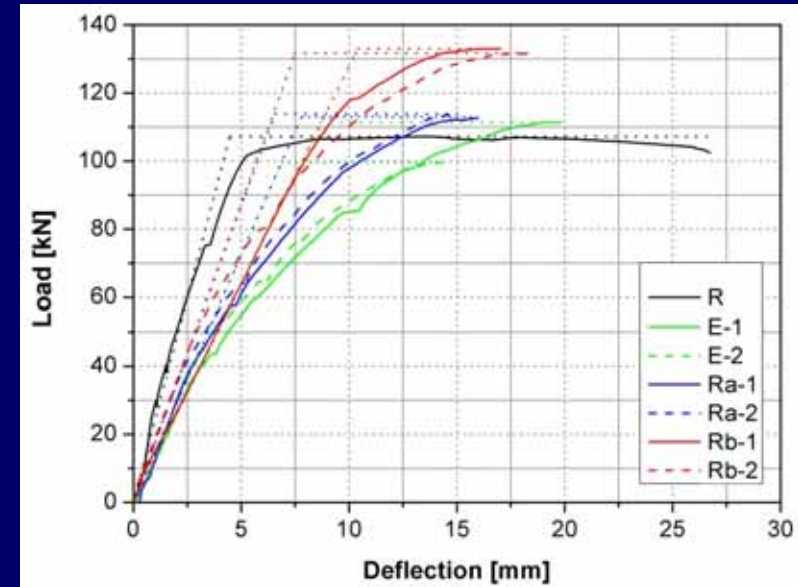
Aluno: Bruno Matos

4.1. Comportamento estrutural de vigas de betão reforçadas com varões de GFRP ¹

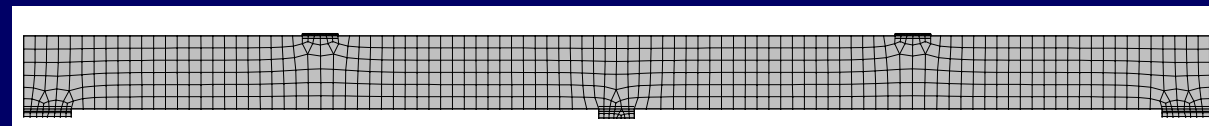


Ensaio de flexão em vigas de 2 tramos:

- (i) R – viga de referência, reforço em aço;
- (ii) Rb-1 – viga reforçada com GFRP e betão confinado em secções críticas



Curvas força-deslocamento



Modelação numérica no software ATENA (análise não linear, fendilhação e esmagamento do betão)



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4.2. COMPORTAMENTO AO FOGO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS COM CFRP

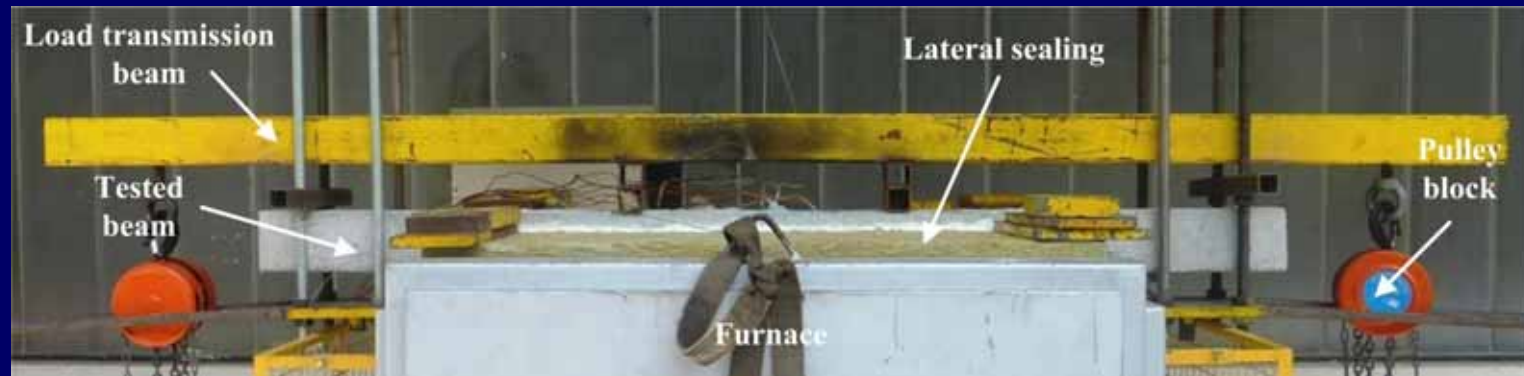


Aluno: João Pedro Firmo (PhD)

Financiamento: Projecto FCT (2011-2014) e bolsa FCT (2010-2013)

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

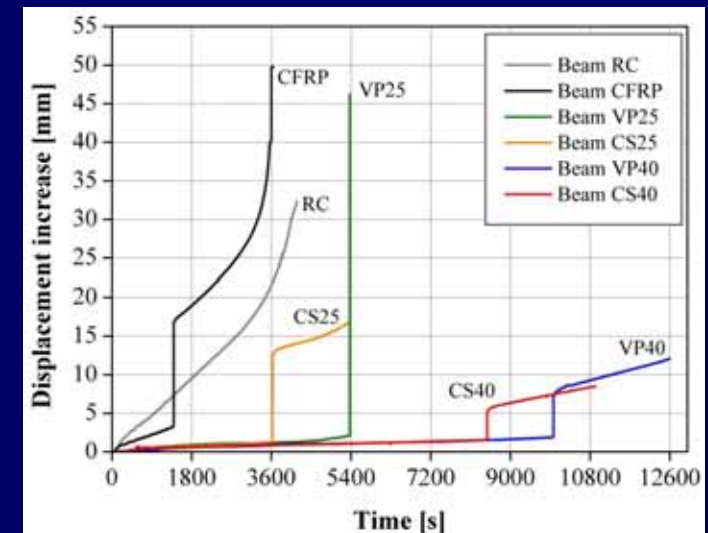
4.2. Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP²



Ensaio de resistência ao fogo em vigas (ISO 834)



Rotura da viga CFRP



Aumento de deslocamento vs. tempo



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4.3. COMPORTAMENTO AO FOGO DE PERFIS DE GFRP



Alunos: Marco Gomes, Francisco Nunes, José Miguel Pires, Augusto Moreira

Financiamento: Projecto FCT (2011-2014) e bolsa FCT (2010-2013)

A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

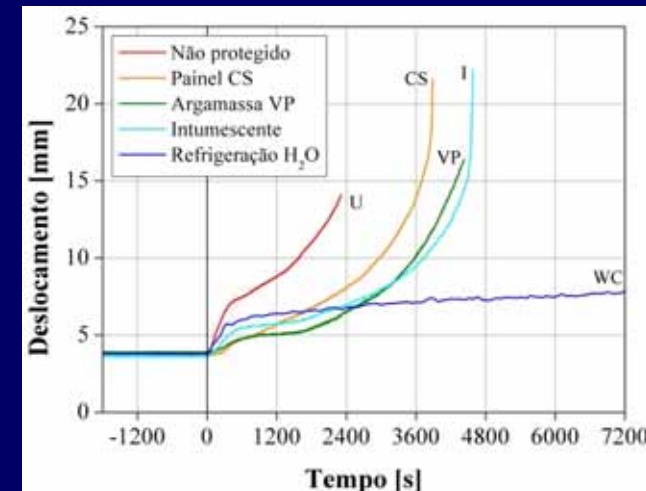
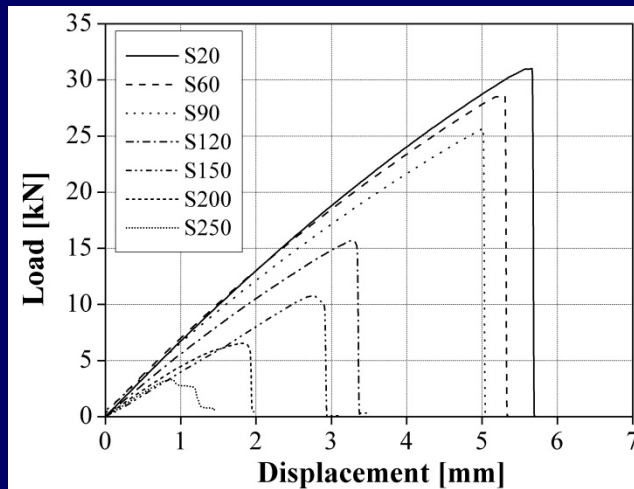
4.3. Comportamento ao fogo de perfis de GFRP ^{3,4}



Ensaio de corte em laminados de GFRP a temperatura elevada (20-250°C)



Ensaio de resistência ao fogo (ISO 834) de viga em GFRP protegida com placa SC – sequência de rotura





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4.4. TABULEIROS DE PONTES EM PAINÉIS PULTRUDIDOS DE GFRP LIGADOS POR ENCAIXE



Alunos: Mário Sá (PhD), Emanuel Silva (MSc), Francisco Martinho (MSc)

Financiamento: Bolsa FCT (2009-2013)

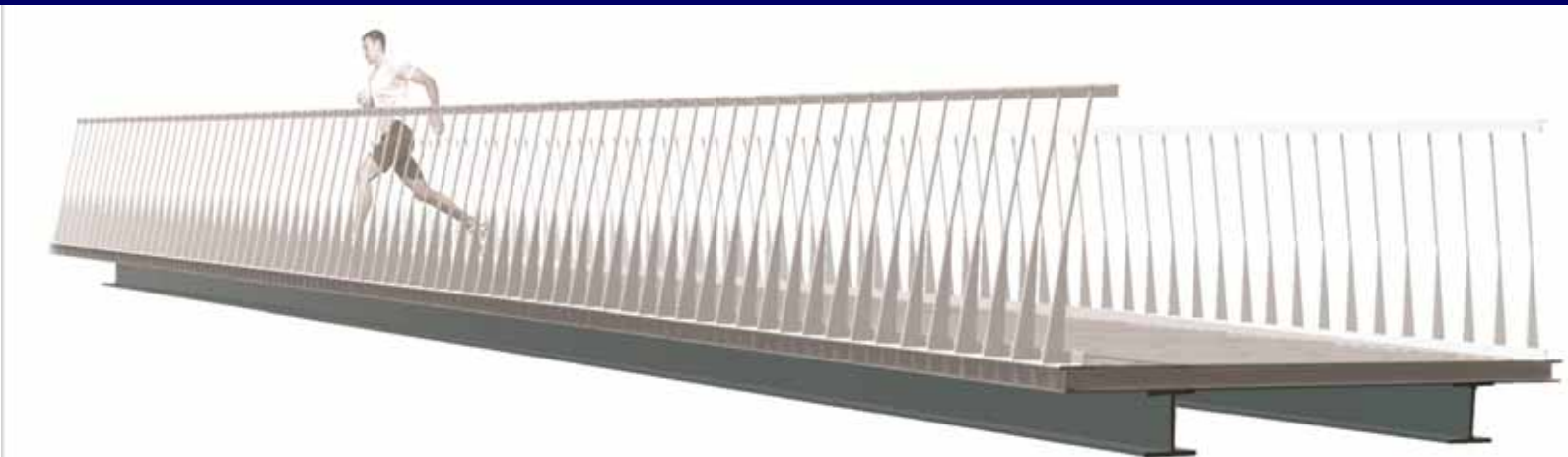
4.4. Tabuleiros de pontes em painéis de GFRP ligados por encaixe

Estudar **solução pré-fabricada** para tabuleiros de **pontes pedonais**:

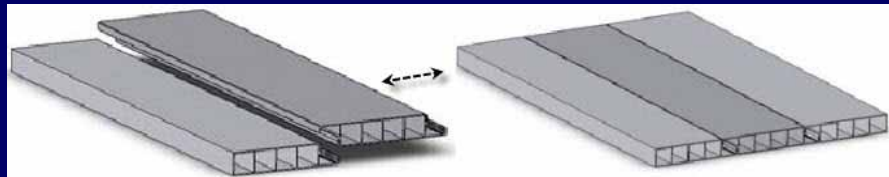
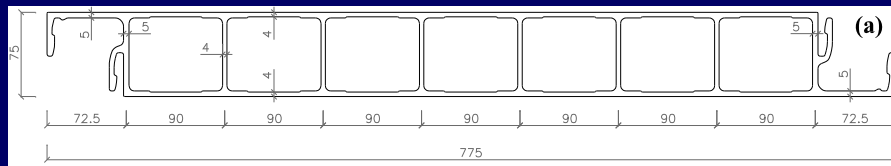
- **Painéis multicelulares** pultrudidos de **GFRP** ligados por **encaixe**
- **Longarinas metálicas**

Protótipo em estudo:

- vão simplesmente apoiado de 12.0 m
- vão transversal interno de 1.5 m entre longarinas metálicas
- largura total de 2.5 m



4.4. Tabuleiros de pontes em painéis de GFRP ligados por encaixe



Secção transversal e princípio de funcionamento dos painéis em GFRP

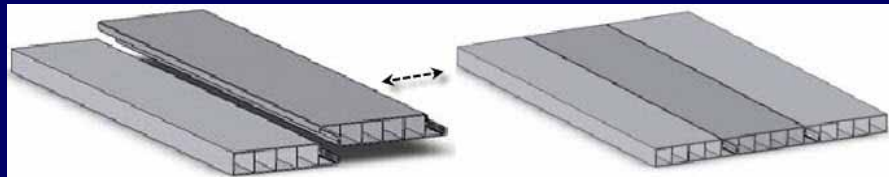
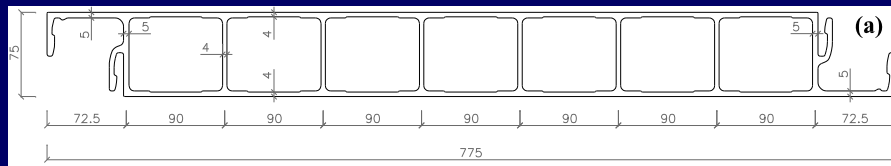


Ensaio de flexão a painel em GFRP



Projecto de ponte pedonal (Viseu)

4.4. Tabuleiros de pontes em painéis de GFRP ligados por encaixe



Secção transversal e princípio de funcionamento dos painéis em GFRP



Ensaio de flexão a painel em GFRP



Projecto de ponte pedonal (Viseu)



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

4.5 TABULEIROS EM PAINÉIS SANDUÍCHE DE GFRP

Alunos: Inês Almeida (MSc), Diogo Ferreira (MSc) e Mário Garrido (PhD)

Financiamento: Projecto FCT (2011-2014)

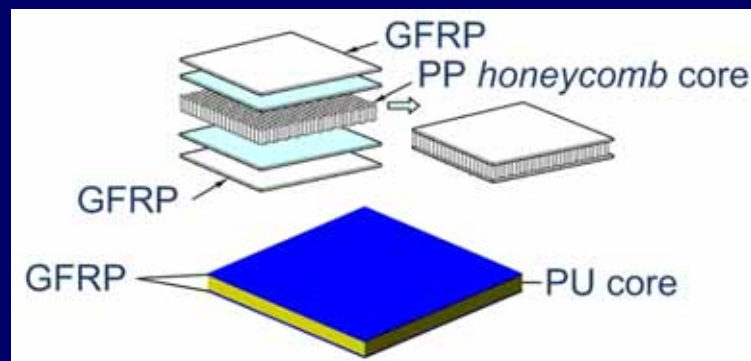
4.5. Tabuleiros em painéis sanduíche de GFRP

Estudo do comportamento estrutural de painéis sanduíche em GFRP para a indústria da construção - pontes pedonais

➡ **Efeito do material de núcleo** - 2 tipos de painéis sanduíche:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Lâminas de GFRP} \\ \text{Núcleo} \left\{ \begin{array}{l} \text{em espuma rígida de poliuretano (PU)} \\ \text{em favos de mel de polipropileno (PP)} \end{array} \right. \end{array} \right.$

➡ **Efeito da introdução de reforços** em GFRP nos bordos laterais



A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP

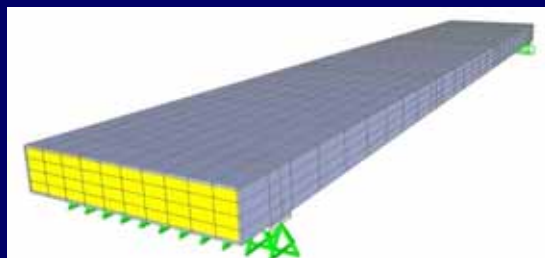
4.5. Tabuleiros em painéis sanduíche de GFRP



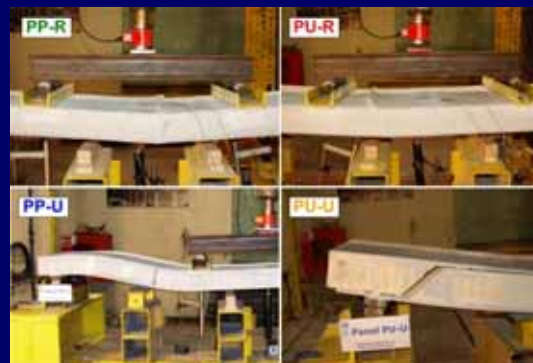
Ensaio de caracterização dos materiais
(lâminas em GFRP, núcleos em espuma rígida de poliuretano e favos de mel em polipropileno)



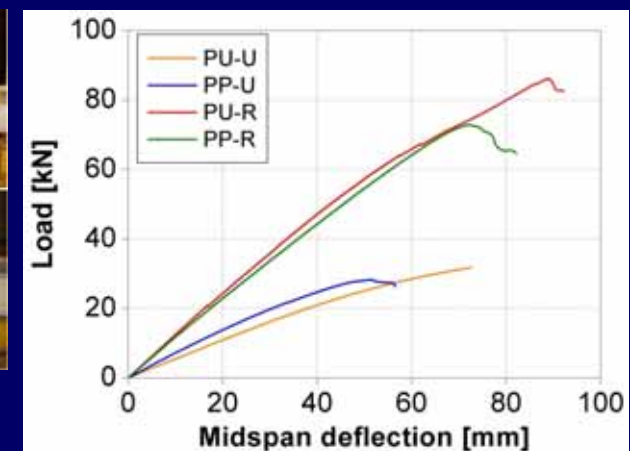
Ensaio de flexão em painéis sanduíche



Modelos de EF

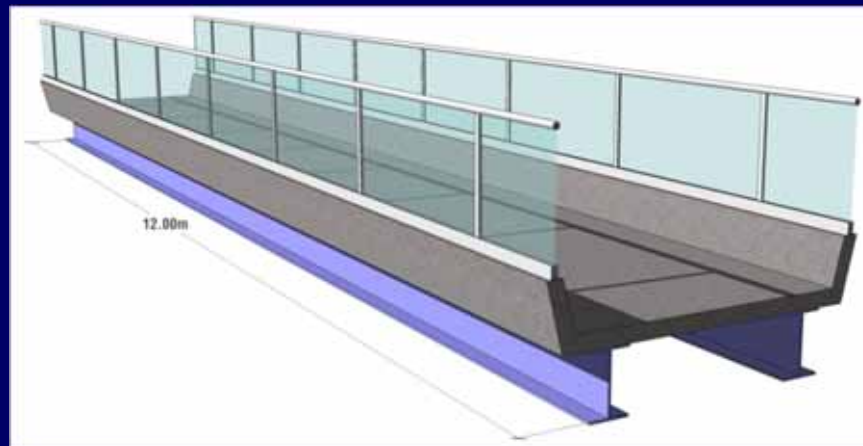


Modos de rotura dos painéis ensaiados



Curvas força vs. deslocamento

4.6. TABULEIROS MISTOS GFRP-BETÃO

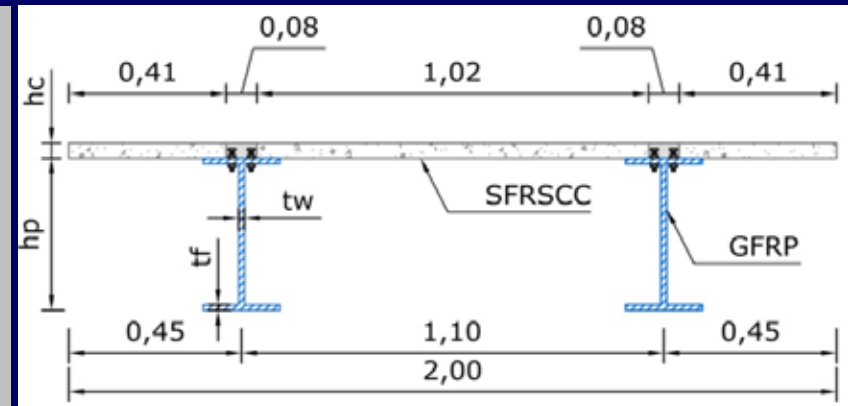


Alunos: José Gonilha (PhD), Ana Aquino (MSc), Joana Sousa (MSc)

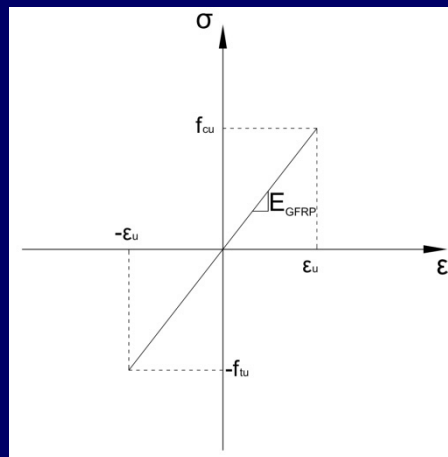
Financiamento: Projecto ADI (2009-2012), Bolsa FCT (2010-2013)

4.6. Tabuleiros mistos GFRP-betão - Conceção

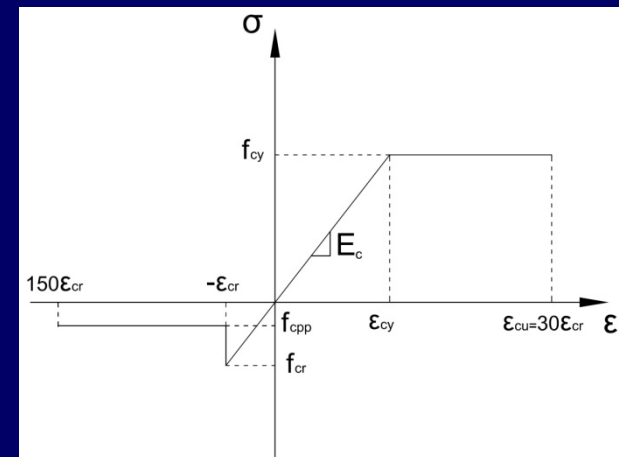
- **Tabuleiro em SFRSCC** (sem varões de reforço, espessura reduzida, estabilidade transversal)
- **Vigas pultrudidas em GFRP** (estabilidade longitudinal)
- **Conexão mecânica e/ou adesiva**



Secção transversal



GFRP – comportamento elástico-linear



SFRSCC – comportamento não linear (UM)

4.6. Tabuleiros mistos GFRP-betão - Protótipo



1. Furação dos perfis 2. Colocação dos conectores 3. Betonagem dos apoios



4. Montagem das vigas e contraventamentos

5. Aplicação do adesivo

4.6. Tabuleiros mistos GFRP-betão - Protótipo



6. Colocação/colagem das lajetas



7. Aspecto final após colagem



Ensaio de carga...



Instituto Superior Técnico
CLUSTER
Construção e Engenharia de Estruturas e Materiais



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

5. NOTAS FINAIS



5. Notas Finais

- Os perfis de GFRP apresentam diversas **vantagens** face aos **materiais tradicionais** para a construção e reabilitação de estruturas: **resistência**, **leveza**, **facilidade de aplicação** e **durabilidade** mesmo em ambientes agressivos.
- As **limitações** dos perfis de GFRP tornam premente a procura de soluções estruturais “adaptadas”, o que constitui o principal objectivo dos estudos em curso no IST aqui apresentados.



MUITO OBRIGADO



Superior
CLUSTER
Tecnologia e Inovação