



# Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP

Premio para Melhor Dissertação em Estruturas

**António Carlos Pereira Janes Monteiro**

Orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Co-orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Doutor António José da Silva Costa

Caparica, 10 de Julho de 2014

## Índice

### 1. Programa Experimental

- 1.1. Vigas em BA utilizadas
- 1.2. Sistema de ensaio
- 1.3. Procedimentos de ensaio
- 1.4. Técnicas de reforço propostas
- 1.5. Instrumentação das vigas

### 2. Resultados Experimentais

- 2.1. Ensaio monotónicos
- 2.2. Ensaio cíclicos
- 2.3. Modos de rotura
- 2.4. Técnicas propostas vs EBR e NSMR

### 3. Modelação numérica

- 3.1. Programa de calculo
- 3.2. Leis constitutivas dos materiais
- 3.3. Critérios de rotura
- 3.4. Apresentação dos resultados

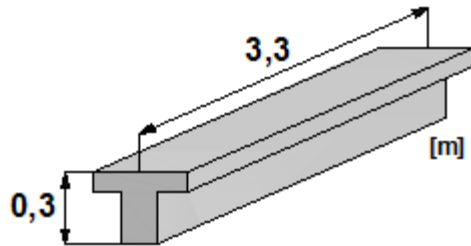
### 4. Conclusões

## Objetivos

- Estudar o desempenho de duas técnicas de reforço de vigas em betão armado com CFRP;
- Desenvolver um programa de cálculo em *MATLAB*, capaz de simular o problema em estudo.

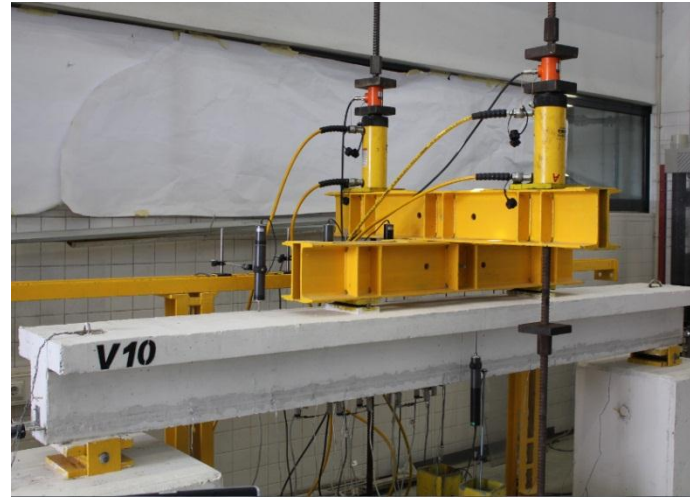
## 1. Programa Experimental

### 1.1. Vigas utilizadas



- 5 vigas em Betão armado
- Secção transversal em T
- Comprimento (L): 3,3 m
- Altura (h): 0,3 m

### 1.2. Sistema de ensaio



- Sistema de Transmissão de cargas em 4 pontos;
- Constituído por:
  - 2 células de carga
  - 2 cilindros hidráulicos
  - 2 perfis metálicos
  - 2 apoios fixo e móvel (perfis metálicos-viga)
  - 2 apoios fixo e móvel (viga-blocos de betão)

### 1.3. Procedimentos de ensaio

- Ensaio Monotónicos:
  - Aplicação contínua e crescente da carga até à rotura.
- Ensaio Cíclicos:
  - Ramos ascendentes (Carga) controlados por deslocamento :  $\frac{1}{4} \delta_{sy} , \frac{2}{4} \delta_{sy} , n \delta_{sy}$
  - Ramos descendentes (Descarga) controlados por força:  $\approx 5kN$

## 1. Programa Experimental

### 1.4. Técnicas de reforço propostas

#### ■ Externally Bonded Reinforcement Anchorage (EBRA)

Em que consiste:

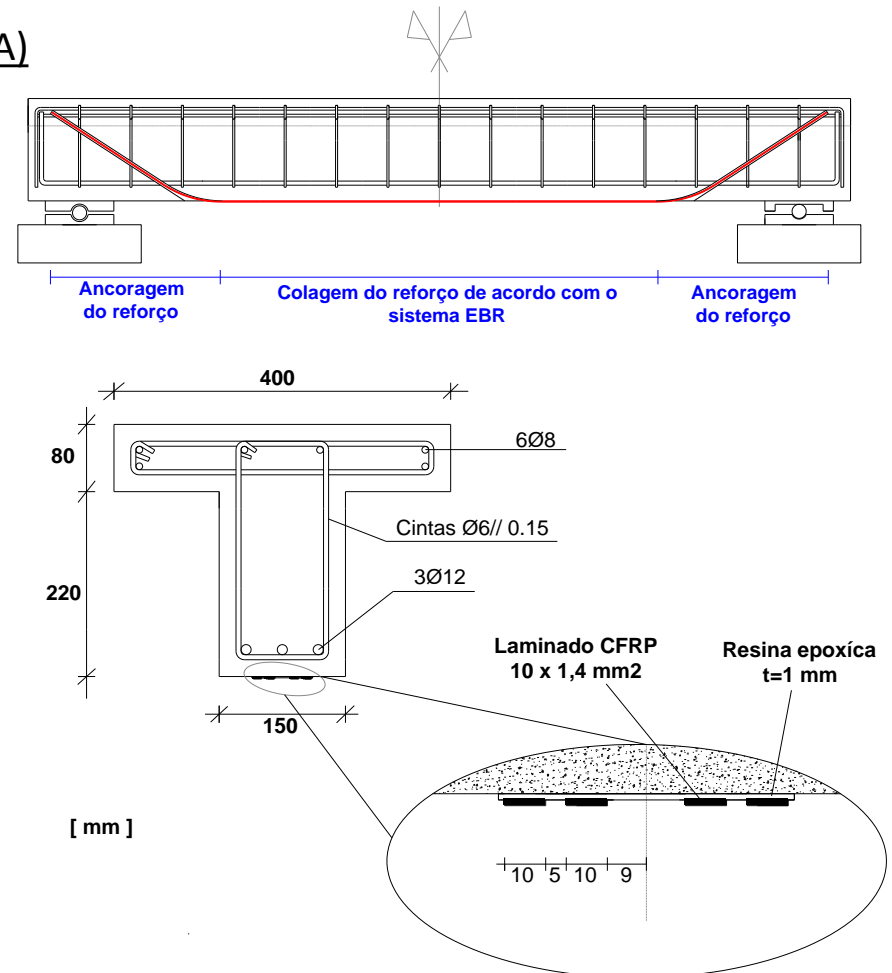
- Colagem do FRP ao longo da face traccionada do elemento a reforçar;
- Amarração das extremidades do FRP em furos inclinados preenchidos com resina epoxídica.

Vantagens:

- Fácil e rápida aplicação;
- Permite mobilizar a resistência total à tração do FRP
- Evita a ocorrência de mecanismos de colapso por perda de aderência da ligação Betão-FRP ou por destacamento do betão de recobrimento.

Desvantagens:

- Exposição exterior do FRP



## 1. Programa Experimental

### 1.4. Técnicas de reforço propostas

#### ■ Horizontal Near Surface Mounted Reinforcement (HNSMR)

Em que consiste:

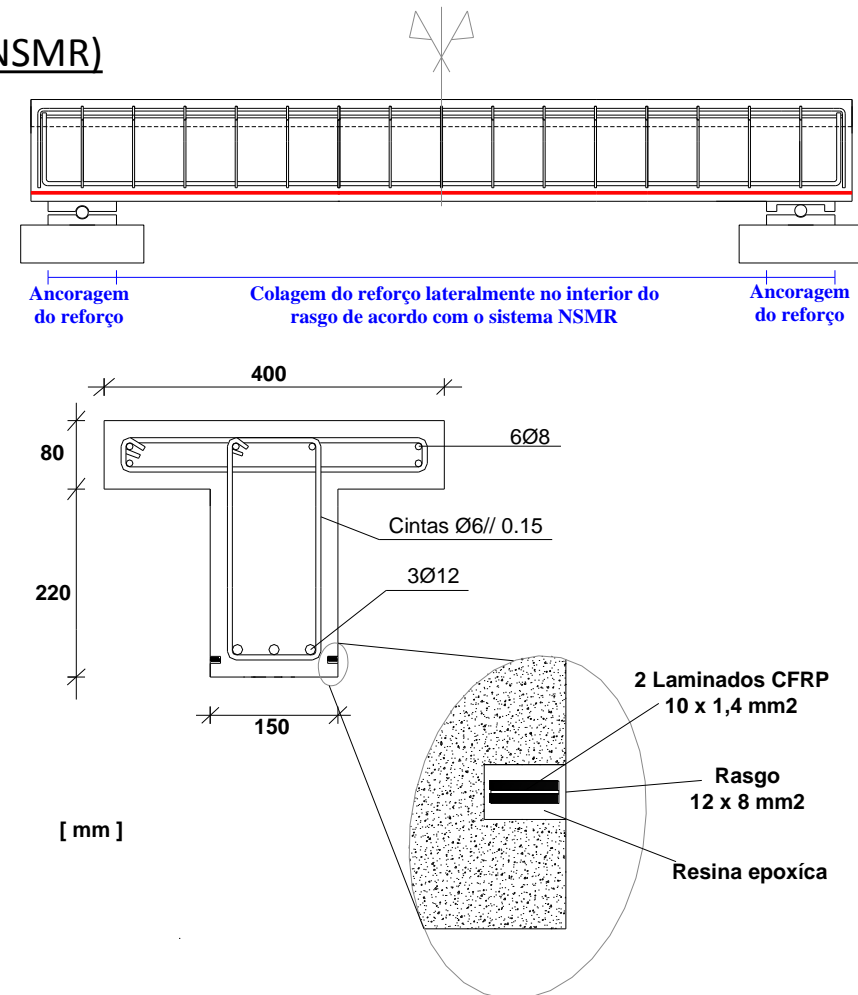
- Introdução do FRP em rasgos realizados nas faces laterais das vigas e preenchidos com resina epoxídica.

Vantagens:

- Fácil e rápida aplicação;
- Permite mobilizar a resistência total à tração do FRP
- Não expõe o FRP ao ambiente exterior

Desvantagens:

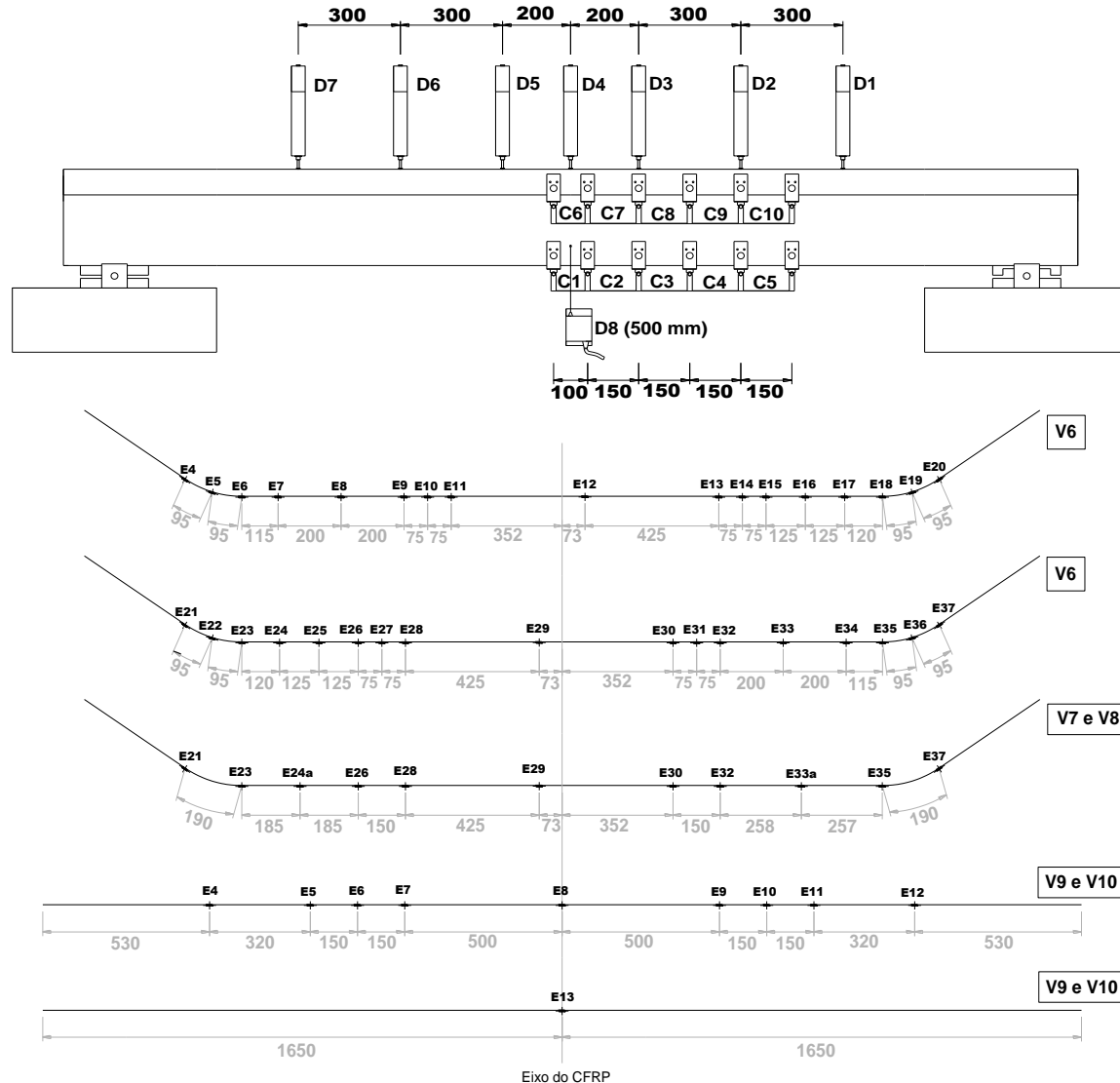
- Difícil aplicação em estruturas porticadas tridimensionais



# 1. Programa Experimental

## 1.5. Instrumentação das vigas

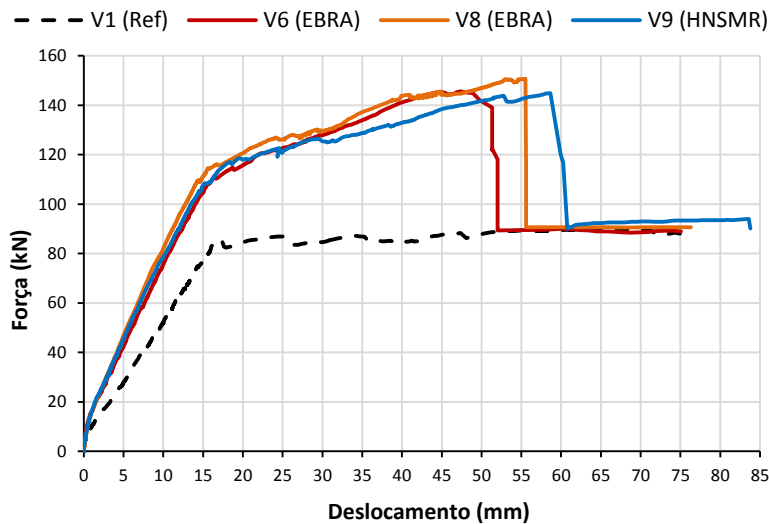
- Deslocamentos verticais nas vigas:
  - 8 transdutores de deslocamento (D1 a D8)
- Curvaturas:
  - 10 transdutores de deslocamento (C1 a C10)
- Extensões no aço:
  - 2 extensómetros nos varões longitudinais;
  - 1 extensómetro nos estribos
- Extensões no CFRP:
  - 34 extensómetros na viga V6 (EBRA)
  - 11 extensómetros nas vigas V7 (EBRA) e V8 (EBRA)
  - 10 extensómetros nas vigas V9 (HNSMR) e V10 (HNSMR)



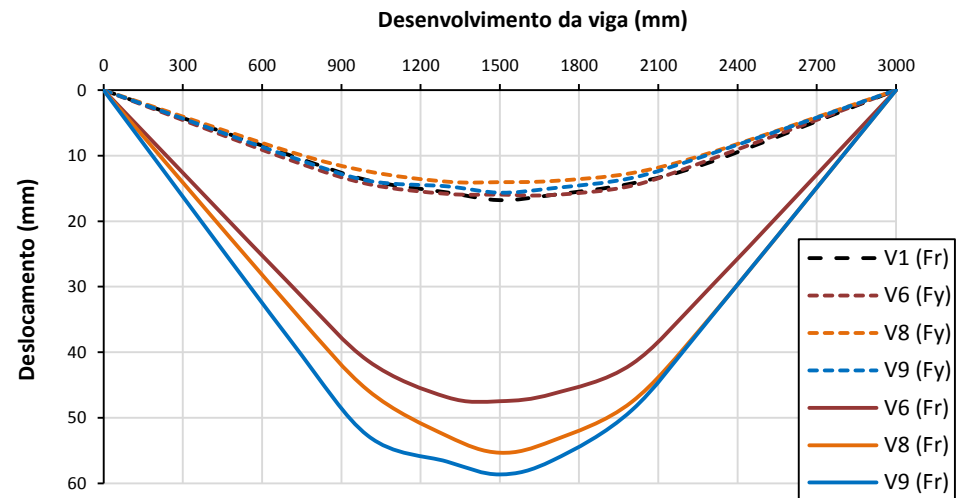
## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.1. Ensaio Monotónicos

#### Força vs Deslocamento



#### Deformada das vigas



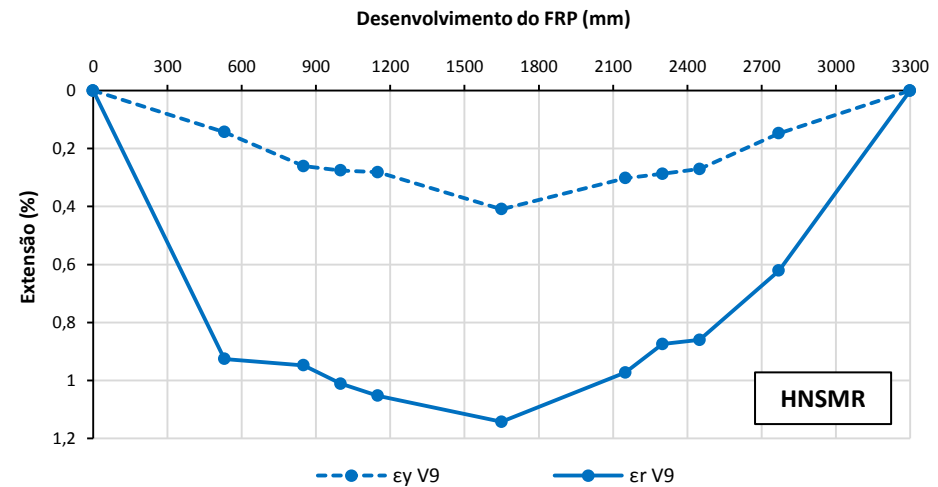
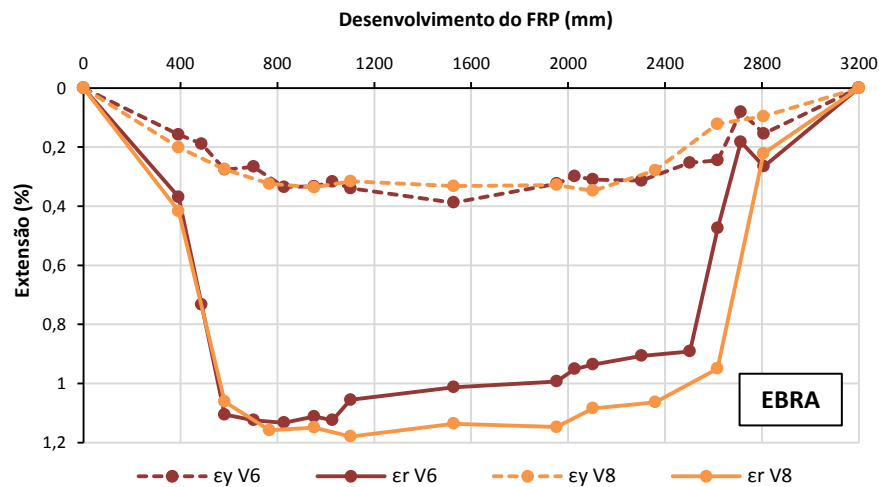
Modelo	$F_y$ (kN)	$\Delta F_y$ (%)	$\delta_y$ (mm)	$\Delta \delta_y$ (%)	$F_r$ (kN)	$\delta_r$ (mm)
V1 (Ref.)	85,5	-	16,8	-	-	-
V6 (EBRA)	109,8	+28%	16,1	-4%	145,5	47,5
V8 (EBRA)	110,0	+29%	14,8	-12%	150,7	55,5
V9 (HNSMR)	108,5	+27%	15,7	-7%	144,9	58,7

- Incremento da carga de cedência relativamente à viga V1 semelhante em ambas as técnicas;
- Maior carga de rotura na técnica EBRA;
- Maior deslocamento de rotura na técnica HNSMR.

## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.1. Ensaio Monotónicos

- Extensão nos laminados de CFRP



Modelo	$\epsilon_{f,max,y}$ (%)	$\epsilon_{f,max,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	$\beta_u$ (%)
V6 (EBRA)	0,39	1,13	1,03	>100
V8 (EBRA)	0,35	1,18		>100
V9 (HNSMR)	0,41	1,14		>100

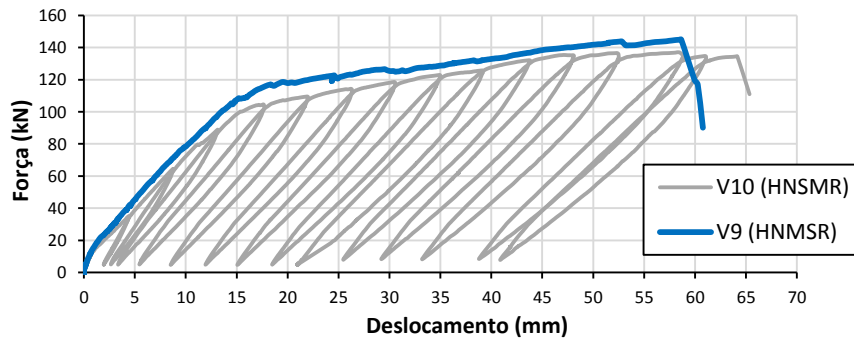
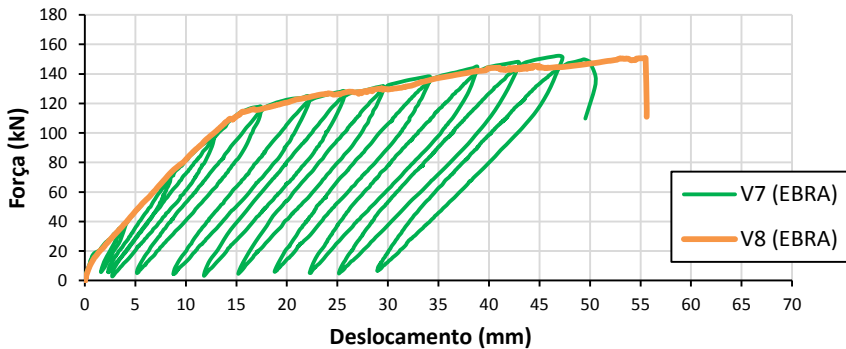
- Grau de utilização do CFRP de 100% nas técnicas EBRA e HNSMR.



## 2. Apresentação dos resultados experimentais

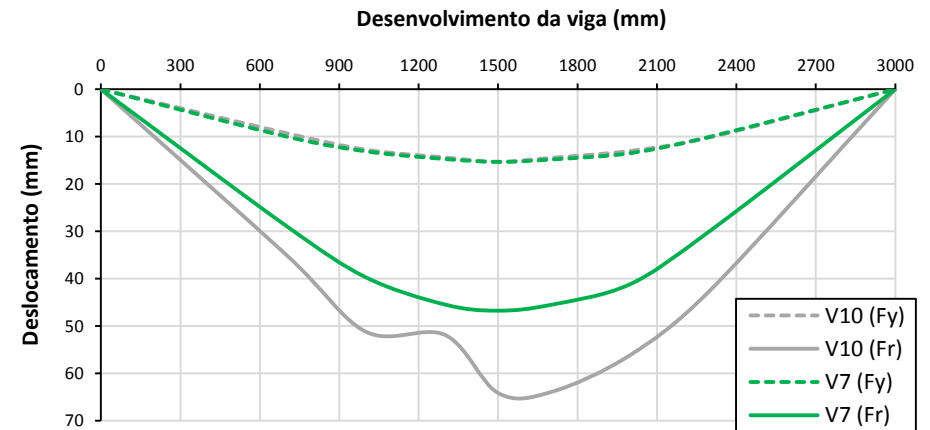
### 2.2. Ensaio Cíclicos

#### Força vs Deslocamento



Modelo	$F_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$F_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$F_r$ (kN)	$\delta_r$ (mm)
V7 (EBRA)	113,7	15,3	152,2	46,8	149,8	49,5
V10 (HNSMR)	100,0	15,3	137,0	58,4	134,4	64,2

#### Deformada das vigas

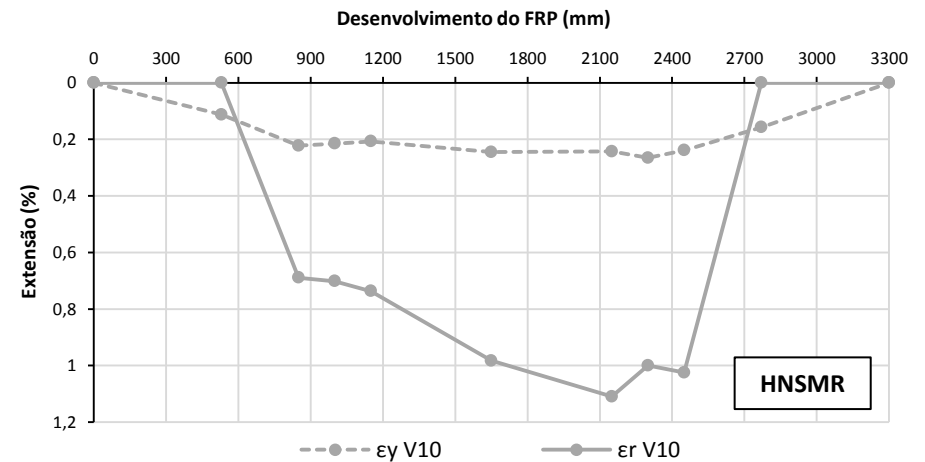
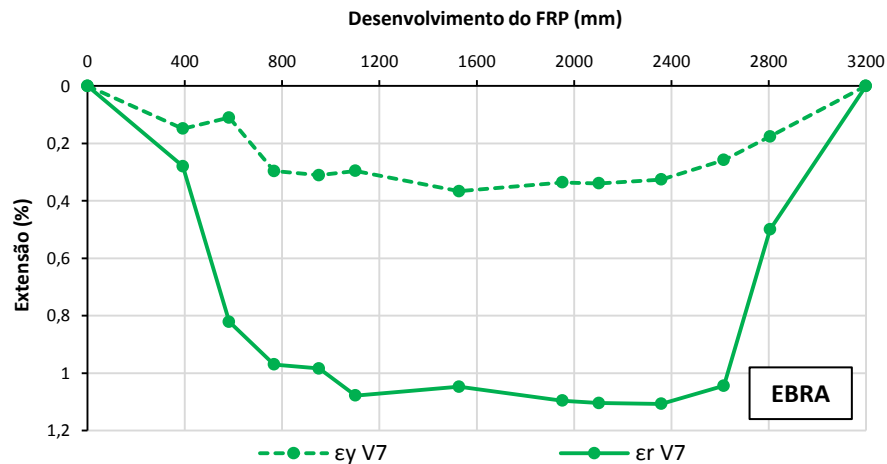


- Carga máxima superior na técnica EBRA;
- Maior deslocamento de rotura na técnica HNSMR;
- Técnicas EBRA e HNSMR eficientes para cargas monotónicas e cíclicas.

## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.2. Ensaio Cíclicos

#### Extensão nos laminados de CFRP



Modelo	$\epsilon_{f,max,y}$ (%)	$\epsilon_{f,max,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	$\beta_u$ (%)
V7 (EBRA)	0,37	1,11	1,03	>100
V10 (HNSMR)	0,27	1,11		>100

- Grau de utilização do CFRP de 100% nas técnicas EBRA e HNSMR

## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.3. Modos de Rotura

#### EBRA



**1º)** Formação de fissuras de flexão e esforço transverso com maior abertura nas zonas de meio vão e das rótulas plásticas;



**2º)** Descolamento dos laminados de CFRP em zonas intermédias da viga;



**3º)** Esmagamento do betão na face superior do banzo, na zona das rótulas plásticas;

**4º)** Rótura dos laminados de CFRP.

#### HNSMR



**1º)** Formação de fissuras de flexão e esforço transverso ao longo da viga;

**2º)** Formação de uma fenda horizontal ao nível dos rasgos laterais;



**3º)** Formação de uma fenda interior inclinada (45°) com origem nos laminados de CFRP;



**4º)** Esmagamento do betão na face superior do banzo, na zona das rótulas plásticas;

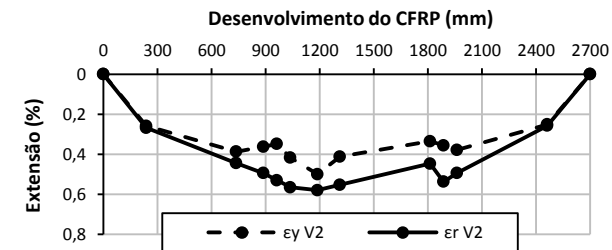
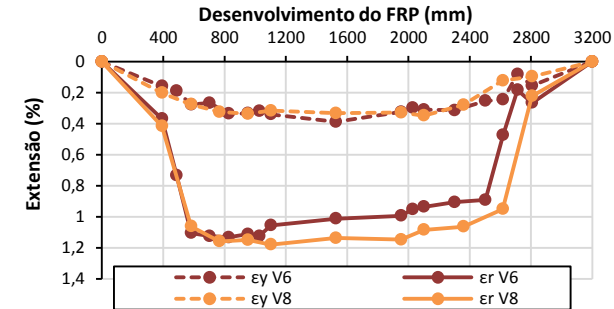
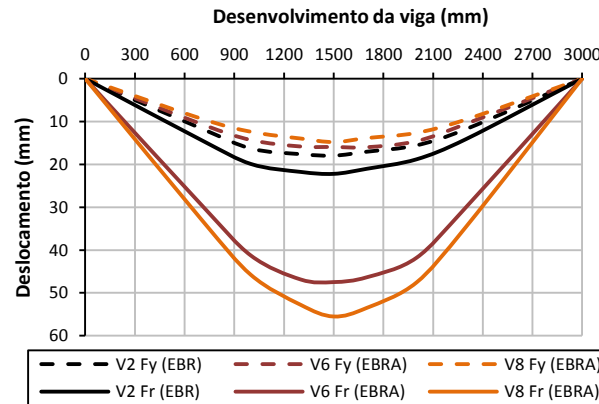
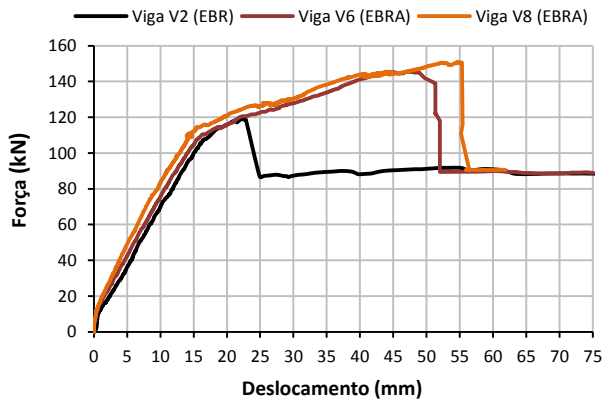


**5º)** Escorregamento do laminado e destacamento da cunha formada através da fenda interior (V9)/ rotura do laminado no interior do rasgo (V10)

## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.4. Técnicas propostas vs EBR e NSMR

#### EBRA vs EBR



Modelo	$F_y$ (kN)	$\Delta F_y$ (%)	$\delta_y$ (mm)	$\Delta \delta_y$ (%)	$F_r$ (kN)	$\Delta F_r$ (%)	$\delta_r$ (mm)	$\Delta \delta_r$ (%)	Incremento de $\delta_y$ a $\delta_r$
V2 (EBR)	107,6	-	16,6	-	119	-	22,2	-	+34 %
V6 (EBRA)	109,8	+2%	16,1	-3%	145,5	+22%	47,2	+113	+193%
V8 (EBRA)	110	+2%	14,8	-11%	150,7	+27%	55,5	+150	+275%

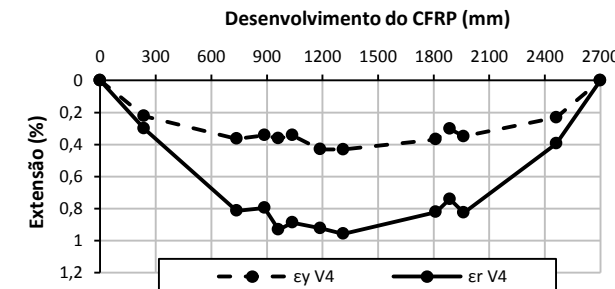
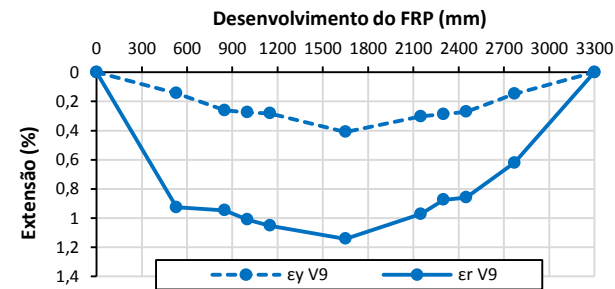
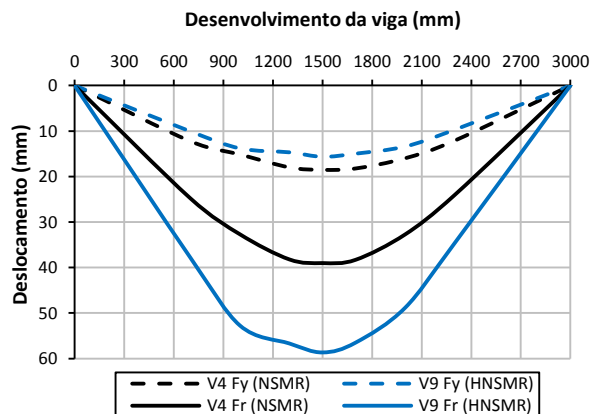
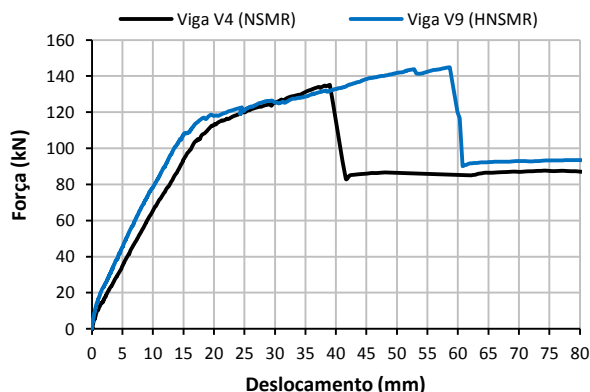
Modelo	$\epsilon_{f,max,y}$ (%)	$\epsilon_{f,max,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	$\beta_u$ (%)
V2 (EBR)	0,35	0,55	1,05	52
V6 (EBRA)	0,39	1,13	1,03	>100
V8 (EBRA)	0,35	1,18	1,03	>100

- Menor rigidez no sistema EBR (V2);
- Técnica EBRA com cargas de rotura de 22 e 27% superiores à técnica EBR;
- Maior incremento de deformação desde a cedência até à rotura na técnica EBRA;
- Grau de utilização do CFRP de 100% na técnica EBRA e de 52% na técnica EBR;

## 2. Apresentação dos resultados experimentais

### 2.4. Técnicas propostas vs EBR e NSMR

#### HNSMR vs NSMR



Modelo	$F_y$ (kN)	$\Delta F_y$ (%)	$\delta_y$ (mm)	$\Delta \delta_y$ (%)	$F_r$ (kN)	$\Delta F_r$ (%)	$\delta_r$ (mm)	$\Delta \delta_r$ (%)	Incremento de $\delta_y$ a $\delta_r$
V4 (NSMR)	104,0	-	17,0	-	135,1	-	39,0	-	+130 %
V9 (HNSMR)	108,5	+4%	15,7	-8%	144,9	+7%	58,7	+50	+275 %

Modelo	$\epsilon_{f,max,y}$ (%)	$\epsilon_{f,max,r}$ (%)	$\epsilon_{f,u}$ (%)	$\beta_u$ (%)
V4 (NSMR)	0,32	0,96	1,03	93
V9 (HNSMR)	0,41	1,14		>100

- Menor rigidez no sistema NSMR (V2) até à cedência;
- Técnica HNSMR com carga de rotura de 7 % superior à técnica NSMR;
- Maior incremento de deformação desde a cedência até à rotura na técnica HNSMR;
- Grau de utilização do CFRP de 100% na técnica HNSMR e de 93% na técnica NSMR;

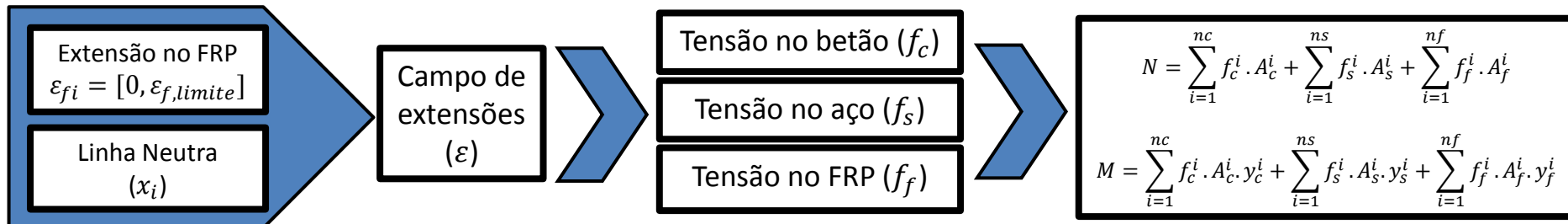
### 3. Modelação numérica

#### 3.1. Programa de cálculo

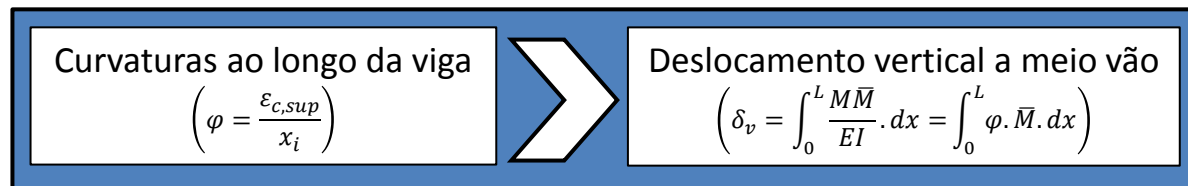
- Dividido em 4 módulos:
  - Módulo I: Introdução das variáveis
  - Módulo II: Leis constitutivas dos materiais
  - Módulo III: Cálculo
  - Módulo IV: Resultados

- Hipóteses consideradas:
  - As secções mantêm-se planas após deformação (Hipótese de Bernoulli).

- No Módulo III:



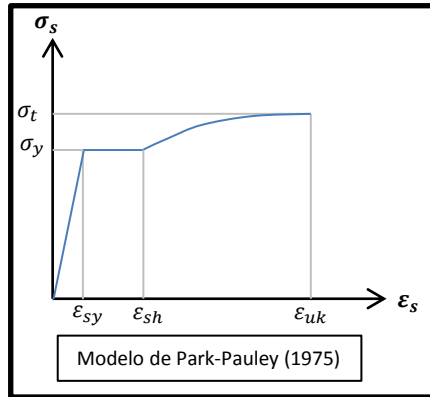
- Em cada ciclo o programa determina também:



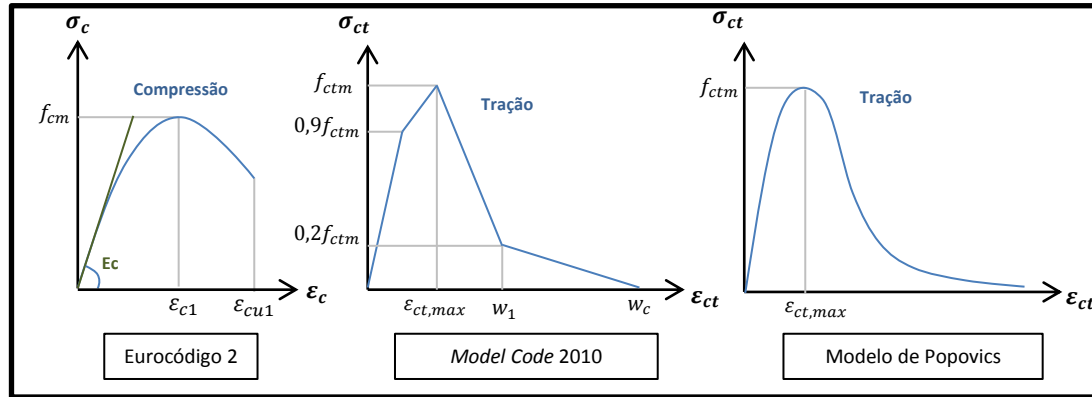
### 3. Modelação numérica

#### 3.2. Leis Constitutivas dos materiais

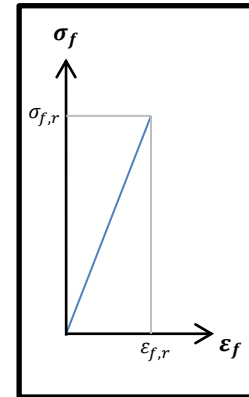
##### ■ Aço



##### ■ Betão



##### ■ CFRP



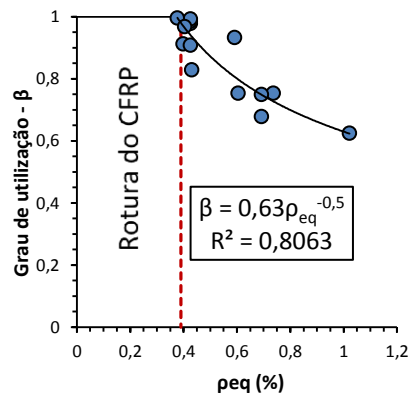
#### 3.3. Critérios de rotura

##### ■ EBR

$$\varepsilon_{f,limite} \leq K_m \times \varepsilon_{fu}$$

$$K_m = \begin{cases} 1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{428000} & \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f \leq 214000 \\ \frac{10700}{n \cdot E_f \cdot t_f} & \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f \geq 214000 \end{cases}$$

##### ■ NSMR



- Fortes et al. (2002)
- Castro et al. (2007)
- Hassan e Rizkalla (2003)
- Barros e Dias (2012)
- Carvalho (2010)

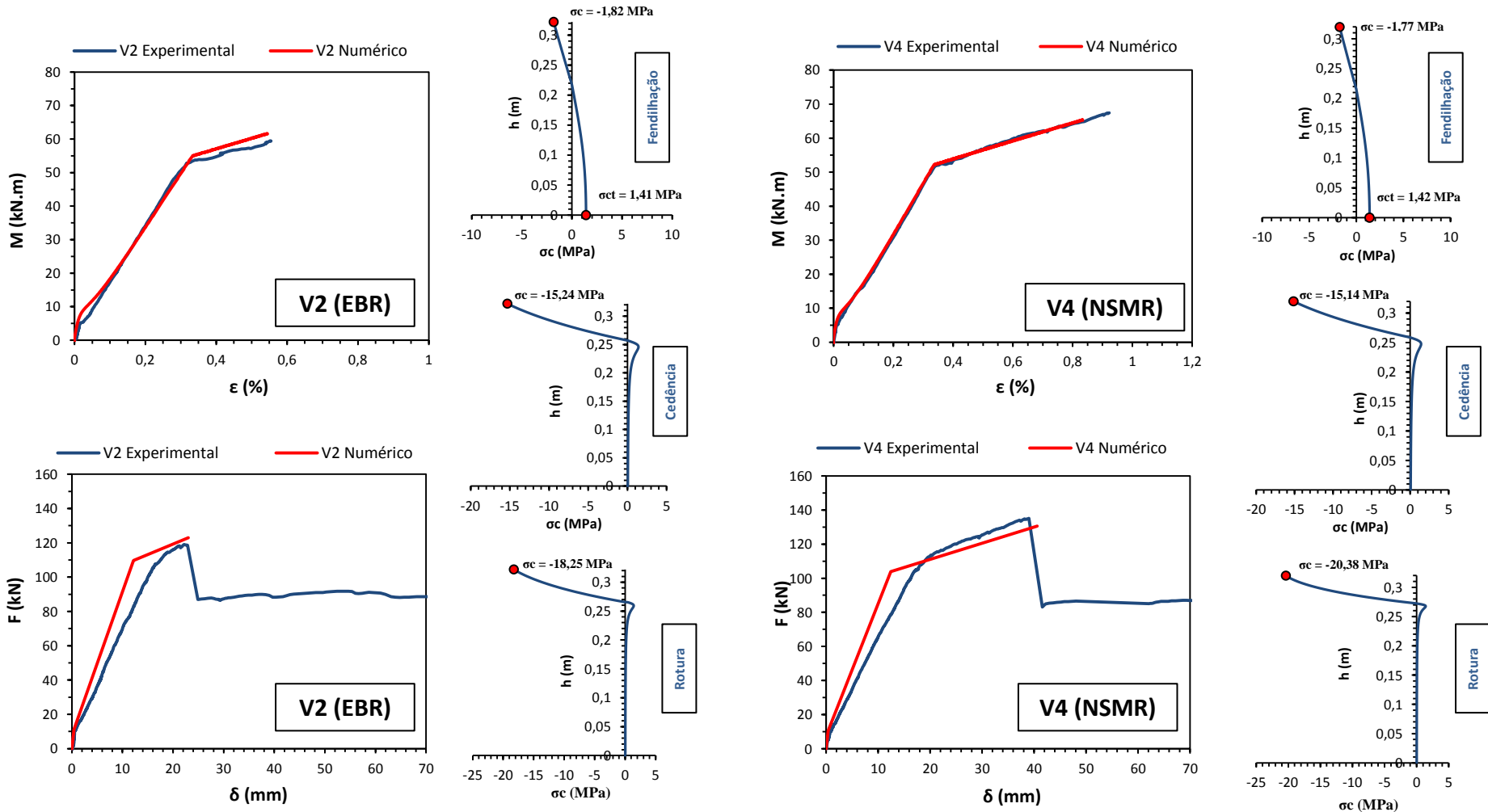
$$\varepsilon_{f,limite} = \frac{0,63 \times \varepsilon_{f,u}}{\sqrt{\rho_{eq}}}$$

##### ■ EBRA e HNSMR

$$\varepsilon_{f,limite} \leq 1,03$$

### 3. Modelação numérica

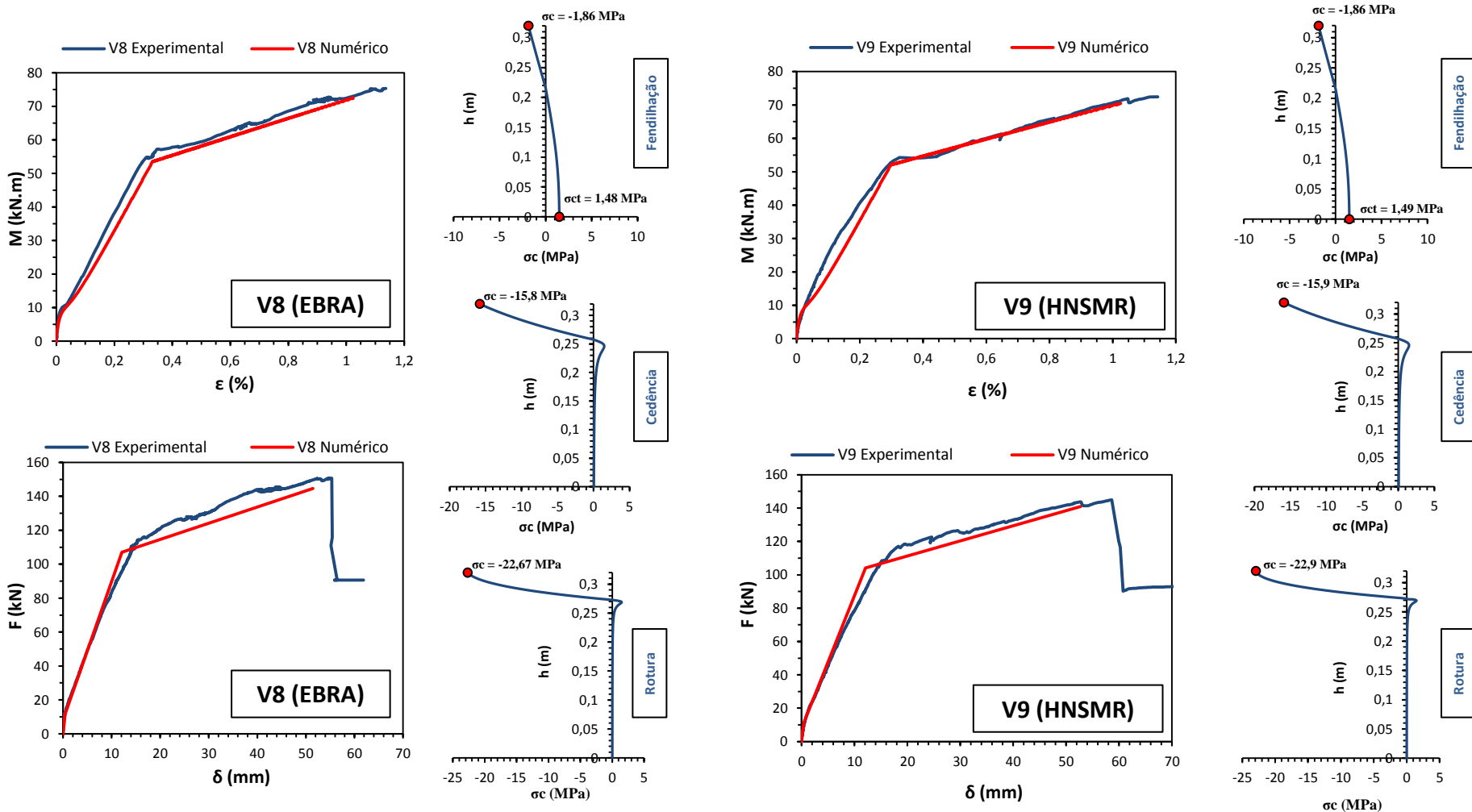
#### 3.4. Apresentação dos resultados





### 3. Modelação numérica

#### 3.4. Apresentação dos resultados



## 4. Conclusões

- A técnica EBRA é totalmente inovadora e permitiu mobilizar toda a resistência à tração do CFRP;
- As técnicas EBRA e HNSMR:
  - Permitiram aumentar a capacidade de carga, rigidez e deformação na rotura das vigas estudadas;
  - Foram eficientes tanto para cargas monotónicas como para cargas cíclicas.
- O desalinhamento na colagem dos laminados de CFRP influencia a resistência, ductilidade após a cedência e a rigidez no desempenho global do sistema de reforço.
- O programa de calculo desenvolvido permitiu obter valores semelhantes aos experimentais, tratando-se de uma ferramenta válida na simulação do comportamento não-linear de vigas reforçadas com compósitos de FRP.

**OBRIGADO !**