

# Avaliação de segurança estrutural de pontes de betão existentes: uma abordagem metodológica

Mário Pimentel (a),(\*)

Joaquim Figueiras (b)

*(a) Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

*(b) Professor Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

*(\*) Orador*



Laboratório de Tecnologia do Betão  
e do Comportamento Estrutural

**U. PORTO**

**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO



# Conteúdo

1. Motivação
2. Metodologia para verificação da segurança de estruturas existentes
3. Particularização: avaliação da segurança ao cisalhamento
4. Conclusões



# 1. Motivação

# 1. Motivação

- O custo de substituição das pontes e viadutos da rede de autoestradas nos 27 países da União Europeia foi estimado em cerca de 4% do produto interno bruto (dados de 2004).
- Dado que as consequências económicas de cálculos conservativos podem ser muito significativas e levar à recomendação de **intervenções desnecessárias**, existe hoje um consenso alargado sobre a necessidade de ter **procedimentos específicos** para a verificação de segurança de estruturas existentes.

# 5 componentes principais de um sistema de gestão de obras de arte

1. Uma base de dados com o inventário;
2. Um conjunto de procedimentos para avaliar a condição estrutural das pontes. Aqui se incluem as rotinas de inspeção visual, as técnicas de inspeção não destrutiva e a monitorização estrutural.
3. Métodos de análise estrutural e verificação de segurança específicos para estruturas existentes;
4. No caso de ser demonstrado que é necessário intervir na estrutura, um procedimento objetivo que permita a determinação da intervenção mais adequada, seja ela reparação, reforço ou substituição.
5. Um conjunto de critérios que permitam priorizar as intervenções, assegurando a melhor alocação de recursos e minimizando os riscos.

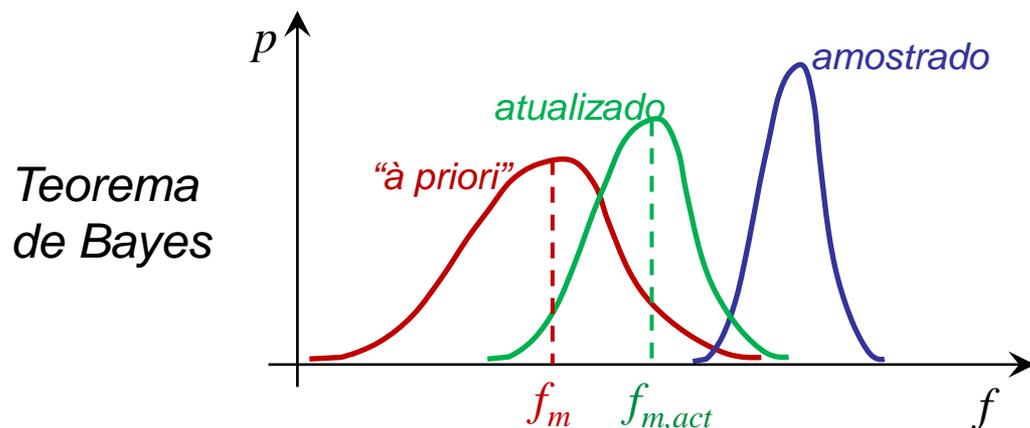
A chave para o prolongamento da vida útil de uma estrutura reside no exame detalhado da sua condição estrutural e numa avaliação de segurança precisa.



## 2. Verificação de segurança de pontes existentes

# Inspeção e atualização de propriedades

## Atualização das propriedades dos materiais e geometria



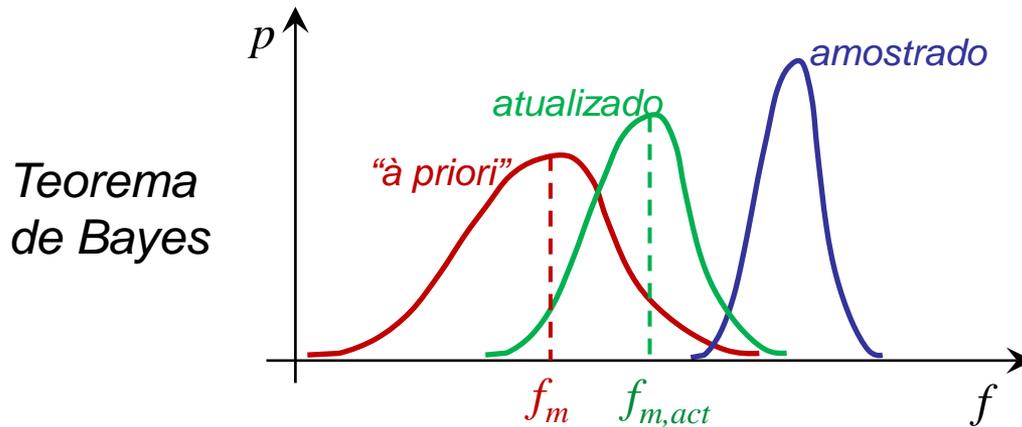
- Relevância das técnicas de inspeção não destrutiva (IND);
- Fusão da informação recolhida no ensaio de carotes com as técnicas de IND.



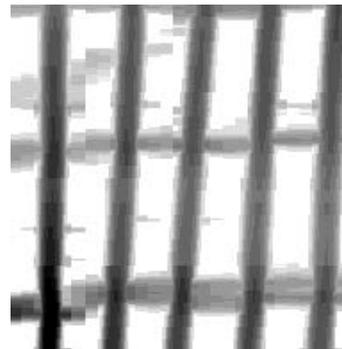
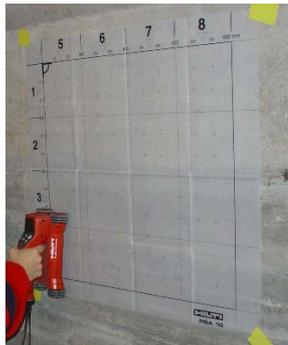
*Inspeção visual*

# Inspeção e atualização de propriedades

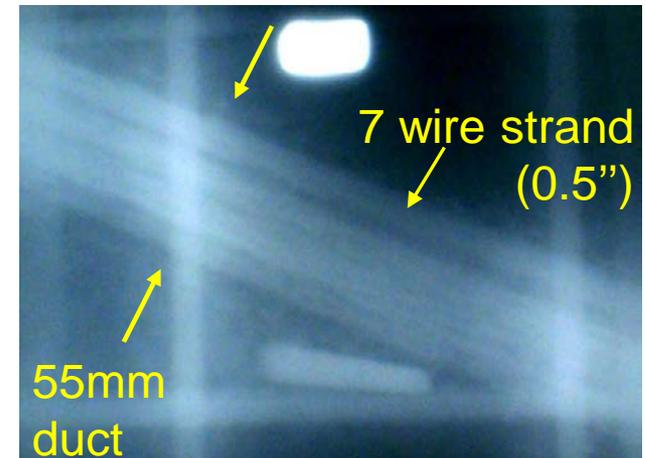
## Atualização das propriedades dos materiais e geometria



- Relevância das técnicas de inspeção não destrutiva (IND);
- Fusão da informação recolhida no ensaio de carotes com as técnicas de IND.



Deteção de armaduras

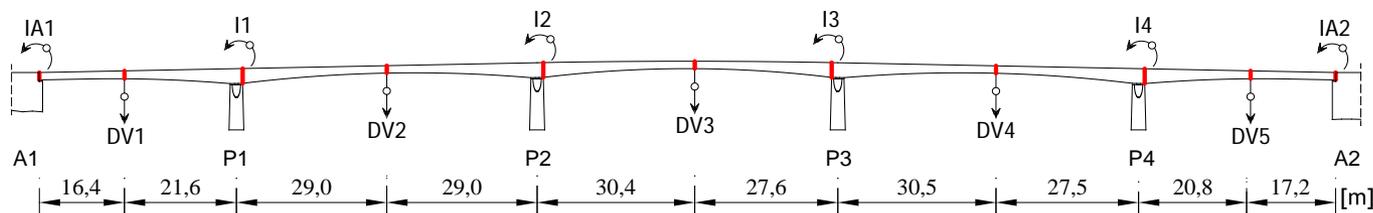


Gamagrafia dos cabos de pré-esforço numa ponte

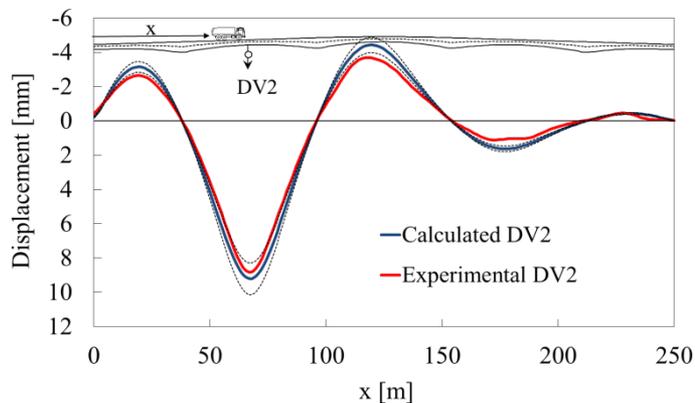
# Inspeção e atualização de propriedades

## Atualização das ações e dos seus efeitos

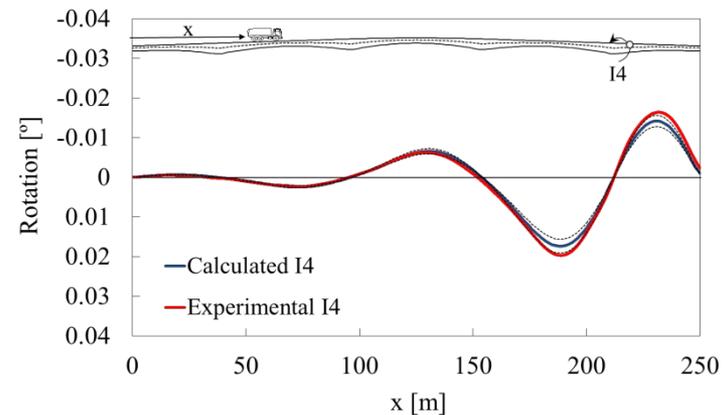
- Relevância dos sistemas WIM ou B-WIM para atualizar os modelos de carga;
- Relevância da monitorização estrutural de componentes selecionados da estrutura;



*Localização dos transdutores de deslocamento e dos inclinómetros*

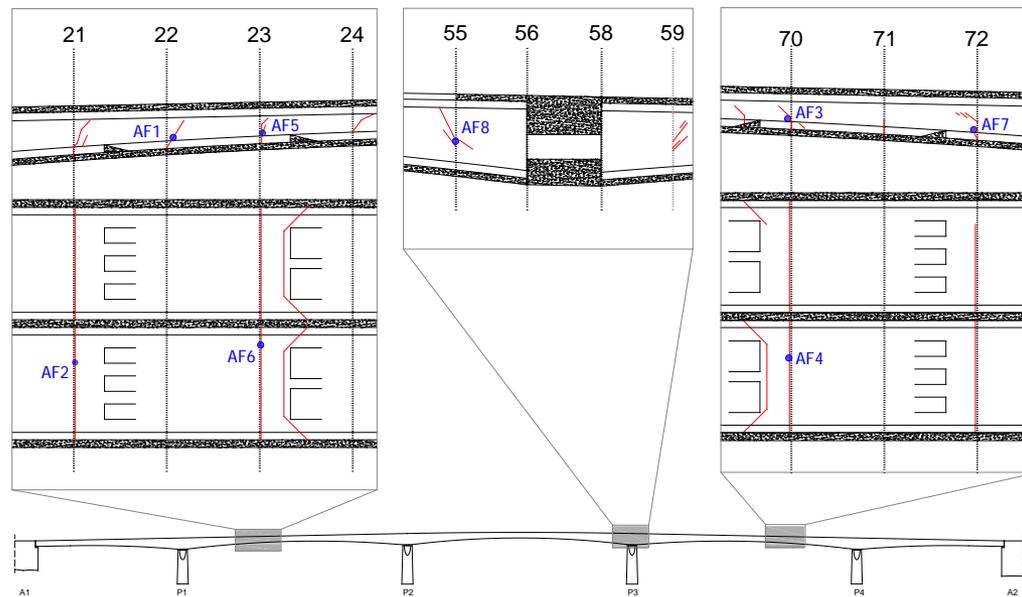


*Linha de influência do deslocamento vertical no 2º vão*

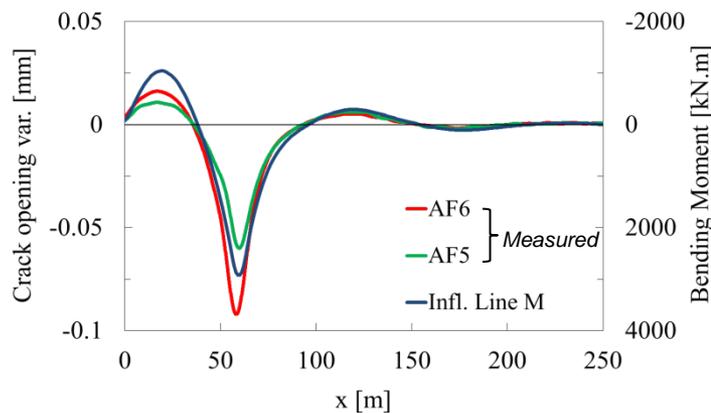


*Linha de influência da rotação sobre o pilar P4*

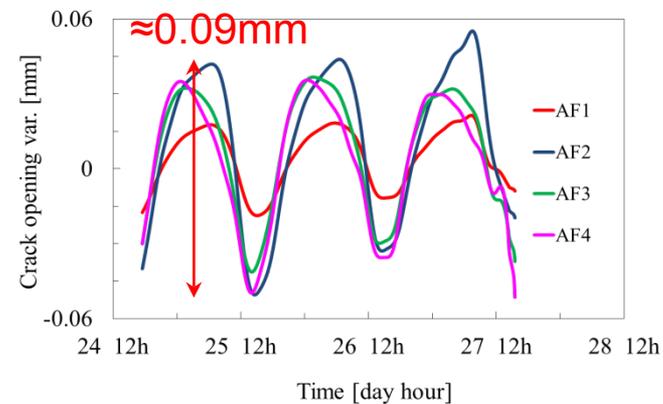
# Inspeção e atualização de propriedades



Localização dos medidores de aberturas de fenda



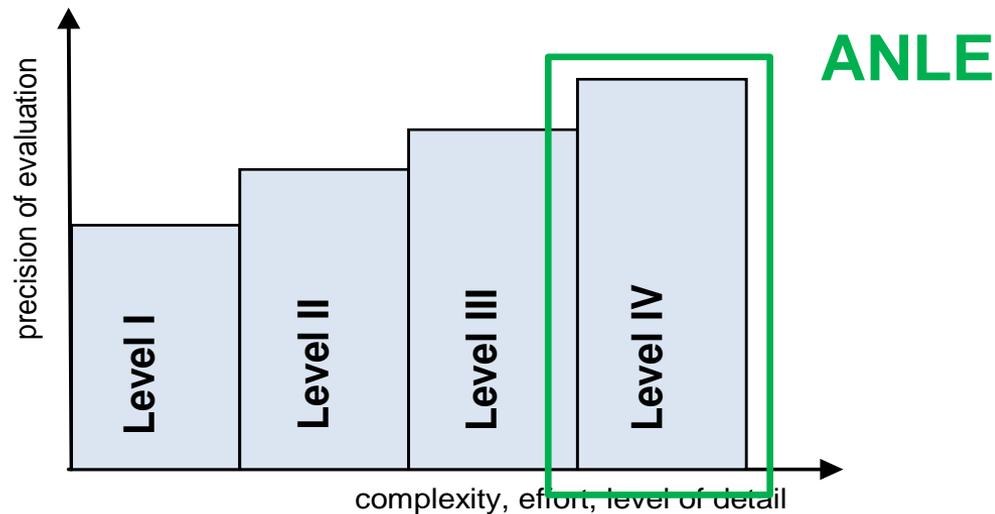
Linha de influência da abertura de fenda na secção n°23



Varição das aberturas de fenda durante 4 dias

# Níveis de aproximação na análise estrutural e verificação de segurança

- Uma abordagem por níveis de aproximação é recomendada para avaliar quais as pontes que apresentam um nível de risco mais elevado, com o nível crescente de refinamento à medida que o processo de análise avança



- Os métodos a utilizar em cada um dos níveis de aproximação devem estar interligados, promovendo assim a transparência no processo de verificação de segurança, o uso de “engineering judgement” e decréscimo do fator “erro humano”;
- A verificação de segurança de estruturas existentes fornece os benefícios económicos necessários para a utilização de métodos de ANLE

# Formato de segurança semi-probabilístico

Condição de exame

$$R_d \geq E_d$$

➤ Grau de conformidade

$$n = R_d / E_d \geq 1.0$$

Valor de cálculo dos efeitos das ações

$$E_d = \gamma_{G,act} G_{k,act} + P + \gamma_{Q,act} \left( Q_{k,j,act} + \sum_{i \neq j} \psi_{0,i} Q_{k,i,act} \right)$$

Valor de cálculo da resistência

➤ Coeficientes parciais de segurança

$$R_d = R(f_{d,act}, a_{nom}) \quad f_d = f_k / \gamma_{Rd,m}$$

✓ *Próprio para ALE (segurança da seções transversal, local)*

➤ Coeficiente global de segurança

$$R_d = \frac{R(f_{m,act}, a_{nom}, S)}{\gamma_R} = \frac{R_m}{\gamma_R}$$

✓ *Próprio para a ANLE (segurança do sistema estrutural global)*

# Formato de segurança semi-probabilístico para ANLE

*Modelo estocástico para a resistência R:*  $R = R_m \cdot F \cdot G \cdot M$

$F$  – variável que traduz a incerteza nas propriedades dos materiais,  $f$ ;

$G$  – incerteza nos parâmetros caracterizadores da geometria,  $a$ ;

$M$  – incerteza no modelo de cálculo utilizado na determinação de  $R_m$ .

*Coefficiente de variação da resistência*

$$v_R = \sqrt{v_F^2 + v_G^2 + v_M^2}$$

*Valor de exame de R (distrib. lognormal)*

$$R_d = R_m \cdot \exp(-0.8 \cdot \beta_n \cdot v_R)$$

*Coefficiente global de resistência*

$$\gamma_R = \exp(0.8 \cdot \beta_n \cdot v_R)$$

Pimentel, M., Brühwiler, E. and Figueiras, J. (2014) " Safety examination of existing concrete structures using the global resistance safety factor concept", Engineering Structures, Vol. 70

# Índice de fiabilidade alvo

Índice de fiabilidade alvo anual  $\beta_1$  (JCSS)

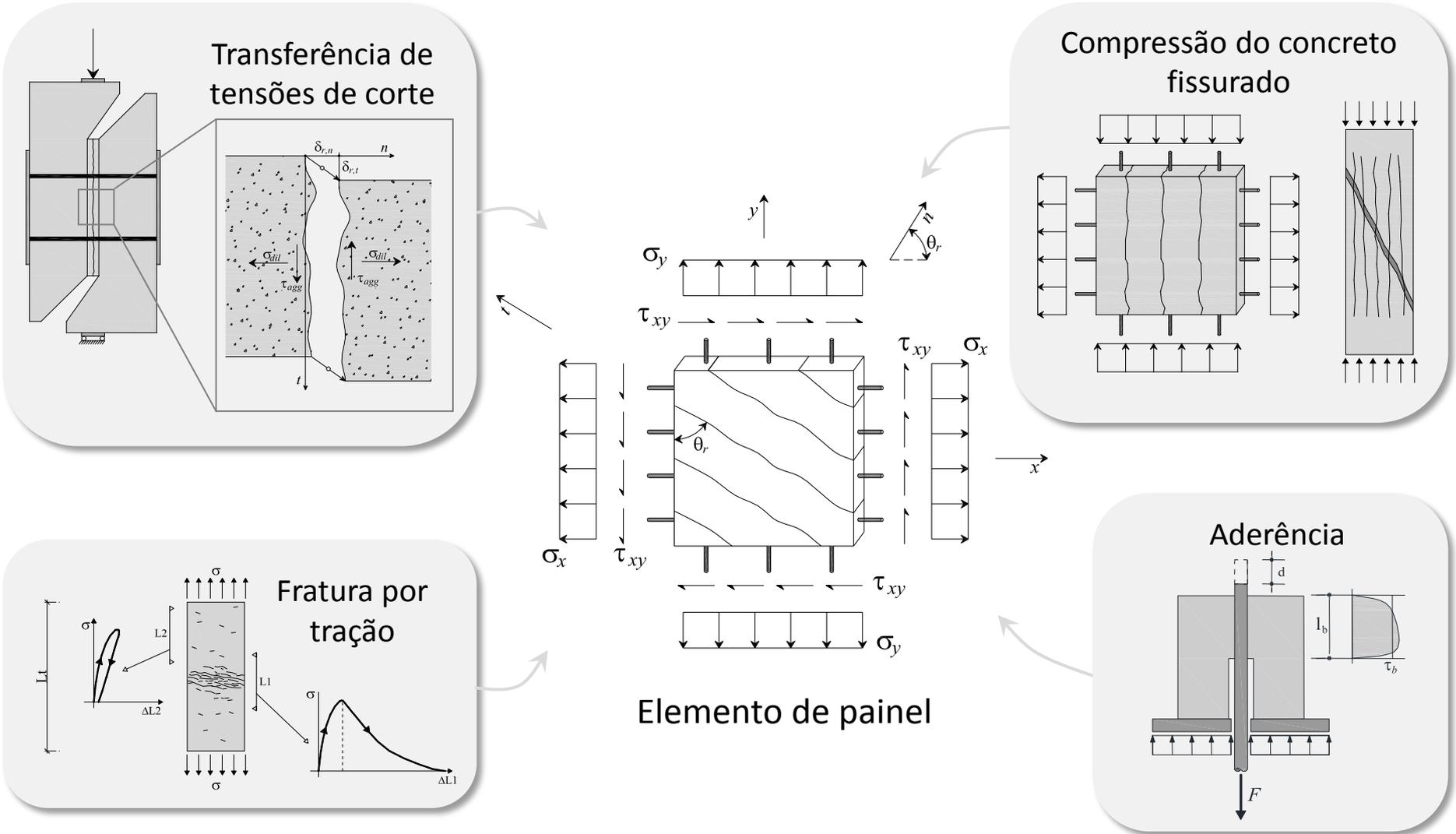
Eficácia da intervenção	Consequências da rotura		
	Reduzidas $\rho < 2$	Moderadas $2 < \rho < 5$	Grandes $5 < \rho < 10$
Reduzida: $EF_M < 0.5$	3.1	3.3	3.7
Normal: $0.5 \leq EF_M \leq 2$	3.7	4.2	4.4
Elevada: $EF_M > 2$	4.2	4.4	4.7

Índice de fiabilidade para  $n$  anos  $\beta_n$ :  $\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$



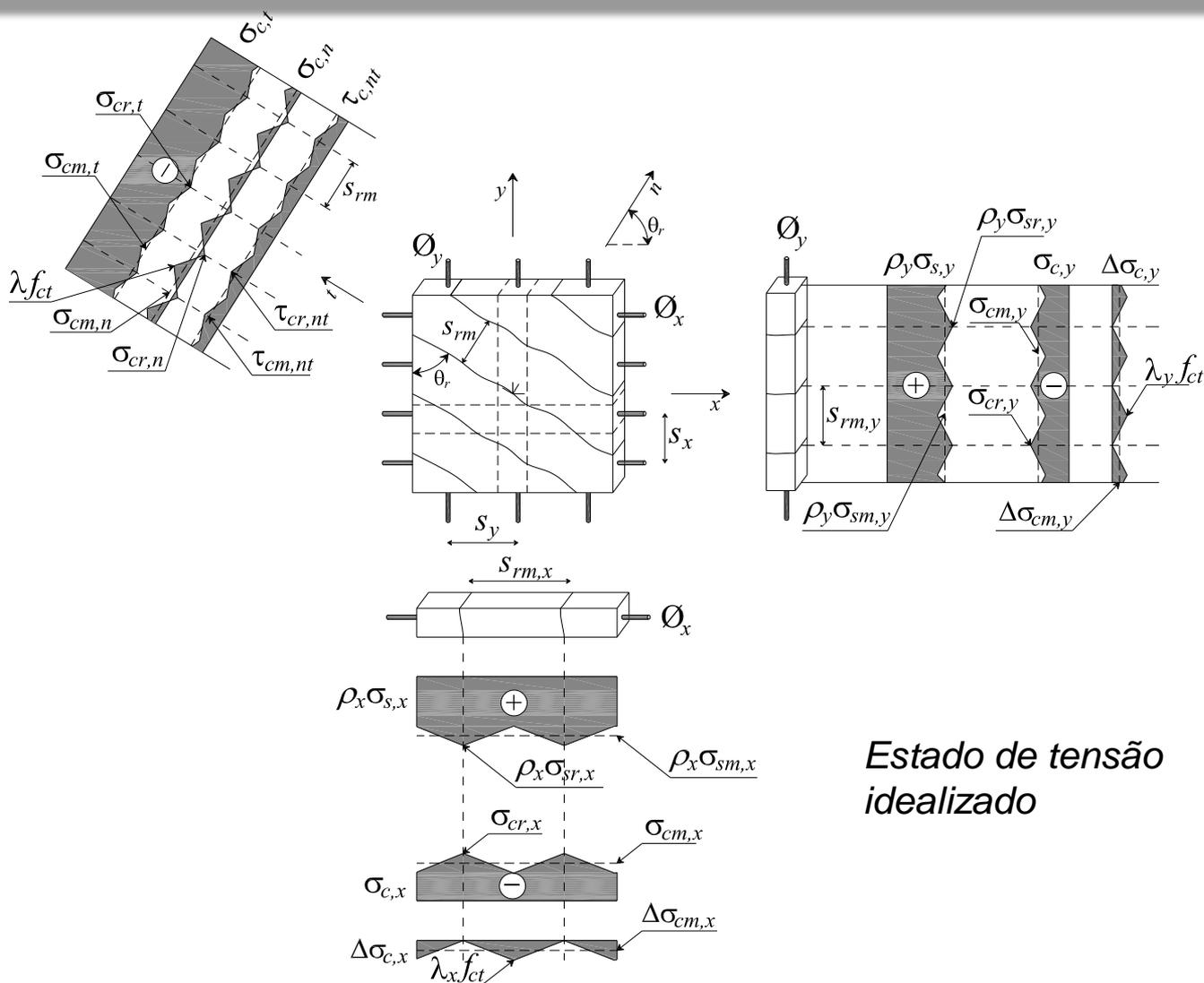
### 3. Particularização: Verificação de segurança ao cisalhamento

# O elemento de painel – modelo detalhado



Pimentel, M., Brühwiler, E. and Figueiras, J. (2010) " Extended cracked membrane model for the analysis of RC panels", Engineering Structures, Vol. 32

# O elemento de painel – modelo detalhado (F-CMM)

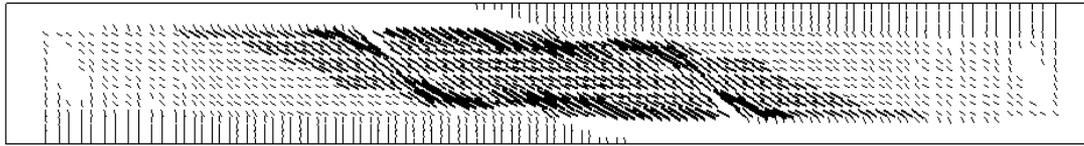
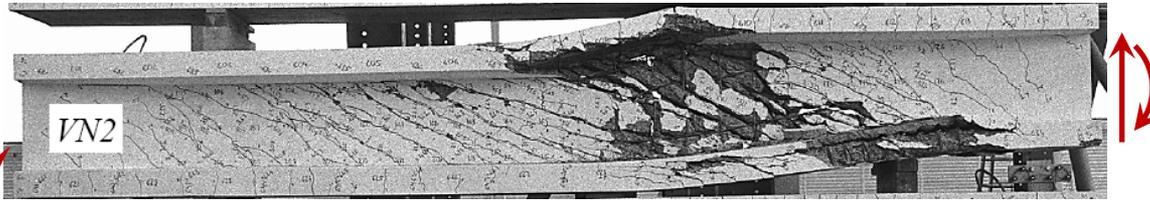


*Estado de tensão idealizado*

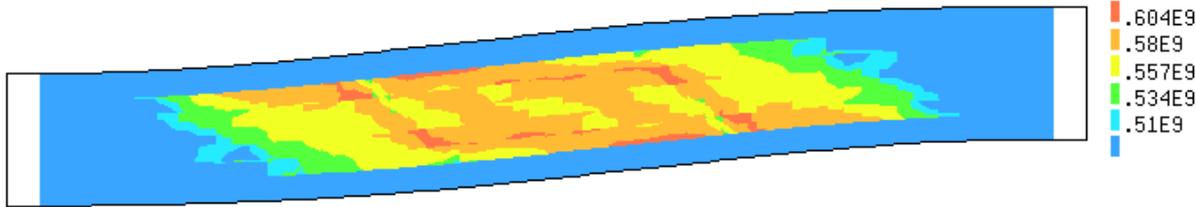
Pimentel, M., Brühwiler, E. and Figueiras, J. (2010) " Extended cracked membrane model for the analysis of RC panels", Engineering Structures, Vol. 32

# Do painel para as estruturas – Nível 4 (modelo de ANLE)

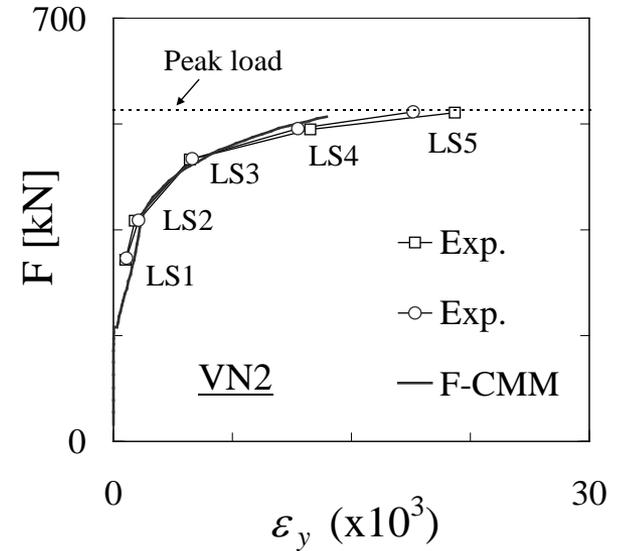
Viga VN2 (Kaufmann e Marti 1998)



Padrão de fendilhação na rotura



Tensões nos estribos (nas fendas)

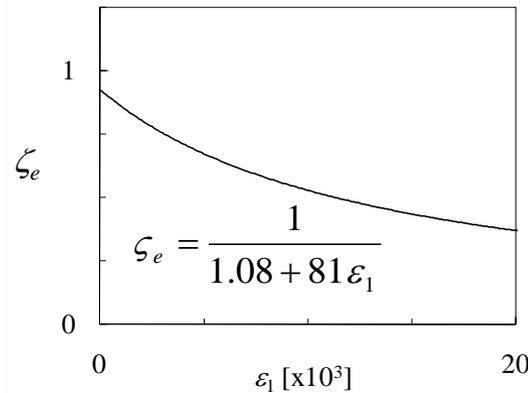
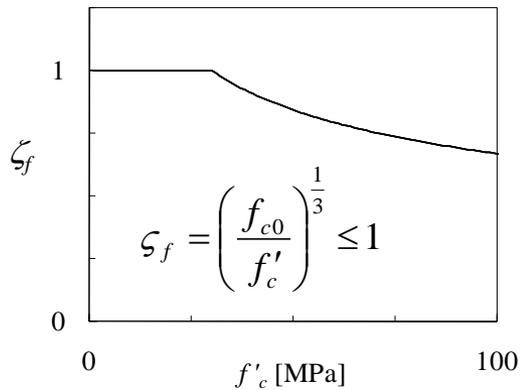
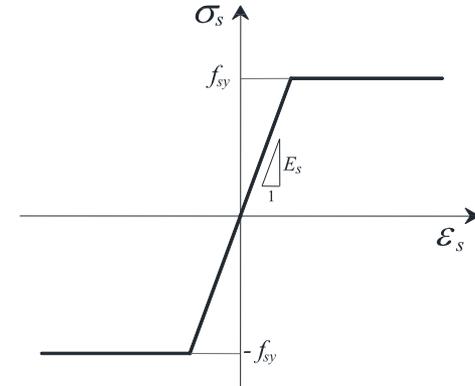
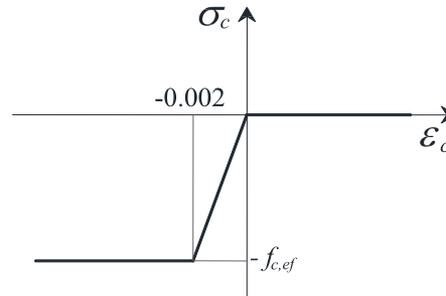
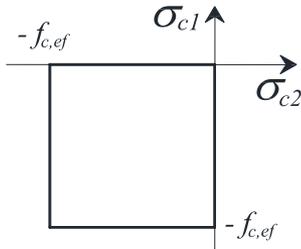


$$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,calc}} = 1.02$$

Pimentel, M. and Figueiras, J. (2013) "Efficient finite element analysis of large-scale structures based on a phenomenological approach to RC membrane behaviour", Engineering Computations, Vol. 30, No. 6

# Nível 3 de aproximação – modelo de campos de tensões

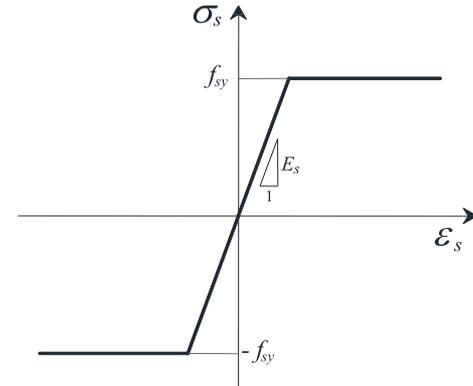
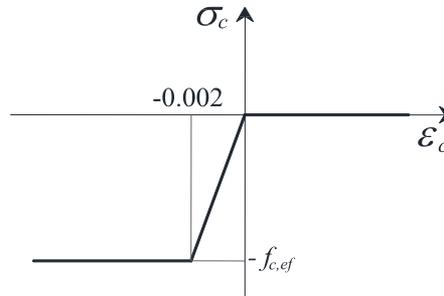
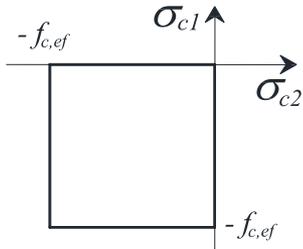
$$f_{c,ef} = \zeta_e \zeta_f f'_c$$



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta'$$

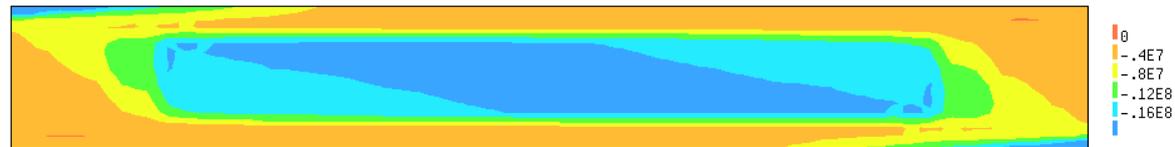
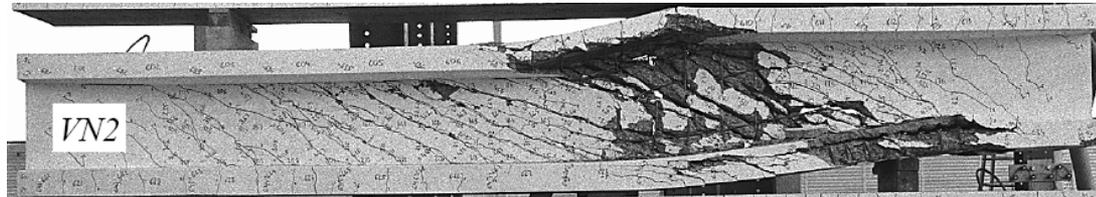
# Nível 3 de aproximação – modelo de campos de tensões

$$f_{c,ef} = \zeta_e \zeta_f f'_c$$



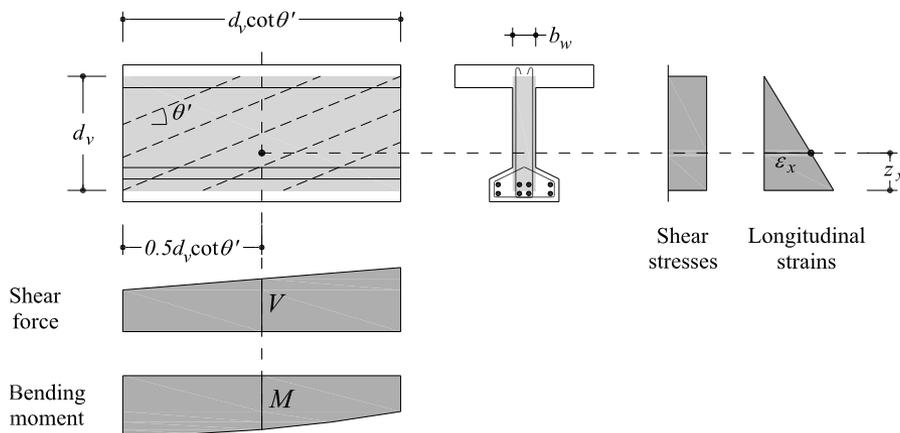
$$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,calc}} = 1.09$$

$$\tan \theta = 2.84$$



*Campo de tensões na rotura*

# Níveis 2 e 1 de aproximação – modelos analíticos



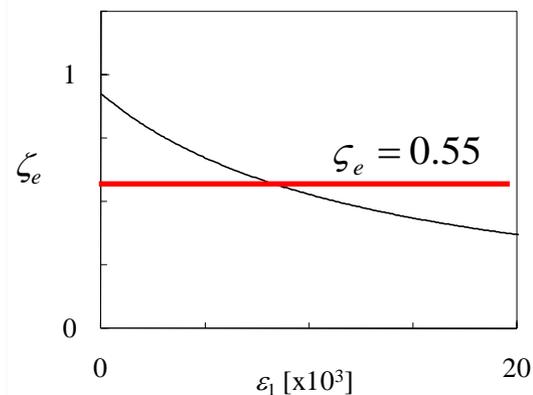
$$\tau_{xy} = \frac{V}{b_w d_v} \left\{ \begin{array}{l} V_{R,\max} = \frac{b_w d_v \zeta_f \zeta_e f'_c}{\tan \theta' + \cot \theta'} \\ V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} d_v \cot \theta' \end{array} \right.$$

## Nível 1 – Dimensionamento

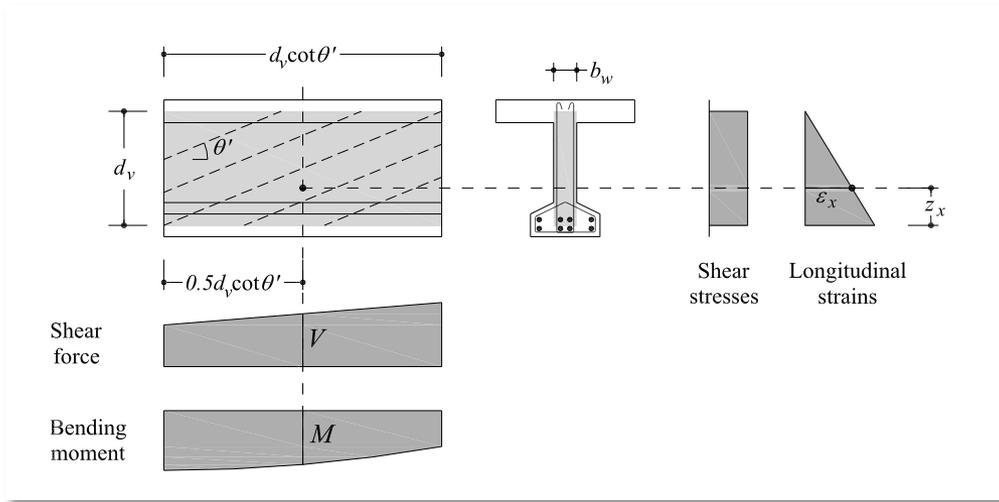
$$\zeta_f = (f_{c0} / f'_c)^{1/3}$$

$$\zeta_e = 0.55$$

$$1 \leq \cot \theta' \leq \sqrt{\frac{0.55 f_{c0}^{1/3} - \omega_y}{\omega_y}} \quad \wedge \quad \cot \theta' \leq 2.5$$



# Nível 2 e 1 de aproximação – modelos analíticos



$$\tau_{xy} = \frac{V}{b_w d_v} \left\{ \begin{array}{l} V_{R,max} = \frac{b_w d_v \zeta_f \zeta_e f'_c}{\tan \theta' + \cot \theta'} \\ V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} d_v \cot \theta' \end{array} \right.$$

## Nível 2 – Verificação

$$\zeta_f = (f_{c0} / f'_c)^{1/3}$$

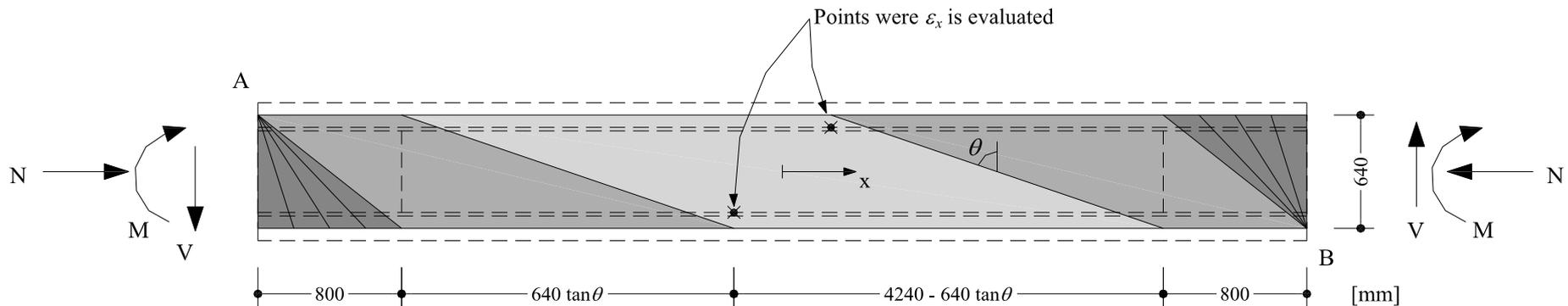
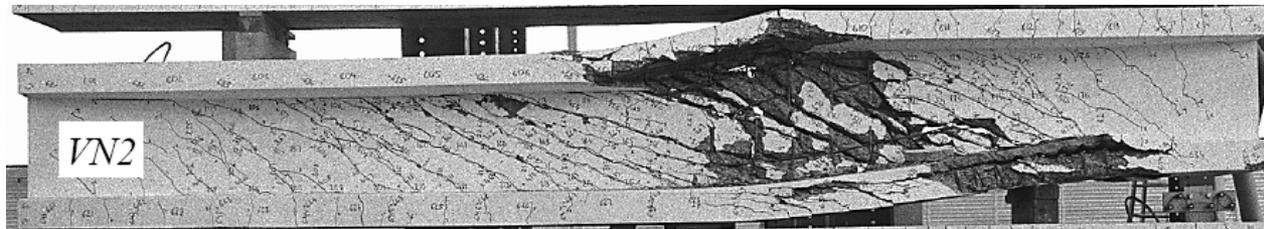
$$\zeta_e = \frac{1}{1.08 + 81 \varepsilon_1}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta'$$

$$1 \leq \cot \theta' \leq \sqrt{\frac{-0.46 - 60 \varepsilon_x + \sqrt{0.1156 + \frac{44.21 f_{c0}^{1/3}}{\omega_y} (\varepsilon_x + 0.002)}}{0.12 + 60 \varepsilon_x}}$$

# Nível 2 e 1 de aproximação – modelos analíticos

Viga VN2 (Kaufmann e Marti 1998)



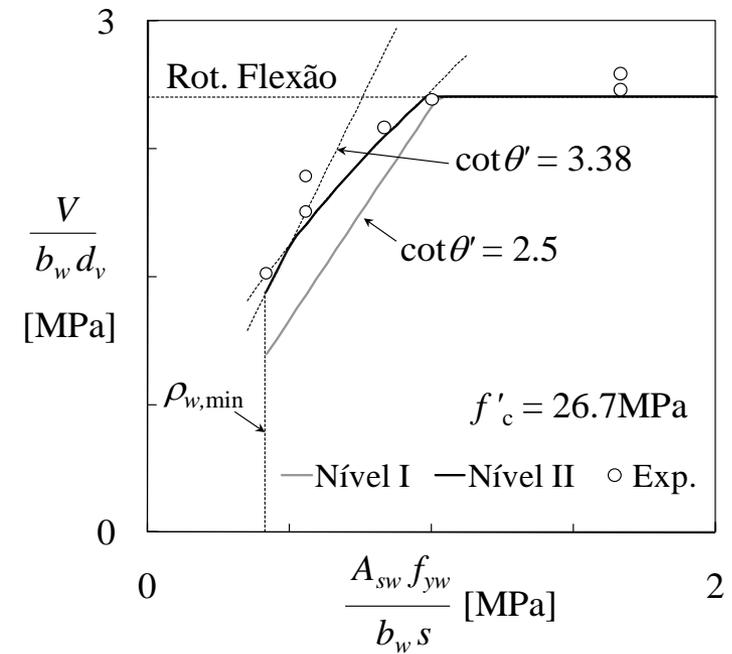
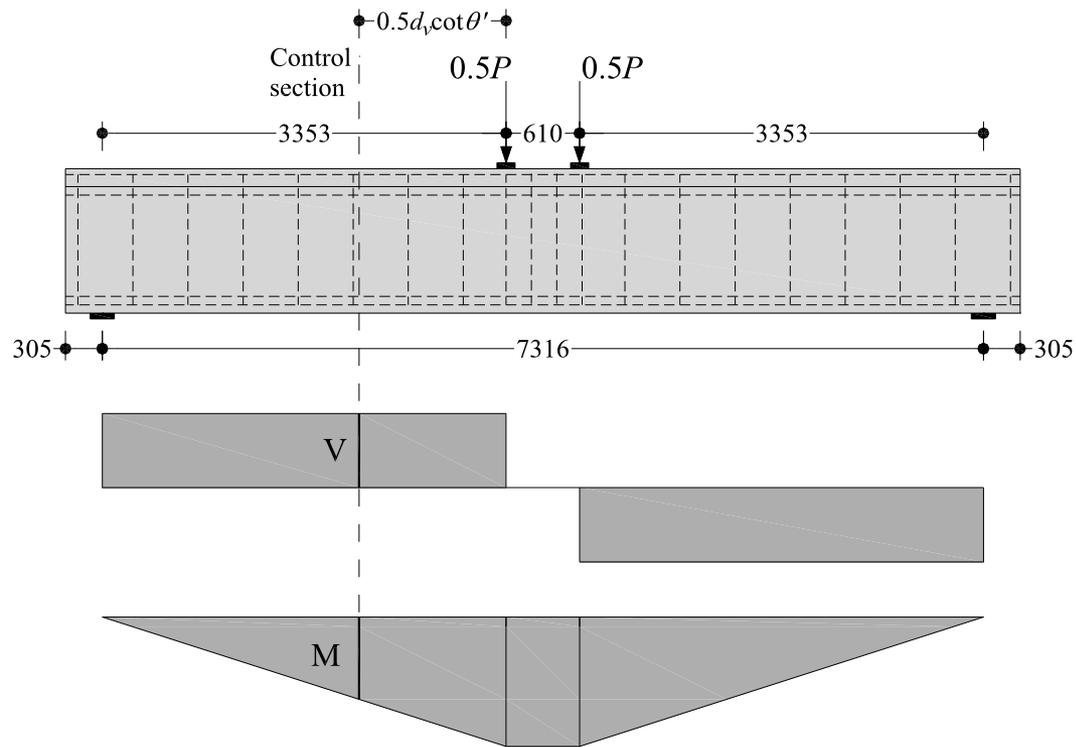
**Nível 2**

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_x = 0.4 \cdot 10^{-3} \\ \tan \theta = 2.88 \end{array} \right\} \frac{V_{u,exp}}{V_{u,calc}} = 1.16$$

**Nível 1**

$$\tan \theta = 2.50 \quad \frac{V_{u,exp}}{V_{u,calc}} = 1.36$$

# Nível 2 e 1 de aproximação – modelos analíticos



Campanha experimental conduzida por Higgins *et al* (2004): sub-série com  $f'_c \approx$  constante e quantidade reduzida de armadura transversal

## 4. Conclusões

1. Foram apresentados modelos para a verificação da resistência ao cisalhamento com diversos níveis de complexidade, permitindo unificar os conceitos intervenientes nos mais complexos modelos de análise não linear e nos métodos analíticos correntes;
2. Os modelos mais simples são obtidos a partir dos mais complexos a partir de simplificações claras. Desta forma são evidentes para as vantagens/ganhos decorrentes da utilização de um modelo de ordem superior;
3. A adoção da abordagem por **Níveis de Aproximação** promove a transparência no processo de verificação de segurança, o uso de “engineering judgement” e decréscimo do fator “erro humano”;
4. O modelo detalhado foi implementado num modelo de elementos finitos e revelou excelentes resultados na reprodução dos modos e cargas de roturas de diversos elementos estruturais **(Nível 4)**;
5. O modelo de análise limite pode ser aplicado na análise de elementos estruturais através de campos de tensões descontínuos **(Nível 3)**;
6. Um modelo analítico com dois níveis de complexidade foi proposto para a análise de regiões de continuidade **(Níveis 2 e 1)**.

The logo for BAC (Betão Auto Compactável) features the letters 'BAC' in a bold, white, sans-serif font. The letter 'A' is stylized with a green triangle pointing upwards from its center. The logo is set against a background of a grey concrete wall with visible rebar.

IV CONGRESSO IBEROAMERICANO  
BETÃO AUTO COMPACTÁVEL 2015

FEUP · PORTO  
6-7 JULHO 2015

A próxima edição do **Congresso Ibero-Americano sobre Betão Auto-compactável - BAC2015** realizar-se-á na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal, de 6 a 7 de julho de 2015.

[www.fe.up.pt/bac2015](http://www.fe.up.pt/bac2015)

**Submissão de Resumos até 19 outubro 2014**



**OBRIGADO PELA ATENÇÃO**