

COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO AO ESFORÇO CORTANTE

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein



GRUPO MONITORAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS

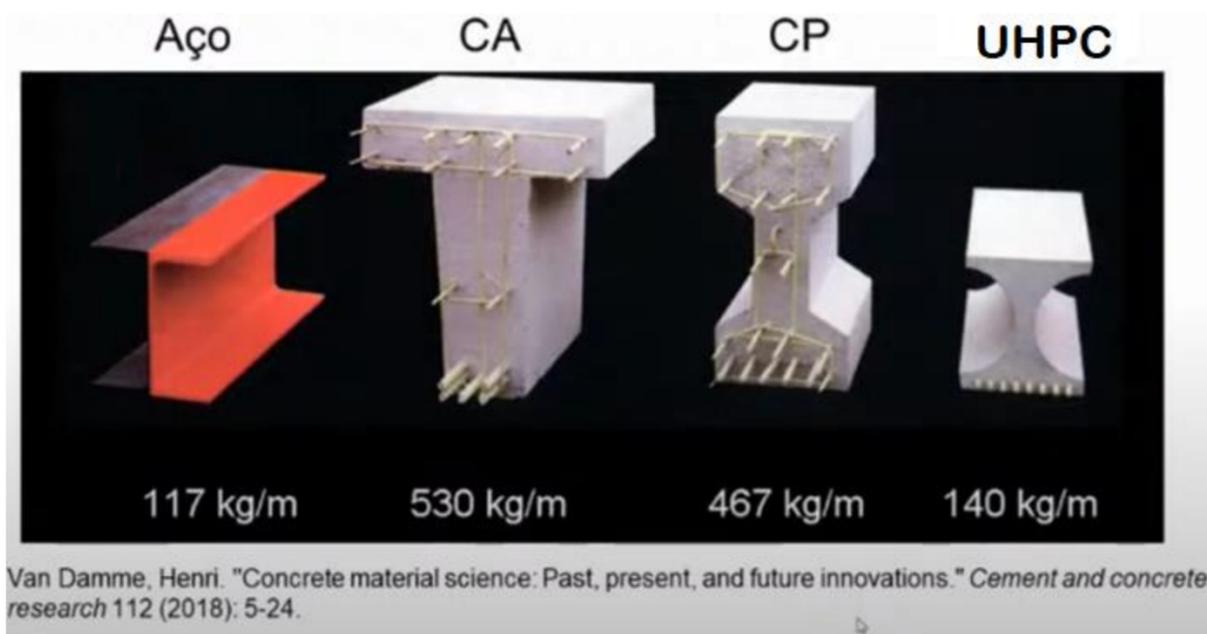


O que é o UHPC/UHPFRC?

- UHPC/ UHPFRC é um tipo de concreto com alta resistência à compressão (~ 150 MPa), auto-adensável e com alto volume de fibras.
- UHPC / UHPFRC é um material que apresenta comportamento dúctil à tração e à compressão e uma elevada capacidade de absorção de energia, além de apresentar múltipla fissuração.

¹ Yoo, Doo-Yeol, and Nemkumar Banthia. "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review." *Cement and Concrete Composites* 73 (2016): 267-280.

² Wille, Kay, Sherif El-Tawil, and Antoine E. Naaman. "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading." *Cement and Concrete Composites* 48 (2014): 53-66.



Aplicações UHPC/UHPFRC



Mars Hill Bridge near Ottumwa, Iowa



Cat Point Creek Bridge near Warsaw, Virginia.



Jakway Park Bridge near Aurora, Iowa.



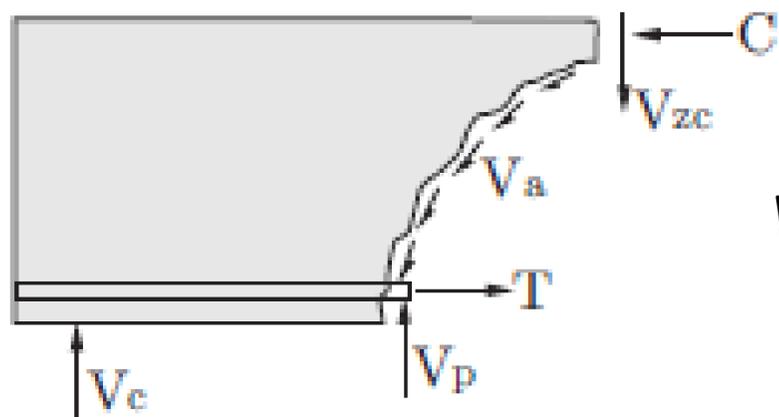
Ponte de Saint-Pierre-la-Cour, França

DUCTAL (2019)

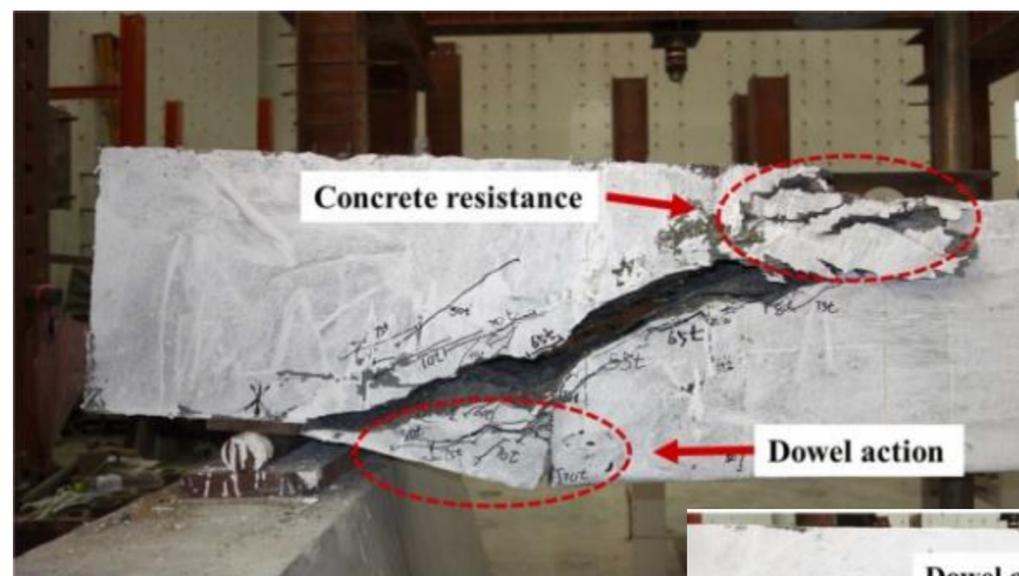
Benjamin Allen Graybeal (2009)

- Esse tipo de concreto apresenta grande resistência ao cisalhamento e à flexão devido às fibras ou microfibras existentes em sua composição, possibilitando eliminar armaduras de flexão passivas e de cisalhamento.
- Redução das seções transversais.

Mecanismos de Transferência de Cisalhamento

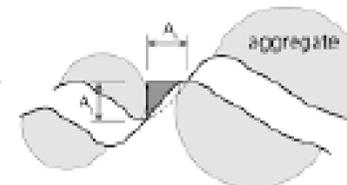
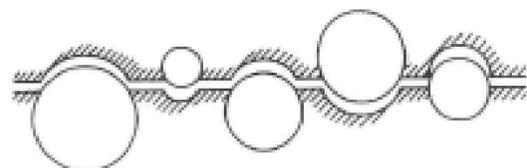
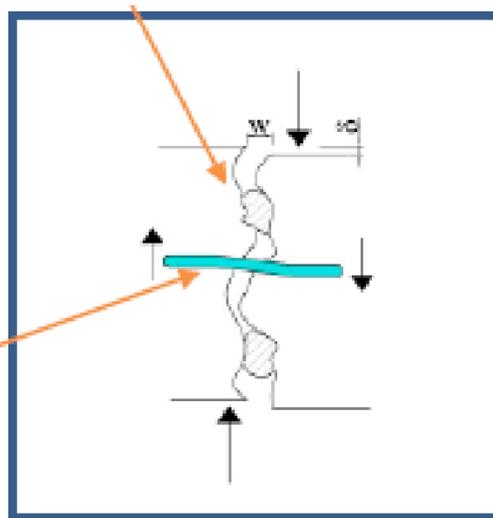


$$V_c = V_p + V_a + V_{zc}$$



Engrenamento do Agregado

Efeito pino

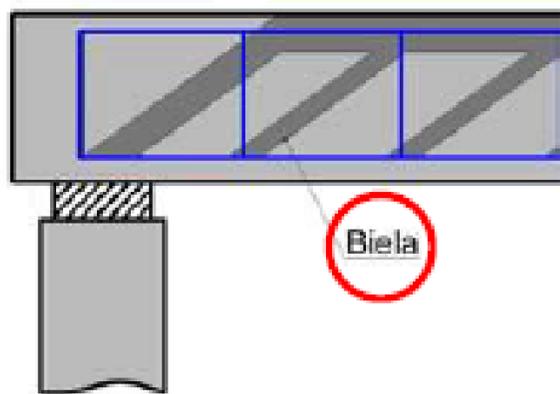


Verificação do estado limite último no cisalhamento – NBR6118 /2014

A resistência do elemento estrutural, em uma determinada seção transversal, deve ser considerada satisfatória, quando verificadas simultaneamente as seguintes condições:

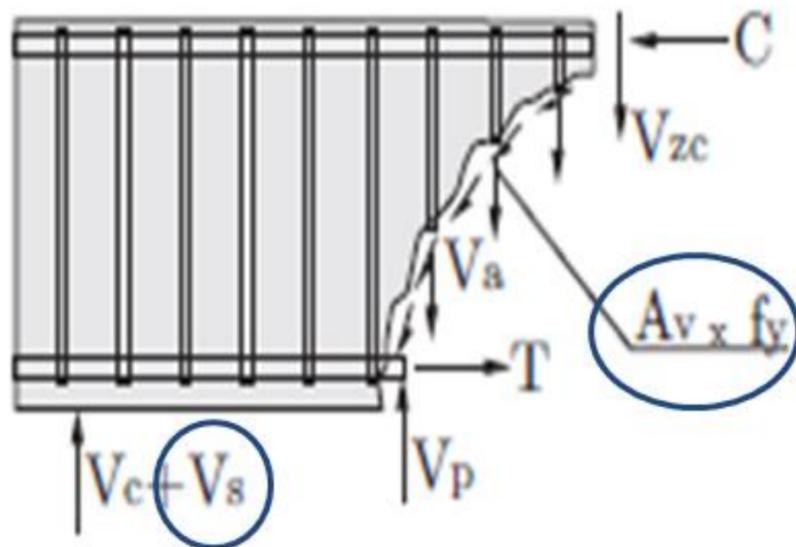
$$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$$

$$S_d \leq R_d$$



$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$$

$$S_d = R_d$$



Modelo 1

- Diagonais de compressão inclinadas de $\theta=45^\circ$
- Parcela resistente do concreto (V_c) constante

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}}$$

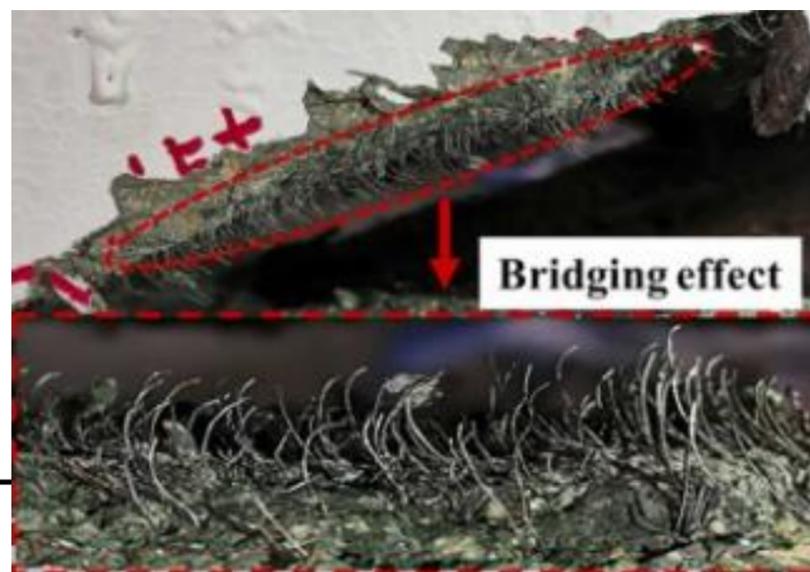
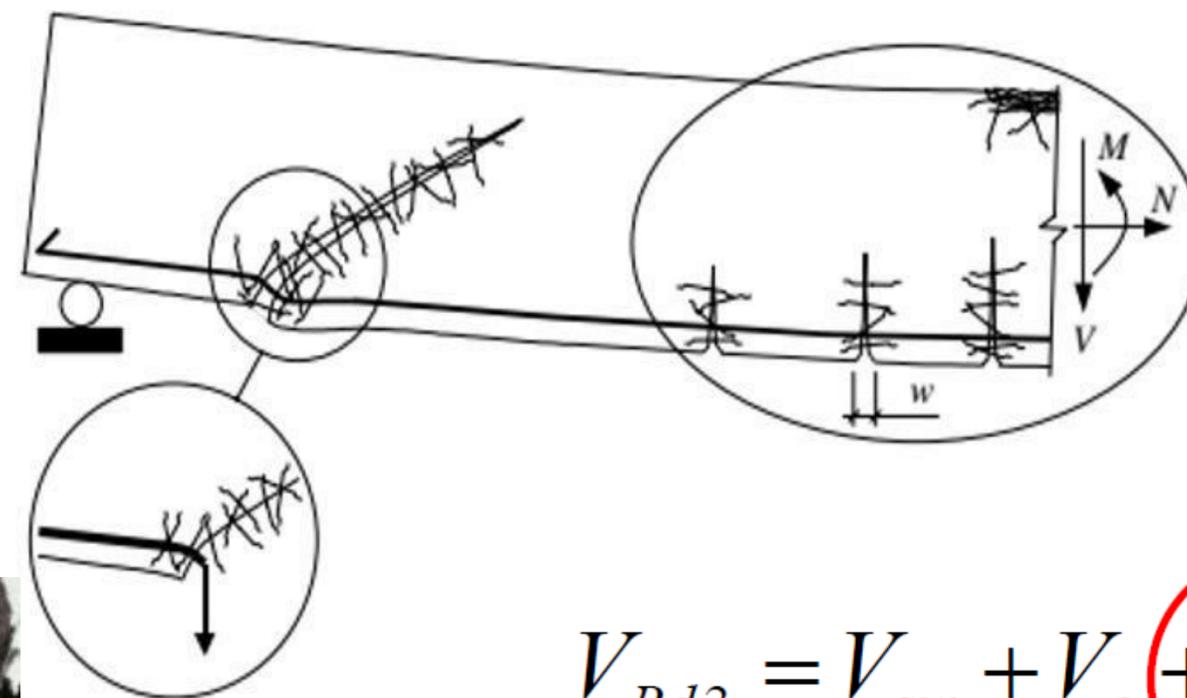
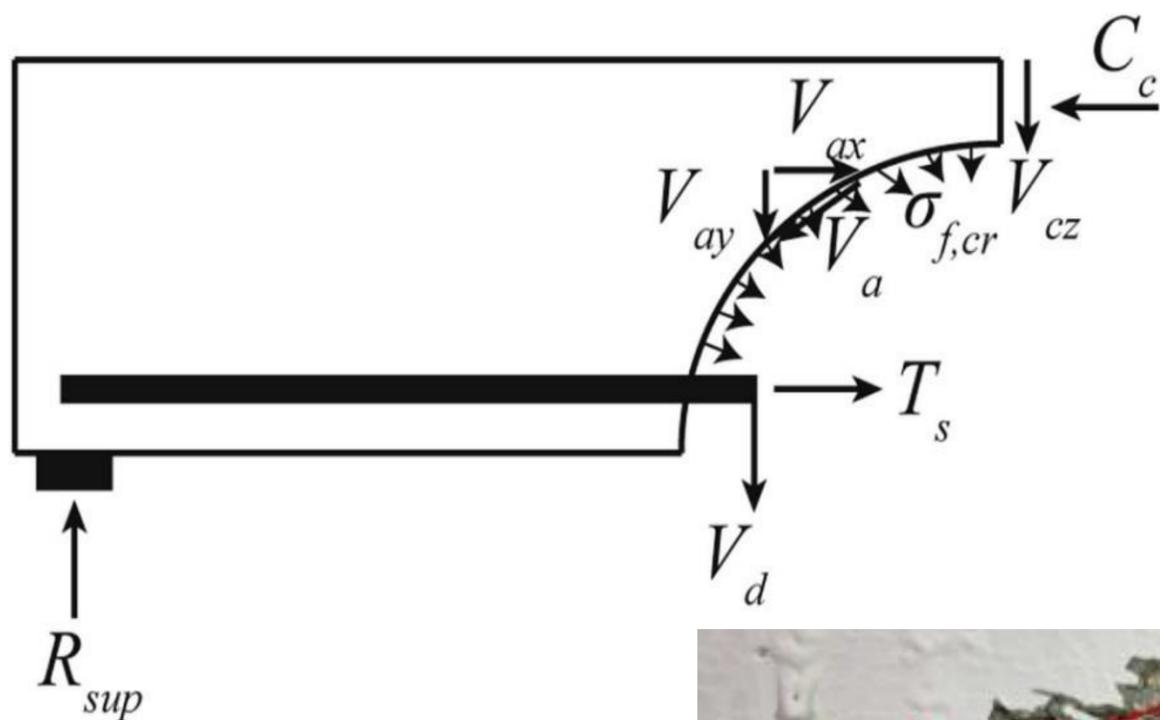
Modelo 2

- Diagonais de compressão inclinadas de θ entre 30° e 45°
- Parcela resistente do concreto (V_c) variável

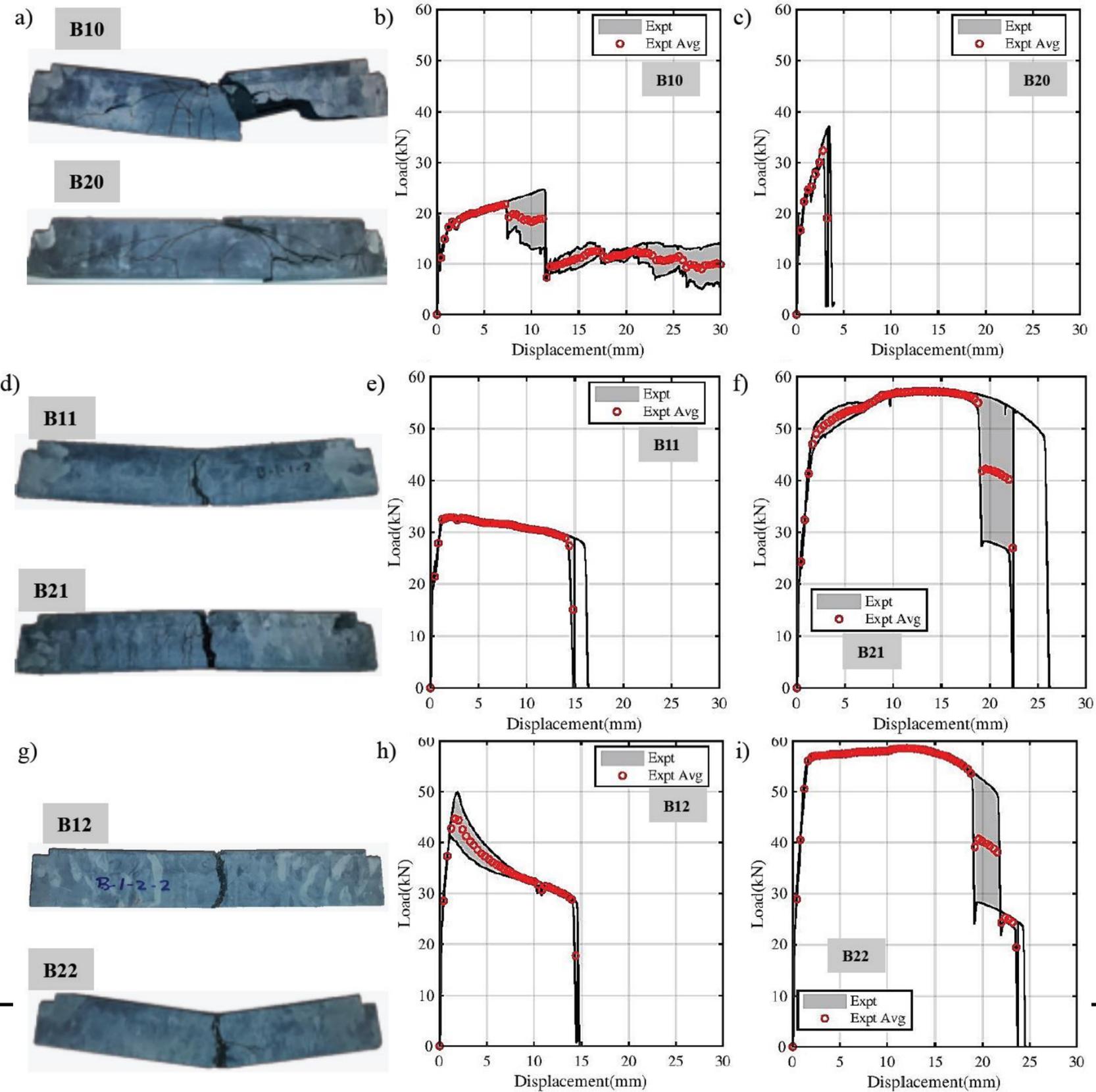
$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9d \cdot f_{ywd} (\cot \alpha + \cot \theta)$$

VIGAS COM REFORÇO DE FIBRAS DE AÇO

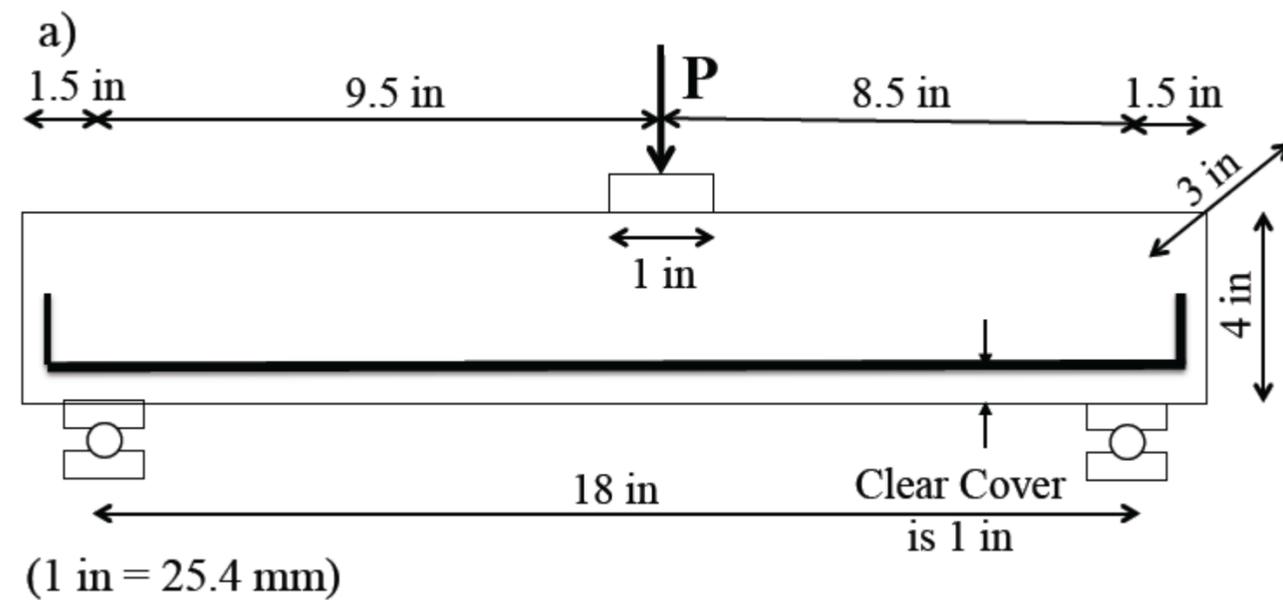
Além dos mecanismos complementares já comentados, deve ser considerada a contribuição da resistência à tração pós-fissuração do concreto, devido ao reforço promovido pelas fibras de aço ($\sigma_{f,cr}$).



$$V_{Rd3} = V_{sw} + V_c + V_{fib}$$



A adição de fibras pode alterar o padrão de falha



Gomaa, S., & Alnaggar, M. Transitioning from shear to flexural failure of UHPC beams by varying fiber content. In. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete* (Vol.2, No.1). Iowa State University Digital Press. June, 2019.

COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO AO ESFORÇO CORTANTE

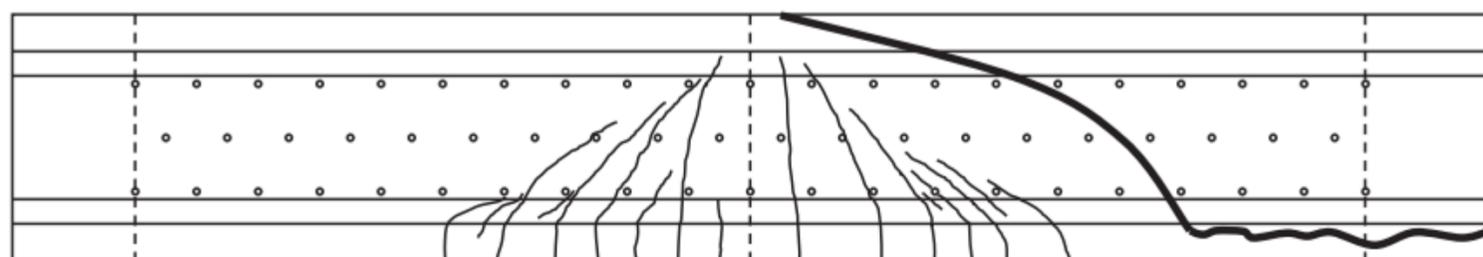


Fig. 14. Crack propagation of NS00.

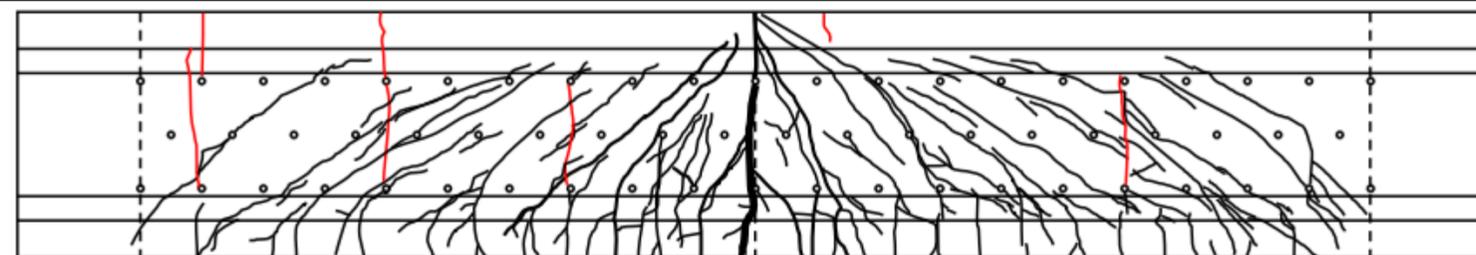


Fig. 17. Crack propagation of WS00.

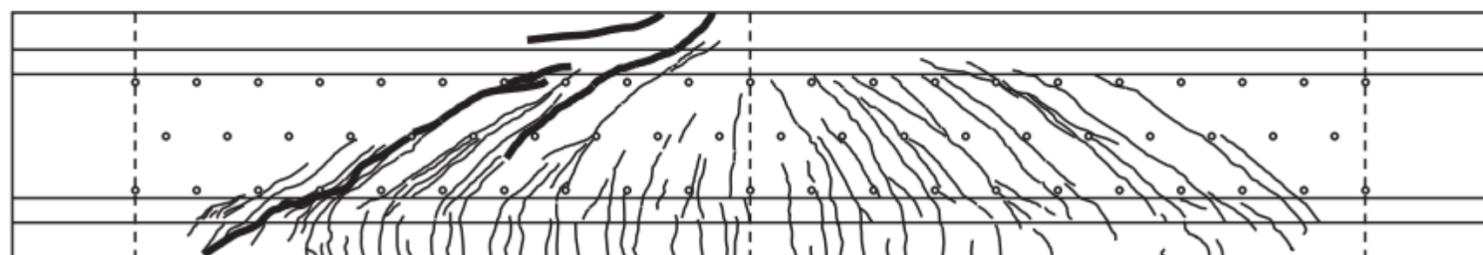


Fig. 15. Crack propagation of NS08.

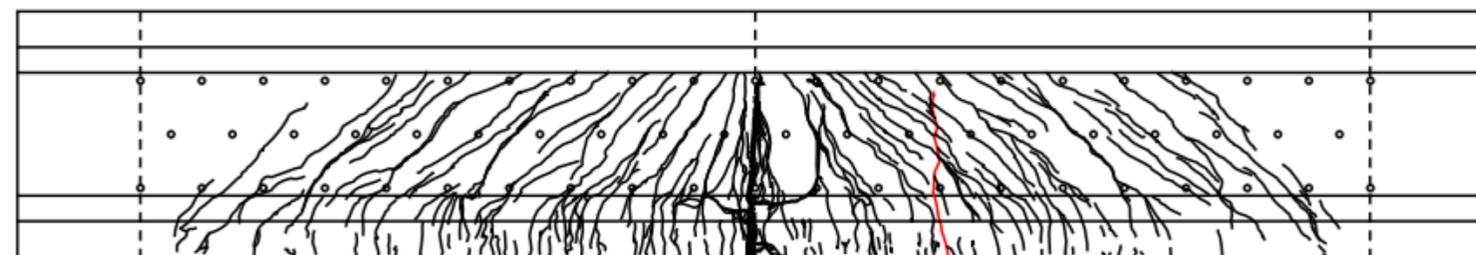


Fig. 18. Crack propagation of WS08.

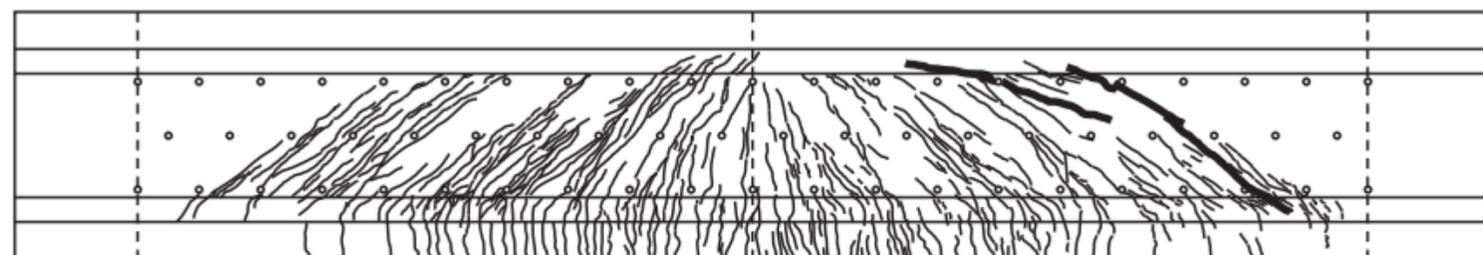


Fig. 16. Crack propagation of NS16.

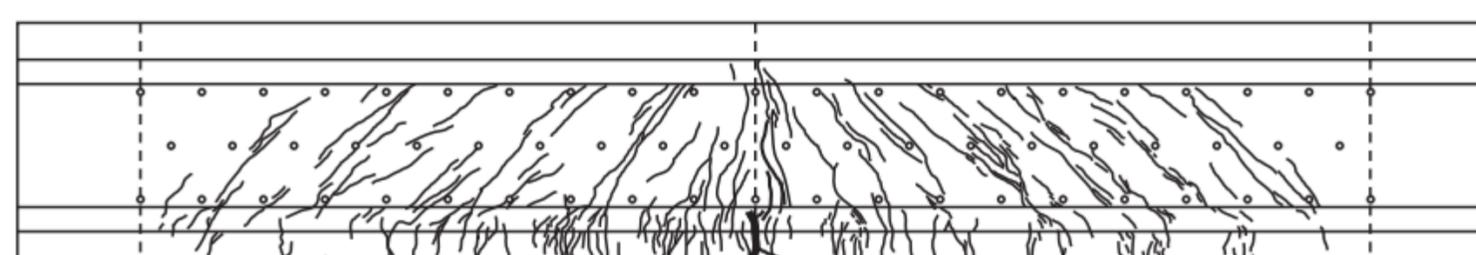
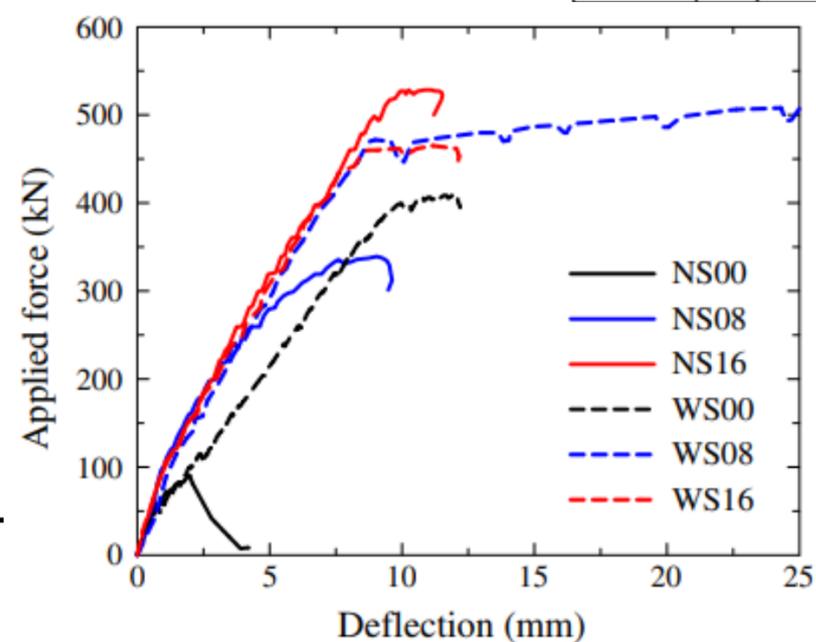


Fig. 19. Crack propagation of WS16.

Compressive and splitting tensile test of concrete.

Test	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)
NS00	141.05	11.53
NS08	147.69	16.27
NS16	146.71	17.00
WS00	136.84	10.38
WS08	144.05	13.69
WS16	146.89	15.80



Pansuk, W. et al. Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams. December 2017. [Construction and Building Materials](#) Volume 157:Pages 182–193

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE -2022

Baseada na NF P 18 710 (2016) e Eurocode 2 (2010)

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd} ; V_{Rd,max}\}$$

$V_{Rd,max}$ = força limite para a resistência da biela no modelo de treliça;

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

$V_{Rd,c}$ = é o termo de contribuição do concreto (UHPC/UHPFRC);
 $V_{Rd,s}$ = é o termo de contribuição para a armadura transversal no modelo de treliça;
 $V_{Rd,f}$ = é o termo de contribuição da fibra.

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE

$V_{Rd,c}$ = força cortante resistente fornecida pela UHPC/UHPFRC

$$V_{Rd,c} = \frac{0,21}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w d$$



Para uma seção transversal armada

$$V_{Rd,c} = \frac{0,24}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w z$$



Para uma seção protendida

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$



Para uma seção em UHPC/UHPFRC sem armadura

$$k = 1 + 3 \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \quad \gamma_{cf}\gamma_E = 1,5$$

$$0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,4 f_{ck}$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE - 2022

$V_{Rd,s}$ = força resistente da armadura transversal

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad \longrightarrow \quad \text{Armadura transversal vertical}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad \longrightarrow \quad \text{Armadura transversal inclinada}$$

$\theta=30^\circ$ deve ser escolhido como o valor mínimo.

Em seções circulares reforçadas com aros ou armações circulares, $V_{Rd,s}$ deve ser reduzido em 30% para levar em consideração o fato de que a armadura não atua diretamente na direção do tirante paralelo à força cortante.

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE -2022

$V_{Rd,f}$ = força resistente dada pela contribuição das fibras

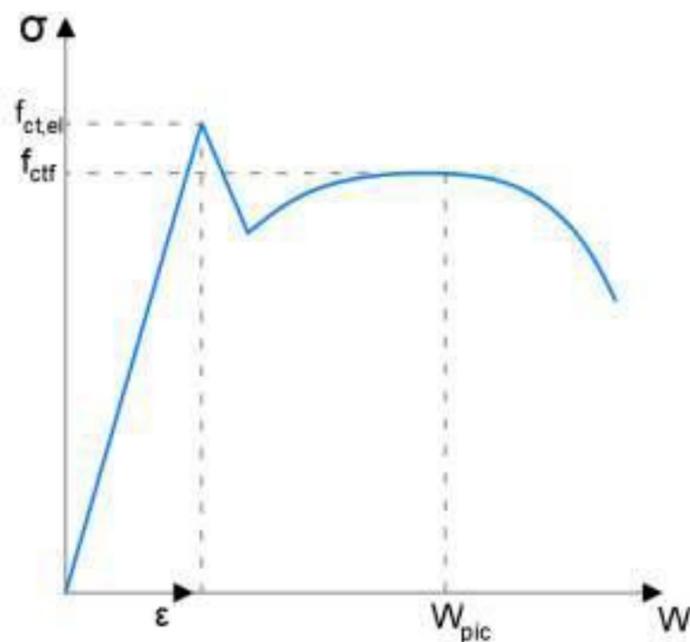
$$V_{Rd,f} = A_{fv} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

$\sigma_{Rd,f}$ - valor médio da tensão pós-fissuração ao longo da fissura de cisalhamento de inclinação

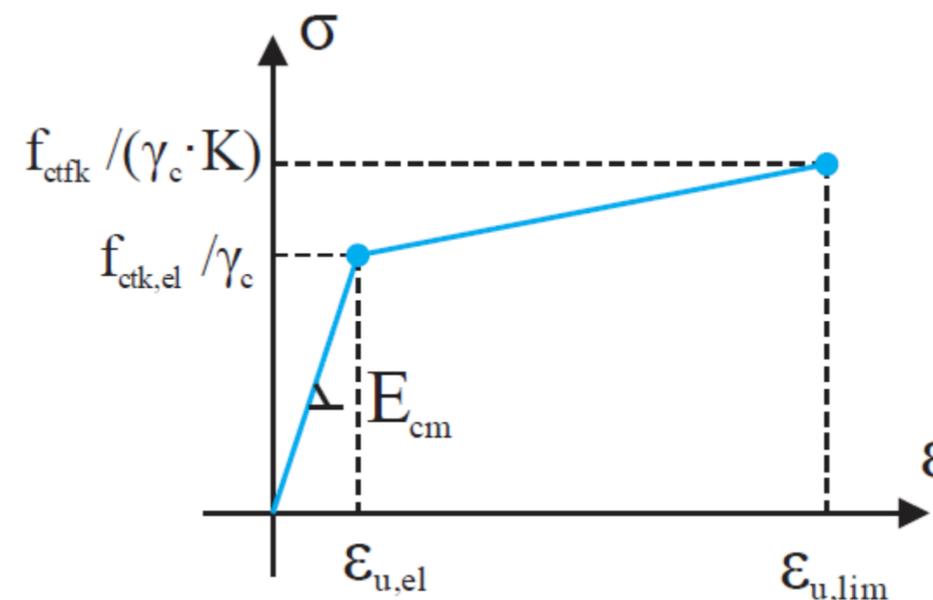
A_{fv} - projeção na seção transversal da área inclinada na qual as fibras atuam.

Classes de comportamento de tração de projeto: **Norma NF P 18-710 (2016)**

Classe T1* e Classe T2*



Classe T3*



Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE - 2022

$V_{Rd,f}$ = força resistente dada pela contribuição das fibras

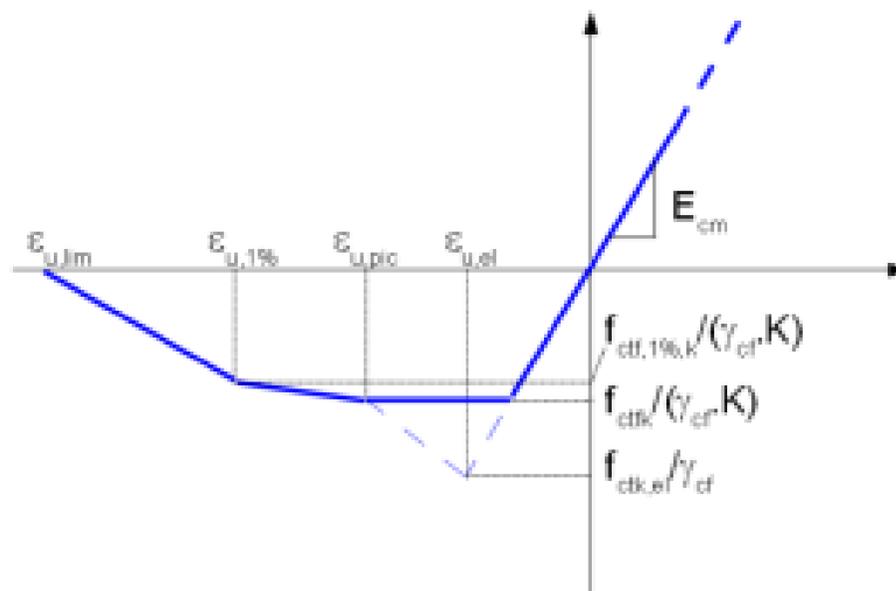
$$V_{Rd,f} = A_{fv} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

$\sigma_{Rd,f}$ - valor médio da tensão pós-fissuração ao longo da fissura de cisalhamento de inclinação

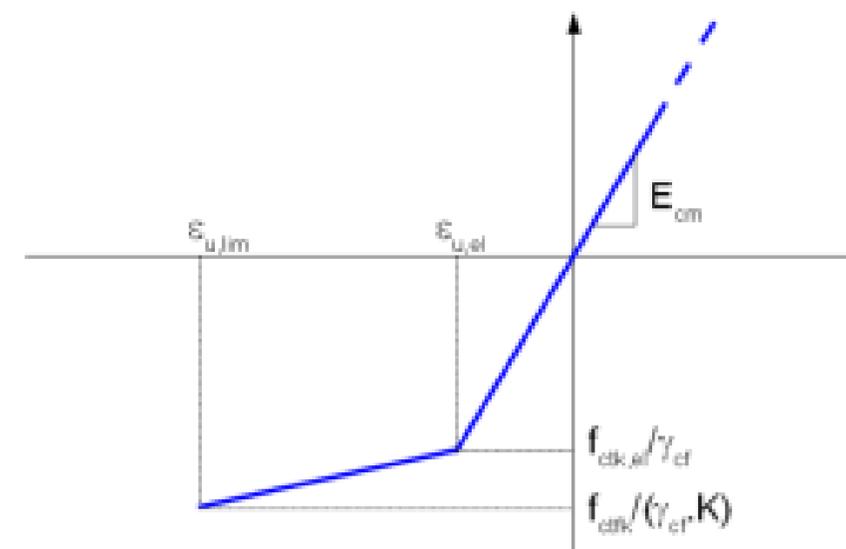
A_{fv} - projeção na seção transversal da área inclinada na qual as fibras atuam.

Classes de comportamento de tração de projeto: **AFGC/SETRA 2013**

Classe T1* e Classe T2*



Classe T3*



Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE - 2022

$V_{Rd,f}$ = força resistente dada pela contribuição das fibras

$$V_{Rd,f} = A_{fv} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

Classes de comportamento de tração de projeto:

Classe T1* e Classe T2*

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{k\gamma_{cf}} \frac{1}{w^*} \int_0^{w^*} \sigma_f w dw$$

$$w^* = \max(w_u; 0,3 \text{ mm})$$

Classe T3*

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{k\gamma_{cf}} \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon^*} \sigma_f w dw$$

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u; \varepsilon_{u,lim})$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE - 2022

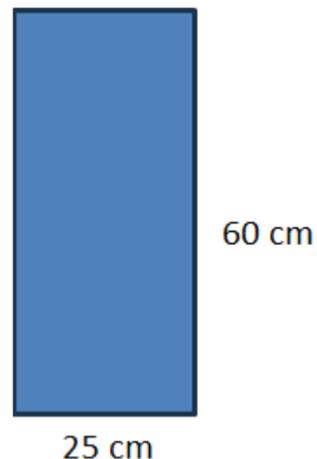
$V_{Rd,max}$ = limite de resistência das bielas de compressão em elementos de UHPC/UHPFRC

$$V_{Rd,max} = 2,3 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} \tan\theta \longrightarrow \text{sem armadura de cisalhamento}$$

$$V_{Rd,max} = 2,3 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} \left[\frac{V_{Rd,s} (\cot\theta + \cot\alpha)}{(1 + \cot^2\theta)} + V_{Rd,f} \tan\theta \right] \left[\frac{1}{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}} \right] \longrightarrow \text{com armadura de cisalhamento}$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE - 2022

Exemplo 1 – verificação ao cisalhamento para uma seção sem armadura.



$$f_{ck} = 150 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = V_{sd}$$

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd} ; V_{Rd,max}\}$$

$V_{Rd,max}$ = verificação da biela

$$\alpha_{cc} = 0,85; \gamma_c = 1,5; z = 0,9h$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = 2,3 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b_w z f_{ck}^{2/3} \tan \theta$$

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = 2869 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

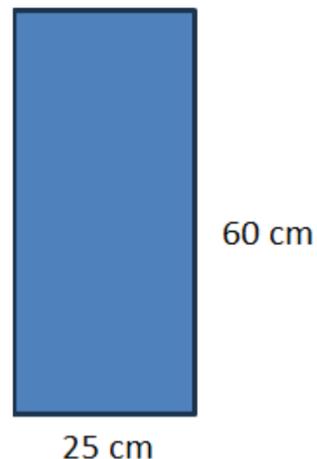
$$k = 1 + 3 \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \quad k=1$$

$$\gamma_{cf} \gamma_E = 1,5$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE

Exemplo 1 – verificação ao cisalhamento para uma seção sem armadura.



$$f_{ck} = 150 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = V_{sd}$$

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd} ; V_{Rd,max}\}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

$$k = 1 + 3 \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \quad k=1$$

$$\gamma_{cf}\gamma_E = 1,5$$

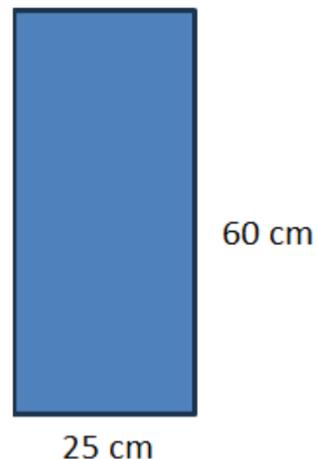
$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf}\gamma_E} k f_{ck}^{1/2} b_w h$$

$$V_{Rd,c} = 220.45 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = 0$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE

Exemplo 1 – verificação ao cisalhamento para uma seção sem armadura.



$$V_{sd} = 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = V_{sd}$$

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd} ; V_{Rd,max}\}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

$$f_{ck} = 150 \text{ kN}$$

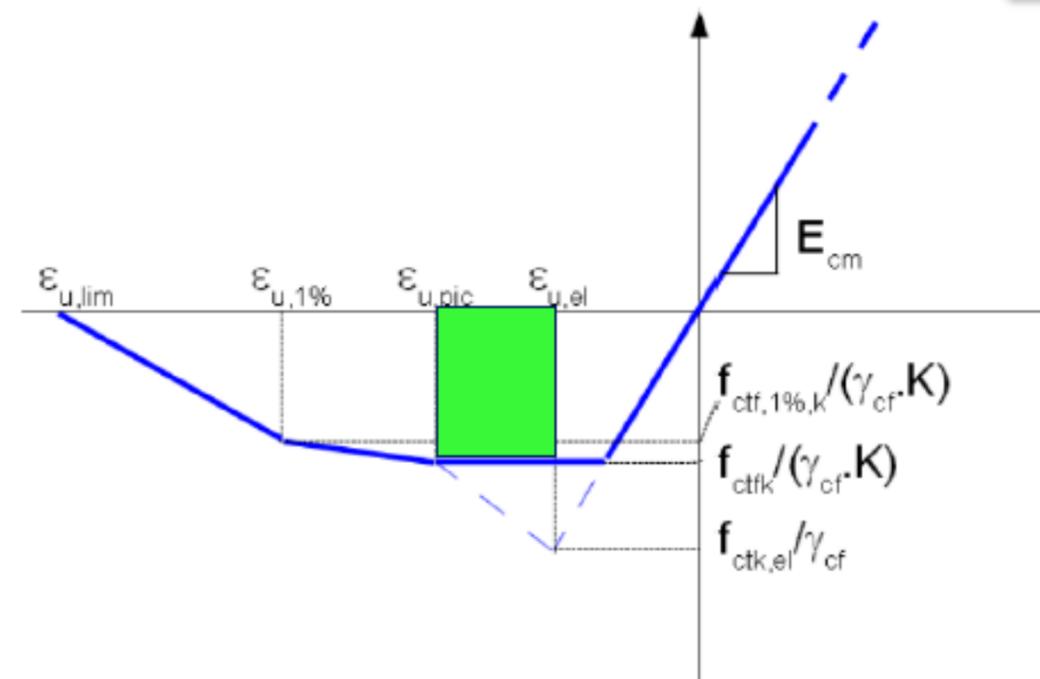
$$V_{Rd,f} = A_{fv} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

Considerando o UHPC classe T1* ou T2*

A função $\sigma_f(w) = f_{ctk,el}$ é uma constante para o intervalo de 0 a 0,3 mm

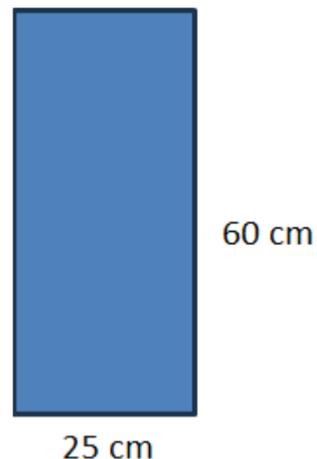
$$f_{ctk,el} = f_{ctfk} = 8 \text{ MPa}$$

$$K_{global} = 1.25$$



Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE

Exemplo 1 – verificação ao cisalhamento para uma seção sem armadura.



$$f_{ck} = 150 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = V_{sd}$$

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd}; V_{Rd,max}\}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

$$V_{Rd,f} = A_{fv} \sigma_{Rd,f} \cot \theta$$

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{k\gamma_{cf}} \frac{1}{w^*} \int_0^{w^*} \sigma_f w dw$$

$$\sigma_{Rd,f} = 0,49 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{fv} = b_w z$$

$$A_{fv} = 1181,25 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd,f} = 1007,25 \text{ kN}$$

Considerando o UHPC classe T1* ou T2*

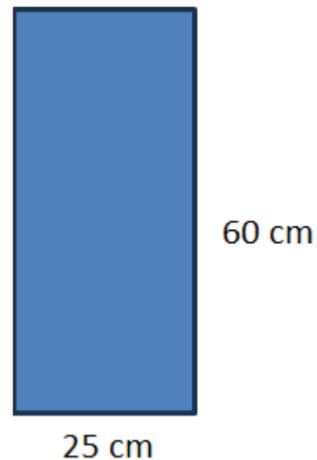
A função $\sigma_f(w) = f_{ctk,el}$ é uma constante para o intervalo de 0 a 0,3 mm

$$f_{ctk,el} = f_{ctfk} = 8 \text{ MPa}$$

$$K_{global} = 1.25$$

Procedimento Geral – Prática Recomendada IBRACON /ABECE

Exemplo 1 – verificação ao cisalhamento para uma seção sem armadura.



$$V_{sd} = 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = V_{sd}$$

$$V_{Rd,total} < \{V_{Rd}; V_{Rd,max}\}$$

$$V_{Rd,total} < \{1227,7; 2581\}$$

$$V_{Rd,total} = 1227,7 \text{ kN}$$

$$f_{ck} = 150 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,total} \geq V_{Ed}$$

$$1227,7 > 1120 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} = 1227,7 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = 220,45 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,f} = 1007,25 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = 0$$

OBRIGADO

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein

email: leandromt@unicamp.br



GRUPO MONITORAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS

