

Dimensionamento a Flexão

Exemplo de Otimização de Ponte em Viga Protendida em UHPC

Guilherme Aris Parsekian – Associate Professor, UFSCar, Brazil, Email: parsekian@ufscar.br

Jadson da Silva Barbosa – Former MSc student, UFSCar, Brazil, Email: jadsonsb_2013@hotmail.com

Gilvan Bezerra dos Santos Junior – Assistant Professor, UFERSA, Brazil, Email: gilvan.bezerra@ufersa.edu.br

Gláucia Maria Dalfré – Associate Professor, UFSCar, Brazil, Email: glaucia.dalfre@ufscar.br

Ana Elisabete P. G. A. Jacintho - PUC Campinas, Brazil, Email: anajacintho@gmail.com

Tópicos



- Introdução aos critérios de dimensionamento
- Exemplo
- Materiais
- Concepção da ponte em viga pré-moldadas
- Dimensionamento com concreto regular
- Dimensionamento com UHPC
- Comparativo de consumo de materiais
- Comparativo de custo
- Comentários finais

Algumas Normas e Instruções Internacionais - UHPC

Ano	Norma	Órgão	País	Atuação
2006	FHWA-Report-HRT 06-103	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2008	Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)	JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING – JSCE	Japão	Ampla
2013	FHWA-HRT 13-060	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC State-of-the-Art
2013	FHWA-HRT-13-100	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Mix Design
2014	Design Guidelines for K-UHPC	KOREA INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY (KICT)	Korea do Sul	Ampla
2016	NF P 18 470	ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION	França	Controle Tecnológico
2016	NF P 18 710	ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION	França	Projeto Estrutural

Algumas Normas e Instruções Internacionais - UHPC

Ano	Norma	Órgão	País	Atuação
2017	FHWA-HRT 17-096	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC for Bridge Preservation
2018	FHWA-HRT 17-097	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC for Bridge Preservation
2018	FHWA-HRT-18-036	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2019	FHWA-HRT-17-053	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior
2019	FHWA-HIF-19-011	Federal Highway Administration	E.U.A	Field-Cast UHPC Connections for Modular Components
2019	FHWA-HIF-19-003	Federal Highway Administration	E.U.A	Field-Cast UHPC Connections for Modular Components
2022	FHWA-HRT-21-095	Federal Highway Administration	E.U.A	UHPC Material Characterization and Behavior

Prática Recomendada – Brasil 2022

- Dividida em duas partes:
 - Parte 1 → Procedimentos de projeto
 - Parte 2 → Especificação, durabilidade, materiais, método de dosagem e ensaios de caracterização
- Normas Francesas; 
 - **NF P 18 710 (projeto estrutural)**
 - **NF P 18 470 (materiais e ensaios)**
- Base – EUROCODE

Propriedades mecânicas do UHPC

E_{cm} módulo de Deformação longitudinal	45-65 GPa
Coeficiente de Poisson	0,15-0,20
Resistência característica à compressão f_{ck}	100-150 MPa
Resistência média à compressão f_{cm}	110-160 MPa
Resistencia característica à tração elasticidade $f_{ctk,el}$	4-6 MPa
Resistência média à tração elasticidade $f_{ctm,el}$	8,0-12,0 MPa
Resistência característica de fissuração $f_{ctf,k}$	6,0-10,0 MPa
Resistência média de fissuração $f_{ctm,k}$	7,0-12,0 MPa
Fator de orientação global das fibras K_{global}	1,25
Fator de orientação local das fibras K_{local}	1,75
Coeficiente de dilatação linear térmica	$1,1 \times 10^{-5}$ m/ °C
Comprimento L_f	12-20 mm

Na falta de ensaios experimentais

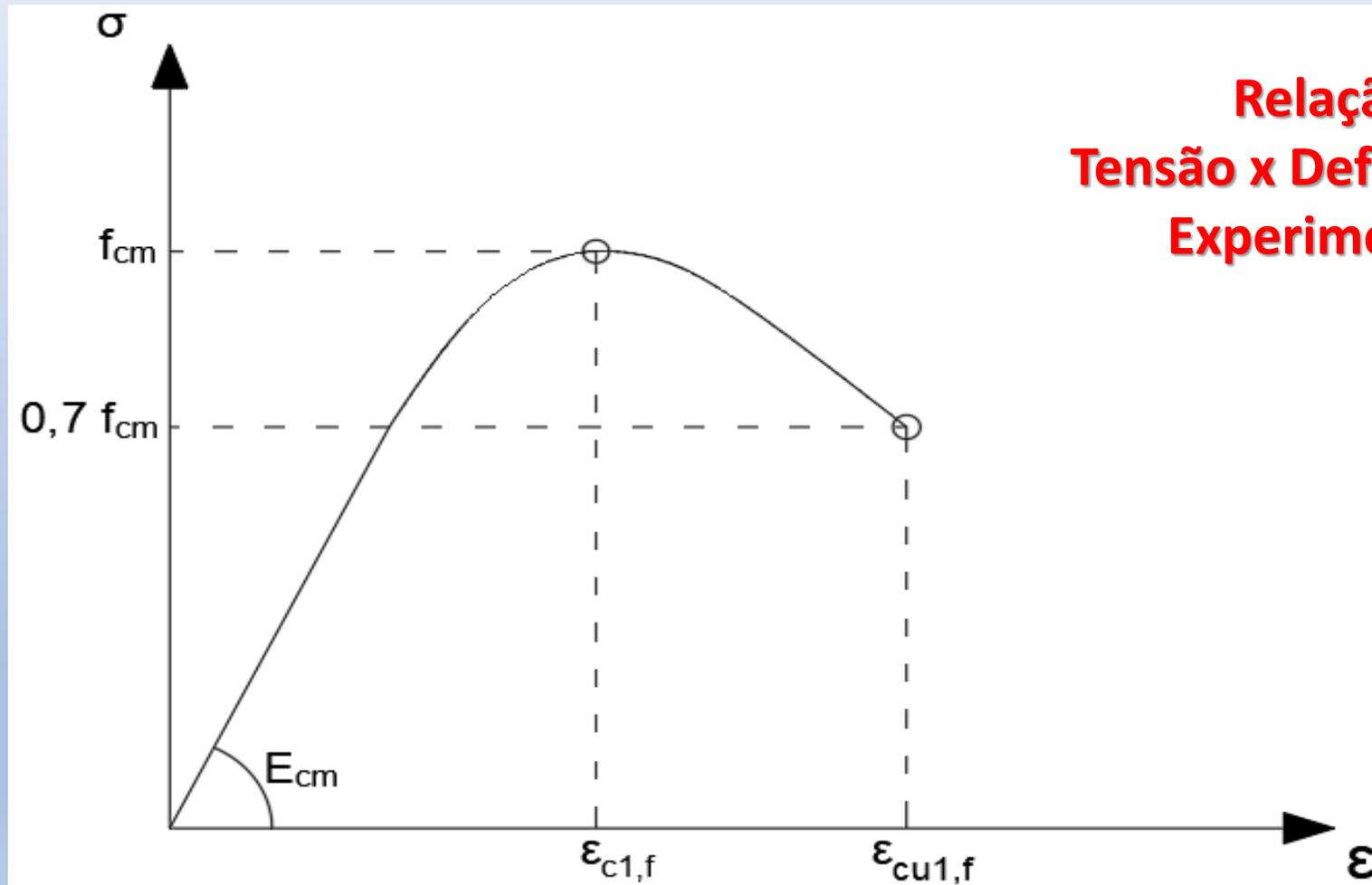
Classes de UHPC

Classes de resistência à compressão	Resistência característica mínima em corpos de prova cilíndricos
	$f_{ck,cil}$
	MPa
UHPC 130	130
UHPC 150	150
UHPC 180	180
UHPC 200	200
UHPC 250	250

UHPC
 $f_{ck} \geq 130\text{MPa}$

UHPC estrutural
 $f_{ck} \geq 150\text{MPa}$

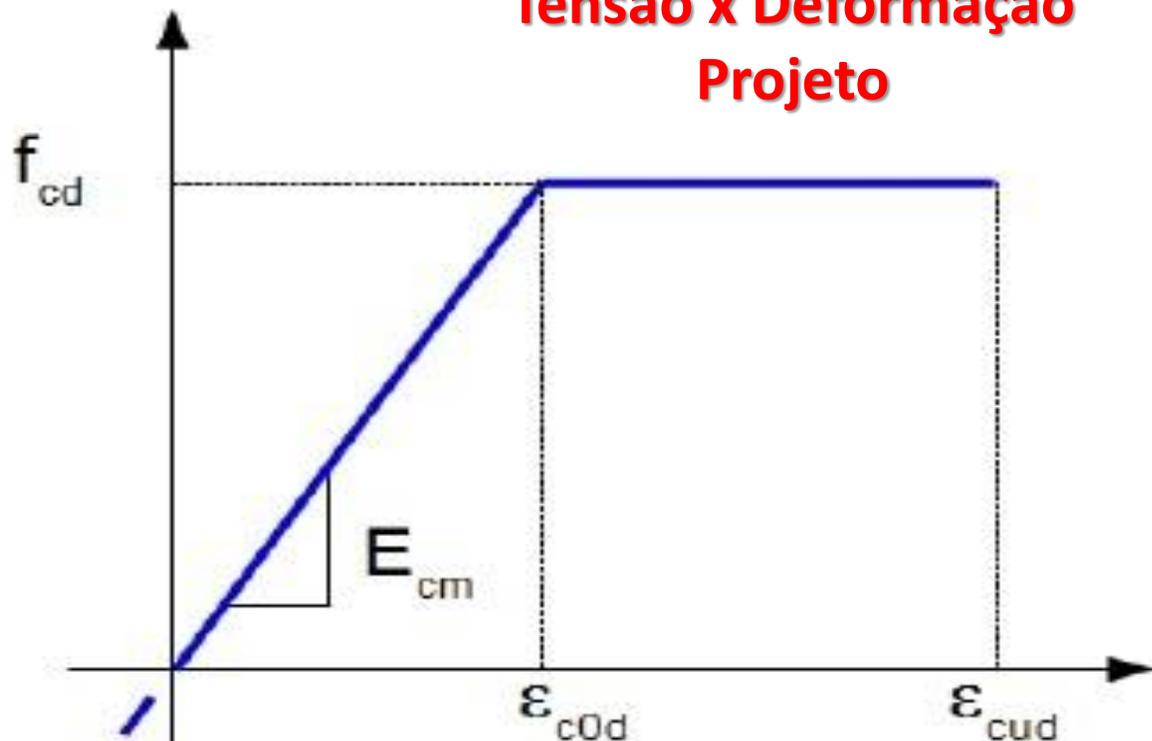
Comportamento à Compressão



**Relação
Tensão x Deformação
Experimental**

Comportamento à Compressão

Relação Tensão x Deformação Projeto



$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\alpha_{cc} = 0,85 \text{ e } \gamma_c = 1,5$$

Parte 2 da prática recomendada

$$\epsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}}$$

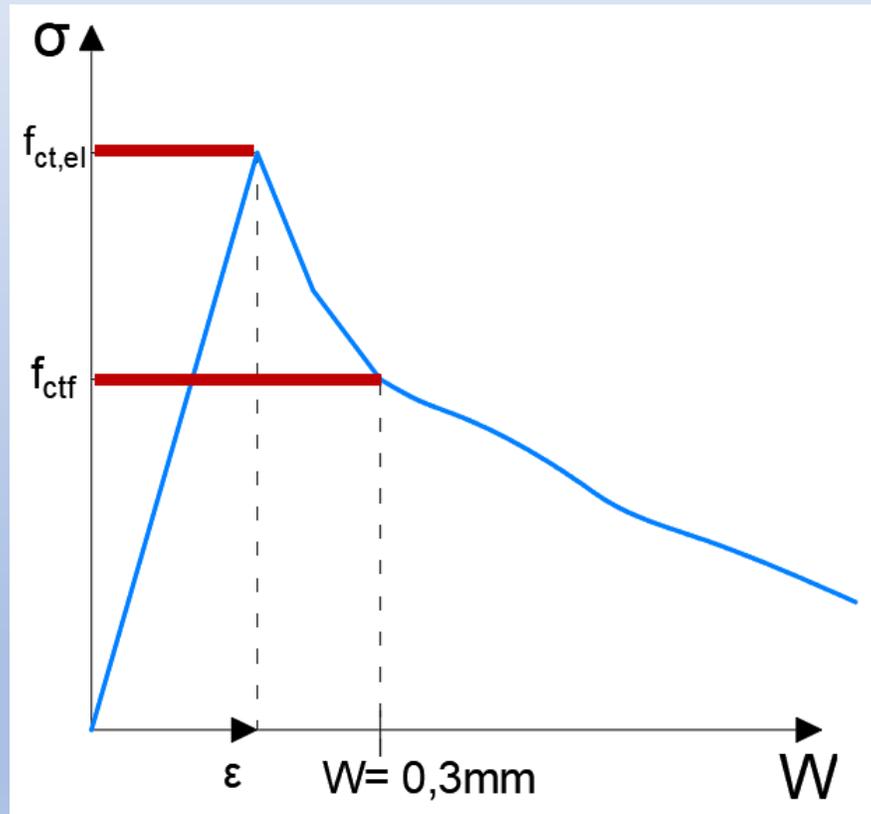
$$\epsilon_{cud} = \left(1 + 14 \frac{f_{ctfm}}{K_{global} \times f_{cm}} \right) \epsilon_{c0d}$$

E_{cm} = experimental – norma francesa

E_{cm} = Benjamim Greybeal - FWHA

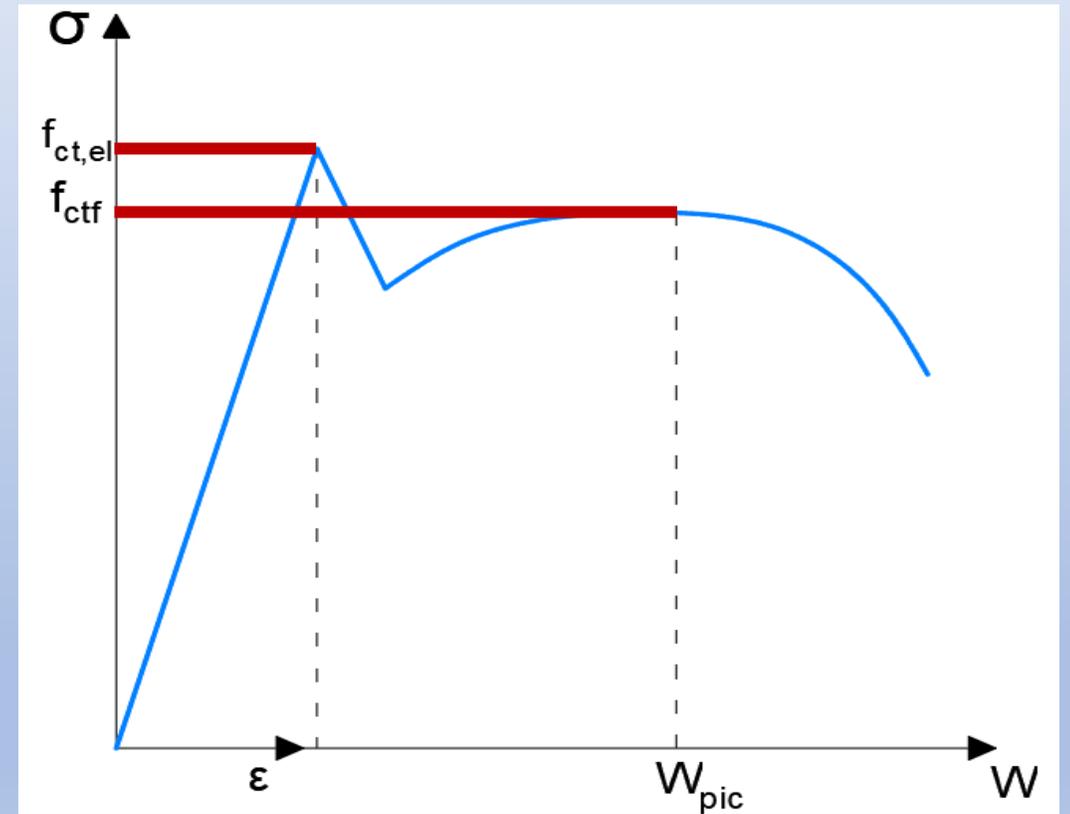
Comportamento à Tração – Resistência à tração na flexão

Classe T1



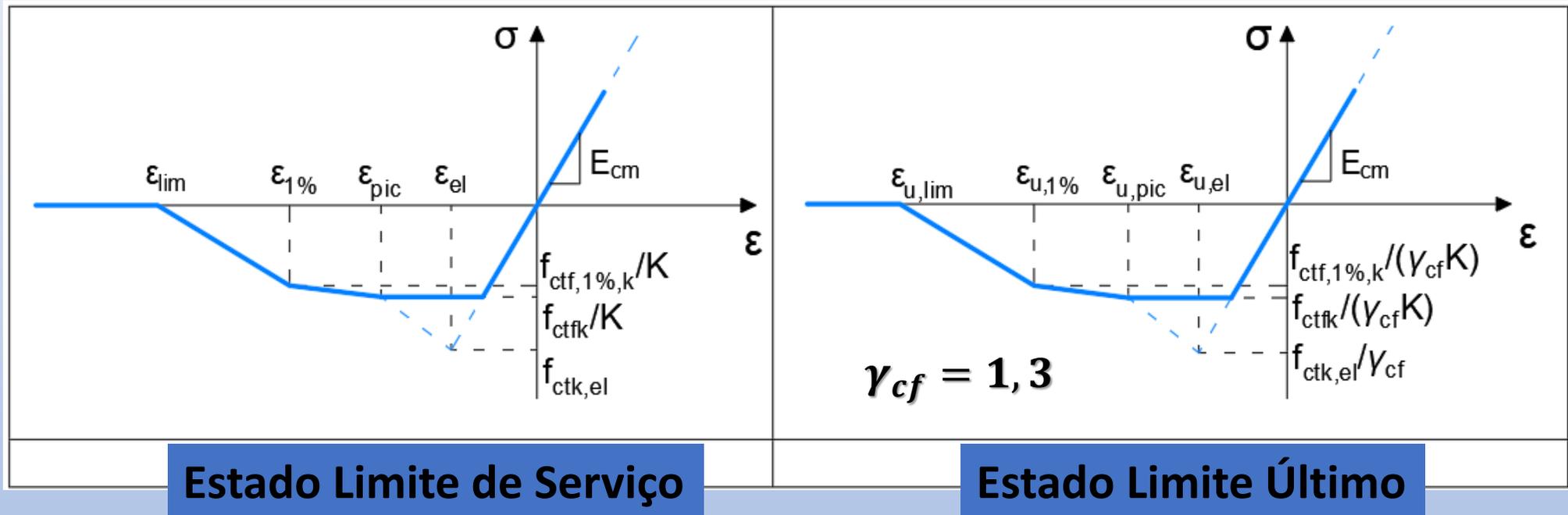
Classe T2

Classe T3



Elementos Espessos – Relação Constitutiva à Tração – Classes T1* e T2*

É possível adotar $f_{ctf,1\%,k} = 0,8 f_{ctf,k}$



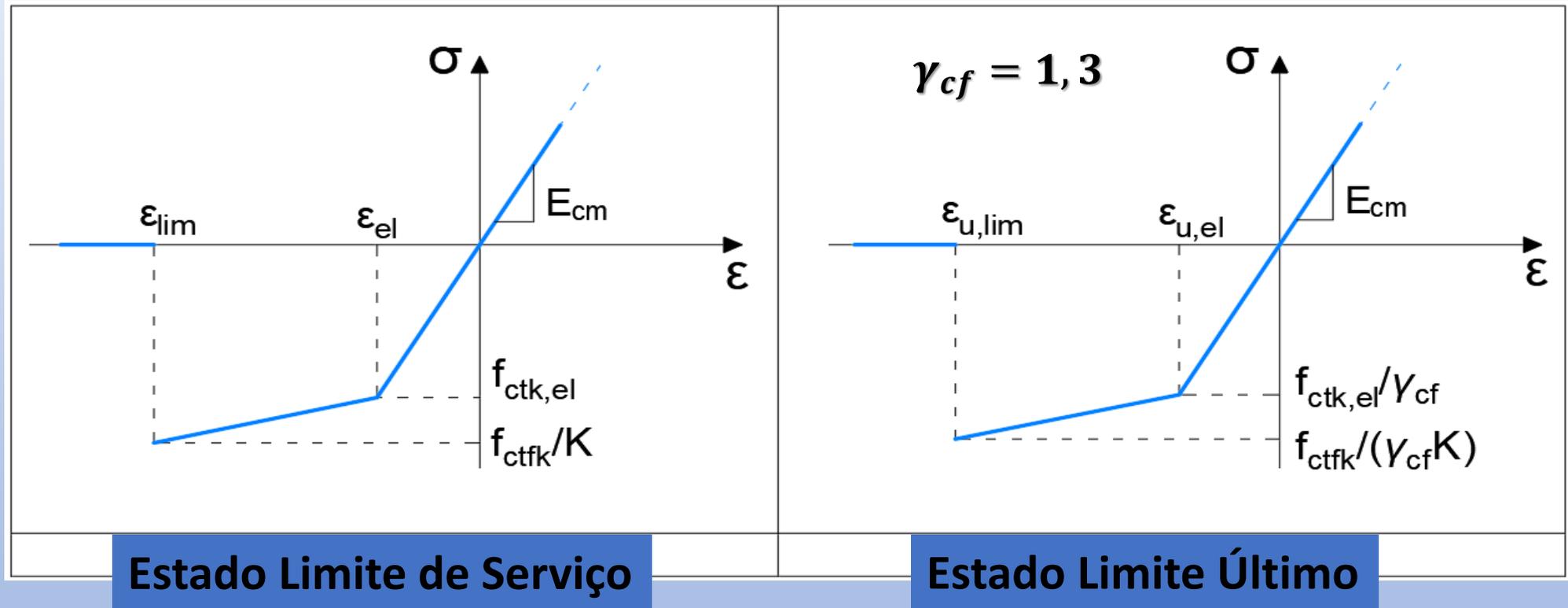
Um elemento delgado é um elemento cuja espessura “e” é tal que: $e \leq 3 L_f$ sendo:

L_f = comprimento das fibras mais longas

$$\epsilon_{u,lim} = \epsilon_{lim} = \frac{L_f}{4L_c}$$

$$L_c = \frac{2}{3} h$$

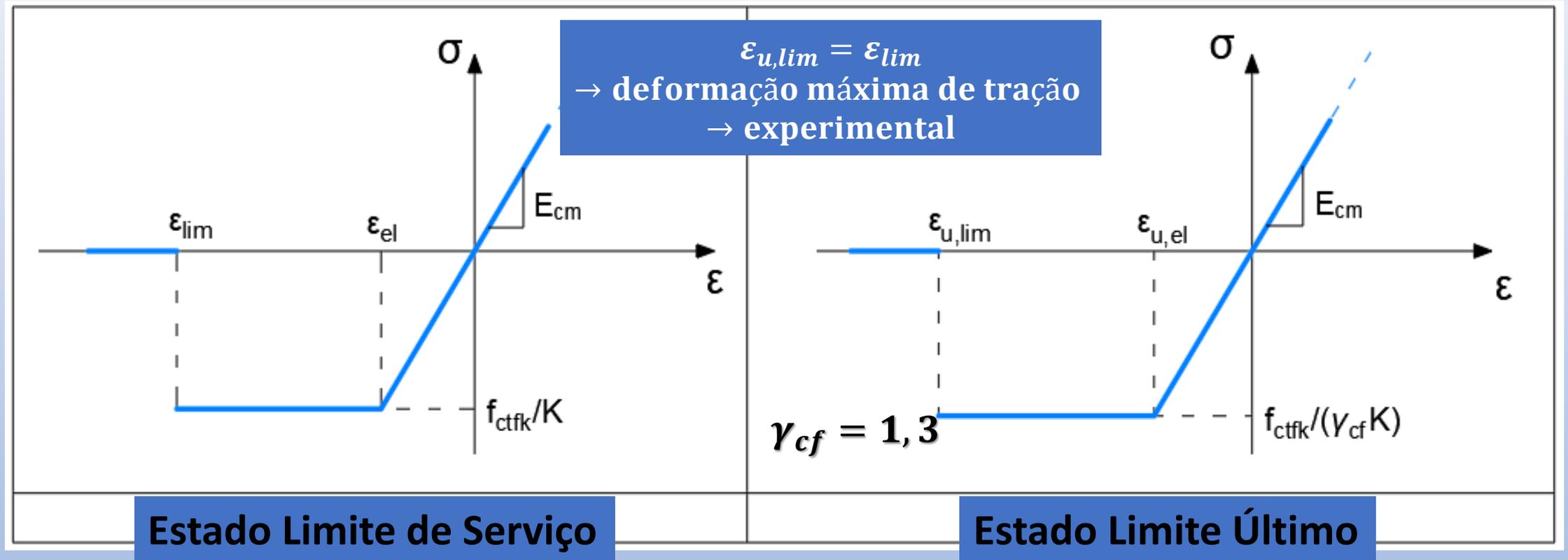
Elementos Espessos – Relação Constitutiva à Tração – Classe T3*



$$\epsilon_{u,lim} = \epsilon_{lim} = \frac{L_f}{4L_c}$$

$$L_c = \frac{2}{3}h$$

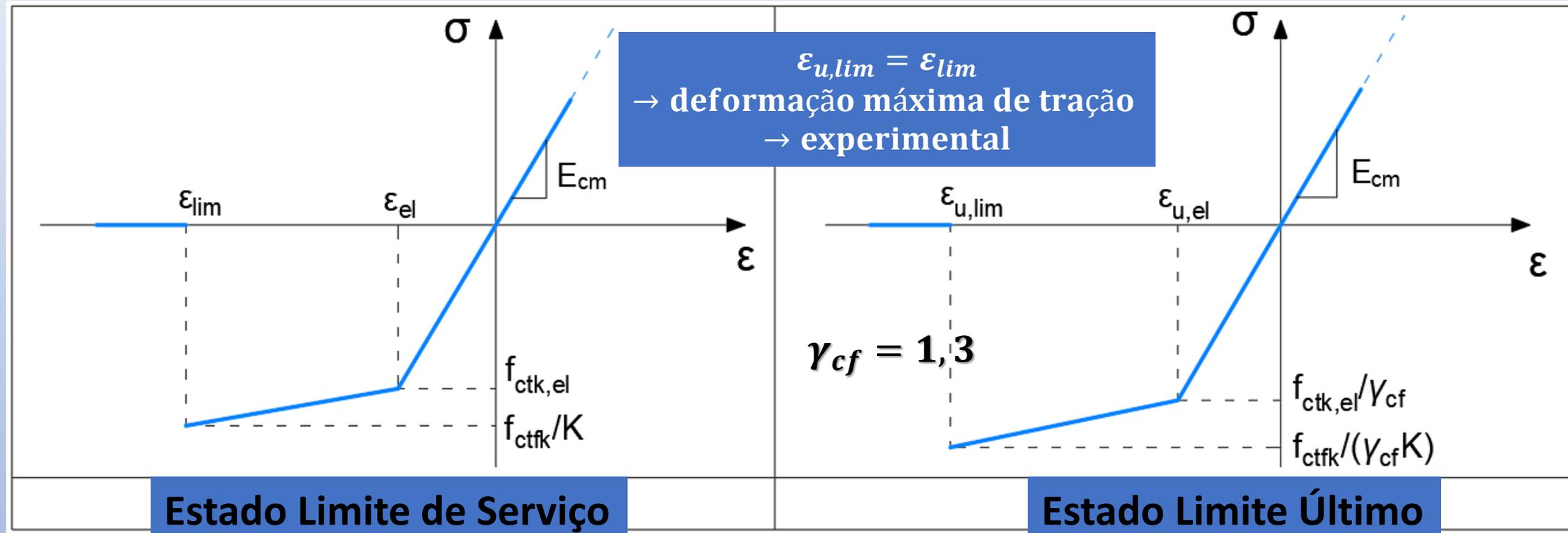
Elementos Delgados – Relação Constitutiva 1 à Tração – à flexão e flexo-compressão



Um elemento delgado é um elemento cuja espessura “e” é tal que: $e \leq 3 L_f$ sendo:

L_f = comprimento das fibras mais longas

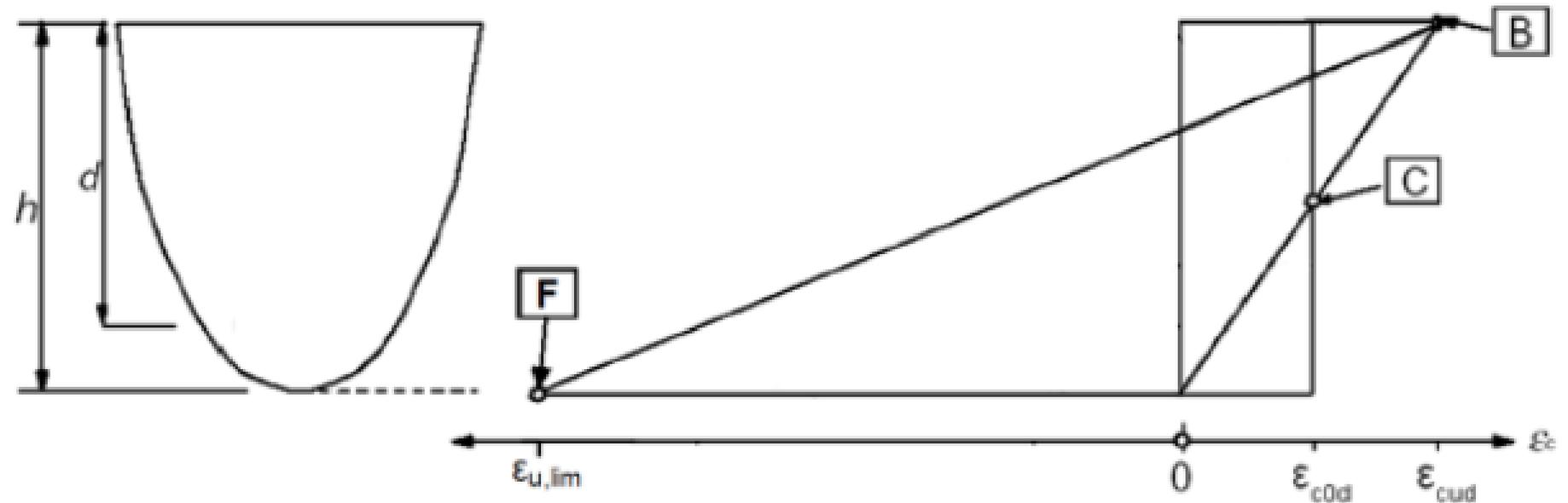
Elementos Delgados – Relação Constitutiva 2 à Tração (qualquer situação de tensão) – Classe T3*



$\epsilon_{u,lim} = \epsilon_{lim} = 5\%$ (pode ser adotado para este caso)

Dimensionamento à Flexão

Diagrama de deformações admissíveis no Estado Limite Último para UHPC não armados



B

- deformação de compressão limite do UHPC;

C

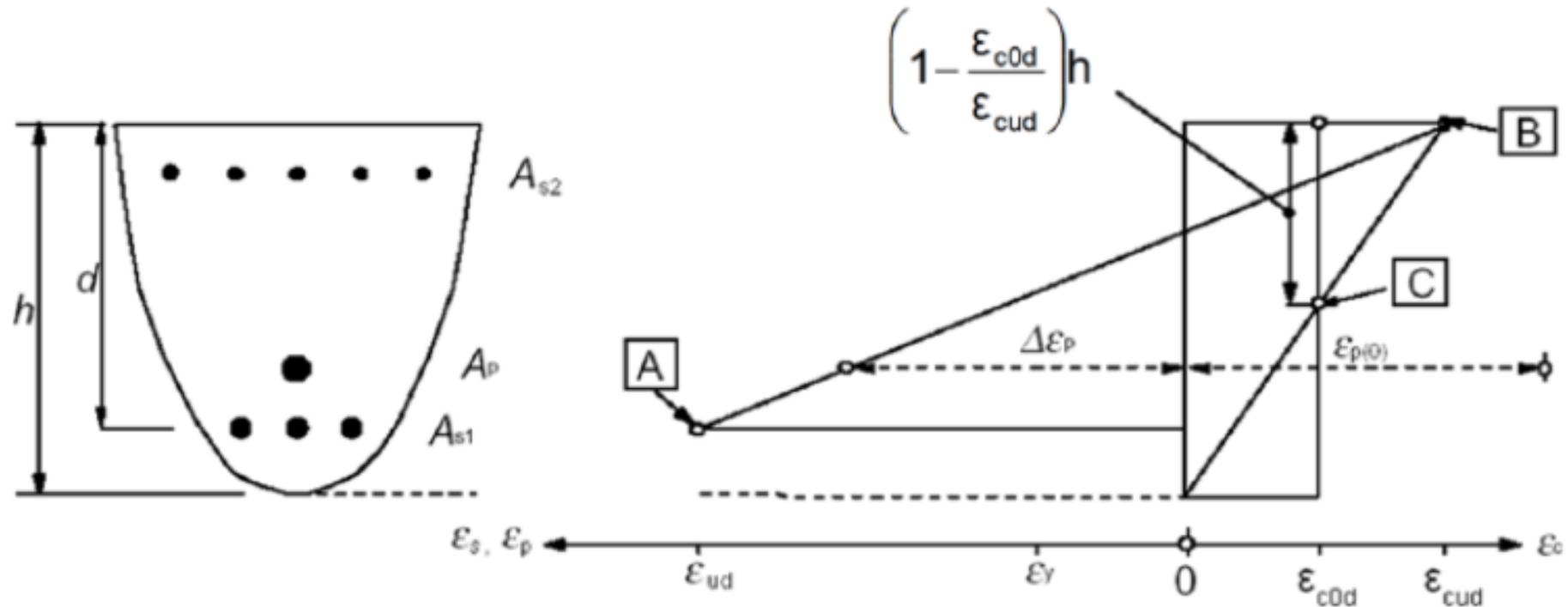
- deformação de compressão pura limite do UHPC;

F

- deformação de tração limite do UHPC;

Dimensionamento à Flexão

Diagrama de deformações admissíveis no Estado Limite Último para UHPC armado e/ou protendido



A

- deformação de tração limite na armadura;

B

- deformação de compressão limite do UHPC;

C

- deformação de compressão pura limite do UHPC;

Armadura Mínima e de Pele

- O UHPC não requer ARMADURA MÍNIMA para o controle de fissuras e nem ARMADURA DE PELE.

Exemplo



- Apresentar um estudo de caso e uma análise comparativa de vigas protendidas com UHPC e com concreto de 45 MPa, de um projeto de ponte em viga pré-moldada, considerando a redução de seção e projeto de mistura local e custo de materiais

O detalhamento completo do exemplo,
incluindo dimensionamentos está
disponível em:

<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15317>

BARBOSA, Jadson da Silva. Aplicação do concreto de ultra alto desempenho em viga pré-moldada protendida para pontes. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO EM
VIGA PRÉ-MOLDADA PROTENDIDA PARA PONTES

Jadson da Silva Barbosa

São Carlos
2021

Materiais



- As vigas são projetadas com
- Concreto de 45 MPa ou UHPC (propriedades apresentadas nos próximos slides)
- Aço resistente ao escoamento de 500 MPa (reforço longitudinal e transversal para os casos regulares de 45 MPa)
- Cabos de protensão de 2.100 MPa em aço

Materiais



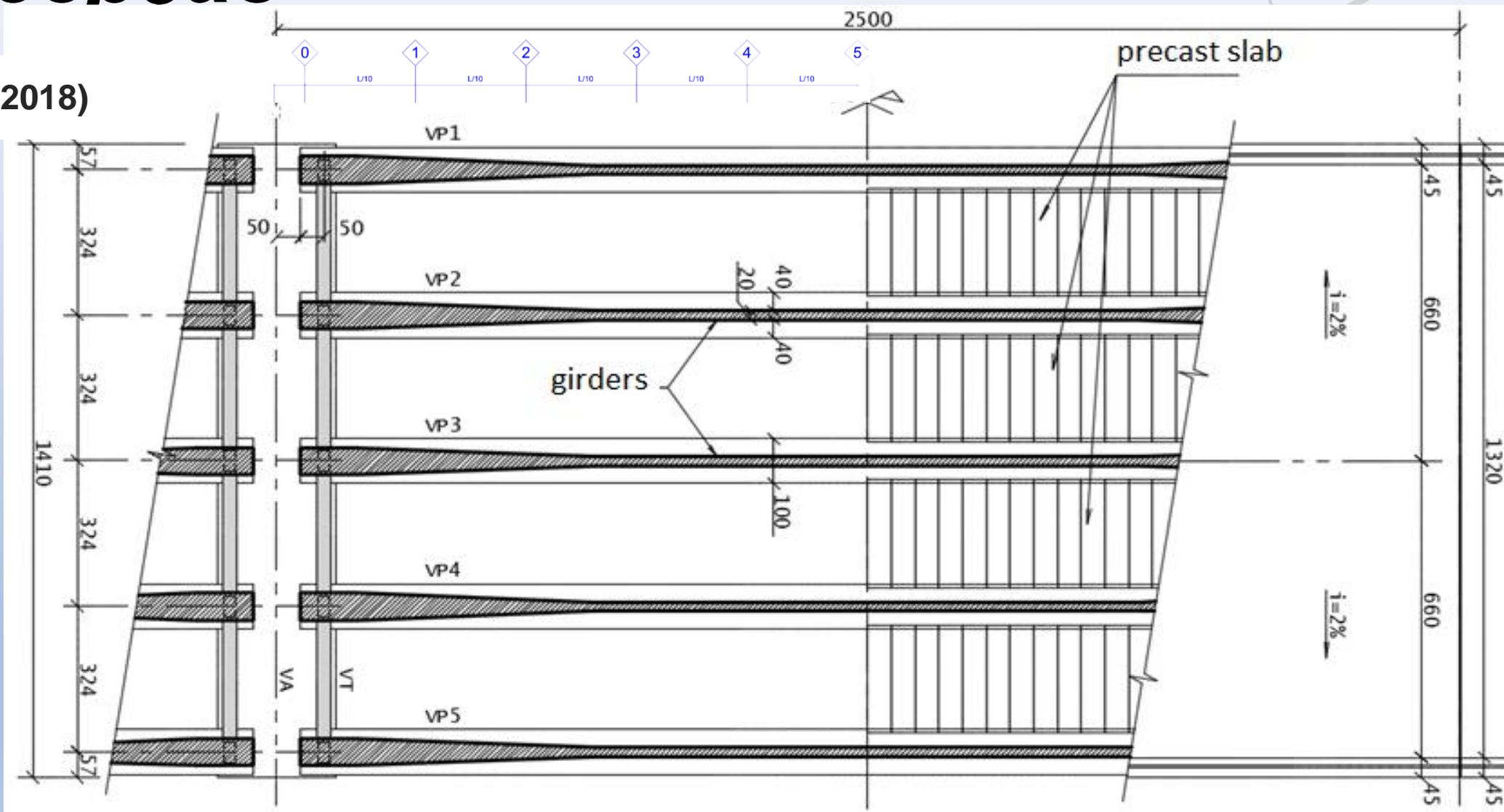
- O UHPC foi projetado e ensaiado localmente, com a mistura

Material	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1185.75
Areia	875.81
Superplastificante	35.57
Água	237.15
Silica	108.86
Fibra de aço	157.00

Concepção

MIGLIORE (2018)

Vista superior



Concepção

MIGLIORE (2018)



Vigas protendidas

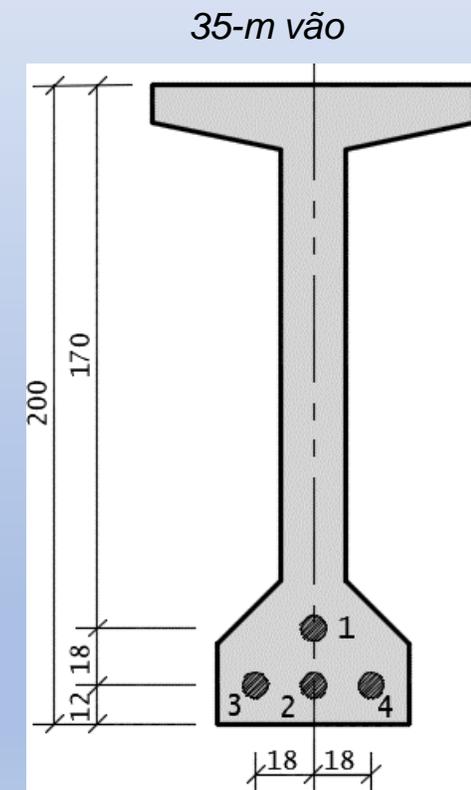
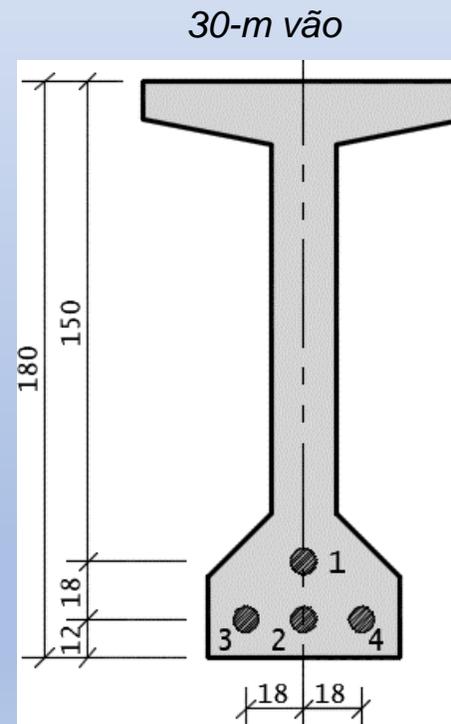
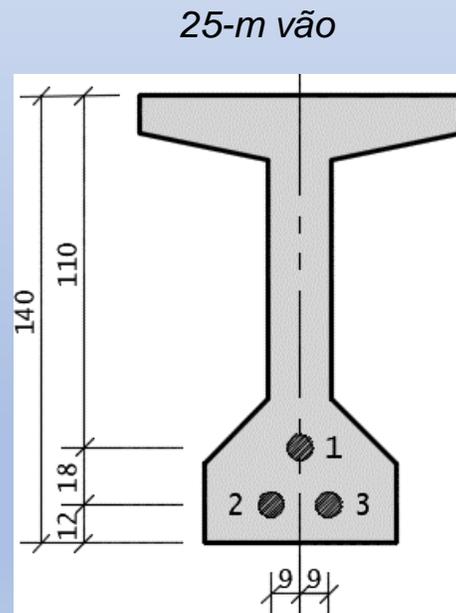
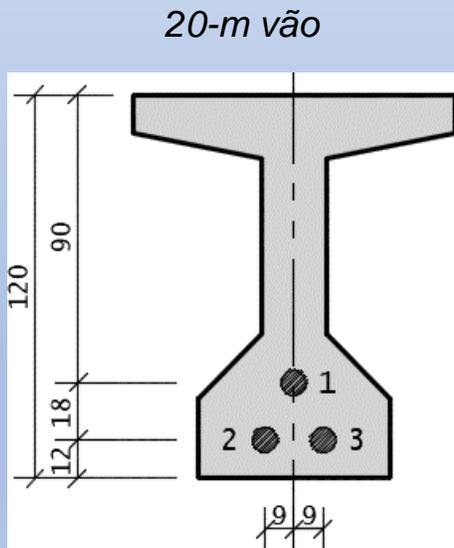
20 a 35 metros de vão



Concepção

MIGLIORE (2018)

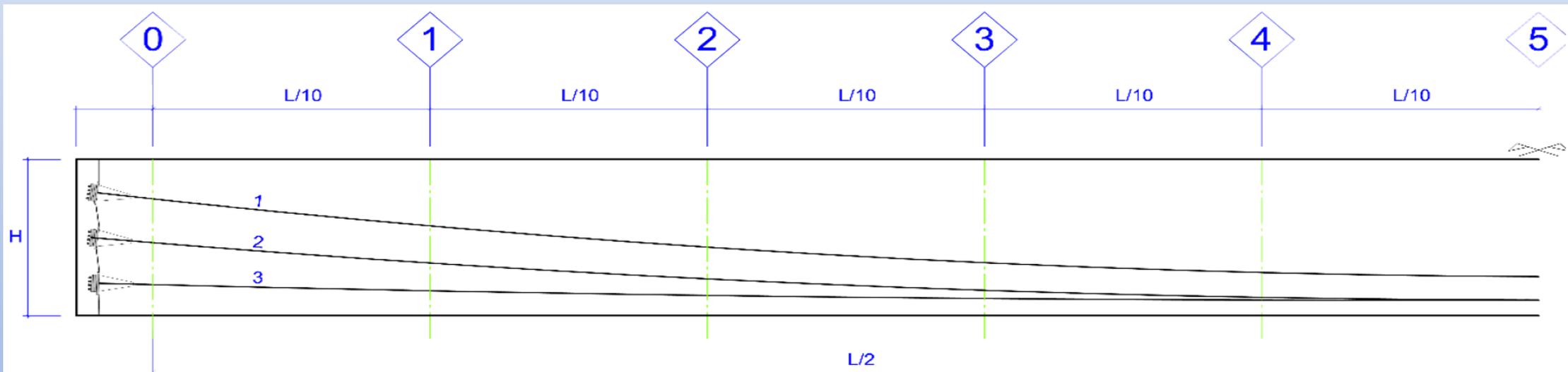
Seções usuais



Concepção

MIGLIORE (2018)

Disposição dos cabos (20-m)

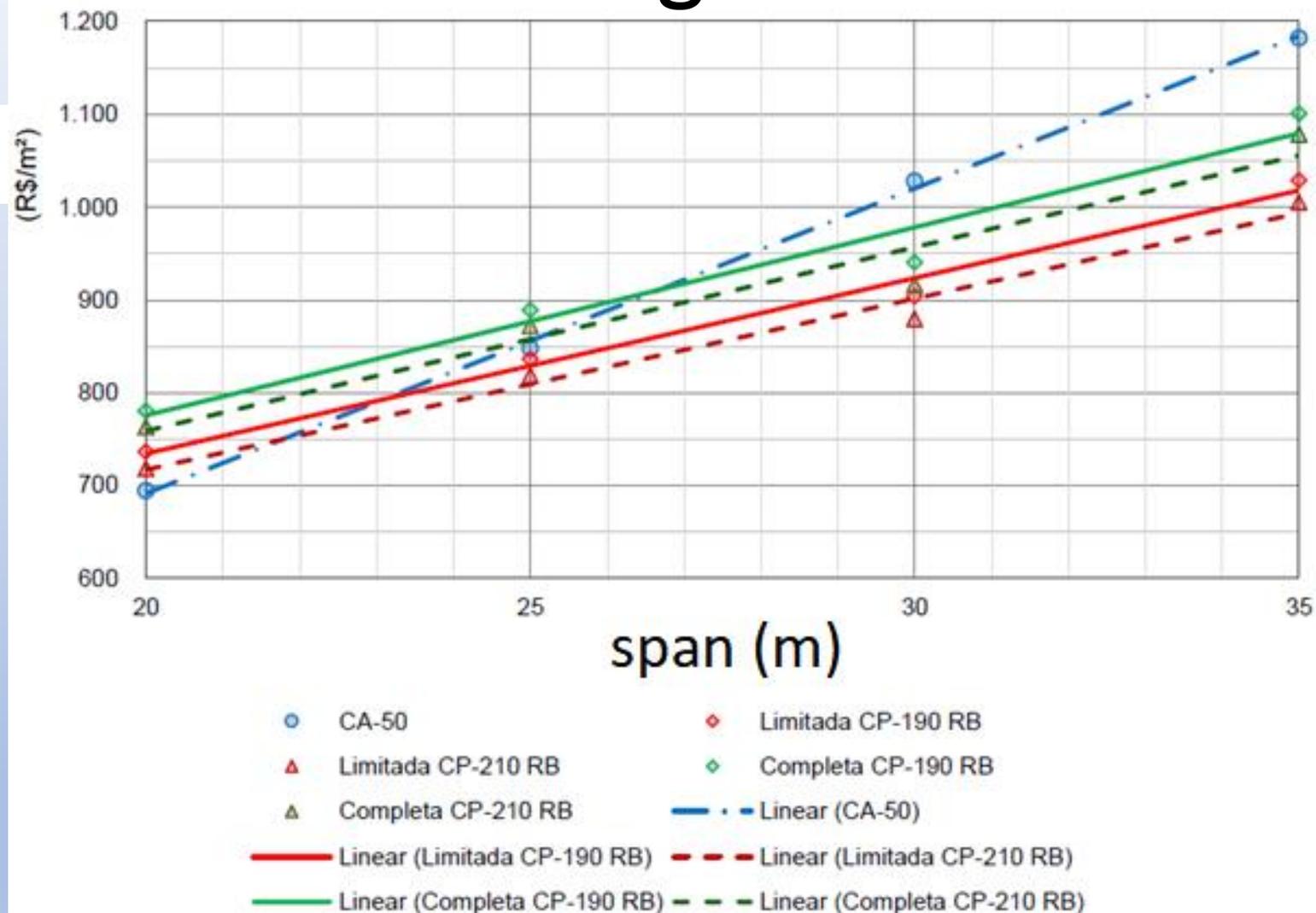


Dimensionamento com concreto regular

MIGLIORE (2018)

RETIRAR

Custo imediato



Dimensionamento com UHPC



- Para os vãos de 20 e 35 metros, as vigas foram projetadas com UHPC
- O projeto é apresentado em Barbosa (2021)
- A área de seção transversal da viga com UHPC foi reduzida ao mínimo capaz de suportar as cargas e verificar se a seção transversal possui espessura mínima capaz de acomodar os cabos de protensão, obedecendo a cobertura mínima de projeto adotada para UHPC
- Foi verificada uma área suficientemente capaz de suportar a carga de cisalhamento e as dimensões inferiores do flange também devem ser suficientes para acomodar os cabos de protensão com espaçamento e cobertura adequados

Dimensionamento com UHPC

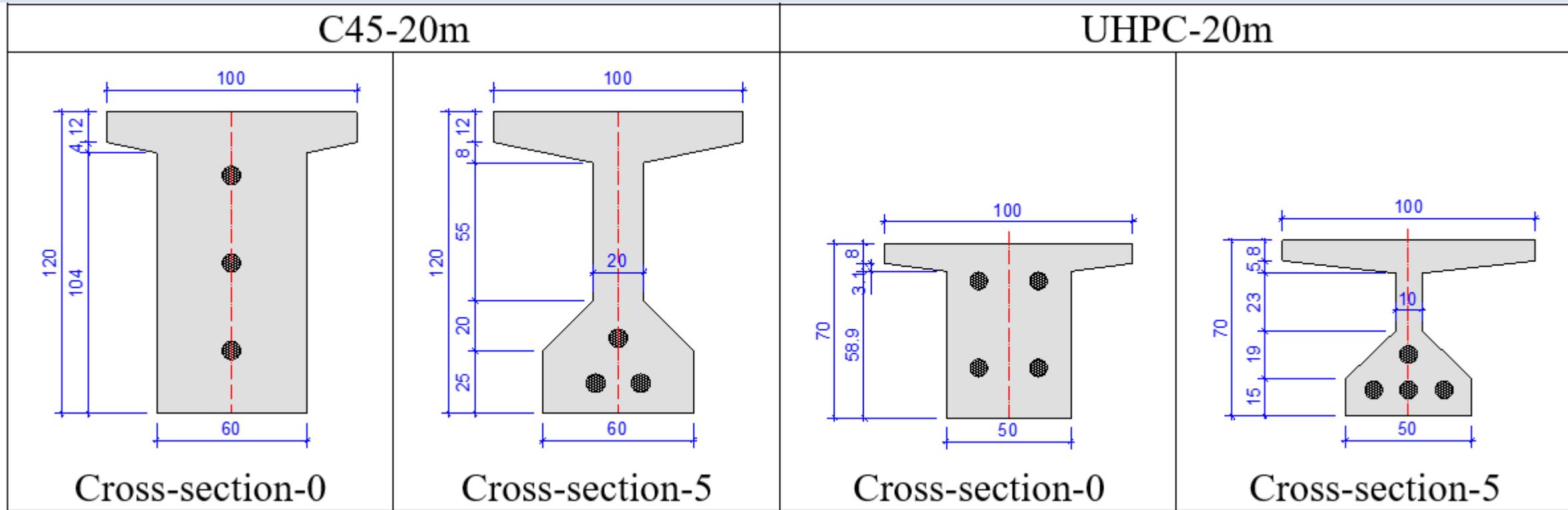


Propriedades

Resistência à Compressão Característica	f_{ck}	150 MPa
Deformação última à compressão de cálculo	ϵ_{cud}	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Resistência à tração característica (limite elástico)	$f_{ctk,el}$	8 MPa
Resistência à tração característica pós-fissuração	f_{ctfk}	8 MPa
Módulo de Elasticidade	E_{cm}	50 GPa
Fator de orientação das fibras (efeitos globais)	K_{global}	1,25
Fator de orientação das fibras (efeitos locais)	K_{local}	1,75
Fator de Redução do CUAD	γ_c	1,5
Retração do CUAD (sem tratamento térmico)	$\epsilon_{cs,nht}$	700 $\mu\text{m}/\text{m}$
Fator de Fluência (sem tratamento térmico)	φ_{nht}	0,8
Comprimento das fibras	l_f	12 mm
Densidade do CUAD	ρ	2.500 kg/m^3

Dimensionamento com UHPC

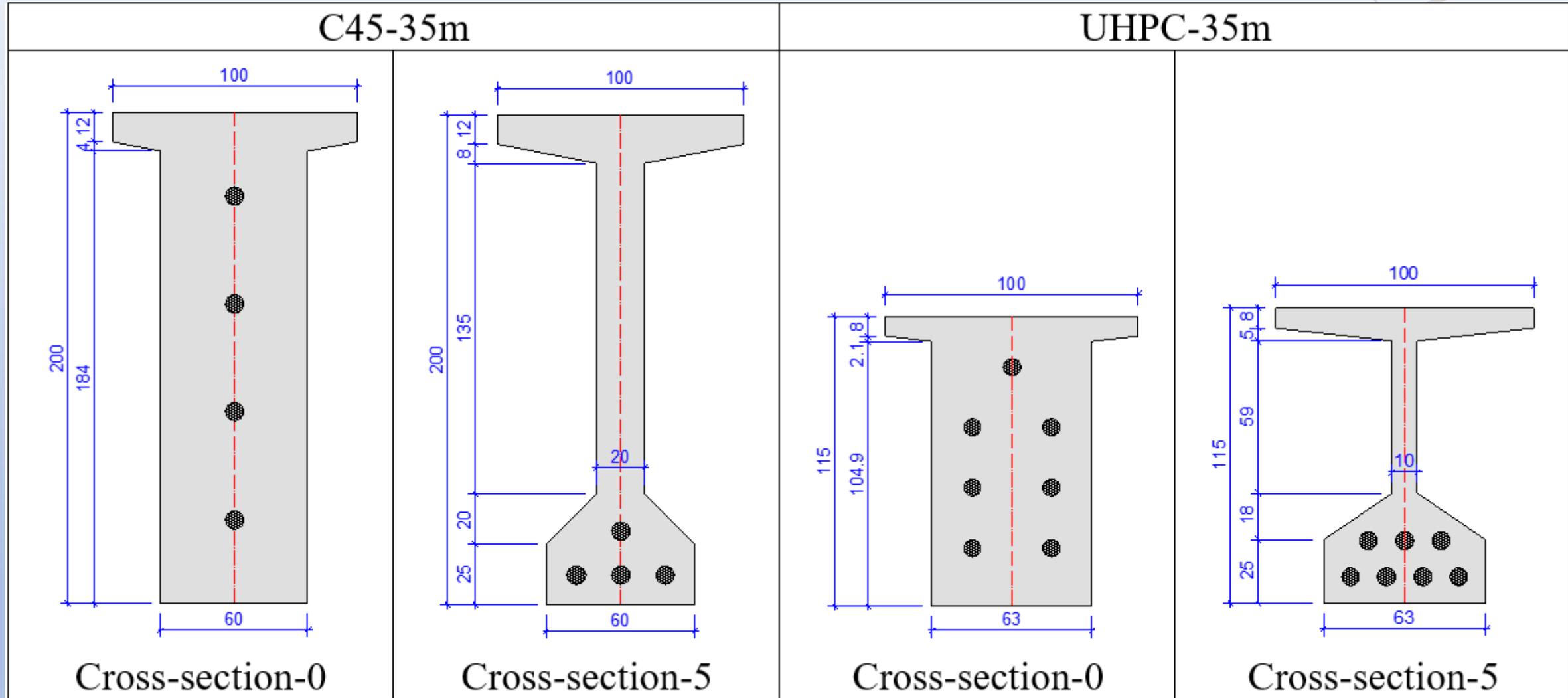
Barbosa, 2021



[cm]

Dimensionamento com UHPC

Barbosa, 2021



[cm]

MÓDULO DE ELASTICIDADE

Valores de módulo de elasticidade são propostos por:

- Graybeal (2007):

$$E_c = 3840 \times \sqrt{f_{ck}}$$

- relatório FHWA-HIF-13-032

$$E_c = 3.836,2 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

- Recomendação Japonesa JSCE (2006):
- Recomendação francesa AFGC (2013):
- Recomendação francesa NF P 18-710 (2016):

$$E_c = 50 \text{ GPa}$$

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO



FLUÊNCIA

- Segundo a AFGC (2013) e NF P 18-710 (2016):

- Sem tratamento térmico:

$$\varphi = 0,8$$

- Com tratamento térmico:

$$\varphi = (0,2 \text{ a } 0,4)$$

- Segundo Sritharan (2015) e Toutlemonde e Resplendino (2011):

- Sem tratamento térmico:

$$\varphi = 1,0$$

- Com tratamento térmico:

$$\varphi = (0,2 \text{ a } 0,5)$$

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO



RETRAÇÃO

- Segundo a AFGC (2013) e NF P 18-710 (2016):
 - Sem tratamento térmico:
700 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Com tratamento térmico:
0 a 550 $\mu\text{m}/\text{m}$
- Segundo relatório FHWA-HIF-13-032 (2013):
 - Sem tratamento térmico:
850 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Com tratamento térmico:
0 a 850 $\mu\text{m}/\text{m}$

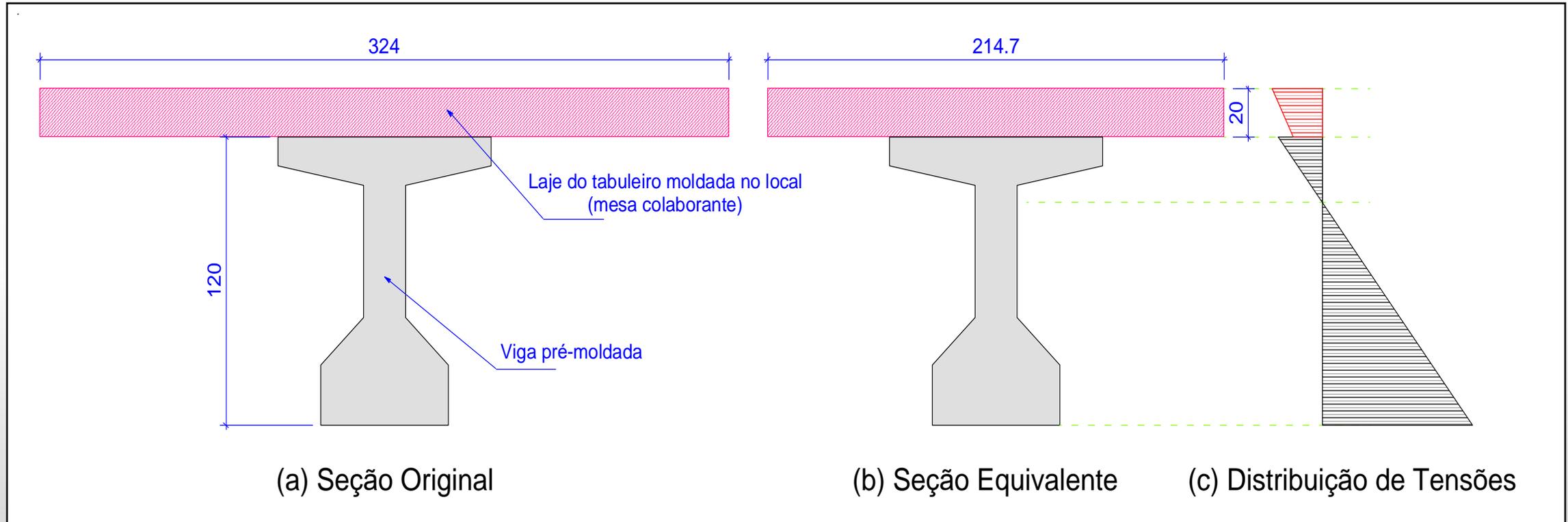
FHWA-HIF-13-032

DESENVOLVIMENTO - CONSIDERAÇÕES

- pós-tração com aderência posterior;
- Ancoragem ativa em ambas as extremidades da viga;
- Protensão aplicada aos 28 dias;
- Nível de protensão: completa;
- Considerando a mesa do tabuleiro colaborante;

DESENVOLVIMENTO – SEÇÃO EQUIVALENTE

Seção transversal da viga com mesa colaborante



DESENVOLVIMENTO – DEFINIÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO

Condições para definição da força mínima de protensão

Condição (a)	Condição (b)
<p>Tensão Inferior ≤ 0 para CF– ELS – D (Com P_{∞}):</p> $\sigma_p + \sigma_{gk, inf} + \psi_1 \cdot \sigma_{qk, inf} \leq 0$ $P_{\infty} \left(-\frac{1}{A} - \frac{e}{W_{inf}} \right) + \sigma_{gk, inf} + \psi_1 \cdot \sigma_{qk, inf} \leq 0$ $-\frac{P_{\infty}}{A} - \frac{P_{\infty} \cdot e}{W_{inf}} + \sigma_{gk, inf} + \psi_1 \cdot \sigma_{qk, inf} \leq 0$	<p>Tensão Inferior $\leq \alpha F * 0,7 \cdot f_{ctk}$ para CR– ELS – F (Com P_{∞}):</p> $\sigma_p + \sigma_{gk, inf} + \sigma_{qk, inf} \leq \alpha F * 0,7 \cdot f_{ctk}$ $P_{\infty} \left(-\frac{1}{A} - \frac{e}{W_{inf}} \right) + \sigma_{gk, inf} + \sigma_{qk, inf} \leq \alpha F * 0,7 \cdot f_{ctk}$ $-\frac{P_{\infty}}{A} - \frac{P_{\infty} \cdot e}{W_{inf}} + \sigma_{gk, inf} + \sigma_{qk, inf} \leq \alpha F * 0,7 \cdot f_{ctm}$

DESENVOLVIMENTO – ARRANJO DE CABOS DE PROTENSÃO

- Área de protensão;
- Definição dos cabos e cordoalhas;
- Traçado dos cabos (cablagem);
- Cabo equivalente;
- Verificação de tensão nas seções;

DESENVOLVIMENTO – VERIFICAÇÕES

- (I) ATO – Seção simples (estado em vazio) – borda **inferior** – ELS-CE;
- (II) ATO – Seção simples (estado em vazio) – borda **superior** – ELS-F;
- (III) P^∞ – Seção composta (em serviço) – borda **superior** – CR-ELS-CE;
- (IV) P^∞ – Seção composta (em serviço) – borda **inferior** – CF-ELS-D;
- (V) P^∞ – Seção composta (em serviço) – borda **inferior** – CR-ELS-F;

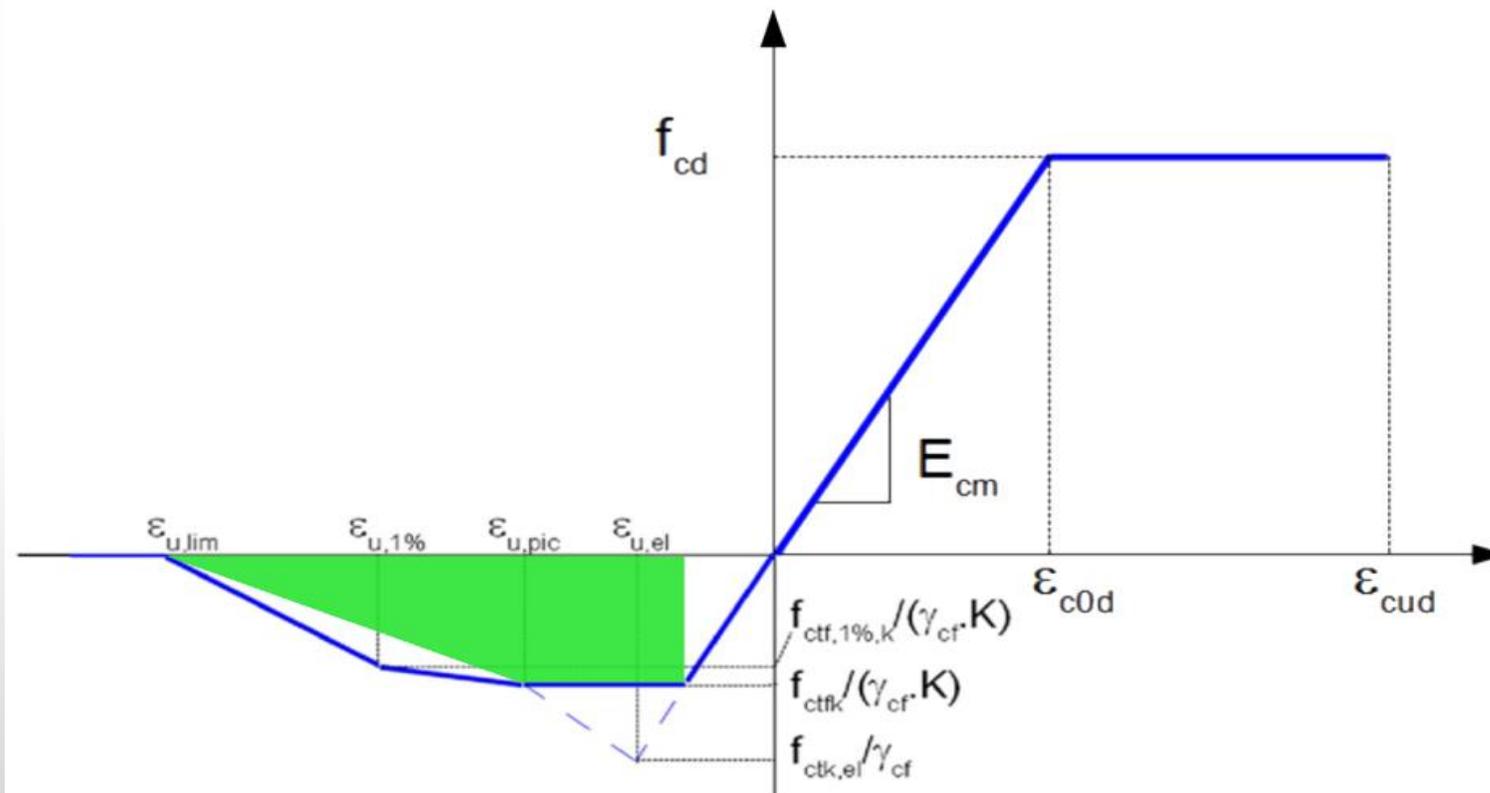
DESENVOLVIMENTO – PERDAS DE PROTENSÃO

- Perdas Imediatas
 - a) Atrito entre o cabo e a bainha durante a protensão;
 - b) Retração do cabo na acomodação da ancoragem;
 - c) Encurtamento elástico do concreto na pré-tração e na pós-tração sequencial.

- Perdas Progressivas
 - a) Retração do concreto;
 - b) Fluência do concreto;
 - c) Relaxação do aço.

DESENVOLVIMENTO – VERIFICAÇÃO À FLEXÃO

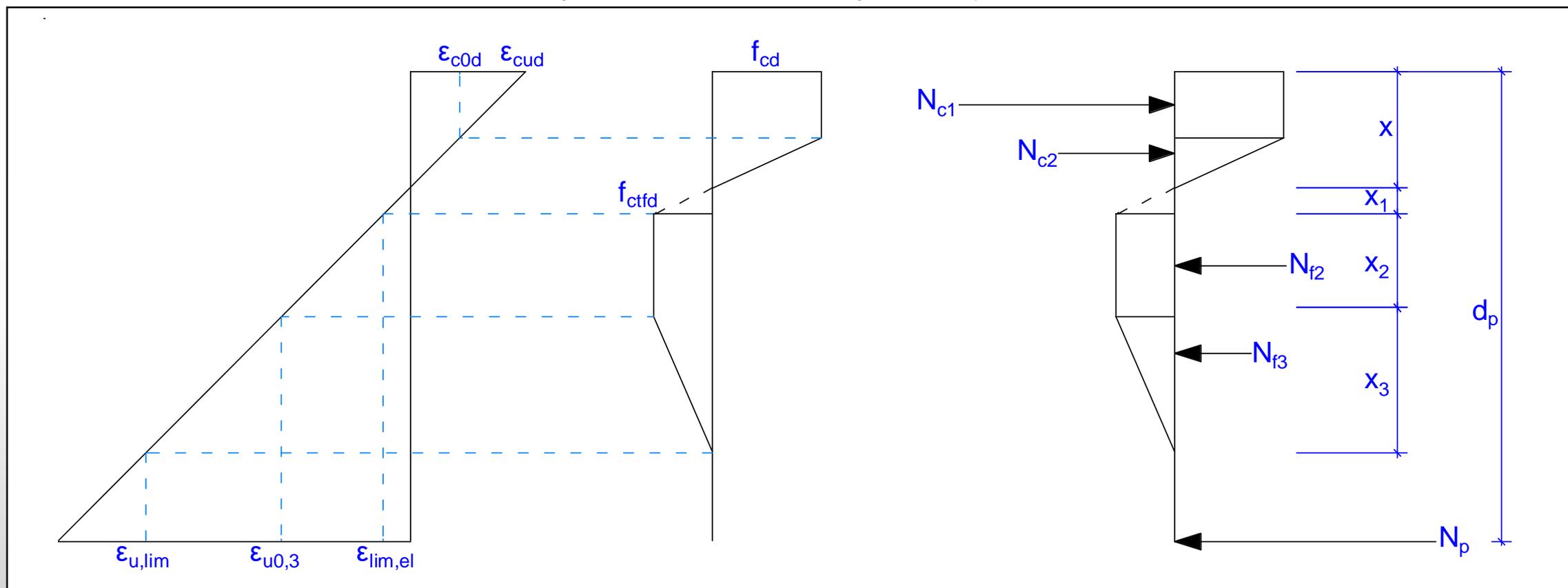
Representação da relação tensão-deformação do CUAD para



METODOLOGIA

DESENVOLVIMENTO – VERIFICAÇÃO À FLEXÃO

Representação de tensões e deformações na viga protendida em CUAD



Comparativo



- Dimensionamento

	C45-20M	C45-35M	UHPC-20M	UHPC-35M
Momento Solicitante - M_{sd} (kN·m)	5,320	15,435	5,320	15,435
Força Cortante Solicitante - V_{sd} (kN)	1,221	1,976	1,221	1,976
Momento Resistente M_{ud} (kN·m)	6,465	19,398	5,855	15,552
Força Cortante Resistente V_{Rd} (kN)	reinforced		4,805	7,320
Contraflecha (cm)	-1.40	-3.60	-4.97	-9.05
Flecha final (cm)	0.10	0.80	-4.86	-6.40

Comparativo de materiais



VIGA	# CABOS	# CORDOALHAS	ÁREA DE AÇO (CM ² /CABO)	FORÇA DE PROTENSÃO INICIAL (KN/CABO)	FORÇA DE PROTENSÃO FINAL (KN/CABO)
C45-20m	3	11 Φ 12,7	11,11	1.700	1.213
C45-35m	4	15 Φ 12,7	15,15	2.200	1.495
UHPC-20m	4	8 Φ 15,2	11,44	1.689	1.215
UHPC-35m	7	8 Φ 15,2	11,44	1.693	1.314

Comparativo de custo



- 20m

Material	Consumo (kg/m ³)	R\$/kg	R\$/m ³	%
Cimento	1185.75	R\$ 0,74	R\$ 877,46	11,60%
Areia	875.81	R\$ 0,23	R\$ 201,44	2,66%
Superplastificante	35.57	R\$ 19,06	R\$ 677,96	8,97%
Água	237.15	-	-	-
Silica	108.86	R\$ 2,85	R\$ 310,25	4,10%
Fibra de aço	157.00	R\$ 35,00	R\$ 5.495,00	72,66%
		Total	R\$ 7.562,11	100,00%

Comparativo de custo



- 20m

MATERIALS/SERVIÇO	UNIDADE	QUANTIDADE		CUSTO	
		C45-20M	UHPC-20M	C45-20M	UHPC-20M
Concreto	m ³	10,94	5,65	R\$ 9.343,58	R\$ 42.725,92
Forma	m ²	53,16	39,78	R\$ 6.849,39	R\$ 5.124,61
CA-50	kg	836,00	-	R\$ 16.101,36	-
CP-210 RB	kg	489,61	684,95	R\$ 16.524,34	R\$ 23.116,95
Ancoragem	unit	6,00	8,00	R\$ 11.068,62	R\$ 18.256,56
Transporte (150km)	vb	1	1	R\$ 5.000,00	R\$ 2.500,00
Elevação	vb	1	1	R\$ 3.500,00	R\$ 1.250,00
Total				R\$ 68.387,29	R\$ 92.974,04

Comparative cost



RETIRAR

- 35m

MATERIAL/SERVIÇO	UNIDADE	QUANTIDADE		CUSTO	
		C45-20M	UHPC-20M	C45-35M	UHPC-35M
Concreto	m ³	27,30	16,13	R\$ 23.318,29	R\$ 121.976,83
Forma	m ²	125,84	94,34	R\$ 16.213,48	R\$ 12.155,20
CA-50	kg	1679,50	-	<i>R\$ 32.347,17</i>	-
CP-210 RB	kg	1605,23	2144,60	R\$ 54.176,51	R\$ 72.380,38
Ancoragem	unit	8,00	14,00	R\$ 20.124,80	R\$ 31.948,98
Transporte (150km)	vb	1	1	R\$ 25.000,00	R\$ 12.000,00
Elevação	vb	1	1	R\$ 30.000,00	R\$ 5.000,00
Total				R\$ 201.180,25	R\$ 255.461,39

Considerações finais



- Redução do volume e peso em 48% e 42% para as vigas UHPC de 20m e 35m, respectivamente.
- ~ metade do peso em relação às vigas de concreto convencionais reduzindo custos de transporte, elevação, equipamentos de menor capacidade, redução de pilares e elementos de fundação

Considerações finais



- a possibilidade de eliminação total das armaduras passivas de flexão e cisalhamento utilizando a UHPC, é um fator essencial a ser considerado em relação ao custo.
- custo inicial do material UHPC é relativamente mais alto
- custo da fibra ~ 70% do custo UHPC local
- Considerando a economia a longo prazo, acredita-se que o alto custo inicial possa ser compensado pelas menores necessidades de manutenção e reparo ao longo da vida útil da estrutura, devido à sua alta durabilidade
- Mas é essencial reduzir o custo local da fibra

Thank you!

- Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Semiárido pela licença concedida a um dos autores, e à MC Bauchemie, Beneficiadora de Minérios Rio Claro e Tranenge Construções, que apoiaram a pesquisa com doação de materiais