

Memorial de Cálculo - Viga 01

Premissas do memorial

Este memorial apresenta as premissas de análise, as ações, as combinações e as verificações aplicadas ao dimensionamento e ao detalhamento da armadura adotada para a Viga 01, em concreto armado, conforme os critérios da ABNT NBR 6118:2026 contemplados neste documento. Os esforços solicitantes são obtidos a partir do modelo estrutural descrito a seguir.

Modelo estrutural

Item	Critério adotado
Modelo estrutural	Viga representada como elemento linear plano.
Método de análise	Análise linear elástica.
Apoios	Restrições aplicadas nos eixos dos apoios indicados no esquema estrutural.
Comportamento rotacional	Representado por rigidezes rotacionais equivalentes, definidas a partir dos coeficientes de vínculo adotados nos apoios.
Redistribuição de momentos	Considerada nos momentos negativos de ELU (15,00%).

Apoios

Apoio	Posição do eixo	Largura do apoio
P01	0,15 m	0,30 m
P02	4,15 m	0,30 m
P03	9,65 m	0,30 m
P04	14,15 m	0,30 m

Em todos os apoios, o deslocamento vertical é restringido. O comportamento rotacional é representado conforme os coeficientes de vínculo adotados no modelo.

Divisão em trechos

Para organização das verificações, a viga é dividida pelas extremidades do elemento e pelos eixos dos apoios internos. Cada trecho reúne as verificações correspondentes ao respectivo intervalo longitudinal.

Trecho	Posição inicial	Posição final	Comprimento
Trecho 01	0,00 m	4,15 m	4,15 m
Trecho 02	4,15 m	9,65 m	5,50 m
Trecho 03	9,65 m	14,15 m	4,50 m
Trecho 04	14,15 m	15,15 m	1,00 m

Materiais e critérios gerais

Item	Valor adotado
Norma principal	ABNT NBR 6118:2026
Concreto	C25
Aço das armaduras longitudinais	CA-50
Aço dos estribos	CA-60
Cobrimento nominal	2,50 cm

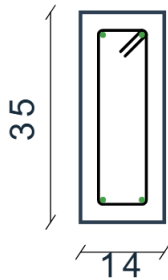
Ações consideradas

Ação	Natureza	Aplicação	Posição ou intervalo	Valor característico
G1	Permanente	Distribuída	0,15 m a 15,15 m	8,00 kN/m
G2	Permanente (peso próprio)	Distribuída	0,15 m a 15,15 m	1,23 kN/m

Combinações utilizadas

Combinação	Estado-limite	Expressão utilizada
ELU Normal 01	ELU	1,40 G1 + 1,40 G2
ELS Quase Permanente 01	ELS	1,00 G1 + 1,00 G2

Viga 01 - Trecho 01



Posição Inicial	0.00 m
Posição Final	4.15 m
Comprimento	4.15 m
Cobrimento Superior	2.50 cm
Cobrimento Inferior	2.50 cm
Cobrimento Direito	2.50 cm
Cobrimento Esquerdo	2.50 cm

1.1 Verificações de Momento Fletor

1.1.1 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 0,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 6.68 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 6.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto. $f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto. $f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto. $\gamma_c = 1.40$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção. $h = 35.00 \text{ cm}$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada. $a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$

f_{yd} : Resistência de cálculo do aço. $f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada. $f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$

γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço. $\gamma_s = 1.15$

1.1.2 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 1,78 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 10.81 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo. $M_{Sd} = 10.81 \text{ kN} \cdot \text{m}$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo. $M_{Rd} = 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada. $A_s = 1.57 \text{ cm}^2$

x : Profundidade da linha neutra. $x = 4.02 \text{ cm}$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1. $\eta_c = 1.000$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}} \right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto. $b_w = 14.00 \text{ cm}$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto. $f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto. $f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto. $\gamma_c = 1.40$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

1.1.3 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 24.67 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 22.74 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.	$M_{Sd} = 22.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.	$M_{Rd} = 24.67 \text{ kN} \cdot \text{m}$
$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$	
A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.	$A_s = 1.92 \text{ cm}^2$
x : Profundidade da linha neutra.	$x = 4.91 \text{ cm}$
$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$	
η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.	$\eta_c = 1.000$
$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$	
b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.	$b_w = 14.00 \text{ cm}$
f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.	$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.	$\gamma_c = 1.40$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

1.2 Verificações de Força Cortante

1.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad 27.29 \text{ kN} \leq 191.36 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, a segurança da biela comprimida do concreto frente à ruptura por compressão diagonal da alma.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} = 27.29 \text{ kN}$$

V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.

$$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

α_{v2} : Fator de redução da biela comprimida do concreto.

$$\alpha_{v2} = 0.900$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s,cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s,cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s,cg} = 3.50 \text{ cm}$$

1.2.2 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2b - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad 27.29 \text{ kN} \leq 60.84 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, se a resistência ao cisalhamento fornecida pela contribuição do concreto e da armadura transversal é suficiente para a solicitação.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} = 27.29 \text{ kN}$$

V_{Rd3} : Resistência de cálculo à força cortante no Modelo I.

$$V_{Rd3} = 60.84 \text{ kN}$$

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

V_c : Contribuição do concreto na resistência ao esforço cortante

$$V_c = 33.93 \text{ kN}$$

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

f_{ctd} : Resistência de cálculo à tração do concreto.

$$f_{ctd} = 1.28 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$f_{ctk,inf}$: Resistência característica inferior à tração do concreto.

$$f_{ctk,inf} = 1.80 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

V_{sw} : Contribuição da armação transversal na resistência ao esforço cortante

$$V_{sw} = 26.90 \text{ kN}$$

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

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.

$$\alpha = 90^\circ$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$$

A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

$$A_{sw} = n \cdot \frac{\pi \varphi_{sw}^2}{4}$$

n : Quantidade de ramos do estribo.

$$n = 2$$

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.

$$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$$

s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

f_{ywd} : Resistência de cálculo do aço da armadura transversal.

$$f_{ywd} = 435.00 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd} = \min \left(\frac{f_{ywk}}{\gamma_s}, 435 \text{ MPa} \right)$$

f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.

$$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$$

γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.

$$\gamma_s = 1.15$$

1.3 Verificações de Ductilidade

1.3.1 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 0,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim}$$

$$0.128 \leq 0.450$$



A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil.

$$x/d = 0.128$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0.45$$

1.3.2 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 1,78 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim}$$

$$0.128 \leq 0.450$$



A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil.

$$x/d = 0.128$$

Continuação - Trecho 01 - 1.3.2 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

posição 1,78 m

x : Profundidade da linha neutra.	$x = 4.02 \text{ cm}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .	$(x/d)_{lim} = 0,45$

1.3.3 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.156 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.156$

x : Profundidade da linha neutra.	$x = 4.91 \text{ cm}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .	$(x/d)_{lim} = 0,45$

1.3.4 Limite de redistribuição de momentos (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Redistribuição crítica de momento negativo obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$\delta \geq 0,75 \quad 0.864 \geq 0.750 \quad \checkmark$$

A proporção efetiva entre o momento negativo de dimensionamento e o momento elástico de referência não deve ser inferior a 0,75. Essa proporção considera a redução decorrente dos vínculos rotacionais adotados nos apoios e a redistribuição nominal de momentos. Caso esse limite não seja atendido, e não seja feita verificação explícita da capacidade de rotação plástica, a posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, no momento positivo, não deve ser superior 0,25. Considera-se que a análise plástica é naturalmente aprovada quando as demais verificações deste trecho no memorial são atendidas.

$$\delta = \frac{|M_{Sd,red}|}{|M_{el}|} \quad M_{Sd,red} = \delta M_{el} = 0.864 \cdot 26.31 \text{ kN} \cdot \text{m} = 22.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

δ : Coeficiente efetivo de redistribuição calculado no momento negativo. $\delta = 0.864$

δ_{lim} : Coeficiente de redistribuição limite. $\delta_{lim} = 0.750$

$M_{Sd,red}$: Momento negativo redistribuído. $M_{Sd,red} = 22.74 \text{ kN} \cdot \text{m}$

M_{el} : Momento elástico de referência. $M_{el} = 26.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$

1.4 Verificações de Detalhamento

1.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal de tração crítica obtida na posição 0,15 m, na face inferior da viga.

$$A_{s,prov,bruta} \geq A_{s,min} \quad 1.57 \text{ cm}^2 \geq 0.74 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A armadura longitudinal mínima no ponto de menor área bruta de aço da face tracionada deve ser igual ou maior que a armação necessária calculada com base no momento mínimo para dimensionamento da seção.

$$M_{d,min} = 0,8 W_0 f_{ctk,sup}$$

$M_{d,min}$: Momento fletor mínimo de dimensionamento. $M_{d,min} = 7.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$$W_0 = \frac{b_w h^2}{6}$$

W_0 : Módulo de resistência da seção de concreto. $W_0 = 2858333 \text{ mm}^3$

Continuação - Trecho 01 - 1.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal — posição 0,15 m

 b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

 h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

 $f_{ctk,sup}$: Resistência característica superior do concreto à tração.

$$f_{ctk,sup} = 3.33 \text{ MPa}$$

 $A_{s,Mdmin}$: Armadura tracionada necessária para $M_{d,min}$.

$$A_{s,Mdmin} = 0.57 \text{ cm}^2$$

 $A_{s,0.15\%}$: Taxa de armação mínima.

$$A_{s,0.15\%} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,0.15\%} = 0.0015 b_w h$$

 $A_{s,min}$: Armação mínima necessária.

$$A_{s,min} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = \max(A_{s,Mdmin}; A_{s,0.15\%})$$

 $A_{s,prov,bruta}$: Armadura longitudinal bruta na face tracionada da seção.

$$A_{s,prov,bruta} = 1.57 \text{ cm}^2$$

 $\rho_{s,prov}$: Taxa longitudinal fornecida na face tracionada.

$$\rho_{s,prov} = 0.321\%$$

1.4.2 Armadura longitudinal máxima (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.4)

Armadura longitudinal crítica obtida na posição 4,00 m.

$$A_s + A'_s \leq 0.04 A_c$$

$$3.64 \text{ cm}^2 \leq 19.60 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A soma das armaduras longitudinais de tração e compressão na seção não deve ultrapassar 4% da área bruta de concreto.

$$A_s + A'_s \leq 0.04 A_c$$

 A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$$

 A'_s : Área de aço longitudinal comprimida.

$$A'_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

 $A_s + A'_s$: Área de aço total fornecida.

$$A_s + A'_s = 3.64 \text{ cm}^2$$

 A_c : Área bruta da seção transversal de concreto.

$$A_c = 490.00 \text{ cm}^2$$

$$A_c = b_w h$$

 b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

 h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

 $A_{s,max}$: Taxa de armação limite.

$$A_{s,max} = 19.60 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 0.04 A_c$$

 $\rho_{s,total}$: Taxa total de armação longitudinal fornecida.

$$\rho_{s,total} = 0.744\%$$

1.4.3 Armadura transversal mínima (NBR 6118:2026, 17.4.1.1.1)

Armadura transversal crítica obtida na posição 0,15 m.

$$\rho_{sw} \geq \rho_{sw,min}$$

$$0.00156 \geq 0.00085 \quad \checkmark$$

A taxa de armação transversal no trecho não deve ser inferior à mínima estabelecida.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \sin \alpha} \geq 0.2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}}$$

 ρ_{sw} : Taxa de armadura transversal fornecida.

$$\rho_{sw} = 0.00156$$

 $\rho_{sw,min}$: Taxa de armadura transversal mínima.

$$\rho_{sw,min} = 0.00085$$

 $(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

 $(A_{sw}/s)_{min}$: Armação transversal mínima.

$$(A_{sw}/s)_{min} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$$

 A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

 s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

 b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

Continuação - Trecho 01 - 1.4.3 Armadura transversal mínima (NBR 6118:2026, 17.4.1.1.1)

Armadura transversal — posição 0,15 m

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.	$\alpha = 90^\circ$
f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.	$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$
f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.	$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$

1.4.4 Detalhamento de estribos (NBR 6118:2026, 18.3.3.2)

Armadura transversal crítica obtida na posição 4,00 m.

$\varphi_{sw,min} \leq \varphi_{sw} \leq \varphi_{sw,max}$	$5.00 \text{ mm} \leq 5.00 \text{ mm} \leq 14.00 \text{ mm}$	✓
$s \leq s_{max}$	$18.00 \text{ cm} \leq 18.90 \text{ cm}$	✓

O diâmetro dos estribos e seus espaçamentos no trecho não devem violar os limites estabelecidos.

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,min}$: Diâmetro mínimo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,min} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,max}$: Diâmetro máximo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,max} = 14.00 \text{ mm}$
n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
s_{max} : Limite longitudinal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{max} = 18.90 \text{ cm}$
$s_{max} = \min(0,6d, 30 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,67V_{Rd2}$
$s_{max} = \min(0,3d, 20 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,67V_{Rd2}$
s_t : Espaçamento transversal entre ramos sucessivos.	$s_t = 8.50 \text{ cm}$
$s_{t,max}$: Limite transversal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{t,max} = 31.50 \text{ cm}$
$s_{t,max} = \min(d, 80 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,20V_{Rd2}$
$s_{t,max} = \min(0,6d, 35 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,20V_{Rd2}$
V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 27.29 \text{ kN}$
V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.	$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s,cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s,cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s,cg} = 3.50 \text{ cm}$

1.4.5 Espaçamento livre entre barras longitudinais (NBR 6118:2026, 18.3.2.2)

Menor espaçamento horizontal livre entre barras longitudinais obtido na posição 3,55 m, face superior, camada 1.

$a_{h,prov} \geq a_{h,min}$	$26.00 \text{ mm} \geq 22.80 \text{ mm}$	✓
-----------------------------	--	---

A região de armação longitudinal mais congestionada do trecho deve garantir que o espaçamento horizontal livre entre barras seja maior ou igual que o mínimo estabelecido.

$a_{h,min} = \max(20 \text{ mm}; \varphi_l; 1,2 d_{agg})$	
$a_{h,prov}$: Menor espaçamento horizontal livre obtido.	$a_{h,prov} = 26.00 \text{ mm}$
$a_{h,min}$: Espaçamento horizontal livre mínimo exigido.	$a_{h,min} = 22.80 \text{ mm}$
Limite absoluto da norma.	20.00 mm
φ_l : Maior diâmetro das barras longitudinais no agrupamento analisado.	$\varphi_l = 10.00 \text{ mm}$
d_{agg} : Diâmetro máximo do agregado.	$d_{agg} = 19.00 \text{ mm}$

n_l : Quantidade de barras longitudinais ativas no agrupamento governante.

$$n_l = 3$$

1.4.6 Largura mínima da seção transversal da viga (NBR 6118:2026, 13.2.2)

Largura mínima da viga obtida na posição 0,00 m.

$$b_w \geq b_{w,min}$$

$$14.00 \text{ cm} \geq 10.00 \text{ cm} \quad \checkmark$$

A largura da viga deve ser no mínimo de 10 cm para vigas normais e 15 cm para trechos classificados como vigas-parede.

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

$b_{w,min}$: Largura mínima aplicável ao trecho.

$$b_{w,min} = 10.00 \text{ cm}$$

1.5 Verificações de Estado Limite de Serviço

1.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 0,30 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.026 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 5.27 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.026 \text{ mm}$$

$$w_k = \min \left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.026 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.085 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 115.01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 6.58 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01020$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

Continuação - Trecho 01 - 1.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Momento negativo — posição 0,30 m

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento. $a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento. $a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento. $a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

1.5.2 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)**Abertura crítica de fissura por momento positivo obtida na posição 1,78 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".**

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.037 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

 M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 6.29 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

 w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.037 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

 $w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.037 \text{ mm}$$

 $w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.102 \text{ mm}$$

 σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 137.25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

 α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

 x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 6.58 \text{ cm}$$

 I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$$

 d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

 φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

 η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

 E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

 f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

 ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01020$$

 A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

 a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

 a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$$

 a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 7.50 \text{ cm}$$

 a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 3.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face inferior, camada 1.

1.5.3 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 4,00 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.112 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 14.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.112 \text{ mm}$$

$$w_k = \min \left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.112 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.137 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 237.86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 7.43 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 125467955 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_I : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_I = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01360$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 57.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 1.75 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

1.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha total visível crítica do Trecho 01 obtida na posição 1,78 m.

$$f_{vis,max} \leq f_{lim}$$

$$1.13 \text{ mm} \leq 14.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha visível máxima que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{vis,max} = \max_{x_i \leq x \leq x_f} |f_t(x)|$$

$$f_t(x) = f_0(x) + f_{dif}(x)$$

$f_t(x_{crit})$: Flecha total no tempo considerado.

$$f_t = 1.13 \text{ mm}$$

Continuação - Trecho 01 - 1.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

posição 1,78 m

 $f_0(x_{crit})$: Flecha imediata.

$f_0 = 0.50 \text{ mm}$

 $f_{dif}(x_{crit})$: Flecha diferida por fluência.

$f_{dif} = 0.62 \text{ mm}$

A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.

 $\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.

$\alpha_f = 1.235$

Idades de carregamento consideradas no histórico.

28 d; 60 d; 360 d

A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .

 M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.

$M_a = 6.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$

 M_r : Momento de fissuração da seção transformada.

$M_r = 8.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$

 I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.

$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$

 I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.

$I_{II} = 8601.73 \text{ cm}^4$

 I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha.

$I_e = 41568.31 \text{ cm}^4$

 $f_{vis,max}$: Flecha máxima.

$f_{vis,max} = 1.13 \text{ mm}$

 x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão.

$x_{crit} = 1.78 \text{ m}$

L: Comprimento de referência do vão.

$L = 3.70 \text{ m}$

$$f_{lim} = \frac{L}{250}$$

 f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$f_{lim} = 14.80 \text{ mm}$

1.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha crítica atuante sob elemento não estrutural, após sua execução, no Trecho 01 obtida na posição 1,78 m.

$$f_{a,max} \leq (L)/(500)$$

$$0.56 \text{ mm} \leq 7.40 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$f_{a,max} \leq 10.00 \text{ mm}$$

$$0.56 \text{ mm} \leq 10.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha atuante sob elementos não estruturais, contada a partir da data de execução do elemento não estrutural, que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{a,max} = \max_{x \in \Omega_a} |f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)|$$

 Ω_a : Trecho do vão ocupado por cargas permanentes construtivas aplicáveis.

0,00 m a 4,00 m

A idade de referência t_{ref} corresponde à carga permanente mais próxima da concretagem no vão adotada no cálculo: 60 dias após a concretagem.

$$f_a(x) = f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)$$

 $f(t_{\infty}, x_{crit})$: Flecha visível máxima.

$f(t_{\infty}) = 1.13 \text{ mm}$

 $f(t_{ref}, x_{crit})$: Flecha total existente na idade de referência.

$f(t_{ref}) = 0.56 \text{ mm}$

A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.

 $\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.

$\alpha_f = 1.235$

Idades de carregamento consideradas no histórico.

28 d; 60 d; 360 d

A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .

 M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.

$M_a = 6.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$

 M_r : Momento de fissuração da seção transformada.

$M_r = 8.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$

 I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.

$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$

 I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.

$I_{II} = 8601.73 \text{ cm}^4$

Continuação - Trecho 01 - 1.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)
posição 1,78 m

I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha. $I_e = 41568.31 \text{ cm}^4$

$f_{a,max}$: Flecha máxima atuante sob o elemento não estrutural. $f_{a,max} = 0.56 \text{ mm}$

x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão. $x_{crit} = 1.78 \text{ m}$

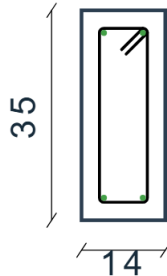
L : Comprimento de referência do vão. $L = 3.70 \text{ m}$

$$f_{lim} = \min\left(\frac{L}{500}; 10 \text{ mm}\right)$$

f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$$f_{lim} = 7.40 \text{ mm}$$

Viga 01 - Trecho 02



Posição Inicial	4.15 m
Posição Final	9.65 m
Comprimento	5.50 m
Cobrimento Superior	2.50 cm
Cobrimento Inferior	2.50 cm
Cobrimento Direito	2.50 cm
Cobrimento Esquerdo	2.50 cm

2.1 Verificações de Momento Fletor

2.1.1 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 4,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 23.62 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 23.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 5.30 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

2.1.2 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 6,74 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 20.68 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.	$M_{Sd} = 20.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.	$M_{Rd} = 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$
$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$	
A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.	$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$
x : Profundidade da linha neutra.	$x = 5.30 \text{ cm}$
$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$	
η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.	$\eta_c = 1.000$
$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$	
b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.	$b_w = 14.00 \text{ cm}$
f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.	$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.	$\gamma_c = 1.40$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

2.1.3 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 24.64 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 24.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 26.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 5.30 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$$

f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.

$$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.

$$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$$

γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.

$$\gamma_s = 1.15$$

2.2 Verificações de Força Cortante

2.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad 33.77 \text{ kN} \leq 191.36 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, a segurança da biela comprimida do concreto frente à ruptura por compressão diagonal da alma.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} = 33.77 \text{ kN}$$

Continuação - Trecho 02 - 2.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Força cortante — posição 9,50 m

V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas. $V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

α_{v2} : Fator de redução da biela comprimida do concreto. $\alpha_{v2} = 0.900$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto. $b_w = 14.00 \text{ cm}$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto. $f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção. $h = 35.00 \text{ cm}$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada. $a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$

2.2.2 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2b - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad 33.77 \text{ kN} \leq 60.84 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, se a resistência ao cisalhamento fornecida pela contribuição do concreto e da armadura transversal é suficiente para a solicitação.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo. $V_{Sd} = 33.77 \text{ kN}$

V_{Rd3} : Resistência de cálculo à força cortante no Modelo I. $V_{Rd3} = 60.84 \text{ kN}$

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

V_c : Contribuição do concreto na resistência ao esforço cortante $V_c = 33.93 \text{ kN}$

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

f_{ctd} : Resistência de cálculo à tração do concreto. $f_{ctd} = 1.28 \text{ MPa}$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk, inf}}{\gamma_c}$$

$f_{ctk, inf}$: Resistência característica inferior à tração do concreto. $f_{ctk, inf} = 1.80 \text{ MPa}$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto. $\gamma_c = 1.40$

V_{sw} : Contribuição da armação transversal na resistência ao esforço cortante $V_{sw} = 26.90 \text{ kN}$

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

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal. $\alpha = 90^\circ$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção. $h = 35.00 \text{ cm}$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada. $a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$

A_{sw} : Área de aço de um estribo $A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$

$$A_{sw} = n \cdot \frac{\pi \phi_{sw}^2}{4}$$

n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
ϕ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\phi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.	$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$
f_{ywd} : Resistência de cálculo do aço da armadura transversal.	$f_{ywd} = 435.00 \text{ MPa}$
$f_{ywd} = \min\left(\frac{f_{ywk}}{\gamma_s}, 435 \text{ MPa}\right)$	
f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.	$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

2.3 Verificações de Ductilidade

2.3.1 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 4,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.168 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.168$

x : Profundidade da linha neutra. $x = 5.30 \text{ cm}$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto. $f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d . $(x/d)_{lim} = 0.45$

2.3.2 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 6,74 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.168 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.168$

x : Profundidade da linha neutra. $x = 5.30 \text{ cm}$

d : Altura útil da seção. $d = 31.50 \text{ cm}$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto. $f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d . $(x/d)_{lim} = 0.45$

2.3.3 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.168 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

Continuação - Trecho 02 - 2.3.3 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

posição 9,50 m

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.168$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 5.30 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0.45$$

2.3.4 Limite de redistribuição de momentos (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Redistribuição crítica de momento negativo obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$\delta \geq 0.75$$

$$0.862 \geq 0.750 \quad \checkmark$$

A proporção efetiva entre o momento negativo de dimensionamento e o momento elástico de referência não deve ser inferior a 0,75. Essa proporção considera a redução decorrente dos vínculos rotacionais adotados nos apoios e a redistribuição nominal de momentos. Caso esse limite não seja atendido, e não seja feita verificação explícita da capacidade de rotação plástica, a posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, no momento positivo, não deve ser superior 0,25. Considera-se que a análise plástica é naturalmente aprovada quando as demais verificações deste trecho no memorial são atendidas.

$$\delta = \frac{|M_{Sd,red}|}{|M_{el}|} M_{Sd,red} = \delta M_{el} = 0.862 \cdot 28.58 \text{ kN} \cdot \text{m} = 24.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

δ : Coeficiente efetivo de redistribuição calculado no momento negativo.

$$\delta = 0.862$$

δ_{lim} : Coeficiente de redistribuição limite.

$$\delta_{lim} = 0.750$$

$M_{Sd,red}$: Momento negativo redistribuído.

$$M_{Sd,red} = 24.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{el} : Momento elástico de referência.

$$M_{el} = 28.58 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2.4 Verificações de Detalhamento

2.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal de tração crítica obtida na posição 4,15 m, na face inferior da viga.

$$A_{s,prov,bruta} \geq A_{s,min} \quad 1.57 \text{ cm}^2 \geq 0.74 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A armadura longitudinal mínima no ponto de menor área bruta de aço da face tracionada deve ser igual ou maior que a armação necessária calculada com base no momento mínimo para dimensionamento da seção.

$$M_{d,min} = 0.8 W_0 f_{ctk,sup}$$

$M_{d,min}$: Momento fletor mínimo de dimensionamento.

$$M_{d,min} = 7.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_0 = \frac{b_w h^2}{6}$$

W_0 : Módulo de resistência da seção de concreto.

$$W_0 = 2858333 \text{ mm}^3$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$f_{ctk,sup}$: Resistência característica superior do concreto à tração.

$$f_{ctk,sup} = 3.33 \text{ MPa}$$

$A_{s,Mdmin}$: Armadura tracionada necessária para $M_{d,min}$.

$$A_{s,Mdmin} = 0.57 \text{ cm}^2$$

$A_{s,0.15\%}$: Taxa de armação mínima.

$$A_{s,0.15\%} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,0.15\%} = 0.0015 b_w h$$

$A_{s,min}$: Armação mínima necessária.

$$A_{s,min} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = \max(A_{s,Mdmin}; A_{s,0.15\%})$$

Continuação - Trecho 02 - 2.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal — posição 4,15 m

$A_{s,prov,bruta}$: Armadura longitudinal bruta na face tracionada da seção.

$$A_{s,prov,bruta} = 1.57 \text{ cm}^2$$

$\rho_{s,prov}$: Taxa longitudinal fornecida na face tracionada.

$$\rho_{s,prov} = 0.321\%$$

2.4.2 Armadura longitudinal máxima (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.4)

Armadura longitudinal crítica obtida na posição 4,30 m.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

$$3.64 \text{ cm}^2 \leq 19.60 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A soma das armaduras longitudinais de tração e compressão na seção não deve ultrapassar 4% da área bruta de concreto.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$$

A'_s : Área de aço longitudinal comprimida.

$$A'_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

$A_s + A'_s$: Área de aço total fornecida.

$$A_s + A'_s = 3.64 \text{ cm}^2$$

A_c : Área bruta da seção transversal de concreto.

$$A_c = 490.00 \text{ cm}^2$$

$$A_c = b_w h$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$A_{s,max}$: Taxa de armação limite.

$$A_{s,max} = 19.60 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 0,04 A_c$$

$\rho_{s,total}$: Taxa total de armação longitudinal fornecida.

$$\rho_{s,total} = 0.744\%$$

2.4.3 Armadura transversal mínima (NBR 6118:2026, 17.4.1.1.1)

Armadura transversal crítica obtida na posição 4,15 m.

$$\rho_{sw} \geq \rho_{sw,min}$$

$$0.00156 \geq 0.00085 \quad \checkmark$$

A taxa de armação transversal no trecho não deve ser inferior à mínima estabelecida.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \sin \alpha} \geq 0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}}$$

ρ_{sw} : Taxa de armadura transversal fornecida.

$$\rho_{sw} = 0.00156$$

$\rho_{sw,min}$: Taxa de armadura transversal mínima.

$$\rho_{sw,min} = 0.00085$$

$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$(A_{sw}/s)_{min}$: Armação transversal mínima.

$$(A_{sw}/s)_{min} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$$

A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.

$$\alpha = 90^\circ$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.

$$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$$

2.4.4 Detalhamento de estribos (NBR 6118:2026, 18.3.3.2)

Armadura transversal crítica obtida na posição 9,50 m.

$$\varphi_{sw,min} \leq \varphi_{sw} \leq \varphi_{sw,max}$$

$$5.00 \text{ mm} \leq 5.00 \text{ mm} \leq 14.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$s \leq s_{max}$$

$$18.00 \text{ cm} \leq 18.90 \text{ cm} \quad \checkmark$$

O diâmetro dos estribos e seus espaçamentos no trecho não devem violar os limites estabelecidos.

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,min}$: Diâmetro mínimo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,min} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,max}$: Diâmetro máximo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,max} = 14.00 \text{ mm}$
n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
s_{max} : Limite longitudinal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{max} = 18.90 \text{ cm}$
$s_{max} = \min(0,6d, 30 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,67V_{Rd2}$
$s_{max} = \min(0,3d, 20 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,67V_{Rd2}$
s_t : Espaçamento transversal entre ramos sucessivos.	$s_t = 8.50 \text{ cm}$
$s_{t,max}$: Limite transversal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{t,max} = 31.50 \text{ cm}$
$s_{t,max} = \min(d, 80 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,20V_{Rd2}$
$s_{t,max} = \min(0,6d, 35 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,20V_{Rd2}$
V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 33.77 \text{ kN}$
V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.	$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s,cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s,cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s,cg} = 3.50 \text{ cm}$

2.4.5 Espaçamento livre entre barras longitudinais (NBR 6118:2026, 18.3.2.2)

Menor espaçamento horizontal livre entre barras longitudinais obtido na posição 6,15 m, face inferior, camada 1.

$$a_{h,prov} \geq a_{h,min}$$

$$26.00 \text{ mm} \geq 22.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A região de armação longitudinal mais congestionada do trecho deve garantir que o espaçamento horizontal livre entre barras seja maior ou igual que o mínimo estabelecido.

$a_{h,min} = \max(20 \text{ mm}; \varphi_l; 1,2 d_{agg})$	
$a_{h,prov}$: Menor espaçamento horizontal livre obtido.	$a_{h,prov} = 26.00 \text{ mm}$
$a_{h,min}$: Espaçamento horizontal livre mínimo exigido. Limite absoluto da norma.	$a_{h,min} = 22.80 \text{ mm}$
φ_l : Maior diâmetro das barras longitudinais no agrupamento analisado.	$\varphi_l = 10.00 \text{ mm}$
d_{agg} : Diâmetro máximo do agregado.	$d_{agg} = 19.00 \text{ mm}$
n_l : Quantidade de barras longitudinais ativas no agrupamento governante.	$n_l = 3$

2.4.6 Largura mínima da seção transversal da viga (NBR 6118:2026, 13.2.2)

Largura mínima da viga obtida na posição 4,15 m.

$$b_w \geq b_{w,min}$$

$$14.00 \text{ cm} \geq 10.00 \text{ cm} \quad \checkmark$$

A largura da viga deve ser no mínimo de 10 cm para vigas normais e 15 cm para trechos classificados como vigas-parede.

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

$b_{w,min}$: Largura mínima aplicável ao trecho.

$$b_{w,min} = 10.00 \text{ cm}$$

2.5 Verificações de Estado Limite de Serviço

2.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 4,30 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.182 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 18.96 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.182 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.198 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.182 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 316.22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 7.43 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 125467955 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_I : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_I = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01360$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 57.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 1.75 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento. $a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

2.5.2 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento positivo obtida na posição 6,74 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.076 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 11.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.076 \text{ mm}$$

$$w_k = \min \left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.076 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.113 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 196.44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 7.43 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 125467955 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01360$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 57.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 1.75 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 7.50 \text{ cm}$$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 3.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face inferior, camada 1.

2.5.3 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 9,50 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.188 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 19.65 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.188 \text{ mm}$$

$$w_k = \min \left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.213 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.188 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 327.76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 7.43 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 125467955 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01360$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 57.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 1.75 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

2.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha total visível crítica do Trecho 02 obtida na posição 6,89 m.

$$f_{vis,max} \leq f_{lim}$$

$$8.74 \text{ mm} \leq 20.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha visível máxima que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{vis,max} = \max_{x_i \leq x \leq x_f} |f_t(x)|$$

$$f_t(x) = f_0(x) + f_{dif}(x)$$

$f_t(x_{crit})$: Flecha total no tempo considerado.

$$f_t = 8.74 \text{ mm}$$

Continuação - Trecho 02 - 2.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

posição 6,89 m

$f_0(x_{crit})$: Flecha imediata.	$f_0 = 3.98 \text{ mm}$
$f_{dif}(x_{crit})$: Flecha diferida por fluência.	$f_{dif} = 4.77 \text{ mm}$
A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.	
$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.	$\alpha_f = 1.199$
Idades de carregamento consideradas no histórico.	28 d; 60 d; 360 d
A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .	
M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.	$M_a = 11.88 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_r : Momento de fissuração da seção transformada.	$M_r = 8.44 \text{ kN} \cdot \text{m}$
I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.	$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$
I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.	$I_{II} = 10903.85 \text{ cm}^4$
I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha.	$I_e = 19946.78 \text{ cm}^4$
$f_{vis,max}$: Flecha máxima.	$f_{vis,max} = 8.74 \text{ mm}$
x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão.	$x_{crit} = 6.89 \text{ m}$
L : Comprimento de referência do vão.	$L = 5.20 \text{ m}$
$f_{lim} = \frac{L}{250}$	
f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.	$f_{lim} = 20.80 \text{ mm}$

2.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha crítica atuante sob elemento não estrutural, após sua execução, no Trecho 02 obtida na posição 6,89 m.

$f_{a,max} \leq (L)/(500)$	$4.52 \text{ mm} \leq 10.40 \text{ mm}$	✓
$f_{a,max} \leq 10.00 \text{ mm}$	$4.52 \text{ mm} \leq 10.00 \text{ mm}$	✓

A flecha atuante sob elementos não estruturais, contada a partir da data de execução do elemento não estrutural, que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$f_{a,max} = \max_{x \in \Omega_a} f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x) $	
Ω_a : Trecho do vão ocupado por cargas permanentes construtivas aplicáveis.	4,15 m a 9,65 m
A idade de referência t_{ref} corresponde à carga permanente mais próxima da concretagem no vão adotada no cálculo: 60 dias após a concretagem.	
$f_a(x) = f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)$	
$f(t_{\infty}, x_{crit})$: Flecha visível máxima.	$f(t_{\infty}) = 8.74 \text{ mm}$
$f(t_{ref}, x_{crit})$: Flecha total existente na idade de referência.	$f(t_{ref}) = 4.22 \text{ mm}$
A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.	
$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.	$\alpha_f = 1.199$
Idades de carregamento consideradas no histórico.	28 d; 60 d; 360 d
A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .	
M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.	$M_a = 11.88 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_r : Momento de fissuração da seção transformada.	$M_r = 8.44 \text{ kN} \cdot \text{m}$
I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.	$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$
I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.	$I_{II} = 10903.85 \text{ cm}^4$

Continuação - Trecho 02 - 2.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)
posição 6,89 m

I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha. $I_e = 19946.78 \text{ cm}^4$

$f_{a,max}$: Flecha máxima atuante sob o elemento não estrutural. $f_{a,max} = 4.52 \text{ mm}$

x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão. $x_{crit} = 6.89 \text{ m}$

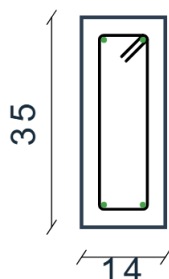
L : Comprimento de referência do vão. $L = 5.20 \text{ m}$

$$f_{lim} = \min\left(\frac{L}{500}; 10 \text{ mm}\right)$$

f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$$f_{lim} = 10.00 \text{ mm}$$

Viga 01 - Trecho 03



Posição Inicial	9.65 m
Posição Final	14.15 m
Comprimento	4.50 m
Cobrimento Superior	2.50 cm
Cobrimento Inferior	2.50 cm
Cobrimento Direito	2.50 cm
Cobrimento Esquerdo	2.50 cm

3.1 Verificações de Momento Fletor

3.1.1 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 26.06 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 24.17 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 24.17 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 26.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.04 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 5.21 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

3.1.2 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 11,91 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 13.58 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.	$M_{Sd} = 13.58 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.	$M_{Rd} = 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$
$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$	
A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.	$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$
x : Profundidade da linha neutra.	$x = 4.02 \text{ cm}$
$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$	
η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.	$\eta_c = 1.000$
$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$	
b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.	$b_w = 14.00 \text{ cm}$
f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.	$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.	$\gamma_c = 1.40$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

3.1.3 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 14,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 11.46 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 11.46 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$$

f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.

$$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.

$$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$$

γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.

$$\gamma_s = 1.15$$

3.2 Verificações de Força Cortante

3.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad 29.44 \text{ kN} \leq 191.36 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, a segurança da biela comprimida do concreto frente à ruptura por compressão diagonal da alma.

Continuação - Trecho 03 - 3.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Força cortante — posição 9,80 m

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 29.44 \text{ kN}$
V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.	$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$
$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$	
α_{v2} : Fator de redução da biela comprimida do concreto.	$\alpha_{v2} = 0.900$
$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$	
b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.	$b_w = 14.00 \text{ cm}$
f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.	$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$

3.2.2 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2b - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad 29.44 \text{ kN} \leq 60.84 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, se a resistência ao cisalhamento fornecida pela contribuição do concreto e da armadura transversal é suficiente para a solicitação.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 29.44 \text{ kN}$
V_{Rd3} : Resistência de cálculo à força cortante no Modelo I.	$V_{Rd3} = 60.84 \text{ kN}$
$V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$	
V_c : Contribuição do concreto na resistência ao esforço cortante	$V_c = 33.93 \text{ kN}$
$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$	
f_{ctd} : Resistência de cálculo à tração do concreto.	$f_{ctd} = 1.28 \text{ MPa}$
$f_{ctd} = \frac{f_{ctk, inf}}{\gamma_c}$	
$f_{ctk, inf}$: Resistência característica inferior à tração do concreto.	$f_{ctk, inf} = 1.80 \text{ MPa}$
γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.	$\gamma_c = 1.40$
V_{sw} : Contribuição da armadura transversal na resistência ao esforço cortante	$V_{sw} = 26.90 \text{ kN}$
$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)$	
α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.	$\alpha = 90^\circ$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$

A_{sw} : Área de aço de um estribo	$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$
$A_{sw} = n \cdot \frac{\pi \phi_{sw}^2}{4}$	
n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
ϕ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\phi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.	$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$
f_{ywd} : Resistência de cálculo do aço da armadura transversal.	$f_{ywd} = 435.00 \text{ MPa}$
$f_{ywd} = \min(\frac{f_{ywk}}{\gamma_s}; 435 \text{ MPa})$	
f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.	$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

3.3 Verificações de Ductilidade

3.3.1 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.165 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.165$

x : Profundidade da linha neutra.

$x = 5.21 \text{ cm}$

d : Altura útil da seção.

$d = 31.50 \text{ cm}$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$(x/d)_{lim} = 0.45$

3.3.2 Limite de redistribuição de momentos (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Redistribuição crítica de momento negativo obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$\delta \geq 0.75 \quad 0.864 \geq 0.750 \quad \checkmark$$

A proporção efetiva entre o momento negativo de dimensionamento e o momento elástico de referência não deve ser inferior a 0,75. Essa proporção considera a redução decorrente dos vínculos rotacionais adotados nos apoios e a redistribuição nominal de momentos. Caso esse limite não seja atendido, e não seja feita verificação explícita da capacidade de rotação plástica, a posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, no momento positivo, não deve ser superior 0,25. Considera-se que a análise plástica é naturalmente aprovada quando as demais verificações deste trecho no memorial são atendidas.

$$\delta = \frac{|M_{Sd,red}|}{|M_{el}|} M_{Sd,red} = \delta M_{el} = 0.864 \cdot 27.99 \text{ kN} \cdot \text{m} = 24.17 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

δ : Coeficiente efetivo de redistribuição calculado no momento negativo.

$\delta = 0.864$

δ_{lim} : Coeficiente de redistribuição limite.

$\delta_{lim} = 0.750$

$M_{Sd,red}$: Momento negativo redistribuído.

$M_{Sd,red} = 24.17 \text{ kN} \cdot \text{m}$

M_{el} : Momento elástico de referência.

$M_{el} = 27.99 \text{ kN} \cdot \text{m}$

3.3.3 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 11,91 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.128 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.128$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0.45$$

3.3.4 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 14,00 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim} \quad 0.128 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil. $x/d = 0.128$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0.45$$

3.4 Verificações de Detalhamento

3.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal de tração crítica obtida na posição 9,65 m, na face inferior da viga.

$$A_{s,prov,bruta} \geq A_{s,min} \quad 1.57 \text{ cm}^2 \geq 0.74 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A armadura longitudinal mínima no ponto de menor área bruta de aço da face tracionada deve ser igual ou maior que a armação necessária calculada com base no momento mínimo para dimensionamento da seção.

$$M_{d,min} = 0.8 W_0 f_{ctk,sup}$$

$M_{d,min}$: Momento fletor mínimo de dimensionamento.

$$M_{d,min} = 7.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_0 = \frac{b_w h^2}{6}$$

W_0 : Módulo de resistência da seção de concreto.

$$W_0 = 2858333 \text{ mm}^3$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$f_{ctk,sup}$: Resistência característica superior do concreto à tração.

$$f_{ctk,sup} = 3.33 \text{ MPa}$$

$A_{s,Mdmin}$: Armadura tracionada necessária para $M_{d,min}$.

$$A_{s,Mdmin} = 0.57 \text{ cm}^2$$

$A_{s,0.15\%}$: Taxa de armação mínima.

$$A_{s,0.15\%} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,0.15\%} = 0.0015 b_w h$$

$A_{s,min}$: Armação mínima necessária.

$$A_{s,min} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = \max(A_{s,Mdmin}; A_{s,0.15\%})$$

Continuação - Trecho 03 - 3.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal — posição 9,65 m

$A_{s,prov,bruta}$: Armadura longitudinal bruta na face tracionada da seção.

$$A_{s,prov,bruta} = 1.57 \text{ cm}^2$$

$\rho_{s,prov}$: Taxa longitudinal fornecida na face tracionada.

$$\rho_{s,prov} = 0.321\%$$

3.4.2 Armadura longitudinal máxima (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.4)

Armadura longitudinal crítica obtida na posição 9,80 m.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

$$3.64 \text{ cm}^2 \leq 19.60 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A soma das armaduras longitudinais de tração e compressão na seção não deve ultrapassar 4% da área bruta de concreto.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 2.07 \text{ cm}^2$$

A'_s : Área de aço longitudinal comprimida.

$$A'_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

$A_s + A'_s$: Área de aço total fornecida.

$$A_s + A'_s = 3.64 \text{ cm}^2$$

A_c : Área bruta da seção transversal de concreto.

$$A_c = 490.00 \text{ cm}^2$$

$$A_c = b_w h$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$A_{s,max}$: Taxa de armação limite.

$$A_{s,max} = 19.60 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 0,04 A_c$$

$\rho_{s,total}$: Taxa total de armação longitudinal fornecida.

$$\rho_{s,total} = 0.744\%$$

3.4.3 Armadura transversal mínima (NBR 6118:2026, 17.4.1.1.1)

Armadura transversal crítica obtida na posição 9,65 m.

$$\rho_{sw} \geq \rho_{sw,min}$$

$$0.00156 \geq 0.00085 \quad \checkmark$$

A taxa de armação transversal no trecho não deve ser inferior à mínima estabelecida.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \sin \alpha} \geq 0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}}$$

ρ_{sw} : Taxa de armadura transversal fornecida.

$$\rho_{sw} = 0.00156$$

$\rho_{sw,min}$: Taxa de armadura transversal mínima.

$$\rho_{sw,min} = 0.00085$$

$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$(A_{sw}/s)_{min}$: Armação transversal mínima.

$$(A_{sw}/s)_{min} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$$

A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.

$$\alpha = 90^\circ$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.

$$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$$

3.4.4 Detalhamento de estribos (NBR 6118:2026, 18.3.3.2)

Armadura transversal crítica obtida na posição 9,80 m.

$$\varphi_{sw,min} \leq \varphi_{sw} \leq \varphi_{sw,max} \quad 5.00 \text{ mm} \leq 5.00 \text{ mm} \leq 14.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$s \leq s_{max} \quad 18.00 \text{ cm} \leq 18.90 \text{ cm} \quad \checkmark$$

O diâmetro dos estribos e seus espaçamentos no trecho não devem violar os limites estabelecidos.

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,min}$: Diâmetro mínimo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,min} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,max}$: Diâmetro máximo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,max} = 14.00 \text{ mm}$
n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
s_{max} : Limite longitudinal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{max} = 18.90 \text{ cm}$
$s_{max} = \min(0,6d, 30 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,67V_{Rd2}$
$s_{max} = \min(0,3d, 20 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,67V_{Rd2}$
s_t : Espaçamento transversal entre ramos sucessivos.	$s_t = 8.50 \text{ cm}$
$s_{t,max}$: Limite transversal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{t,max} = 31.50 \text{ cm}$
$s_{t,max} = \min(d, 80 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,20V_{Rd2}$
$s_{t,max} = \min(0,6d, 35 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,20V_{Rd2}$
V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 29.44 \text{ kN}$
V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.	$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s,cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s,cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s,cg} = 3.50 \text{ cm}$

3.4.5 Espaçamento livre entre barras longitudinais (NBR 6118:2026, 18.3.2.2)

Menor espaçamento horizontal livre entre barras longitudinais obtido na posição 9,50 m, face superior, camada 1.

$$a_{h,prov} \geq a_{h,min} \quad 26.00 \text{ mm} \geq 22.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A região de armação longitudinal mais congestionada do trecho deve garantir que o espaçamento horizontal livre entre barras seja maior ou igual que o mínimo estabelecido.

$a_{h,min} = \max(20 \text{ mm}; \varphi_l; 1,2 d_{agg})$	
$a_{h,prov}$: Menor espaçamento horizontal livre obtido.	$a_{h,prov} = 26.00 \text{ mm}$
$a_{h,min}$: Espaçamento horizontal livre mínimo exigido. Limite absoluto da norma.	$a_{h,min} = 22.80 \text{ mm}$
φ_l : Maior diâmetro das barras longitudinais no agrupamento analisado.	$\varphi_l = 10.00 \text{ mm}$
d_{agg} : Diâmetro máximo do agregado.	$d_{agg} = 19.00 \text{ mm}$
n_l : Quantidade de barras longitudinais ativas no agrupamento governante.	$n_l = 3$

3.4.6 Largura mínima da seção transversal da viga (NBR 6118:2026, 13.2.2)

Largura mínima da viga obtida na posição 9,65 m.

$$b_w \geq b_{w,min}$$

$$14.00 \text{ cm} \geq 10.00 \text{ cm} \quad \checkmark$$

A largura da viga deve ser no mínimo de 10 cm para vigas normais e 15 cm para trechos classificados como vigas-parede.

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

$b_{w,min}$: Largura mínima aplicável ao trecho.

$$b_{w,min} = 10.00 \text{ cm}$$

3.5 Verificações de Estado Limite de Serviço

3.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 9,80 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.143 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 16.13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.143 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.143 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.155 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 269.14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 7.43 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 125467955 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_I : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_I = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01360$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 57.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 1.75 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

Continuação - Trecho 03 - 3.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Momento negativo — posição 9,80 m

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento. $a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

3.5.2 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)**Abertura crítica de fissura por momento positivo obtida na posição 11,91 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".**

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.056 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

 M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 7.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

 w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.056 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

 $w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.056 \text{ mm}$$

 $w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.124 \text{ mm}$$

 σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 168.14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

 α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

 x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 6.58 \text{ cm}$$

 I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$$

 d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

 φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

 η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

 E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

 f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

 ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01020$$

 A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

 a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

 a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$$

 a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 7.50 \text{ cm}$$

 a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 3.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face inferior, camada 1.

3.5.3 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 14,00 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.079 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 9.16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.079 \text{ mm}$$

$$w_k = \min \left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.079 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.148 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 200.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 6.58 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01020$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento.

$$a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

3.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha total visível crítica do Trecho 03 obtida na posição 12,06 m.

$$f_{vis,max} \leq f_{lim}$$

$$1.87 \text{ mm} \leq 16.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha visível máxima que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{vis,max} = \max_{x_i \leq x \leq x_f} |f_t(x)|$$

$$f_t(x) = f_0(x) + f_{dif}(x)$$

$f_t(x_{crit})$: Flecha total no tempo considerado.

$$f_t = 1.87 \text{ mm}$$

Continuação - Trecho 03 - 3.5.4 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

posição 12,06 m

$f_0(x_{crit})$: Flecha imediata.	$f_0 = 0.84 \text{ mm}$
$f_{dif}(x_{crit})$: Flecha diferida por fluência.	$f_{dif} = 1.03 \text{ mm}$
A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.	
$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.	$\alpha_f = 1.233$
Idades de carregamento consideradas no histórico.	28 d; 60 d; 360 d
A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .	
M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.	$M_a = 7.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_r : Momento de fissuração da seção transformada.	$M_r = 8.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$
I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.	$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$
I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.	$I_{II} = 8601.73 \text{ cm}^4$
I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha.	$I_e = 40149.13 \text{ cm}^4$
$f_{vis,max}$: Flecha máxima.	$f_{vis,max} = 1.87 \text{ mm}$
x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão.	$x_{crit} = 12.06 \text{ m}$
L : Comprimento de referência do vão.	$L = 4.20 \text{ m}$
$f_{lim} = \frac{L}{250}$	
f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.	$f_{lim} = 16.80 \text{ mm}$

3.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha crítica atuante sob elemento não estrutural, após sua execução, no Trecho 03 obtida na posição 12,06 m.

$f_{a,max} \leq (L)/(500)$	$0.94 \text{ mm} \leq 8.40 \text{ mm}$	✓
$f_{a,max} \leq 10.00 \text{ mm}$	$0.94 \text{ mm} \leq 10.00 \text{ mm}$	✓

A flecha atuante sob elementos não estruturais, contada a partir da data de execução do elemento não estrutural, que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$f_{a,max} = \max_{x \in \Omega_a} f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x) $	
Ω_a : Trecho do vão ocupado por cargas permanentes construtivas aplicáveis.	9,65 m a 14,15 m
A idade de referência t_{ref} corresponde à carga permanente mais próxima da concretagem no vão adotada no cálculo: 60 dias após a concretagem.	
$f_a(x) = f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)$	
$f(t_{\infty}, x_{crit})$: Flecha visível máxima.	$f(t_{\infty}) = 1.87 \text{ mm}$
$f(t_{ref}, x_{crit})$: Flecha total existente na idade de referência.	$f(t_{ref}) = 0.93 \text{ mm}$
A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.	
$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.	$\alpha_f = 1.233$
Idades de carregamento consideradas no histórico.	28 d; 60 d; 360 d
A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .	
M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.	$M_a = 7.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_r : Momento de fissuração da seção transformada.	$M_r = 8.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$
I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.	$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$
I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.	$I_{II} = 8601.73 \text{ cm}^4$

Continuação - Trecho 03 - 3.5.5 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

posição 12,06 m

I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha. $I_e = 40149.13 \text{ cm}^4$

$f_{a,max}$: Flecha máxima atuante sob o elemento não estrutural. $f_{a,max} = 0.94 \text{ mm}$

x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão. $x_{crit} = 12.06 \text{ m}$

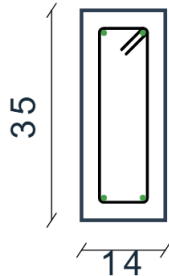
L : Comprimento de referência do vão. $L = 4.20 \text{ m}$

$$f_{lim} = \min\left(\frac{L}{500}; 10 \text{ mm}\right)$$

f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$$f_{lim} = 8.40 \text{ mm}$$

Viga 01 - Trecho 04



Posição Inicial	14.15 m
Posição Final	15.15 m
Comprimento	1.00 m
Cobrimento Superior	2.50 cm
Cobrimento Inferior	2.50 cm
Cobrimento Direito	2.50 cm
Cobrimento Esquerdo	2.50 cm

4.1 Verificações de Momento Fletor

4.1.1 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 14,25 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 22.12 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 11.14 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} = 11.14 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = 22.12 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$$

A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$$

η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.

$$\eta_c = 1.000$$

$$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \quad \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 34.00 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

4.1.2 Condição analítica de segurança - Resistência à flexão (NBR 6118:2026, 12.5.2, 17.2.2 e 8.2.10.1)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 14,94 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq 0.03 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

Conforme a condição analítica de segurança, a resistência de cálculo não pode ser menor que a solicitação de cálculo.

M_{Sd} : Momento solicitante de cálculo.	$M_{Sd} = 0.03 \text{ kN} \cdot \text{m}$
M_{Rd} : Momento resistente de cálculo.	$M_{Rd} = 20.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$
$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x)$	
A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.	$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$
x : Profundidade da linha neutra.	$x = 4.02 \text{ cm}$
$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot \eta_c \cdot b_w \cdot f_{cd}}$	
η_c : Coeficiente de fragilidade conforme NBR 6118:2026, 8.2.10.1.	$\eta_c = 1.000$
$\eta_c = 1,0 \text{ (} f_{ck} \leq 40 \text{ MPa)}; \eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \text{ (} f_{ck} > 40 \text{ MPa)}$	
b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.	$b_w = 14.00 \text{ cm}$
f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.	$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	
f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.	$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$
γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.	$\gamma_c = 1.40$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s, cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$
f_{yd} : Resistência de cálculo do aço.	$f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	
f_{yk} : Resistência característica do aço da armadura tracionada.	$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$
γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.	$\gamma_s = 1.15$

4.2 Verificações de Força Cortante

4.2.1 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2a - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 14,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad 10.98 \text{ kN} \leq 191.36 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, a segurança da biela comprimida do concreto frente à ruptura por compressão diagonal da alma.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} = 10.98 \text{ kN}$$

V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.

$$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

α_{v2} : Fator de redução da biela comprimida do concreto.

$$\alpha_{v2} = 0.900$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

f_{cd} : Resistência de cálculo do concreto.

$$f_{cd} = 17.86 \text{ MPa}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$$

4.2.2 Condição analítica de segurança - Resistência ao cisalhamento (NBR 6118:2026, 17.4.2.1 e 17.4.2.2b - Modelo I)

Solicitação crítica de força cortante obtida na posição 14,30 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad 10.98 \text{ kN} \leq 60.84 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Verifica-se, na seção crítica, se a resistência ao cisalhamento fornecida pela contribuição do concreto e da armadura transversal é suficiente para a solicitação.

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} = 10.98 \text{ kN}$$

V_{Rd3} : Resistência de cálculo à força cortante no Modelo I.

$$V_{Rd3} = 60.84 \text{ kN}$$

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

V_c : Contribuição do concreto na resistência ao esforço cortante

$$V_c = 33.93 \text{ kN}$$

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$$

f_{ctd} : Resistência de cálculo à tração do concreto.

$$f_{ctd} = 1.28 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk, inf}}{\gamma_c}$$

$f_{ctk, inf}$: Resistência característica inferior à tração do concreto.

$$f_{ctk, inf} = 1.80 \text{ MPa}$$

γ_c : Coeficiente parcial de segurança do concreto.

$$\gamma_c = 1.40$$

V_{sw} : Contribuição da armação transversal na resistência ao esforço cortante

$$V_{sw} = 26.90 \text{ kN}$$

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

α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.

$$\alpha = 90^\circ$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

$$d = h - a_{s, cg}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$a_{s, cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.

$$a_{s, cg} = 3.50 \text{ cm}$$

A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

$$A_{sw} = n \cdot \frac{\pi \varphi_{sw}^2}{4}$$

n : Quantidade de ramos do estribo.

$$n = 2$$

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.

$$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$$

s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

$(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

f_{ywd} : Resistência de cálculo do aço da armadura transversal.

$$f_{ywd} = 435.00 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd} = \min \left(\frac{f_{ywk}}{\gamma_s}; 435 \text{ MPa} \right)$$

f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.

$$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$$

γ_s : Coeficiente parcial de segurança do aço.

$$\gamma_s = 1.15$$

4.3 Verificações de Ductilidade

4.3.1 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor negativo obtida na posição 14,25 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim}$$

$$0.118 \leq 0.450$$



A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil.

$$x/d = 0.118$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 34.00 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0,45$$

4.3.2 Limite de redistribuição de momentos (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Redistribuição crítica de momento negativo obtida na posição 14,25 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$\delta \geq 0,75$$

$$0.873 \geq 0.750 \quad \checkmark$$

A proporção efetiva entre o momento negativo de dimensionamento e o momento elástico de referência não deve ser inferior a 0,75. Essa proporção considera a redução decorrente dos vínculos rotacionais adotados nos apoios e a redistribuição nominal de momentos. Caso esse limite não seja atendido, e não seja feita verificação explícita da capacidade de rotação plástica, a posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, no momento positivo, não deve ser superior 0,25. Considera-se que a análise plástica é naturalmente aprovada quando as demais verificações deste trecho no memorial são atendidas.

$$\delta = \frac{|M_{Sd,red}|}{|M_{el}|} M_{Sd,red} = \delta M_{el} = 0.873 \cdot 12.75 \text{ kN} \cdot \text{m} = 11.14 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

δ : Coeficiente efetivo de redistribuição calculado no momento negativo.

$$\delta = 0.873$$

δ_{lim} : Coeficiente de redistribuição limite.

$$\delta_{lim} = 0.750$$

$M_{Sd,red}$: Momento negativo redistribuído.

$$M_{Sd,red} = 11.14 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_{el} : Momento elástico de referência.

$$M_{el} = 12.75 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4.3.3 Profundidade limite da linha neutra (NBR 6118:2026, 14.6.4.3)

Solicitação crítica de momento fletor positivo obtida na posição 14,94 m, para a combinação "ELU Normal 01".

$$x/d \leq (x/d)_{lim}$$

$$0.128 \leq 0.450 \quad \checkmark$$

A posição da linha neutra no ELU em relação a sua altura útil, para preservar a capacidade de rotação e o comportamento dúctil da seção, não deve ser superior a 0,45.

x/d : Relação entre a profundidade da linha neutra e a altura útil.

$$x/d = 0.128$$

x : Profundidade da linha neutra.

$$x = 4.02 \text{ cm}$$

d : Altura útil da seção.

$$d = 31.50 \text{ cm}$$

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = 25.00 \text{ MPa}$$

$(x/d)_{lim}$: Proporção limite da relação x/d .

$$(x/d)_{lim} = 0.45$$

4.4 Verificações de Detalhamento

4.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal de tração crítica obtida na posição 14,15 m, na face inferior da viga.

$$A_{s,prov,bruta} \geq A_{s,min}$$

$$1.57 \text{ cm}^2 \geq 0.74 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A armadura longitudinal mínima no ponto de menor área bruta de aço da face tracionada deve ser igual ou maior que a armação necessária calculada com base no momento mínimo para dimensionamento da seção.

$$M_{d,min} = 0,8 W_0 f_{ctk,sup}$$

$M_{d,min}$: Momento fletor mínimo de dimensionamento.

$$M_{d,min} = 7.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_0 = \frac{b_w h^2}{6}$$

W_0 : Módulo de resistência da seção de concreto.

$$W_0 = 2858333 \text{ mm}^3$$

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

$f_{ctk,sup}$: Resistência característica superior do concreto à tração.

$$f_{ctk,sup} = 3.33 \text{ MPa}$$

$A_{s,Mdmin}$: Armadura tracionada necessária para $M_{d,min}$.

$$A_{s,Mdmin} = 0.57 \text{ cm}^2$$

Continuação - Trecho 04 - 4.4.1 Armadura longitudinal mínima de tração (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.1)

Armadura longitudinal — posição 14,15 m

 $A_{s,0.15\%}$: Taxa de armação mínima.

$$A_{s,0.15\%} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,0.15\%} = 0,0015 b_w h$$

 $A_{s,min}$: Armação mínima necessária.

$$A_{s,min} = 0.74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = \max(A_{s,Mdmin}; A_{s,0.15\%})$$

 $A_{s,prov,bruta}$: Armadura longitudinal bruta na face tracionada da seção.

$$A_{s,prov,bruta} = 1.57 \text{ cm}^2$$

 $\rho_{s,prov}$: Taxa longitudinal fornecida na face tracionada.

$$\rho_{s,prov} = 0.321\%$$

4.4.2 Armadura longitudinal máxima (NBR 6118:2026, 17.3.5.2.4)

Armadura longitudinal crítica obtida na posição 14,25 m.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

$$3.14 \text{ cm}^2 \leq 19.60 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

A soma das armaduras longitudinais de tração e compressão na seção não deve ultrapassar 4% da área bruta de concreto.

$$A_s + A'_s \leq 0,04 A_c$$

 A_s : Área de aço longitudinal tracionada considerada.

$$A_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

 A'_s : Área de aço longitudinal comprimida.

$$A'_s = 1.57 \text{ cm}^2$$

 $A_s + A'_s$: Área de aço total fornecida.

$$A_s + A'_s = 3.14 \text{ cm}^2$$

 A_c : Área bruta da seção transversal de concreto.

$$A_c = 490.00 \text{ cm}^2$$

$$A_c = b_w h$$

 b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

 h : Altura total da seção.

$$h = 35.00 \text{ cm}$$

 $A_{s,max}$: Taxa de armação limite.

$$A_{s,max} = 19.60 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,max} = 0,04 A_c$$

 $\rho_{s,total}$: Taxa total de armação longitudinal fornecida.

$$\rho_{s,total} = 0.641\%$$

4.4.3 Armadura transversal mínima (NBR 6118:2026, 17.4.1.1.1)

Armadura transversal crítica obtida na posição 14,15 m.

$$\rho_{sw} \geq \rho_{sw,min}$$

$$0.00156 \geq 0.00085 \quad \checkmark$$

A taxa de armação transversal no trecho não deve ser inferior à mínima estabelecida.

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s \sin \alpha} \geq 0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}}$$

 ρ_{sw} : Taxa de armadura transversal fornecida.

$$\rho_{sw} = 0.00156$$

 $\rho_{sw,min}$: Taxa de armadura transversal mínima.

$$\rho_{sw,min} = 0.00085$$

 $(A_{sw}/s)_{prov}$: Área de aço transversal fornecida por unidade de comprimento.

$$(A_{sw}/s)_{prov} = 2.18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

 $(A_{sw}/s)_{min}$: Armação transversal mínima.

$$(A_{sw}/s)_{min} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$$

 A_{sw} : Área de aço de um estribo

$$A_{sw} = 0.39 \text{ cm}^2$$

 s : Espaçamento longitudinal entre estribos.

$$s = 18.00 \text{ cm}$$

 b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

 α : Inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal.

$$\alpha = 90^\circ$$

 f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

 f_{ywk} : Resistência característica do aço da armadura transversal.

$$f_{ywk} = 600.00 \text{ MPa}$$

4.4.4 Detalhamento de estribos (NBR 6118:2026, 18.3.3.2)

Armadura transversal crítica obtida na posição 14,30 m.

$$\varphi_{sw,min} \leq \varphi_{sw} \leq \varphi_{sw,max}$$

$$5.00 \text{ mm} \leq 5.00 \text{ mm} \leq 14.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$s \leq s_{max}$$

$$18.00 \text{ cm} \leq 18.90 \text{ cm} \quad \checkmark$$

O diâmetro dos estribos e seus espaçamentos no trecho não devem violar os limites estabelecidos.

φ_{sw} : Diâmetro da barra do estribo.	$\varphi_{sw} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,min}$: Diâmetro mínimo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,min} = 5.00 \text{ mm}$
$\varphi_{sw,max}$: Diâmetro máximo normativo do estribo.	$\varphi_{sw,max} = 14.00 \text{ mm}$
n : Quantidade de ramos do estribo.	$n = 2$
s : Espaçamento longitudinal entre estribos.	$s = 18.00 \text{ cm}$
s_{max} : Limite longitudinal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{max} = 18.90 \text{ cm}$
$s_{max} = \min(0,6d, 30 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,67V_{Rd2}$
$s_{max} = \min(0,3d, 20 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,67V_{Rd2}$
s_t : Espaçamento transversal entre ramos sucessivos.	$s_t = 8.50 \text{ cm}$
$s_{t,max}$: Limite transversal em função de V_{Sd}/V_{Rd2} e da altura útil.	$s_{t,max} = 31.50 \text{ cm}$
$s_{t,max} = \min(d, 80 \text{ cm})$	$V_{Sd} \leq 0,20V_{Rd2}$
$s_{t,max} = \min(0,6d, 35 \text{ cm})$	$V_{Sd} > 0,20V_{Rd2}$
V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.	$V_{Sd} = 10.98 \text{ kN}$
V_{Rd2} : Força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas.	$V_{Rd2} = 191.36 \text{ kN}$
d : Altura útil da seção.	$d = 31.50 \text{ cm}$
$d = h - a_{s,cg}$	
h : Altura total da seção.	$h = 35.00 \text{ cm}$
$a_{s,cg}$: Distância da face tracionada ao centro de gravidade da armadura tracionada.	$a_{s,cg} = 3.50 \text{ cm}$

4.4.5 Espaçamento livre entre barras longitudinais (NBR 6118:2026, 18.3.2.2)

Menor espaçamento horizontal livre entre barras longitudinais obtido na posição 14,00 m, face inferior, camada 1.

$$a_{h,prov} \geq a_{h,min}$$

$$60.00 \text{ mm} \geq 22.80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A região de armação longitudinal mais congestionada do trecho deve garantir que o espaçamento horizontal livre entre barras seja maior ou igual que o mínimo estabelecido.

$a_{h,min} = \max(20 \text{ mm}; \varphi_l; 1,2 d_{agg})$	
$a_{h,prov}$: Menor espaçamento horizontal livre obtido.	$a_{h,prov} = 60.00 \text{ mm}$
$a_{h,min}$: Espaçamento horizontal livre mínimo exigido. Limite absoluto da norma.	$a_{h,min} = 22.80 \text{ mm}$
φ_l : Maior diâmetro das barras longitudinais no agrupamento analisado.	$\varphi_l = 10.00 \text{ mm}$
d_{agg} : Diâmetro máximo do agregado.	$d_{agg} = 19.00 \text{ mm}$
n_l : Quantidade de barras longitudinais ativas no agrupamento governante.	$n_l = 2$

4.4.6 Largura mínima da seção transversal da viga (NBR 6118:2026, 13.2.2)

Largura mínima da viga obtida na posição 14,15 m.

$$b_w \geq b_{w,min}$$

$$14.00 \text{ cm} \geq 10.00 \text{ cm} \quad \checkmark$$

A largura da viga deve ser no mínimo de 10 cm para vigas normais e 15 cm para trechos classificados como vigas-parede.

b_w : Largura da alma da seção retangular de concreto.

$$b_w = 14.00 \text{ cm}$$

$b_{w,min}$: Largura mínima aplicável ao trecho.

$$b_{w,min} = 10.00 \text{ cm}$$

4.5 Verificações de Estado Limite de Serviço

4.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Abertura crítica de fissura por momento negativo obtida na posição 14,25 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.016 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 4.16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.016 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_I} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

$w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.016 \text{ mm}$$

$w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.067 \text{ mm}$$

σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 90.80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = 8.696$$

x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II.

$$x_{II} = 6.58 \text{ cm}$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada.

$$I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$$

d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada.

$$d_i = 31.50 \text{ cm}$$

φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada.

$$\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$$

η_I : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2.

$$\eta_I = 2.25 \text{ (CA50)}$$

E_{si} : Módulo de elasticidade do aço.

$$E_{si} = 210000 \text{ MPa}$$

f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto.

$$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$$

ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento.

$$\rho_{ri} = 0.01020$$

A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra.

$$A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento.

$$a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento.

$$a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento.

$$a_{sup} = 3.50 \text{ cm}$$

Continuação - Trecho 04 - 4.5.1 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)

Momento negativo — posição 14,25 m

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento. $a_{inf} = 7.50 \text{ cm}$

Barra verificada.

Face superior, camada 1.

4.5.2 Limite de abertura característica de fissuras (NBR 6118:2026, Figura 17.3 e 8.3.2)**Abertura crítica de fissura por momento positivo obtida na posição 14,94 m, para a combinação "ELS Quase Permanente".**

$$w_k \leq w_{lim}$$

$$0.000 \text{ mm} \leq 0.30 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A seção de momento fletor crítico, considerando somente a barra longitudinal com maior tensão de tração calculada no Estádio II, deve não gerar fissuras com abertura superior ao limite máximo admissível.

 M_{ser} : Momento fletor de serviço.

$$M_{ser} = 0.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

 w_k : Abertura de fissura.

$$w_k = 0.000 \text{ mm}$$

$$w_k = \min\left(\frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}}, \frac{\varphi_i}{12,5\eta_l} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45\right)\right)$$

 $w_{k,1}$: Abertura de fissura 01.

$$w_{k,1} = 0.000 \text{ mm}$$

 $w_{k,2}$: Abertura de fissura 02.

$$w_{k,2} = 0.000 \text{ mm}$$

 σ_{si} : Tensão de tração na barra analisada, no Estádio II.

$$\sigma_{si} = 0.00 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{si} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d_i - x_{II})}{I_{II}}$$

α_e : Relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto. $\alpha_e = 8.696$

 x_{II} : Profundidade da linha neutra no Estádio II. $x_{II} = 6.58 \text{ cm}$ I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada transformada. $I_{II} = 99265501 \text{ mm}^4$ d_i : Distância da face comprimida ao centro da barra analisada. $d_i = 31.50 \text{ cm}$ φ_i : Diâmetro da barra longitudinal analisada. $\varphi_i = 10.00 \text{ mm}$ η_l : Coeficiente de aderência da categoria do aço conforme NBR 6118:2026, 8.3.2. $\eta_l = 2.25 \text{ (CA50)}$ E_{si} : Módulo de elasticidade do aço. $E_{si} = 210000 \text{ MPa}$ f_{ctm} : Resistência média à tração do concreto. $f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$ ρ_{ri} : Taxa da barra analisada em relação à área de envolvimento. $\rho_{ri} = 0.01020$ A_{cri} : Área retangular de envolvimento protegida pela barra. $A_{cri} = 77.00 \text{ cm}^2$

$$A_{cri} = (a_{esq} + a_{dir})(a_{sup} + a_{inf})$$

a_{esq} : Distância horizontal à esquerda considerada na área de envolvimento. $a_{esq} = 3.50 \text{ cm}$

a_{dir} : Distância horizontal à direita considerada na área de envolvimento. $a_{dir} = 3.50 \text{ cm}$

a_{sup} : Distância vertical superior considerada na área de envolvimento. $a_{sup} = 7.50 \text{ cm}$

a_{inf} : Distância vertical inferior considerada na área de envolvimento. $a_{inf} = 3.50 \text{ cm}$

Barra verificada.

Face inferior, camada 1.

4.5.3 Flecha visível total (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha total visível crítica do Trecho 04 obtida na posição 15,15 m.

$$f_{vis,max} \leq f_{lim} \quad 0.09 \text{ mm} \leq 8.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha visível máxima que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{vis,max} = \max_{x_i \leq x \leq x_f} |f_t(x)|$$

$$f_t(x) = f_0(x) + f_{dif}(x)$$

$f_t(x_{crit})$: Flecha total no tempo considerado.

$$f_t = 0.09 \text{ mm}$$

$f_0(x_{crit})$: Flecha imediata.

$$f_0 = 0.04 \text{ mm}$$

$f_{dif}(x_{crit})$: Flecha diferida por fluência.

$$f_{dif} = 0.05 \text{ mm}$$

A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.

$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.

$$\alpha_f = 1.243$$

Idades de carregamento consideradas no histórico.

$$28 \text{ d}; 60 \text{ d}; 360 \text{ d}$$

A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .

M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.

$$M_a = 0.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_r : Momento de fissuração da seção transformada.

$$M_r = 7.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.

$$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.

$$I_{II} = 3786.88 \text{ cm}^4$$

I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha.

$$I_e = 50020.83 \text{ cm}^4$$

$f_{vis,max}$: Flecha máxima.

$$f_{vis,max} = 0.09 \text{ mm}$$

x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão.

$$x_{crit} = 15.15 \text{ m}$$

L : Comprimento de referência do vão.

$$L = 2.00 \text{ m}$$

$$f_{lim} = \frac{L}{250}$$

f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$$f_{lim} = 8.00 \text{ mm}$$

4.5.4 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

Flecha crítica atuante sob elemento não estrutural, após sua execução, no Trecho 04 obtida na posição 15,15 m.

$$f_{a,max} \leq (L)/(500) \quad 0.05 \text{ mm} \leq 4.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$f_{a,max} \leq 10.00 \text{ mm} \quad 0.05 \text{ mm} \leq 10.00 \text{ mm} \quad \checkmark$$

A flecha atuante sob elementos não estruturais, contada a partir da data de execução do elemento não estrutural, que a viga irá desenvolver no seu ciclo de vida não deve ultrapassar o limite estabelecido.

$$f_{a,max} = \max_{x \in \Omega_a} |f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)|$$

Ω_a : Trecho do vão ocupado por cargas permanentes construtivas aplicáveis.

$$14,15 \text{ m a } 15,15 \text{ m}$$

A idade de referência t_{ref} corresponde à carga permanente mais próxima da concretagem no vão adotada no cálculo: 60 dias após a concretagem.

$$f_a(x) = f(t_{\infty}, x) - f(t_{ref}, x)$$

$f(t_{\infty}, x_{crit})$: Flecha visível máxima.

$$f(t_{\infty}) = 0.09 \text{ mm}$$

$f(t_{ref}, x_{crit})$: Flecha total existente na idade de referência.

$$f(t_{ref}) = 0.05 \text{ mm}$$

A fluência é considerada por histórico de idades. Em cada intervalo, a flecha diferida é obtida a partir do incremento de flecha imediata e do coeficiente $\lambda = \zeta(t_f) - \zeta(t_i)$.

$\alpha_f(x_{crit})$: Coeficiente equivalente de fluência no ponto crítico.

$$\alpha_f = 1.243$$

Continuação - Trecho 04 - 4.5.4 Flecha em elementos não estruturais - paredes (NBR 6118:2026, Tabela 13.3)

posição 15,15 m

Idades de carregamento consideradas no histórico.

28 d; 60 d; 360 d

A rigidez à flexão no ponto é calculada pela fórmula de Branson, com o módulo $E_c(t)$ e a inércia I_e , usando M_r , M_a , I_b e I_{II} .

M_a : Momento fletor atuante adotado para Branson.

$$M_a = 0.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

M_r : Momento de fissuração da seção transformada.

$$M_r = 7.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

I_b : Momento de inércia bruto da seção de concreto.

$$I_b = 50020.83 \text{ cm}^4$$

I_{II} : Momento de inércia da seção fissurada.

$$I_{II} = 3786.88 \text{ cm}^4$$

I_e : Momento de inércia equivalente usado na integração da flecha.

$$I_e = 50020.83 \text{ cm}^4$$

$f_{a,max}$: Flecha máxima atuante sob o elemento não estrutural.

$$f_{a,max} = 0.05 \text{ mm}$$

x_{crit} : Posição em que ocorre a flecha máxima no vão.

$$x_{crit} = 15.15 \text{ m}$$

L : Comprimento de referência do vão.

$$L = 2.00 \text{ m}$$

$$f_{lim} = \min\left(\frac{L}{500}; 10 \text{ mm}\right)$$

f_{lim} : Deslocamento-limite adotado.

$$f_{lim} = 4.00 \text{ mm}$$



Essa página encerra as verificações da Viga 01