ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL

ABECE

RESPONSABILIDADE, CONHECIMENTO E EXPERIÊNCIA: VALORES DO PROJETO ESTRUTURAL



29º ENECE

Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural

29º ENECE

Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural

Alertas e validações com foco no projeto estrutural



Francisco Paulo Graziano – Pasqua&Graziano

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL

ABECE

• Alertas e validações com foco no projeto estrutural

Temas a serem abordados:

1) Blocos de fundações e pilares excêntricos – vigas-alavanca.
2) Vigas de equilíbrio – transições em fundações.
3) Contenções com aberturas próximas nas lajes.
4) Dimensionamento de lajes e vigas em subsolos sob altas pressões.
5) Pilares destravados por vazios.
6) Vigas aporticadas em pilares de pouca profundidade
7) Determinação da seção transversal de lajes sob flexão
8) Pilares inclinados – estudo preliminar – conformidade geométrica

1. Blocos de fundações – pilares alavancados

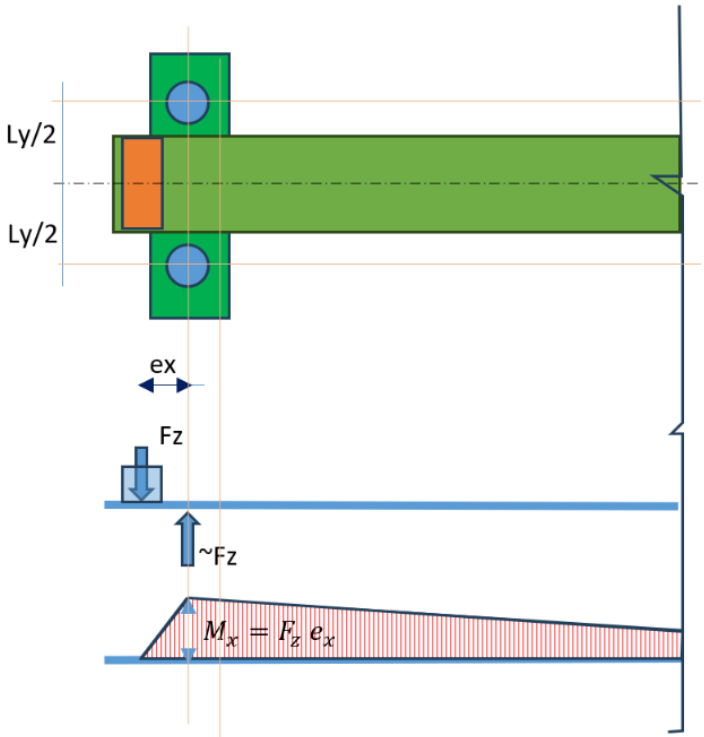
Ao analisar elementos que envolvem blocos ou sapatas em fundações, atenção adicional deve ser dada à interpretação dos resultados.

No caso de blocos em geral recomenda-se o uso do método biela tirante.

Para situações de vigas alavancas, pode-se cair no erro de buscar simplificar posturas por analogia com vigas, em que se necessita de uma atenção especial.

1. Blocos de fundações – pilares alavancados

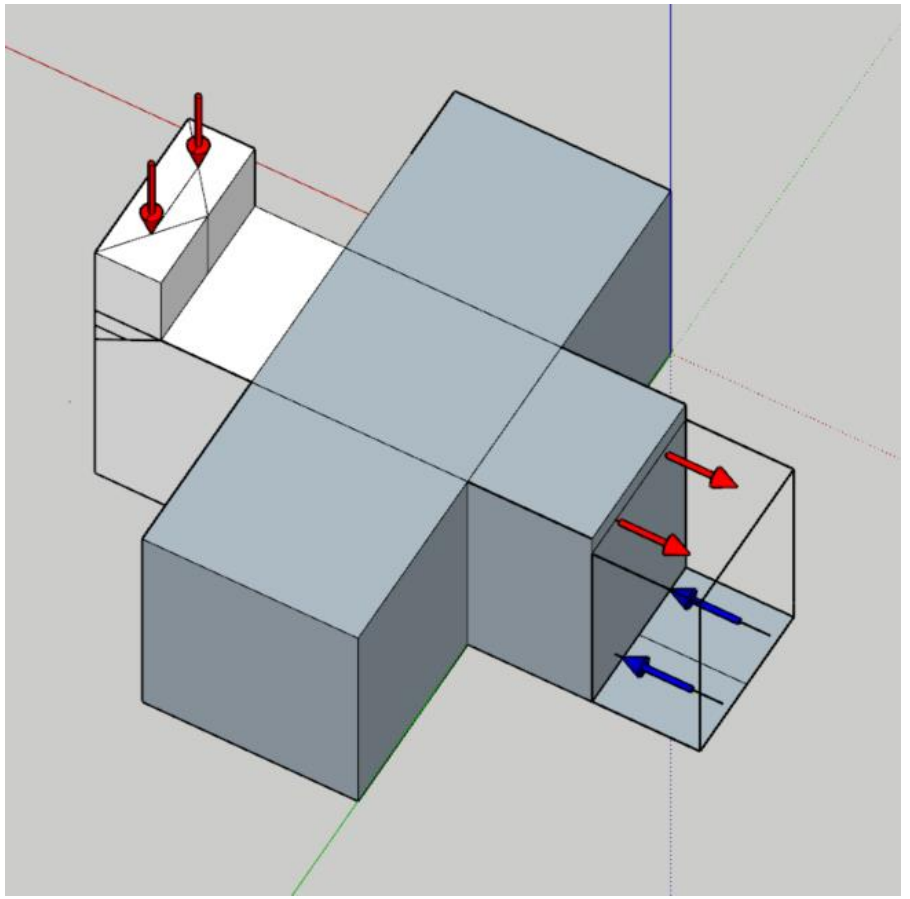
1) Sistema idealizado no plano:



Esforços para dimensionamento

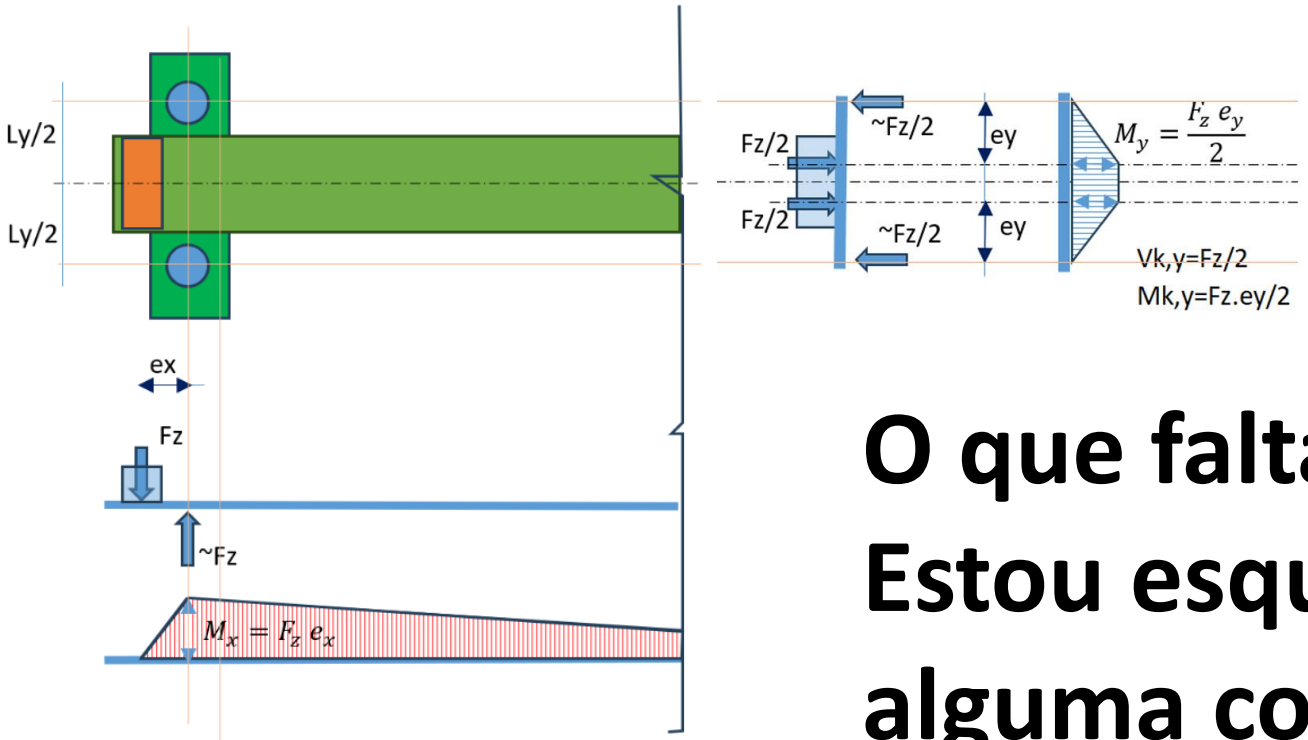
Vk,x = Fz

Mk,x = Fz.ex



1. Blocos de fundações – pilares alavancados

1) Sistema idealizado no plano:

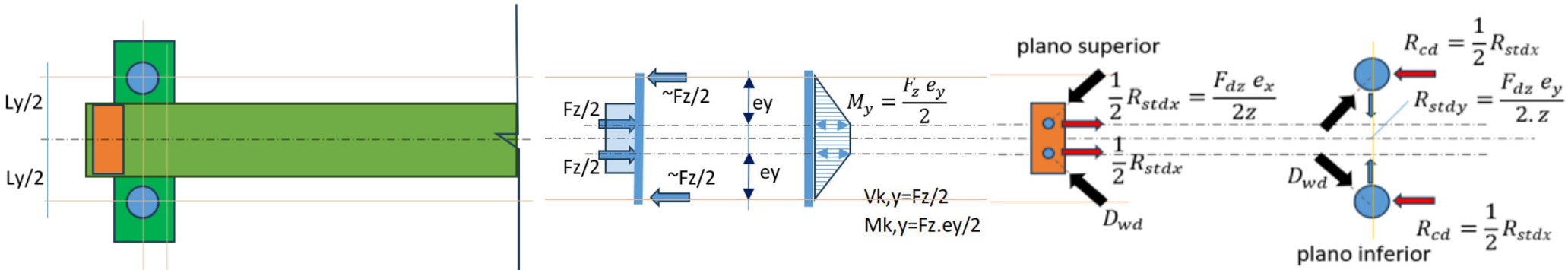


Esforços para dimensionamento
Vk,x = Fz
Mk,x = Fz.ex

O que falta ?
Estou esquecendo alguma coisa?

1. Blocos de fundações – pilares alavancados

1) Sistema idealizado no plano:



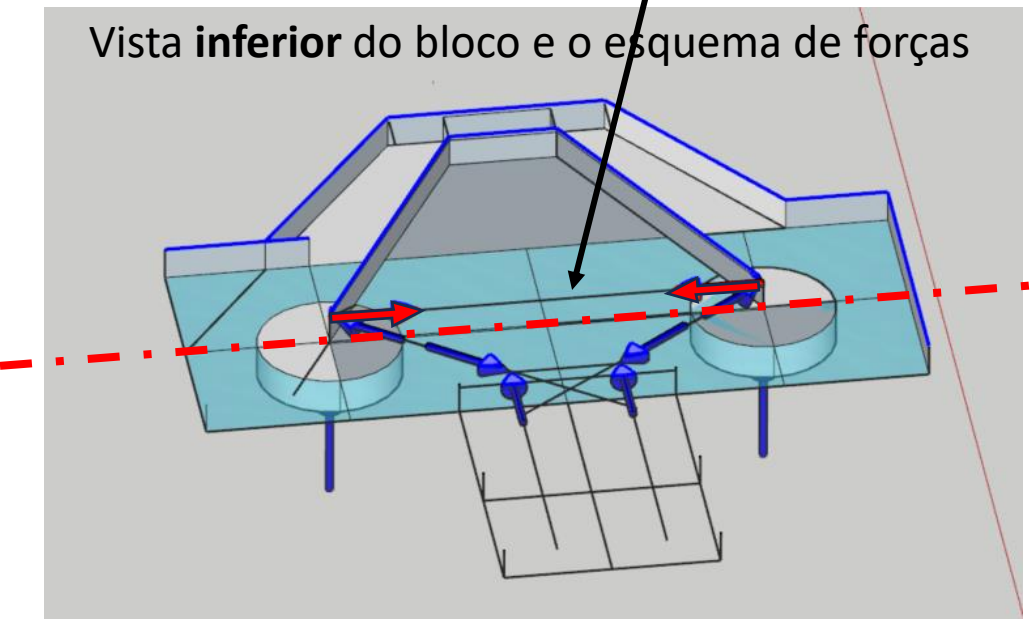
Esforços para dimensionamento
Vk,x = Fz
Mk,x = Fz.ex

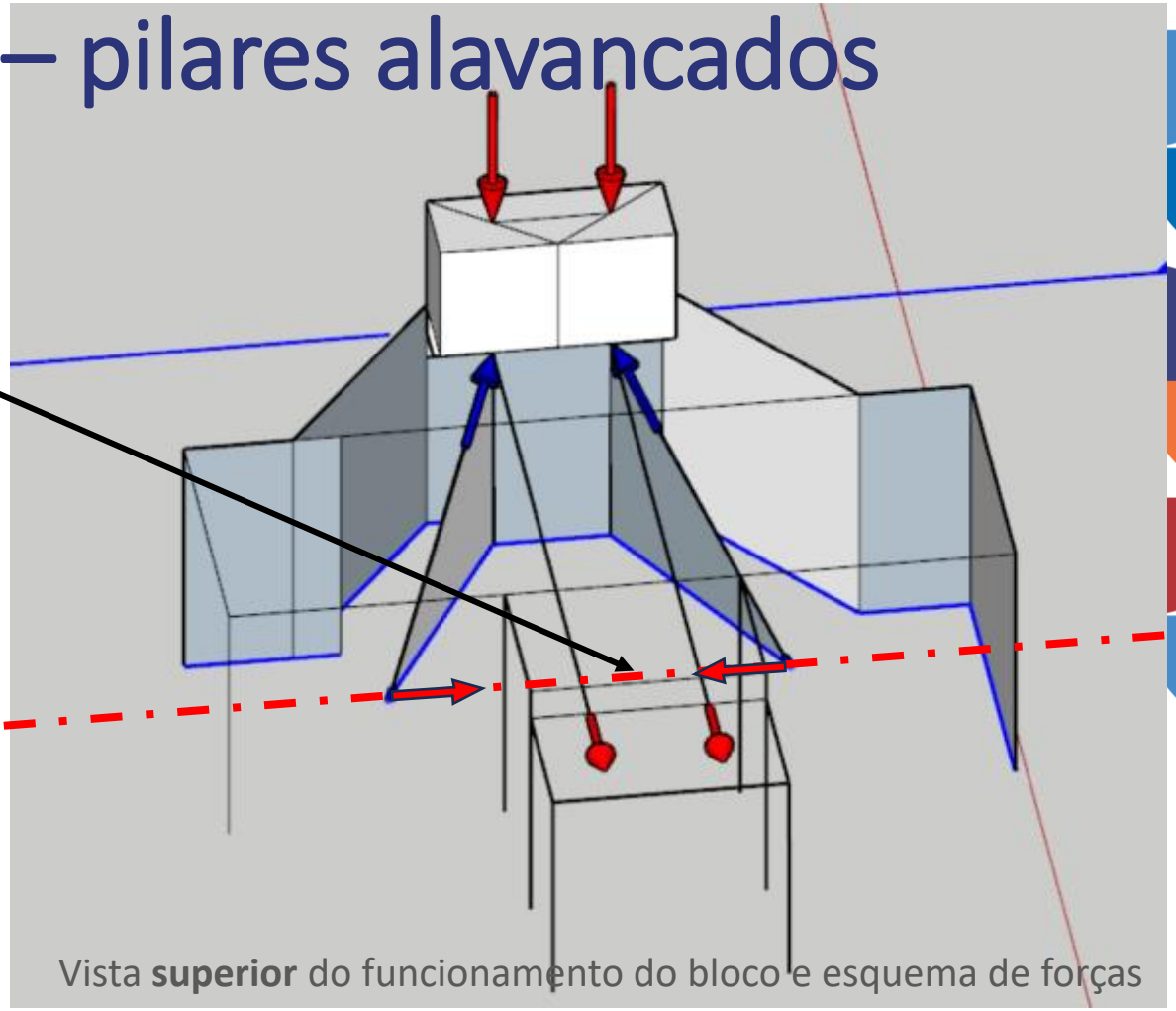
O equilíbrio se dá no espaço tridimensional e não nas projeções dos dois planos de cálculo!

1. Blocos de fundações – pilares alavancados

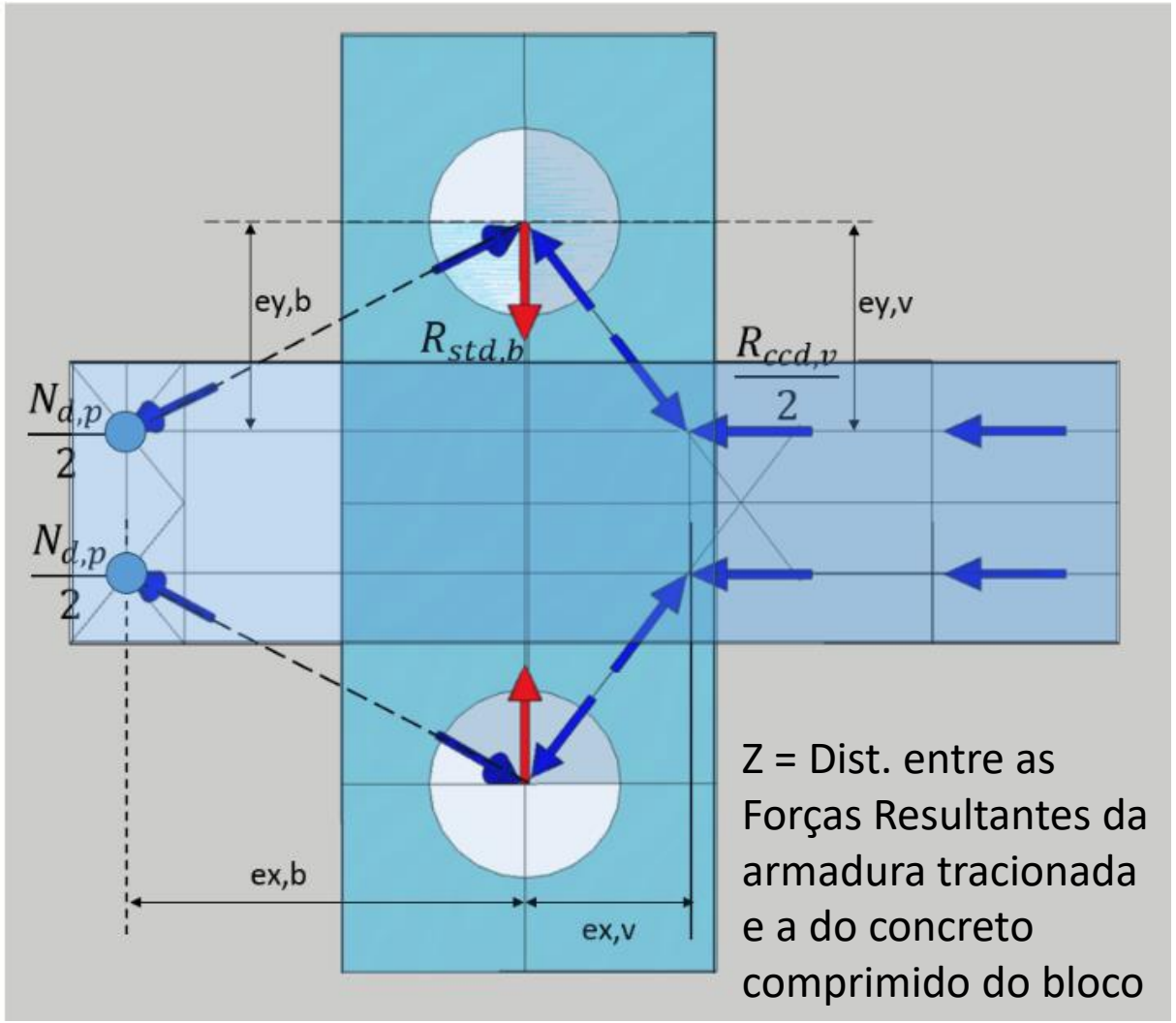
O tirante recebe a soma das projeções !

Vista **inferior** do bloco e o esquema de forças





Vista **superior** do funcionamento do bloco e esquema de forças



Z = Dist. entre as Forças Resultantes da armadura tracionada e a do concreto comprimido do bloco

$$\frac{N_{d,p}}{2z} \times e_{x,b} = \frac{R_{ccd,v}}{2}$$

$$R_{std,b} = \frac{N_{d,p}}{2z} \times e_{y,b} + \frac{R_{ccd,v}}{2} \times \frac{e_{y,v}}{e_{x,v}}$$

$$R_{std,b} = \frac{N_{d,p}}{2z} \times e_{y,b} + \frac{N_{d,p}}{2z} \times e_{x,b} \times \frac{e_{y,v}}{e_{x,v}}$$

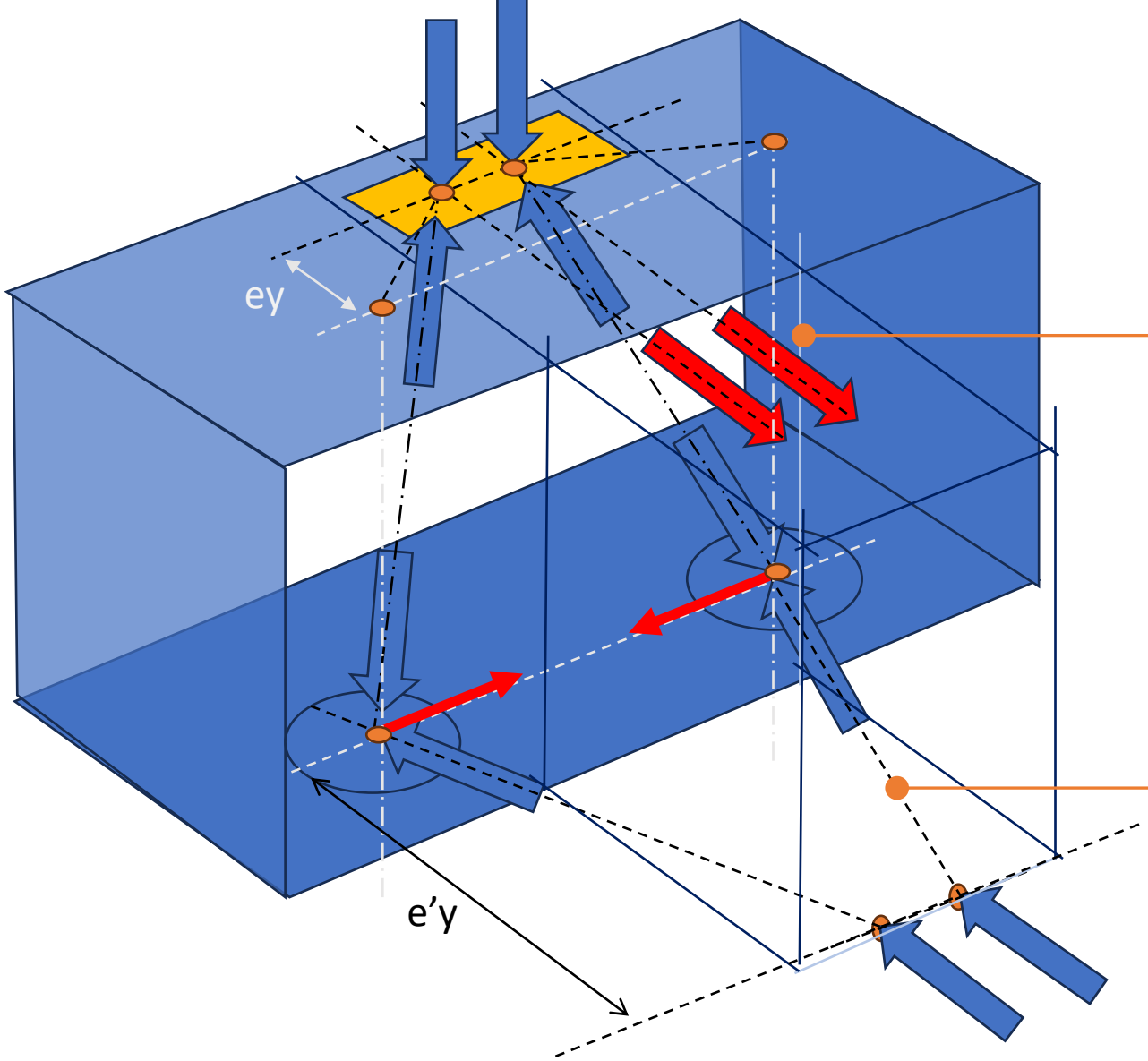
$$R_{std,b} = \frac{N_{d,p}}{2z}\left(e_{y,b} + e_{x,b} \times \frac{e_{y,v}}{e_{x,v}}\right)$$

A única maneira da 2a pacela ser nula é alinhando Rccd com a estaca, ou seja, uma viga que assuma a dimensão do bloco. O que corresponderia a $e_{x,v} \to \infty$. Portanto sempre haverá esta 2a parcela, trata-se de torná-la menos importante amentando para algo como $e_{x,v} \cong 2.e_{y,v}$ e adotando $e_{y,v} = e_{y,b}$ (que corresponde a se ter bw, v = ay, p), teremos:

$$R_{std,b} = \frac{N_{d,p}}{2z} \times e_y\left(1 + \frac{e_{x,b}}{e_{x,v}}\right)$$ Expressão para $e_{y,v} = e_{y,b}$

$$R_{std,b} = \frac{N_{d,p}}{2z} \times e_y\left(1 + \frac{e_{x,b}}{2e_y}\right)$$ Expressão para $e_{y,v} = e_{y,b}$ e $e_{x,v} \cong 2.e_y$

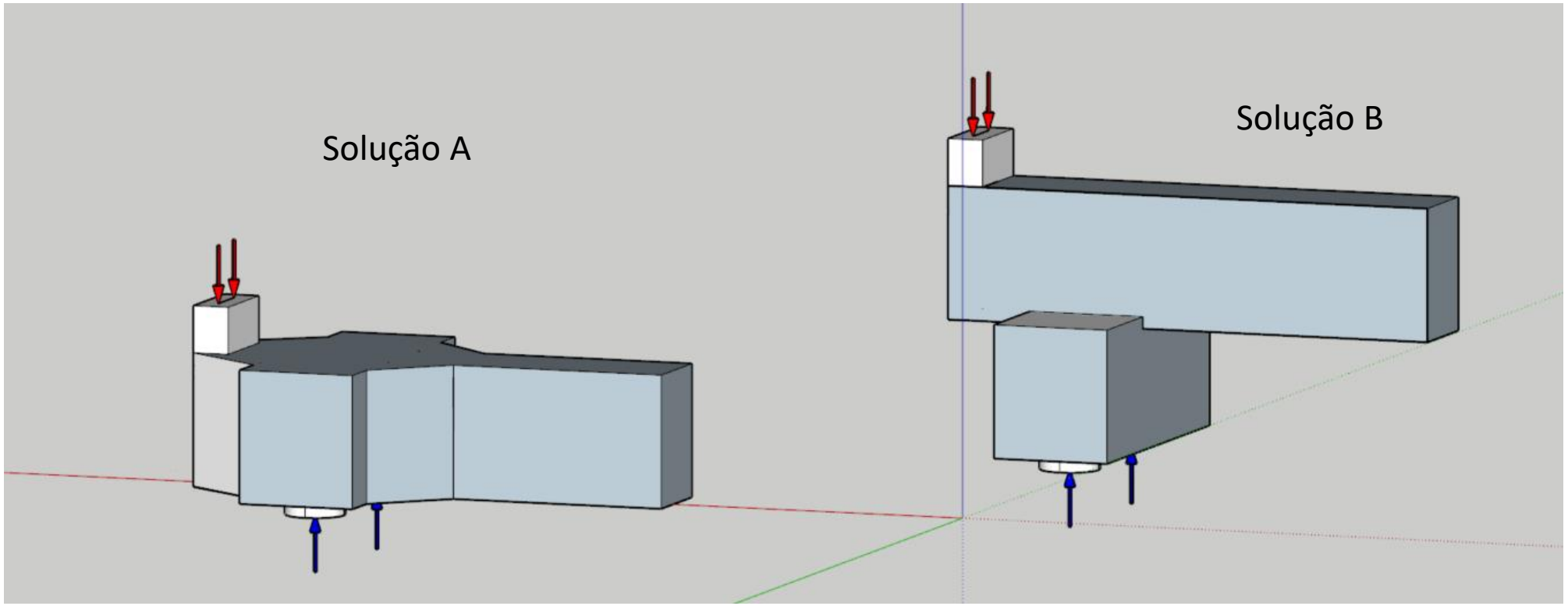
Se $e_y = e'_y$, a força no tirante dobra!



As reações das fibras comprimidas da viga **não** estão alinhadas onde pressupõe o esquema estrutural.

Para cumprir o esquema, deve-se **alargar em muito a viga** junto ao Bloco.

Solução A – dimensionamento tridimensional
Solução B – dimensionamento por planos

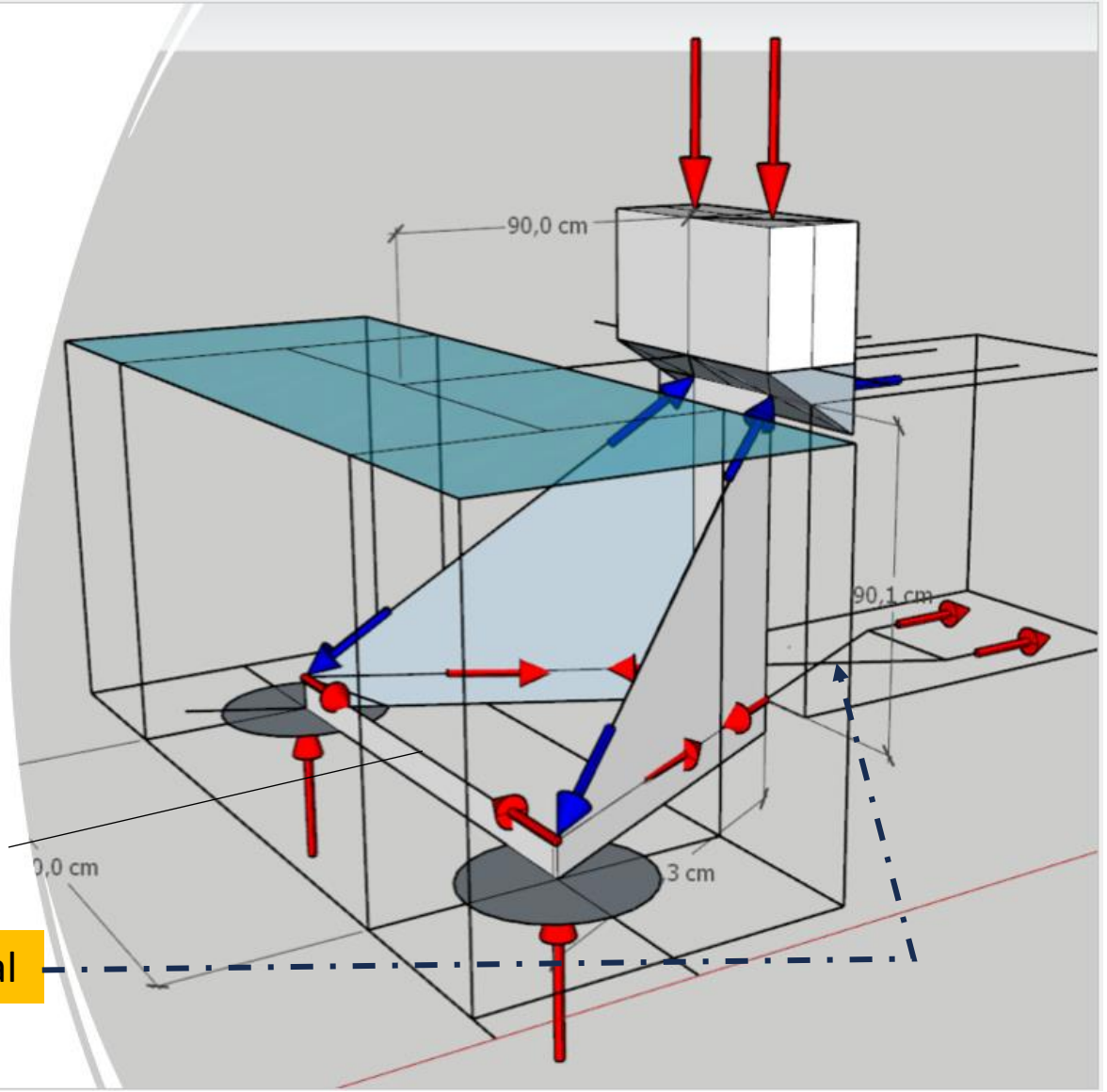


2. Situações similares podem ocorrer com transições com pilares muito próximos aos apoios

- Um caso clássico e recorrente é o de vigas de equilíbrio para absorver excentricidades executivas em fundações.

Introduz alívio nas armaduras do tirante

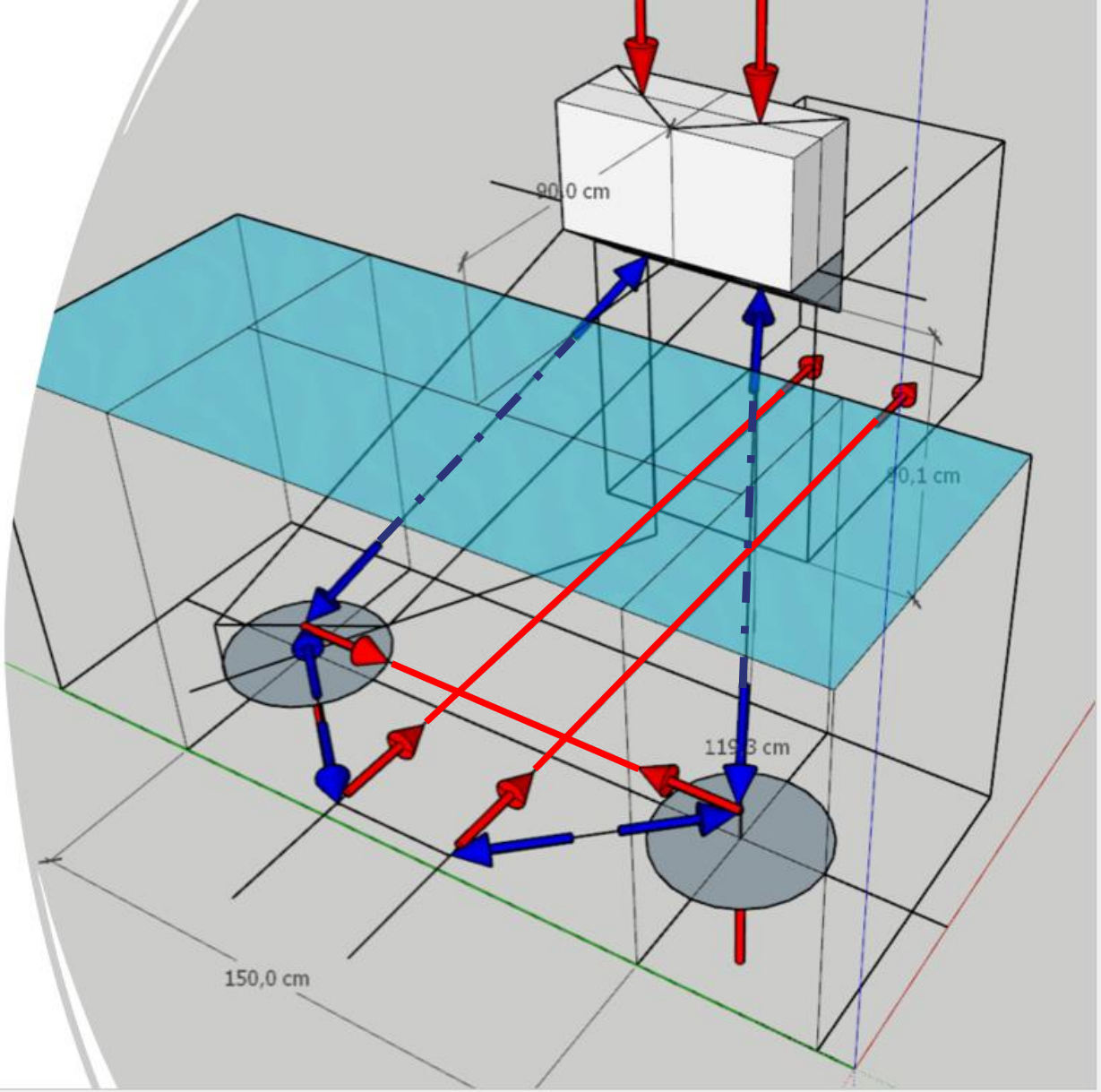
Situação ideal de armação, mas pouco usual



SITUAÇÃO MAIS USUAL

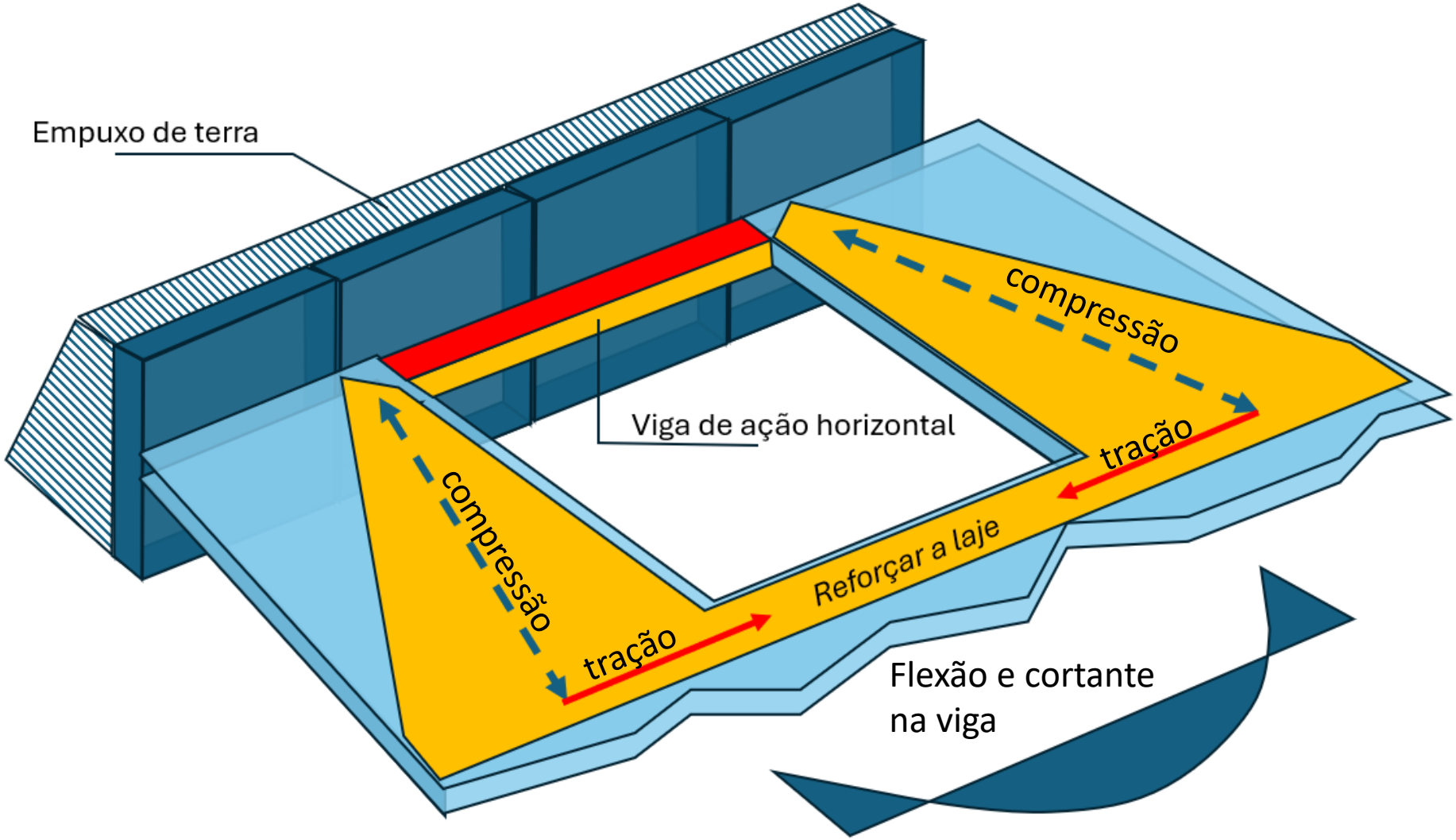
No caso usual, as armaduras da viga seguem até o final do bloco ancorando após da linha de eixo das estacas.

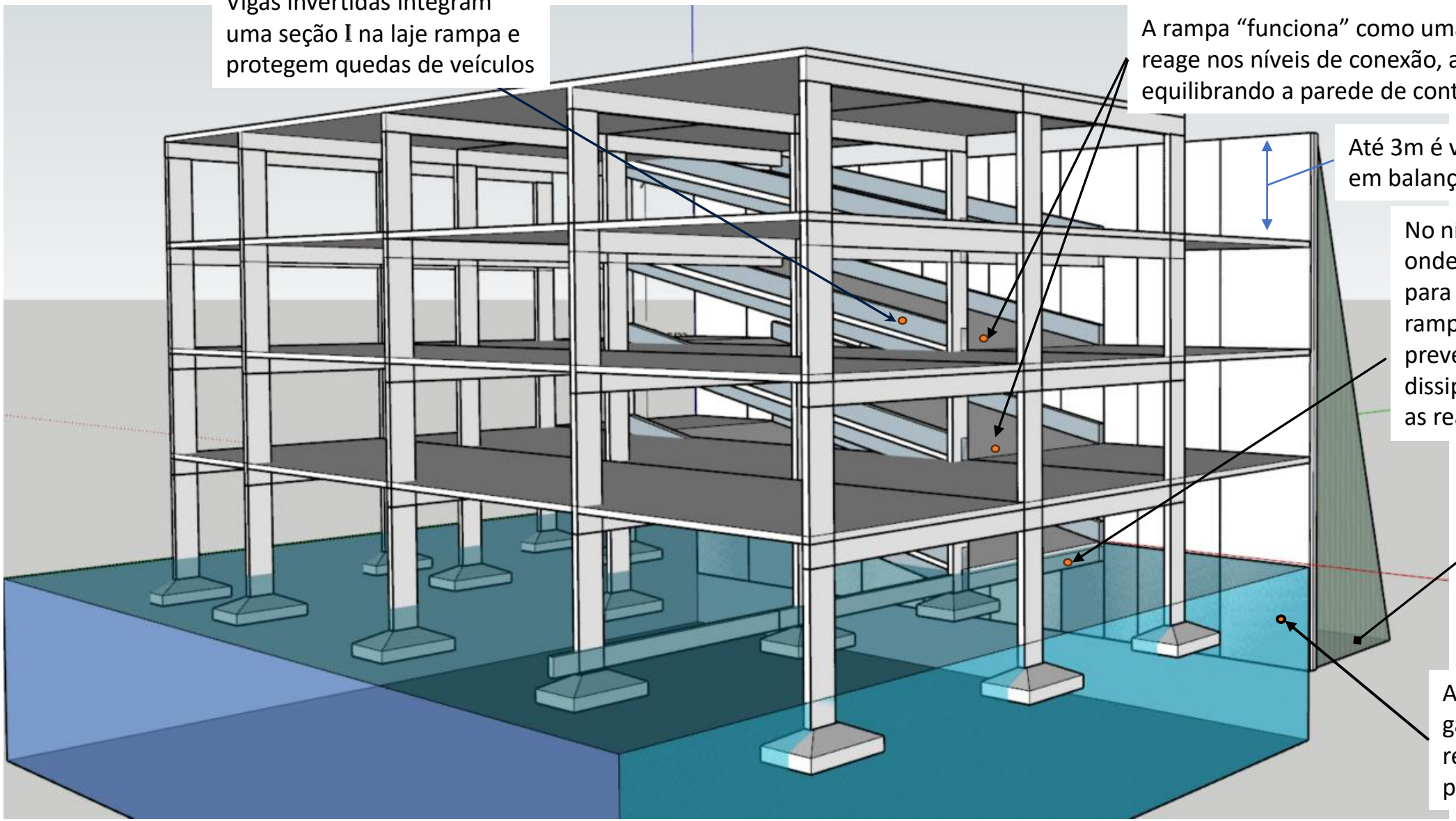
Este detalhe introduz forças adicionais no tirante semelhante ao demonstrado no exemplo anterior de vigas alavancas

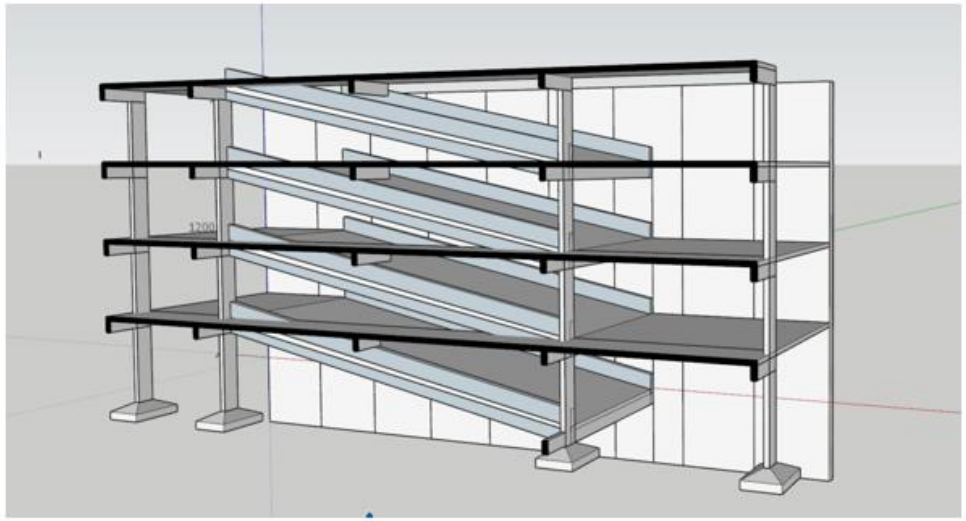


3. Atenção para as paredes de contenção destravadas horizontalmente

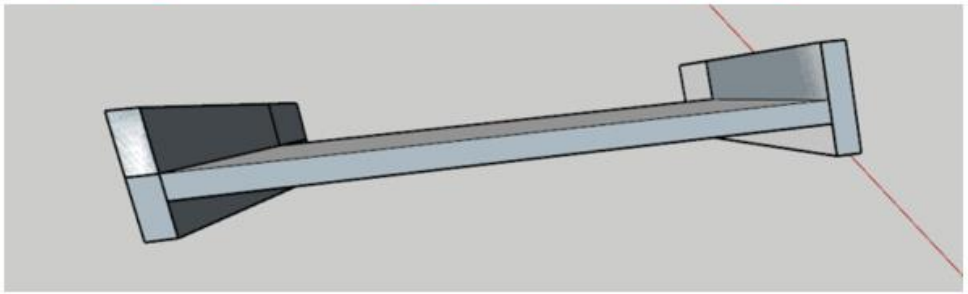
- Reservatórios
- Rampas
- Escadas
- Ventilações
- outros

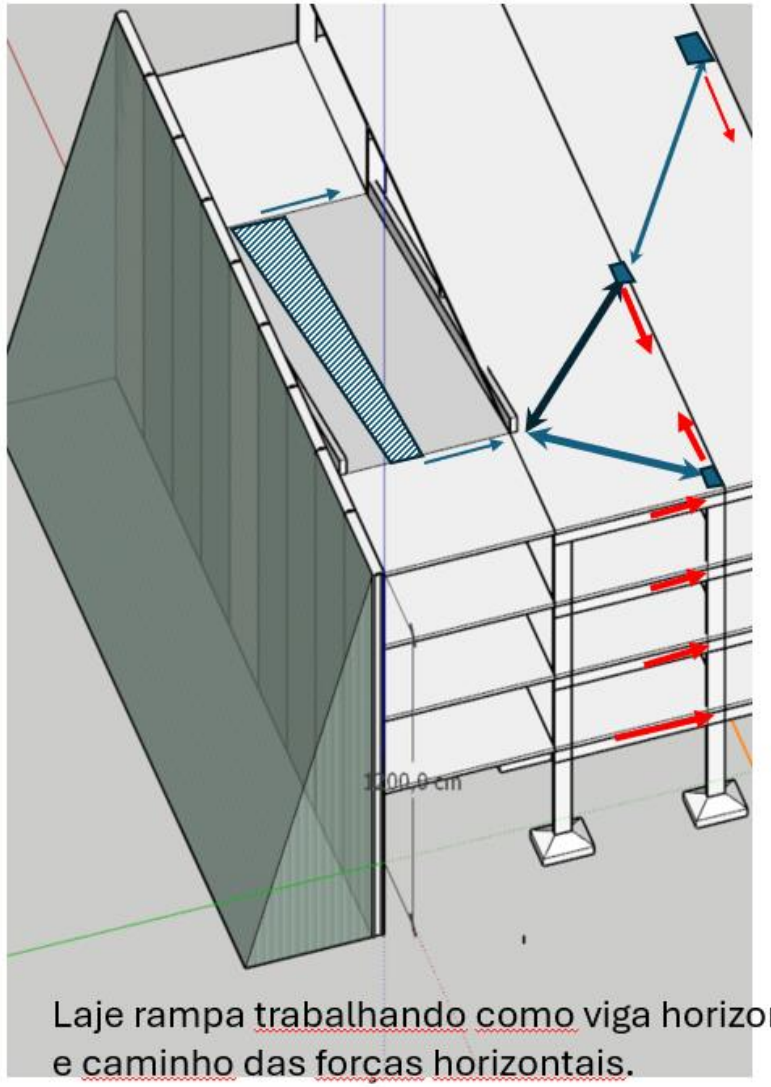

Empuxo de terra
Viga de ação horizontal
compressão
tração
compressão
tração
Reforçar a laje
Flexão e cortante
na viga


Vigas invertidas integram uma seção I na laje rampa e protegem quedas de veículos
A rampa “funciona” como uma viga horizontal que reage nos níveis de conexão, acima e abaixo, equilibrando a parede de contenção.
Até 3m é viável em balanço
No nível das fundações onde não existem lajes para travar o final da laje rampa, é necessário prever vigas que dissipem nas fundações as reações horizontais.
Empuxo ativo
Aqui a ficha da diafragma garante a absorção da reação horizontal da parede



Seção transversal da laje rampa em seção I





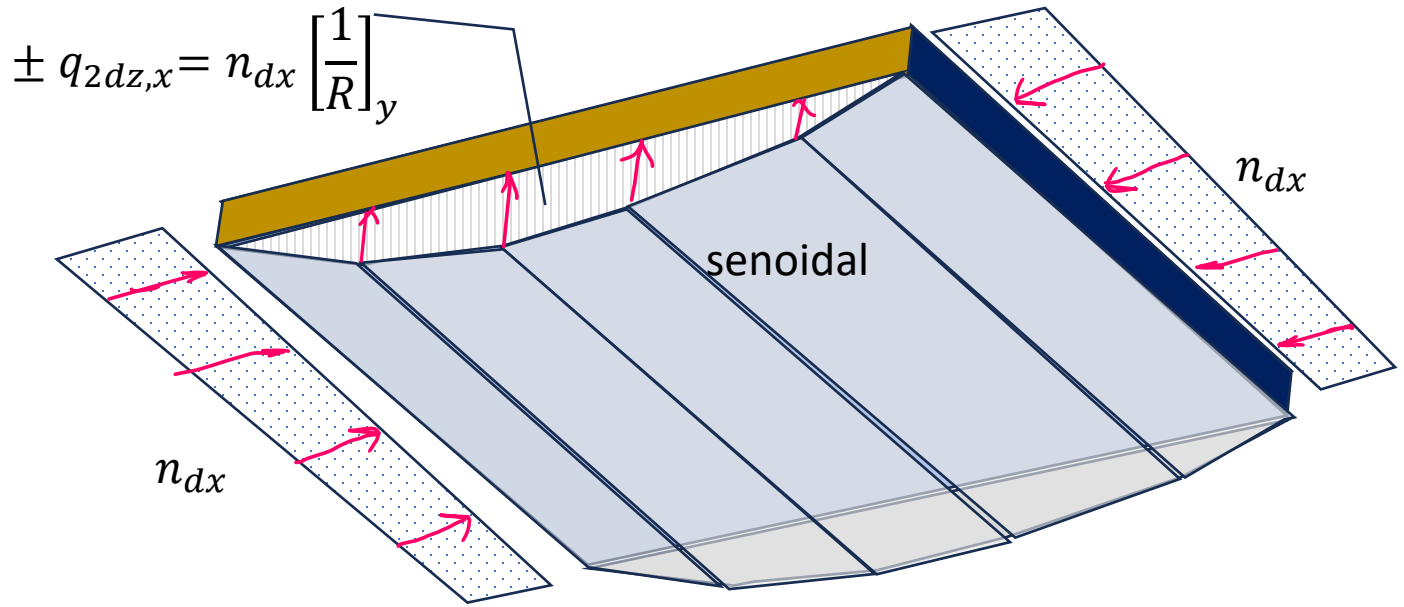
Laje rampa trabalhando como viga horizontal e caminho das forças horizontais.

4. Estabilidade de lajes que trabalham como diafragmas em múltiplos subsolos (+3)

- É comum nestes casos termos reações horizontais das contenções com intensidades superiores a **60 tf/m**.
- Lajes esbeltas podem manifestar **efeitos de 2ª ordem** importantes. Considerar que estas já estão flexionadas devido ao seu uso e que a esta flexão serão adicionados momentos de 2ª ordem devido às forças normais introduzidas.
- Este efeito também poderá acionar **vigas de grande vão** que dão suporte às lajes.
- Especial cuidado para **lajes lisas e lajes nervuradas em cubetas**.

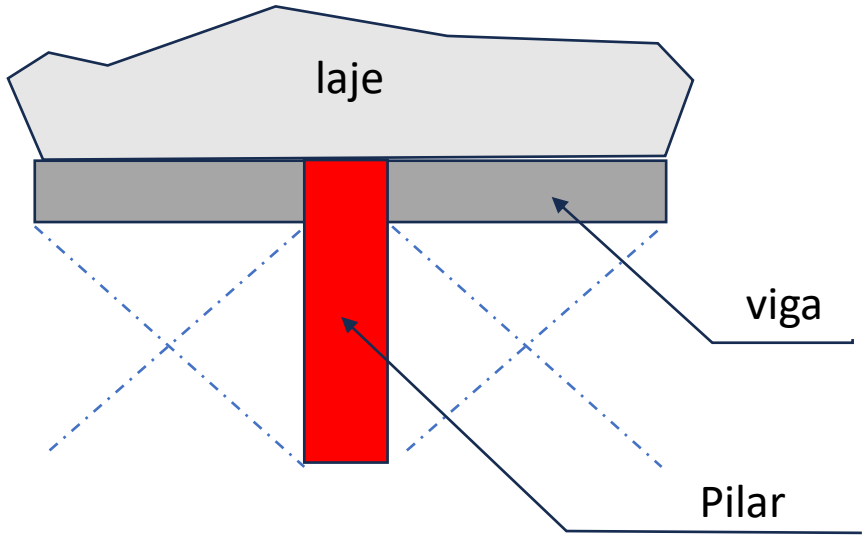
Acrescentar às ações gravitacionais a $q_{2d,z,x}\ e\ q_{2d,z,y}$ quando for o caso.

Carregar as lajes em damas alternando sinal e sobrepondo os esforços com os momentos fletores devido à carga gravitacional



5. Pilares destravados pelas lajes

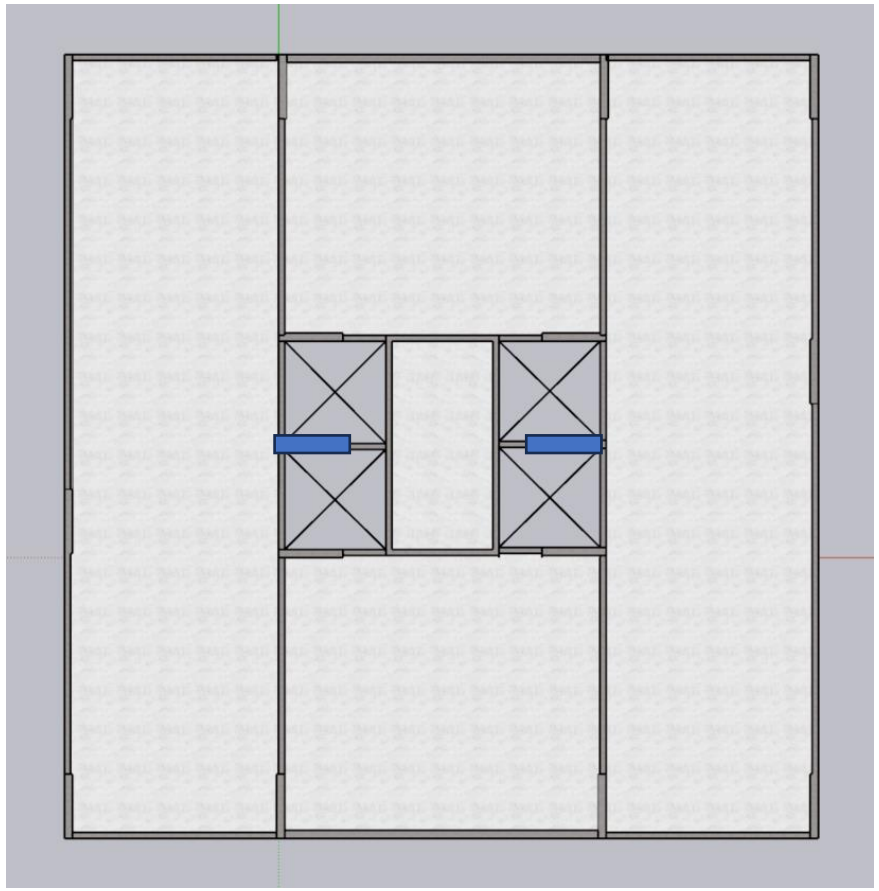
- Atenção para sempre ter toda a extensão dos pilares em 2 faces ortogonais em contato com elementos do diafragma de contraventamento (laje) do edifício de forma a garantir sua estabilidade e o comprimento de ‘le’ adotado nas verificações de estabilidade local e localizada.

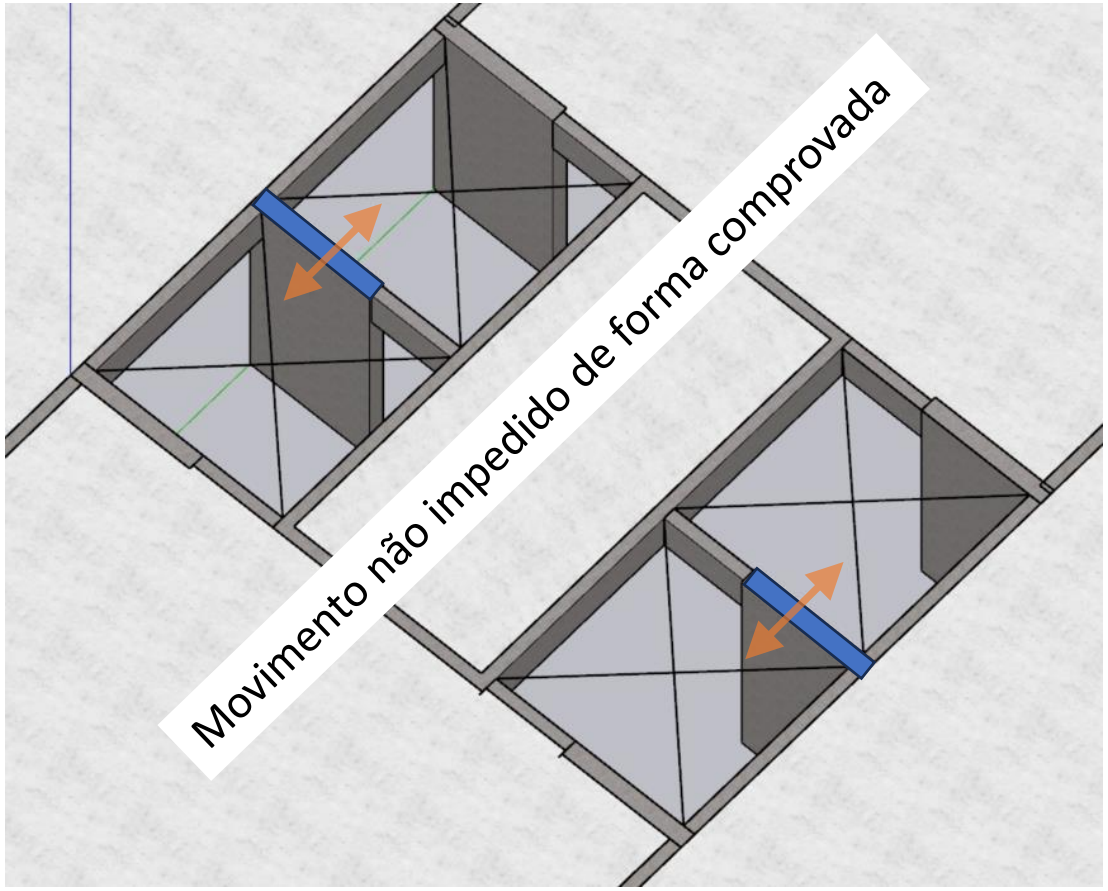


Comprovar a estabilidade em situações que não cumprem esta regra.

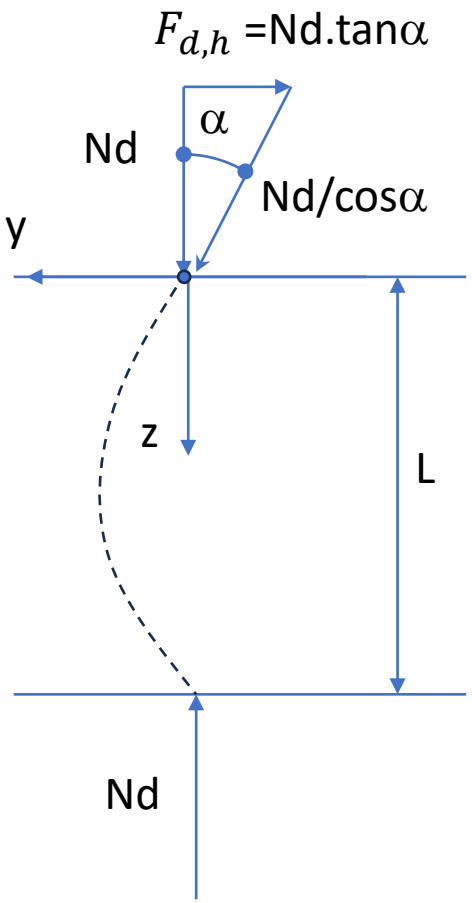
Exemplo de situação a ser evitada

com Pilares destravados





Determinação da força de fixação do pilar



1. Deformada do pilar

$$y = e_2 \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi z}{L}\right)$$

2. Inclinação no topo do pilar (z = 0)

$$\frac{dy}{dz} = \frac{\pi e_2}{L} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \Rightarrow \tan\alpha = \frac{\pi e_2}{L}$$

Portanto, levando-se em consideração o efeito de 2ª ordem, apenas:

$$F_{d,h} = N_d \cdot \frac{\pi e_2}{L}$$

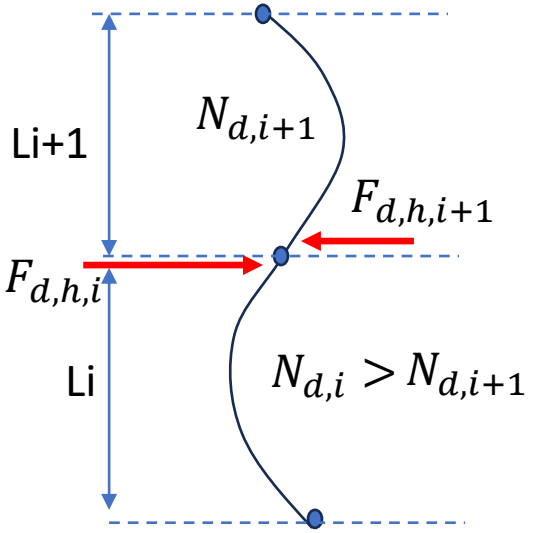
com $e_2 = \left(\frac{1}{R}\right)\frac{L^2}{\pi^2}$ $\qquad F_{d,h} = N_d\left(\frac{1}{R}\right)\cdot\frac{L}{\pi}$

Exemplo: N_d = 1000 tf; pilar 19×225; L = 2,88 m; e_2 = 0,0166 m; C40

$$F_{d,h} = 1000 \times \frac{\pi \cdot 0{,}0166}{2{,}88} = \mathbf{18{,}11\ tf}$$

Em geral, o equilíbrio se dá no andar.

$$F_{d,h} = N_d \left(\frac{1}{R}\right) \cdot \frac{L}{\pi}$$



Força de desequilíbrio no andar

Pilar superior

$$\Delta F_{d,h_i,i+1} = \gamma_{f\times} N_{k,i\times} \frac{\pi.ei_2}{L,i} - \gamma_{f1\times} N_{k,i+1\times} \frac{\pi.ei+1_2}{L,i+1}$$

Pilar inferior

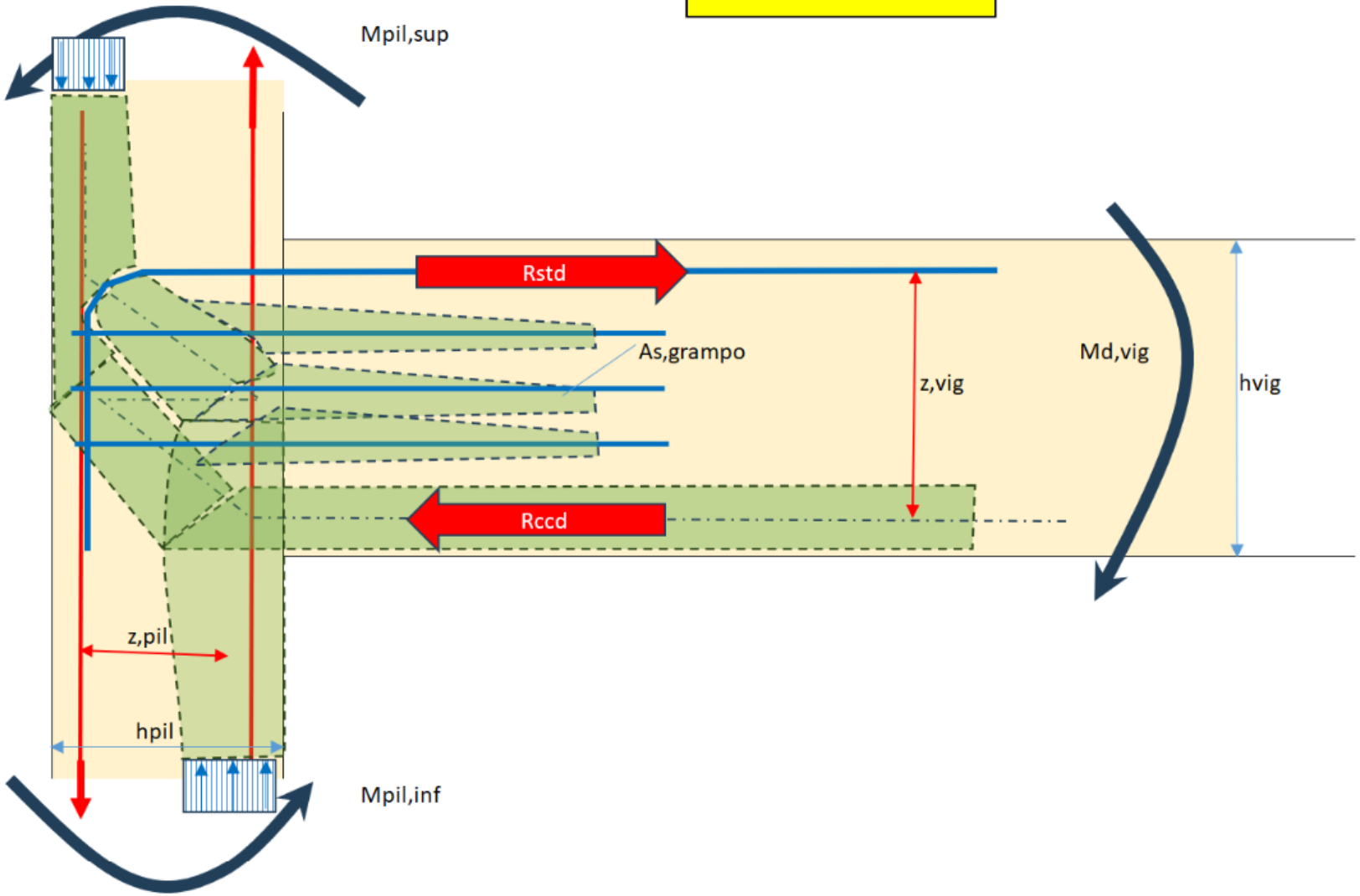
O valor da força de desequilíbrio é proporcional ao acréscimo de Força Normal e será maior onde o houver diferenças de Le e de rigidez, alterando substancialmente um Fd,h de outro.

É boa prática manter os pilares travejados por lajes que estejam unidas a elementos de rigidez em duas direções ortogonais no plano da laje.

6. Vigas ‘aporticadas’ em pilares de pouca profundidade

- Quando a profundidade do pilar é inferior à altura da viga, pode ocorrer que o dimensionamento do pilar seja satisfeito e no entanto a situação do nó de pórtico não esteja em condições de transferir os esforços de maneira segura.
- Tendo em vista esta situação temos proposto uma expressão prática para controlar estas situações como veremos a seguir

PROPOSTA


Mpil,sup
Rstd
As,grampo
z,vig
Md,vig
hvig
Rccd
z,pil
hpil
Mpil,inf

quando z,vig > hpil

Sugestão de verificação

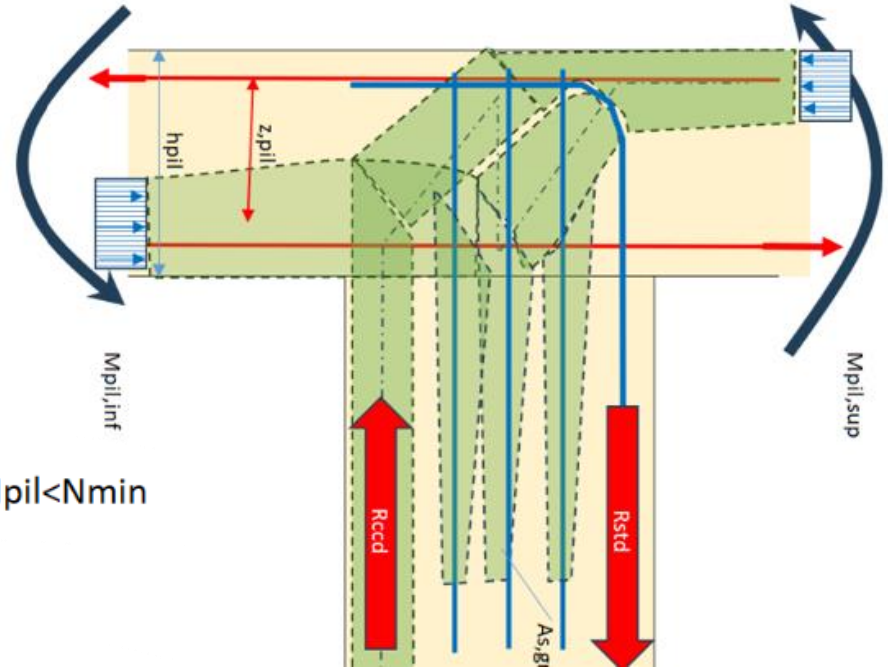
Rccd <= 0,30 .fcd . bw,vig . z,pil Vc = 0,6 . fctd . bw,vig . z,pil p/ Npil<Nmin

interpolar entre estes valores

Rccd <= 0,5 .fcd . bw,vig . z,pil Vc = 0,6 . fctd . bw,vig . z,pil p/ Npil>=Nmin

As,grampo = (Rccd - Vc)/(z,pil*fyd,w)

adotar zpil = 0,8 hpil na falta de dado mais preciso



Engastes de vigas em pilares

Situação em que o bw da viga é igual ao do pilar

Pilares com baixa força normal

fck	Rstd,lim	μ,lim,viga
25	385,71.dpil	0,254.dpil/dv
30	452,57.dpil	0,248.dpil/dv
35	516,00.dpil	0,243.dpil/dv
40	576,00.dpil	0,237.dpil/dv
45	632,57.dpil	0,232.dpil/dv
50	685,71.dpil	0,226.dpil/dv
		unidades tf,m

Tabela calculada com d'=5cm

$$\mu = \frac{M_{d,viga}}{0{,}85.f_{cd}.bw.d^2}$$

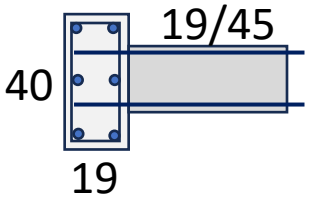
$$\nu = \frac{N_{d,pilar}}{f_{cd}.A_c}$$

Pilares com força normal de compressão maior que a mínima

fck	Rstd,lim	μ,lim,viga	ν,min,pil
25	642,86.dpil	0,424.dpil/dv	0,4
30	754,29.dpil	0,414.dpil/dv	
35	860,00.dpil	0,405.dpil/dv	
40	960,00.dpil	0,395.dpil/dv	
45	1054,29.dpil	0,386.dpil/dv	
50	1142,86.dpil	0,376.dpil/dv	
		unidades tf,m	

Exemplo: fck=40

Interpolar linearmente para normais abaixo da mínima



axpil	aypil
19	40

bw	hv
19	45

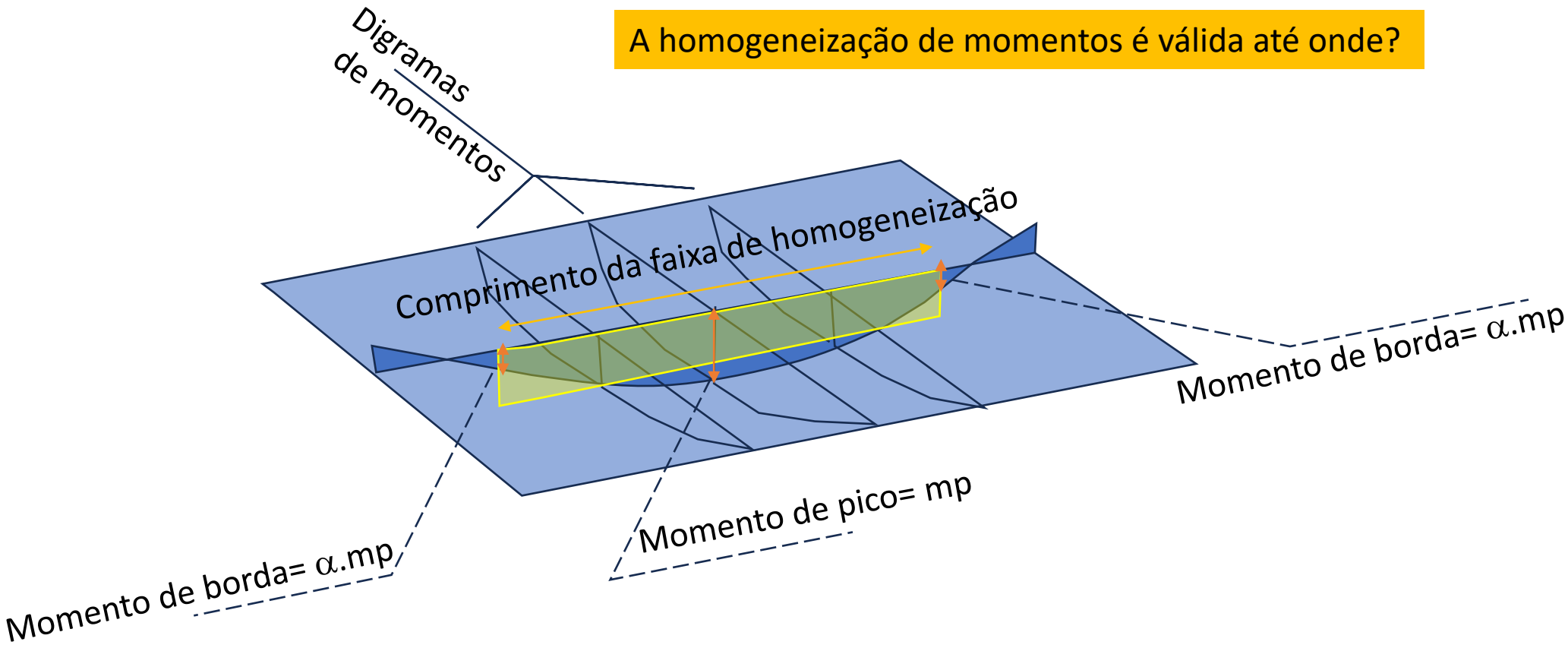
	μ,lim,viga	Nd,pil,min=
Pilares com baixa força normal	0,083	0,00
Pilares com força normal de compressão maior que a mínima	0,138	86,86

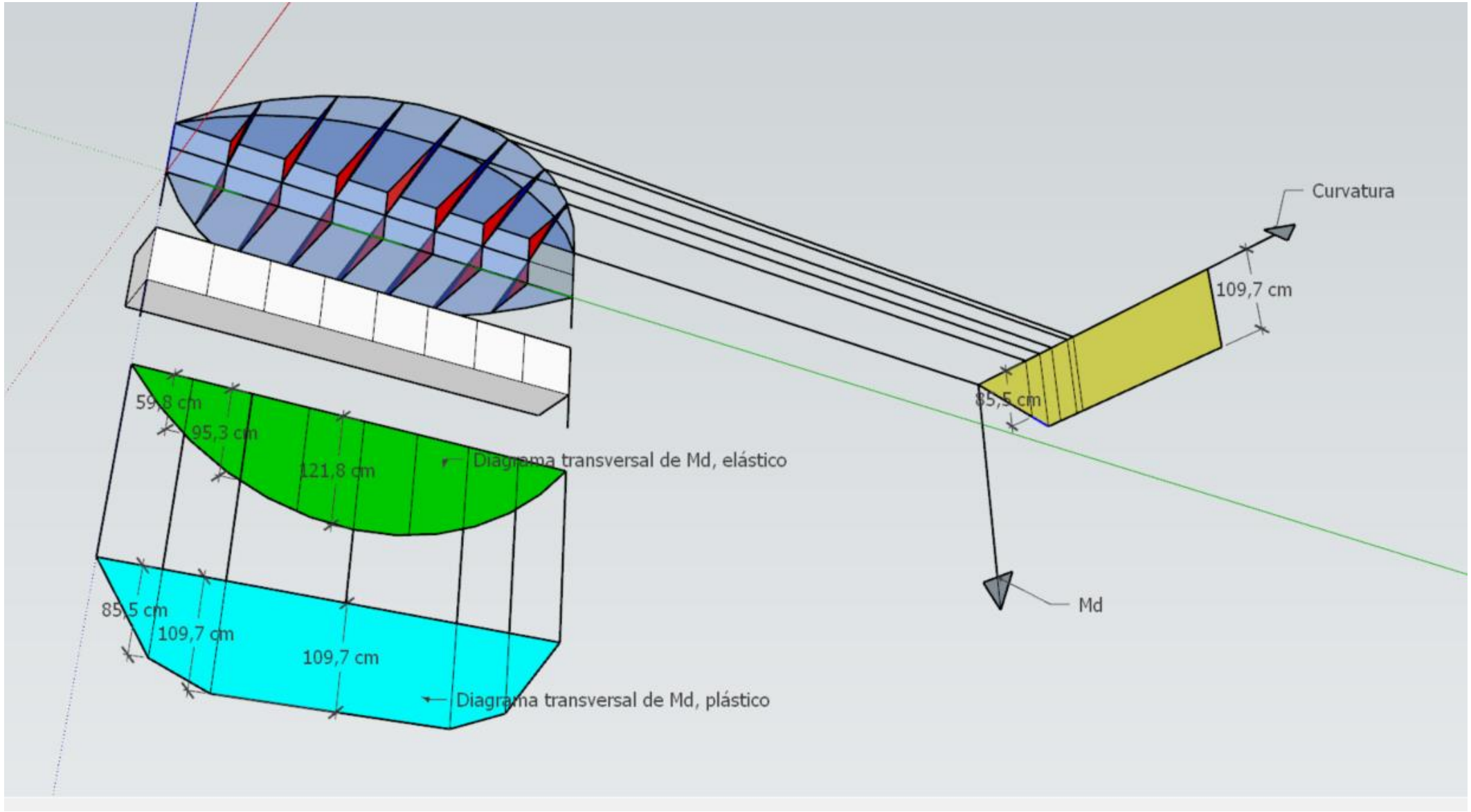
Bem baixo!

66% maior!

7. Determinação de trecho válido para plastificação de momentos fletores em lajes

A homogeneização de momentos é válida até onde?




Curvatura
109,7 cm
85,5 cm
Md
59,8 cm
95,3 cm
121,8 cm
Diagrama transversal de Md, elástico
85,5 cm
109,7 cm
109,7 cm
Diagrama transversal de Md, plástico

6. Nesta aproximação controlaremos as curvaturas com o seguinte critério. Exemplificado abaixo:

Gerador de diagramas transversais de mk			
Lx	DtX	Mcentral	Potência do Diagrama
10	0,625	3	1
m	*m*	*tf.m/m*	

FUNDO AZUL INDICA A EXTENSÃO DA FAIXA DE ARMADURA HOMOGENIZADA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x	0	0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	3,75	4,375	5	5,625	6,25	6,875	7,5	8,125	8,75	9,375	10
mk(x) tf.m/m	0	0,375	0,75	1,125	1,5	1,875	2,25	2,625	3	2,625	2,25	1,875	1,5	1,125	0,75	0,375	0
ProporçãoDiagrama	0,00	0,13	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1,00	0,88	0,75	0,63	0,50	0,38	0,25	0,13	0,00
Após Plastif.	0,00	0,54	1,08	1,63	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	1,63	1,08	0,54	0,00
		1,44	1,44	1,44	1,44	1,16	0,96	0,83	0,72	0,83	0,96	1,16	1,44	1,44	1,44	1,44	

Mome -Diagrama inicial - EST I

Mome -Diagrama final - ELU

m*(x) tf.m/m	0,00	0,54	1,08	1,63	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	1,63	1,08	0,54	0,00

d,min				mult.de CURV,	mult.de CURV,	
733,264	0,111					
fck	~EI ,EST I	d,adt	Min,curv,ELU	limELU	limELS	resíduo
30	112,5	0,150	0,06667	2,500	1,610	-0,166
	tf.m²	m	1/m			

α 0,380

m,borda = α . m,p

mk,p	mk,borda	mk,medio	k,plast,max	mult. de Curv,nec		
3,00	1,14	2,167	72%	1,44	5 G55	7
tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m		ok	13 O55	15

Condição de atendimento x/d<=0,26, ou seja : $\mu \leq 0,186$ Limite do DOM.2 c/ DOM.3 $\rho \cong 0,00869$ $betay = 0,2075$ $betaz = 0,896$ para o dimensinamento da armadura com o momento plastificado

As,L	ρ,L
5,19	0,00346
cm²/m	

Mresult, EST I
24
tf.m

Mresult,após,plast.
26,00
tf.m

Extra,Seg
1,08

6. Nesta aproximação controlaremos as curvaturas com o seguinte critério. Exemplificado abaixo:

Gerador de diagramas transversais de mk			
Lx	DtX	Mcentral	Potência do Diagrama
10	0,625	3	2
m	*m*	*tf.m/m*	

FUNDO AZUL INDICA A EXTENSÃO DA FAIXA DE ARMADURA HOMOGENIZADA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x	0	0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	3,75	4,375	5	5,625	6,25	6,875	7,5	8,125	8,75	9,375	10
mk(x) tf.m/m	0	0,70313	1,3125	1,82813	2,25	2,57813	2,8125	2,95313	3	2,95313	2,8125	2,57813	2,25	1,82813	1,3125	0,70313	0
ProporçãoDiagrama	0,00	0,23	0,44	0,61	0,75	0,86	0,94	0,98	1,00	0,98	0,94	0,86	0,75	0,61	0,44	0,23	0,00
Após Plastif.	0,00	0,97	1,82	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	1,82	0,97	0,00
		1,38	1,38	1,38	1,13	0,98	0,90	0,86	0,84	0,86	0,90	0,98	1,13	1,38	1,38	1,38	

Mome -Diagrama inicial - EST I

Mome -Diagrama final - ELU

m*(x) tf.m/m	0,00	0,97	1,82	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	1,82	0,97	0,00

d,min				mult.de CURV,	mult.de CURV,	
733,264	0,111					
fck	~EI ,EST I	d,adt	Min,curv,ELU	limELU	limELS	resíduo
30	112,5	0,150	0,06667	2,500	1,610	-0,225
	tf.m²	m	1/m			

α 0,440

m,borda = α . m,p

mk,p	mk,borda	mk,medio	k,plast,max	mult. de Curv,nec		
3,00	1,32	2,531	84%	1,38	4 F55	6
tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m		ok	14 P55	16

Condição de atendimento x/d<=0,26, ou seja : $\mu \leq 0,186$ Limite do DOM.2 c/ DOM.3 $\rho \cong 0,00869$ $betay = 0,2075$ $betaz = 0,896$ para o dimensinamento da armadura com o momento plastificado

As,L	ρ,L
6,06	0,00404
cm²/m	

Mresult, EST I
31,875
tf.m

Mresult,após,plast.
33,43
tf.m

Extra,Seg
1,05

6. Nesta aproximação controlaremos as curvaturas com o seguinte critério. Exemplificado abaixo:

Gerador de diagramas transversais de mk			
Lx	DtX	Mcentral	Potência do Diagrama
10	0,625	3	3
m	*m*	*tf.m/m*	

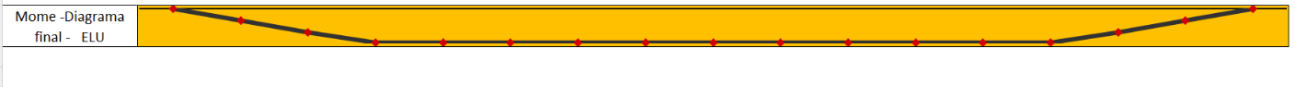
FUNDO AZUL INDICA A EXTENSÃO DA FAIXA DE ARMADURA HOMOGENIZADA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x	0	0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	3,75	4,375	5	5,625	6,25	6,875	7,5	8,125	8,75	9,375	10
mk(x) tf.m/m	0	0,74414	1,45313	2,0918	2,625	3,01758	3,23438	3,24023	3	3,24023	3,23438	3,01758	2,625	2,0918	1,45313	0,74414	0
ProporçãoDiagrama	0,00	0,23	0,45	0,65	0,81	0,93	1,00	1,00	0,93	1,00	1,00	0,93	0,81	0,65	0,45	0,23	0,00
Após Plastif.	0,00	1,02	1,98	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	1,98	1,02	0,00
		1,37	1,37	1,37	1,09	0,95	0,88	0,88	0,95	0,88	0,88	0,95	1,09	1,37	1,37	1,37	

Mome -Diagrama inicial - EST I



Mome -Diagrama final - ELU



m*(x) tf.m/m	0,00	1,02	1,98	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	1,98	1,02	0,00

d,min	733,264	0,116		mult.de CURV,	mult.de CURV,	
fck	~EI ,EST I	d,adt	Min,curv,ELU	limELU	limELS	resíduo
30	121,509	0,150	0,06667	2,500	1,610	-0,245
	tf.m²	m	1/m			

α 0,502

m,borda = α . m,p

mk,p	mk,borda	mk,medio	k,plast,max	mult. de Curv,nec		
3,24	1,63	2,856	88%	1,37	4 F55	6
tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m		ok	14 P55	16

Condição de atendimento x/d<=0,26, ou seja :

$\mu \leq 0{,}186$ Limite do DOM.2 c/ DOM.3 $\rho \cong 0{,}00869$ $betay = 0{,}2075$ As,L 6,84 cm²/m ρ,L 0,00456

para o dimensinamento da armadura com o momento plastificado $betaz = 0{,}896$

Mresult, EST I
35,8125
tf.m

Mresult,após,plast. 37,42 tf.m

Extra,Seg 1,04

6. Nesta aproximação controlaremos as curvaturas com o seguinte critério. Exemplificado abaixo:

Gerador de diagramas transversais de mk			
Lx	DtX	Mcentral	Potência do Diagrama
10	0,625	3	15
m	*m*	*tf.m/m*	

FUNDO AZUL INDICA A EXTENSÃO DA FAIXA DE ARMADURA HOMOGENIZADA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x	0	0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	3,75	4,375	5	5,625	6,25	6,875	7,5	8,125	8,75	9,375	10
mk(x) tf.m/m	0	0,75	1,5	2,25	2,99991	3,7474	4,45991	4,8452	3	4,8452	4,45991	3,7474	2,99991	2,25	1,5	0,75	0
ProporçãoDiagrama	0,00	0,15	0,31	0,46	0,62	0,77	0,92	1,00	0,62	1,00	0,92	0,77	0,62	0,46	0,31	0,15	0,00
Após Plastif.	0,00	1,20	2,40	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	2,40	1,20	0,00
		1,60	1,60	1,60	1,20	0,96	0,81	0,74	1,20	0,74	0,81	0,96	1,20	1,60	1,60	1,60	

Mome -Diagrama inicial - EST I



Mome -Diagrama final - ELU



m*(x) tf.m/m	0,00	1,20	2,40	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	2,40	1,20	0,00

d,min	733,264	0,142		mult.de CURV,	mult.de CURV,	
fck	~EI ,EST I	d,adt	Min,curv,ELU	limELU	limELS	resíduo
30	181,695	0,150	0,06667	2,500	1,610	-0,010
	tf.m²	m	1/m			

α 0,310

m,borda = α . m,p

mk,p	mk,borda	mk,medio	k,plast,max	mult. de Curv,nec		
4,85	1,50	3,600	74%	1,60	4 F55	6
tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m		ok	14 P55	16

Condição de atendimento x/d<=0,26, ou seja :

$\mu \leq 0{,}186$ Limite do DOM.2 c/ DOM.3 $\rho \cong 0{,}00869$ $betay = 0{,}2075$ As,L 8,62 cm²/m ρ,L 0,00575

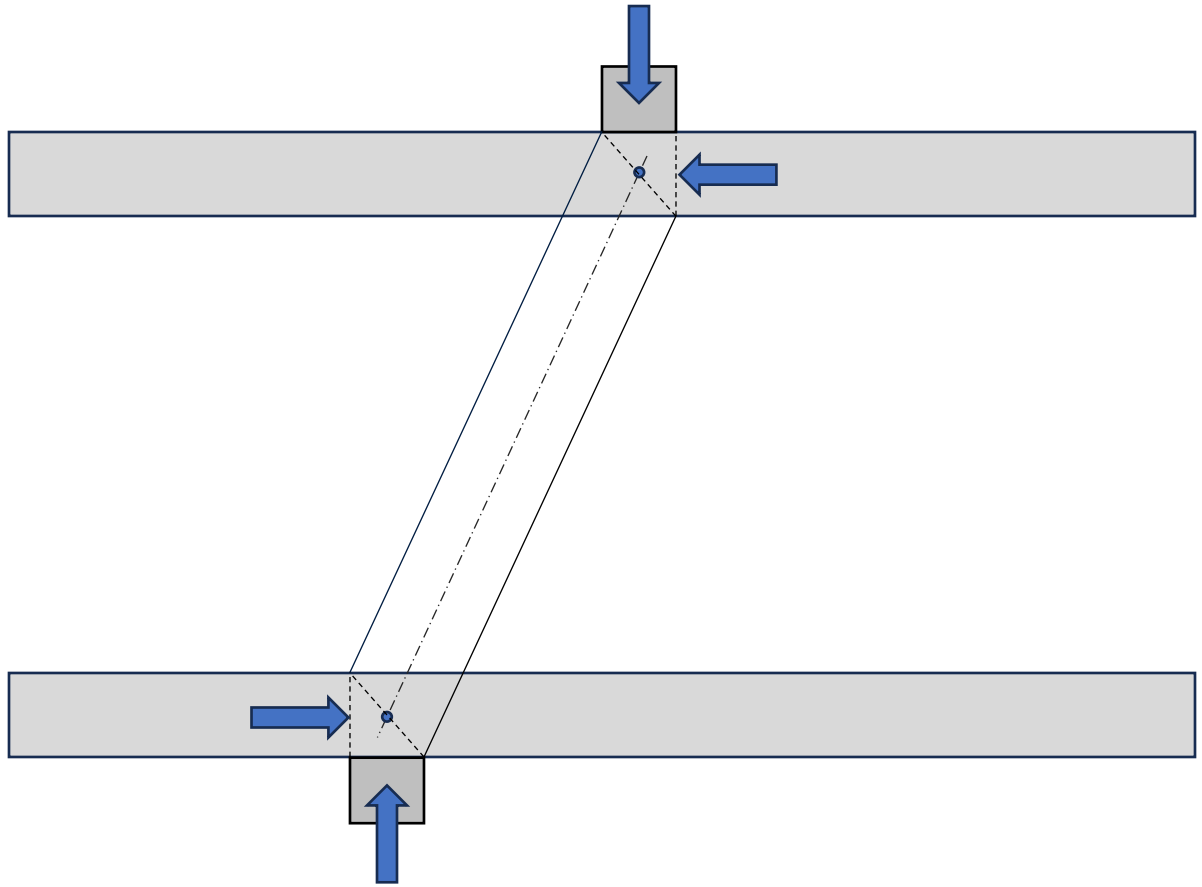
para o dimensinamento da armadura com o momento plastificado $betaz = 0{,}896$

Mresult, EST I
44,1048
tf.m

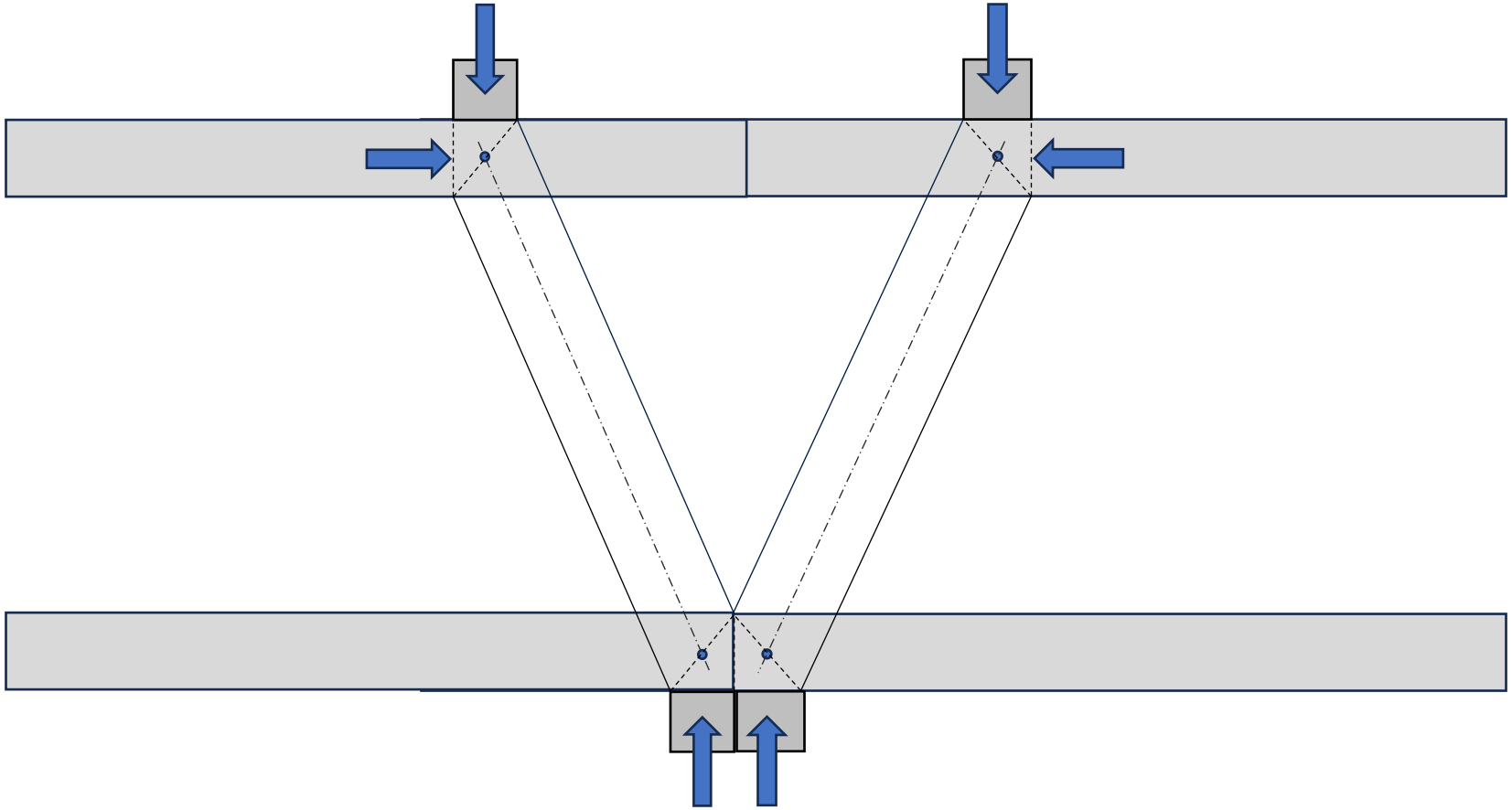
Mresult,após,plast. 46,81 tf.m

Extra,Seg 1,06

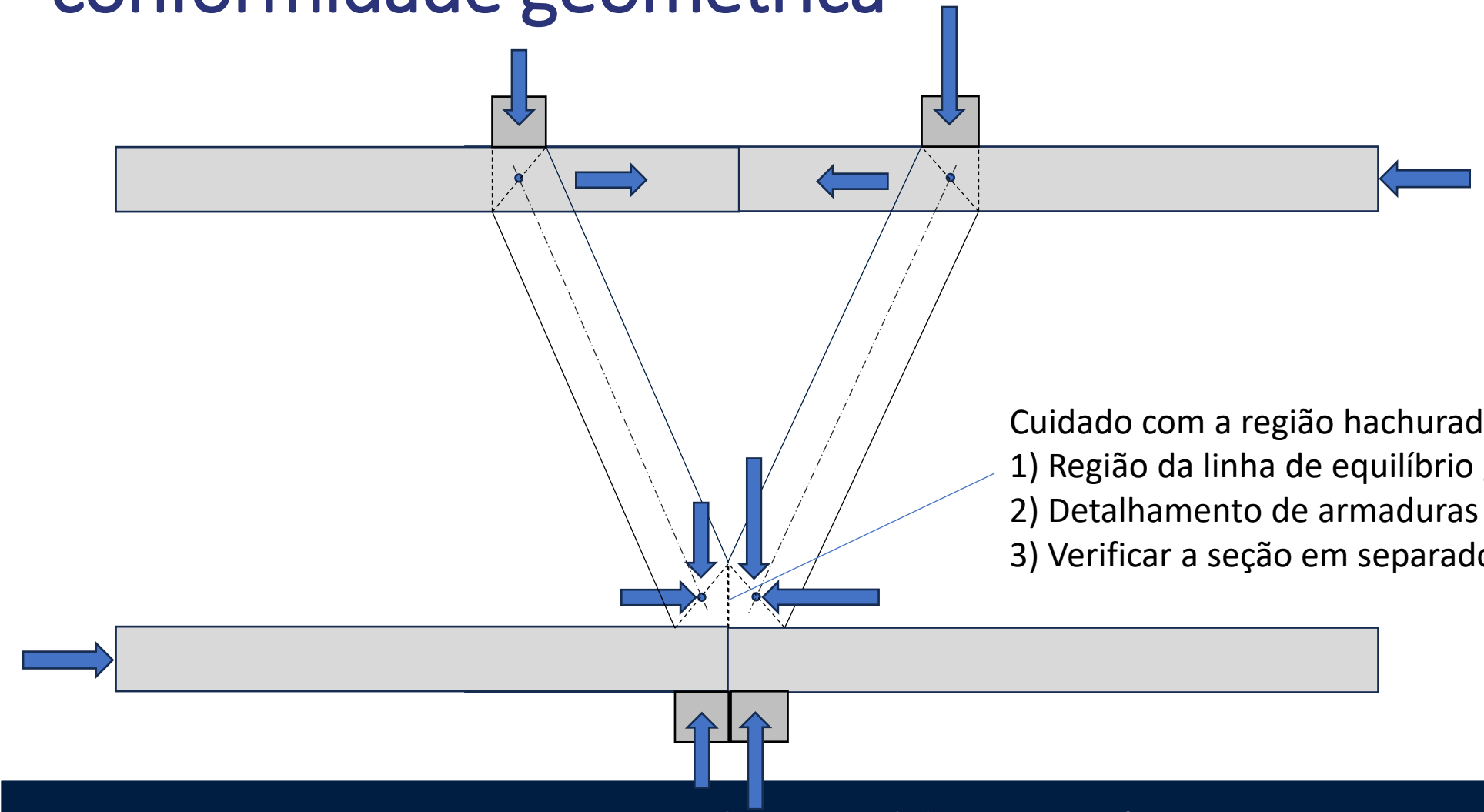
8) Pilares inclinados – estudo preliminar – para conformidade geométrica



8) Pilares inclinados – estudo preliminar – para conformidade geométrica



8) Pilares inclinados – estudo preliminar – para conformidade geométrica



Cuidado com a região hachurada:
1) Região da linha de equilíbrio global
2) Detalhamento de armaduras dificultado
3) Verificar a seção em separado do pilar

Alertas e validações com foco no projeto estrutural

Francisco Paulo Graziano – Pasqua&Graziano

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL
ABECE



OBRIGADO

Até o próximo ENECE