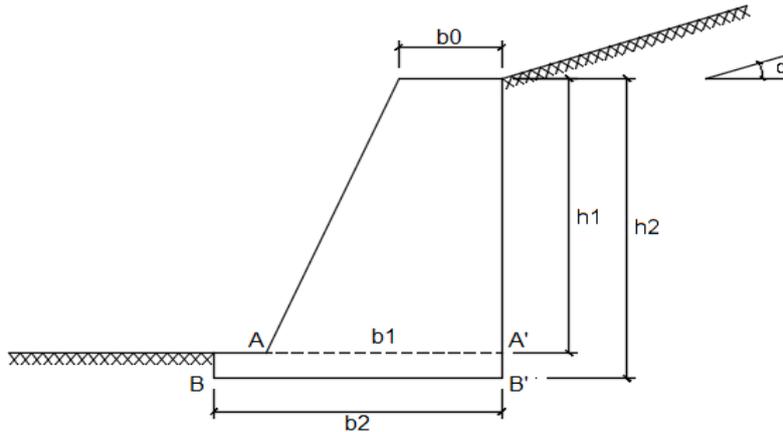


Muro de arrimo



• Propriedades geométricas:

$h_1 =$	2,1 m	(Altura do muro medida da seção AA' até o topo)
$h_2 =$	2,1 m	(Altura do muro medida da seção BB' até o topo)
$h_0 =$	2 m	(Altura de terra equivalente à sobrecarga)
$b_0 =$	1,2 m	(Largura do topo do muro)
$b_1 =$	1,2 m	(Largura do muro na seção AA')
$b_2 =$	1,2 m	(Largura do muro na seção BB')

OBS.: A altura de terra equivalente à sobrecarga é calculada dividindo a sobrecarga pelo peso específico do solo. Fisicamente, ela corresponde a altura de solo que exerceria uma pressão sobre o talude igual a pressão exercida pela sobrecarga

• Propriedade dos materiais:

$\phi =$	35 Graus	(Ângulo de atrito do solo)
$\phi_1 =$	17,5 Graus	(Ângulo de rugosidade do muro)
$\alpha =$	0 Graus	(Ângulo de inclinação do terreno adjacente)
$\gamma_{\text{solo}} =$	17 kN/m ³	(Peso específico do solo)
$\gamma_{\text{alv}} =$	19 kN/m ³	(Peso específico do material do qual o muro é feito)
$\sigma_{\text{adm, solo}} =$	200 kN/m ²	(Tensão admissível do solo)
$\sigma_{\text{adm, alv}} =$	1000 kN/m ²	(Tensão admissível do material de que é feito o muro)

• Verificação da estabilidade da seção AA':

Cálculo do ângulo δ :

δ é o ângulo que a força de empuxo forma com a horizontal. Ele é igual a soma de ϕ_1 com o ângulo que a face do muro em contato com o solo forma com a vertical. Portanto, $\delta = \phi_1$

No livro "Caderno de Muros de Arrimo" do autor Antonio Moliterno são sugeridos os seguintes valores para o ângulo ϕ_1 :

$\phi_1 = 0$	(Ângulo para muros lisos - Ex.: Muro cimentado ou pintado com pixe)
$\phi_1 = 0,5 \cdot \phi$	(Ângulo para muros parcialmente rugosos)
$\phi_1 = \phi$	(Ângulo para muros rugosos)

$\delta =$ 17,5 Graus (Valor adotado para o ângulo δ)

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo do solo:

O cálculo do coeficiente de empuxo ativo do solo (K_a) foi realizado utilizando a fórmula mais apropriada para o Método de Coulomb

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\beta + \phi)}{\text{sen}^2\beta \cdot \text{sen}(\beta - \phi_1) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi - \alpha) \cdot \text{sen}(\phi + \phi_1)}{\text{sen}(\beta - \phi_1) \cdot \text{sen}(\beta + \alpha)}} \right]^2}$$

β = Ângulo que a face do muro em contato com o solo forma com a horizontal

$$\beta = 90^\circ$$

$$K_a = 0,2461$$

Cálculo do peso próprio do muro:

O muro foi dimensionado através da análise das forças que atuam em uma porção de apenas 1 metro de comprimento do mesmo. Portanto, o peso próprio foi calculado multiplicando a área da seção transversal do muro por 1 e pelo peso específico do material do qual ele é feito

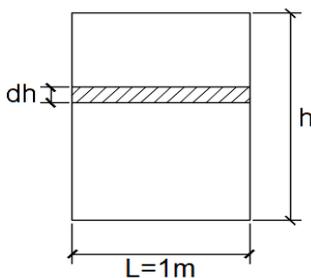
$$A_{st} = \frac{(b_1 + b_0) \cdot h_1}{2} \quad (\text{Área da seção transversal do muro compreendida acima da Seção AA'})$$

$$\gamma_{alv} = 19 \text{ kN/m}^3 \quad (\text{Peso específico do material do qual o muro é feito})$$

$$P = A_{st} \cdot \gamma_{alv}$$

$$P = 47,88 \text{ kN} \quad (\text{Peso próprio do muro})$$

Cálculo do empuxo:



$$\sigma_h = K_a \cdot \sigma_v \quad (\text{Tensão na horizontal})$$

$$\sigma_v = \gamma_{solo} \cdot h \quad (\text{Tensão na vertical})$$

$$dA = dh \cdot L = dh \quad (\text{Elemento infinitesimal de área})$$

$$\sigma_h = \frac{dE}{dA} = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h$$

$$dE = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dA = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dh$$

$$E = \int_0^h dE = \int_0^h K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dh = K_a \cdot \gamma_{solo} \int_0^h h \cdot dh$$

$$E = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot \left[\frac{h^2}{2} \right]_0^h$$

$$E = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h^2 \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos não coesivos})$$

$$E = \frac{1}{2} Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h^2 - 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{Ka} \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos coesivos})$$

$$E = \frac{1}{2} Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot (H^2 - h_0^2) \quad ; \quad H = h + h_0 \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos não coesivos com sobrecarga})$$

O dimensionamento foi feito para um solo não coesivo, pois o empuxo gerado por esse tipo de solo é maior do que o de um solo coesivo nas mesmas condições. Dessa forma, o dimensionamento fica a favor da segurança

Conforme mencionado anteriormente, o dimensionamento foi feito através da análise das forças atuando em apenas 1 metro de comprimento do muro

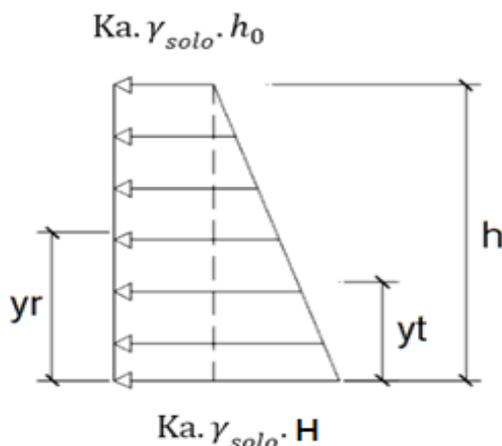
$$E = 26,80 \text{ kN}$$

$$E_h = 25,56 \text{ kN} \quad (\text{Componente horizontal do empuxo})$$

$$E_v = 8,06 \text{ kN} \quad (\text{Componente vertical do empuxo})$$

Cálculo do ponto de aplicação do empuxo:

A altura do ponto de aplicação do empuxo, representado nesse memorial pela letra y , foi calculado em relação a Seção AA'



y_r = Altura do centróide do retângulo

y_t = Altura do centróide do triângulo

A ilustração ao lado representa as pressões atuantes no muro ao longo de sua altura h

$$y = \frac{y_r \cdot A_r + y_t \cdot A_t}{A_r + A_t}$$

A_r = Área do retângulo

A_t = Área do triângulo

$$y_r \cdot A_r = \frac{h}{2} (h \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) = \frac{h^2 \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0}{2}$$

$$y_t \cdot A_t = \frac{h}{3} \cdot \frac{(Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H - Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) \cdot h}{2} = \frac{Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H \cdot h^2}{6} - \frac{Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0 \cdot h^2}{6} \quad ; \quad H = h + h_0$$

$$A_r = h \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0$$

$$At = \frac{(Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H - Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) \cdot h}{2} \quad ; \quad H = h + h_0$$

Fazendo as devidas substituições se obtém a fórmula final para o cálculo de y

$$y = \frac{h}{3} \cdot \frac{(2h_0 + H)}{(h_0 + H)} \quad ; \quad H = h + h_0$$

$$h_1 = 2,1 \text{ m}$$

$$h_0 = 2 \text{ m}$$

$$H = 4,1 \text{ m}$$

$$y = 0,93 \text{ m}$$

Cálculo do momento estabilizador:

As forças que produzem momentos fletores que tendem a estabilizar o muro são a força peso e a componente vertical da força de empuxo. Esses momentos foram calculados em relação ao ponto A (Ver ilustração no início do memorial)

$$M_E = P \cdot x + E_v \cdot b_1 \quad (\text{Momento estabilizador})$$

x = Coordenada horizontal do centro de gravidade do muro, calculada com origem no ponto A

$$M_E = 38,40 \text{ kNm}$$

Cálculo do momento de tombamento:

A única força que produz momento fletor que tende a tombar o muro é a componente horizontal da força de empuxo. Esse momento fletor deve ser calculado em relação ao mesmo ponto do momento estabilizador, ou seja, ponto A

$$M_T = E_h \cdot y \quad (\text{Momento de tombamento})$$

$$y = 0,93 \text{ m}$$

$$M_T = 23,76 \text{ kNm}$$

Cálculo do ponto de aplicação da força resultante R:

A força resultante R corresponde a força que a base do muro na seção AA' aplica na região abaixo dela. Seu ponto de aplicação em relação ao ponto A, é representado pela letra c

$$V_R = \sum F_v = P + E_v \quad (\text{Componente vertical da força resultante R})$$

$$H_R = \sum F_h = E_h \quad (\text{Componente horizontal da força resultante R})$$

$$c = \frac{M_E - M_T}{V_R}$$

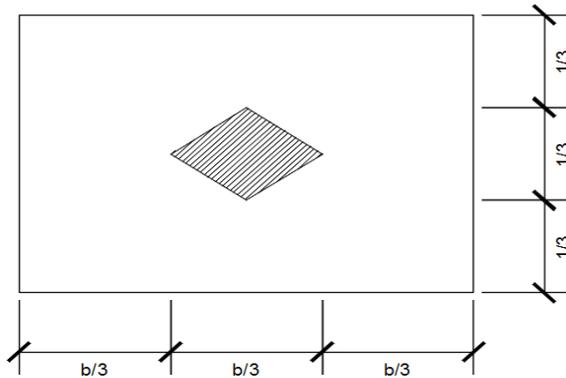
$c = 0,26 \text{ m}$

Cálculo da excentricidade da força resultante R:

A excentricidade da força resultante R corresponde a distância da força resultante R até o centro da seção AA'

$$e = \frac{b_1}{2} - c \quad (\text{Excentricidade da força resultante R})$$

Cálculo da tensão de compressão na seção AA':



A fórmula para o cálculo da maior tensão de compressão na seção AA' irá depender do ponto de aplicação da força resultante R. Se essa força estiver sendo aplicada dentro do núcleo central de inércia da seção (Losango da figura acima), toda a seção estará submetida a compressão, caso contrário apenas uma fração da seção estará comprimida

$$\sigma_1 = \frac{V_R}{b} \left(1 + \frac{6 \cdot e}{b} \right) \quad (\text{Máxima tensão de compressão para força resultante R dentro do núcleo central de inércia})$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot V_R}{3 \cdot c} \quad (\text{Máxima tensão de compressão para força resultante R fora do núcleo central de inércia})$$

A condição para que a força resultante R esteja dentro do núcleo central de inércia é que $b/3 \leq c \leq 2b/3$

$c = 0,26 \text{ m}$
 $b/3 = 0,40 \text{ m}$
 $(2 \cdot b)/3 = 0,80 \text{ m}$

Força resultante R se encontra fora do núcleo central de inércia da seção AA'

$\sigma_1 = 142,48 \text{ kN/m}^2$

1ª Verificação:

Pelo menos metade da seção AA' deve estar comprimida. Isso ocorre para $b/6 \leq c \leq (5b)/6$

$c = 0,26 \text{ m}$

$$b_1/6 = 0,20 \text{ m}$$
$$(5b_1)/6 = 1,00 \text{ m}$$

$$b_1/6 \leq c \leq (5b_1)/6 \quad \text{OK}$$

2ª Verificação:

A máxima tensão de compressão atuando na seção AA' deve ser menor que a tensão admissível do material do qual é feito o muro. Caso $h_1=h_2$, a máxima tensão de compressão atuando na seção AA' deve ser menor que a tensão admissível do solo

$$\sigma_1 = 142,48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{adm,alv} = 1000 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{adm,solo} = 200 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 \leq \sigma_{adm} \quad \text{OK}$$

3ª Verificação:

Para garantir a segurança contra o tombamento do muro, o momento estabilizador deve ser 50% maior que o momento de tombamento, ou seja, $(M_E/M_T) \geq 1,5$

$$M_E = 38,40 \text{ kNm}$$

$$M_T = 23,76 \text{ kNm}$$

$$(M_E/M_T) \geq 1,5 \quad \text{OK}$$

4ª Verificação:

A altura h_1 deve ser menor ou igual a altura h_2 (Ver ilustração no início do memorial)

$$h_1 = 2,1 \text{ m}$$

$$h_2 = 2,1 \text{ m}$$

$$h_1 \leq h_2 \quad \text{OK}$$

5ª Verificação:

A largura b_1 deve ser menor ou igual a largura b_2 (Ver ilustração no início do memorial)

$$b_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$b_2 = 1,2 \text{ m}$$

$$b_1 \leq b_2 \quad \text{OK}$$

• Verificação da estabilidade da seção BB':

Calculo do ângulo δ :

δ é o ângulo que a força de empuxo forma com a horizontal. Ele é igual a soma de φ_1 com o ângulo que a face do muro em contato com o solo forma com a vertical. Portanto, $\delta = \varphi_1$

No livro "Caderno de Muros de Arrimo" do autor Antonio Moliterno são sugeridos os seguintes valores para o ângulo φ_1 :

- $\varphi_1 = 0$ (Ângulo para muros lisos - Ex.: Muro cimentado ou pintado com pixe)
- $\varphi_1 = 0,5 \cdot \phi$ (Ângulo para muros parcialmente rugosos)
- $\varphi_1 = \phi$ (Ângulo para muros rugosos)

$\delta = 17,5$ Graus (Valor adotado para o ângulo δ)

Cálculo do coeficiente de empuxo ativo do solo:

O cálculo do coeficiente de empuxo ativo do solo (K_a) foi realizado utilizando a fórmula mais apropriada para o Método de Coulomb

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\beta + \phi)}{\text{sen}^2\beta \cdot \text{sen}(\beta - \varphi_1) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi - \alpha) \cdot \text{sen}(\phi + \varphi_1)}{\text{sen}(\beta - \varphi_1) \cdot \text{sen}(\beta + \alpha)}} \right]^2}$$

$\beta = \hat{\text{Ângulo}} \text{ que a face do muro em contato com o solo forma com a horizontal}$

$\beta = 90^\circ$

$K_a = 0,2461$

Cálculo do peso próprio do muro:

O muro foi dimensionado através da análise das forças que atuam em uma porção de apenas 1 metro de comprimento do mesmo. Portanto, o peso próprio foi calculado multiplicando a área da seção transversal do muro por 1 e pelo peso específico do material do qual ele é feito

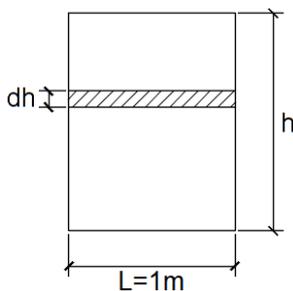
$$A_{st} = \frac{(b_1 + b_0) \cdot h_1}{2} + b_2 \cdot (h_2 - h_1)$$

(Área da seção transversal do muro compreendida acima da Seção BB')

$\gamma_{alv} = 19 \text{ kN/m}^3$ (Peso específico do material do qual o muro é feito)

$P = A_{st} \cdot \gamma_{alv} = 47,88 \text{ kN}$ (Peso próprio do muro)

Cálculo do empuxo:



$$\sigma_h = K_a \cdot \sigma_v$$

(Tensão na horizontal)

$$\sigma_v = \gamma_{solo} \cdot h$$

(Tensão na vertical)

$$dA = dh \cdot L = dh$$

(Elemento infinitesimal de área)

$$\sigma_h = \frac{dE}{dA} = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h$$

$$dE = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dA = K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dh$$

$$E = \int_0^h dE = \int_0^h K_a \cdot \gamma_{solo} \cdot h \cdot dh = K_a \cdot \gamma_{solo} \int_0^h h \cdot dh$$

$$E = Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot \left[\frac{h^2}{2} \right]_0^h$$

$$E = \frac{1}{2} Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h^2 \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos não coesivos})$$

$$E = \frac{1}{2} Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h^2 - 2 \cdot c \cdot h \cdot \sqrt{Ka} \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos coesivos})$$

$$E = \frac{1}{2} Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot (H^2 - h_0^2) ; \quad H = h + h_0 \quad (\text{Fórmula do empuxo para solos não coesivos com sobrecarga})$$

O dimensionamento foi feito para um solo não coesivo, pois o empuxo gerado por esse tipo de solo é maior do que a de um solo coesivo nas mesmas condições. Dessa forma, o dimensionamento fica a favor da segurança

Conforme mencionado anteriormente, o dimensionamento foi feito através da análise das forças atuando em apenas 1 metro de comprimento do muro

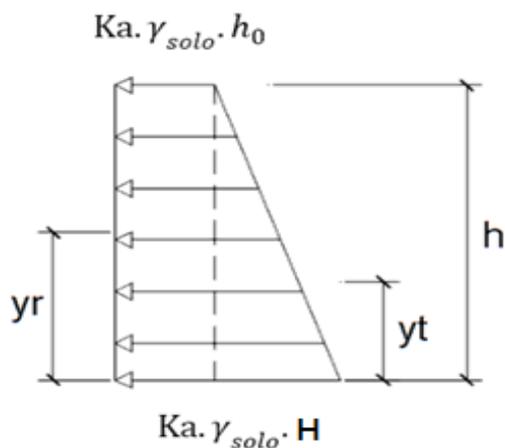
$$E = 26,80 \text{ kN}$$

$$E_h = 25,56 \text{ kN} \quad (\text{Componente horizontal do empuxo})$$

$$E_v = 8,06 \text{ kN} \quad (\text{Componente vertical do empuxo})$$

Cálculo do ponto de aplicação do empuxo:

A altura do ponto de aplicação do empuxo, representado nesse memorial pela letra y, foi calculado em relação a Seção BB'



y_r = Altura do centróide do retângulo

y_t = Altura do centróide do triângulo

A ilustração ao lado representa as pressões atuantes no muro ao longo de sua altura h

$$y = \frac{y_r \cdot A_r + y_t \cdot A_t}{A_r + A_t}$$

A_r = Área do retângulo

A_t = Área do triângulo

$$y_r \cdot A_r = \frac{h}{2} (h \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) = \frac{h^2 \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0}{2}$$

$$y_t \cdot At = \frac{h}{3} \cdot \frac{(Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H - Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) \cdot h}{2} = \frac{Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H \cdot h^2}{6} - \frac{Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0 \cdot h^2}{6} \quad ; \quad H = h + h_0$$

$$Ar = h \cdot Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0$$

$$At = \frac{(Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot H - Ka \cdot \gamma_{solo} \cdot h_0) \cdot h}{2} \quad ; \quad H = h + h_0$$

Fazendo as devidas substituições se obtém a fórmula final para o cálculo de y

$$y = \frac{h}{3} \cdot \frac{(2h_0 + H)}{(h_0 + H)} \quad ; \quad H = h + h_0$$

$$h_2 = 2,1 \text{ m}$$

$$h_0 = 2 \text{ m}$$

$$H = 4,1 \text{ m}$$

$$y = 0,93 \text{ m}$$

Cálculo do momento estabilizador:

As forças que produzem momentos fletores que tendem a estabilizar o muro são a força peso e a componente vertical da força de empuxo. Esses momentos foram calculados em relação ao ponto B (Ver ilustração no início do memorial)

$$M_E = P \cdot x + E_v \cdot b_2 \quad (\text{Momento estabilizador})$$

x = Coordenada horizontal do centro de gravidade do muro, calculada com origem no ponto B

$$M_E = 38,40 \text{ kNm}$$

Cálculo do momento de tombamento:

A única força que produz momento fletor que tende a tombar o muro é a componente horizontal da força de empuxo. Esse momento fletor deve ser calculado em relação ao mesmo ponto do momento estabilizador, ou seja, ponto B

$$M_T = E_h \cdot y \quad (\text{Momento de tombamento})$$

$$y = 0,93 \text{ m}$$

$$M_T = 23,76 \text{ kNm}$$

Cálculo do ponto de aplicação da força resultante R:

A força resultante R corresponde a força que a base do muro na seção BB' aplica na região abaixo dela. Seu ponto de aplicação em relação ao ponto B, é representado pela letra c

$$V_R = \sum F_v = P + E_v \quad (\text{Componente vertical da força resultante R})$$

$$H_R = \sum F_h = E_h \quad \text{(Componente horizontal da força resultante R)}$$

$$c = \frac{M_E - M_T}{V_R}$$

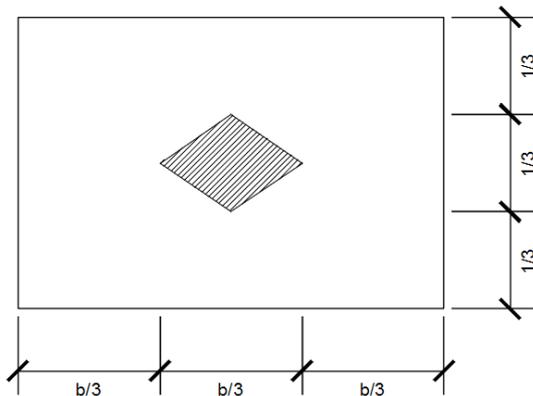
$$c = 0,26 \text{ m}$$

Cálculo da excentricidade da força resultante R:

A excentricidade da força resultante R corresponde a distância da força resultante R até o centro da seção BB'

$$e = \frac{b^2}{2} - c \quad \text{(Excentricidade da força resultante R)}$$

Cálculo da tensão de compressão na seção BB':



A fórmula para o cálculo da maior tensão de compressão na seção BB' irá depender do ponto de aplicação da força resultante R. Se essa força estiver sendo aplicada dentro do núcleo central de inércia da seção (Losango da figura acima), toda a seção estará submetida a compressão, caso contrário apenas uma fração da seção estará comprimida

$$\sigma_1 = \frac{V_R}{b} \left(1 + \frac{6 \cdot e}{b} \right) \quad \text{(Máxima tensão de compressão para força resultante R dentro do núcleo central de inércia)}$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot V_R}{3 \cdot c} \quad \text{(Máxima tensão de compressão para força resultante R fora do núcleo central de inércia)}$$

A condição para que a força resultante R esteja dentro do núcleo central de inércia é que $b/3 \leq c \leq 2b/3$

$$\begin{aligned} c &= 0,26 \text{ m} \\ b/3 &= 0,40 \text{ m} \\ (2 \cdot b)/3 &= 0,80 \text{ m} \end{aligned}$$

Força resultante R se encontra fora do núcleo central de inércia da seção BB'

$$\sigma_1 = 142,48 \text{ kN/m}^2$$

1ª Verificação:

Pelo menos metade da seção BB' deve estar comprimida. Isso ocorre para $b_2/6 \leq c \leq (5b_2)/6$

$$\begin{aligned}c &= 0,26 \text{ m} \\ b_2/6 &= 0,20 \text{ m} \\ (5 \cdot b_2)/6 &= 1,00 \text{ m}\end{aligned}$$

$$b_2/6 \leq c \leq (5b_2)/6 \quad \text{OK}$$

2ª Verificação:

A máxima tensão de compressão atuando na seção BB' deve ser menor que a tensão admissível do solo

$$\sigma_1 = 142,48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{adm, solo} = 200 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 \leq \sigma_{adm, solo} \quad \text{OK}$$

3ª Verificação:

Para garantir a segurança contra o tombamento do muro, o momento estabilizador deve ser 50% maior que o momento de tombamento, ou seja, $(M_E/M_T) \geq 1,5$

$$M_E = 38,40 \text{ kNm}$$

$$M_T = 23,76 \text{ kNm}$$

$$(M_E/M_T) \geq 1,5 \quad \text{OK}$$

4ª Verificação:

Para garantir a segurança contra o deslizamento é necessário que a maior força horizontal atuando no muro, majorada por um fator de segurança de 1,5, seja menor do que a força de cisalhamento que o solo é capaz de suportar. Resumindo, $1,5 \cdot H_R \leq V_R \cdot \text{tg}\phi$

$$\tau = c + \sigma_v \cdot \text{tg}\phi \quad (\text{Tensão de cisalhamento que provoca a ruptura do solo aderido à base do muro})$$

OBS.: Na fórmula acima, c é a coesão do solo, que será adotado como sendo igual a 0

$$\tau = \frac{F_{ruptura}}{A} = \left(\frac{V_R}{A}\right) \text{tg}\phi$$

$$F_{ruptura} = V_R \cdot \text{tg}\phi$$

HR =	25,56
VR =	55,94
tgφ =	0,700208

$$1,5 \cdot H_R \leq V_R \cdot \text{tg}\phi \quad \text{OK}$$