

DIMENSIONAMENTO DE CÁLICE DE FUNDAÇÃO PARA PILARES DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Giovana Marassi Zambon Moscardini
Marcelo Rodrigo de Matos Pedreiro
Roberto Racanicchi
Curso de Engenharia Civil - Universidade Brasil - UB
giovanazambom@gmail.com
mpedreiro.ub@gmail.com
racanicchi.ub@gmail.com

RESUMO

O uso cada vez mais frequente de elementos pré-moldados em estruturas usuais exige que os engenheiros tenham conhecimento técnico e prático a respeito do assunto. A ligação pilar-fundação por meio de cálice é a mais utilizada no Brasil e consiste em um embutimento de parte do pilar pré-moldado em uma cavidade na base do elemento de fundação. No caso de elementos pré-moldados, existe ainda uma vasta lacuna a ser preenchida com base em pesquisas e experimentos. Os principais modelos da literatura a respeito do dimensionamento da ligação cálice de fundação apresentam diferentes recomendações a respeito do comportamento dessa ligação. Desta forma, viu-se necessário um estudo a respeito dos modelos existentes. Este artigo teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para automatizar o dimensionamento de cálice de bloco de fundação para estruturas de concreto pré-moldado, através de uma análise crítica dos modelos já existentes sobre esta ligação.

Palavras-chave: Concreto pré-moldado, Cálice de fundação, Colarinho.

Design of the socket foundation for precast concrete column

The increasingly frequent use of precast elements in customary structures requires that engineers have technical and practical knowledge about the subject. The column-foundation connection by means of a socket is the most commonly used in Brazil and consists of an inlaying part of the precast column into a cavity in the base of the foundation element. In the case of precast elements, there is still a vast gap to be filled based on research and experiments. The main models of the literature regarding the design of the socket foundation connection have different recommendations regarding the behavior of this connection. In this

way, a study of the existing models was necessary. This article has as main objective the development of a spreadsheet to automate the design of a socket foundation for precast concrete structures, through a critical analysis of the existing models on this connection.

Key-words: Precast concrete, Socket foundation, Pedestal walls.

1. INTRODUÇÃO

A denominação de concreto pré-moldado corresponde ao emprego de elementos pré-moldados de concreto, ou seja, ao emprego de elementos de concretos moldados fora de sua posição definitiva de utilização na construção. Os sistemas estruturais em concreto pré-moldado, cujos elementos são vigas, pilares, lajes podem ser aplicados em todos os tipos de obras desde casas de pequeno porte até aeroportos, fábricas, escolas, entre outros.

Devido ao amplo espectro de utilização as estruturas pré-moldadas vêm ganhando espaço na construção civil, devido ao seu ganho de tempo na execução, aumento da qualidade, limitação de espaço para grandes canteiros de obras e também pela falta de mão de obra.

Os projetos estruturais em concreto pré-moldado quando comparados com estruturas de concreto armado, as principais diferenças na análise estrutural residem nos tipos de ligações entre os seus elementos assim como na verificação das situações de montagem.

Toda ligação tem como principal objetivo estrutural a transferência dos esforços entre os elementos, a fim de permitir a interação estrutural entre todas as partes, garantindo a solidez e a estabilidade da construção ao longo de sua vida útil. Sempre deve-se salientar que ligações são regiões de descontinuidade onde ocorrem concentrações de tensões e constituem um ponto delicado no que se refere ao dimensionamento e montagem das estruturas de concreto pré-moldado. Assim, estudos a respeito das ligações são fundamentais, para que soluções econômicas possam ser sugeridas, sem afetar a segurança estrutural.

O presente trabalho abordará a ligação pilar-fundação, que pode ocorrer de diferentes formas: por meio de cálice, por chapa de base, por emenda da armadura com graute e bainha e por emenda de armaduras salientes.

Dentre os tipos de ligação pilar-fundação, a mais executada no Brasil é a por meio de cálices. O cálice apresenta-se como uma alternativa vantajosa para a ligação pilar-fundação devido principalmente às suas facilidades e rapidez na montagem e boa capacidade de transmissão de forças normais e momentos fletores.

A ligação tipo cálice consiste em uma conformação no elemento estrutural da fundação

para o embutimento de um certo trecho do pilar, denominado de comprimento de embutimento. Os métodos de dimensionamento para o cálice de fundação são baseados no tipo de conformação das paredes dos elementos, a qual pode ser lisa ou rugosa.

No caso de elementos pré-moldados em geral existe vasta lacuna a ser preenchida com base em pesquisas e experimentos. No que diz respeito a blocos de fundação com cálice a situação é ainda pior. Há pouca literatura a respeito do assunto e muitas delas com divergências.

A ABNT através da NBR 9062:2017 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado fixa as condições exigíveis no projeto, na execução e no controle de estruturas pré-moldadas de concreto armado e estruturas mistas ou compostas. No que se refere ao cálice de fundação a referida norma é baseada principalmente (com algumas divergências) no modelo de Leonhardt&Mönnig (1978). O modelo apresentado por Leonhardt&Mönnig (1978) é o que tem sido mais empregado para dimensionamento da ligação pilar-fundação, porém este modelo apresenta algumas simplificações, como a não consideração das forças de atrito que surgem nos cálices com interface lisa durante a transmissão das pressões do pilar para as paredes do colarinho, resultando assim em resultados conservadores.

Ainda há outros renomados modelos difundidos no meio acadêmico e muito utilizado no dimensionamento de blocos de fundação com cálice. São eles: Campos (2010), Canha (2004) e Nunes (2009).

O presente trabalho levantou os principais modelos da literatura a respeito do dimensionamento da ligação cálice de fundação, afim de apresentar uma planilha eletrônica para automatizar o dimensionamento de cálice de bloco de fundação para estruturas de concreto pré-moldado, baseado em recomendações e estudos da literatura.

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 BLOCO DE FUNDAÇÃO

De acordo com a ABNT por meio da NBR 6118:2014 os blocos são estruturas de volume usadas para transmitir às estacas e aos tubulões as cargas de fundação, podendo ser considerados rígidos ou flexíveis.

Para estruturas de concreto pré-moldado, os blocos de fundação são geralmente dotados de um cálice para fazer a ligação entre o pilar e o bloco que pode ser externo (com colarinho), embutido ou parcialmente embutido no elemento estrutural de fundação.

O cálice é a parte do bloco que recebe o pilar pré-moldado, funcionando como um

encaixe entre esses elementos, podendo ter as paredes lisas ou rugosas. O pilar fica em contato com o cálice num trecho denominado comprimento de embutimento. A ligação entre os dois elementos é efetuada após o preenchimento com concreto moldado no local do espaço vazio entre o pilar e o cálice, o qual é denominado de junta.

As paredes de contato do cálice e do pilar podem ser classificadas em cálice com interfaces lisas e cálice com interfaces rugosas, sendo as rugosas com execução nas paredes internas do colarinho e no externamente ao pilar pré-moldado na região de embutimento, chaves de cisalhamento que contribuem para a transferência de esforços na ligação.

Estudos como o de Campos (2010) mostraram que os resultados das áreas de armaduras provenientes da consideração de cálice com interface lisa ou rugosa, submetidos ao mesmo carregamento, e com seção do pilar pré-moldado 40x40cm, indicam que o cálice com interface rugosa, além da redução das áreas de armadura verticais (provenientes do dimensionamento pela teoria da flexão), há um menor consumo de concreto, pois o comprimento de embutimento do cálice para essa situação é menor quando comparado ao cálice de interface lisa.

No entanto, muitas vezes opta-se moldar a ligação com interface lisa pela facilidade construtiva dessa opção. O tempo de execução do cálice rugoso é maior, quando comparado com o liso, visto que as formas do cálice de interface rugosa são mais detalhadas devido a chaves de cisalhamento. Dessa maneira, cada projetista deve fazer uma análise e decidir qual é a melhor interface a ser adotada para a estrutura que está sendo projetada.

Este trabalho irá abordar as propriedades geométricas recomendadas por estudos consagrados na engenharia e no meio científico, assim como as recomendações na da ABNT através da NBR 9062:2017, tanto para cálice com interface lisa, quanto interface rugosa. Após este estudo foi definido a geometria a ser utilizada e para o dimensionamento das armaduras foi utilizado o método de Campos (2010).

2.1.1 RECOMENDAÇÕES DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS NO CÁLICE

A Figura 1 ilustra o modelo simplificado das características geométricas do cálice com colarinho, indicado por Leonhardt&Mönnig (1978) e texto base para a NBR 9062(ABNT, 2017)

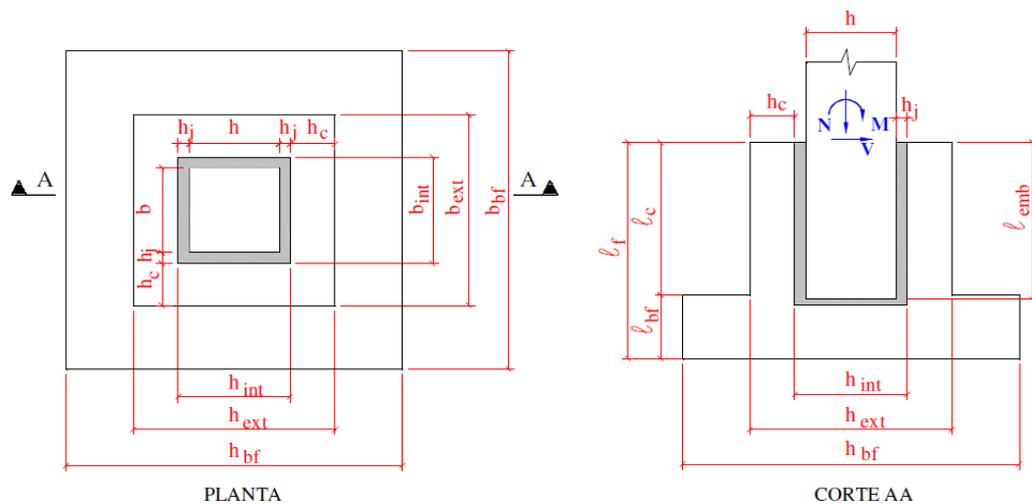


Figura 1 - Características geométricas do cálice com colarinho.

Fonte: Campos (2010)

onde:

b : Base da seção transversal do pilar

b_{bf} : Base da seção em planta da base da fundação

b_{int}/b_{ext} : Base interna/Base externa entre as paredes do colarinho

h : Largura da seção transversal do pilar

h_{bf} : Largura da seção em planta da base da fundação

h_{int}/h_{ext} : Largura interna/Largura externa entre as paredes do colarinho

h_j : Espessura da junta de ligação do cálice com o pilar

h_c : Espessura da parede do colarinho

l_{bf} : Espessura da base da fundação

l_c : Comprimento do consolo

l_f : Comprimento da fundação

l_{emb} : Comprimento de embutimento do pilar no cálice (não considerando a altura da junta abaixo do pilar)

N, M e V : Esforços solicitantes atuantes na ligação

2.1.2 ESPESSURA DAS PAREDES DO COLARINHO (h_c)

De acordo com a NBR 9062 (ABNT,2017) as paredes dos colarinhos devem ter espessura maior que 10cm.

Segundo Leonhardt&Mönnig (1978) a espessura das paredes do colarinho é definida

por: $h_c \geq \frac{1}{3} \cdot (h_{\text{int}} \text{ ou } b_{\text{int}})$

No estudo de Nunes (2009), foi adotada uma nova relação para a definição dessa espessura, a fim de avaliar o impacto da redução da espessura na resistência do cálice de fundação, sendo proposta para o cálculo da espessura da parede a equação:

$$h_c \geq \frac{1}{3,5} \cdot (h_{\text{int}} \text{ ou } b_{\text{int}})$$

Já segundo Campos (2010) a espessura das paredes do colarinho é definida por:

$$h_c \geq \frac{1}{4} \cdot (h_{\text{int}} \text{ ou } b_{\text{int}})$$

Lembrando que deve-se verificar se o espaço resultante é adequado para o alojamento de todas as armaduras resultantes do dimensionamento, respeitando os valores de cobrimento indicado na norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

Foi adotado a espessura da parede do colarinho proposta por Nunes (2009) em, por ser um valor intermediário entre o mínimo recomendado por Campos (2010) e o valor indicado por Leonhardt&Mönnig (1978).

2.1.3 ESPESSURA DA BASE (l_{bf})

De acordo com NBR 9062 (ABNT, 2017) a espessura mínima da base do cálice deve ser considerada como tendo 20 cm.

2.1.4 ESPESSURA DA JUNTA (h_j)

De acordo com NBR 9062 (ABNT, 2017) o concreto para preenchimento do vazio entre o pilar e o colarinho deve ter a mesma característica que o concreto do bloco, devendo ser previsto tamanho máximo do agregado que permita a vibração e a concretagem.

Segundo Canha (2004) e Campos (2010) a cavidade entre as paredes internas do colarinho e do pilar deve ter espaço suficiente para permitir a entrada do aparelho de vibração. O valor mínimo e usualmente empregado para a espessura da junta é de 5 cm. Essa espessura é importante para acomodação de erros de locação de pilares e desvios da fundação. No caso de graute autoadensável a espessura da junta pode ser reduzida.

2.1.5 COMPRIMENTO DE EMBUTIMENTO NA BASE (l_{emb})

Os comprimentos de embutimento são determinados de acordo com a interface das paredes do colarinho e do pilar: lisa ou rugosa, e de acordo com a excentricidade da força normal: pequena ou grande excentricidade.

De acordo com NBR 9062 (ABNT, 2017) e Campos (2010) o comprimento mínimo do embutimento do pilar na fundação deve seguir o indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comprimento mínimo do embutimento do pilar na fundação

	$M_k/N_k h \leq 0,15$	$M_k/N_k h \geq 2,00$
Interface lisa	$l_{emb} \geq 1,5 h$	$l_{emb} \geq 2,0 h$
Interface rugosa	$l_{emb} \geq 1,2 h$	$l_{emb} \geq 1,6 h$

Fonte: NBR 9062 (ABNT, 2017)

onde:

h é a dimensão paralela ao plano de ação do momento M_k ;

N_k é a força normal atuante no pilar;

l_{emb} é o comprimento de embutimento.

Caso a excentricidade seja maior que 0,15 e menor que 2,0 deve-se interpolar linearmente para valores intermediários da relação $M_k/N_k h$ para definição do comprimento de embutimento.

Nos casos de tração no pilar, deve-se adotar no mínimo L_{emb} multiplicado por 1,15.

O comprimento de embutimento não deve ser inferior a 40 cm e deve ser compatível com o comprimento de ancoragem da armadura do pilar.

Para L_{emb} resultante maior que 200 cm podem ser adotados valores diferentes, desde que seja realizado um estudo da ligação entre o pilar e o colarinho.

Já segundo Leonhardt&Mönnig (1978) o comprimento mínimo do embutimento do pilar na fundação segue o indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comprimento mínimo do embutimento do pilar na fundação -

	$M_k/N_k h \leq 0,15$	$M_k/N_k h \geq 2,00$
Interface lisa	$L_{emb} \geq 1,68 h$	$L_{emb} \geq 2,8 h$
Interface rugosa	$L_{emb} \geq 1,2 h$	$L_{emb} \geq 2,0 h$

Fonte: Leonhardt&Mönnig (1978)

Conforme as Tabelas 1 e 2 pode-se observar que os valores adotados por Leonhardt&Mönnig (1978) são mais conservadores que os descritos na NBR 9062 (ABNT, 2017), com exceção ao comprimento mínimo de embutimento para cálice com interface rugosa e pequena excentricidade, que o valor é o mesmo. O cálculo do comprimento mínimo do embutimento do pilar na fundação foi realizado de acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017).

2.1.6 CHAVE DE CISALHAMENTO (CÁLICE DE INTERFACE RUGOSA)

As chaves de cisalhamento são utilizadas em cálices de interface rugosa, com a função de melhorar a transmissão de tensões de cisalhamento na região de embutimento do pilar pré-moldado no cálice de fundação. Os modelos com interface rugosa, com a utilização de chaves de cisalhamento, apresentaram um comportamento semelhante ao de uma ligação monolítica.

A NBR 9062 (ABNT, 2017) recomenda uma rugosidade mínima de 1 cm a cada 10 cm de junta, para que essa ligação apresente um comportamento monolítico. No entanto, não especifica a que distância esses 10 cm de junta se referem. Assim, será adotado que o comprimento de 10 cm seja igual à soma da base maior da chave e o espaçamento interno entre as chaves, conforme Figura 2.

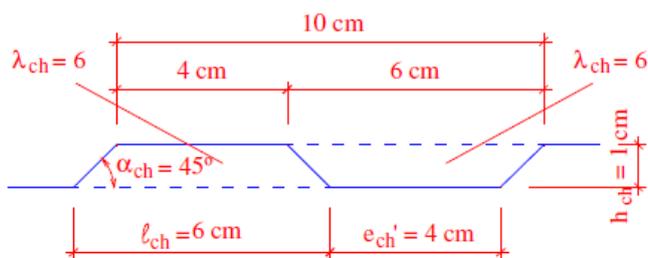


Figura 1 - Dimensões máximas para as chaves de cisalhamento de acordo com a rugosidade mínima

Fonte: ABNT (2017) e Canha (2004)

Para dimensões mínimas das chaves de cisalhamento é indicado que a base maior da chave seja igual a duas vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo e que a altura seja no mínimo equivalente à metade desse agregado. Dessa maneira, ocorre a entrada do agregado graúdo na chave durante a concretagem.

Nos ensaios de Canha (2004), foram utilizadas duas configurações de chaves de cisalhamento, e após análise dos resultados, verificou-se que a resistência experimental resultante foi próxima nos dois modelos. Isso indica que, a modificação nas dimensões das chaves não influencia na resistência do cálice e sim, apenas na rigidez da ligação.

3. PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO

Será apresentado um exemplo de dimensionamento de cálice com interface lisa e posteriormente um de cálice com interface rugosa com o auxílio da planilha desenvolvida. As propriedades geométricas do cálice foram definidas conforme exposto acima e para o dimensionamento das armaduras foi realizado uma análise dos métodos existentes e, por fim, baseou-se nos estudos de Campos (2010).

Os cálculos foram realizados considerando um pilar pré-moldado com seção quadrada.

3.1 CÁLICE COM INTERFACE LISA

Primeiramente deve-se entrar com os dados na tela inicial da planilha. Os dados de entrada são: seção do pilar, esforços de cálculo, características dos materiais, espessura da junta do concreto de preenchimento, cobrimento e bitola da armadura, conforme Figura 3.

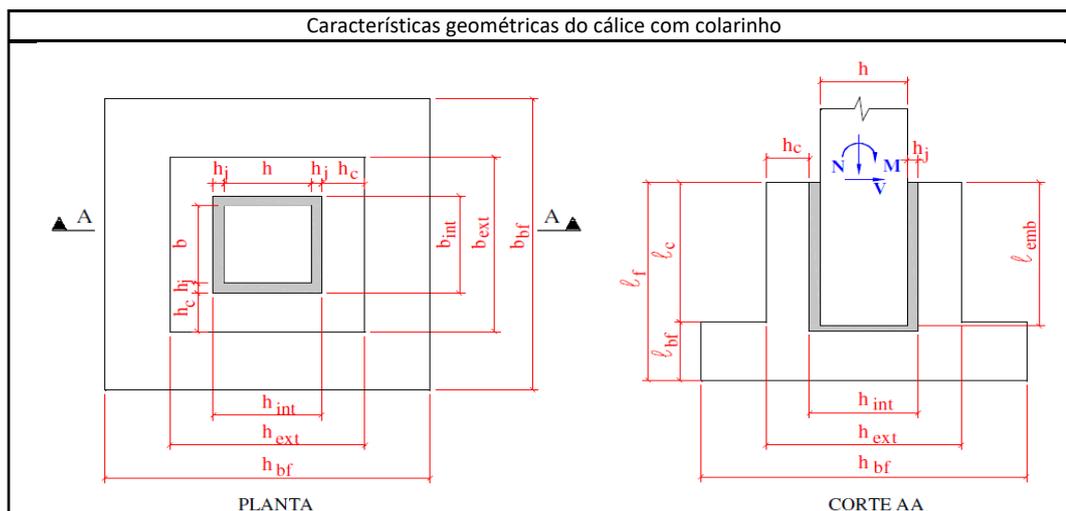
CÁLICE COM INTERFACE LISA	
ENTRADA DE DADOS	
Seção Pilar Quadrado (cm ²)	40,00
Carregamentos	
Nd (kN)	250,00
Md (kN.cm)	20000,00
Vd (kN)	50,00
Características dos materiais	
fy (10 ⁷ Pa)	50,00
fyd (10 ⁷ Pa) - cálculo automático	43,48
fck (MPa)	20,00
fcd (MPa) - cálculo automático	14,29
fctd (MPa) - cálculo automático	1,11
Características Geométricas adotadas	
hj - Junta (cm)	5,00
c - cobrimento da armadura (cm)	2,50
Bitola da armadura (cm)	1,00

Figura 3 - Tela da planilha com os dados de entrada, os quais devem ser inseridos pelo usuário.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.1.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO COLARINHO

Fornecidas as informações iniciais a planilha realiza todos os cálculos automaticamente, iniciando pelo cálculo das características geométricas do colarinho(Figura 4).



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 4 -Tela da planilha com detalhamento das características geométricas do cálice com colarinho.

As características geométricas calculadas estão ilustradas na Figura 5.

CÁLCULOS	
Características Geométricas do Colarinho	
b _{int} e h _{int} (cm)	50,00
h _c - esp. Parede (cm)	15,00
b _{ext} e h _{ext} - ext. entre paredes	80,00
e - excentricidade	2,00
l _{emb} - comp. embutimento (cm)	80,00
l _c - comp. colarinho (cm)	79,00

Verificar se o espaço resultante é adequado para o alojamento das armaduras resultantes do dimensionamento, respeitando os valores de cobertura indicado na norma ABNT NBR 6118:2014

Figura 2. Tela da planilha com os cálculos das características geométricas do colarinho.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Com a geometria definida pode-se partir para o dimensionamento das armaduras:

3.1.2 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL PRINCIPAL LONGITUDINAL ($A_{s,hpl}$)

$$A_{s,hpl} = \frac{H_{supf}}{2 \cdot f_{yd}}$$

Recomenda-se que a armadura $A_{s,hpl}$, seja distribuída nas paredes longitudinais em uma altura de $l_{emb}/3$ a partir do topo do colarinho.

A armadura horizontal principal longitudinal é composta de dois ramos: ramo externo ($A_{s,hpe} = \frac{2}{3} \cdot A_{s,pl}$) localizado no perímetro externo das paredes longitudinais e pelo ramo

interno ($A_{s,hpli} = \frac{1}{3} \cdot A_{s,hpl}$) localizado na parte interna das paredes longitudinais.

O cálculo da armadura horizontal principal longitudinal depende da força de compressão superior oriunda da pressão do pilar na parede transversal frontal que é dada por:

$$H_{sup f} = \frac{M_d - N_d \cdot \left(e_{nb} + \frac{\mu \cdot y' - \mu^2 \cdot (0,5 \cdot h + e_{nb})}{1 + \mu^2} \right) + V_d \cdot \left(l_{emb} - \frac{y' - \mu \cdot (0,5 \cdot h + e_{nb})}{1 + \mu^2} \right)}{l_{emb} - y - y' + \mu \cdot h}$$

onde:

μ é o coeficiente de atrito que para cálice de fundação moldado com utilização de forma de madeira é 0,30;

e_{nb} é a excentricidade da força normal na base da fundação;

y é a distância do ponto de aplicação da resultante de pressão $H_{sup f}$ ao topo do colarinho;

y' é distância do ponto de aplicação da resultante de pressão H_{inf} à base do pilar.

E a força de compressão inferior (H_{inf}) oriunda da pressão do pilar na parede transversal posterior é obtida da equação de equilíbrio das forças horizontais: $H_{inf} = H_{sup f} - V_d$. Portanto a armadura horizontal principal longitudinal é obtida na Figura 6.

Cálculo Armadura horizontal principal longitudinal	
Pressões na Parede	
enb - excentricidade força normal (cm)	10,00
u - coeficiente de atrito	0,30
y e y' - ponto de aplicação (cm)	8,00
Resultante de pressão	
Hsup f (kN) - superior na parede frontal	284,40
Hinf (kN) - inferior na parede posterior	234,40
Área de Armadura horizontal principal longitudinal	
As,hpl (cm2)	3,27
As,hple (cm2)	2,18
As,hpli (cm2)	1,09

Figura 6 - Tela da planilha com os cálculos para armadura horizontal principal longitudinal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.1.3 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL PRINCIPAL TRANSVERSAL ($A_{s,hpt}$)

Há divergências no cálculo da armadura horizontal principal transversal no que se refere a pressão superior aplicada na parede transversal frontal. O modelo apresentado no Manual da Empresa Munterelatom que a pressão causa flexão na parede. Já o modelo apresentado pela norma CNR 10025:1998 indicam que causa tração.

De acordo com Campos (2010), pelos resultados experimentais de Canha verificou-se que a parte superior da parede transversal frontal da ligação é submetida à tração e a flexão, e que a tração prevalece sobre a flexão.

Assim, foi considerado para o cálculo o comportamento conjunto de flexo-tração da parede e, também, considerado somente tração da parede. O valor utilizado foi o maior valor entre os dois. No caso foi considerando apenas a tração na parede transversal frontal.

O valor da pressão é uma soma de duas parcelas:

$$H_{sup f} = H_{sup f-f} + H_{sup f-t}$$

sendo:

$H_{sup f-f}$ parcela da pressão superior que causa flexão na parede transversal frontal

$H_{sup f-t}$ parcela da pressão superior que causa tração na parede transversal frontal

Considerando esforço de flexo-tração atuando na parede transversal frontal as porcentagens observadas da pressão $H_{sup f-f}$ e $H_{sup f-t}$ foram de aproximadamente 15% e 85%. Por questões construtivas também foi sugerido pelos autores as porcentagens de 1% para a força $H_{sup f-f}$ e 100% para a força $H_{sup f-t}$, considerando somente esforço de tração atuando na parede transversal frontal. A armadura horizontal transversal é obtida dividindo a força $H_{sup f}$ em duas parcelas e cada parcela é calculada dividindo a resultante de cada por f_{yd} .

$$A_{s,hpt} = A_{s,hpte} + A_{s,hpti} = \frac{R_{s,hpte}}{f_{yd}} + \frac{R_{s,hpti}}{f_{yd}}$$

A resultante é obtida por:

$$R_{s,hpte} = \frac{N_{sup f-t}}{2} + \frac{M_{sup f-f}}{z} \text{ e } R_{s,hpti} = \frac{N_{sup f-t}}{2} + \frac{M_{sup f-f}}{z}$$

sendo:

$M_{sup f-f}$ momento fletor oriundo da pressão $H_{sup f-f}$;

$N_{sup f-t}$ força normal oriunda da pressão $H_{sup f-t}$;

z é a distancia entre as resultantes $R_{s,hpte}$ e $R_{s,hpti}$.

Segue o cálculo da armadura considerando tração na parede transversal frontal e posteriormente considerando flexo-tração na parede transversal frontal. A armadura horizontal principal transversal é o maior valor conforme Figuras 7 e 8.

Cálculo Armadura horizontal principal transversal	
Considerando tração parede transversal frontal	
Resultante de pressão superior	
Hsup f-f (kN)	0,00
Hsup f-t (kN)	284,40
Força Normal	
Nsup f-t (kN)	142,20
Momento Fletor	
Msup f-f (kN x cm)	0,00
Cálculo das Resultantes	
d	12,00
d'	3,00
z	9,00
Rs,hpte (kN)	71,10
Rs,hpti (kN)	71,10
Área de Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	1,64
As,hpti (cm ²)	1,64
As,hpt (cm²)	3,27
As,hpte (cm²)	2,18
As,hpti (cm²)	1,09

Figura 3. Tela da planilha com os cálculos para armadura horizontal principal transversal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Considerando flexo-tração parede transversal frontal	
Resultante de pressão superior	
Hsup f-f (kN)	42,66
Hsup f-t (kN)	241,74
Força Normal	
Nsup f-t (kN)	120,87
Momento Fletor	
Msup f-f (kN.cm)	426,61
Cálculo das Resultantes	
Rs,hpte (kN)	107,84
Rs,hpti (kN)	13,04
Área de Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	2,48
As,hpti (cm ²)	0,30
As,hpt (cm ²)	2,78
Adotar maior valor	
Área de Armadura horizontal principal transversal	
As,hpt (cm²)	3,27
As,hpte (cm²)	2,18
As,hpti (cm²)	1,09

Figura 8. Tela da planilha com continuação dos cálculos para armadura horizontal principal transversal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.1.4 CÁLCULO DA ARMADURA VERTICAL PRINCIPAL ($A_{s,vp}$)

O dimensionamento da armadura $A_{s,vp}$, e verificação da resistência a compressão do concreto devem ser feitos considerando as paredes longitudinais como consolos, conforme indicado pelo modelo de Leonhardt & Mönning (1978).

A armadura vertical principal é dimensionada conforme o tipo de consolo, sendo especificado, para cada tipo, um modelo de cálculo. Além de dimensionar a armadura, é necessário verificar o esmagamento do concreto da biela de compressão.

Como apresentado na NBR 9062 (ABNT, 2017) são três tipos de consolo e modelos de cálculo. Sendo que β é o ângulo formado entre a biela de compressão e o eixo horizontal, calculado como:

$$\beta = \arctan \left(\frac{l_c - y}{0,85 \cdot h_{ext} - \frac{h_c}{2}} \right)$$

- **Consolo curto** ($1,0 \geq \text{tg } \beta > 0,5$) modelo de biela e tirante

$$A_{s,vp} = \frac{R_{vp}}{f_{yp}}$$

$$R_{vp} = \frac{H_{sup,f}}{2} \cdot \text{tg } \beta$$

$$\sigma_{cb} = \frac{R_{cb}}{h_{bie} \cdot h_c} \leq 0,85 \cdot f_{cd}$$

$$R_{cb} = \frac{H_{sup,f}}{2 \cdot \cos \beta}$$

$$h_{bie} = (0,15 \cdot h_{ext} \cdot \text{sen } \beta) \cdot 2$$

Limita-se a tensão na armadura em 435 MPa e a tensão do concreto em $0,85 \cdot f_{cd}$, por considerar atuação de carga indireta.

- **Consolo muito curto** ($\text{tg } \beta \leq 0,5$) modelo de atrito-cisalhamento

$$A_{s,vp} = \frac{0,8 \cdot \left(\frac{H_{sup,f}}{2} \right)}{f_{yd} \cdot \mu}$$

Sendo que o valor de μ é definido segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017) de acordo com as situações abaixo:

$\mu = 1,4$, para concreto lançado monoliticamente;

$\mu = 1,0$, para concreto lançado sobre concreto endurecido intencionalmente rugoso (5 mm de profundidade a cada 30 mm);

$\mu = 0,6$, para concreto lançado sobre concreto endurecido com interface lisa.

A verificação do esmagamento do concreto é feita em função da tensão decisalhamento de cálculo:

$$\tau_{wd} = \frac{H_{supf}}{2.h_c.d_c} \leq \tau_{wu} = 3,0 + 0,9.\rho.f_{yd} \leq 6MPa$$

Sendo que ρ é a taxa geométrica da armadura vertical principal.

A armadura $A_{s,vp}$ também pode ser calculada igualando a tensão de cisalhamento de cálculo com a tensão de cisalhamento última, o que resulta em:

$$A_{s,vp} = \frac{\left(\frac{H_{supf}}{2} \right) - 3.h_c.d_c}{0,9.f_{yd}}$$

Adotar a maior área de aço entre as calculadas para a armadura $A_{s,vp}$. A tensão na armadura também deve ser limitada em 435 MPa e o resultado de $A_{s,vp}$ não deve ter valor menor que a calculada para o caso de consolo curto.

- **Consolo longo** ($tg \beta > 1,0$) teoria da flexão

As paredes longitudinais devem ser dimensionadas como uma viga em balanço engastada na fundação, onde uma força $H_{supf}/2$ atuante na extremidade gera um momento de engastamento. Para o dimensionamento de $A_{s,vp}$, nesse caso, devem ser adotadas as indicações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Assim, como no caso de consolo muito curto, a armadura $A_{s,vp}$ resultante do dimensionamento, não deve ter área menor quando comparada com a calculada para consolo curto.

Então, mesmo a verificação resultando em consolo longo, como no exemplo, deve-se verificar a armadura $A_{s,vp}$ para consolo curto e utilizar o maior valor, conforme Figura 9.

Cálculo Armadura vertical principal	
Verificação tipo de consolo	
B - ângulo de inclinação biela (graus)	49,57
tg B (graus)	1,17
Cálculo como consolo muito curto	
As,vp (cm ²)	0,00
u	0,00
As,vp (cm ²)	0,00
τwd	0,00
Adotar maior valor	
As,vp (cm²)	0,00
Cálculo como consolo longo	
dc - altura útil (cm)	72,50
Md - momento fletor (kN x cm)	10096,33
kc	7,81
ks	0,024
As,vp (cm²)	3,39
Verificação da força cortante	
Vrd2	385,91
Vsd	142,20
Cálculo como consolo curto	
Rvp (kN)	166,88
As,vp (cm²)	3,84
Rcb (kN)	219,25
hbie (cm)	18,27
σ cd (kN/cm ²)	0,80
0,85 x fcd (kN/cm ²)	1,21
Adotar maior valor entre todos	
Área da Armadura vertical principal	
As,vp (cm²)	3,84

Figura 4 - Tela da planilha com os cálculos para armadura vertical principal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.1.5 CÁLCULO DAS ARMADURAS SECUNDÁRIAS ($A_{s,vs}$ E $A_{s,hs}$)

As armaduras verticais e horizontais secundárias são utilizadas na ligação cálice-fundação para resistir a esforços secundários e controlar a fissuração nas paredes do colarinho.

A armadura vertical secundária é disposta no meio das paredes do colarinho e a armadura horizontal secundária é distribuída ao longo dos 2/3 inferiores da altura útil das paredes longitudinais e transversais.

As armaduras secundárias também são calculadas conforme as recomendações de consolo da NBR 9062 (ABNT,2017).

- Consolo curto ($1,0 \geq tg \beta > 0,5$)

$$A_{s,vs} = 0,40.A_{s,vp}$$

$$A_{s,hs} = 0,25.A_{s,vp}$$

- Consolo muito curto ($tg \beta \leq 0,5$)

$$A_{s,vs} = 0,50.A_{s,vp}$$

$$A_{s,hs} = 0,25.A_{s,vp}$$

Como no caso de $A_{s,vp}$ os valores obtidos para $A_{s,vs}$ e $A_{s,hs}$ não devem ser menores que os calculados para o caso de consolo curto.

- Consolo longo ($tg \beta > 1,0$)

$$A_{s,vs} = 0,10\% * h_c * h_{ext}$$

Na distribuição de $A_{s,vs}$, o espaçamento deve ser menor que $d_c/3$ ou 20 cm.

A armadura horizontal secundária para resistir ao esforço cortante de $H_{sup} f/2$ dever ser calculada segundo os modelos de cálculo I ou II da NBR 6118 (ABNT,2014) para elementos lineares sujeitos a força cortante.

As armaduras $A_{s,vs}$ e $A_{s,hs}$ não devem ter área menor quando comparadas com as calculadas para consolo curto, conforme indicado nas Figuras 10 e 11.

Cálculo Armadura vertical secundária	
Calculo como consolo muito curto	
As,vs (cm ²)	0,00
Calculo como consolo longo	
As,vs (cm ²)	1,20
Calculo como consolo curto	
As,vs (cm ²)	1,54
Adotar maior valor entre todos	
Área da Armadura vertical secundária	
As,vs (cm²)	1,54

Figura 5. Tela da planilha com os cálculos para armadura vertical secundária.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Cálculo Armadura horizontal secundária	
Calculo como consolo muito curto	
As,hs (cm ²)	0,00
Calculo como consolo longo	
As,hs/s (cm ² /cm)	0,0247
As,hs (cm ²)	0,6176
Calculo como consolo curto	
As,hs (cm ²)	0,96
Adotar maior valor entre curto e longo	
Área da Armadura horizontal secundária	
As,hs (cm²)	0,96

Figura 6. Tela da planilha com os cálculos para armadura horizontal secundária.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.1.6 RESULTADOS PARA O CÁLICE COM INTERFACE LISA

A Figura 12 apresenta o dimensionamento do cálice com interface lisa, de acordo com os dados de entrada fornecidos. Constando as características geométricas do cálice, devidamente dimensionado, e suas áreas de armaduras.

CÁLICE COM INTERFACE LISA	
RESUMO	
Características Geométricas	
bint e hint (cm)	50,00
hc - esp. Parede (cm)	15,00
bext e hext - ext. entre paredes	80,00
lomb - comp. embutimento (cm)	80,00
lc - comp. colarinho (cm)	79,00
Armadura horizontal principal	
As,hpl (cm ²)	3,27
As,hpt (cm ²)	3,27
As,hple (cm ²)	2,18
As,hpte (cm ²)	2,18
As,hpli (cm ²)	1,09
As,hpti (cm ²)	1,09
Armadura vertical principal	
As,vp (cm ²)	3,84
Armadura vertical secundária	
As,vs (cm ²)	1,54
Armadura horizontal secundária	
As,hs (cm ²)	0,96

Figura 7. Tela da planilha com o dimensionamento do cálice com interface lisa.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2 CÁLICE COM INTERFACE RUGOSA

O cálice é definido como rugoso quando são executadas, nas paredes internas do colarinho e no pilar pré-moldado na região de embutimento, chaves de cisalhamento que contribuem para a transferência de esforços na ligação. Inicialmente são informados os esforços de cálculo, características dos materiais e espessura da junta do concreto de preenchimento, o cobrimento e bitola da armadura. Os dados na tela inicial da planilha (Figura 13),

CALICE COM INTERFACE RUGOSA	
ENTRADA DE DADOS	
Seção Pilar Quadrado (cm ²)	40,00
Carregamentos	
Nd (kN)	250,00
Md (kN.cm)	20000,00
Vd (kN)	50,00
Características dos materiais	
f _y (10 ⁷ Pa)	50,00
f _{yd} (10 ⁷ Pa) - cálculo automático	43,48
f _{ck} (MPa)	20,00
f _{cd} (MPa) - cálculo automático	14,29
f _{ctd} (MPa) - cálculo automático	1,11
Características Geométricas adotadas	
h _j - Junta (cm)	5,00
c - cobrimento da armadura (cm)	2,50
Bitola da armadura (cm)	1,00

Figura 8. Tela da planilha com os dados de entrada, os quais devem ser inseridos pelo usuário. Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO COLARINHO

Fornecidas as informações iniciais a planilha realiza todos os cálculos automaticamente, iniciando pelo cálculo das características geométricas do colarinho (Figura 14).

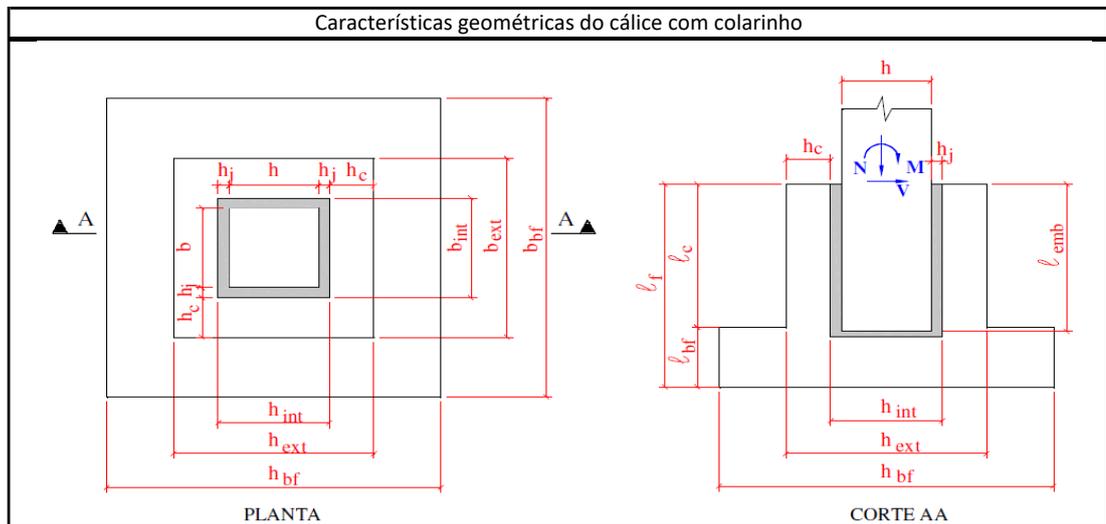


Figura 14 -Tela da planilha com detalhamento das características geométricas do cálice com colarinho.

Fonte: Próprio Autor (2021)

As características geométricas calculadas estão ilustradas na Figura 15.

CÁLCULOS	
Características Geométricas do Colarinho	
bint e hint (cm)	50,00
hc - esp. Parede (cm)	15,00
bext e hext - ext. entre paredes	80,00
e - excentricidade	2,00
lomb - comp. embutimento (cm)	64,00
lc - comp. colarinho (cm)	63,00

Verificar se o espaço resultante é adequado para o alojamento das armaduras resultantes do dimensionamento, respeitando os valores de cobrimento indicado na norma ABNT NBR 6118:2014

Figura 19. Tela da planilha com os cálculos das características geométricas do colarinho.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.2 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL PRINCIPAL LONGITUDINAL ($A_{s,hpl}$)

A armadura deve ser dimensionada considerando a atuação das pressões $H_{sup f}$ e $H_{sup p}$ nas paredes transversais do cálice. As pressões atuantes nas paredes transversais foram calculadas de acordo com o método indicado em Campos (2010), é necessário calcular a área de aço resultante pela atuação da pressão atuante na parede frontal e também pela ação de uma força na parede posterior. O dimensionamento da armadura horizontal principal longitudinal é

dado pelo maior valor: $A_{s,hpl} = \frac{H_{sup f}}{2 \cdot f_{yd}}$ ou $A_{s,hpl} = \frac{H_{sup p}}{2 \cdot f_{yd}}$

Cálculo Armadura horizontal principal longitudinal	
Pressões na Parede	
Mbd (kN.cm)	23200,00
dcc (cm)	72,00
zcc (cm)	64,80
Rcc (kN)	483,41
Bf (graus)	60
Hf (kN)	279,10
Hsup f (kN)	167,46
Resultante de pressão sup. na parede transv. posterior	
Rtv (kN)	233,41
Bp (graus)	35
Hp (kN)	333,34
Hsup p (kN)	333,34
Área de Armadura horizontal principal longitudinal	
As,hpl (cm ²)	1,93
As,hpl (cm²)	3,83
Adotar maior valor	
Área de Armadura horizontal principal longitudinal	
As,hpl (cm²)	3,83
As,hple	2,56
As,hpli	1,28

Figura 10. Tela da planilha com os cálculos para armadura horizontal principal longitudinal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.3 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL PRINCIPAL TRANSVERSAL ($A_{s,hpt}$)

O modelo apresentado por Campos (2010) que é referente ao projeto proposto por Canha para dimensionamento da armadura $A_{s,hpt}$, das paredes transversais em cálice com interface rugosa é similar ao proposto para o dimensionamento da armadura $A_{s,hpt}$, da parede frontal para cálice com interface lisa, pois a configuração das fissuras e as medições dos extensômetros nos ensaios realizados indicam que a parede transversal posterior do cálice com interface rugosa é submetida a uma pressão similar ao que acontece na parede transversal frontal de cálices com interface lisa. As Figuras 17 e 18 ilustram os resultados.

Cálculo Armadura horizontal principal transversal	
Considerando tração parede transversal frontal	
Resultante de pressão superior	
Hsup f-f (kN)	0,00
Hsup f-t (kN)	167,46
Força Normal	
Nsup f-t (kN)	83,73
Momento Fletor	
Msup f-f (kN.cm)	0,00
Cálculo das Resultantes	
d (cm)	12,00
d' (cm)	3,00
z (cm)	9,00
Rs,hpte (kN)	41,86
Rs,hpti (kN)	41,86
Área da Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	0,96
As,hpti (cm ²)	0,96
As,hpt (cm²)	1,93
Considerando flexo-tração parede transversal frontal	
Resultante de pressão superior	
Hsup f-f (kN)	25,12
Hsup f-t (kN)	142,34
Força Normal	
Nsup f-t (kN)	71,17
Momento Fletor	
Msup f-f (kN.cm)	251,19
Cálculo das Resultantes	
Rs,hpte (kN)	63,49
Rs,hpti (kN)	7,68
Área da Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	1,46
As,hpti (cm ²)	0,18
As,hpt (cm²)	1,64

Figura 11. Tela da planilha com os cálculos para armadura horizontal principal transversal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Considerando tração parede transversal posterior	
Resultante de pressão superior	
Hsup p-f (kN)	0,00
Hsup p-t (kN)	333,34
Força Normal	
Nsup-t (kN)	166,67
Momento Fletor	
Msup-f (kN.cm)	0,00
Cálculo das Resultantes	
Rs,hpte (kN)	83,34
Rs,hpti (kN)	83,34
Área da Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	1,92
As,hpti (cm ²)	1,92
As,hpt (cm²)	3,83
Considerando flexo-tração parede transversal posterior	
Resultante de pressão superior	
Hsup p-f (kN)	50,00
Hsup p-t (kN)	283,34
Força Normal	
Nsup-t (kN)	141,67
Momento Fletor	
Msup-f (kN.cm)	500,02
Cálculo das Resultantes	
Rs,hpte (kN)	126,39
Rs,hpti (kN)	15,28
Área da Armadura horizontal principal transversal	
As,hpte (cm ²)	2,91
As,hpti (cm ²)	0,35
As,hpt (cm²)	3,26
Adotar maior valor	
Área da Armadura horizontal principal transversal	
As,hpt (cm²)	3,83
As,hpte (cm ²)	2,56
As,hpti (cm ²)	1,28

Figura 12. Tela da planilha com continuação dos cálculos para armadura horizontal principal transversal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.4 CÁLCULO DA ARMADURA VERTICAL PRINCIPAL ($A_{s,vp}$)

Os modelos com interface rugosa, com comprimento de embutimento definido de acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017), apresentam um comportamento próximo de uma ligação monolítica, ou seja, ocorre a transferência total do momento e da força normal do pilar para o cálice. Portanto, a teoria da flexão é recomendada para determinação da armadura vertical principal nos cálices com interface rugosa.

Para aplicações práticas, um cálculo simplificado pode ser utilizado, considerando um

diagrama simplificado de tensões no concreto com altura igual a 0,8 da profundidade da linha neutra e a resultante de tração determinada pela contribuição somente das armaduras verticais principais situadas nos cantos da parede posterior e pela armadura vertical secundária dessa mesma parede. Assim, a armadura total resultante do cálculo pela teoria da flexão é determinada por:

$$A_{s,t0t} = 2.A_{s,vp} + A_{s,vs}$$

A armadura $A_{s,vp}$ é definida por:

$$R_{cd} = R_{sd} + N_d$$

$$R_{cd} = A_{cc} \cdot \sigma_{cd} = 0,8 \cdot x \cdot h_{ext} \cdot \sigma_{cd}$$

$$R_{sd} = A_{s,vp} \cdot f_{yd} = \frac{M_{bd} - N_d \cdot (0,5 \cdot h_{ext} - 0,4 \cdot x)}{d_c - 0,4 \cdot x}$$

$$M_{bd} = M_d + V_d \cdot l_{emb}$$

sendo:

M_{bd} : Momento fletor de cálculo na base do cálice

x : Profundidade da linha neutra

σ_{cd} : Valor de cálculo da tensão de compressão no concreto

Substituindo as equações é possível determinar a posição da linha neutra e consequentemente calcular o valor de $A_{s,vp}$, conforme Figura 19.

Cálculo Armadura vertical principal	
dc (cm)	72,50
σ_{cd} (kN/cm ²)	0,97
x (cm)	7,22
Rs (kN)	200,00
Rc (kN)	450,00
As,t0t (cm ²)	4,60
As,vp (cm ²)	1,92

Figura 13. Tela da planilha com os cálculos para armadura vertical principal.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.5 CÁLCULO DAS ARMADURAS SECUNDÁRIAS ($A_{s,vs}$ E $A_{s,hs}$)

Para o dimensionamento das armaduras secundárias do cálice com interface rugosa, devem ser adotadas as mesmas recomendações que consideram o comportamento de consolo curto das paredes longitudinais. Observa-se que no cálculo pela teoria da flexão, a armadura $A_{s,vs}$ já está incluída e tem valor de $0,4 \cdot A_{s,vp}$. Como no cálice com interface lisa, as armaduras secundárias são utilizadas no cálice para resistir a esforços secundários e controlar a

fissuração nas paredes do colarinho.

Cálculo Armadura vertical secundária	
Considerando as indicações para consolo curto	
As,vs	0,77
Cálculo Armadura horizontal secundária	
Considerando as indicações para consolo curto	
As,hs	0,48

Figura 14. Tela da planilha com os cálculos para armadura vertical e horizontal secundária.

Fonte: Próprio Autor (2021)

3.2.6 RESULTADOS PARA O CÁLICE COM INTERFACE RUGOSA

A Figura 21 apresenta a tela final da planilha com o dimensionamento do cálice com interface rugosa, de acordo com os dados de entrada fornecidos, com as características geométricas do cálice, devidamente dimensionado, e suas áreas de armaduras.

CALICE COM INTERFACE RUGOSA	
RESUMO	
Características Geométricas	
bint e hint (cm)	50,00
hc - esp. Parede (cm)	15,00
bext e hext - ext. entre paredes	80,00
lemb - comp. embutimento (cm)	64,00
lc - comp. colarinho (cm)	63,00
Armadura horizontal principal	
As,hpl (cm ²)	3,83
As,hpt (cm ²)	3,83
As,hple	2,56
As,hpte (cm ²)	2,56
As,hpli	1,28
As,hpti (cm ²)	1,28
Armadura vertical principal	
As,vp (cm ²)	1,92
Armadura vertical secundária	
As,vs	0,77
Armadura horizontal secundária	
As,hs	0,48

Figura 15. Tela da planilha com o dimensionamento do cálice com interface rugosa.

Fonte: Próprio Autor (2021)

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para cálculo das propriedades geométricas e das armaduras do colarinho, na ligação pilar-fundação por meio de cálice com uso de colarinho.

Os cálculos foram baseados nos principais modelos encontrados na literatura sobre este tipo de bloco de fundação: Leonhardt e Mönning (1978), Canha (2004), Campos (2010), Nunes (2009) e, também, na norma brasileira que fixa as condições exigíveis no projeto, na execução e no controle de estruturas pré-moldadas de concreto armado e estruturas mistas ou compostas: NBR 9062:2017.

Foram abordados neste estudo os cálices com interface lisa e com interface rugosa. Já que a escolha da interface fica por conta do projetista, visto que a interface rugosa apresenta redução de áreas de armadura e menor consumo de concreto, enquanto a interface lisa ganha na facilidade construtiva e tempo de execução.

Este estudo apresenta de forma eficiente uma automação nos cálculos de cálices de fundação, que é o tipo de ligação pilar-fundação mais utilizado em estruturas de concreto pré-moldado no Brasil.

5. REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto** – Procedimento, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

CAMPOS, G. M. **Recomendações para projeto de cálice de fundação**. 2010. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CANHA, R. M. F. **Estudo teórico-experimental da ligação pilar-fundação por meio de cálice em estruturas de concreto pré-moldado**. 2004. 279 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

EBELING, E. B. **Análise da base de pilares pré-moldados na ligação com cálice de fundação**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos sobre armação de estruturas de concreto armado**. v.3. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

NUNES, V. C. P. **Análise experimental de cálice de fundação com ênfase nos esforços nas paredes transversais do colarinho**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

