

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA NORMA  
ACI-313:1997 NO DIMENSIONAMENTO DE  
SILOS MULTICELULARES ELEVADOS DE  
CONCRETO ARMADO PARA CAFÉ**

**HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS**

**2010**

**HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA NORMA  
ACI-313:1997 NO DIMENSIONAMENTO DE SILOS  
MULTICELULARES ELEVADOS DE CONCRETO  
ARMADO PARA CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Deckers, Hellen Pinto Ferreira.

Avaliação da aplicação da norma ACI-313:1997 no dimensionamento de silos multicelulares elevados de concreto armado para café / Hellen Pinto Ferreira Deckers. – Lavras : UFLA, 2010.

137 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Projeto estrutural. 2. Armazenamento. 3. Pressão adicional. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 681.7631

**HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA NORMA  
ACI-313:1997 NO DIMENSIONAMENTO DE SILOS  
MULTICELULARES ELEVADOS DE CONCRETO  
ARMADO PARA CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 11 de fevereiro de 2010

Prof. Dr. Evandro de Castro Melo UFV

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Júnior UFLA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes UFLA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes  
UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

A meu marido, Elcimar e meu filho, Murilo, com toda a minha admiração,  
pelo apoio, incentivo e compreensão que me deram  
força para a realização deste sonho.

**OFEREÇO E DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, fonte de toda inspiração.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), por meio do Departamento de Engenharia.

Ao Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes, pela orientação por meio de ensinamentos, dinamismo e oportunidades de aprendizado.

Aos professores Sebastião Pereira Lopes, Tarley Ferreira de Souza Júnior e Vitor Hugo Teixeira, pelos quais tenho grande carinho e admiração.

Ao meu marido, Elcimar, por suportar a distância para a realização deste sonho e pelo apoio e incentivo na minha realização profissional.

Ao meu filho, Murilo, pela compreensão nos momentos em que pouco do meu tempo lhe sobrou.

Aos meus pais, pela minha formação e pela construção da minha personalidade, pelo que também agradeço aos meus irmãos Hallen e Kellen.

À amiga Adriana Garcia do Amaral, que tive o prazer de conhecer no mestrado, pelo convívio e a amizade que tornaram menos dolorosa esta etapa de minha vida e que me ajudou na realização deste trabalho.

Ao amigo do grupo de pesquisa em construções da UFLA, Luciano Vieira, pela troca de conhecimentos e amizade.

À banca examinadora, composta pelos professores Tadayuki Yanagi Júnior e Evandro de Castro Melo, pela participação, procedentes correções e sábias e oportunas sugestões que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesquisa de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia da UFLA, pela constante pelos ensinamentos e apoio prestado durante a realização deste trabalho.

A todos os colegas de mestrado, pela alegre convivência e companheirismo, estes nunca serão esquecidos, Fabrício, Raphaela, Pedro, Itagildo, Fabiana, Gervásio, Luisa, Mário, Daniel e Priscila.

Muito obrigada!

“Se consegui ver mais além, foi por me colocar sobre os ombros de gigantes”  
Isaac Newton

## **BIOGRAFIA**

HELLEN PINTO FERREIRA DECKERS, filha de Hitler Martins Ferreira e Maria Eloiza Pinto Ferreira, nasceu na cidade de São Paulo, SP, em 1º de outubro de 1972, formou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA, Lavras, MG), em dezembro de 1997 e em Engenharia Civil, pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS, São Leopoldo, RS), em dezembro de 2000. De setembro de 2007 até dezembro de 2009 foi professora voluntária no Departamento de Engenharia Agrícola da UFLA, como substituta do professor Tarley Ferreira de Souza Júnior. Em agosto de 2008, iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola na UFLA, realizando seus estudos na área de Construções e Ambiente, obtendo o título de Mestre com a defesa da presente dissertação.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
LISTA DE SIGLAS .....	xv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Produto café .....	4
2.1.1 Histórico .....	4
2.1.2 Sistemas de armazenamento .....	6
2.1.2.1 Sistema convencional .....	6
2.1.2.2 Sistema big-bags.....	9
2.1.2.3 Sistema a granel.....	10
2.1.3 Condições mínimas para armazenagem de café beneficiado .....	12
2.2 Armazenamento em silos.....	13
2.2.1 Histórico .....	13
2.2.2 Considerações para projetos estruturais em silos .....	14
2.2.3 Propriedades físicas dos produtos armazenados .....	16
2.2.3.1 Peso específico .....	17
2.2.3.2 Granulometria .....	17
2.2.3.3 Ângulo de repouso.....	18
2.2.3.4 Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede .....	18
2.2.4 Características do tipo de fluxo .....	20
2.2.4.1 Obstruções de fluxo .....	21

2.2.4.2 Projeto de fluxo .....	23
2.2.5 Geometria do silo .....	32
2.2.6 Considerações das ações em silos verticais .....	32
2.2.7 Pressões exercidas pelos produtos armazenados .....	34
2.2.7.1 Pressões estáticas nas células .....	36
2.2.7.2 Pressões dinâmicas ou de descarregamento .....	44
2.3 Definições dos esforços solicitantes atuando na estrutura do silo prismático .....	49
2.3.1 Esforços nas paredes do silo prismático .....	50
2.3.1.1 Esforço horizontal nas paredes do silo.....	50
2.3.1.2 Esforço vertical nas paredes do silo.....	53
2.3.2 Esforços na tremonha do silo prismático .....	55
2.4 Considerações para o dimensionamento do silo prismático de concreto armado.....	58
2.4.1 Projeto das paredes do silo.....	58
2.4.1.1 Armadura horizontal.....	58
2.4.1.2 Armadura vertical.....	64
2.4.1.3 Distribuição das armaduras.....	65
2.4.1.4 Verificação das paredes do silo quanto à flambagem.....	65
2.4.1.5 Verificação das paredes do silo quanto ao cisalhamento .....	66
2.4.2 Projeto das tremonhas.....	67
2.4.2.1 Armadura horizontal.....	67
2.4.2.2 Armadura vertical.....	68
2.4.2.3 Verificação das paredes da tremonha quanto à flambagem .....	68
2.4.2.4 Verificação das paredes da tremonha quanto ao cisalhamento .....	68
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
3.1 Determinação das propriedades físicas do café beneficiado.....	69
3.2 Determinação da geometria da tremonha .....	70

3.3 Projeto geométrico do silo .....	74
3.3.1 Considerações sobre a capacidade da célula .....	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	82
4.1 Cálculo das ações devido ao produto armazenado .....	82
4.1.1 Pressões estáticas na célula .....	82
4.1.2 Pressões dinâmicas na célula .....	88
4.2 Esforços atuantes nos silos prismáticos .....	93
4.2.1 Esforços na parede de silos prismáticos .....	93
4.2.2 Esforços na tremonha de silos prismáticos .....	97
4.3 Dimensionamento do silo prismático de concreto armado .....	99
4.3.1 Projeto das paredes do silo .....	100
4.3.1.1 Armadura horizontal .....	100
4.3.1.2 Armadura vertical .....	105
4.3.1.3 Verificação das paredes do silo quanto à flambagem .....	106
4.3.1.4 Verificação das paredes do silo quanto ao cisalhamento .....	106
4.3.2 Projeto das tremonhas .....	107
4.3.2.1 Armadura horizontal .....	107
4.3.2.2 Armadura vertical .....	110
4.3.2.3 Verificação das paredes da tremonha quanto à flambagem .....	110
4.3.2.4 Verificação das paredes da tremonha quanto ao cisalhamento .....	111
5 CONCLUSÕES .....	112
6 REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113
APÊNDICE .....	117
ANEXOS .....	121

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Exportação brasileira de café.....	5
FIGURA 2	Sistema convencional de armazenamento.....	7
FIGURA 3	Sistema <i>big-bags</i> de armazenamento.....	10
FIGURA 4	Construção do silo multicelular para café a granel, usando alvenaria estrutural, na cidade de Varginha, MG.....	11
FIGURA 5	Notação dos parâmetros geométricos de um silo e das pressões.....	16
FIGURA 6	Foto do equipamento de cisalhamento TSG 70-140.....	19
FIGURA 7	Lugar geométrico de deslizamento.....	19
FIGURA 8	Esquema de uma célula de cisalhamento para o ensaio de atrito produto/parede.....	20
FIGURA 9	Fluxo durante o descarregamento.....	21
FIGURA 10	Tipos de obstruções.....	22
FIGURA 11	Tipos de tremonhas: (a) cônica, (b) cunha e (c) piramidal.....	23
FIGURA 12	Determinação gráfica do tipo de fluxo.....	24
FIGURA 13	Diagramas para projeto de tremonhas.....	25
FIGURA 14	Foto da bancada de consolidação.....	27
FIGURA 15	Gráfico para determinação do fator fluxo.....	28
FIGURA 16	Determinação da tensão crítica.....	30
FIGURA 17	Determinação da função $H(\alpha)$ para tremonha cônica ou em cunha.....	31
FIGURA 18	Pressões nas paredes do silo para um ciclo de operação de carga, armazenamento e descarga.....	32
FIGURA 19	Pressões atuantes nos silos.....	35
FIGURA 20	Linha de trabalho da esteira transportadora.....	36
FIGURA 21	Forças agindo sobre uma camada infinitesimal.....	37
FIGURA 22	Forças atuando em uma faixa elementar de uma tremonha.....	40

FIGURA 23 Pressões adicionais – fluxo de massa.....	44
FIGURA 24 Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por Safarian (1969).....	49
FIGURA 25 Forças horizontais de tração atuando em silos prismáticos. ....	51
FIGURA 26 Esquema do diagrama de momentos fletores.....	53
FIGURA 27 Esforços de tração horizontais e meridionais, nas tremonhas piramidais. ....	56
FIGURA 28 Tensão com pequena excentricidade (Caso I).....	60
FIGURA 29 Tensão com grande excentricidade (Caso II).....	61
FIGURA 30 Diagrama para projetos de tremonha.....	71
FIGURA 31 Determinação gráfica do tipo de fluxo.. ....	72
FIGURA 32 Planta baixa para armazenamento a granel do café.....	75
FIGURA 33 Corte transversal do silo para armazenamento do café. ....	75
FIGURA 34 Corte longitudinal do silo para armazenamento do café. ....	76
FIGURA 35 Pirâmide cônica formada pelo ângulo de repouso do produto.....	78
FIGURA 36 Esquema geométrico de uma célula com capacidade para 1.500 sacas de café beneficiado.....	80
FIGURA 37 Planta baixa da tremonha com detalhes do enchimento na saída..	81
FIGURA 38 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “L” do silo – ACI 313:1997. ....	84
FIGURA 39 Força de atrito estática na parede do lado “L” do silo – ACI 313:1997. ....	84
FIGURA 40 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “a” do silo – ACI 313:1997. ....	85
FIGURA 41 Força de atrito estática na parede do lado “a” do silo – ACI 313:1997. ....	85
FIGURA 42 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “L” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.....	87

FIGURA 43 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “a” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.....	87
FIGURA 44 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede “L” do silo, segundo Safarian (1969).....	90
FIGURA 45 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede “a” do silo, segundo Safarian (1969).....	90
FIGURA 46 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede do lado “L” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.....	92
FIGURA 47 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede do lado “a” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.....	92
FIGURA 48 Pressões estáticas e dinâmicas horizontais na parede do lado “L” e do lado “a” da tremonha, acrescidas das pressões adicionais. ....	93
FIGURA 49 Esforços de tração atuando nas hipóteses de descarga. ....	94
FIGURA 50 Esforços de momento fletor atuando nas hipóteses de descarga....	95
FIGURA 51 Esforços de tração horizontais e meridionais, na tremonha em cunha. ....	97
FIGURA 52 Hipóteses de descarga das células do silo.....	100

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Cálculo da capacidade de armazenagem. ....	9
TABELA 2 Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos. ....	17
TABELA 3 Classificação quanto à granulometria dos produtos armazenados ..	18
TABELA 4 Classificação dos valores limites da função fluxo .....	26
TABELA 5 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ).....	46
TABELA 6 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ).....	47
TABELA 7 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ) continuação .....	48
TABELA 8 Código limite para valores de $y/d$ .....	63
TABELA 9 Capacidade de armazenamento da tremonha, já descontado o enchimento.....	79
TABELA 10 Capacidade de volume do enchimento descontado na tremonha. .	79
TABELA 11 Capacidade de armazenamento em repouso. ....	79
TABELA 12 Capacidade de armazenamento do corpo da célula. ....	79
TABELA 13 Capacidade de armazenamento total da célula.....	79
TABELA 14 Cálculo das pressões estáticas na parede do lado “a” e “L” do silo para café beneficiado – ACI 313:1997. ....	83
TABELA 15 Cálculo das pressões estáticas na parede do lado “a” e “L” da tremonha para café beneficiado, segundo Walker – ACI 313:1997. ....	86
TABELA 16 Pressões adicionais em silos com fluxo de massa – DIN 1055-6:2005. ....	88
TABELA 17 Cálculo das pressões dinâmicas na parede do lado “L” e “a” do silo para café beneficiado, segundo Safarian (1969). ....	89

TABELA 18 Cálculo das pressões dinâmicas na parede do lado “a” e “L” na tremonha para café beneficiado, segundo Walker – ACI 313:1997. .....	91
TABELA 19 Cálculo das trações últimas na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997.....	94
TABELA 20 Cálculo do momento fletor último na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997. ....	96
TABELA 21 Cálculo do esforço vertical último na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997. ....	97
TABELA 22 Cálculo dos esforços de tração última na parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.....	98
TABELA 23 Cálculo do momento fletor último na parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1997. ....	99
TABELA 24 Excentricidades no meio da parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1991. ....	101
TABELA 25 Armadura para flexão simples no meio das paredes do lado “a” do silo – ACI 313:1991. ....	101
TABELA 26 Armadura para flexo-tração no meio das paredes do lado “L” do silo – ACI 313:1991. ....	102
TABELA 27 Armadura horizontal de tração no meio das paredes dos silos – ACI 313:1991.....	102
TABELA 28 Excentricidades no canto das paredes do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1991.....	103
TABELA 29 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” do silo – ACI 313:1991. ....	103
TABELA 30 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.....	104

TABELA 31 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” – ACI 313:1991.....	104
TABELA 32 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.....	104
TABELA 33 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” – ACI 313:1991.....	104
TABELA 34 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.....	105
TABELA 35 Armadura mínima vertical para as paredes do silo – ACI 313:1997. .....	105
TABELA 36 Verificação da parede do lado “a” e “L” do silo quanto à flambagem – ACI 313:1997.....	106
TABELA 37 Verificação da parede do lado “a” e “L” do silo quanto ao cisalhamento – ACI 313:1991.....	106
TABELA 38 Excentricidades no meio da parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.....	108
TABELA 39 Armadura para flexão simples no meio da parede do lado “a” da tremonha – ACI 313:1991. ....	108
TABELA 40 Armadura para flexo-tração no meio da parede do lado “L” da tremonha – ACI 313:1991. ....	108
TABELA 41 Excentricidades no canto da parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.....	109
TABELA 42 Armadura para flexo-tração no canto da parede do lado “a” da tremonha – ACI 313:1991. ....	109
TABELA 43 Armadura para flexo-tração no canto da parede do lado “L” da tremonha – ACI 313:1991. ....	109
TABELA 44 Armadura mínima vertical para as paredes da tremonha silo – ACI 313:1997. ....	110

TABELA 45 Verificação da parede do lado “L” da tremonha quanto à flambagem – ACI 313:1997.....	110
TABELA 46 Verificação da parede do lado “a” e “L” da tremonha quanto ao cisalhamento – ACI 313:1991.....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal horizontal do silo
$a$	Largura do lado menor da seção transversal do silo
$A_a$	Área de fundo afluyente para parede “a”
$AA_C$	Reação da carga accidental da cobertura na parede da célula, distribuída linearmente no perímetro da seção
$A_{cunha}$	Área da cunha
$A_g$	Reforço da área total de aço por unidade de largura da parede
$A_{pirâmide}$	Área da pirâmide
$A_s$	Área de armadura horizontal tencionada
$A'_s$	Área da seção transversal da armadura comprimida
$A_{sv}$	Área de armadura vertical
$A_{sv,m}$	Armadura vertical mínima por unidade de perímetro
$B$	Grandeza definida pela equação (28)
$b$	Largura unitária da parede da célula, igual a 100 cm, medida ao longo do perímetro da seção
$b_{min}$	Dimensão mínima da boca da tremonha
$b_p$	Boca de saída
$c$	Faixa de reforço da armadura de atuação da pressão adicional acima e abaixo da transição
$c_a$ e $c_L$	Coefficientes de distribuição das cargas das tremonhas
$C_d$	Coefficiente de majoração
$c_{min}$	Cobrimento mínimo
$c_{nom}$	Cobrimento nominal
$D$	Diâmetro da seção transversal característica
$d$	Profundidade efetiva para flexão do concreto
$d'$	Distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais

	próxima da seção
$d''$	Distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais próxima da seção
$d_c$	Diâmetro do círculo de área equivalente inscrito no silo
$d_y$	Incremento infinitesimal da ordenada “y”
$D_p$	Granulometria ou diâmetro da partícula
$d_z$	Incremento infinitesimal da ordenada “z”
$dP_v$	Incremento infinitesimal da pressão vertical “P <sub>v</sub> ”
$dP_o$	Incremento infinitesimal da pressão “P <sub>o</sub> ”
$e$	Base de logaritmo neperiano
$e, e', e''$	Excentricidades
$e_o$	Excentricidade da boca de descarga
$F_{a,u}(y)$	Força horizontal última de tração por unidade de profundidade y da célula, parede “a”
$f'_c$	Resistência à compressão última do concreto
$f_{c,v}$	Força de compressão vertical da parede do silo
FF	Função Fluxo
$ff$	Fator fluxo da tremonha
$F_h$	Força de tração horizontal
$F_{L,u}(y)$	Força horizontal última de tração por unidade de profundidade y da célula, parede “L”
$F_{ta}$	Força de tração horizontal por unidade de profundidade $h_y$ da tremonha, parede “a”
$F_{ta,u}$	Força de tração horizontal última por unidade de profundidade $h_y$ da tremonha, parede “a”
$F_{tL}$	Força de tração horizontal por unidade de profundidade $h_y$ da tremonha, parede “L”
$F_{tL,u}$	Força de tração horizontal última por unidade de profundidade $h_y$

	da tremonha, parede “L”
$F_m$	Força de tração meridional
$F_{ma}$	Força de tração meridional do lado “a”
$F_{ma,u}$	Força de tração meridional última do lado “a”
$F_{mL}$	Força de tração meridional do lado “L”
$F_{mL,u}$	Força de tração meridional última do lado “L”
$F_{v,u}(y)$	Força vertical última por unidade de perímetro da célula
$f_y$	Tensão de escoamento do aço à tração
$(f'_s)_{eff}$	Efetiva tensão de compressão do aço
$F_u$	Força horizontal última de tração
$F(\alpha)$	Valor calculado pela equação (8)
$g$	Aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-1}$ )
$H$	Distância da saída até a superfície equivalente
$h$	Espessura da parede do silo
$h_c$	Altura do corpo do silo
$h_e$	Altura do enchimento
$h_r$	Altura do ângulo de repouso do produto armazenado
$h_t$	Altura da tremonha
$h_y$	Profundidade do produto armazenado dentro da tremonha
$H(\alpha)$	Função para tremonha cônica ou em cunha
$h_0$	Nítida distância vertical entre apoios
$I_a$	Momento de inércia do lado “a”
$I_L$	Momento de inércia do lado “L”
$K$	Relação entre a pressão horizontal e vertical
$l$	Perímetro da seção transversal horizontal
$L$	Comprimento do lado maior da seção transversal do silo
$L$	Comprimento da abertura da tremonha em cunha
$l_0$	Nítido vão horizontal de uma parede entre os apoios

$m$	Parâmetro que depende da forma da seção da tremonha
$M_a$	Momento máximo para o lado “a”
$M_c$	Momento de canto
$M_L$	Momento máximo para o lado “L”
$M_u$	Momento fletor último
$n$	Valor calculado pela equação (27)
$P_h$	Pressão horizontal na profundidade $y$
$P_{hd}$	Pressão horizontal dinâmica na profundidade $y$
$P_{hda}$	Pressão horizontal dinâmica na profundidade $y$ do lado “a”
$P_{hdL}$	Pressão horizontal dinâmica na profundidade $y$ do lado “L”
$P_n$	Pressão normal a superfície da tremonha
$P_{nda}$	Pressão horizontal dinâmica na profundidade $h_y$ do lado “a”
$P_{ndL}$	Pressão horizontal dinâmica na profundidade $h_y$ do lado “L”
$P_o$	Pressão vertical no topo da tremonha
$PP$	Peso próprio da célula
$PP_C$	Reação do peso próprio devido à cobertura na parede da célula, distribuído linearmente no perímetro da seção
$P_s$	Pressão adicional em silo com fluxo de massa
$P_t$	Força de atrito na profundidade $h_y$ , por unidade de perímetro da tremonha
$P_v$	Pressão vertical devido ao produto armazenado
$P_{vd}$	Pressão vertical dinâmica devido ao produto armazenado
$P_w$	Força de atrito vertical na profundidade $y$ , por unidade de comprimento do perímetro da célula
$P_{wd}$	Força de atrito vertical dinâmica na profundidade $y$ por unidade de comprimento do perímetro da célula
$P_y$	Pressão vertical à profundidade $h_y$ , abaixo do topo da tremonha
$P_{yda}$	Pressão vertical devido ao produto armazenado na profundidade

	$h_y$ na parede “a”
$P_{yDL}$	Pressão vertical devido ao produto armazenado na profundidade $h_y$ na parede “L”
$r$	Raio da seção transversal do silo
$R$	Raio hidráulico da célula
$S_p$	Força de pré-cisalhamento
$S_s$	Força de cisalhamento
$T_a$	Força horizontal de tração para o lado “a”
$T_L$	Força horizontal de tração para o lado “L”
$V_c$	Volume do corpo
$V_{célula}$	Volume total do silo
$V_{cunha}$	Volume da cunha
$V_e$	Volume de enchimento da tremonha
$V_{pirâmide}$	Volume da pirâmide
$V_r$	Volume de repouso
$V_t$	Volume real da tremonha
$V_{tt}$	Volume total da tremonha
$W_g$	Peso próprio da tremonha
$W_m$	Peso do produto armazenado na tremonha
$W_p$	Sequência de carregamento normal à célula
$W_s$	Carregamento normal à célula e cisalhamento
$W_t$	Peso total da célula de cisalhamento
$y$	Profundidade da superfície equivalente do produto armazenado dentro do corpo da célula
$y$	Profundidade do bloco à compressão
$Y$	Valor calculado pela equação (12)
$y_L$	Valor da limitação de $y$ , a profundidade do bloco de compressão
$X$	Valor calculado pela equação (11)

$Z$	Profundidade a partir da superfície equivalente
$\alpha$	Ângulo da tremonha com a vertical
$\alpha_a$ e $\alpha_L$	Ângulos de inclinação da parede “a” e “L” relativos à horizontal
$\alpha_{crit}$	Maior ângulo da tremonha com a vertical
$\beta$	Ângulo calculado pela equação (9)
$\beta_1$	Razão, profundidade de compressão de bloco retangular com a profundidade da face de compressão em relação ao eixo neutro
$\gamma$	Peso específico do produto armazenado
$\gamma_i$	Peso específico do produto armazenado inferior
$\gamma_s$	Peso específico do produto armazenado superior
$\gamma_c$	Peso específico do concreto armado
$\mu'$	Coefficiente de atrito com a parede
$v_c$	Resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto
$v_u$	Requerida resistência ao cisalhamento
$\sigma_1$	Tensão de consolidação
$\sigma_1'$	Tensão atuante nos apoios do arco
$\sigma_c$	Tensão inconfiada de ruptura
$\sigma_{crit}$	Tensão crítica
$\theta$	Ângulo da tremonha com a horizontal
$\phi$	Ângulo de repouso do produto
$\phi_e$	Efetivo ângulo de atrito interno
$\phi_{ei}$	Efetivo ângulo de atrito interno inferior
$\phi_{es}$	Efetivo ângulo de atrito interno superior
$\phi_i$	Ângulo de atrito interno
$\phi_{ii}$	Ângulo de atrito interno inferior
$\phi_{is}$	Ângulo de atrito interno superior
$\phi_r$	Ângulo de repouso
$\phi_{ri}$	Ângulo de repouso inferior

$\phi_{rs}$	Ângulo de repouso superior
$\phi_w$	Ângulo de atrito do produto com a parede
$\phi_{wi}$	Ângulo de atrito do produto com a parede inferior
$\phi_{ws}$	Ângulo de atrito do produto com a parede superior
$\phi$	Fator de redução, adotado igual a 0,90, segundo a norma ACI 313:1991
$\phi$	Fator de redução, adotado igual a 0,85, segundo a norma ACI 313:1991
$\phi_c$	Fator de redução da resistência do concreto à compressão, adotado igual a 0,70, segundo a norma ACI 313:1991
$\phi_s$	Fator de redução da tensão de escoamento do aço à tração, adotado igual a 0,90, segundo a norma ACI 313:1991
$\pi$	3,1415927 (pi)
$2T_a$	Força horizontal de tração para o lado “a” quando as duas células estiverem cheias
$2T_L$	Força horizontal de tração para o lado “L” quando as duas células estiverem cheias

## LISTA DE SIGLAS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria do Café
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AS	Australian Standart
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMHB	British Materials Handling Board
CFBC	Canadian Farm Building Code
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DIN	Deutsches Institut fur Normung
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EUROCODE	European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization
LAMEM	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
NBR	Norma Brasileira Registrada
SNBATI	Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées
TB	Terminologia Brasileira
USP	Universidade de São Paulo

## RESUMO

DECKERS, Hellen Pinto Ferreira. **Avaliação da aplicação da norma ACI-313:1997 no dimensionamento de silos multicelulares elevados de concreto armado para café.** 2010. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

O armazenamento de produtos a granel é realizado em construções denominadas silos, os quais são tipicamente utilizados na indústria, agricultura, siderurgia e portos, entre outros. Esses silos podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto armado, aço, madeira, argamassa armada, etc. Atualmente, há uma tendência mundial de elaboração de projetos estruturais, adotando o critério de dimensionamento nos estados limites, com o objetivo de realizarem-se projetos mais seguros e econômicos. Assim, faz-se necessária a determinação mais precisa das ações que atuam nas estruturas dos silos. Neste trabalho, procurou-se avaliar e estabelecer uma proposta de projeto estrutural de armazenagem para café em relação aos métodos tradicionais já existentes. Desenvolveu-se uma proposta de dimensionamento, com diferentes hipóteses de carregamento e descarga nas células, a fim de contemplar a armazenagem a granel, a movimentação e o transporte do produto, definindo assim um modelo para a execução de silo multicelular de concreto armado vertical e elevado. O silo tem células geminadas para armazenar 1.500 sacas de café por célula. Foi projetado com base na norma americana ACI 313:1997, considerando a tremonha tipo cunha. O trabalho foi dividido em etapas: determinação das propriedades físicas do café beneficiado, determinação da geometria da tremonha, projeto geométrico do silo, cálculo das ações na estrutura e dimensionamento do silo. Com base nos resultados, determinaram-se as áreas de armadura horizontais para as paredes do lado “a” e “L” do silo e da tremonha, visando atender aos critérios de dimensionamento de modo seguro e econômico. Considerando a transição do corpo do silo para a tremonha como um ponto crítico para os silos elevados, conclui-se que a verificação gerou um acréscimo de pressão nos cálculos de 60% e 59% nas paredes “a” e “L” do corpo do silo e de 44% e 43% nos lados “a” e “L” da tremonha para a pressão adicional, pela norma DIN 1055-6:2005, já que a norma estudada não contempla essa variação de pressão.

**Palavras chaves:** Silos, concreto armado, armazenagem, café, pressão adicional.

---

\* Comitê de orientação: Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes – DEG/UFLA (Orientador), Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior – DEG/UFLA.

## ABSTRACT

DECKERS, Hellen Pinto Ferreira. **Evaluation of the implementation of the standard ACI-313:1997 in the design of silos multicellular elevated reinforced concrete for coffee.** 2010. 137 p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

The storage of bulk solids is done in silos used in industry, agriculture, iron metallurgy and ports and others. These can be built with the most different materials such as reinforced concrete, steel, wood, armed mortar, etc. At present, there is a worldwide trend of designing structural projects, adopting the criterion of dimensioning in the limit states with the purpose of performing safe and economical projects. So, a more accurate determination of the actions acting on the structures of silos becomes necessary. In this work, it was aimed to establish a proposal of structural project of coffee storage with relation to the already existing traditional methods. A design with different hypothesis of full and empty cells was developed in order to contemplate the storage in bulk, motion and transport of the product. The model of building construction was vertical and elevated reinforced concrete multicellular silo. The silo have cells to store 1,500 bags. It was projected on the basis of the ACI 313:1997 code, considering the wedge- type hopper. The structural project was divided in steps: determination of the physical properties of coffee, determination of the hopper geometry, geometric design, calculation of the actions on the structure and silo design. On the basis of the results, the areas of horizontal armor for the wall of the side “a” and “L” of the silo and of the hopper were determined aiming to meet the dimensioning criteria in a safe and economical manner on the basis of ACI 313:1997 code. Considering the transition of the silo wall to the hopper, a critical point in the elevated silos, it follows that the verification generated an increase of pressure in the calculations of 60% and 59% in the silo walls “a” e “L” and 44% e 43% in the “a” and “L” of the hopper sides for the additional pressure by the no DIN 1055-6:2005.

**Key words:** Silos, reinforced concrete, storage, coffee, additional pressure.

---

\*Guidance Committee: Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes – DEG/UFLA (Adviser), Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior – DEG/UFLA.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de café, tendo produzido, em 2008, 45,99 milhões de sacas, além de ser o maior exportador do mundo, com 29,48 milhões de sacas embarcadas naquele mesmo. Com a marca de 18,39 milhões de sacas, foi considerado o segundo mercado consumidor mundial. O país também começa a conquistar o mundo com a alta qualidade de seus cafés torrado em grãos ou torrado e moído. Neste contexto, destaca-se o estado de Minas Gerais, com produção de 23.581 mil sacas de café beneficiadas (Associação Brasileira da Indústria de Café - ABIC, 2010).

A exportação de cafés industrializados no Brasil é relativamente nova. Começou oficialmente em 2002, mas tem crescido rapidamente, a fim de alcançar seus concorrentes internacionais, como Itália e Alemanha, maiores exportadores do mundo. Ao longo dos últimos anos, as torrefadoras brasileiras aprenderam com esses países a agregar valor ao produto e hoje vendem para países da Europa, Ásia, África, América do Norte, etc. Esses cafés para exportação são totalmente processados, industrializados e embalados nas torrefadoras, o que gera mais empregos e renda para o país (ABIC, 2010).

No Brasil, a importância deste produto no mercado interno e externo tem levado à otimização da produção, nas fases de plantio, colheita, pré-processamento e pós-processamento. A granelização do café permitiria uma melhor classificação do produto em lotes, o que elevaria a qualidade, atendendo às várias exigências do mercado interno e externo. Estruturas de armazenamento corretamente dimensionadas e construídas podem ser amortizadas, apenas eliminando as perdas durante a fase do armazenamento. A verticalização do armazenamento de café em unidade multicelulares otimiza o controle do processamento do produto.

O armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos a granel é realizado em construções denominadas silos, que são tipicamente utilizados na indústria, agricultura, siderurgia e portos, entre outros. Estes podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto armado, aço, madeira, argamassa armada, etc.

A demanda por silos pode ser explicada devido às necessidades de cooperativas, produtores e indústrias em armazenar grandes quantidades de produtos e materiais em espaços reduzidos. A estocagem torna-se importante também em termos econômicos, na medida em que permite um maior controle do escoamento da safra e abastecimento, reduzindo a necessidade de importação e também das especulações de mercado (Palma, 2005).

Atualmente, há uma tendência mundial de elaboração de projetos estruturais, adotando o critério de dimensionamento nos estados limites com o objetivo da realização de projetos mais seguros e econômicos. Assim, faz-se necessária a determinação mais precisa das ações que atuam nas estruturas dos silos.

De maneira geral, toda unidade de silo está solicitada a diversos tipos de ações: permanentes (peso próprio, cobertura), variáveis (pressão dos produtos, vento, recalques) e excepcionais (explosões e impactos). As pressões exercidas por produtos armazenados, objeto de estudo deste trabalho, são tidas como de ação variável.

No projeto de silos, as principais ações a serem consideradas são as provenientes dos produtos armazenados que exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Na parede vertical atuam pressões perpendiculares, denominadas pressões horizontais ( $P_h$ ) e pressões de atrito do produto com a parede ( $P_w$ ). No fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais ( $P_v$ ).

Diferentes normas podem ser utilizadas para projetos de silos. Todas se baseiam em métodos teóricos e empíricos. A norma ACI 313 - Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313, 1997), trata do dimensionamento de silos de concreto para o armazenamento de produtos granulares, enquanto o Brasil não dispõe de norma própria, com exceção de duas referências a terminologias para silos de grãos vegetais TB-374 - Silos cilíndricos para grãos vegetais e TB-377 - Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais (ABNT, 1990).

Neste trabalho, procurou-se estabelecer uma proposta de projeto estrutural de armazenagem para café em relação aos métodos já existentes e tradicionais. Desenvolveu-se uma proposta de dimensionamento, com diferentes hipóteses de células carregamento e descarga nas células, a fim de contemplar a armazenagem a granel, a movimentação e o transporte do produto, definindo assim um modelo para a execução de silo multicelular de concreto armado vertical e elevado, com base nos estudos das ações.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produto café

#### 2.1.1 Histórico

Originário da Etiópia, onde já era utilizado em tempos remotos, o café atravessou o Mediterrâneo e chegou à Europa durante a segunda metade do século XVII. Era a época do Barroco e das monarquias absolutas, e a expansão do comércio internacional enriquecia a burguesia. Já no início do século XVIII, os cafês tornaram-se centros de encontro e reunião de aristocratas, burgueses e intelectuais (Conselho Nacional do Café, 2010).

As primeiras mudas da rubiácea (café), provenientes da Guiana Francesa, chegaram ao Brasil em 1727, sendo plantadas no estado do Pará, onde floresceram sem dificuldade. Em 1781, o café começou a ser plantado no estado do Rio de Janeiro, devido ao crescente consumo da bebida na Europa e nos Estados Unidos, o que exigiu o aumento da produção. Iniciou-se, assim, um novo ciclo econômico na história do país, uma vez que o ciclo da mineração do ouro em Minas Gerais havia se esgotado (Conselho Nacional do Café, 2010).

Expandido pelo vale do rio Paraíba, os cafezais chegaram a São Paulo que, a partir da década de 1880, passou a ser o principal produtor nacional. Com a sua expansão, foi criando cidades e fazendo fortunas. No final do século XIX, o Brasil controlava o mercado cafeeiro mundial.

Pelos idos de 1830, o café transformara-se no principal produto nacional de exportação, ultrapassando o algodão e o açúcar e, em 1845, o Brasil já era responsável por 45% das exportações mundiais do produto. Desde então, as exportações de café têm evoluído, chegando à marca de 30,31 milhões sacas de 60 kg de café em 2009 (ABIC, 2010; Conselho dos Exportadores de Café do Brasil - CECAFÉ, 2010), conforme ilustrado na Figura 1.

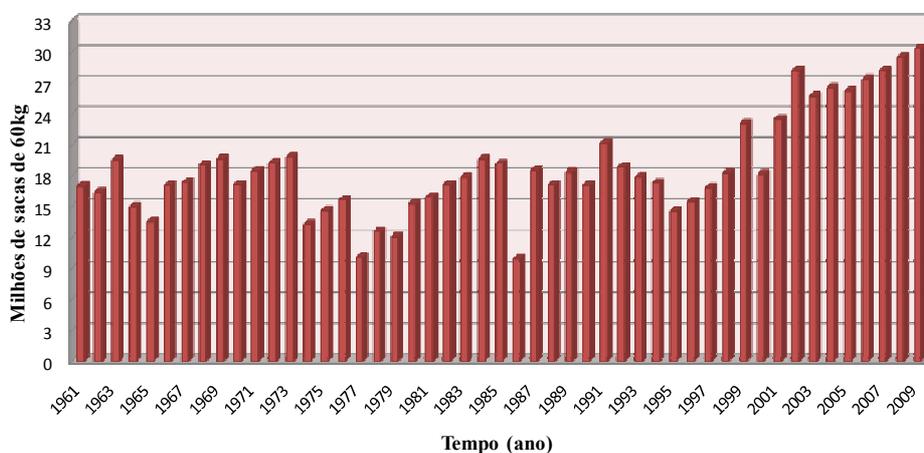


FIGURA 1 Exportação brasileira de café.  
 Fonte: ABIC (2010) e CECAFÉ (2010).

Nos últimos anos, várias pesquisas têm destacado a importância do produto nos mercados interno e externo. A conquista de novos mercados tem levado à otimização da produção. Inovações tecnológicas têm sido implementadas nas fases de plantio, colheita, pré-processamento e pós-processamento. Vários equipamentos foram desenvolvidos, juntamente com novas técnicas de plantio. O café beneficiado na fazenda ainda é armazenado em tulhas e, quando esse armazenamento é feito em cooperativas, em sacarias. Sem o armazenamento adequado, a produção é vendida em época inoportuna, com o preço desfavorável e, o que é pior, gerando desmotivação ao produtor que vem enfrentando concorrência interna e externa, agravada pela qualidade do café produzido. A granelização do café permitiria uma melhor classificação do produto em lotes, o que elevaria a qualidade, atendendo às várias exigências do mercado externo.

O café é uma cultura de destaque, ocupando o segundo lugar entre as commodities agrícolas globalmente comercializadas. A qualidade é fator decisivo no preço alcançado pelo produto. As operações ligadas à pós-colheita

do café têm um impacto direto na qualidade do produto e por isso são de grande importância na sua cadeia de produção. O armazenamento de café difere, de certa forma, da armazenagem dos outros produtos devido às questões ligadas à sua qualidade. Além disso, muitos aspectos ligados ao armazenamento têm origem nas operações realizadas antes que o produto chegue ao armazém.

As técnicas de processamento do produto são definidas de acordo com o tipo de mercado que se deseja atingir, sendo assim, o armazenamento de café precisa contemplar aspectos ligados às operações que ocorrem antes e depois do armazenamento.

### **2.1.2 Sistemas de armazenamento**

As estruturas para armazenamento devem ser suficientemente resistentes para suportar o material armazenado, protegê-lo de intempéries, permitir o controle de insetos, pragas e pássaros e, ainda, ser de fácil operação. A armazenagem de café divide-se, basicamente, em três tipos: sistema convencional, sacos tipo *big-bags* e a granel.

#### **2.1.2.1 Sistema convencional**

No sistema convencional, os produtos são armazenados em sacos de juta, formando blocos individualizados até uma altura entre 25 e 30 sacos, segundo sua origem e suas características (Figura 2).



FIGURA 2 Sistema convencional de armazenamento.

A maior parte dos cafês no Brasil, apesar dos avanços tecnológicos dos últimos anos, é armazenada em sacos, tecnicamente disposto em armazém. O saco é uma unidade que se adapta ao manuseio e ao comércio em pequena escala. Este tipo de armazenagem possui vantagens e desvantagens, em relação ao sistema a granel, que deverão ser consideradas antes de sua escolha.

Segundo Silva (2008) podem-se citar como **vantagens**:

- oferecer condições para manipular quantidades e tipos diferentes de produtos, simultaneamente;
- individualizar produtos dentro de um mesmo lote;
- em caso de deterioração localizada, existe a possibilidade de removê-la sem o remanejamento de todo o lote;
- menor gasto inicial com a instalação.

Como **desvantagens**, citam-se:

- o elevado custo das sacarias, que é substituída, inevitavelmente por não ser um material permanente;
- o elevado custo de movimentação, por demandar muita mão de obra;
- a perda da qualidade, quando o produto é armazenado durante longo período;

- a necessidade de muito espaço por tonelada estocada.

Geralmente, o armazenamento em sacarias apresenta alguns pontos, no que se refere à construção, como características que influenciarão na utilização do armazém. São eles:

- instalação de portas, em números e locais tecnicamente escolhidos, de modo a facilitar as operações de carga e descarga;
- as portas devem ser instaladas frontalmente, isto é, no mesmo alinhamento, em paredes opostas;
- o pé direito deve ter altura de 6 m;
- construção de paredes lisas, evitando-se reentrâncias e terminando em “meia cana” junto ao piso e nunca em ângulo reto;
- fechamento lateral das paredes, junto ao piso e à cobertura, para evitar o acesso de roedores, pássaros e insetos ao interior do armazém;
- colocação de aberturas laterais de ventilação, protegidas por estruturas de telas e com aberturas reguláveis;
- instalação de lanternins, tecnicamente dispostos para a boa circulação de ar natural;
- utilização de telhas transparentes, para melhorar a iluminação natural;
- piso impermeável, de concreto e que esteja, no mínimo, a 40 cm acima do nível do solo;
- construção, em cada porta, de marquises, para carga e descarga em dias chuvosos;
- para o máximo de aproveitamento, a área do piso deve ser projetada em função do estrado, das ruas principais e secundárias;
- instalação de sistema de prevenção e combate a incêndios.

Segundo Brandão, citado por Puzzi (2000), multiplicando-se a área bruta por um coeficiente  $k$  permite-se o cálculo da capacidade de uma armazenagem (Tabela 1).

TABELA 1 Cálculo da capacidade de armazenagem.

<b>Produto</b>	<b>Altura da pilha (m)</b>	<b>Nº de sacos por m<sup>2</sup> (k)</b>
Café beneficiado (10 sacas m <sup>-3</sup> )	4,00	32
	4,50	36
	5,00	40
	5,50	44
	6,00	48

Fonte: Puzzi (2000).

Segundo Marques Neto (2004), considerando os corredores de passagem, os corredores entre as pilhas e a parede do armazém e o sistema de emblocamento adotado, os valores de k caem bastante, chegando, em média, à metade dos valores indicados acima.

#### **2.1.2.2 Sistema *big-bags***

Popularmente chamados de *big-bags*, esses sacos de armazenagem são contentores flexíveis e são transportados de forma fracionada por qualquer tipo de modal, sendo dotados de dispositivos e acessórios que facilitam seu enchimento, movimentação e armazenagem (Figura 3).

A parte construtiva dos armazéns é a mesma utilizada no sistema convencional. Porém, a largura dos corredores existentes entre os empilhamentos dos sacos *big-bags* tem que ser bem maior, de forma a permitir as manobras de empilhadeiras para transportar esses *big-bags*.



FIGURA 3 Sistema *big-bags* de armazenamento.

Podem-se citar algumas vantagens desse tipo de armazenamento. São elas:

- manuseio mecanizado;
- redução das perdas nas operações de carga e descarga;
- minimização da necessidade de mão-de-obra e do uso de sacos de juta.

Entretanto, tem a desvantagem de reduzir a capacidade estática de armazenamento, uma vez que a altura de empilhamento é limitada pela instabilidade das pilhas, recomendando-se um empilhamento máximo de três *big bags*.

### **2.1.2.3 Sistema a granel**

No sistema de armazenamento a granel, o produto é armazenado sem segregação, em silos (Figura 4).



FIGURA 4 Construção do silo multicelular para café a granel, usando alvenaria estrutural, na cidade de Varginha, MG.

Fonte: Marques Neto (2004).

O mercado externo e boa parte do mercado interno (torrefações) sinalizam a intenção cada vez maior de trabalhar com o produto granelizado, em volumes maiores, por diversos fatores:

- transporte mais barato e seguro, em caminhões tipo contêiner;
- menor custo do contêiner, para embarcar nos navios para exportação;
- manuseio facilitado e menor uso de mão-de-obra;
- maior segurança contra incêndio;
- maior rapidez na carga e descarga;
- maior facilidade na operação de controle de pragas;
- redução de custo de operação devido à eliminação de sacarias;
- capacidade de armazenagem por área bem maior que o sistema convencional.

O café beneficiado a granel em grandes volumes é uma opção adequada principalmente para empresas de armazéns gerais, exportadoras de café ou para cooperativas, pelas vantagens abordadas acima.

O café é transportado até o local de armazenagem a granel em sacos de 60 kg, os quais são despejados nas moegas que ficam no nível do solo. São retiradas amostras de todos os sacos, a fim de se classificar o produto quanto ao tipo de bebida, antes que o mesmo seja levado para dentro das células por meio de correias transportadoras (sistema de transporte horizontal) e de elevadores de canecas (transporte vertical).

A retirada do café a granel para a exportação é feita em caminhão contêiner forrado com papel kraft, direto para os portos, sendo, hoje, uma exigência do mercado externo a menor interferência do homem em todo o processo até a mesa do consumidor.

### **2.1.3 Condições mínimas para armazenagem de café beneficiado**

Conforme descrito anteriormente, uma massa de grãos se comporta como um organismo vivo, que respira, eliminando gás carbônico e transpira, despendendo energia na forma de calor e que, portanto, pode ser atacada por insetos e/ou fungos.

O armazenamento deve ser entendido como um elenco de medidas e procedimentos destinados a manter a massa de grãos dentro de condições ideais de conservação, protegendo-os contra seus inimigos naturais.

Como, nesta pesquisa, se tratará apenas de café já beneficiado, o ideal é armazená-lo com umidade em torno de 11%, em temperatura ambiente em torno de 20°C e umidade ambiente máxima de 65% (Puzzi, 2000). O teor de umidade do grão define sua durabilidade no armazenamento, pois quanto mais úmido mais propício ao envelhecimento e morte, maior probabilidade de reações de oxidação, além de possibilitar a indesejável entrada de fungos. Ambientes com menor umidade do que a ideal permitem a perda das substâncias aromáticas, devido à sua volatilidade.

Puzzi (2000) recomenda que o teor de umidade para o armazenamento no período de, no máximo, um ano seja de 11% e, de cinco anos, de até 10%. Segundo Silva et al. (2006), os ângulos de atrito interno e de repouso dos grãos de café beneficiado aumentam linearmente com o incremento do teor de umidade.

Conforme a Instrução Normativa nº 8 (Brasil, 2003), independente da classificação do grão de café, os teores de umidade não podem ultrapassar 12,5%.

## **2.2 Armazenamento em silos**

### **2.2.1 Histórico**

A palavra silo tem origem da palavra *sirus* (do latim), que deriva da palavra grega *siros*, que significa lugar profundo, cavernoso e escuro. As estruturas que apresentam condições necessárias para a preservação da qualidade de produtos agrícolas a granel por longos períodos de armazenamento são os silos agrícolas ou silos graneleiros.

A partir de 1800, foram construídos os primeiros grandes silos em madeira, tendo até vinte metros de altura. Com o desenvolvimento de várias pesquisas na área, os projetos evoluíram. Inicialmente, os silos eram construídos com base na teoria hidrostática. Posteriormente, graças ao conhecimento do atrito do produto com a parede, constatou-se que as pressões exercidas pelos grãos eram muito elevadas. Esse comportamento foi verificado por Janssen, em 1895, que, em pouco tempo, modificou a forma de cálculos de silos. Juntamente, houve um progresso no uso de materiais de construção, o que também proporcionou o aumento da capacidade de armazenamento (Araújo & Calil Júnior, 1995).

Dentre os aspectos históricos das pesquisas sobre silos, Jenike & Johanson (1968) relatam que os primeiros grandes silos foram construídos em

1860, para o armazenamento de grãos. Desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos para o armazenamento de uma extensa variedade de pós, grãos, torrões, fibras, etc.

### **2.2.2 Considerações para projetos estruturais em silos**

Os silos podem ser projetados e construídos de diversas formas e tamanhos, dependendo do tipo de utilização. No projeto estrutural de um silo os critérios utilizados são similares aos utilizados em outros tipos de estruturas.

Segundo Silva (1993), para projetar um silo de forma segura e econômica, é necessário levar em consideração algumas características (Figura 5), tais como:

- propriedades físicas do produto armazenado;
- características do tipo de fluxo;
- forma geométrica do silo, na qual a relação altura/diâmetro e a espessura de maneira a possuir um dimensionamento ótimo, tanto do ponto de vista estrutural, quanto econômico;
- tipo de entrada e saída do produto;
- estágios de operação, que são: carregamento, armazenamento e descarga;
- ações atuantes na estrutura do silo, como as pressões causadas pelo produto armazenado sobre as paredes, a ação do vento e os efeitos térmicos gerados pela diferença de temperatura entre o meio e o produto armazenado.

As normas, de modo geral, propõem formulações para as pressões exercidas pelos produtos armazenados nas paredes e no fundo de silos de baixa relação altura/diâmetro, diferenciadas dos silos altos, bem como pressões adicionais para levar em conta o efeito de pressões assimétricas, inevitáveis mesmo em silos com carregamento concêntrico e de eixo simétrico, e que são

dependentes das características do produto e das imperfeições na geometria do silo construído. As normas internacionais mais importantes e recentes existentes no mundo são: a canadense CFBC:1983, a americana ACI 313:1997, a australiana AS 3774:1996, a alemã DIN 1055-6:2005, a britânica BMHB:1985, a francesa SNBATI:1975 e as europeias ENV EUROCODE 1991-4:2006 e ISO 11697:1997.

O projeto seguro e econômico das estruturas é função das ações impostas; no caso dos silos, não há uma norma brasileira que prescreva sobre seus projetos e ações. Além disso, há algumas divergências entre as normas estrangeiras. Dentre as diferentes normas internacionais, a ACI 313:1997, objeto deste estudo, aborda somente projetos para silos de concreto armado para produtos granulares.

Em relação à geometria, os silos são classificados segundo a relação entre altura efetiva do produto armazenado (H) e o diâmetro (D) ou a maior dimensão (L) do corpo do silo, considerando a norma ACI 313:1997, que classifica a relação em:

- silo baixo –  $H/D \leq 2$ ;
- silo esbelto –  $H/D > 2$ .

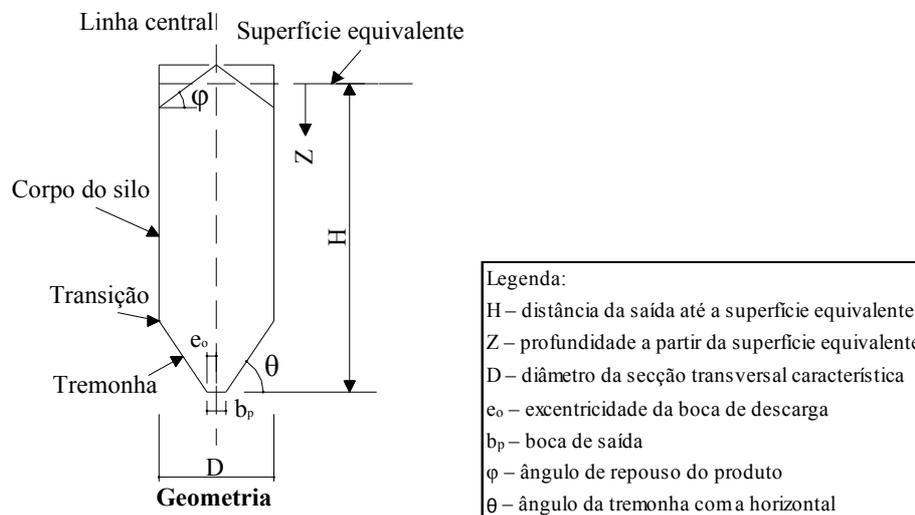


FIGURA 5 Notação dos parâmetros geométricos de um silo e das pressões.

### 2.2.3 Propriedades físicas dos produtos armazenados

O primeiro passo para o projeto de fluxo e estrutural de silos verticais é a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados e deve ser realizado nas condições mais severas que podem ocorrer no silo.

As propriedades físicas normalmente determinadas são:

- peso específico ( $\gamma$ );
- granulometria ( $D_p$ );
- ângulo de repouso ( $\phi_r$ );
- ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ );
- efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ );
- ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ );
- função fluxo (FF);
- fator fluxo da tremonha ( $ff$ ).

As normas internacionais apresentam tabelas com os valores das propriedades de fluxo para alguns produtos e também métodos e equipamentos para a sua determinação. Como esses valores variam muito entre as normas,

recomenda-se, sempre que possível, realizar ensaios para a determinação das propriedades de cada produto a ser armazenado.

Segundo Calil Júnior (1997), todas as propriedades dos produtos armazenados em silos podem variar durante a vida útil do silo. Assim, de acordo com a norma australiana AS 3774:1996, deverão, em termos de projeto, ser determinados dois limites para cada parâmetro, de modo a delinear a sua faixa de variação com combinações mais desfavoráveis para cada caso (Tabela 2).

TABELA 2 Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos.

Aplicação das propriedades		Peso específico ( $\gamma$ )	Ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ )	Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ )	$K=P_h/P_v$
Tipo de fluxo	Funil	Inferior	Superior	Inferior	----
	Massa	Inferior	Inferior	Superior	----
Cálculo da máxima pressão horizontal na parede do silo ( $P_h$ )		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Cálculo da máxima pressão vertical ( $P_v$ )		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Força máxima de atrito na parede do silo ( $P_w$ )		Superior	Superior	Inferior	Superior
Carga vertical máxima na tremonha		Superior	Inferior	Superior	Inferior

Fonte: AS 3774:1996.

### 2.2.3.1 Peso específico

O peso específico é definido como a quantidade de massa de partículas sólidas divididas pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ ).

### 2.2.3.2 Granulometria

A análise granulométrica do produto armazenado é importante para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo, pois a dimensão das

partículas sólidas influencia diretamente a formação ou não de obstruções de fluxo, especialmente no que diz respeito à formação de arcos mecânicos junto à boca de descarga.

Calil Júnior (1984) recomenda que a classificação dos produtos armazenados seja feita em função das dimensões das partículas (Tabela 3).

TABELA 3 Classificação quanto à granulometria dos produtos armazenados.

<b>Diâmetro da partícula (<math>D_p</math>) (mm)</b>	<b>Classificação do produto armazenado</b>
$D_p > 0,42$	Produtos granulares
$0,42 \leq D_p < 0,149$	Pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos
$0,149 \leq D_p < 0,079$	Produtos pulverulentos coesivos finos
$D_p < 0,079$	Produtos pulverulentos coesivos extrafinos

Fonte: Calil Júnior (1984).

### **2.2.3.3 Ângulo de repouso**

O ângulo máximo do talude formado pela massa dos grãos, em relação à horizontal, é chamado de ângulo de repouso. Esse ângulo forma-se em decorrência do atrito dos grãos com a superfície e do atrito entre os grãos, sendo o seu valor necessário para o cálculo de capacidade estática dos silos (células) e dimensionamento da moega de despejo (ou tremonha).

### **2.2.3.4 Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede**

Dentre as propriedades dos produtos armazenados, estas são as mais importantes para o projeto estrutural. Tais propriedades são medidas por meio do equipamento de Jenike, modelo TSG 70-140 (Figura 6). Dos ensaios de cisalhamento das amostras dos produtos são extraídos os valores de tensões normais e de cisalhamento. Levando-se esses dados ao gráfico da Figura 7, obtêm-se os ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno. O

ângulo de atrito interno é obtido com a horizontal de uma linha tangente aos semicírculos de Mohr da menor e maior tensão de consolidação (Figura 7).

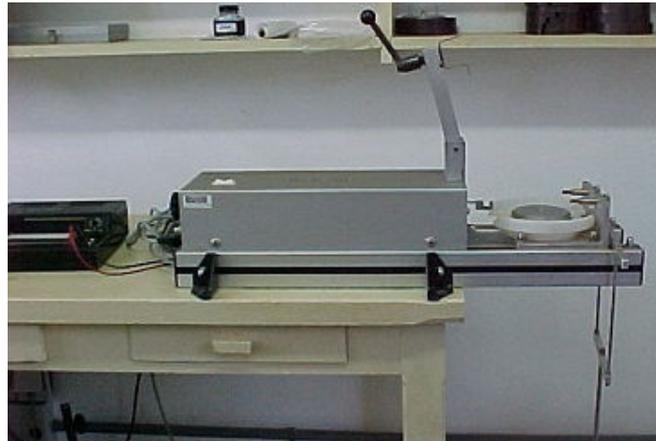


FIGURA 6 Foto do equipamento de cisalhamento TSG 70-140.

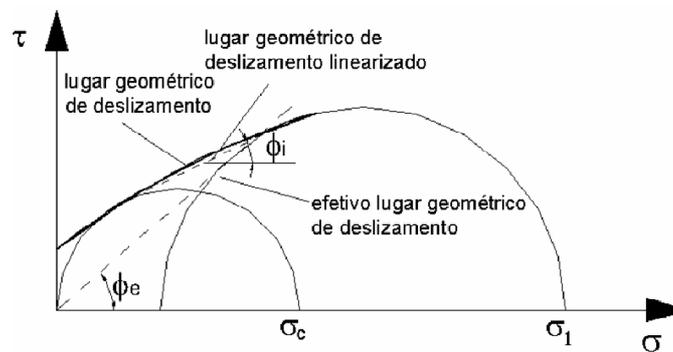


FIGURA 7 Lugar geométrico de deslizamento.  
Fonte: Palma (2005).

O efetivo ângulo de atrito interno é obtido por meio da reta formada entre origem e tangencia o maior semicírculo de Mohr com o eixo das tensões normais (Figura 7).

O ângulo de atrito com a parede é obtido também pela máquina de cisalhamento, observando-se que o atrito é medido com o material da parede do silo. Plotados os valores de tensão normal versus tensão de cisalhamento, obtém-se uma reta que representa o lugar geométrico de deslizamento da parede com o eixo das tensões normais. Na Figura 8 está ilustrado o esquema de ensaio para a determinação do referido ângulo.

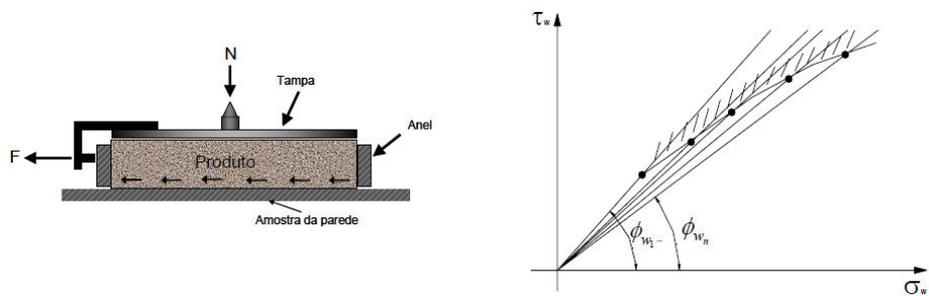


FIGURA 8 Esquema de uma célula de cisalhamento para o ensaio de atrito produto/parede.  
Fonte: Calil Júnior & Cheung (2007).

#### 2.2.4 Características do tipo de fluxo

O tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina também a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, e a integridade e custo da construção (Calil Júnior, 1997).

O modo como um produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície (atrito com a parede) da tremonha. Em geral, podem ser distinguidos dois tipos principais de fluxo: fluxo de massa e fluxo de funil:

(a) fluxo de massa: todas as partículas armazenadas estão em movimento, do começo até o fim do descarregamento;

(b) fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada, enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário.

Os tipos de fluxo durante o descarregamento estão ilustrados na Figura 9.

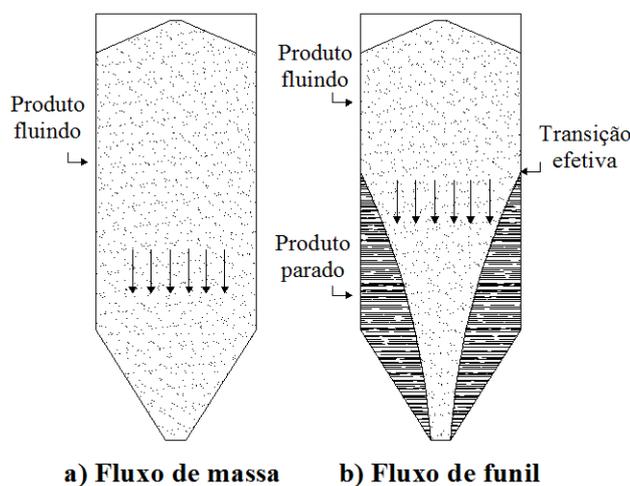


FIGURA 9 Fluxo durante o descarregamento.

#### 2.2.4.1 Obstruções de fluxo

O objetivo principal, no projeto da célula de armazenamento, é assegurar que o produto armazenado fluirá por gravidade sem que ocorram obstruções. A ocorrência de obstruções do fluxo em silos deve-se ao fato de o produto armazenado adquirir resistência, quando consolidado, suficiente para suportar seu próprio peso (Jenike, 1964).

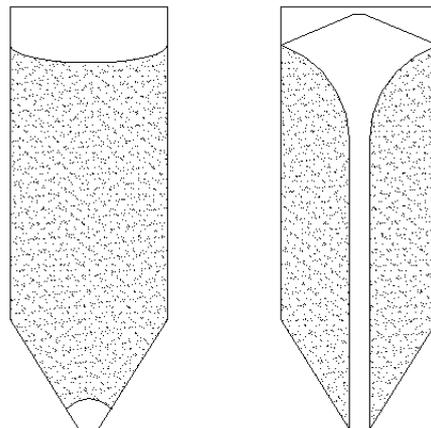
Existem, basicamente, dois tipos de obstruções de fluxo: abóbada (arco estável) e tubo (Figura 10). Admite-se que se, durante a descarga do produto,

nenhuma dessas duas obstruções ocorrer, acontecerá, portanto, um fluxo satisfatório.

Essas obstruções causam sérios danos aos silos e, principalmente, à tremonha, pois, quando elas rompem, atuam como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos na boca de descarga e nas paredes laterais.

A obstrução tipo “tubo”, normalmente, ocorre em silos com fluxo de funil contendo produtos coesivos.

Enquanto a obstrução tipo “abóboda” é a principal fonte nos casos de produtos não-coesivos (em geral maiores e em grãos), o arco é formado pelo travamento de uma pequena quantidade de partículas. Para esses tipos de produtos, o arco pode ser evitado pela escolha da menor dimensão da boca da tremonha.



**a) Obstrução tipo abóboda    b) Obstrução em tubo**

FIGURA 10 Tipos de obstruções.

O problema de fluxo pode ocorrer quando as aberturas de saída e a inclinação da tremonha são insuficientes, fazendo com que as pressões devido

ao peso próprio se equilibrem, principalmente devido às pressões de atrito entre os grãos, na região da saída do produto.

Entretanto, o fluxo de massa ocorre somente quando a saída é larga o suficiente para o material fluir sem arco, e as paredes da tremonha são lisas e inclinadas o suficiente para permitir o deslizamento do produto.

É recomendado que, na construção das tremonhas, se faça um acabamento final nas arestas, abaulando-as, de forma a evitar a presença de material inerte e facilitar o escoamento de forma global.

#### 2.2.4.2 Projeto de fluxo

Para projetar tanto um silo como uma tremonha, o primeiro passo é a determinação das propriedades físicas do produto armazenado. O passo seguinte é a escolha da forma geométrica da tremonha.

##### a) Forma geométrica da tremonha

Existem diversas formas geométricas utilizadas para projetos de tremonhas, contudo, as formas mais utilizadas são a cônica, a cunha e a piramidal (Figura 11).

O comprimento mínimo da abertura da tremonha em cunha é  $L = 3.b_p$  que, na prática, é muito menor que a largura do silo.

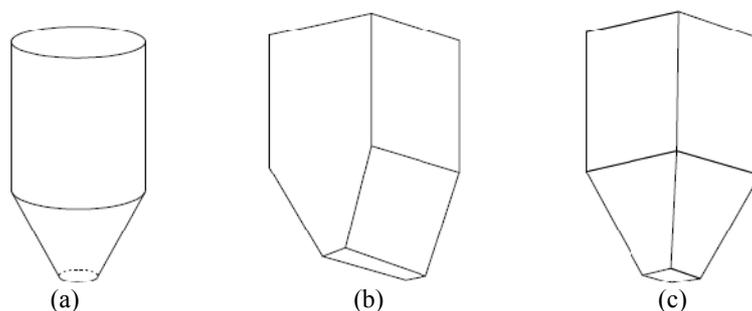


FIGURA 11 Tipos de tremonhas: (a) cônica, (b) cunha e (c) piramidal.

### b) Determinação da inclinação da parede da tremonha

Definida a forma geométrica da tremonha, determinados os ângulos de atrito com a parede e o efetivo ângulo de atrito interno, pode ser determinada a máxima inclinação da tremonha com a vertical, a qual assegura o fluxo de massa. A maioria das normas internacionais apresenta, geralmente, dois diagramas para a determinação da inclinação máxima da tremonha, geralmente, cônica ou em cunha (Figura 12).

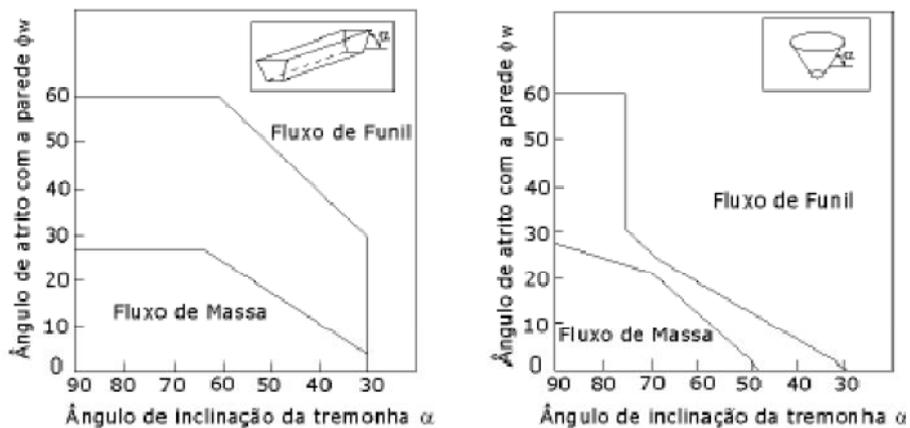


FIGURA 12 Determinação gráfica do tipo de fluxo.

Fonte: ACI 313:1997.

Os limites entre o fluxo de massa e fluxo de funil são o resultado da solução das equações propostas por Jenike (1964). Nos diagramas, a inclinação da tremonha é medida com a vertical. O efetivo ângulo de atrito interno é o parâmetro das linhas limites entre o fluxo de massa e o fluxo de funil. As linhas limites separam todos os pares de valores que conduzem ao fluxo de massa daqueles que conduzem ao fluxo de funil (Figura 13).

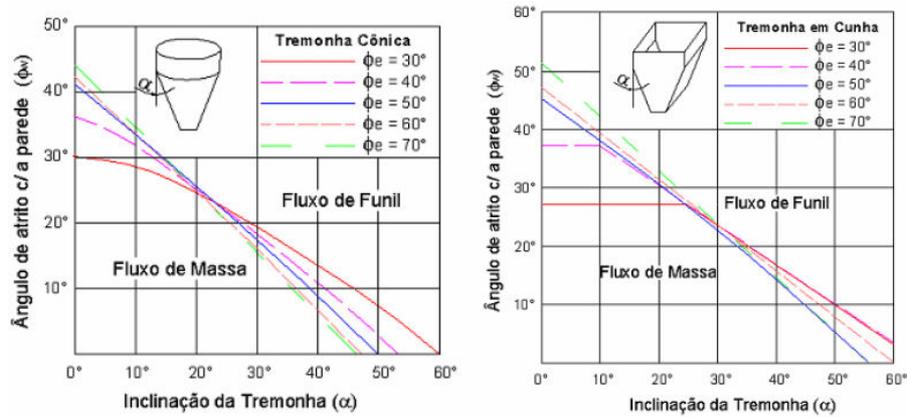


FIGURA 13 Diagramas para projeto de tremonhas.  
Fonte: Schulze (1996).

Mclean, citado por Palma (2005), sugere o seguinte equacionamento para a determinação da inclinação máxima da tremonha para fluxo de massa:

- para tremonhas de eixo simétrico:

$$\alpha_{\text{crit}} = 0,5 \cdot \left[ 180 - \cos^{-1} \left( \frac{1 - \sin \phi_e}{2 \cdot \sin \phi_e} \right) - \left( \phi_w + \sin^{-1} \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_e} \right) \right] \quad (1)$$

- para tremonhas em cunha:

$$\alpha_{\text{crit}} = \frac{e^{3,75 \cdot (1,01)^{(\phi_e - 30)/10}} - \phi_w}{0,725 \cdot (\text{tg} \phi_e)^{0,2}} \quad (2)$$

Conforme Gaylord Júnior & Gaylord (1984), para tremonhas em bisel e em cunha, o fluxo de massa ocorrerá se:

$$\alpha \leq 60^\circ - 1,33 \cdot \phi_w \quad (3)$$

$$\phi_w \leq 0,9 \phi_e \quad (4)$$

$$L \geq 6.b_p \quad (5)$$

### c) Função fluxo

A capacidade do produto de fluir depende da resistência desenvolvida, devido à consolidação e, como resultado da resistência, o produto é capaz de formar um arco estável, ou efeito tubo (Calil Júnior, 1990).

De acordo com Jenike (1964), a função fluxo pode ser classificada de acordo com determinados valores limites, sendo esta propriedade uma relação direta entre tensão de consolidação ( $\sigma_1$ ) e tensão inconfínada de ruptura ( $\sigma_c$ ). Pode-se expressar a função fluxo por meio da Equação 1:

$$FF = \sigma_1 / \sigma_c \quad (6)$$

Conforme Jenike (1964), a função fluxo pode ser classificada de acordo com determinados valores limites (Tabela 4).

TABELA 4 Classificação dos valores limites da função fluxo.

<b>Função fluxo (FF)</b>	<b>Classificação</b>
FF<2	Produto muito coesivo, não flui
2<FF<4	Produto coesivo
4<FF<10	Produto que flui facilmente
FF>10	Produto de fluxo livre

Fonte: Jenike (1964).

Observa-se que, quanto maior o valor da função fluxo, melhor será o escoamento do produto armazenado. Os produtos sem coesão ou de fluxo livre, geralmente, não causam problemas de fluxo.

Fatores como temperatura, umidade e período de armazenamento podem influenciar os resultados dos testes. Sendo assim, os ensaios deverão ser

realizados de acordo com as condições esperadas para o armazenamento do produto.

Alguns produtos podem se consolidar com o tempo de armazenamento. Para medir esta influência, utiliza-se uma bancada de consolidação (Figura 14), em que uma amostra do produto estudado permanece por um tempo sob uma tensão normal, correspondente à tensão de pré-cisalhamento. Passado o tempo analisado, a célula com a amostra é levada ao aparelho de cisalhamento TSG 70-140 (Figura 6), em que se procede às etapas de pré-cisalhamento e de cisalhamento.



FIGURA 14 Foto da bancada de consolidação, em São Carlos.

#### **d) Fator fluxo da tremonha**

O fator de fluxo da tremonha ( $ff$ ) é outro importante parâmetro para o estudo da fluidez dos produtos armazenados que, diferentemente, da função fluxo do produto (FF), é uma propriedade do conjunto silo-produto, dependendo de algumas características de ambos. Para calcular o fator de fluxo do sistema é necessário conhecer: o efetivo ângulo de atrito interno do produto ( $\phi_e$ ), o ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ), a geometria e a inclinação da tremonha (Palma, 2005).

Assim como a função fluxo, o fator fluxo da tremonha também é utilizado para indicar a fluidez do produto armazenado. Porém, ao contrário da função fluxo, quanto mais baixo seu valor, melhor é a fluidez do produto. O fator fluxo é definido como sendo a relação entre a tensão de consolidação ( $\sigma_1$ ) que pode ser desenvolvida em um arco imaginário e a tensão atuante nos apoios do arco ( $\sigma_1'$ ) (Equação 2):

$$ff = \sigma_1 / \sigma_1' \quad (7)$$

#### e) Determinação do fator fluxo da tremonha

Para se determinar o fator fluxo da tremonha graficamente, segundo Jenike (1964), é necessário entrar com os dados do ângulo de atrito com a parede e a inclinação da tremonha. Os gráficos foram confeccionados para tremonha em cunha ou cônica, conforme cada projeto (Figura 15).

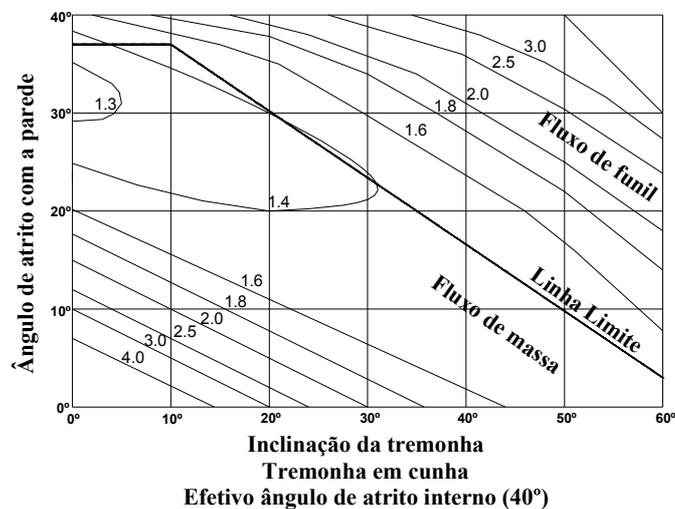


FIGURA 15 Gráfico para determinação do fator fluxo.  
Fonte: Jenike (1964).

O fator fluxo da tremonha ( $ff$ ) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e pode ser determinado, com boa aproximação, pela seguinte equação (Enstad, 1975):

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130+\alpha}\right)^m \cdot \left(\frac{200}{200+\alpha}\right)^{1-m} \quad (8)$$

$$2\beta = \phi_{ws} + \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen}\phi_{ws}}{\text{sen}\phi_{es}}\right) \quad (9)$$

$$\theta = \beta + \alpha \quad (10)$$

$$X = \frac{2^m \cdot \text{sen}\phi_{es}}{1 - \text{sen}\phi_{es}} \cdot \left[ \frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\text{cos}(90 - \alpha)} + 1 \right] \quad (11)$$

$$Y = \frac{[2 \cdot (1 - \text{cos}\theta)]^m \cdot \theta^{1-m} \cdot \text{cos}(90 - \alpha) + \text{sen}\beta \cdot (\text{sen}\theta)^{1+m}}{(1 - \text{sen}\phi_{es}) \cdot (\text{sen}\theta)^{2+m}} \quad (12)$$

$$ff = \frac{Y \cdot (1 + \text{sen}\phi_{es})}{2 \cdot (X - 1) \cdot F(\alpha) \cdot \text{cos}(90 - \alpha)} \quad (13)$$

em que

$m = 0$  para silos retangulares, em que  $L \geq 30$  cm

$m = 1$  para silos de eixo simétrico

$\phi_{es}$  = efetivo ângulo de atrito interno superior

$\phi_{ws}$  = ângulo de atrito com a parede superior

$L$  = maior dimensão da boca de descarga retangular (cm)

Para tremonhas retangulares com  $L \leq 30$  cm, o valor de “m” será encontrado por interpolação entre 0 e 1.

### f) Determinação da tensão crítica

Para a determinação da tensão crítica, plota-se num gráfico a tensão de consolidação ( $\sigma_1$ ) versus a tensão incondfinada ( $\sigma_c$ ) (Figura 16). Esta tensão crítica determina a menor dimensão da boca de descarga para a ocorrência do fluxo.

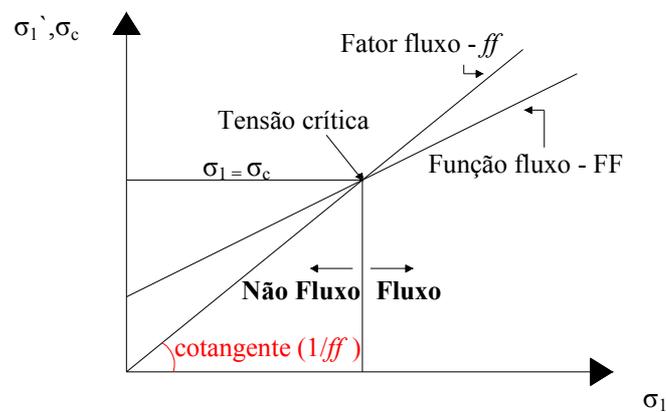


FIGURA 16 Determinação da tensão crítica.

Portanto, para ocorrer fluxo por gravidade:  $FF > ff$ , ou seja,  $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} > \frac{\sigma_1}{\sigma_1'}$

### g) Determinação da função H ( $\alpha$ )

Em se tratando de projetos com fluxo de massa, faz-se necessário, primeiro, determinar a função H ( $\alpha$ ). Essa função é dependente da forma e da inclinação da tremonha. Sua determinação é feita por meio de gráficos, como o da Figura 17 (Jenike, 1964).

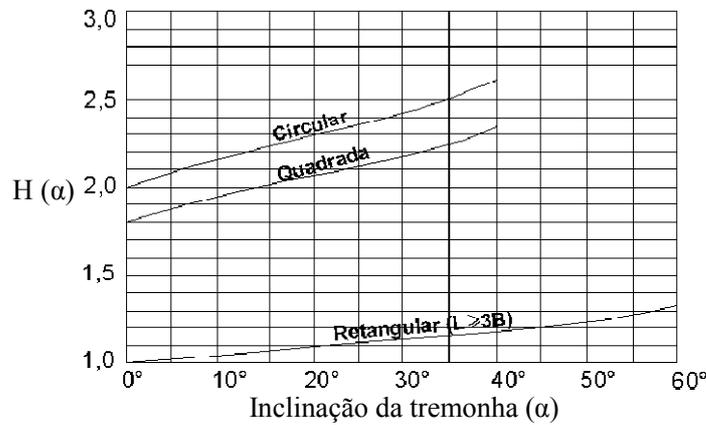


FIGURA 17 Determinação da função  $H(\alpha)$  para tremonha cônica ou em cunha. Fonte: Jenike (1964).

#### h) Determinação da dimensão mínima da boca da tremonha

Para projeto de silos com fluxo tipo de massa, é preciso determinar a menor dimensão da boca de descarga que é dada por:

$$b_{\min} = \frac{H(\alpha) \cdot \sigma_{\text{crit}}}{\gamma_i} \quad (14)$$

Jenike (1964) recomenda que, para evitar instabilidades, a dimensão mínima da boca obtida pela Equação 14 seja multiplicada por 1,2 como fator de majoração.

Ja Gaylord Júnior & Gaylord (1984) sugerem as seguintes equações.

$$b_{\min} \geq \frac{2,2 \cdot \sigma_{\text{crit}}}{\gamma_i}, \text{ para bocas de descarga circular;} \quad (15)$$

$$b_{\min} \geq \frac{1,3 \cdot \sigma_{\text{crit}}}{\gamma_i}, \text{ para bocas de descarga retangulares.} \quad (16)$$

### 2.2.5 Geometria do silo

Geometricamente, os silos multicelulares exigem projetos que considerem as operações mecânicas e as células geminadas. Assim, devem-se levar em consideração as esteiras eletromecânicas para carregamento e descarga do projeto.

### 2.2.6 Considerações das ações em silos verticais

Na elaboração de projetos estruturais é importante a determinação das ações para que com ele se tenha a determinação das pressões atuantes, dimensionamento, estabilidade e segurança estrutural.

No caso dos silos, além das forças que normalmente solicitam uma estrutura, como peso próprio, peso dos equipamentos, cargas acidentais, recalque de apoio e ação do vento, desempenham papel fundamental as pressões oriundas das operações que ocorrem durante a vida útil da estrutura, que se traduzem em pressões nas paredes dos silos, causadas pelo produto armazenado, nas fases de carregamento, armazenamento e descarga (Figura 18) (Pham, 1983).



FIGURA 18 Pressões nas paredes do silo para um ciclo de operação de carga, armazenamento e descarga.

As ações são definidas como causas que provocam a ocorrência de esforços ou deformações nas estruturas. As forças são chamadas de ações diretas e as deformações impostas são designadas por ações indiretas.

Sendo assim, os silos devem ser projetados para resistir a todas as ações que, segundo a norma ACI 313:1997, são:

- ações permanentes: as decorrentes do peso próprio da estrutura e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e/ou tremonha;
- ações variáveis: forças devido ao produto armazenado, incluindo impactos ou sobrecargas, pisos e cobertura; neve; ação do vento ou cargas sísmicas; efeitos de recalques diferenciais da fundação e expansão do produto no descarregamento;
- tensões térmicas devido à diferença de temperatura entre o produto armazenado e o ar exterior.

Um carregamento é definido pelo conjunto de ações com probabilidade de atuação simultânea que devem ser combinadas de forma a representar a condição mais desfavorável para a estrutura.

As classes podem ser assim classificadas:

- permanente: presente em toda a vida útil da construção;
- longa duração: presente mais de seis meses de vida útil da construção;
- média duração: presente mais de uma semana de vida útil da construção;
- curta duração: presente menos de uma semana de vida útil da construção;
- instantânea: presente em curto espaço de tempo.

Para a verificação da segurança, torna-se necessário realizar a combinação das ações atuantes, devendo ser estabelecidas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para que a segurança seja verificada em relação a todos os possíveis estados limites da estrutura.

### **2.2.7 Pressões exercidas pelos produtos armazenados**

Objeto de estudo desde o século passado, nos primeiros silos a serem construídos admitia-se a hipótese de que os produtos armazenados tivessem o comportamento de líquidos, com a aplicação da teoria da hidrostática. Em 1881, Baker deu início ao estudo das pressões exercidas por um sólido nas paredes do silo. Na Inglaterra, em 1892, Roberts realizou os primeiros testes para a determinação das pressões verticais e laterais dos silos.

Em 1895, Janssen testou as hipóteses de Robert e assim forneceu uma das mais importantes expressões matemáticas para o desenvolvimento da teoria sobre pressões em silos. A teoria de Janssen, de 1895, é a mais difundida e adotada por diversas normas que tratam do assunto.

Segundo Calil Júnior (1990), o produto armazenado tem uma variabilidade tanto no tempo e no espaço, não podendo então ser calculada com precisão. As pressões horizontais são aumentadas de maneira considerável na fase de descarga do produto, mas o percentual desse aumento em relação à fase de carregamento ainda é motivo de muita pesquisa.

Em projeto de silos, as principais ações a serem consideradas são as provenientes dos produtos armazenados que exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Na parede vertical atuam pressões perpendiculares, denominadas pressões horizontais ( $P_h$ ) e pressões de atrito do produto com a parede ( $P_w$ ). No fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais ( $P_v$ ), conforme é apresentado na Figura 19 (Palma, 2005).

Os esforços de compressão nas paredes são resultados vindos da pressão de atrito que é distribuída na superfície das paredes e equilibra parte do peso do produto. A existência desse atrito faz com que as pressões horizontais que o produto exerce nas paredes não aumentem indefinidamente com a altura como as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento que tende, exponencialmente, a um valor máximo.

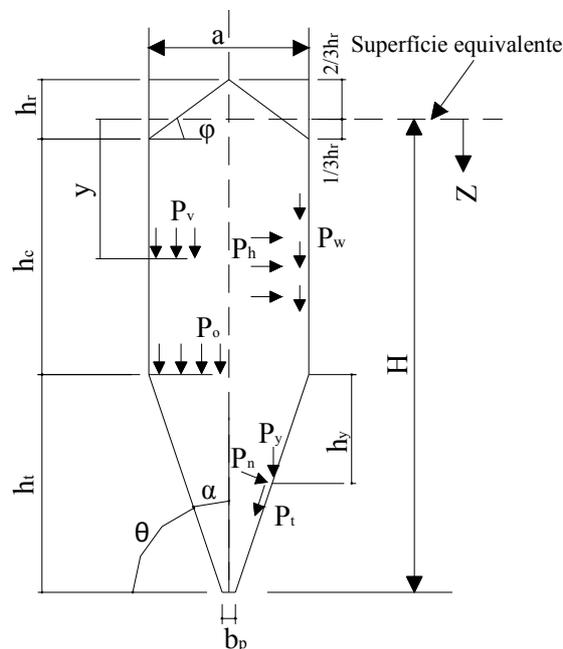


FIGURA 19 Pressões atuantes nos silos.  
Fonte: ACI 313:1997.

Segundo a norma ACI 313:1997, as pressões do produto contra a parede devem ser determinadas pelo método de Janssen e, no fundo do silo (tremonha), pelo método de Janssen ou Walker. As pressões dos produtos são consideradas não somente as pressões estáticas, mas também todos os possíveis aumentos de pressões causados por carregamentos, descarregamentos do produto, arcos, colapso de produto arqueado, aeração e descarga excêntrica.

Para silos multicelulares, a possibilidade de algumas células serem carregadas e outras descarregadas ao mesmo tempo deve ser considerada, pois a operação é feita simultaneamente em linhas de trabalho. A análise do efeito das pressões nas multicélulas passa a ter um caráter peculiar, exigindo do projetista uma avaliação mais criteriosa nas ações combinadas (Figura 20).

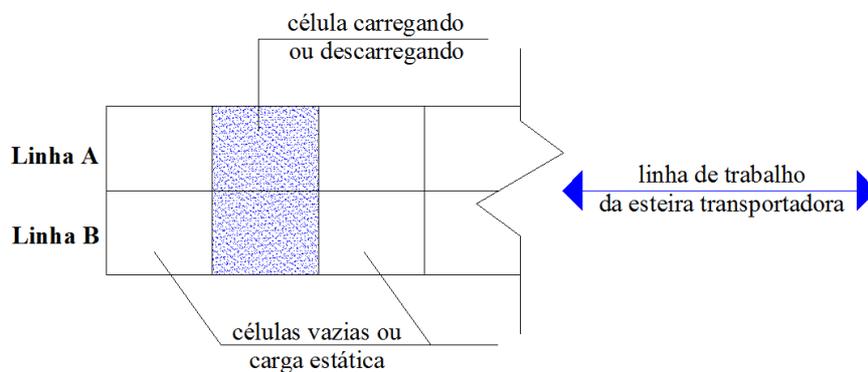


FIGURA 20 Linha de trabalho da esteira transportadora.  
Fonte: Marques Neto (2004).

#### 2.2.7.1 Pressões estáticas nas células

As pressões estáticas são aquelas exercidas pelo produto em repouso, no interior da parede e da tremonha. Após o carregamento dessas células, o peso do produto confinado é suportado pelas paredes e pela tremonha, existindo pressões perpendiculares às paredes, denominadas pressões horizontais, pressões paralelas às paredes devido ao atrito e pressões verticais atuando na seção transversal da massa ensilada.

## a) Pressões estáticas nas paredes

### Teoria de Janssen

A Teoria de Janssen (1895) foi desenvolvida somente para as condições estáticas. Sua contribuição para a teoria de pressões em silos de grãos e para o conhecimento do atrito interno no comportamento de produtos granulares é de grande significado. Sendo até hoje utilizada, tem sido adotada como base de cálculo de diversas normas, principalmente pela norma ACI 313:1997. Até mesmo para o cálculo das pressões durante a descarga, um dos métodos é aplicar fatores de sobrepressão aos valores computados pelas equações de Janssen para se obter as pressões dinâmicas.

A Teoria de Janssen determina as pressões horizontais e verticais por meio do equilíbrio das forças verticais que atuam em uma camada horizontal de material armazenado de altura infinitesimal (Figura 21).

As hipóteses em que esta teoria é baseada são:

- a pressão vertical em uma seção transversal horizontal do produto armazenado é constante na seção.
- denominada de  $K$ , a razão entre as pressões horizontais e verticais,  $K = P_h/P_v$ , tem valor constante para qualquer profundidade.

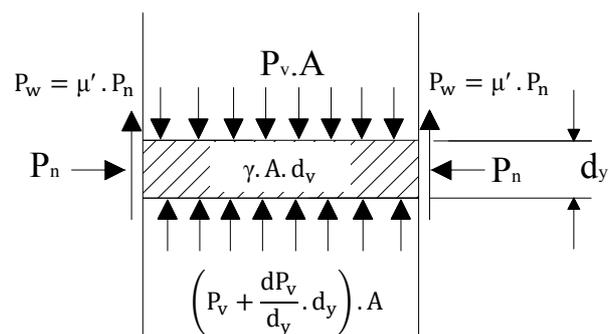


FIGURA 21 Forças agindo sobre uma camada infinitesimal.

Os procedimentos de cálculo das pressões estáticas, segundo a norma ACI 313:1997, devem ser feitos pela Teoria de Janssen:

**Pressões estáticas nas paredes:**

(a) Pressão estática vertical por unidade de profundidade  $y$  abaixo da superfície do produto armazenado (Figura 19):

$$P_v = \frac{\gamma R}{\mu' K} [1 - e^{-\mu' K y / R}] \quad (17)$$

em que

$P_v$  = pressão vertical atuando sobre a seção transversal do produto armazenado na profundidade  $y$ ;

$\gamma$  = peso específico do produto armazenado;

$K$  = relação entre pressão horizontal e vertical, denominado coeficiente  $K$ ;

$y$  = profundidade da superfície equivalente do produto armazenado dentro do corpo da célula;

$R$  = raio hidráulico, sendo para:

. silos circulares:  $R = D/4$  e silos com forma de polígonos retangulares  $R = d_c/4$ , em que  $d_c$  é o diâmetro do círculo de área equivalente inscrito no silo;

. silos quadrados:  $R = a/4$ , onde  $a$  é o comprimento do lado;

. silos retangulares: para cálculo da pressão próxima ao menor lado da parede, aplica-se  $R = a/4$  e, para pressão próxima ao maior lado da parede, aplica-se  $R = a^2/4$ , em que  $a'$  é o comprimento do lado de um silo imaginário:  $a' = 2.a.L/a+L$ , em que  $a$  = comprimento do lado menor e  $L$  = comprimento do lado maior,

$\mu'$  = coeficiente de atrito com a parede, sendo:

$$\mu' = \text{tg } \phi_w \text{ onde: } \phi_w = \text{ângulo de atrito com a parede}$$

(b) Pressão estática horizontal por unidade de profundidade  $y$  abaixo da superfície do produto armazenado (Figura 19):

$$P_h = K \cdot P_v \quad (18)$$

em que

$P_v$  = pressão horizontal sobre as paredes do silo, na profundidade  $y$

(c) Taxa de pressão lateral deve ser calculada por (Figura 19):

$$K = 1 - \text{sen}\phi_i \quad (19)$$

em que

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno

(d) Força de atrito vertical por unidade de comprimento do perímetro da parede em profundidade  $y$  abaixo da superfície do produto (Figura 19):

$$P_w = (\gamma \cdot y - P_v) \cdot R \quad (20)$$

em que

$P_w$  = força de atrito vertical na profundidade  $y$  por unidade de comprimento do perímetro da célula

(e) As seguintes combinações das propriedades físicas dos produtos devem ser utilizadas com  $\gamma$  máximo, para se obter as máximas pressões e força de atrito:

(1) mínimo  $\mu'$  e  $K$  para a máxima pressão vertical  $P_v$ ;

- (2) mínimo  $\mu'$  e máximo K para a máxima pressão horizontal  $P_h$ ;  
 (3) máximo  $\mu'$  e K para máxima força de atrito vertical  $P_w$ .

### b) Pressões estáticas na tremonha

Pressões na tremonha são mais complexas de prever que as pressões na parede. O fluxo de massa resulta em altas pressões no topo da tremonha.

As principais teorias existentes de pressões em tremonhas são baseadas no equilíbrio de uma fatia elementar do produto submetido a uma tensão inicial na parte superior, como mostrado na Figura 22.

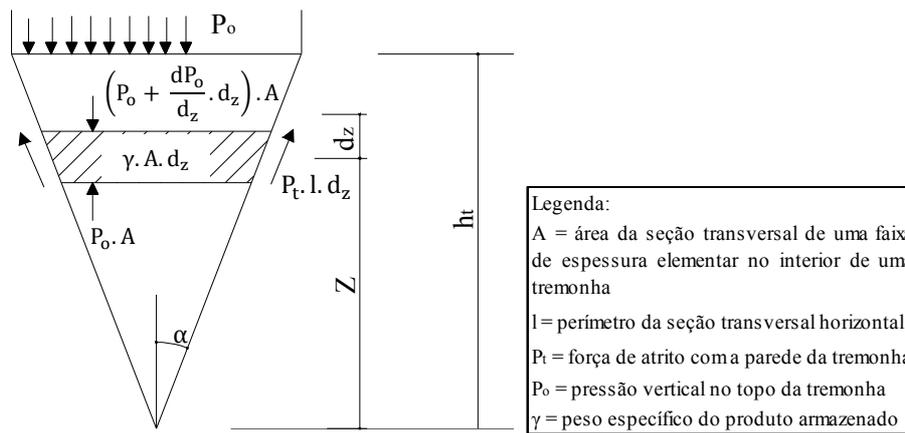


FIGURA 22 Forças atuando em uma faixa elementar de uma tremonha.

A norma ACI 313:1997 aborda as pressões nas tremonhas por duas teorias: Janssen e Walker.

### Teoria de Janssen

Pressões iniciais (enchimento) na parte superior da tremonha:

- (a) Pressão vertical inicial na profundidade  $h_y$ , na parte superior da tremonha (Figura 19):

$$P_y = P_o + \gamma \cdot h_y \quad (21)$$

em que

$P_o$  = pressão inicial vertical na parte superior da tremonha, calculada pela Equação 17.

(b) A pressão inicial normal à superfície da tremonha à profundidade  $h_y$ , na parte superior da tremonha, será maior entre (Figura 19):

$$P_n = \frac{P_y \cdot \text{tg } \alpha}{\text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \phi_w} \quad (22)$$

ou

$$P_n = P_y \cdot (\text{sen}^2 \alpha + K \cdot \text{cos}^2 \alpha) \quad (23)$$

(c) Forças de atrito na profundidade  $h_y$ , por unidade de perímetro da tremonha (Figura 19):

$$P_t = P_n \cdot \text{tg } \phi_w \quad (24)$$

quando a Equação 22 for utilizada para determinar o  $P_n$  e por

$$P_t = P_y \cdot (1 - K) \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \alpha \quad (25)$$

quando a Equação 23 for utilizada para determinar a  $P_n$ .

### **Teoria de Walker**

A Teoria de Walker, proposta em 1966, para o estudo de fluxo, apresenta as tensões na massa de um produto granular ou pulverulento em tremonhas e ainda os fatores críticos que asseguram a continuidade do fluxo

gravitacional. O campo de tensões durante o fluxo de massa foi deduzido considerando que as forças agem numa camada elementar e ao longo da parede da tremonha e do corpo do silo.

O método que tem sido utilizado para o projeto para a determinação das pressões em tremonha de fluxo massa é:

(a) Pressão vertical na profundidade  $h_y$ , na parte superior da tremonha (Figura 19):

$$P_y = \frac{\gamma}{n-1} (h_t - h_y) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_t - h_y}{h_t} \right)^{n-1} \right] + P_o \cdot \left[ \frac{h_t - h_y}{h_t} \right]^n \quad (26)$$

em que  $P_o$  é calculado pela Equação 17 e,

$$\text{para tremonhas de fluxo plano, } n = \frac{B}{\text{tg } \alpha} \quad (\text{mas não menos que } 1,0) \quad (27)$$

em que

$$B = \frac{\sin \phi_i \cdot \sin 2(\alpha + \beta)}{1 - \sin \phi_i \cdot \cos 2(\alpha + \beta)} \quad (28)$$

e

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \phi_w + \text{arc sin } \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_i} \right] \quad (29)$$

(b) A pressão normal para a superfície da tremonha na profundidade  $h_y$ , na parte superior da tremonha (Figura 19):

$$P_n = \frac{1 + \sin \phi_i \cdot \cos(2\beta)}{1 - \sin \phi_i \cdot \cos 2(\alpha + \beta)} \cdot P_y \quad (30)$$

### c) Pressões adicionais em silos com fluxo de massa

Em vários estudos experimentais realizados até hoje concluiu-se que altas pressões ocorrem na transição do silo, no entanto, estas não são consideradas pela norma ACI 313:1997. Isso induz à utilização da norma alemã DIN 1055-6:2005, na qual as pressões adicionais, devido ao fluxo de massa na transição do corpo do silo com a tremonha, serão dadas pelo menor valor das seguintes equações:

$$P_s = \gamma \cdot Z \quad (31)$$

$$P_s = \gamma \cdot d_c \quad (32)$$

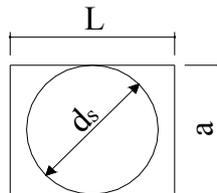
em que

$P_s$  = pressão adicional em silo com fluxo de massa

$\gamma$  = peso específico do produto

$d_c$  = diâmetro do círculo de área equivalente inscrito no silo

sendo, para seções retangulares:



Considera-se que a pressão adicional varie linearmente de  $0,3d_c$  acima e abaixo da transição, como mostrado na Figura 23.

$$c = 0,3 \cdot d_c \quad (33)$$

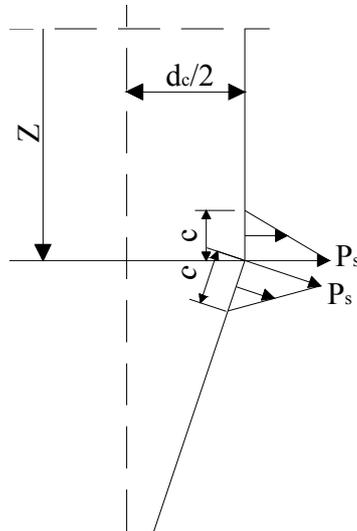


FIGURA 23 Pressões adicionais – fluxo de massa.  
Fonte: DIN 1055-6:2005.

#### 2.2.7.2 Pressões dinâmicas ou de descarregamento

De modo geral, existem dois métodos para determinar as pressões dinâmicas: calcular diretamente as pressões, por meio de formulações matemáticas obtidas teoricamente ou indiretamente, modificando a pressão estática calculada usando coeficientes de sobrepessão.

As normas, de modo geral, propõem, para a obtenção das pressões dinâmicas advindas do descarregamento do produto, a adoção do método dos coeficientes de sobrepessão aplicados às pressões estáticas e, além disso, algumas recomendam a adoção de pressões adicionais, de modo a levar em conta efeitos de excentricidade construtiva e, mesmo, sobrepessões na efetiva transição.

Conforme a norma ACI 313:1997, os coeficientes de sobrepessão ( $C_d$ ) são estabelecidos em função da relação altura/diâmetro do silo e têm valores crescentes da borda superior até o fundo. São estabelecidos cinco intervalos para a altura da célula ( $H$ ), conforme indicado na Tabela 5 e, para cada um

deles, há dois valores para o coeficiente  $C_d$ , sendo um adotado por Janssen e outro por Reimbert. No trecho da tremonha ( $h_t$ ), é considerado um valor para  $C_d$ , igual ao adotado no último intervalo da célula.

Safarian (1969), a partir das pressões estáticas dadas por Janssen e Reimbert, apresentou uma proposta de pressões dinâmicas, empregando coeficientes de majoração (Tabelas 6 e 7) estabelecidos a partir de trabalhos teóricos e experimentais. Para o escoamento de massa, os valores obtidos na Tabela 6 devem ser acrescidos entre 10% a 25%.

As ações da massa ensilada em movimento são dadas por:

$$P_{hd} = C_d \cdot P_h \quad (34)$$

$$P_{vd} = C_d \cdot P_v \quad (35)$$

$$P_{wd} = P_w \text{ para silos de concreto} \quad (36)$$

$$P_{wd} = P_w / 0,9 \text{ para silos de aço} \quad (37)$$

TABELA 5 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ).

D - DIÂMETRO INTERNO DA CÉLULA CILÍNDRICA. a - LARGURA DA PAREDE DE CÉLULA POLIGONAL REGULAR OU DO LADO MENOR DE CÉLULA RETANGULAR. b - LARGURA DO LADO MAIOR DE CÉLULA RETANGULAR. $H_1$ - ALTURA DA TREMONHA, OU ALTURA DA TREMONHA FORMADA PELO MATERIAL ENSILADO OU ALTURA DO MATERIAL DE ENCHIMENTO SOBRE A LAJE DE FUNDO CUME DO MATERIAL DO SILO		$H < 2D$		$2 = H < 3D$		$3 = H < 4D$		$4 = H < 5D$		$H > 5D$	
		JANSSEN	REIMBERT	JANSSEN	REIMBERT	JANSSEN	REIMBERT	JANSSEN	REIMBERT	JANSSEN	REIMBERT
H (Altura da Célula)	$H_1 = D \operatorname{tg} \phi$ ou $H_1 = a \operatorname{tg} \phi$ Ou $H_1 = b \operatorname{tg} \phi$	1,35	1,10	1,45	1,20	1,50	1,25	1,60	1,30	1,65	1,35
	$(H-H_1)/4$	1,45	1,20	1,55	1,30	1,60	1,35	1,70	1,40	1,75	1,50
	$(H-H_1)/4$	1,55	1,45	1,65	1,55	1,75	1,60	1,80	1,70	1,90	1,75
	$(H-H_1)/4$	1,65	1,65	1,75	1,75	1,85	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00
	$(H-H_1)/4$	1,65	1,65	1,75	1,75	1,85	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00
	$(H-H_1)/4$	1,65	1,65	1,75	1,75	1,85	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00
$H_1$		USAR A MESMA PRESSÃO EM TODA A ALTURA DA TREMONHA OU, SE DESEJAR, REDUZIR AS PRESSÕES DE ACORDO COM A VARIAÇÃO DO RAIO HIDRÁULICO									
		SE DESEJADO, AS PRESSÕES PODEM SER REDUZIDAS DO INÍCIO ATÉ O FUNDO DA TREMONHA.									
COEFICIENTES DE MAJORAÇÃO $C_d$ PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO DINÂMICA DO FUNDO DO SILO	FUNDO DE CONCRETO	1,35	1,50	1,35	1,50	1,35	1,50	1,35	1,50	1,35	1,50
	FUNDO DE AÇO	1,50	1,75	1,50	1,75	1,50	1,75	1,50	1,75	1,50	1,75

Notas:

- 1) Fator  $C_d$  para pressão lateral é dado para direção do fundo em cada trecho de altura.
- 2) A região de pressão lateral de pouca correção inserida pode, algumas vezes, ser maior que a estática, então, os valores acima não são suficientes.
- 3) As pressões no fundo do silo não necessitam ser maior que a pressão causada por 100% do peso do silo corrente.
- 4) Se  $H_1 < H \leq 2H_1$ , usar o segundo valor de  $C_d$  para o topo e em toda altura do silo H.
- 5) Valores do fator  $C_d$  para H/D entre estes dados pela Tabela 5 podem ser determinados por meio de interpolação linear.

6) Valores do fator  $C_d$  dados pela Tabela 5, para cálculo de projeto do fundo do silo, podem ser multiplicados por 0,75, para produtos não coesivos, exceto para silos de homogeneização, onde descarga pneumática é utilizada.

7) Os fatores  $C_d$  apresentados na Tabela 5 são valores mínimos recomendados. Portanto, maiores valores de  $C_d$  podem ser utilizados, mas somente para casos particulares em que o projetista demonstre que o fator seja satisfatório.

Fonte: ACI 313:1997.

TABELA 6 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ).

Descrição da área de aplicação	Silo de concreto		Silo de aço	
	Reimbert	Janssen	Reimbert	Janssen
<b>I - Valores de <math>C_d</math> para determinação das pressões horizontais dinâmicas (Fig. 24)</b>				
1. Silo unicelular circular ou poligonal				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	H/D = 1,5	1,50	1,75	1,65
	H/D > 4,5	1,75	1,75	1,95
2. Grupo de células circulares ou poligonais em linha reta e torre de controle				
(A). CELULAS EXTERNAS				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3H	H/D = 1,5	1,50	1,75	1,65
	H/D > 4,5	1,75	1,75	1,95
(B). CELULAS INTERNAS				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3H	H/D = 1,5	1,25	1,50	1,40
	H/D > 4,5	1,50	1,50	1,65
3. Células intersticiais				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3H	H/D = 1,5	1,25	1,50	1,40
	H/D > 4,5	1,50	1,50	1,65
4. Pequenas células no interior de qualquer arranjo destas e células externas conectadas a pequenas células				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3H	H/D = 1,5	1,50	1,35	1,10
	H/D > 4,5	2,00	2,00	2,20
5. Silos unicelulares e multicelulares quadrados ou retangulares				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO $H_1$	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3H	H/(a ou b) = 1,50	1,25	1,50	1,40
	H/(a ou b) > 4,50			
	$H_1 = D \cdot \text{tg } \phi < H/3$	1,50	1,50	1,65
	$(H_1)a = b \cdot \text{tg } \phi < H/3$ $(H_1)b = a \cdot \text{tg } \phi < H/3$			1,65

Fonte: Safarian (1969).

TABELA 7 Coeficientes de majoração ( $C_d$ ) continuação.

Descrição da área de aplicação	Silo de concreto		Silo de aço	
	Reimbert	Janssen	Reimbert	Janssen
<b>II - Valores de <math>c_d</math> para determinação das pressões no fundo da célula</b>				
1. Fundo plano com ou sem tremonha formada por enchimento de concreto, sistema de vigas e placas de concreto, tremonha de concreto, vigas curvas e pilares de concreto				
(A). PARA AVEIA E FARINHA	1,50	1,25	1,50	1,25
(B). PARA TODOS TIPOS DE CEREAIS	1,35	1,10	1,35	1,10
(C). TODOS TIPOS DE MATERIAIS GRANULARES EXCETO OS DOS ITENS (A) E (B) ACIMA				
C.1 FUNDO COM TREMONHAS FORMADAS POR ENCHIMENTO DE CONCRETO	1,35	1,10	1,35	1,10
C.2 FUNDOS SEM TREMONHAS FORMADAS POR ENCHIMENTO DE CONCRETO, TREMONHAS DE CONCRETO, VIGAS CURVAS E PILARES SUPORTANDO O FUNDO DAS CELULAS.	1,75	1,50	1,75	1,50
2. Tremontas e vigas curvas de aço; vigas de aço em silos metálicos ou de concreto armado				
(A). PARA AVEIA E FARINHA	1,75	1,50	1,75	1,5
(B). PARA TODOS TIPOS DE CEREAIS	1,5	1,25	1,50	1,25
(C). TODOS TIPOS DE MATERIAIS GRANULARES EXCETO OS DOS ITENS (A) E (B) ACIMA	2,5	2,25	2,50	2,25

**OBSERVAÇÃO:** os valores do coeficiente  $c_d$  para  $h/d$  entre 1,50 e 4,50, para a teoria de Reimbert, podem ser determinados por interpolação.

Fonte: Safarian (1969).

Baseado em várias curvas experimentais de pressão horizontais obtidas durante a descarga de produto armazenado, as quais indicavam que grandes sobrepressões podiam ocorrer nos dois terços inferiores da célula, enquanto que relativamente pequenas sobrepressões ocorriam na parte superior da célula, Safarian, então, estabeleceu uma curva simplificada para as pressões horizontais dinâmicas (Figura 24).

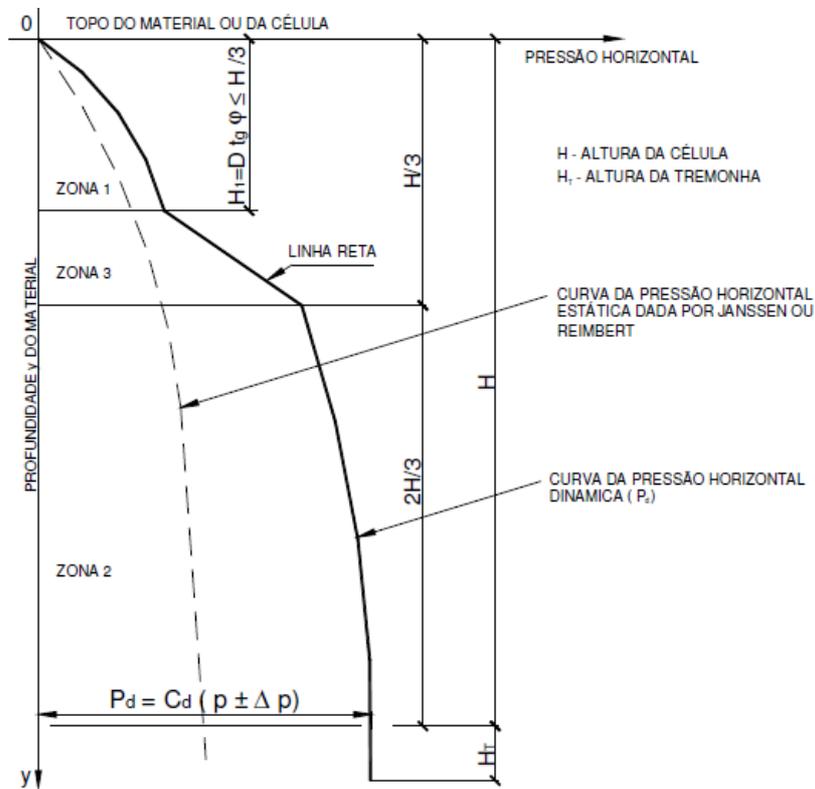


FIGURA 24 Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por Safarian (1969).

### 2.3 Definições dos esforços solicitantes atuando na estrutura do silo prismático

Definida todas as ações que atuam nas células em função da arquitetura dos silos multicelulares de células prismáticas, levando em consideração as várias situações de carregamento obtidas com as combinações de células cheia, descarga e vazia, duas situações críticas de carregamento podem ser definidas:

- carregamento na célula unitária;
- carregamento no conjunto de células.

O sistema estrutural é analisado e projetado considerando-se os esforços de tração, compressão e momentos fletores, devido à ação do produto.

Serão abordados a seguir os esforços solicitantes nas paredes e na tremonha para silo prismático retangular, segundo a norma ACI 313:1997.

### **2.3.1 Esforços nas paredes do silo prismático**

#### **2.3.1.1 Esforço horizontal nas paredes do silo**

##### **a) Determinação dos esforços de tração,**

A força horizontal de tração ilustrada na Figura 25, atuando nas paredes do silo multicelular, devido ao produto armazenado, pode ser determinada, segundo Moral, Troitsky e Ravenet, citados por Calil Júnior et al. (1997), pelas Equações 38 e 39:

$$T_a = P_{hdL} \cdot \frac{L}{2} \quad \text{para o lado "a"} \quad (38)$$

$$T_L = P_{hda} \cdot \frac{a}{2} \quad \text{para o lado "L"} \quad (39)$$

Quando as duas células estiverem cheias, a análise da força de tração deverá ser feita considerando a força de tração devido à reação das duas paredes adjacentes e será dada pelas equações:

$$2T_a = P_{hdL} \cdot L \quad (40)$$

$$2T_L = P_{hda} \cdot a \quad (41)$$

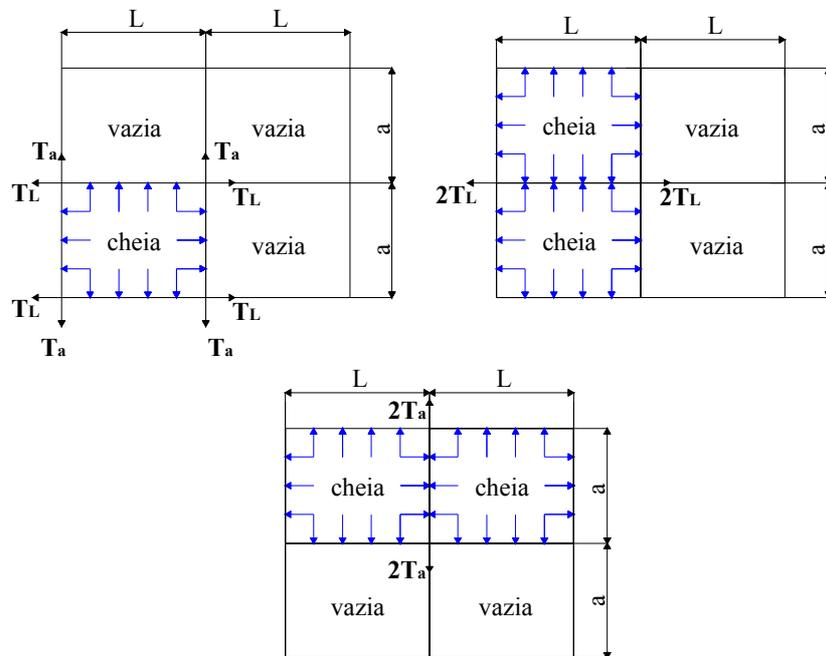


FIGURA 25 Forças horizontais de tração atuando em silos prismáticos.

Para a determinação da força de tração horizontal, última assume-se que a pressão horizontal causada pelo produto armazenado distribui-se uniformemente por todo o perímetro da seção transversal da célula, para uma dada altura.

A força horizontal última de tração ( $F_u$ ) por unidade de altura da célula, proposta pela norma ACI 313:1997, é calculada pelas equações:

$$F_{a,u}(y) = 1,7 \cdot \frac{L}{2} \cdot P_{hdL}(y) \quad (42)$$

$$F_{L,u}(y) = 1,7 \cdot \frac{a}{2} \cdot P_{hda}(y) \quad (43)$$

em que

$F_{a,u}(y)$  = força horizontal última de tração por unidade de profundidade  $y$  da célula, parede “a” ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$F_{L,u}(y)$  = força horizontal última de tração por unidade de profundidade  $y$  da célula, parede “L” ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$P_{hd}(y)$  = pressão horizontal dinâmica na profundidade  $y$  ( $\text{kN m}^{-2}$ );

O valor 1,7 é o coeficiente da ponderação para ações variáveis, recomendado pela norma ACI 313:1997.

## **b) Determinação dos momentos fletores**

Considerou-se um estudo do comportamento das células de silos multicelulares, de acordo com as hipóteses.

Na Figura 26 é mostrado o diagrama de momentos nas paredes dos silos prismáticos retangulares quando carregados, segundo Moral, Gray, Reimbert e Troitsky, citado por Calil Júnior et al. (1997).

### **b.1) Momento nos cantos**

Por trabalhar com paredes de mesma espessura, tem-se o mesmo momento de inércia  $I_a = I_L$ . Então, o momento fletor no canto será:

$$M_c = \frac{-(P_{hda} \cdot a^3 + P_{hdL} \cdot L^3)}{12(a+L)} \quad (44)$$

### **b.2) Momento fletor no meio do vão**

$$M_a = \frac{P_{hda} \cdot a^2}{8} - M_c \quad (45)$$

$$M_L = \frac{P_{hdL} \cdot L^2}{8} - M_c \quad (46)$$

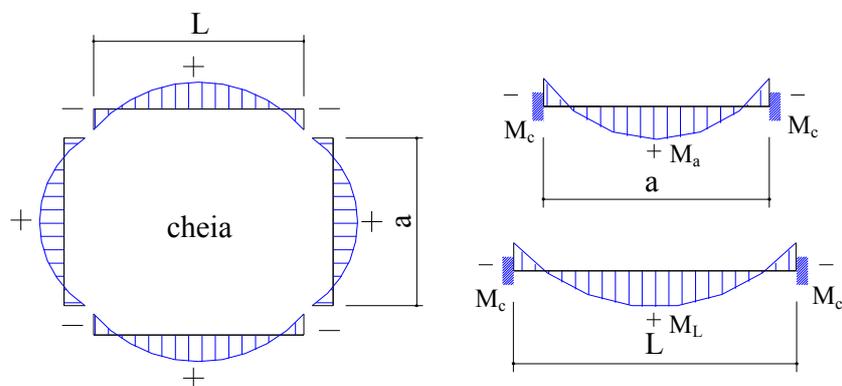


FIGURA 26 Esquema do diagrama de momentos fletores.

Segundo Guerrin ([19--]), o momento  $M_L$  na face maior é sempre positivo:  $P_{hd}.L^2/8 > M_c$ . Ao contrário, o momento na face menor  $M_a$  pode se anular. Tem-se, com efeito:  $P_{hd}.a^2/8 - M_c = 0$ , para  $L/a = 1,31$ .

Se  $L/a > 1,31$ , o momento  $M_a$  na face menor torna-se negativo. A parede menor é, então, tracionada internamente.

O momento fletor último ( $M_u$ ) por unidade de altura da célula é calculado pelas Equações 44, 45 e 46, mas deve ser multiplicado pelo valor 1,7, que é o coeficiente de ponderação para ações variáveis recomendado pela norma ACI 313:1997.

### 2.3.1.2 Esforço vertical nas paredes do silo

A força vertical última por unidade de perímetro da célula ( $F_{v,u}$ ) é possível de se calcular, tendo uma proposta de valor para a parede do silo.

A equação para cálculo da força vertical última tem os valores de coeficientes de ponderação de 1,7 e 1,4 para as ações acidentais e permanentes, respectivamente, indicados pela norma ACI 313:1997, sendo a seguinte:

$$F_{v,u} = 1,7.(P_w + AA_C + \text{outras ações acidentais}) + 1,4.(PP + PP_C + \text{outras ações permanentes}) \quad (47)$$

em que

$P_w$  = força de atrito vertical na parede da célula, distribuída linearmente no perímetro da seção;

$AA_C$  = reação da carga acidental da cobertura na parede da célula, distribuída linearmente no perímetro da seção;

$PP$  = peso próprio da célula, distribuído linearmente no perímetro da seção;

$PP_C$  = reação do peso próprio devido à cobertura na parede da célula, distribuído linearmente no perímetro da seção.

A ação devido ao peso próprio da célula ( $PP$ ) é obtida pela Equação 48:

$$PP = \gamma_c \cdot h \cdot y \quad (48)$$

em que

$\gamma_c$  = peso específico do concreto armado,  $25 \text{ kN m}^{-3}$ , segundo NBR 6120:2000;

$h$  = espessura da parede do silo (m);

$y$  = profundidade da parede da célula (m).

Na cobertura da célula, considera-se que seja de laje pré-moldada para facilitar, devido à altura das células, o escoramento, a fixação e a retirada das fôrmas para concreto armado tornam-se tarefas bastante complicadas de executar. O peso próprio da cobertura da célula deve ser considerado igual a  $1,4 \text{ kN m}^{-2}$  e, assim, a reação do peso próprio devido à cobertura nas paredes do silo é obtida pela equação:

$$PP_c = \frac{1,4.(a.L)}{\text{Perímetro}} \quad (49)$$

Para o cálculo da carga acidental da cobertura, considera-se, inicialmente, o valor de 0,6 kN m<sup>2</sup> por unidade de área. Essa sobrecarga acidental é transformada em uma força distribuída linearmente pelo perímetro da célula, por meio da seguinte equação:

$$AA_c = \frac{0,6.(a.L)}{\text{Perímetro}} \quad (50)$$

Para silo retangular, a força de atrito da parede do lado “a” é diferente da força de atrito da parede do lado “L” e também, quando a parede é geminada, as forças de atrito ocorrem em ambos os lados.

### **2.3.2 Esforços na tremonha do silo prismático**

As paredes de tremonha piramidais estão sujeitas a momentos, cisalhamento e forças de tensão direta. As forças de tração ocorrem devido ao efeito de membrana. Estas serão biaxiais, sendo uma horizontal e a outra meridional, segundo a norma ACI 313:1997 e Safarian & Harris (1985).

#### **a) Determinação dos esforços de tração**

Para tremonhas simétricas, os ângulos de declividade das paredes com a horizontal serão designados por  $\alpha_a$  e  $\alpha_L$ , respectivamente em relação a uma seção transversal de dimensões “a” e “L”, conforme Figura 27.

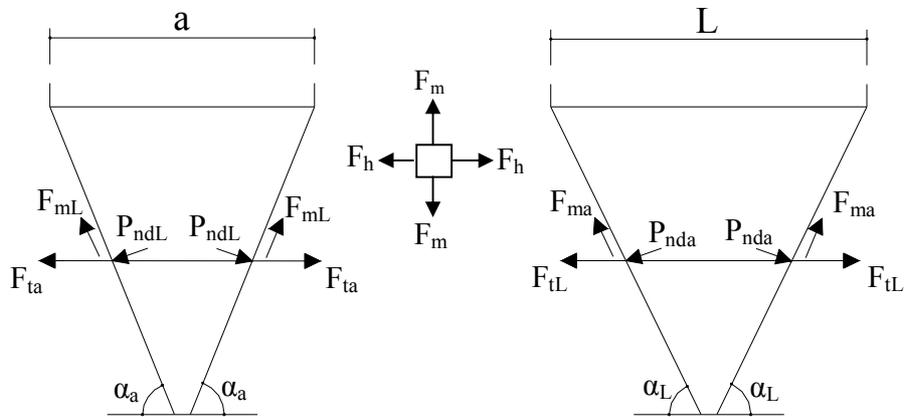


FIGURA 27 Esforços de tração horizontais e meridionais, nas tremonhas piramidais.

#### a.1) Força de tração horizontal

As forças de tração horizontais última ( $F_{t,u}$ ), calculadas por unidade de largura de parede “a” e “L”, segundo a norma ACI 313:1997, para tremonhas piramidais são:

$$F_{ta,u} = 1,7 \cdot \frac{L}{2} \cdot P_{ndL} \cdot \text{sen } \alpha_a \quad (51)$$

$$F_{tL,u} = 1,7 \cdot \frac{a}{2} \cdot P_{nda} \cdot \text{sen } \alpha_L \quad (52)$$

em que

$F_{ta,u}$  = força de tração horizontal última por unidade de profundidade  $h_y$  da tremonha, parede “a” ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$F_{tL,u}$  = força de tração horizontal última por unidade de profundidade  $h_y$  da tremonha, parede “L” ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$P_{nd}$  = pressão horizontal dinâmica na profundidade  $h_y$  na parede “a” e “L” da tremonha à superfície inclinada a um ângulo horizontal ( $\text{kN m}^{-2}$ );

$\alpha_a$  e  $\alpha_L$  = ângulos de inclinação da parede “a” e “L” relativos à horizontal.

### a.2) Força de tração meridional

As paredes inclinadas das tremonhas também estão sujeitas a forças de tração ao longo de seus meridianos.

As forças de tração meridional última ( $F_{m,u}$ ) por unidade de largura da parede “a” e “L”, segundo a norma ACI 313:1991, para tremonhas piramidais, são, respectivamente:

$$F_{ma,u} = \frac{1,7(c_a \cdot W_m + A_a \cdot P_{yda}) + 1,4 \cdot c_a \cdot W_g}{a \cdot \text{sen} \alpha_a} \quad (53)$$

$$F_{mL,u} = \frac{1,7(c_L \cdot W_m + A_L \cdot P_{yL}) + 1,4 \cdot c_L \cdot W_g}{L \cdot \text{sen} \alpha_L} \quad (54)$$

em que

$W_g$  = peso próprio da tremonha (kN);

$W_m$  = peso do produto armazenado na tremonha (kN);

$P_{yd}$  = pressão vertical devido ao produto armazenado na profundidade  $h_y$  na parede “a” e “L” da tremonha ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$A_a$  = área de fundo afluyente para parede “a” ( $\text{m}^2$ );

$A_L$  = área de fundo afluyente para parede “L” ( $\text{m}^2$ );

$c_a$  e  $c_L$  = coeficientes de distribuição das cargas das tremonhas.

Para as distribuições das pressões nas áreas  $A_a$  e  $A_L$  podem ser definidos coeficientes de distribuição, que proporcionam a divisão da carga vertical na tremonha entre as paredes “a” e “L”, dada por:

$$c_a = \frac{A_a}{A_g} \quad (55)$$

$$c_L = \frac{A_L}{A_g} \quad (56)$$

que podem ser relacionados pela seguinte expressão:

$$2c_a + 2c_L = 1,0 \quad (57)$$

Segundo Calil Júnior et al. (1997), as hipóteses que culminam nas Equações 55 e 56 são conservadoras e serviram de base para a norma ACI 313:1991. Nestas equações são desprezados os efeitos do atrito nas paredes da tremonha e os cálculos das pressões são feitos por área de influência.

#### **b) Determinação dos momentos fletores**

A determinação é a mesma descrita para as paredes do silo prismático citado no 2.3.1.1 b.

### **2.4 Considerações para o dimensionamento do silo prismático de concreto armado**

#### **2.4.1 Projeto das paredes do silo**

As paredes do silo devem ser projetadas para resistir a todos os tipos de tensões, compressões e outras cargas às quais elas podem estar sujeitas.

##### **2.4.1.1 Armadura horizontal**

A armadura horizontal é determinada nos projetos das paredes, sendo considerada somente a flexão ou a combinação entre tensão direta e flexão. Mas, quando se trabalha com silos multicelulares, com a presença de paredes

entre duas células cheias, haverá também a ocorrência de esforço de tração, pois na parede pode não ocorrer momento fletor.

Neste caso, a área de armadura horizontal para absorver a força horizontal causada pelo produto armazenado é obtida pela equação:

$$A_s = \frac{F_u}{\phi_s \cdot f_y} \quad (58)$$

em que

$F_u$  = força horizontal última de tração, obtida pelas Equações 42 e 43 ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$f_y$  = tensão de escoamento do aço à tração ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$\phi_s$  = fator de redução da tensão de escoamento do aço à tração, adotado igual a 0,9, segundo a norma ACI 313:1991;

$A_s$  = área de armadura horizontal ( $\text{cm}^2 \text{ m}^{-1}$ ).

A combinação de  $M_u$  e  $F_u$  é, primeiro, substituída por uma tensão excêntrica, com  $e = M_u/F_u$ . A força excêntrica ( $F_u$ ) pode estar no espaço entre as camadas de aço (Figura 28) ou fora desse espaço (Figura 29). Uma abordagem de projeto diferente é sugerida para cada caso.

#### **Caso I:** Flexão simples

- Pequena excentricidade, tem a condição de:  $e \leq h/2 - d''$  (Figura 28).

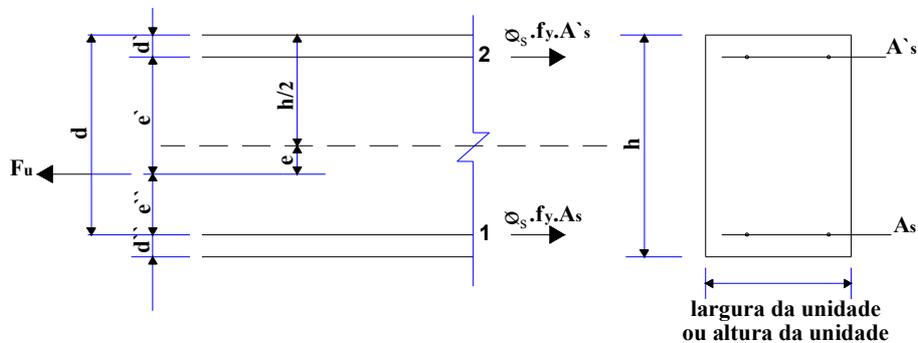


FIGURA 28 Tensão com pequena excentricidade (Caso I).  
Fonte: ACI 313:1991.

Para o cálculo da área de aço necessária para as tensões por unidade de altura (caso I), utilizam-se as equações de equilíbrio, dadas a seguir:

$$\Sigma M^1=0 \rightarrow F_u \cdot e'' = A'_s \cdot \phi_s \cdot f_y \cdot (d-d')$$

$$A'_s = \frac{F_u \cdot e''}{\phi_s \cdot f_y \cdot (d-d')} \quad \text{no lado oposto à força } F_u \quad (59)$$

$$\Sigma M^2=0 \rightarrow F_u \cdot e' = A_s \cdot \phi_s \cdot f_y \cdot (d-d')$$

$$A_s = \frac{F_u \cdot e'}{\phi_s \cdot f_y \cdot (d-d')} \quad \text{no lado próximo à força } F_u \quad (60)$$

em que

$F_u$  = força horizontal última de tração, obtida pelas Equações 42 e 43 ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$f_y$  = tensão de escoamento do aço à tração ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$\phi_s$  = fator de redução da tensão de escoamento do aço à tração, adotado igual a 0,9, segundo a norma ACI 313:1991;

$e$ ,  $e'$ ,  $e''$  = excentricidades (m);

$d$  = profundidade efetiva para flexão do concreto (m);

$d'$  = distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais próxima da seção (m);

$d''$  = distância do centro de gravidade da armadura até à borda mais próxima da seção (m).

Ambas as áreas de aço,  $A_s$  e  $A'_s$ , estão tensionadas.

**Caso II:** Flexo-tração

- Grande excentricidade, tem a condição de:  $e > h/2 - d''$  (Figura 29)

Para o caso de grande excentricidade, trata-se de flexo-tração, requerendo, então, armadura simples ou dupla.

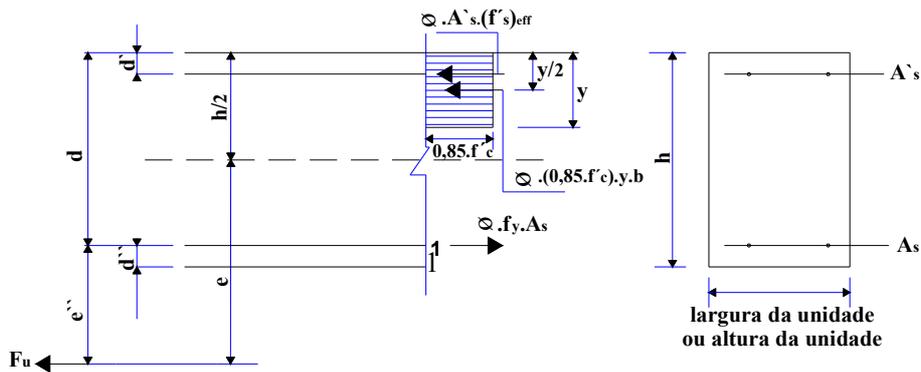


FIGURA 29 Tensão com grande excentricidade (Caso II).  
Fonte: ACI 313:1991.

**a) Armadura dupla**

Calculando-se o limite de profundidade  $y_L$ , do bloco de compressão, com a uso da Tabela 8. Assumindo existir compressão no aço, calculando-se a efetiva tensão de compressão do aço, pela Equação 61.

$$(f'_s)_{\text{eff}} = 87 \cdot \left( \frac{y_L - \beta_1 \cdot d''}{y_L} \right) - 0,85 \cdot f'_c \quad (61)$$

$$\text{mas não superior a: } (f_y - 0,85 \cdot f'_c) \quad (62)$$

em que

$(f'_s)_{\text{eff}}$  = efetiva tensão de compressão do aço ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$y_L$  = valor da limitação de  $y$ , à profundidade do bloco de compressão (cm);

$f_y$  = tensão de escoamento do aço à tração ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$f'_c$  = resistência à compressão última do concreto ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$\beta_1$  = razão, profundidade de compressão de bloco retangular com a profundidade da face de compressão em relação ao eixo neutro;

$d'$  = distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais próxima da seção (cm);

$b$  = largura unitária da parede da célula, igual a 100 cm, medida ao longo do perímetro da seção.

Se a equação acima gerar um valor negativo para  $f'_s$ , a compressão no aço é ineficiente. Neste caso, um simples membro para a armadura não é adequado, devendo ser acrescida ou  $A'_s$  deve ser removida para um local onde possa atuar de maneira efetiva.

Se o valor encontrado para  $f'_s$  é **positivo**, a área necessária será:

$$A'_s = \frac{F_u \left( \frac{e''}{\phi} \right) - 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot y_L \cdot \left( d - \frac{y_L}{2} \right)}{(f'_s)_{\text{eff}} \cdot (d - d')} \quad (63)$$

em que

$F_u$  = força horizontal última de tração, obtida pelas Equações 42 e 43 ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$\phi$  = fator de redução, adotado igual a 0,85, segundo a norma ACI 313:1991;

$A'_s$  = área da seção transversal da armadura comprimida ( $\text{cm}^2 \text{ m}^{-1}$ );

$(f'_s)_{\text{eff}}$  = efetiva tensão de compressão do aço ( $\text{kN cm}^{-2}$ );

$y_L$  = valor da limitação de  $y$ , à profundidade do bloco de compressão (cm);  
 $f_y$  = tensão de escoamento do aço à tração ( $\text{kN cm}^{-2}$ );  
 $f'_c$  = resistência à compressão última do concreto ( $\text{kN cm}^{-2}$ );  
 $e''$  = excentricidade (cm);  
 $d$  = profundidade efetiva para flexão do concreto (cm);  
 $d'$  = distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais próxima da seção (cm);  
 $b$  = largura unitária da parede da célula, igual a 100 cm, medida ao longo do perímetro da seção.

TABELA 8 Código limite para valores de  $y/d$ .

Resistência do concreto - $f'_c$	Valores de resistência do aço - $f_y$		
	276 MPa	345 MPa	414 MPa
Acima de 28 MPa	0,436	0,405	0,378
34 MPa	0,411	0,381	0,355
41 MPa	0,386	0,357	0,333

Fonte: ACI 313:1991.

A compressão no aço é solicitada se  $A'_s$  for positivo. Neste caso, a área de aço necessária a resistir à tensão será:

$$A_s = \frac{\frac{F_u}{\phi} + 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot y_L + A'_s \cdot (f'_s)_{eff}}{f_y} \quad (64)$$

em que

$F_u$  = força horizontal última de tração, obtida pelas Equações 42 e 43 ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$\phi$  = fator de redução, adotado igual a 0,90, segundo a norma ACI 313:1991;

$y_L$  = valor da limitação de  $y$ , à profundidade do bloco de compressão (cm);

$A_s$  = área da seção transversal da armadura tracionada ( $\text{cm}^2 \text{ m}^{-1}$ ).

### b) Armadura simples

Se a Equação 63 apresentar valor negativo para  $A'_s$ , então, não haverá compressão no aço, devendo, portanto a parede ser projetada como simplesmente armada. Neste caso, a área necessária para resistir à tensão no aço será:

$$A_s = \frac{\frac{F_u}{\phi} + 0,85.f'_c.b.y}{f_y} \quad (65)$$

em que

$$y \approx d - \sqrt{d^2 - \frac{2.F_u.e''}{0,85.\phi_c.f'_c.b}} \quad (66)$$

sendo

$\phi$  = fator de redução, adotado igual a 0,90, segundo a norma ACI 313:1991;

$\phi_c$  = fator de redução da resistência do concreto à compressão, adotado igual a 0,70, segundo a norma ACI 313:1991.

A tensão de escoamento do aço  $f_y$  corresponde ao valor característico  $f_{yk}$  mencionado pela norma NBR 6118:2003, assim como a resistência à compressão última do concreto  $f'_c$  corresponde ao valor característico  $f_{ck}$  mencionado pela norma NBR 6118:2003.

#### 2.4.1.2 Armadura vertical

Normalmente, a armadura vertical requerida para a parede do silo, segundo Safarian & Harris (1985), não é calculada a partir dos valores de pressão e força que atuam na célula. A especificação feita pela norma ACI 313:1997 é de uma taxa mínima de armadura.

Segundo a ACI 313:1997, a armadura vertical, por unidade de perímetro da célula, não deve ser menor que:

$$A_{sv,m} = 0,0020 \cdot b \cdot h \quad (67)$$

em que

$A_{sv,m}$  = armadura vertical mínima por unidade de perímetro ( $\text{cm}^2 \text{m}^{-1}$ );

$b$  = largura unitária da parede da célula, igual a 100 cm, medida ao longo do perímetro da seção;

$h$  = espessura da parede do silo (cm).

A norma ACI 313:1997 exige que o espaçamento entre barras verticais não exceda a  $4h$ , sendo  $h$  a espessura da parede do silo, nem a 45 cm para paredes externas ou 60 cm para paredes internas.

#### **2.4.1.3 Distribuição das armaduras**

A armadura, tanto vertical quanto horizontal, deve ser distribuída em uma única camada, posicionada do centro para a parte externa da parede para silos com espessura da parede de até 23 cm. Para os silos com espessura de parede acima de 23 cm, a camada deverá ser dupla, com armadura vertical e horizontal próximas às camadas externa e interna, respectivamente.

#### **2.4.1.4 Verificação das paredes do silo quanto à flambagem**

A força vertical última ( $F_{v,u}$ ) na parede do silo, calculada pela Equação 47, não deverá ultrapassar o valor admissível da força vertical imposto pela norma ACI 313:1997, para que não ocorra destruição por flambagem.

O valor admissível para a força de compressão vertical da parede do silo ( $f_{c,v}$ ) por unidade de perímetro não deve exceder o limite dado pelas Equações

68 e 69. A Equação 68 é utilizada para espessuras de paredes de silos circulares e a Equação 69, para silos quadrados, retangulares e poligonais.

$$f_{c,v} = 0,55 \cdot \varphi_c \cdot f'_c \quad (68)$$

$$f_{c,v} = 0,55 \cdot \varphi_c \cdot f'_c \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_0}{40 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (69)$$

em que

$\varphi_c$  = fator de redução da resistência do concreto à compressão, adotado igual a 0,7, segundo a norma ACI 313:1997;

$f'_c$  = resistência à compressão última do concreto ( $\text{kN m}^{-2}$ );

$h_0$  = nítida distância vertical entre apoios (m);

$h$  = espessura da parede do silo (m).

Se  $h_0 > l_0$ , usar  $l_0$  no lugar de  $h_0$  na Equação 69, na qual  $h_0$  e  $l_0$  são os vãos nítidos verticais e horizontais entre apoios (sustentação).

em que

$l_0$  = nítido vão horizontal de uma parede entre os apoios (m)

#### **2.4.1.5 Verificação das paredes do silo quanto ao cisalhamento**

Cada parede terá força de cisalhamento horizontal (em seções transversais verticais), devido às pressões do produto armazenado.

A resistência ao cisalhamento nominal fornecida ( $v_c$ ) deverá ser tal que:

$$\varphi \cdot v_c \geq v_u \quad (70)$$

sabendo que

$$v_c = 2 \cdot b \cdot d \cdot \left(1 - 0,002 \cdot \frac{F_u}{A_g}\right) \cdot \sqrt{f'_c} \quad (71)$$

em que

$b$  = largura unitária da parede da célula, igual a 1 m, medida ao longo do perímetro da seção;

$\phi$  = fator de redução adotado igual a 0,85, segundo a norma ACI 313:1991;

$d$  = profundidade efetiva para flexão do concreto (m);

$F_u$  = força horizontal última de tração, obtida pelas Equações 42 e 43 ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$A_g$  = reforço da área total de aço por unidade de largura da parede ( $\text{m}^2$ );

$f'_c$  = resistência à compressão última do concreto ( $\text{kN m}^{-2}$ );

$v_c$  = resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto ( $\text{kN m}^{-1}$ );

$v_u$  = requerida resistência ao cisalhamento ( $\text{kN m}^{-1}$ ).

Segundo a norma ACI 313:1997, a espessura das paredes de silos retangulares, quadrados e poligonais não deve ser menor que 15 cm, quando moldadas *in loco*.

#### **2.4.2 Projeto das tremonhas**

As paredes da tremonha também devem ser projetadas para resistir a todos os tipos de tensões, compressão e outras cargas às quais elas podem estar sujeitas.

##### **2.4.2.1 Armadura horizontal**

A armadura horizontal é determinada no projeto das paredes da tremonha, sendo considerada somente a flexão ou a combinação entre tensão direta e flexão conforme o item 2.4.1.1.

#### **2.4.2.2 Armadura vertical**

A armadura vertical é determinada no projeto das paredes da tremonha, conforme o item 2.4.1.2. A especificação feita pela norma ACI 313:1997 é de uma taxa mínima de armadura.

#### **2.4.2.3 Verificação das paredes da tremonha quanto à flambagem**

O valor admissível para a força de compressão vertical da parede da tremonha ( $f_{c,v}$ ) por unidade de perímetro não deve exceder o limite dado pela Equação 69.

#### **2.4.2.4 Verificação das paredes da tremonha quanto ao cisalhamento**

A resistência ao cisalhamento nominal fornecida ( $v_c$ ) deverá ser tal que a resistência requerida ao cisalhamento seja menor.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho trata do dimensionamento de um silo de concreto armado multicelular vertical elevado para café tipo cereja descascado, sendo as células geminadas duas a duas, para armazenar 1.500 sacas por célula. Foi projetado com base na norma americana ACI 313:1997, considerando a tremonha tipo cunha.

O projeto do silo foi dividido em etapas:

- determinação das propriedades físicas do café beneficiado;
- determinação da geometria da tremonha;
- projeto geométrico do silo.

#### 3.1 Determinação das propriedades físicas do café beneficiado

Nesta fase foram utilizadas as propriedades físicas do café cereja descascado (*coffea arábica*), determinadas no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira, da Escola de Engenharia em São Carlos / SP (LAMEM/EESC/USP), de acordo com a metodologia proposta por Milani (1993), utilizando o aparelho de cisalhamento TSG 70-140 (Jenike Shear Tester). O produto estudado estava com a umidade de 12%, sendo determinada pelo método da estufa. Foram obtidos os seguintes valores:

- peso específico inferior  $\rightarrow \gamma_i = 6,75 \text{ kN m}^{-3}$ ;
- peso específico superior  $\rightarrow \gamma_s = 6,88 \text{ kN m}^{-3}$ ;
- ângulo de atrito interno inferior  $\rightarrow \phi_{ii} = 34,5^\circ$ ;
- ângulo de atrito interno superior  $\rightarrow \phi_{is} = 36,0^\circ$ ;
- efetivo ângulo de atrito interno inferior  $\rightarrow \phi_{ei} = 35,0^\circ$ ;
- efetivo ângulo de atrito interno superior  $\rightarrow \phi_{es} = 36,5^\circ$ ;
- ângulo de atrito com a parede de concreto liso:
  - inferior  $\rightarrow \phi_{wi} = 22,5^\circ$ ;
  - superior  $\rightarrow \phi_{ws} = 23,5^\circ$ ;

- ângulo de repouso inferior:  $\phi_{ri} = 29^\circ$ ;
- ângulo de repouso superior:  $\phi_{rs} = 33^\circ$ .

### 3.2 Determinação da geometria da tremonha

A norma ACI 313:1997 aborda a utilização de tremonha tipo cunha ou cônica. Sendo assim, por se tratar de produto granular, optou-se por trabalhar com a tremonha em cunha, sendo o silo com corpo de forma retangular.

Portanto determinou-se a inclinação da parede e a dimensão mínima da boca de descarga, levando em consideração as propriedades físicas e de fluxo do café.

#### a) Determinação da inclinação da parede

Escolhida a forma geométrica da tremonha, foi determinada a máxima inclinação da tremonha com a vertical, assegurando o fluxo de massa.

A inclinação da tremonha foi determinada graficamente utilizando o ângulo de atrito interno com a parede ( $\phi_w$ ) e o efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) que é o parâmetro das linhas limites entre o fluxo de massa e o fluxo de funil. Nos diagramas da Figura 30, a inclinação da tremonha é medida com a vertical.

Dados:

- efetivo ângulo de atrito interno  $\rightarrow \phi_e = 40^\circ$ ;
- ângulo de atrito interno com a parede  $\rightarrow \phi_{ws} = 23,5^\circ$ .

Obteve-se a inclinação da parede  $\rightarrow \alpha = 31^\circ$  para tremonha em cunha.

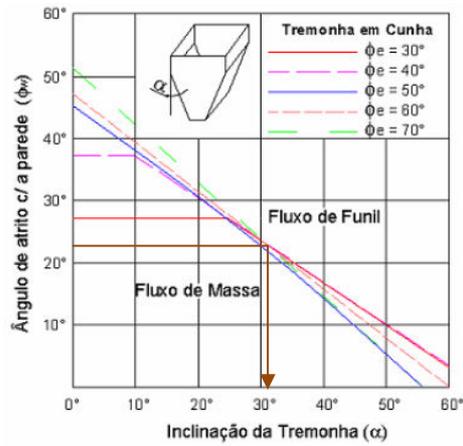


FIGURA 30 Diagrama para projetos de tremonha.  
Fonte: Schulze (1996).

Uma segunda maneira de se determinar a inclinação máxima da tremonha é por meio de cálculos conforme as Equações 1 e 2, visando obter o fluxo de massa:

➤ para tremonhas de eixo simétrico:

$$\alpha_{\text{crit}} = 0,5 \cdot \left[ 180 - \cos^{-1} \left( \frac{1 - \text{sen } \phi_e}{2 \cdot \text{sen } \phi_e} \right) - \left( \phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen } \phi_w}{\text{sen } \phi_e} \right) \right]$$

$$\alpha_{\text{crit}} = 0,5 \cdot \left[ 180 - \cos^{-1} \left( \frac{1 - \text{sen } 36,5^\circ}{2 \cdot \text{sen } 36,5^\circ} \right) - \left( \phi_w + \text{sen}^{-1} \frac{\text{sen } 23,5^\circ}{\text{sen } 36,5^\circ} \right) \right]$$

$$\alpha_{\text{crit}} = 22,16^\circ$$

➤ para tremonhas em cunha:

$$\alpha_{\text{crit}} = \frac{e^{3,75 \cdot (1,01)^{(\phi_e - 30)/10}} - \phi_w}{0,725 \cdot (\text{tg } \phi_e)^{0,2}}$$

$$\alpha_{\text{crit}} = \frac{e^{3,75 \cdot (1,01)^{(36,5^\circ - 30)/10}} - 23,5^\circ}{0,725 \cdot (\text{tg } 36,5^\circ)^{0,2}}$$

$$\alpha_{\text{crit}} = 29,40^\circ$$

Segundo os cálculos sugeridos por Gaylord Júnior & Gaylord (1984), para tremonhas em bisel e em cunha, o fluxo de massa ocorrerá se:

$$\alpha \leq 60^\circ - 1,33 \cdot \phi_w$$

$$\alpha \leq 60^\circ - 1,33 \cdot 23,5^\circ \rightarrow \alpha \leq 28,75^\circ$$

$$\phi_w \leq 0,9 \cdot \phi_e$$

$$23,5^\circ \leq 0,9 \cdot 36,5^\circ \rightarrow 23,5^\circ \leq 32,85^\circ$$

$$L \geq 6 \cdot b_p$$

$$L \geq 6 \cdot 0,25 \rightarrow L \geq 1,50\text{m}$$

Para efeito do projeto, foi adotada a inclinação da tremonha de 22° com a vertical ou 68° com a horizontal, que contemplou todas as condições acima relacionadas com diferentes autores.

Constatou-se graficamente, por meio da norma ACI 313:1997, que o tipo de fluxo obtido é realmente o do tipo fluxo de massa (Figura 31).

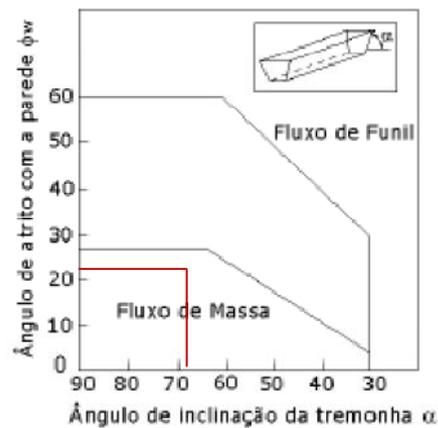


FIGURA 31 Determinação gráfica do tipo de fluxo.

Fonte: ACI 313:1997.

### **b) Determinação da tensão crítica**

Para o projeto e a determinação da geometria da tremonha utilizando o critério de fluxo, foram obtidas tensões críticas, calculadas diretamente pelo programa de cálculo das propriedades. Adotou-se, para efeito de cálculo,  $\sigma_{crit} = 1,17 \text{ kN m}^{-2}$  (Anexo A – Tabela 2A).

### **c) Determinação da função $H(\alpha)$**

A determinação do  $H(\alpha)$  é necessária para o dimensionamento mínimo da boca da tremonha, quando se trata de fluxo de massa. Essa função é dependente da forma (retangular) e da inclinação da tremonha ( $22^\circ$ ). Sua determinação foi obtida por meio do gráfico da Figura 17, no qual se obteve  **$H(\alpha) = 1,1$** .

### **d) Determinação da dimensão mínima da boca da tremonha**

Para assegurar que no projeto de silos ocorra o fluxo tipo de massa, foi preciso determinar a menor dimensão da boca de descarga que é dada por:

$$b_{\min} = \frac{H(\alpha) \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i}$$
$$b_{\min} = \frac{1,1 \cdot 1,17}{6,75} \rightarrow \mathbf{b_{\min} = 0,19 \text{ m}}$$

Considerando que podem ocorrer instabilidades, Jenike (1964) recomenda que a dimensão mínima da boca obtida pela Equação 14 deve ser multiplicada por 1,2, como fator de majoração. Considerando o fator de majoração, a menor dimensão da boca de descarga foi calculada obtendo-se o valor de **0,23 m**.

Comparando-se com as equações proposta por Gaylord Júnior & Gaylord (1984), para o cálculo da boca de descarga retangular, obteve-se:

$$b_{\min} \geq \frac{1,3 \cdot \sigma_{\text{crit}}}{\gamma_i}$$
$$b_{\min} \geq \frac{1,3 \cdot 1,17}{6,75} \rightarrow b_{\min} = 0,23 \text{ m}$$

Atendendo às duas teorias propostas, Jenike (1964) e Gaylord Júnior & Gaylord (1984), a dimensão mínima da boca da tremonha apresentou os mesmos valores para uma mesma tensão crítica (Anexo A – Tabela 2A). Foi adotado, portanto, o valor da boca da tremonha de **0,25 m**, atendendo, assim, à dimensão mínima da boca da tremonha, que foi de 0,23 m.

### 3.3 Projeto geométrico do silo

Para o desenvolvimento do projeto, neste estudo foram considerados os sistemas operacionais para o transporte do produto, o enchimento das células, a transilagem do produto, a pesagem do produto tanto na entrada como na saída e o carregamento do café a granel nos caminhões contêineres.

O projeto arquitetônico proposto consiste de um silo multicelular para armazenamento de café cereja descascado, com células geminadas 2 a 2, conforme Figura 32. As células apresentam a forma retangular e tremonha em forma de cunha com enchimento. Nas Figuras 33 e 34 estão ilustrados os cortes no sentido transversal e longitudinal.

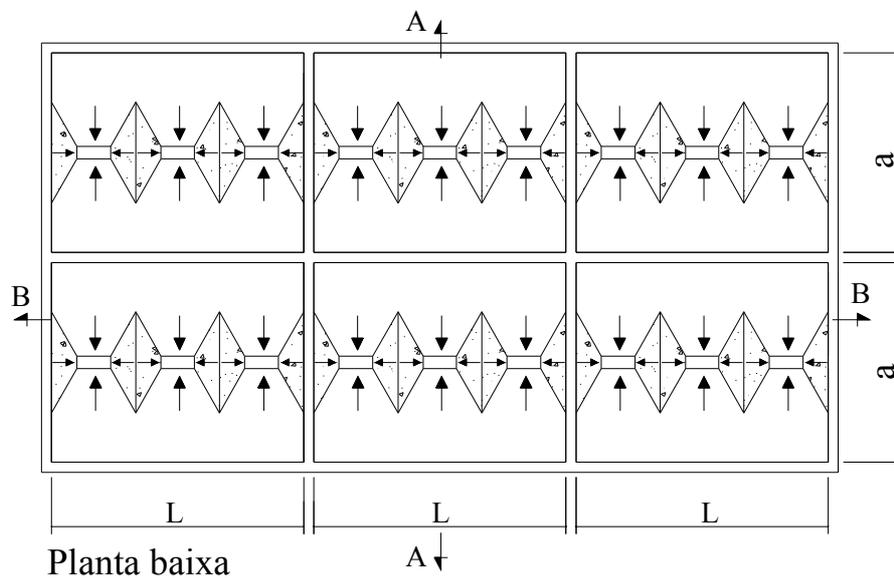


FIGURA 32 Planta baixa para armazenamento a granel do café.

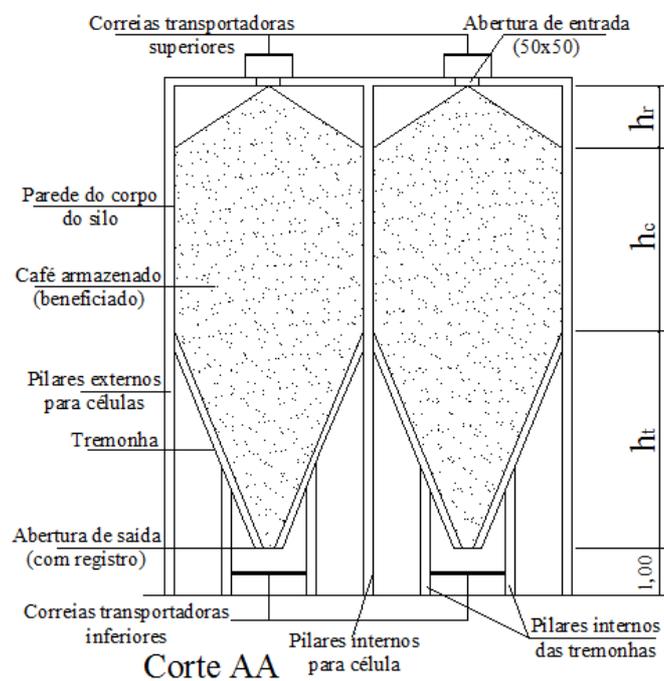


FIGURA 33 Corte transversal do silo para armazenamento do café.

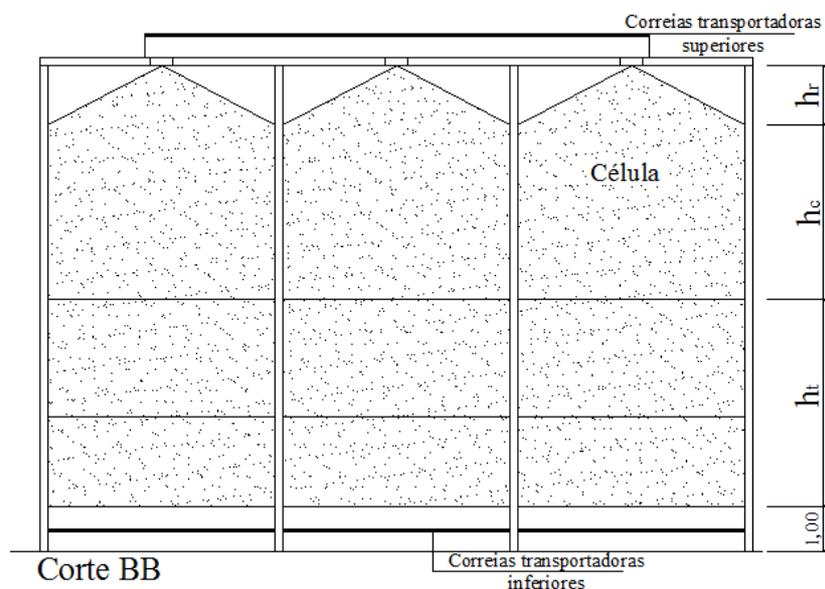


FIGURA 34 Corte longitudinal do silo para armazenamento do café.

### 3.3.1 Considerações sobre a capacidade da célula

A capacidade (ou volume) de armazenamento de cada célula do silo multicelular está apresentada nas Tabelas 9 a 13.

Foi adotada a massa específica do café beneficiado em  $680 \text{ kg m}^{-3}$  e capacidade estática da célula de 1.500 sacas de café cereja beneficiado. Como cada saca tem 60 kg, o volume total de célula é de  $132,35 \text{ m}^3$ .

Segundo Marques Neto (2004), sabe-se que dificilmente será projetado um sistema de silos graneleiros para café beneficiado com capacidade menor que 1.500 sacas por célula, pois os custos de construção e de mecanização seriam muito altos em relação à capacidade armazenadora.

#### a) Volume da tremonha

Para o cálculo do volume total da tremonha, utilizou-se a Equação 73.

Tem-se:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h_t}{\frac{a-b_p}{2}} \rightarrow h_t = \frac{1}{2}(a - b_p) \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$V_{tt} = \left(\frac{a+b_p}{2}\right) \cdot h_t \cdot L$$

$$V_{tt} = \left(\frac{a+b_p}{2}\right) \cdot \left[\frac{1}{2}(a - b_p) \cdot \operatorname{tg} \theta\right] \cdot L$$

$$V_{tt} = \frac{a^2 - b_p^2}{4} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot L \quad (73)$$

Em seguida, foi necessário determinar a fórmula para o volume de enchimento que será descontado do volume total da tremonha.

Tem-se:

$$V_e = 3 \cdot (V_{\text{cunha}} + 2 \cdot V_{\text{pirâmide}})$$

$$V_{\text{cunha}} = \frac{A_{\text{cunha}} \cdot h_e}{2} \quad \text{e} \quad V_{\text{pirâmide}} = \frac{A_{\text{pirâmide}} \cdot Z}{4}$$

$$A_{\text{cunha}} = \frac{L}{3} \cdot b_p \quad , \quad A_{\text{pirâmide}} = \frac{L}{3} \cdot h_e \quad \text{e} \quad Z = \frac{h_e}{\operatorname{tg} \theta}$$

$$V_e = 3 \cdot \left( \frac{L \cdot b_p \cdot h_e}{6} + 2 \cdot \frac{L \cdot h_e^2}{12 \cdot \operatorname{tg} \theta} \right)$$

$$V_e = \frac{L}{2} \cdot \left( b_p \cdot h_e + \frac{h_e^2}{\operatorname{tg} \theta} \right) \quad (74)$$

#### **b) Volume do repouso**

Considerou-se, inicialmente, o cálculo do volume do produto em repouso, que pode variar conforme determinação do ensaio de 29° a 33° (Figura 35).

Para este projeto, foi adotado o ângulo de 33° ( $\varphi = 33^\circ$ ).

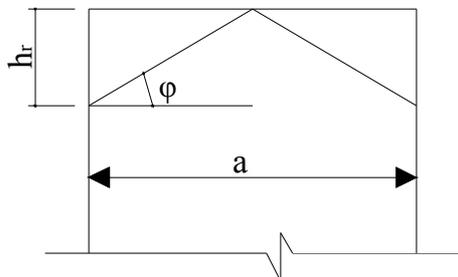


FIGURA 35 Pirâmide cônica formada pelo ângulo de repouso do produto.

O volume do produto em repouso foi calculado com o formato cônico:

Tem-se:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{h_r}{\frac{a}{2}} \rightarrow h_r = \frac{a}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \text{e} \quad r = \frac{a}{2}$$

$$V_r = \frac{1}{3} \pi r^2 h_r$$

$$V_r = \frac{1}{3} \pi \frac{a^2}{4} h_r$$

$$V_r = \frac{1}{24} \pi a^3 \operatorname{tg} \varphi \quad (75)$$

**c) Volume do corpo**

$$V_c = a \cdot L \cdot h_c \quad (76)$$

**d) Volume total da célula**

$$V_{\text{célula}} = (V_{\text{tt}} - V_e) + V_r + V_c \quad (77)$$

A altura das células do silo multicelular foi calculada em função da capacidade total do armazenamento desejado de cada célula. Nas Tabelas 9 a 13

estão apresentados os valores encontrados para as dimensões das células, conforme as fórmulas apresentadas anteriormente.

TABELA 9 Capacidade de armazenamento da tremonha, já descontado o enchimento.

Ângulo de inclinação $\Theta$ (°)	Tremonha					
	Largura a (m)	Comprimento L (m)	Largura $b_p$ (m)	Altura $h_t$ (m)	Volume $V_t$ (m <sup>3</sup> )	Nº total de sacas
68	4,00	5,00	0,25	4,60	43,58	494

TABELA 10 Capacidade de volume do enchimento descontado na tremonha.

Ângulo de inclinação $\Theta$ (°)	Enchimento				
	Comprimento L (m)	Largura $b_n$ (m)	Altura $h_c$ (m)	Volume $V_c$ (m <sup>3</sup> )	Nº total de sacas
68	5,00	0,25	2,00	5,29	60

TABELA 11 Capacidade de armazenamento em repouso.

Ângulo de inclinação $\varphi$ (°)	Café em repouso		
	Altura $h_r$ (m)	Volume $V_r$ (m <sup>3</sup> )	Nº total de sacas
33	1,30	5,44	62

TABELA 12 Capacidade de armazenamento do corpo da célula.

Corpo do silo			
Altura útil $h_c$ (m)	Altura do corpo $H = h_r + h_c$ (m)	Volume $V_c$ (m <sup>3</sup> )	Nº total de sacas
4,20	5,50	83,33	944

TABELA 13 Capacidade de armazenamento total da célula.

Total da célula			
Altura útil $H_{Total}$ (m)	Volume total $V_{Total}$ (m <sup>3</sup> )	Nº total de sacas na célula	Relação H/L
10,10	132,32	1.500	1,84

Para armazenar 1.500 sacas de café, ou seja, 90 toneladas, a tremonha terá capacidade para armazenar 494 sacas; no cone superior, formado pelo ângulo de repouso, 62 sacas e no corpo do silo, 944 sacas, com as respectivas alturas conforme apresentado na Figura 36.

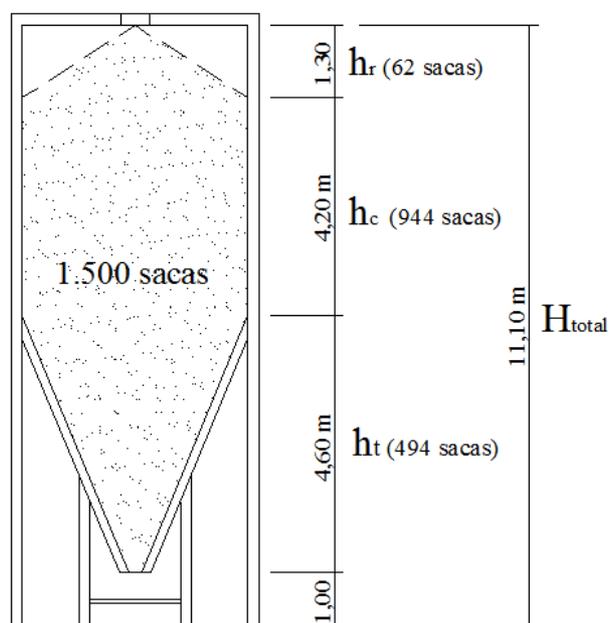


FIGURA 36 Esquema geométrico de uma célula com capacidade para 1.500 sacas de café beneficiado.

Na Figura 37 está ilustrada a tremonha com o comprimento desejado da boca de saída, facilitando o direcionamento e controle da descarga. Logo, o comprimento total da boca de descarga adotado é de 2 m.

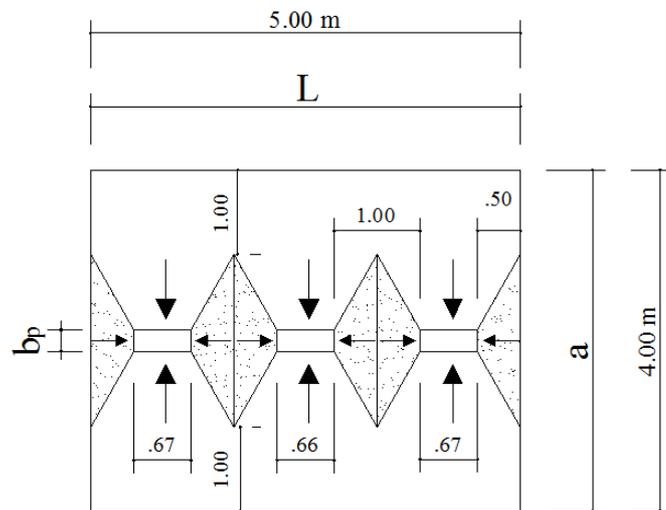


FIGURA 37 Planta baixa da tremonha com detalhes do enchimento na saída.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Cálculo das ações devido ao produto armazenado

#### 4.1.1 Pressões estáticas na célula

Para o cálculo das pressões estáticas (situação de carregamento ou inicial) na célula, foi adotada a Teoria de Janssen (1895), cujas fórmulas foram citadas no item 2.2.7.1 (letra a e b).

Para o cálculo das pressões verticais e horizontais e das forças de atrito na parede do lado “a” e “L”, foram utilizados os valores das propriedades físicas do café extraídas do item 3.1. Os dados da Tabela 14 A, B e C representam as pressões nas paredes do lado “a” e “L”, com diferentes combinações do ângulo de atrito com a parede ( $\phi_{ws}$  e  $\phi_{wi}$ ), com efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_{es}$  e  $\phi_{ei}$ ), conforme a Tabela 2, que aborda o emprego dos limites das propriedades físicas dos produtos, para a possível determinação das maiores pressões vertical e horizontal, como também a força de atrito.

TABELA 14 Cálculo das pressões estáticas na parede do lado “a” e “L” do silo para café beneficiado – ACI 313:1997.

	Ângulo de atrito com a parede	Efetivo ângulo de atrito interno	Profundidade do grão na célula	Pressão vertical do lado "L"	Pressão vertical do lado "a"	Pressão horizontal do lado "L"	Pressão horizontal do lado "a"	Força de atrito vertical do lado "L"	Força de atrito vertical do lado "a"
	$\phi_{wi}$ (°)	$\phi_{es}$ (°)	y (m)	$P_{vL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{va}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{hL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ha}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{wL}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$P_{wa}$ (kN m <sup>-1</sup> )
TABELA A	22,5	36,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	22,5	36,5	0,87	5,61	5,57	2,27	2,26	0,34	0,42
	22,5	36,5	2,03	12,02	11,82	4,87	4,79	1,74	2,13
	22,5	36,5	3,19	17,39	16,97	7,05	6,88	4,07	4,94
	22,5	36,5	4,34	21,91	21,21	8,88	8,60	7,17	8,66
	22,5	36,5	5,50	25,70	24,71	10,41	10,01	10,92	13,13
TABELA B	$\phi_{ws}$ (°)	$\phi_{ei}$ (°)	y (m)	$P_{vL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{va}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{hL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ha}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{wL}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$P_{wa}$ (kN m <sup>-1</sup> )
	23,5	35,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	23,5	35,0	0,87	5,57	5,53	2,38	2,36	0,37	0,46
	23,5	35,0	2,03	11,83	11,63	5,05	4,96	1,90	2,32
	23,5	35,0	3,19	17,00	16,55	7,25	7,06	4,42	5,36
	23,5	35,0	4,34	21,25	20,52	9,06	8,75	7,76	9,36
23,5	35,0	5,50	24,76	23,72	10,56	10,12	11,77	14,12	
TABELA C	$\phi_{wi}$ (°)	$\phi_{ei}$ (°)	y (m)	$P_{vL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{va}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{hL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ha}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{wL}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$P_{wa}$ (kN m <sup>-1</sup> )
	22,5	35,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	22,5	35,0	0,87	5,59	5,55	2,38	2,37	0,36	0,44
	22,5	35,0	2,03	11,92	11,72	5,08	5,00	1,82	2,22
	22,5	35,0	3,19	17,19	16,76	7,33	7,15	4,25	5,15
	22,5	35,0	4,34	21,58	20,86	9,20	8,90	7,47	9,01
22,5	35,0	5,50	25,23	24,21	10,76	10,32	11,35	13,63	

Por meio da Tabela 14 A, B e C, verifica-se que os maiores valores para as pressões verticais estáticas foram obtidos nas condições da Tabela 14 A, os maiores valores para pressões horizontais estáticas foram obtidos da Tabela 14 C e que os maiores valores da força de atrito estática foram obtidos da Tabela 14 B. A relação das maiores pressões estáticas horizontais e verticais e força de atrito estática está apresentada nos gráficos das Figuras 38 e 39, para o lado “L” e Figuras 40 e 41, para o lado “a”, de acordo com a profundidade do café na célula.

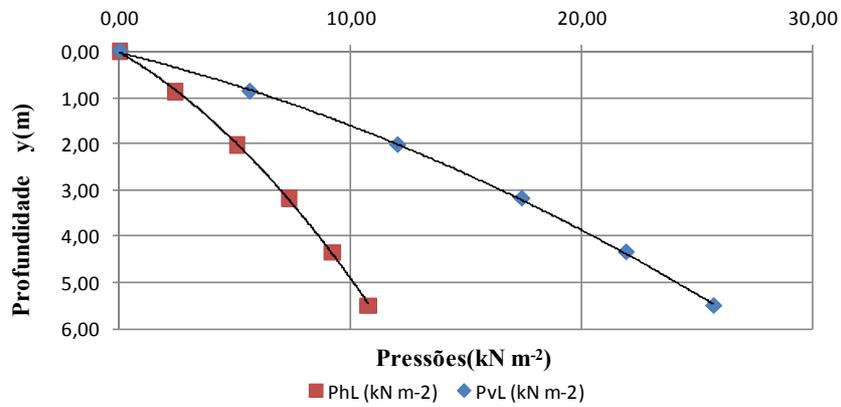


FIGURA 38 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado "L" do silo – ACI 313:1997.

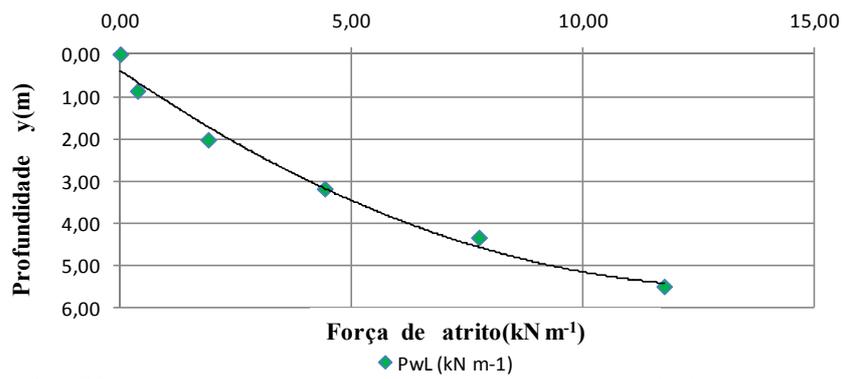


FIGURA 39 Força de atrito estática na parede do lado "L" do silo – ACI 313:1997.

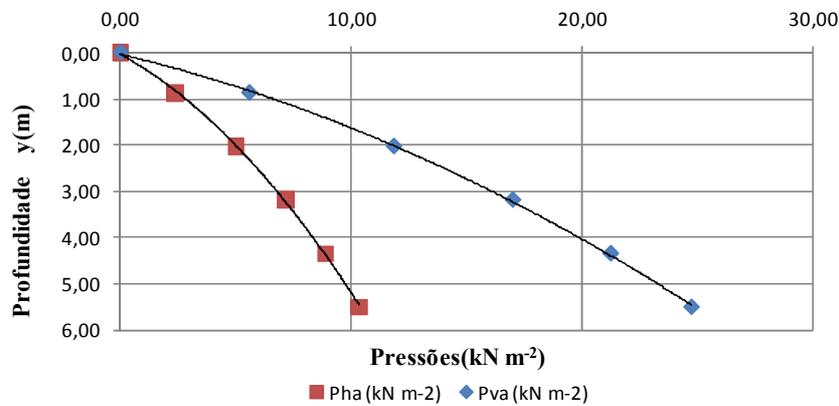


FIGURA 40 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “a” do silo – ACI 313:1997.

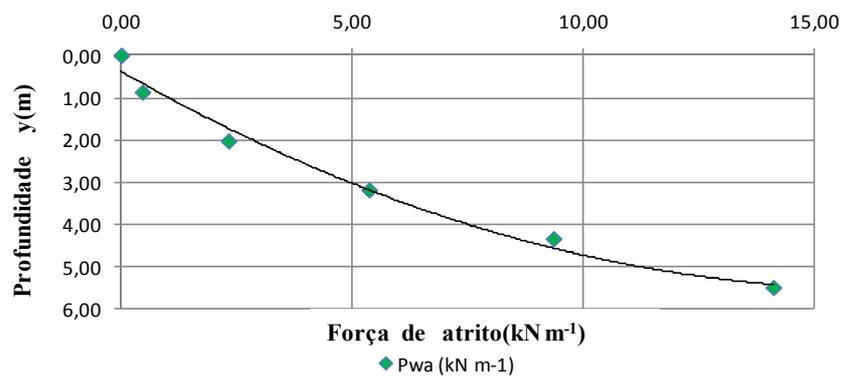


FIGURA 41 Força de atrito estática na parede do lado “a” do silo – ACI 313:1997.

A norma ACI 313 estabelece que as pressões estáticas na tremonha sejam estabelecidas pela Teoria de Janssen ou de Walker, cujas fórmulas estão citadas no item 2.2.7.1 letra b.

Para os cálculos da pressão estática vertical na tremonha, foi considerada a condição de maior valor de pressão vertical à profundidade de 5,50 m (no fundo do corpo do silo), sendo a pressão estática vertical a mesma no topo da tremonha ( $P_0$ ) de  $25,70 \text{ kN m}^{-2}$  para o lado “L” e de  $24,71 \text{ kN m}^{-2}$  para o lado “a”.

Os dados da Tabela 15 A, B e C representam as pressões nas paredes com diferentes combinações do ângulo de atrito com a parede ( $\phi_{ws}$  e  $\phi_{wi}$ ) com efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_{es}$  e  $\phi_{ei}$ ), conforme Tabela 2, que aborda o emprego dos limites das propriedades físicas dos produtos, aplicados na determinação das maiores pressões estáticas verticais e horizontais como também a força de atrito na tremonha.

TABELA 15 Cálculo das pressões estáticas na parede do lado “a” e “L” da tremonha para café beneficiado, segundo Walker – ACI 313:1997.

	Ângulo de atrito com a parede	Efetivo ângulo de atrito interno	Profundidade da tremonha	Altura do topo da tremonha até o ápice	Pressão vertical do lado "L"	Pressão vertical do lado "a"	Pressão horizontal do lado "L"	Pressão horizontal do lado "a"
<b>TABELA A</b>	$\phi_{wi} (^{\circ})$	$\phi_{es} (^{\circ})$	$h_y$ (m)	$h_{total}$	$P_{yL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ya}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{na}$ (kN m <sup>-2</sup> )
	22,5	36,5	0,00	4,91	25,70	24,71	28,01	26,92
	22,5	36,5	1,00	4,91	25,51	24,75	27,80	26,97
	22,5	36,5	2,00	4,91	23,60	23,07	25,71	25,14
	22,5	36,5	3,00	4,91	19,49	19,18	21,24	20,90
	22,5	36,5	4,00	4,91	12,27	12,14	13,37	13,23
	22,5	36,5	4,60	4,91	5,40	5,37	5,89	5,85
<b>TABELA B</b>	$\phi_{ws} (^{\circ})$	$\phi_{ei} (^{\circ})$	$h_y$ (m)	$h_{total}$	$P_{yL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ya}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{na}$ (kN m <sup>-2</sup> )
	23,5	35,0	0,00	4,91	25,70	24,71	25,88	24,88
	23,5	35,0	1,00	4,91	26,11	25,34	26,30	25,51
	23,5	35,0	2,00	4,91	24,76	24,19	24,93	24,36
	23,5	35,0	3,00	4,91	21,07	20,71	21,22	20,86
	23,5	35,0	4,00	4,91	13,87	13,72	13,97	13,81
	23,5	35,0	4,60	4,91	6,47	6,43	6,52	6,47
<b>TABELA C</b>	$\phi_{wi} (^{\circ})$	$\phi_{ei} (^{\circ})$	$h_y$ (m)	$h_{total}$	$P_{yL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ya}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{na}$ (kN m <sup>-2</sup> )
	22,5	35,0	0,00	4,91	25,70	24,71	27,18	26,12
	22,5	35,0	1,00	4,91	25,85	25,08	27,33	26,52
	22,5	35,0	2,00	4,91	24,24	23,69	25,63	25,05
	22,5	35,0	3,00	4,91	20,36	20,03	21,53	21,17
	22,5	35,0	4,00	4,91	13,14	13,00	13,90	13,74
	22,5	35,0	4,60	4,91	5,98	5,93	6,32	6,27

Pelos resultados apresentados na Tabela 15 A, B e C, verifica-se que os maiores valores para as pressões verticais estáticas na tremonha foram obtidos nas condições da Tabela 15 B e os maiores valores para pressões horizontais estáticas foram obtidos nas três diferentes combinações da Tabela 15. A relação das maiores pressões estáticas horizontais e verticais estão apresentadas nos gráficos das Figuras 42 e 43, de acordo com o lado “L” e “a” da tremonha.

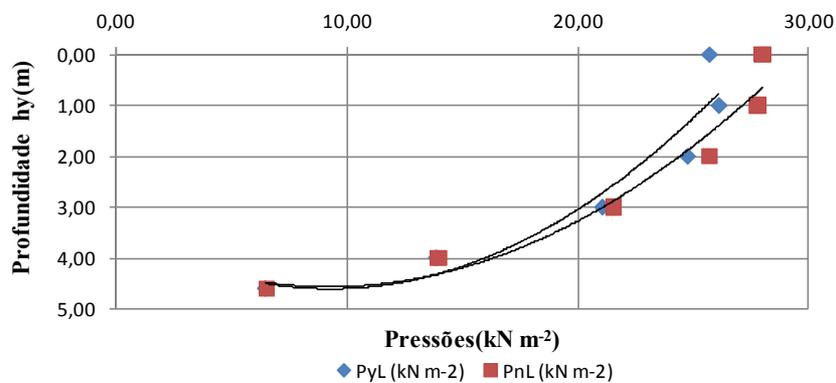


FIGURA 42 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “L” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.

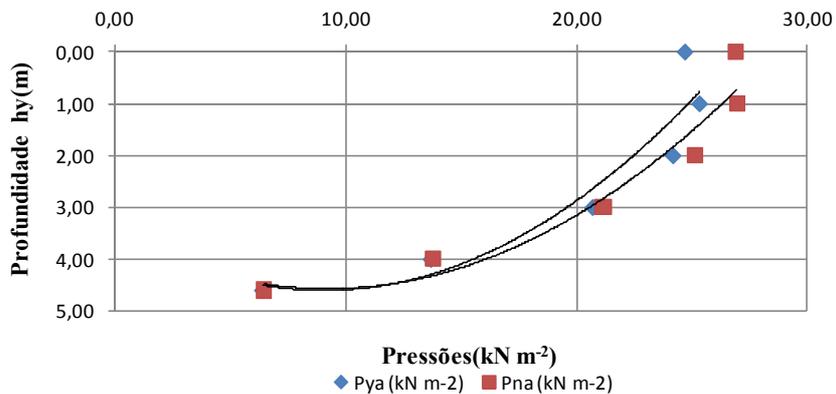


FIGURA 43 Pressões estáticas verticais e horizontais na parede do lado “a” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.

### Pressões adicionais em silos com fluxo de massa

Os valores das pressões adicionais, conforme fórmulas citadas no item 2.2.7.1 letra c, para fluxo de massa na transição do corpo do silo com a tremonha, estão apresentados na Tabela 16.

A importância da pressão adicional é para que se faça o reforço na transição do corpo com a tremonha, com o reforço de armadura a 1,20 m abaixo e acima da transição, sendo utilizado o menor valor que está em destaque, segundo a norma DIN 1055-6:2005.

TABELA 16 Pressões adicionais em silos com fluxo de massa – DIN 1055-6:2005.

Seção transversal retangular				
d <sub>c</sub> (m)	c (m)	z (m)	P <sub>s</sub> (kN m <sup>-2</sup> )	P <sub>s</sub> (kN m <sup>-2</sup> )
4,00	1,20	5,5	37,84	27,52

### 4.1.2 Pressões dinâmicas na célula

Para o cálculo das pressões dinâmicas (situação de descarga) na célula foi adotada a teoria de Safarian (1969), cujas fórmulas foram citadas no item 2.2.7.2 e seus coeficientes de sobrepressão conforme Tabela 6, para o corpo do silo e Tabela 7 para a tremonha.

Da Tabela 6 foram adotados os coeficientes para silo de concreto, com base na Teoria de Janssen:

- Trecho superior com extensão H<sub>1</sub>  
 $H_1 = b \text{ (ou } L) \cdot \text{tg}\phi \rightarrow H_1 = 5 \cdot \text{tg}33^\circ \rightarrow H_1 = 3,45\text{m} > 1/3H$   
Então,  $H_1 = 1/3 \cdot H \rightarrow 1/3 \cdot 5,20 \rightarrow 1,73\text{m} \rightarrow C_{d1} = 1,35$
- Trecho inferior com extensão 2/3H  
 $2/3 \cdot H \rightarrow 2/3 \cdot 5,50 \rightarrow 3,66\text{m} \rightarrow C_{d2} = 1,50$

Considerando que o café é um produto com o escoamento para fluxo de massa, acrescentaram-se de 10% a 25% nos valores acima, resultando, então, nos seguintes coeficientes de sobrepressão finais: para  $C_{d1}$  entre **1,48** a **1,68** e para  $C_{d2}$  entre **1,65** e **1,87**, que poderão ser utilizados para multiplicar os valores de pressão horizontal e pressões verticais na descarga do café, segundo Safarian (1969). Os valores de sobrepressão não se aplicam à força de atrito.

As maiores pressões estáticas horizontais e verticais que foram apresentadas na Tabela 14 em destaque estão sendo agora aplicados aos coeficientes de sobrepressão para se determinar as pressões dinâmicas (Tabela 17).

À pressão dinâmica horizontal à profundidade de 5,50 m e no topo da tremonha foi acrescido o menor valor de pressão adicional da Tabela 16, de 27,52  $\text{kN m}^{-2}$ , que é de fundamental importância para se determinar a armadura na região de transição.

TABELA 17 Cálculo das pressões dinâmicas na parede do lado “L” e “a” do silo para café beneficiado, segundo Safarian (1969).

Teoria de Safarian				
Profundidade do grão na célula	Pressão vertical do lado "L"	Pressão vertical do lado "a"	Pressão horizontal do lado "L"	Pressão horizontal do lado "a"
y (m)	$P_{vL}(\text{kN m}^{-2})$	$P_{va}(\text{kN m}^{-2})$	$P_{hL}(\text{kN m}^{-2})$	$P_{ha}(\text{kN m}^{-2})$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,87	8,86	8,80	3,77	3,74
2,03	21,15	20,81	8,95	8,80
3,19	30,61	29,87	12,90	12,58
4,34	38,56	37,34	16,19	15,66
5,50	45,24	43,48	46,45	45,69
Coeficiente de sobrepressão $1/3H = 1,73\text{m}$				1,58
Coeficiente de sobrepressão $2/3H$				1,76

As pressões dinâmicas horizontais e verticais estão apresentadas no gráfico da Figura 44, para o lado “L” e da Figura 45, para o lado “a”, de acordo com a profundidade do café na célula.

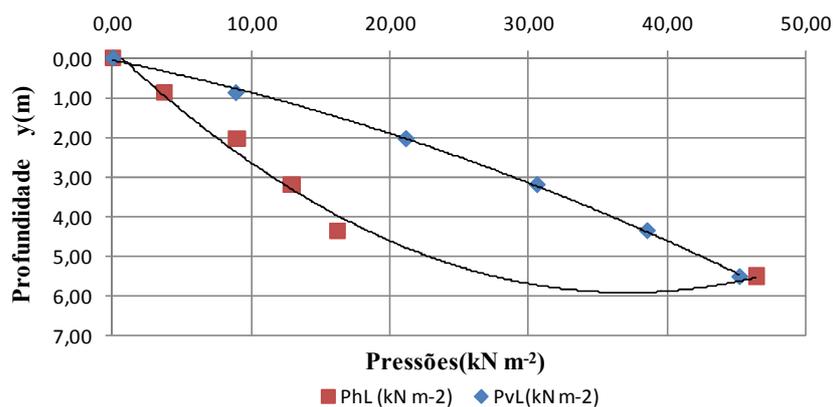


FIGURA 44 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede “L” do silo, segundo Safarian (1969).

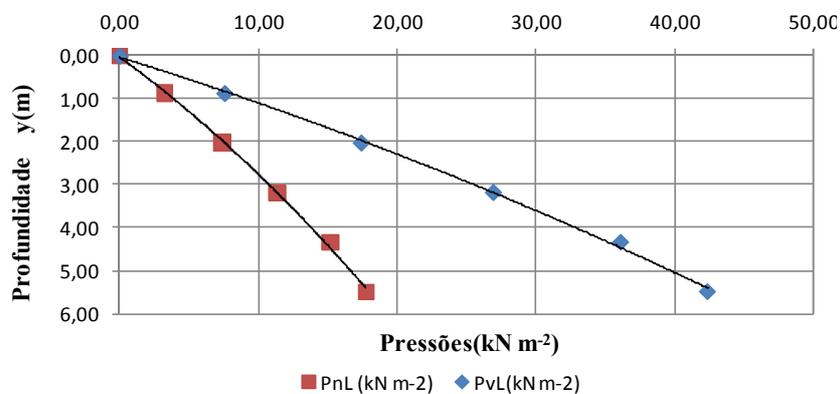


FIGURA 45 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede “a” do silo, segundo Safarian (1969).

Para a determinação das pressões dinâmicas nas tremonhas, os coeficientes de sobrepressão apresentam diferenças entre as Tabelas 5 e 7.

Portanto, para maior segurança, foi adotado o coeficiente de sobrepressão da norma ACI 313:1997 (Tabela 5), de 1,35.

Às maiores pressões estáticas horizontais e verticais nas tremonhas, que foram apresentadas na Tabela 15, em destaque, de acordo com a profundidade do café na célula, estão sendo agora aplicados os coeficientes de sobrepressão para se determinar as pressões dinâmicas na tremonha (Tabela 18).

TABELA 18 Cálculo das pressões dinâmicas na parede do lado “a” e “L” na tremonha para café beneficiado, segundo Walker – ACI 313:1997.

<b>Teoria de Walker - Coeficiente ACI 313:1997</b>				
Profundidade da tremonha	Pressão vertical do lado "L"	Pressão vertical do lado "a"	Pressão horizontal do lado "L"	Pressão horizontal do lado "a"
$h_y$ (m)	$P_{yL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{ya}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{na}$ (kN m <sup>-2</sup> )
0,00	34,70	33,35	65,33	63,87
1,00	35,25	34,20	37,53	36,42
2,00	33,42	32,66	34,71	33,93
3,00	28,44	27,96	29,07	28,58
4,00	18,73	18,52	18,86	18,65
4,60	8,74	8,67	8,80	8,73

Coeficiente de sobrepressão 1,35

As relações das maiores pressões dinâmicas horizontais e verticais estão apresentadas no gráfico da Figura 46, para o lado “L” e Figura 47, para o lado “a”, de acordo com a profundidade do café na célula.

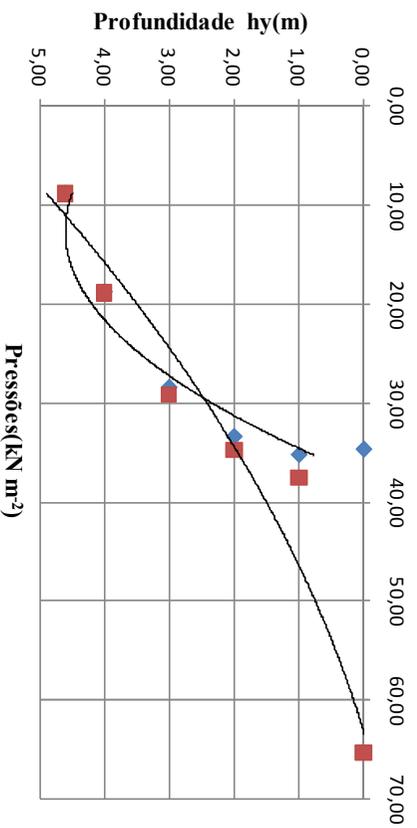


FIGURA 46 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede do lado “L” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.

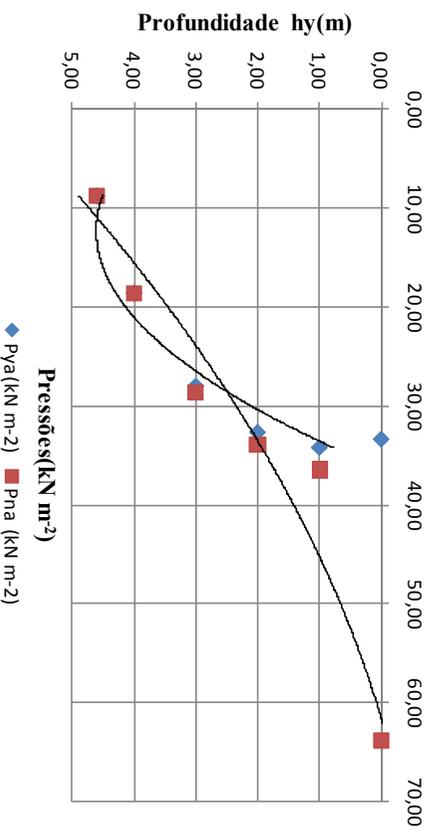


FIGURA 47 Pressões dinâmicas verticais e horizontais na parede do lado “a” da tremonha, segundo Walker – ACI 313:1997.

Após a determinação das pressões estáticas e dinâmicas, estão representados, na Figura 48, os resultados das pressões horizontais e adicional para as paredes do lado “L” e “a” do silo (Figura 48).

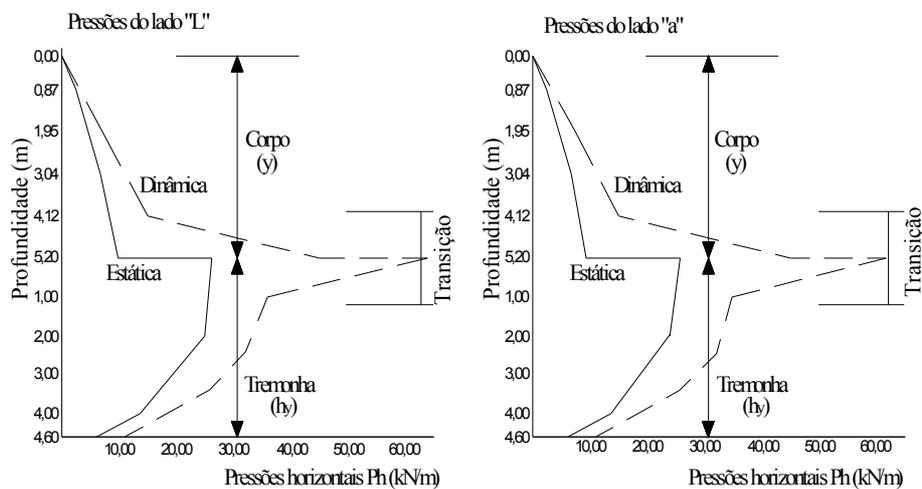


FIGURA 48 Pressões estáticas e dinâmicas horizontais na parede do lado “L” e do lado “a” da tremonha, acrescidas das pressões adicionais.

#### 4.2 Esforços atuantes nos silos prismáticos

Para a determinação dos esforços foram consideradas cinco hipóteses de descarga das células do silo multicelular, trabalhando sempre com as pressões dinâmicas apresentadas nas Tabelas 17 e 18.

Os cálculos dos esforços últimos têm os valores de coeficientes de ponderação de 1,7 e 1,4, para as ações acidentais e permanentes, respectivamente, indicados pela norma ACI 313:1997.

##### 4.2.1 Esforços na parede de silos prismáticos

###### a) Determinação dos esforços de tração horizontal

Para o cálculo dos esforços de tração último na parede do silo, levam-se em consideração as hipóteses de descarga, conforme mostrado na Figura 49, as pressões dinâmicas horizontais ( $P_{nd}$ ) e o coeficiente de ponderação de 1,7, conforme Tabela 19.

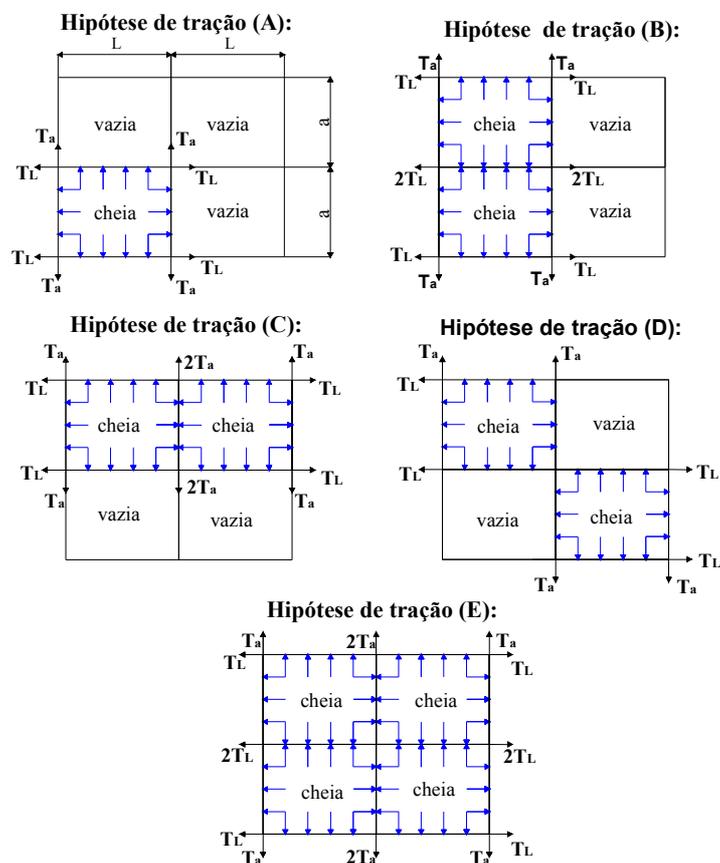


FIGURA 49 Esforços de tração atuando nas hipóteses de descarga.

TABELA 19 Cálculo das trações últimas na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997.

Profundidade do grão na célula	Pressão horizontal dinâmica do lado "L"	Pressão horizontal dinâmica do lado "a"	Tração última horizontal para o lado "a"	Tração última horizontal para o lado "L"	Tração última horizontal (duas células cheias)	Tração última horizontal (duas células cheias)
y (m)	$P_{hdL}$ (kN m <sup>2</sup> )	$P_{hda}$ (kN m <sup>2</sup> )	$F_{a,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$F_{L,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$2F_{a,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$2F_{L,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,87	3,77	3,74	16,01	12,71	32,01	25,42
2,03	8,95	8,80	38,03	29,92	76,07	59,84
3,19	12,90	12,58	54,84	42,76	109,69	85,53
4,34	16,19	15,66	68,83	53,24	137,65	106,47
5,50	46,45	45,69	197,42	155,34	394,84	310,68

**b) Determinação do esforço de momento fletor último horizontal**

Assim como foi feito anteriormente, para o cálculo dos esforços de momento fletor último na parede do silo, consideraram-se as hipóteses de descarga conforme ilustrado na Figura 50, as pressões dinâmicas horizontais ( $P_{nd}$ ) e o coeficiente de ponderação de 1,7, conforme Tabela 20.

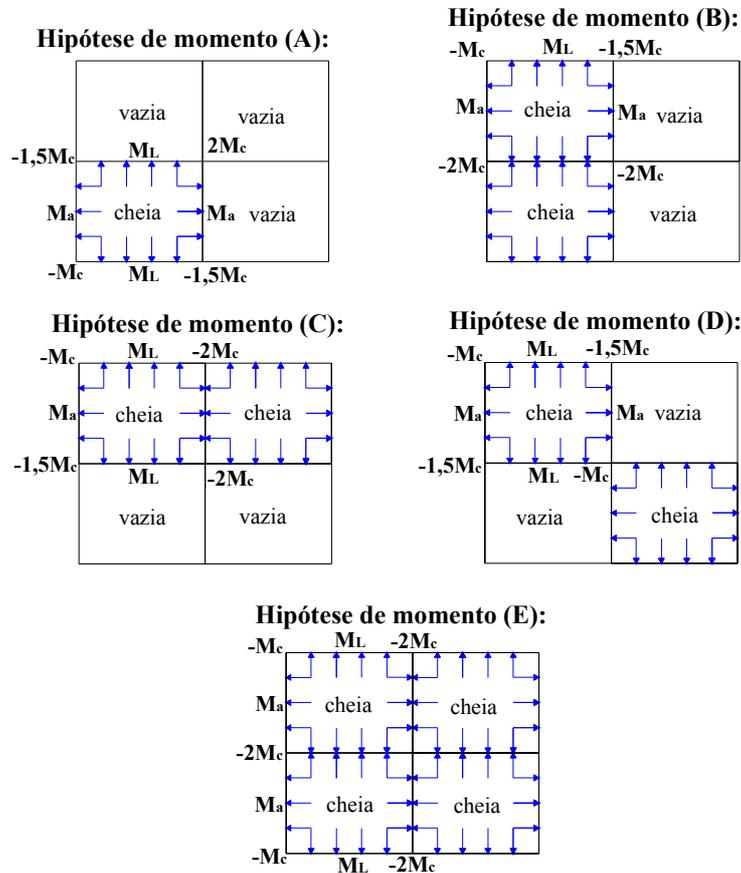


FIGURA 50 Esforços de momento fletor atuando nas hipóteses de descarga.

TABELA 20 Cálculo do momento fletor último na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997.

Profundidade do grão na célula	Pressão horizontal dinâmica do lado "L"	Pressão horizontal dinâmica do lado "a"	Momento fletor último de canto (-)	Momento fletor último máximo em "a"	Momento fletor último máximo em "L"	Momento fletor último de canto (-)	Momento fletor último de canto (-)	Momento fletor último de canto (+)
y (m)	$P_{hdL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{hda}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$M_{c,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$M_{a,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$M_{L,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$1,5M_{c,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$2M_{c,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$2M_{c,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,87	3,77	3,74	-11,18	1,53	8,83	-16,76	-22,35	22,35
2,03	8,95	8,80	-26,47	3,44	21,07	-39,71	-52,95	52,95
3,19	12,90	12,58	-38,06	4,70	30,49	-57,09	-76,12	76,12
4,34	16,19	15,66	-47,64	5,60	38,40	-71,46	-95,28	95,28
5,50	46,45	45,69	-137,42	17,91	109,35	-206,14	-274,85	274,85

### c) Determinação dos esforços vertical de compressão

A determinação do esforço vertical último na parede leva em consideração a disposição arquitetônica do silo, as hipóteses de descarga, o fato de as paredes internas estarem sofrendo a força de atrito dos dois lados e o coeficiente de ponderação de 1,7 e 1,4 para as ações acidentais e permanentes, respectivamente, indicado pela norma ACI 313:1997, conforme Tabela 21.

No projeto não está sendo considerado o peso dos equipamentos de transporte. Mas, para efeito de cálculo, foi considerado o peso próprio da cobertura (laje pré-moldada), de 1,4 kN m<sup>-2</sup> e, para a carga acidental da cobertura, 0,6 kN m<sup>-2</sup>.

A laje superior de cada célula tem uma abertura de 50 x 50 cm no centro para o recebimento do café pelas esteiras transportadoras superiores. Importante função da laje é travar a parte superior da célula, para a movimentação de pessoas para manutenção e verificação de procedimento.

TABELA 21 Cálculo do esforço vertical último na parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1997.

Profundidade da tremonha	Largura da tremonha		Peso próprio da tremonha	Peso do produto armazenado	Pressão horizontal dinâmica		Tração horizontal		Tração meridiana
	lado "L"	lado "a"			lado "L"	lado "a"	lado "L"	lado "a"	lado "L"
$h_y$ (m)	(m)	(m)	$W_g$ (kN)	$W_m$ (kN)	$P_{ndL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nda}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$F_{tL,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$F_{ta,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$F_{mL,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )
0,00	5,00	4,00	442,46	290,77	65,33	63,87	217,15	257,44	229,35
1,00	5,00	3,18	326,35	220,14	37,53	36,42	123,81	147,88	202,97
2,00	5,00	2,37	221,48	148,92	34,71	33,93	115,38	136,79	169,95
3,00	5,00	1,55	127,44	78,28	29,07	28,58	97,19	114,54	127,85
4,00	5,00	0,74	44,51	7,06	18,86	18,65	63,39	74,32	71,11
4,60	5,00	0,25	0,00	0,00	8,80	8,73	29,70	34,68	29,72

#### 4.2.2 Esforços na tremonha de silos prismáticos

Para o cálculo dos esforços solicitantes na tremonha em cunha, utilizou-se o critério de tremonha tronco de piramidal, citado na norma ACI 313:1991 e por Safarian & Harris (1985).

Na Figura 51 são representadas as equações utilizadas para o cálculo dos esforços solicitantes na tremonha em cunha.

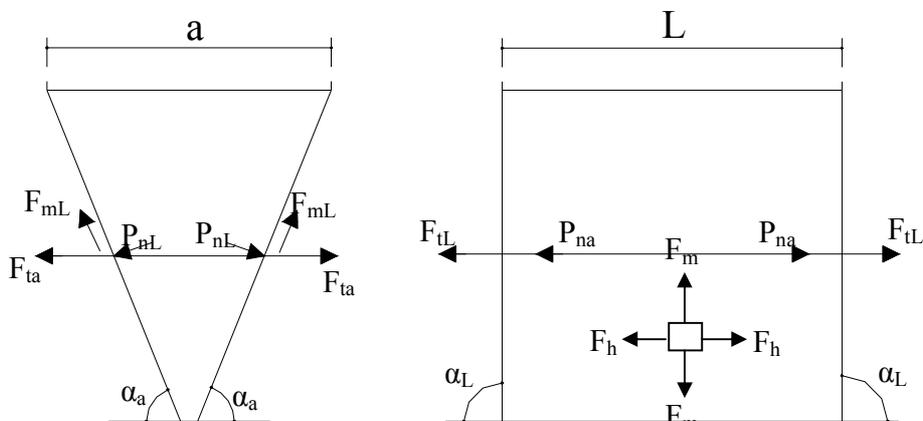


FIGURA 51 Esforços de tração horizontais e meridionais, na tremonha em cunha.

## a) Determinação dos esforços de tração

### a.1) Força de tração horizontal

Na determinação das forças de tração horizontais última ( $F_{t,u}$ ) por unidade de largura de parede “a” e “L”, para tremonha em cunha, conforme as Equações 51 e 52, a parede do lado “a” é  $\alpha_L$  igual a  $90^\circ$ .

### a.2) Força de tração meridional

No caso da tremonha em cunha, a força de tração meridional última ( $F_{m,u}$ ) será calculada apenas para o lado que se encontra a parede inclinada. Devido ao fato de a área de fundo afluyente para a parede “a”, de  $\alpha_L$  igual a  $90^\circ$ , ser igual a zero ( $A_a = 0$ ) e também o coeficiente de distribuição do mesmo lado ser zero ( $c_a = 0$ ), calcula-se somente a força de tração meridional última por unidade de largura da parede “L”, para tremonha em cunha, conforme Equação 54.

O coeficiente de distribuição pode ser relacionado pela seguinte Equação:

$$2c_L = 1,0 \quad (78)$$

Na Tabela 22 estão apresentados os cálculos dos esforços de tração última na tremonha.

TABELA 22 Cálculo dos esforços de tração última na parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.

Profundidade da tremonha	Largura da tremonha		Peso próprio da tremonha	Peso do produto armazenado	Pressão horizontal dinâmica		Tração horizontal		Tração meridional
	lado "L"	lado "a"			lado "L"	lado "a"	lado "L"	lado "a"	lado "L"
$h_y$ (m)	(m)	(m)	$W_g$ (kN)	$W_m$ (kN)	$P_{ndL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nda}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$F_{tL,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$F_{ta,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$F_{mL,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )
0,00	5,00	4,00	442,46	290,77	65,33	63,87	217,15	257,44	229,35
1,00	5,00	3,18	326,35	220,14	37,53	36,42	123,81	147,88	202,97
2,00	5,00	2,37	221,48	148,92	34,71	33,93	115,38	136,79	169,95
3,00	5,00	1,55	127,44	78,28	29,07	28,58	97,19	114,54	127,85
4,00	5,00	0,74	44,51	7,06	18,86	18,65	63,39	74,32	71,11
4,60	5,00	0,25	0,00	0,00	8,80	8,73	29,70	34,68	29,72

### b) Determinação dos momentos fletores

Na determinação dos esforços de momento fletor último na tremonha do silo foram consideradas as hipóteses de descarga ilustrada na Figura 49, as pressões dinâmicas horizontais ( $P_{nd}$ ) e o coeficiente de majoração de 1,7, conforme Tabela 23.

TABELA 23 Cálculo do momento fletor último na parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1997.

Profundidade do grão na célula	Pressão horizontal dinâmica do lado "L"	Pressão horizontal dinâmica do lado "a"	Momento fletor último de canto (-)	Momento fletor último máximo em "a"	Momento fletor último máximo em "L"
y (m)	$P_{ndL}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$P_{nda}$ (kN m <sup>-2</sup> )	$M_{c,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$M_{a,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )	$M_{L,u}$ (kN m m <sup>-1</sup> )
0,00	65,33	63,87	-192,88	24,26	154,19
1,00	37,53	36,42	-101,52	-23,27	97,84
2,00	34,71	33,93	-92,09	-51,59	92,32
3,00	29,07	28,58	-80,89	-66,30	73,53
4,00	18,86	18,65	-58,37	-56,20	41,82
4,60	8,80	8,73	-29,69	-29,58	17,07

### 4.3 Dimensionamento do silo prismático de concreto armado

Após a determinação dos esforços solicitantes na parede e na tremonha do silo apresentada no item anterior, passa-se ao dimensionamento dos elementos estruturais.

No dimensionamento, levou-se em consideração a envoltória das ações que ocorrem nas diferentes situações de operação no interior do silo com o produto armazenado, que são: carregamento, armazenamento e descarga. Na Figura 52 estão apresentadas as hipóteses de células cheias e vazias do silo.

Para o dimensionamento foi utilizada a resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias de 28 MPa e o aço CA-50.

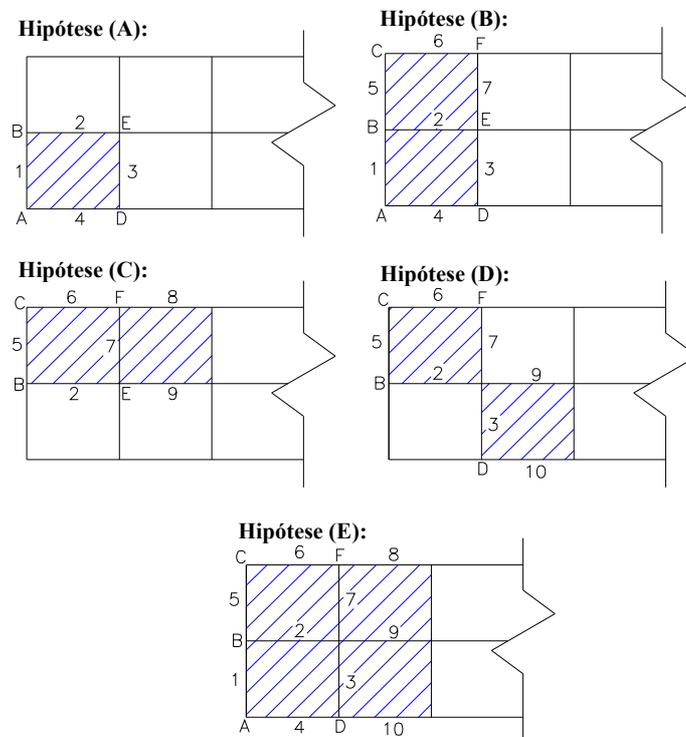


FIGURA 52 Hipóteses de descarga das células do silo.

### 4.3.1 Projeto das paredes do silo

O dimensionamento foi realizado com base na norma ACI 313:1991 e ACI 313:1997.

#### 4.3.1.1 Armadura horizontal

O primeiro passo é a determinação da excentricidade, considerando uma espessura de parede de 0,32 m e cobrimento de 0,05 m, sendo:

##### Caso I: Flexão simples

- Pequena excentricidade ocorrerá quando  $e \leq h/2 - d''$ . Neste caso, o valor tem que ser menor/igual a 0,11 m

##### Caso II: Flexo-tração.

- Grande excentricidade ocorrerá quando:  $e > h/2 - d''$ . Neste caso, o valor tem que ser maior a 0,11 m

$$\text{Em que } h = 0,32 \text{ m} \quad d = 0,27 \text{ m}$$

$$d'' = 0,05 \text{ m} \quad d' = 0,05 \text{ m}$$

#### a) Armadura horizontal no meio das paredes do silo

Na Tabela 24, a determinação da excentricidade no meio das paredes foi realizada com as hipóteses A, B, C, D e E, que estão apresentadas na Figura 52, de células cheias em uma das faces da parede. Estará, dessa forma, ocorrendo a flexão simples ou a combinação entre flexão e tração na horizontal.

Na área de armadura das paredes do lado “a” que apresentam excentricidade menor que 0,11 m, ocorre a flexão simples, conforme a Tabela 25. Para as paredes do lado “L” com excentricidade maior que 0,11 m, ocorre a combinação de flexão e tração, conforme Tabela 26.

TABELA 24 Excentricidades no meio da parede do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1991.

Profundidade do grão na célula	$M_{a,u}/F_{a,u}$ excentricidade no meio	$M_{L,u}/F_{L,u}$ excentricidade no meio
y (m)	$e_a$ (m)	$e_L$ (m)
5,50	0,09	0,70

TABELA 25 Armadura para flexão simples no meio das paredes do lado “a” do silo – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal					
Profundidade do grão na célula	$M_{a,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso I	Bitola espaçamento	$M_{a,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso I	Bitola espaçamento	Armadura para as paredes
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	
4,30	1,40	6,3 / 22 cm	0,83	6,3 / 33 cm	1, 3, 5 e 7
5,50	4,00	10 / 19 cm	2,38	8 / 20 cm	1, 3, 5 e 7

TABELA 26 Armadura para flexo-tração no meio das paredes do lado “L” do silo – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$M_{L,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$M_{L,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para as paredes
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm		
4,30	5,14	12,5 / 22 cm			SIMPLES	2, 4, 6, 8, 9 e 10
5,50	13,25	16 / 15 cm	6,00	12,5 / 20 cm	DUPLA	2, 4, 6, 8, 9 e 10

Considerando as hipóteses B, C e E (paredes entre células cheias), apresentadas na Figura 52, no meio das paredes internas do lado “a” e “L” ficam solicitadas horizontalmente apenas ao esforço de tração e verticalmente ao esforço de compressão, não ocorrendo o momento fletor devido ao produto armazenado. Portanto, para atender à armadura horizontal, seria necessária a armadura apresentada na Tabela 27.

TABELA 27 Armadura horizontal de tração no meio das paredes dos silos – ACI 313:1991.

Profundidade do grão na célula	Tração última horizontal (duas células cheias)	Armadura para as paredes 3 e 7	Bitola espaçamento	Tração última horizontal (duas células cheias)	Armadura para as paredes 2 e 9	Bitola espaçamento
y (m)	$2F_{a,u}(\text{kN m}^{-1})$	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing/\text{cm}$	$2F_{L,u}(\text{kN m}^{-1})$	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing/\text{cm}$
4,30	137,65	3,06	10 / 25cm	106,47	2,37	8 / 20cm
5,50	394,84	8,77	16 / 22cm	310,68	6,90	12,5 / 17,5cm

Com base nos critérios adotados, a armadura horizontal do silo, para o meio das paredes externas 1 e 5 do lado “a”, deve ser armada atendendo ao caso I. No meio das paredes internas 3 e 7 do mesmo lado teriam que ser armadas para atender apenas às trações. Já a armadura horizontal do silo, para o meio das paredes externas 4, 6, 8 e 10 do lado “L”, deve atender ao caso II, na profundidade de 4,30 m:  $A_s = 5,14 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e na profundidade de 5,50 m:  $A_s = 13,25 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 6,00 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$ . No meio das paredes internas 2 e 9 do lado

“L” não tem a mesma armadura das paredes externas, na profundidade de 4,30 m:  $A_s = A'_s = 5,14 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$ , para os dois lados e de 5,50 m:  $A_s = A'_s = 13,25 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$ , para os dois lados (Apêndice A – Figura 1A).

### b) Armadura horizontal no canto das paredes do silo

Na Tabela 28 está indicada a determinação da excentricidade no canto das paredes com as hipóteses de A a E, conforme Figura 52, apresentando grande excentricidade em todas as simulações.

A área de armadura horizontal para o canto das paredes do lado “a” e “L”, conforme apresentado nas Tabelas 29 a 34, terá, em toda a extensão, reforço na profundidade da parede de 4,30 a 5,50 m com armadura dupla, por se tratar da região de transição do corpo do silo.

TABELA 28 Excentricidades no canto das paredes do lado “a” e “L” do silo – ACI 313:1991.

Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{a,u}$ excentricidade canto	$M_{c,u}/F_{L,u}$ excentricidade canto	$1,5M_{c,u}/F_{a,u}$ excentricidade canto	$1,5M_{c,u}/F_{L,u}$ excentricidade canto	$2M_{c,u}/F_{a,u}$ excentricidade canto	$2M_{c,u}/F_{L,u}$ excentricidade canto
y (m)	$e_{ca}$ (m)	$e_{cL}$ (m)	$e_{ca}$ (m)	$e_{cL}$ (m)	$e_{ca}$ (m)	$e_{cL}$ (m)
5,50	0,70	0,88	1,04	1,33	1,39	1,77

TABELA 29 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” do silo – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm		
4,30	6,94	12,5 / 17,5 cm			SIMPLES	A, C e E
5,50	16,69	16 / 12 cm	8,80	12,5 / 13 cm	DUPLA	A, C e E

TABELA 30 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm		
4,30	6,75	12,5 / 18 cm			SIMPLES	A, C e E
5,50	16,25	16 / 12 cm	9,35	16 / 20 cm	DUPLA	A, C e E

TABELA 31 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$1,5M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$1,5M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm		
4,30	8,33	12,5 / 14 cm	2,66	8 / 18 cm	DUPLA	B, D e F
5,50	24,04	16 / 8 cm	17,00	16 / 11 cm	DUPLA	B, D e F

TABELA 32 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$1,5M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$1,5M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm		
4,30	8,04	12,5 / 15 cm	2,72	8 / 18 cm	DUPLA	B, D e F
5,50	23,60	16 / 8,5 cm	17,55	16 / 11 cm	DUPLA	B, D e F

TABELA 33 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “a” – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade do grão na célula	$2M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$2M_{c,u}/F_{a,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\infty$ / cm		
4,30	10,90	16 / 18 cm	5,52	12,5 / 22 cm	DUPLA	B e E
5,50	31,39	16 / 6 cm	25,20	16 / 7,5 cm	DUPLA	B e E

TABELA 34 Armadura para flexo-tração no canto das paredes do lado “L” – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal						
Profundidade e do grão na célula	$2M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$2M_{c,u}/F_{L,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para os cantos
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{m}^{-1})$	$\varnothing / \text{cm}$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{m}^{-1})$	$\varnothing / \text{cm}$		
4,30	10,56	16 / 19 cm	5,53	12,5 / 22 cm	DUPLA	D, E e F
5,50	30,95	16 / 6 cm	25,75	16 / 7,5 cm	DUPLA	D, E e F

Nas extremidades A e C é necessária uma área de armadura horizontal na profundidade de 4,30 m:  $A_s = 6,94 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  (armadura simples), enquanto na profundidade de 5,50 m:  $A_s = 16,69 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 9,35 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  (armadura dupla). Nas extremidades B, D, E e F é necessária uma área de armadura dupla horizontal, nas profundidades de 4,30 m:  $A_s = 10,90 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 5,53 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$ , enquanto que a 5,50 m:  $A_s = 31,39 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 25,75 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  (Apêndice A – Figura 2A).

#### 4.3.1.2 Armadura vertical

A armadura vertical calculada para atender às forças verticais últimas atuantes foi menor que a armadura vertical mínima das paredes do silo de espessura de 32 cm, segundo a norma ACI 313:1997. Então fez-se como apresentado na Tabela 35.

TABELA 35 Armadura mínima vertical para as paredes do silo – ACI 313:1997.

Dimensionamento: Armadura vertical	
Armadura vertical mínima	Bitola espaçamento
$A_{sv,m}(\text{cm}^2 \text{m}^{-1})$	$\varnothing / \text{cm}$
6,40	12,5 / 19 cm

#### 4.3.1.3 Verificação das paredes do silo quanto à flambagem

A força vertical última nas paredes do silo, conforme a Tabela 36, não ultrapassou o valor admissível da força vertical imposto pela norma ACI 313:1997, para que não ocorra destruição por flambagem.

TABELA 36 Verificação da parede do lado “a” e “L” do silo quanto à flambagem – ACI 313:1997.

Força vertical última				Valor admissível da força vertical (Equação 69)
Paredes externas do lado "L"	Paredes externas do lado "a"	Paredes internas do lado "L"	Paredes internas do lado "a"	
$F_{v,u}$ (kN m <sup>-1</sup> )	$f_{c,v}$ (kN m <sup>-1</sup> )			
87,57	109,80	107,58	152,04	9135,10

#### 4.3.1.4 Verificação das paredes do silo quanto ao cisalhamento

Para a verificação das paredes do silo quanto à força de cisalhamento horizontal devido às pressões do produto armazenado (Tabela 37), observou-se que as paredes internas e externas do silo para o lado “a” e “L” não ultrapassaram ao máximo de resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto.

TABELA 37 Verificação da parede do lado “a” e “L” do silo quanto ao cisalhamento – ACI 313:1991.

Paredes	Requerida resistência ao cisalhamento	Resistência ao cisalhamento nominal	Requerida resistência ao cisalhamento	Resistência ao cisalhamento nominal fornecida
	$v_u$ (kN m <sup>-1</sup> )	$v_c$ (kN m <sup>-1</sup> )	$v_u$ (kN m <sup>-1</sup> )	$v_c$ (kN m <sup>-1</sup> )
lado "a"	394,84	647,83	197,42	322,91
lado "L"	310,68	823,87	155,34	410,93

#### 4.3.2 Projeto das tremonhas

O dimensionamento foi realizado com base na norma ACI 313:1991 e ACI 313:1997.

##### 4.3.2.1 Armadura horizontal

O primeiro passo é determinar a excentricidade, considerando uma espessura de parede de 0,27 m e cobrimento de 0,04 m, sendo:

###### Caso I: Flexão simples

- Pequena excentricidade ocorrerá quando:  $e \leq h/2 - d''$ . Neste caso, o valor terá que ser menor/igual a 0,10 m

###### Caso II: Flexo-tração.

- Grande excentricidade ocorrerá quando:  $e > h/2 - d''$ . Neste caso, o valor terá que ser maior a 0,10 m

$$\text{em que } h = 0,27 \text{ m} \qquad d = 0,23 \text{ m}$$

$$d'' = 0,04 \text{ m} \qquad d' = 0,04 \text{ m}$$

##### a) Armadura horizontal no meio das paredes da tremonha

Na Tabela 38 é apresentada a determinação da excentricidade no meio da parede da tremonha, pois estará, dessa forma, ocorrendo a flexão simples e combinação entre flexão e tração na horizontal.

Na área de armadura da parede do lado “a” da tremonha, que apresenta excentricidade igual a 0,10 m, está ocorrendo flexão simples, conforme Tabela 39. Para a parede do lado “L” da tremonha com excentricidade maior que 0,10 m, ocorre uma combinação de flexão e tração, conforme Tabela 40.

TABELA 38 Excentricidades no meio da parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.

Profundidade do grão na célula	$M_{a,u}/F_{ta,u}$ excentricidade no meio	$M_{L,u}/F_{tL,u}$ excentricidade no meio
y (m)	$e_{ta}$ (m)	$e_{tL}$ (m)
0,00	0,09	0,71

TABELA 39 Armadura para flexão simples no meio da parede do lado “a” da tremonha – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal					
Profundidade do grão na célula	$M_{a,u}/F_{ta,u}$ Armadura Caso I	Bitola espaçamento	$M_{a,u}/F_{ta,u}$ Armadura Caso I	Bitola espaçamento	Armadura para o lado da tremonha
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm	
0,00	5,70	12,5 / 20 cm	2,43	10 / 30 cm	"a"
1,20	3,27	10 / 24 cm	1,40	6,3 / 22 cm	"a"

TABELA 40 Armadura para flexo-tração no meio da parede do lado “L” da tremonha – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal					
Profundidade do grão na célula	$M_{L,u}/F_{tL,u}$ Armadura Caso II	$M_{L,u}/F_{tL,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura	Armadura para o lado da tremonha
y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$\varnothing$ / cm		
0,00	22,41	14,63	16 / 13 cm	DUPLA	"L"
1,20	12,77	6,62	12,5 / 18 cm	DUPLA	"L"

#### b) Armadura horizontal no canto das paredes da tremonha

Os dados da Tabela 41 indicam que, no canto da parede do lado “a” e “L” da tremonha, ocorreu grande excentricidade.

A área de armadura horizontal para o canto da parede do lado “a” e “L” da tremonha (Tabelas 42 e 43) terá, em toda a extensão, reforço na profundidade da parede da tremonha de 0,00 a 1,20 m com armadura dupla, por se tratar da região de transição do silo.

TABELA 41 Excentricidades no canto da parede do lado “a” e “L” da tremonha – ACI 313:1991.

Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{ta,u}$ excentricidade no canto	$M_{c,u}/F_{tL,u}$ excentricidade no canto
y (m)	$e_{ca}$ (m)	$e_{cL}$ (m)
0,00	0,75	0,89

TABELA 42 Armadura para flexo-tração no canto da parede do lado “a” da tremonha – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal					
Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{ta,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$M_{c,u}/F_{ta,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura
y (m)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	∞ / cm	$A'_s$ (cm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	∞ / cm	
0,00	26,57	16 / 7,5 cm	18,08	16 / 11 cm	DUPLA
1,20	15,26	16 / 13 cm	8,69	16 / 22 cm	DUPLA

TABELA 43 Armadura para flexo-tração no canto da parede do lado “L” da tremonha – ACI 313:1991.

Dimensionamento: Armadura horizontal					
Profundidade do grão na célula	$M_{c,u}/F_{tL,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	$M_{c,u}/F_{tL,u}$ Armadura Caso II	Bitola espaçamento	Tipo de Armadura
y (m)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	∞ / cm	$A'_s$ (cm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> )	∞ / cm	
0,00	26,15	16 / 7,5 cm	18,59	16 / 10 cm	DUPLA
1,20	14,91	16 / 13 cm	8,88	12,5 / 13 cm	DUPLA

Para as tremonhas, a armadura horizontal na parede do lado “a” necessita de armadura nas duas faces tensionadas (caso I) e de armadura dupla para a parede do lado “L”, estando uma face externa tracionada e a interna, comprimida. Nas extremidades, faz-se necessário uma área de armadura dupla horizontal no topo da tremonha de  $A_s = 26,57 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 18,59 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$ ,

enquanto que a 1,20 m:  $A_s = 15,26 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  e  $A'_s = 8,88 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$  (Apêndice A – Figura 3A).

#### 4.3.2.2 Armadura vertical

A armadura vertical calculada para a força vertical última atuante foi menor que a armadura vertical mínima para as paredes da tremonha de espessura de 27 cm, segundo a norma ACI 313:1997, adotando-se conforme apresentado na Tabela 44.

TABELA 44 Armadura mínima vertical para as paredes da tremonha silo – ACI 313:1997.

Dimensionamento: Armadura vertical	
Armadura vertical mínima	Bitola espaçamento
$A_{sv,m} \text{ (cm}^2 \text{ m}^{-1}\text{)}$	$\varnothing / \text{cm}$
5,40	12,5 / 22 cm

#### 4.3.2.3 Verificação das paredes da tremonha quanto à flambagem

A força vertical última nas paredes da tremonha (Tabela 45) não ultrapassou o valor admissível da força vertical imposto pela norma ACI 313:1997, para que não ocorra ruptura por flambagem.

TABELA 45 Verificação da parede do lado “L” da tremonha quanto à flambagem – ACI 313:1997.

Força vertical última	Valor admissível da força vertical (Equação 69)
Paredes do lado "L"	
$F_{mL,u} \text{ (kN m}^{-1}\text{)}$	$f_{c,v} \text{ (kN m}^{-1}\text{)}$
229,35	8469,47

#### 4.3.2.4 Verificação das paredes da tremonha quanto ao cisalhamento

Para a verificação das paredes quanto à força de cisalhamento horizontal devido às pressões do produto armazenado (Tabela 46), observou-se que a parede do lado “a” e “L” da tremonha não ultrapassou ao máximo de resistência ao cisalhamento nominal fornecida pelo concreto.

TABELA 46 Verificação da parede do lado “a” e “L” da tremonha quanto ao cisalhamento – ACI 313:1991.

Paredes	Requerida resistência ao cisalhamento	Resistência ao cisalhamento nominal
	$v_u$ (kN m <sup>-1</sup> )	$v_c$ (kN m <sup>-1</sup> )
lado "a"	257,44	536,31
lado "L"	217,15	636,19

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, pôde-se concluir que a norma ACI 313:1997 tem uma boa aplicação para silos de concreto armado, desde que observadas algumas considerações não contempladas na mesma. As pressões estáticas na parede do silo devem ser calculadas de acordo com a teoria de Janssen e na tremonha, com base na teoria de Walker. As pressões dinâmicas devem ser calculadas de acordo com norma ACI 313:1997 na tremonha e Safarian na parede, utilizando os coeficientes de sobrepressão.

A norma ACI 313:1997 não considera as pressões adicionais na transição do corpo do silo para a tremonha, um ponto crítico para os silos elevados. Conclui-se que, na verificação, foi necessária o uso da norma DIN 1055-6:2005, o que gerou um acréscimo de pressão nos cálculos de 60% e 59% nas paredes “a” e “L” do silo e de 44% e 43% nos lados “a” e “L” da tremonha para a pressão adicional considerada.

## 6 REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211**: recommended practice for selecting proportions for no-slump concrete. Detroit, 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313**: standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials. Detroit, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE . **ACI 313**: standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials (ACI 313-97) and commentary – ACI 313R-97. Detroit, 1997. Revised.

ARAÚJO, E. C.; CALIL JÚNIOR, C. Silos metálicos cilíndricos: Recomendações mínimas de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 1995. v. 1, p.131-146.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Exportação brasileira de café**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://www.abic.com.br/estat\\_exporta\\_cafe.html](http://www.abic.com.br/estat_exporta_cafe.html)>. Acesso em: 28 jan. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projetos de estruturas de concreto - procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-374**: silos cilíndricos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-377**: componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: loads on bulk solids containers - commentary. Sydney, 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 08** de 11 de junho de 2003. Disponível em: <[http://encafe.com.br/arquivos/abic\\_nm\\_a1d\\_inst\\_normativa08.pdf](http://encafe.com.br/arquivos/abic_nm_a1d_inst_normativa08.pdf)>. Acesso em: 28 jan. 2010.

CALIL JÚNIOR, C. Ações em silos pelo método dos estados limites: proposta de norma brasileira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n. 4, p. 110-117, jun. 1997.

CALIL JÚNIOR, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 24., 1997, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: UFPB, 1997. CD ROM.

CALIL JÚNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos**: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 232 p.

CALIL JÚNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAUJO, E. C. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: EESC/USP, 1997. 175 p.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 198 p. Tese (Livre docência) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

CALIL JÚNIOR, C. **Sobrepresiones em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. 184 p. Tese (Doutorado em engenharia industrial) - Escola Politécnica de Barcelona, Barcelona.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. **Balanço das exportações de café: 2009**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.cecafe.com.br/Menu/dados/exportacoes/CECAFE%20-%20Fechamento%20das%20Exportacoes%20de%20Cafe%202009.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ. **História: café no mundo**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.cncafe.com.br/conteudo.asp?id=10>>. Acesso em: 4 jan. 2010.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1055-6**: Basis of design and actions on structures, part 6: design loads for buildings and loads in silo bins. Berlin, 2005.

- ENSTAD, G. On the theory of arching in mass flow hoppers. **Chemical Engineering Science**, New York, v.30, p.1273-1283, Oct. 1975.
- GAYLORD JUNIOR, E. H.; GAYLORD, C. N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 359 p.
- GUERRIN, A; LAVAUUR, R. C. **Tratado de concreto armado**: reservatórios, caixas d'água e piscinas. São Paulo: Hemus, [19--]. v. 5.
- JANSSEN, H. A. Versuche über getreidedruck in silozellen. **Zeitschrift/Verein Deutscher Ingenieure**, Dusseldorf, v. 39, p. 1045-1049, Aug. 1895.
- JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R. Bin loads. **Journal of Structural Division**, New York, v. 94, p. 1011-1041, 1968.
- JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 197 p. (Utah Engineering Experiment Station. Bolletín 123).
- MARQUES NETO, J. F. A. **Concepção de um sistema misto em concreto armado e alvenaria estrutural aplicado a silos multicelulares para café a granel**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $h/d \geq 1,5$ )**. 2005. 109 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PHAM, L. Variability of bin loads due to bulk solids for structural design. **Civil Engineering Transactions**, Sydney, v. 27, n. 1, p. 73-78, 1983.
- PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000. 666p.
- RAVENET, J. **Silos**: flujo de vaciado de sólidos, formación de bóvedas, efectos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1983. 335 p.

SAFARIAN, S. S. Design pressure of granular material in silos. **Journal of the American Concrete Institute**, Detroit, v.66, p. 647-655, Aug. 1969.

SAFARIAN, S. S.; HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985. 468 p.

SCHULZE, D. Flowability and time consolidation measurements using a ring shear tester. **Powder Handling & Processing**, Clausthal-Zellerfeld, v. 8, v.3, p. 221-226, 1996.

SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; CALIL JUNIOR, C.; GOMES, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2006.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SILVA, M. C. A. T. **Estudo da variabilidade pressões em silos**. 1993. 192 p. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

TERZIAN, P.; HELENE, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A

<b>FIGURAS</b>		<b>Páginas</b>
FIGURA 1A	Situações críticas para as paredes de meio do lado “a” e “L”, conforme as hipóteses de descarga das células do silo.	118
FIGURA 2A	Situações críticas para as paredes de canto do lado “a” e “L”, conforme as hipóteses de descarga das células do silo.	119
FIGURA 3A	Situação crítica para os cantos e as paredes “a” e “L” da tremonha, considerando a descarga do produto no silo.	120

**Todas as hipóteses:**

No meio da parede do lado "a"

Caso I 5		
Caso I 1		

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	1,40	0,83
5,50	4,00	2,38

**Hipóteses B, C e E:**

No meio da parede do lado "a"

Tração 7		
Tração 3		

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	3,06
5,50	8,77

**Todas as hipóteses:**

No meio da parede do lado "L"

Caso II 6	Caso II 8	cotas: 4,00m - armadura simples 5,20m - armadura dupla
Caso II 4	Caso II 10	

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	5,14	6,00
5,50	13,25	6,00

**Hipóteses A, C e D:**

No meio da parede do lado "L"

		cotas: 4,00m - armadura simples 5,20m - armadura dupla
Caso II 2	Caso II 9	

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	5,14	5,14
5,50	13,25	13,25

FIGURA 1A Situações críticas para as paredes de meio do lado "a" e "L", conforme as hipóteses de descarga do produto nas células do silo.

Espessura da parede acima de 23 cm → armadura nas duas faces.

**Todas as hipóteses:**

No canto da parede

Caso II C	cotas: 4,00m - armadura simples 5,20m - armadura dupla	
Caso II A		

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	6,94	
5,50	16,69	9,35

**Hipóteses B e E:**

No canto da parede

		armadura dupla
Caso II B		

**Hipótese E:**

No canto da parede

		armadura dupla
	Caso II D	

**Hipóteses A, B e C:**

No canto da parede

	armadura dupla	
	Caso II E	

**Hipóteses C e E:**

No canto da parede

Caso II F		armadura dupla

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
4,30	10,90	5,53
5,50	31,39	25,75

FIGURA 2A Situações críticas para as paredes de canto do lado “a” e “L”, conforme as hipóteses de descarga do produto nas células do silo.

Espessura da parede acima de 23 cm → armadura nas duas faces.

y (m)	$A_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$	$A'_s(\text{cm}^2 \text{ m}^{-1})$
0,00	22,41	14,63
1,20	12,77	6,62

Lado "L" - Caso II

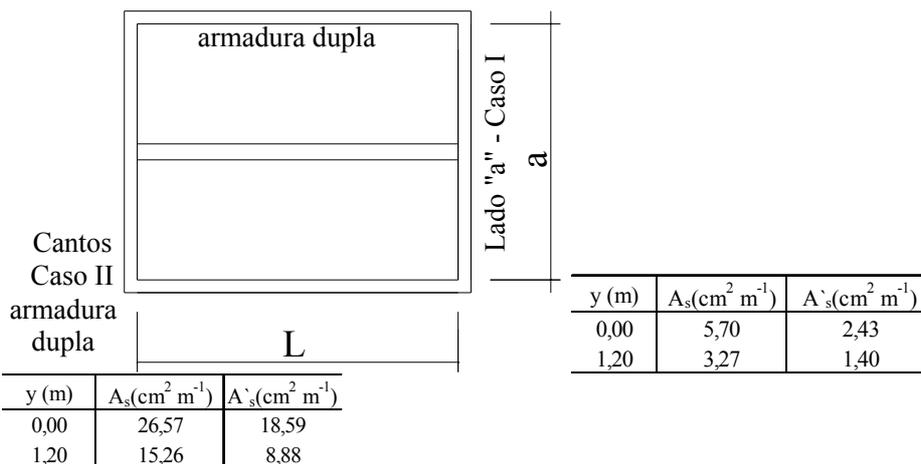


FIGURA 3A Situação crítica para os cantos e as paredes “a” e “L” da tremonha, considerando a descarga do produto no silo.

Espessura da parede acima de 23 cm → armadura nas duas faces.

## ANEXOS

### ANEXO A

<b>TABELAS</b>		<b>Páginas</b>
TABELA 1A	Dados obtidos no ensaio	122
TABELA 2A	Dados obtidos no ensaio	122

<b>FIGURAS</b>		<b>Páginas</b>
FIGURA 1A	Resultado do ensaio 1 de cisalhamento	123
FIGURA 2A	Resultado do ensaio 2 de cisalhamento	123
FIGURA 3A	Resultado do ensaio 3 de cisalhamento	124
FIGURA 4A	Resumo dos ensaios de cisalhamento	124

#### **Ensaio das propriedades do café**

Ensaio realizado para a determinação das propriedades físicas do café cereja descascado (*Coffea arabica*), no LAMEM/EESC/USP, de acordo com a metodologia proposta por Milani (1993), utilizando o aparelho de cisalhamento TSG 70-140 (Jenike Shear Tester), em 2009. O produto estudado estava com a umidade de 12%, determinada pelo método da estufa.

**Produto:** Café cereja descascado.

TABELA 1A Dados obtidos no ensaio.

Yield Locus 1								
Ponto	cel	Wp [kg]	Ws [kg]	Wt [kg]	Sp [kg]	Ss [kg]	$\sigma$ [N m <sup>-2</sup> ]	$\sigma_1$ [N m <sup>-2</sup> ]
1	1	10	7	0,3727	6,2	4,8	15581,4	8283,4
2	1	10	5	0,3672	5,6	3,5	11247,1	6934,9
3	1	10	3,5	0,3688	5,4	2,6	8357,5	5056,7
Yield Locus 2								
Ponto	cel	Wp [kg]	Ws [kg]	Wt [kg]	Sp [kg]	Ss [kg]	$\sigma$ [N m <sup>-2</sup> ]	$\sigma_1$ [N m <sup>-2</sup> ]
1	1	7	5	0,372	4,2	3,6	11247,3	6501,5
2	1	7	3,5	0,3678	4,8	2,9	8357,8	5201,2
3	1	7	2	0,3699	4,5	1,8	6190,6	4189,8
Yield Locus 3								
Ponto	cel	Wp [kg]	Ws [kg]	Wt [kg]	Sp [kg]	Ss [kg]	$\sigma$ [N m <sup>-2</sup> ]	$\sigma_1$ [N m <sup>-2</sup> ]
1	1	5	3,5	0,3684	3,6	2,8	8359,2	5104,9
2	1	5	2	0,3733	3,4	1,9	6192	4045,4
3	1	5	1	0,3731	3,6	1,2	4024,9	2745,1

TABELA 2A Dados obtidos no ensaio.

Ensaio	Dens [kg m <sup>-3</sup> ]	c [kN m <sup>-2</sup> ]	$\phi_i$ [°]	$\phi_e$ [°]	$\sigma_{crit}$ [kN m <sup>-2</sup> ]	$\sigma_1$ [kN m <sup>-2</sup> ]
1	600,85	0	33	33	0	23,51
2	602,56	1,3	25	30,5	4,09	20,29
3	611,25	0,33	31	32,9	<b>1,17</b>	15

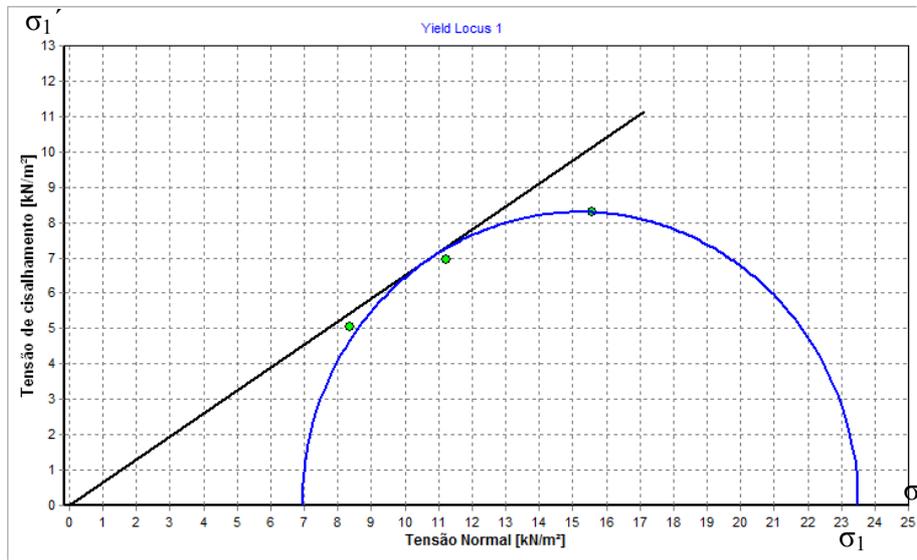


FIGURA 1A Resultado do ensaio 1 de cisalhamento.

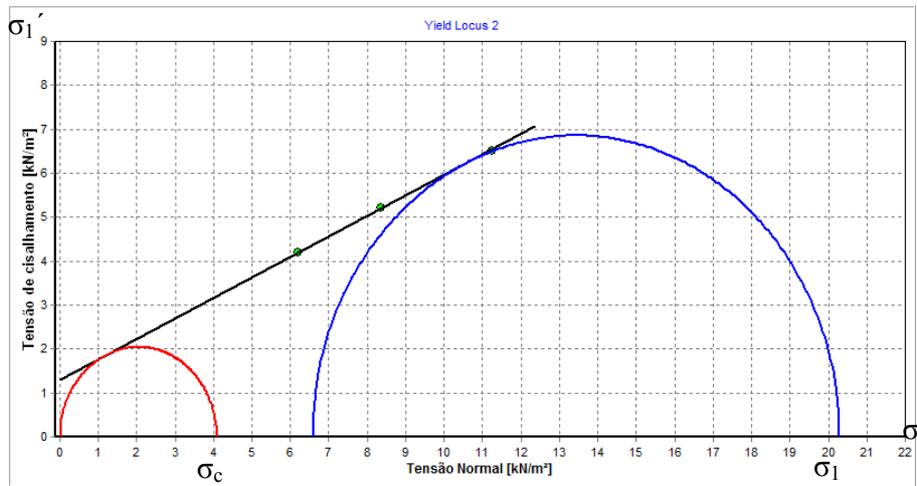


FIGURA 2A Resultado do ensaio 2 de cisalhamento.

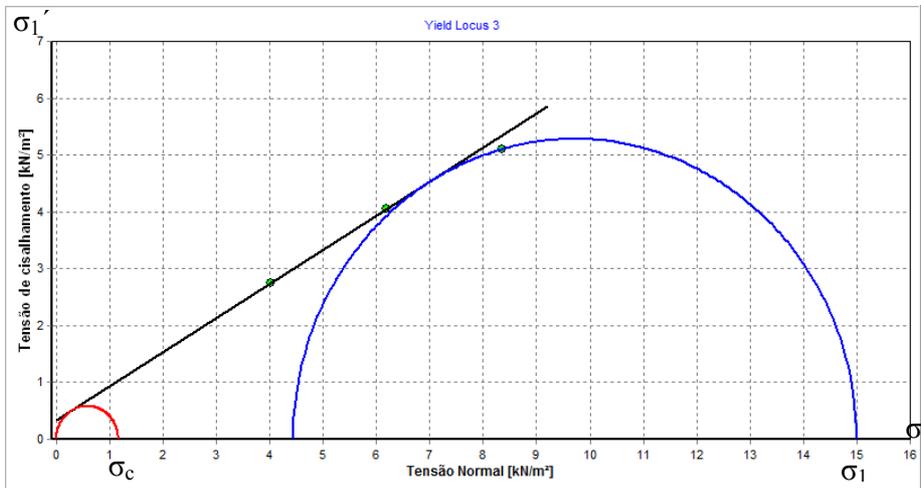


FIGURA 3A Resultado do ensaio 3 de cisalhamento.

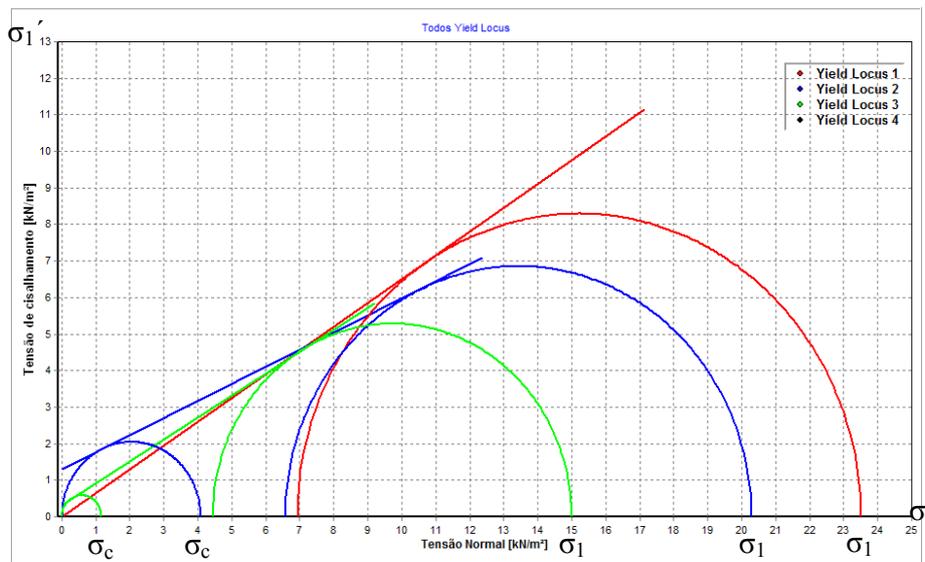


FIGURA 4A Resumo dos ensaios de cisalhamento.

## **ANEXO B**

<b>TABELAS</b>		<b>Páginas</b>
TABELA 1B	Área da seção da armadura por metro de laje ( $\text{cm}^2$ $\text{m}^{-1}$ )	126

TABELA 1B Área da seção da armadura por metro de laje ( $\text{cm}^2 \text{m}^{-1}$ ).

ÁREA DA SEÇÃO DE BARRAS POR METRO DE LARGURA $a_s$ ( $\text{cm}^2/\text{m}$ )							
s (cm)	DIÂMETRO NOMINAL (mm)						s (cm)
	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	
5,0	3,92	6,24	10,06	15,70	24,54	40,22	5,0
5,5	3,56	5,67	9,15	14,27	22,31	36,56	5,5
6,0	3,27	5,20	8,38	13,08	20,45	33,52	6,0
6,5	3,02	4,80	7,74	12,08	18,88	30,94	6,5
7,0	2,80	4,46	7,19	11,21	17,53	28,73	7,0
7,5	2,61	4,16	6,71	10,47	16,36	26,81	7,5
8,0	2,45	3,90	6,29	9,81	15,34	25,14	8,0
8,5	2,31	3,67	5,92	9,24	14,44	23,66	8,5
9,0	2,18	3,47	5,59	8,72	13,63	22,34	9,0
9,5	2,06	3,28	5,29	8,26	12,92	21,17	9,5
10,0	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27	20,11	10,0
11,0	1,78	2,84	4,57	7,14	11,15	18,28	11,0
12,0	1,63	2,60	4,19	6,54	10,23	16,76	12,0
12,5	1,57	2,50	4,02	6,28	9,82	16,09	12,5
13,0	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44	15,47	13,0
14,0	1,40	2,23	3,59	5,61	8,76	14,36	14,0
15,0	1,31	2,08	3,35	5,23	8,18	13,41	15,0
16,0	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67	12,57	16,0
17,0	1,15	1,84	2,96	4,62	7,22	11,83	17,0
17,5	1,12	1,78	2,87	4,49	7,01	11,49	17,5
18,0	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82	11,17	18,0
19,0	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46	10,58	19,0
20,0	0,98	1,56	2,52	3,93	6,14	10,06	20,0
22,0	0,89	1,42	2,29	3,57	5,58	9,14	22,0
24,0	0,82	1,30	2,10	3,27	5,11	8,38	24,0
25,0	0,78	1,25	2,01	3,14	4,91	8,04	25,0
26,0	0,75	1,20	1,93	3,02	4,72	7,73	26,0
28,0	0,70	1,11	1,80	2,80	4,38	7,18	28,0
30,0	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09	6,70	30,0
33,0	0,59	0,95	1,52	2,38	3,72	6,09	33,0

Elaborada por Alessandro L. Nascimento e Libânio M. Pinheiro.

De acordo com a NBR 7480:1996.

## **ANEXO C**

<b>TABELAS</b>		<b>Páginas</b>
TABELA 1C	Consistência do concreto, em função do tipo de elemento estrutural.	133
TABELA 2C	Consistência do concreto, em função do tipo de elemento estrutural.	133
TABELA 3C	Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.	134

<b>FIGURAS</b>		<b>Páginas</b>
FIGURA 1C	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.	132
FIGURA 2C	Modelo de reforço em paredes interceptadas.	136

### **Recomendações práticas para projetos e construção para silos de concreto armado**

No Brasil, é preciso recorrer a normas internacionais porque ainda não se dispõe de normalização para projeto de silos que forneçam métodos de avaliação de ações e disposições construtivas.

A norma ACI 313:1997 é utilizada para silos de concreto para materiais granulares. Essa norma foi elaborada em 1968 e revisada em 1977, 1983, 1991 e, finalmente, em 1997.

Neste anexo serão abordadas de forma simples algumas das recomendações da norma americana ACI e da ABNT.

### **A) Definições**

O termo “silo” aplica-se a todo recipiente vertical para armazenar uma massa de produto granular, sendo a tremonha a parte da parede inclinada do fundo do silo.

Nomes alternativos, tais como silos e *bunkers* (paióis), são utilizados em diferentes localidades, mas, para efeitos da presente norma, todas essas estruturas são consideradas como silos.

Tubos empilhados são relativamente delgados, com altura livre; estruturas de concreto tubular são utilizadas para empilhar montes cônicos de material granular.

*Slipformed* é uma forma de concretagem do silo, utilizando fôrmas deslizantes, com 1,20 m de altura, construídas para moverem-se continuamente, devido à adição de aditivos para que ocorra a secagem rápida do concreto.

*Jumpformed* são construídos utilizando 3,60 m de altura para fôrma fixa. O fundo do elevador é saltado para a próxima posição, após o concreto endurecer suficientemente.

*Staves* silos são silos montados por pequenas unidades de concreto pré-moldado chamado *staves*, usualmente estriadas e encaixadas, possuindo justamente uma parte exterior cintas de aço ajustáveis.

### **B) Materiais**

Todos os materiais e testes de materiais devem ser realizados conforme a ACI 313:1997, exceto as diferentes especificações. No Brasil, são utilizadas as normas brasileiras nas especificações dos materiais e metodologia para os ensaios, como preconizado pela ABNT.

## **B.1 Cimento**

➤ ACI 313:1997

O cimento deve seguir uma das seguintes especificações: ASTM C150: Especificações para cimento Portland (tipos I, IA, II, IIA, III e IIIA), ASTM C595: especificação para combinação de cimento hidráulico (excluindo tipos S, AS, IS e IS-A) ou ASTM C845.

➤ Norma brasileira

O cimento, no Brasil, dispõe de oito opções, que atendem com igual desempenho aos mais variados tipos de obras. Mas, no caso do concreto para silos, podem ser utilizados:

- cimento Portland comum (CP I) - NBR 5732:
  - a) CP I - cimento Portland comum,
  - b) CP I-S - cimento Portland comum com adição;
- cimento Portland composto (CP II) - NBR 11578:
  - a) cimento Portland CP II-Z (com adição de material pozolânico),
  - b) cimento Portland composto CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno),
  - c) cimento Portland Composto CP II-F (com adição de material carbonático - filler);
- cimento Portland de alto-forno (CP III) - com escória - NBR 5735,
- cimento Portland pozolânico (CP IV) - com pozolana - NBR 5736,
- cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) - alta resistência inicial - NBR 5733

## **B.2 Agregados**

Dimensão máxima característica do agregado ( $D_{max}$ ).

- ACI 313:1997 confere que deve ser conforme a ASTM C33.  
Especificações de agregados para concreto estrutural:
  - $\leq 1/5$  da menor dimensão entre as faces da forma;
  - $\leq 1/3$  da espessura das lajes;
  - $\leq 3/4$  do espaço livre entre armaduras.
- NBR 6118:2003:
  - $\leq 1/4$  da menor dimensão da peça a ser concretada;
  - $\leq$  que  $1/3$  da espessura das lajes;
  - $\leq 1,2$  (20%) espessura nominal do cobrimento;
  - espaço livre entre armaduras  $\geq 1,2 D_{\max}$ .

### **B.3 Água**

A água para o concreto deve ser potável, livre de substâncias contaminantes que podem ser prejudiciais para o concreto ou aço. Água não potável pode ser utilizada somente na produção de cubos de argamassa, devendo apresentar, entre 7 a 28 dias, resistência igual ou próxima à mínima resistência de amostras feitas com água potável, segundo a ACI 313:1997.

No caso de águas com partículas em suspensão (argila e/ou silte), que podem ocorrer em águas de rios, poços e represas, recomenda-se deixá-las em repouso num tanque para que aconteça a sedimentação, antes do uso.

A norma NBR NM 137:1997 da ABNT especifica qualidades para a água a ser utilizada no amassamento e na cura de argamassa e concreto. A água do mar não é recomendada, pois pode levar a resistências iniciais mais elevadas que os concretos normais, mas as resistências finais são sempre menores, além da possibilidade de corrosão da armadura. As águas minerais também não são recomendadas.

### **B.4 Misturas**

Em caso de construções de concreto com formas deslizantes, podem-se incluir aceleradores e/ou retardadores.

## **B.5 Aços**

Aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono (em torno de 0,002% até 2%).

Os aços estruturais para construção civil possuem teores de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%. Entre outras propriedades, o aço apresenta resistência e ductilidade, muito importantes para a engenharia civil.

Segundo a NBR 7480:1996, foi eliminada a categoria CA-40, que não era especificada nos projetos de obras e nem comercializada pelas usinas siderúrgicas, permanecendo somente as categorias CA-25, CA-50 e CA-60. Na versão de 1996, a separação em classes foi eliminada e todo material em barras, caso típico do CA-25 e CA-50, deve ser fabricado obrigatoriamente por laminação a quente e todo fio, caso típico do CA-60, deve ser fabricado por trefilação ou processo equivalente (estiramento ou laminação a frio).

Como o concreto simples apresenta pequena resistência à tração e é frágil, é altamente conveniente a associação do aço ao concreto, obtendo-se o concreto armado.

Este material, adequadamente dimensionado e detalhado, resiste muito bem à maioria dos tipos de solicitação. Mesmo em peças comprimidas, além de fornecer ductilidade, o aço aumenta a resistência à compressão.

## **C) Requisitos construtivos**

### **C.1 Qualidade do concreto**

A resistência à compressão do concreto, para o corpo de prova ou usado em unidades pré-moldadas aos 28 dias, tem um  $f_{ck} > 28$  MPa. É recomendado um fator água/cimento, em peso, no limite de 0,55, para não haver incorporação

de ar no concreto e de 0,45 para concretos com incorporadores de ar. O *slump* do concreto, para o caso de utilizar formas deslizantes, deve ser de  $100 \pm 25$  mm. A determinação do *slump test* está ilustrada na Figura 1C.

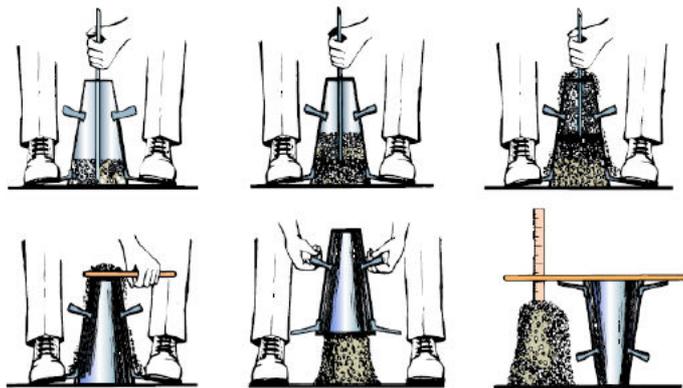


FIGURA 1C Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Fonte: NBR NM 67:1998.

As escolhas da consistência do concreto devem ser feitas em função do tipo de elemento estrutural para adensamento mecânico, segundo a norma ACI 211:2001.

O ensaio é descrito pelo método brasileiro MB 256 (antigamente NBR 7223 e hoje já normalizado para o Mercosul com a sigla NBR NM 67:1998), denominado Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test*.

Nas Tabelas 1C e 2C são fornecidos os limites máximos e mínimos recomendados para o abatimento (*slump*).

TABELA 1C Consistência do concreto em função do tipo de elemento estrutural.

Elemento estrutural	Abatimento (mm)	
	Máximo*	Mínimo
Paredes de fundações armadas e sapatas	75	25
Sapatas não armadas, caixões e paredes de vedação	75	25
Vigas e paredes armadas	100	25
Pilares de edifício	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Concreto simples	50	25

\*Pode ser aumentado em 25 mm com o uso de método de consolidação que não a vibração.

Fonte: ACI 211:2001.

TABELA 2C Consistência do concreto em função do tipo de elemento estrutural.

Elemento estrutural	Abatimento (mm)	
	Pouco armada	Muito armada
Laje	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$
Viga e parede armada	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Pilar do edifício	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Paredes de fundações, sapatas, tubulões	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$

Concreto bombeado: abatimento entre 70 e 100 mm, no máximo.

Fonte: Terzian, P.; Helene, P. (1992).

Esse ensaio serve para a verificação do controle de qualidade da execução do concreto, pois qualquer variação efetuada, seja na dosagem ou na forma e na sequência de concretagem, o *slump* será alterado.

Safarian & Harris (1985) sugeriram a utilização de mísulas nas interseções, um cobrimento interno da armadura devido à abrasão  $\geq 2,5$  cm ou apenas 2,0 cm, se utilizado produto antiabrasivo na superfície.

Segundo a NBR 6118:2003, para garantir o cobrimento mínimo ( $c_{\min}$ ), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal ( $c_{\text{nom}}$ ), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução ( $\Delta c$ ). Assim, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, estabelecidos na Tabela 3C, para  $\Delta c = 10$  mm.

TABELA 3C Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c = 10\text{mm}$ .

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1 da NBR 6118, 2003)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Lajes <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Vigas/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR 6118:2003.

## C.2 Concretagem

As etapas e a velocidade devem ser muito bem controladas, segundo a ACI 313:1983. O concreto deverá ser depositado o mais próximo possível de sua posição final, de modo a evitar a segregação. Não será permitido que o concreto seja trabalhado ou vibrado a uma distância superior a 1,50 m do ponto de depósito inicial. A temperatura mínima do concreto, quando forem utilizadas formas deslizantes, deve estar entre 13° e 32°C e o sistema de avanço dessas formas deve ser sucessivo, com a utilização de macacos hidráulicos.

## C.3 Cura e proteção

Combinações de curas não devem ser feitas nas superfícies internas dos silos, a não ser por uma determinação de projeto e/ou especificação, segundo a ACI 313:1997. As combinações de curas devem ser feitas sem a utilização de

corantes, principalmente aqueles à base de resina, Os compostos à base de cera não são permitidos. Se um composto para cura for utilizado no interior das superfícies das paredes do silo, usado para armazenamento de alimentos, ele não deve ser tóxico, inflamável e nem deteriorável.

Finalizando, a superfície vertical imediatamente após remoção da forma deve incluir o enchimento de espaços ociosos com argamassa, contendo uma parte de cimento e duas partes de areia fina, acompanhado de fricção até que uma textura suave seja produzida.

#### **C.4 Detalhes e localização da armadura**

As paredes com espessuras de 23 cm ou superior devem ter duas camadas de aço vertical e horizontal. Na armadura horizontal não será permitida a ancoragem e na armadura vertical pode ser utilizada solda na fixação para prevenir os deslocamentos durante a movimentação das formas ou concretagem.

A espessura de paredes de silos moldadas *in loco* não deve ser inferior a 15 cm e paredes de concreto pré-moldado, não inferiores a 5 cm.

As paredes da tremonha cônica não podem ter espessura menor que 13 cm e, para as tremonhas quadradas, retangulares e poligonais, não devem ser inferiores a 15 cm.

As mísulas têm a finalidade de eliminar os cantos retos facilitando o fluxo e a utilização de fôrmas deslizantes, além de reduzir as contrações de tensões e momentos. As mísulas de dimensões superiores a 22,5 cm x 22,5 cm devem ser armadas.

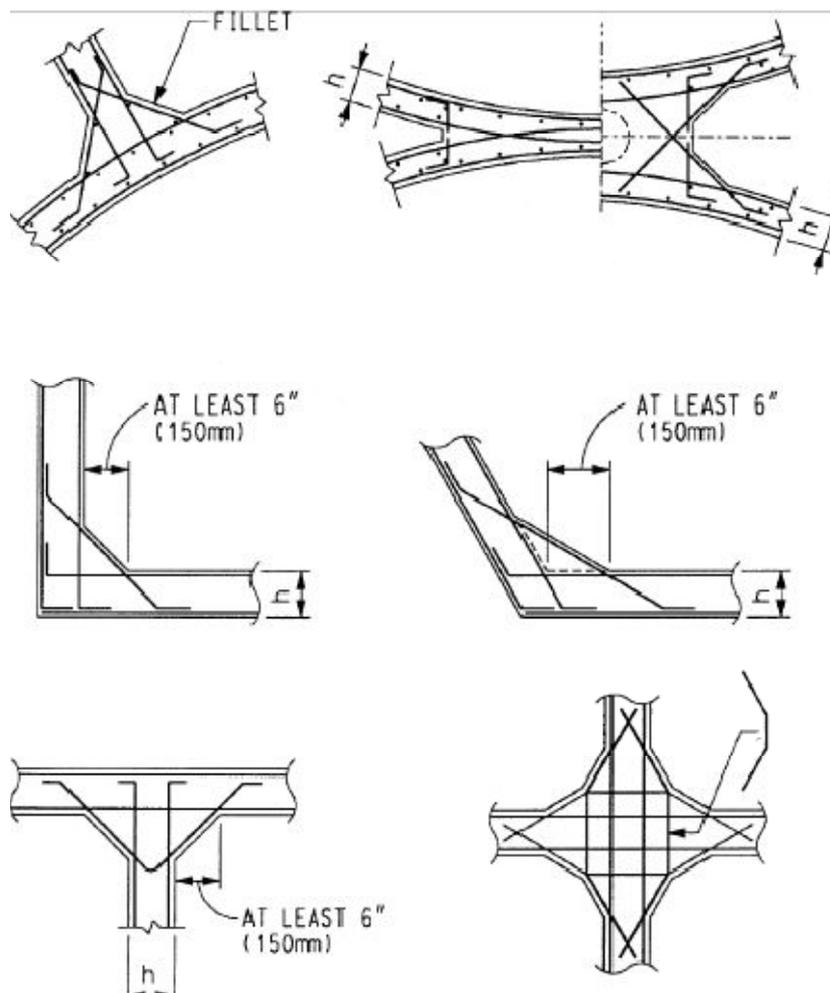


FIGURA 2C Modelo de reforço em paredes interceptadas.  
 Fonte: ACI 313:1997.

### C.5 Formas

As formas devem ser firmes e rígidas para impedir o vazamento de argamassa e manter a espessura da parede de concreto final dentro das tolerâncias dimensionais especificadas no item C.6.

## C.6 Tolerâncias

Tolerâncias para estruturas *slipformed* e *jumpformed*:

a) Translação da linha central da parede de silo:

Para altura menor ou igual a 30 m .....7,5 cm

Para alturas maior que 30 m, 1/400 tempos de altura .....10 cm

b) Diâmetro interno ou distante entre paredes:

Para 3 m de diâmetro ou de distância .....1,2 cm

mas menor que .....7,5 cm

d) Locais de abertura, chapas encaixadas ou âncoras:

Vertical ..... 2,5 cm

Horizontal .....2,5 cm