

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA MISTO EM  
CONCRETO ARMADO E ALVENARIA  
ESTRUTURAL APLICADO A SILOS  
MULTICELULARES PARA CAFÉ A GRANEL**

Eng.º José Floriano de Azevedo Marques Neto

Campinas

2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA MISTO EM  
CONCRETO ARMADO E ALVENARIA  
ESTRUTURAL APLICADO A SILOS  
MULTICELULARES PARA CAFÉ A GRANEL**

Eng.º José Floriano de Azevedo Marques Neto

Orientadora: Profª. Drª Maria Cecília Amorim Teixeira da Silva

Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP.

2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M348c Marques Neto, José Floriano de Azevedo  
Concepção de um sistema misto em concreto armado e alvenaria estrutural aplicado a silos multicelulares para café a granel / José Floriano de Azevedo Marques Neto.-  
-Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Maria Cecília Amorim Teixeira da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Silos. 2. Café. 3. Alvenaria. I. Silva, Maria Cecília Amorim Teixeira da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: An alternative design of multi-cell group for storing coffee beans

Palavras-chave em Inglês: Silos, Coffee, Masonry.

Área de concentração: Edificações.

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carlito Calil Junior, Armando Lopes Moreno Junior.

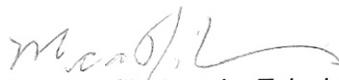
Data da defesa: 25/08/2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA MISTO EM  
CONCRETO ARMADO E ALVENARIA  
ESTRUTURAL APLICADO A SILOS  
MULTICELULARES PARA CAFÉ A GRANEL**

Eng.º José Floriano de Azevedo Marques Neto

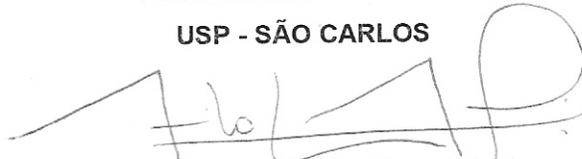
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



Profª.Drª. Maria Cecília Amorim Teixeira da Silva  
Presidente e Orientadora - UNICAMP



Prof. Dr. Carlito Calil Junior  
USP - SÃO CARLOS



Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior  
UNICAMP

Campinas, 25 de agosto de 2004.

## Dedicatória

À  
minha esposa Silvia  
e  
aos meus filhos Bruno e Pedro

## **Agradecimentos**

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Cecília pelo acolhimento, pelas orientações que recebi , pela dedicação e paciência que sempre teve comigo.

Aos amigos Rosaura, Lucas, Carol, Daianna e Rosana que ao longo desses anos de mestrado, sempre incentivaram e colaboraram no que fosse necessário.

À Pinhalense Máquinas Agrícolas pelas oportunidades que nos proporcionaram e que ainda proporcionam para trabalharmos em projetos e obras do setor cafeeiro.

Ao colega Giovano Palma que com grande generosidade colaborou com o desenvolvimento dos ensaios no laboratório do LAMEM.

À minha família pelo apoio e incentivo.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
RESUMO .....	xxi
ABSTRACT .....	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ATUALIDADE DO ESTUDO.....	1
1.2 HISTÓRICO.....	2
1.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	5
1.4 OBJETIVOS .....	8
1.5 METODOLOGIA DO PROJETO.....	8
2. PROPRIEDADES DO PRODUTO CAFÉ.....	9
2.1 INFORMAÇÕES GERAIS .....	9
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS MAIS IMPORTANTES.....	13
2.3 PROPRIEDADES BIOLÓGICAS MAIS IMPORTANTES.....	17
2.4 PROPRIEDADES QUÍMICAS MAIS IMPORTANTES.....	18
2.5 CONDIÇÕES MÍNIMAS PARA ARMAZENAGEM DE CAFÉ BENEFICIADO .....	19
3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS EXISTENTES .....	21
3.1 ARMAZÉNS CONVENCIONAIS.....	21

3.2	ARMAZENAGEM EM SACOS TIPO <i>BIG-BAGS</i> .....	25
3.3	ARMAZENAGEM A GRANEL PARA CAFÉ EM COCO .....	27
4.	SISTEMA CONSTRUTIVO PROPOSTO .....	29
4.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	29
4.2	SISTEMA PROPOSTO .....	30
4.2.1	Projeto arquitetônico .....	32
4.2.2	Cobertura dos silos .....	35
4.2.3	Laje de fechamento das células .....	39
4.2.4	Paredes dos silos .....	40
4.2.5	Fundo da célula .....	41
4.2.6	Apoios das células e das tremonhas .....	44
4.2.7	Considerações sobre a capacidade (volume) das células .....	45
4.2.8	Um exemplo prático .....	52
5.	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS AÇÕES DECORRENTES DO PRODUTO ENSILADO .....	57
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O PRODUTO EM REPOUSO NAS CÉLULAS .....	58
5.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PRESSÕES NAS TREMONHAS .....	62
5.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MOVIMENTO DO PRODUTO ENSILADO .....	64
5.4	SOBREPRESSÕES DURANTE A CARGA E A DESCARGA .....	67
5.5	OBSTRUÇÕES DO FLUXO DURANTE A DESCARGA .....	73
6.	PROJETO ESTRUTURAL .....	77
6.1	DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS .....	77
6.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CAFÉ BENEFICIADO E DA GEOMETRIA DA TREMONHA .....	79
6.3	DEFINIÇÕES ARQUITETÔNICAS E GEOMÉTRICAS .....	85
6.4	PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO .....	88
6.4.1	Pressões .....	88
6.4.2	Células prismáticas .....	92
6.4.3	Tremonhas tronco-piramidais .....	103
6.4.4	Vigas de sustentação e pilares de apoio .....	106

6.5	CÁLCULOS E RESULTADOS.....	108
6.6	DIMENSIONAMENTO .....	117
6.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO CONSTRUTIVO.....	120
6.7.1	Considerações sobre as paredes de alvenaria estrutural.....	120
6.7.2	Considerações sobre a argamassa de assentamento da alvenaria estrutural.....	126
6.7.3	Considerações sobre o graute para a alvenaria armada.....	129
7.	RECOMENDAÇÕES PARA PROJETOS DE SILOS ELEVADOS DE CÉLULAS QUADRADAS OU RETANGULARES PARA CAFÉS BENEFICIADOS A GRANEL .....	131
7.1	PROCEDIMENTOS DE PROJETO E DE CÁLCULO .....	131
7.2	PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS.....	132
8.	COMPARAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM: CONVENCIONAL X SILOS.....	135
9.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O EXEMPLO PRÁTICO: OBRA JÁ CONSTRUÍDA ..	137
10.	CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	139
	ANEXO A: TIPOS DE BLOCOS ESTRUTURAIS.....	143
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	145

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 01 – Grãos de café no galho, em época de colheita. ....	6
Fig. 02 – Grãos de café já beneficiados .....	10
Fig. 03 – Fluxograma dos processos. ....	11
Fig. 04 – Representação esquemática do ângulo de repouso .....	14
Fig. 05 – Classificação (defeitos) do café.....	16
Fig. 06 – Sacos de cafés empilhados de maneira convencional.....	23
Fig. 07 – Embocamento de cafés em sacos: armazenagem em big-bags (à esquerda); armazenagem em sacos (à direita).....	24
Fig. 08 – Sacos de café armazenados por empilhadeiras (pallets).....	24
Fig. 09 – Sistema de transporte interno de <i>big-bags</i> através de empilhadeiras.....	26
Fig. 10 – Sistema de armazenagem em <i>big-bags</i> .....	26
Fig. 11 – Armazenagem em <i>big-bags</i> .....	27
Fig. 12 – Caminhão container utilizado para transporte de café beneficiado a granel. ...	31
Fig. 13 – Planta esquemática de um sistema de silos graneleiros para café.....	33
Fig. 14 – Corte longitudinal do sistema de silos graneleiros .....	34
Fig. 15 – Corte transversal do sistema de silos graneleiros .....	35
Fig. 16 – Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho.....	37

Fig. 17 a – Corte transversal do sistema de silos graneleiros. ....	38
Fig. 17 b – Fechamento em telhas de aço, nas extremidades do silo.....	39
Fig. 18 – Detalhe do sistema de apoio da abertura da laje superior .....	40
Fig. 19 – Detalhe genérico de uma pré-laje. ....	42
Fig. 20 – Exemplo de montagem de uma pré-laje.....	42
Fig. 21 – Tremonha com saída dupla tronco-piramidal .....	43
Fig. 22 – Projeto esquemático do fundo de uma célula (tremonha) .....	44
Fig. 23 – Sistema estrutural de apoio das células e tremonhas .....	45
Fig. 24 – Esquema geométrico de uma tremonha tronco-piramidal .....	46
Fig. 25 – Corte A-A: corte transversal da tremonha .....	47
Fig. 26 – Corte B-B: corte longitudinal da tremonha.....	48
Fig. 27 – Esquema geométrico do tronco de pirâmide inferior .....	48
Fig. 28 – Esquema geométrico do tronco de pirâmide superior .....	49
Fig. 29 – Pirâmide cônica formada pelo ângulo de repouso do café.....	50
Fig. 30 – Esquema geométrico de uma célula. ....	51
Fig. 31 – Execução de paredes dos silos graneleiros .....	52
Fig. 32 – Perspectiva da construção do silo.....	53
Fig. 33 – Perspectiva da construção do silo.....	53
Fig. 34 – Vista da laje superior de fechamento das células. ....	54
Fig. 35 – Início da construção das tremonhas.....	54
Fig. 36 – Detalhe da construção da tremonha.....	55
Fig. 37 – Vista da tremonha. ....	55
Fig. 38 – Detalhe do fechamento vertical em telhas de aço.....	56
Fig. 39 – Variação das forças verticais com a profundidade seguindo a teoria de Reimbert .....	60

Fig. 40 – Pressões nas paredes de uma tremonha.....	63
Fig. 41 – Enchimento de uma célula .....	64
Fig. 42 – Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por SAFARIAN (1985).....	72
Fig. 43 – Tipos de obstruções do fluxo.....	74
Fig. 44 – Foto do equipamento Jenike Shear Tester.....	80
Fig. 45 – Vista superior do equipamento Jenike Shear Tester .....	80
Fig. 46 – Função fluxo (FF) e fator fluxo (ff) para fluxo de massa.....	84
Fig. 47– Esquema geométrico de uma célula com capacidade para dois mil sacos de café. ....	87
Fig. 48 - Pressões que atuam em uma célula. ....	89
Fig. 49 – Pressões normais à superfície da tremonha em fluxo de massa. ....	92
Fig. 50 – Esquema estático das ações e esforços. ....	93
Fig. 51 – Corte longitudinal de uma célula .....	94
Fig. 52 – Corte transversal da célula.....	94
Fig. 53 – Gráfico indicando articulação em cima e engastamento embaixo, pressão hidrostática e momento (GUERRIN s /d) .....	98
Fig. 54 – Equivalência das pressões para cálculo dos esforços através das fórmulas de GUERRIN (s /d).....	99
Fig. 55 – Tração nas células. ....	100
Fig. 56 – Força de atrito nas células. ....	101
Fig. 57 – Hipóteses de enchimento das células. ....	102
Fig. 58 – Esquema de carga / descarga das células.....	103
Fig. 59 – Esquema de tremonha em planta.....	104
Fig. 60 – Corte transversal da tremonha. ....	104

Fig. 61 – Corte Longitudinal da tremonha .....	105
Fig. 62 – Visão espacial do pórtico.....	106
Fig. 63 – Seção transversal do silo multicelular .....	107
Fig. 64 – Gráfico das pressões horizontais com a profundidade do café na célula, e da força de atrito com a profundidade do café na célula.....	112
Fig. 65 – Gráfico das pressões na parede da tremonha para carga estática. ....	114
Fig. 66 – Ações e esforços que atuam numa seção de parede.....	117
Fig. 67 – Planta da 1ª fiada da alvenaria.....	123
Fig. 68 – Planta da 2ª fiada da alvenaria.....	124
Fig. 69 – Corte B-B: corte transversal indicando as fiadas de bloco e as canaletas de concreto. ....	125
Fig. 70 – Corte A-A: corte longitudinal.....	126
Fig. 71 – Esquema estrutural dos silos construídos em Varginha.....	138
Fig. 72 – Família dos blocos estruturais.....	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Sacas de 60 kg de café cru, solúvel e torrado, exportado.....	4
Tabela 02 – Cálculo da Capacidade de Armazenagem. ....	22
Tabela 03 – Coeficientes de absorvância e emissividade para vários materiais.....	37
Tabela 04 – Coeficientes de majoração Cd .....	70
Tabela 05 – Relação entre volume armazenado e dimensões da célula .....	88
Tabela 06 – Pressões verticais, horizontais e força de atrito em uma célula, para café beneficiado a granel em repouso .....	110
Tabela 07 – Pressões verticais, horizontais e força de atrito nas paredes da tremonha, para café beneficiado em repouso.....	113
Tabela 08 – Pressões, tração e momentos horizontais para café beneficiado em repouso.....	115
Tabela 09 – Pressões equivalentes e momentos verticais.....	115
Tabela 10 – Peso da parede, reação da laje de cobertura, força de atrito e tensão vertical na parede da célula. ....	116
Tabela 11 – Resumo das ações e esforços provenientes do produto ensilado. ....	118
Tabela 12 – Traço das argamassas .....	129

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\gamma$  = peso específico de produto ensilado
- $\varphi$  = ângulo de repouso do produto ensilado
- $\alpha$  = ângulo de declividade da parede da tremonha
- $\Phi$  = ângulo de atrito entre as partículas do produto ensilado (ângulo de atrito interno)
- $\Phi'$  = ângulo de atrito entre produto ensilado e as paredes da célula
- $\Phi_{wpi}$  = ângulo de atrito (inferior) com a parede de bloco de concreto
- $\Phi_{wps}$  = ângulo de atrito (superior) com a parede de bloco de concreto
- $\Phi_{wti}$  = ângulo de atrito (inferior) com a parede de concreto liso da tremonha
- $\Phi_{wts}$  = ângulo de atrito (superior) com a parede de concreto liso da tremonha
- $\Phi_{ii}$  = ângulo de atrito interno (inferior)
- $\Phi_{is}$  = ângulo de atrito interno (superior)
- $\Phi_{ei}$  = efetivo ângulo de atrito (inferior)
- $\Phi_{es}$  = efetivo ângulo de atrito (superior)
- $\mu$  =  $\text{tg } \Phi$  = coeficiente de atrito entre as partículas do produto ensilado ( coeficiente de atrito interno )
- $\mu'$  =  $\text{tg } \Phi'$  = coeficiente de atrito entre produto ensilado e paredes da célula

- $p$  = pressão horizontal atuando na parede do silo  
 $q$  = pressão vertical atuando sobre a secção transversal da massa ensilada  
 $q_0$  = pressão vertical no topo da tremonha  
 $q_y$  = pressão vertical à profundidade  $h_y$  abaixo do topo da tremonha  
 $p_n$  = pressão normal a superfície da tremonha à profundidade  $h_y$  abaixo  
 $a$  = lado da tremonha quadrada  
 $b$  = lado da abertura de saída  
 $h_m$  = altura total da tremonha  
 $h$  = altura do tronco de pirâmide inferior da tremonha  
 $h_y$  = profundidade do produto ensilado dentro da tremonha  
 $S$  = área da secção transversal da célula  
 $U$  = perímetro da secção  $S$   
 $R$  =  $\frac{S}{U}$  = raio hidráulico da célula  
 $H$  = altura total da célula  
 $K$  =  $p/q$  = razão entre as pressões horizontal e vertical  
 $F_a$  = força vertical resultante das ações de atrito nas faces internas das paredes da célula, por unidade de comprimento  
 $e$  = base de logaritmo neperiano

## RESUMO

MARQUES NETO, José Floriano de Azevedo. Concepção de um sistema misto em concreto armado e alvenaria estrutural aplicado a silos multicelulares para café a granel. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 148 pág. Dissertação de Mestrado. O agronegócio café representa atualmente no mundo a segunda maior *commodity* e observa-se uma tendência cada vez maior em se trabalhar com esse produto a granel, em grandes volumes. Diversos fatores justificam essa tendência: transporte mais barato e mais seguro em caminhão do tipo *container*; custo mais barato do *container* para embarcar nos navios para exportação; diminuição significativa da mão – de – obra de manuseio; maior segurança contra incêndio; maior rapidez na carga e descarga; e eliminação de gastos com valores não agregados ao produto. Visando uma concepção construtiva racional e econômica, o presente trabalho propõe um sistema de armazenagem para café a granel, na forma alternativa aos sistemas tradicionais, quer seja de armazenagem do café em sacos de 60kg, ou mesmo em sacos tipo *big-bags*, com capacidade individual de 900kg a 1200kg. No projeto proposto, o silo é composto de células em alvenaria estrutural, geminadas duas a duas na largura e com um número variável de células no comprimento, em função do volume desejado de armazenagem. Esse sistema simétrico favorece a racionalidade operacional, garantindo a continuidade entre os fluxos de recebimento e de expedição. O fundo da célula é em forma de tremonha dupla tronco-piramidal, com saída central. Essa alternativa permite a redução da altura da tremonha para uma mesma célula, e conseqüentemente uma redução na altura total do silo, facilitando a concepção estrutural e minimizando o custo

da obra. As tremonhas são construídas em painéis treliçados pré-moldados com capeamento de concreto. A sustentação das células e das tremonhas é feita através de vigas e pilares de concreto armado. O isolamento térmico necessário para que a qualidade do café armazenado seja garantida é estabelecido pela utilização de telhas trapezoidais de aço galvanizado, tanto na cobertura como nos fechamentos laterais. A parte superior das células do silo recebe uma laje que tem como função estrutural o travamento da estrutura. Tendo em vista situações de silos multicelulares, as várias situações de carregamento, resultantes das combinações de células cheias e vazias, são analisadas. As especificações e as peculiaridades relativas ao produto armazenado são apresentadas e consideradas na definição do sistema proposto. Para um exemplo de silo adotado, são calculados todos os esforços provenientes das ações que agem nas paredes e nas tremonhas, e também seu dimensionamento, concluindo-se pela viabilidade da concepção construtiva estudada.

**Palavras Chave:** silos, café, alvenaria estrutural, tremonhas.

## **ABSTRACT**

MARQUES NETO, José Floriano de Azevedo. An alternative design of multi-cell group for storing coffee beans. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, State University of Campinas, 2004. 148 pages. M. Sc. Dissertation. Nowadays, coffee agribusiness represents the second largest commodity in the world. Storing coffee beans in silos, instead of in bags or big-bags, has been an increase tendency. Several factors justify that tendency: cheaper and safer transport by container trucks, lower cost of containers for export shipment, less labor in handling, greater safety against fire, faster filling and discharge, and elimination of extra expenses due to values not aggregated to the product. Aiming at an economic and rational solution for storing coffee beans this paper presents an alternative design: a multi-cell silo group composed of reinforced masonry rectangular cells coupled two by two in width, and a variable number of cells in length according to the volume of desired storage. Such symmetrical system benefits the loading and the unloading operations, and guarantees the continuity between the receipt flow and the shipment flow. The silo bottom is designed as a double pyramidal central opening hopper. That shape reduces the height of the hopper in the cell, and consequently reduces the total height of the silo lowering the cost of the building. The hoppers are built in precast-concrete trussed panels. Cells and hoppers are supported on concrete beams and columns. The thermal insulation needed to preserve the quality of the stored coffee beans is obtained by using galvanized steel trapezoid tiles for the roof as well as for the lateral closure. The roof structure consists of a precast-concrete slab that restrains the silo structure. Several combinations of loaded

and unloaded cells are analyzed in the multi-cell silo group to compute the worst combinations of loading. An example is presented and the feasibility of the alternative design is discussed.

**Keywords:** silo, coffee, reinforced masonry, hopper.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 ATUALIDADE DO ESTUDO

A necessidade constante em se reduzir custos, economizando valores não agregados ao produto, principalmente nessa época de economia globalizada, faz com que cada segmento produtivo, industrial e de serviços procure soluções para enfrentar o mercado mundial, sem protecionismos.

A *Engenharia Civil*, em sua essência principal, pode ser definida como uma importante, poderosa e imprescindível ferramenta a serviço do homem. Portanto, à medida que os desafios aparecem, é que se verifica o progresso e o desenvolvimento desta atividade, tanto em novas técnicas, como em processos, procedimentos, materiais, ferramentas, etc.

Todas essas considerações são importantes para caracterizar e dar suporte às soluções apresentadas a seguir, para armazenagem de café a granel, através de uma nova concepção construtiva mais racional e econômica.

O produto *café* representa no mundo a segunda maior *commodity*.

Em 50 países, aproximadamente 60 a 80 milhões de pessoas vivem do trabalho em torno do agronegócio “café”.

Consumem-se, em média, 100 grãos de café para se obter uma xícara, sendo que 1 pé de café produz, aproximadamente, 4.000 grãos por ano. Então, se uma pessoa bebe duas xícaras de café por dia, serão necessários 18 pés de café por ano, para se produzir a bebida para esta pessoa. Além disso, demora em torno de 4 a 5 anos para que um pé de café produza sua capacidade máxima.

## 1.2 HISTÓRICO

Para melhor situar as razões do presente estudo, vamos discorrer um pouco sobre esse nobre produto chamado “café” conforme CAMARGO (1953), PASCOAL (1999), CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ (2003), SINDICAFÉ (2004):

- ✓ a planta *Coffea arabica* é originária da Etiópia, porém foi a Arábia a responsável pela cultura do café;
- ✓ os manuscritos mais antigos mencionam que a cultura do café data de 575 d.C., no Yemen;
- ✓ a partir do século XV é que o café iniciou a conquista do mundo, através das invasões dos etíopes à Arábia;
- ✓ a Europa conheceu a bebida por volta de 1615, através dos venezianos;
- ✓ o café, então, tornou-se uma “*commodity*”, guardada a sete chaves pelos árabes;
- ✓ até o século XVII, somente os árabes produziam o café, mas foram os holandeses que conseguiram as primeiras mudas, levando-as para a Europa, e as cultivaram em estufas no Jardim Botânico de Amsterdã;
- ✓ a partir daí houve a disseminação do cultivo de café em vários países;
- ✓ o primeiro *coffee shop* do mundo foi aberto em Constantinopla, em 1554;
- ✓ o café tornou-se muito popular na Arábia – como o Alcorão proíbe bebidas alcoólicas, o café passou a ser usado nas reuniões religiosas, apesar de, em 1511, o Xequie Bey, prefeito de Meca, proibir o seu consumo aos seguidores do Corão, fato este que perdurou por mais de 100 anos;

- ✓ em 1624, no Cairo, iniciou-se o uso de açúcar para adoçar o café;
- ✓ em 1645, abriu-se o primeiro café público europeu;
- ✓ em 1672, abriu-se o primeiro café público na França, por intermédio de um armênio, de nome Pascal;
- ✓ em 1683, iniciou-se um grande mercado de grãos de café em *Wall Street*, a *Exchange Coffee House*;
- ✓ as lavouras que deram origem às brasileiras foram trazidas da Ilha de Java em 1714, pelos holandeses, para o atual Suriname;
- ✓ o café demorou um pouco a chegar ao Brasil, em razão de um velho costume, trazido desde a época dos turcos: não se vender café em coco, para não ser plantado;
- ✓ só em 1729, o sargento-mor Francisco de Mello Palheta, a pretexto de resolver, oficialmente, questões de fronteira com a Guiana Francesa, trouxe em sua bagagem algumas sementes da preciosa planta;
- ✓ em 1732, Johann Sebastian Bach compõe a *Cantata do Café*, indicando a importância do café nas reuniões e nas cafeterias;
- ✓ em 1843, o café tornou-se uma “*commodity*” importante para os brasileiros, chegando a Campinas e tornando-a a capital da cafeicultura paulista;
- ✓ em 1860, o Brasil tornou-se uma grande potência exportadora de café, com 26 milhões de pés plantados;
- ✓ em 1867, foi inaugurada a Estrada de Ferro Santos – Jundiaí, que unia o principal porto de exportação à região produtora de café;
- ✓ nessa época iniciou-se um dos principais ciclos econômicos da história do Brasil, o *Ciclo do Café*;
- ✓ em 1906, Santos Dummond realizou seu primeiro vôo, com o 14 Bis e reforçou sua imagem de maior cafeicultor do mundo, divulgando sua marca *Santos* por toda a Europa;

- ✓ em 1929, com a quebra da Bolsa em Nova York, houve uma desestabilização do mercado: os preços “despencaram”;
- ✓ o ano de 1944 representou o fim do domínio absoluto brasileiro no mercado mundial, com a entrada de muitos países produzindo café;
- ✓ em 1996, o consumo mundial superou a barreira dos 100 milhões de sacas;
- ✓ em 1997, o Brasil atingiu o recorde de quase 3 bilhões de dólares na exportação de café (com quase 14,5 milhões de sacas), tendo a Alemanha superado os Estados Unidos, como maior importador;
- ✓ em 2002, o Brasil atingiu o recorde de quase 28 milhões de sacas, em volume de exportação.

A tabela 1 indica a evolução das exportações brasileiras a partir 1961.

Tabela 01 – Sacas de 60 kg de café cru, solúvel e torrado, exportado.

(Fonte: ABIC – Associação Brasileira da Indústria de Café, 2004).

<b>ano</b>	<b>Total (sacas de 60kg)</b>	<b>ano</b>	<b>Total (sacas de 60kg)</b>
1961	16.917.000	1982	17.063.095
1962	16.377.000	1983	17.820.334
1963	19.514.000	1984	19.997.421
1964	14.948.000	1985	19.253.241
1965	13.497.000	1986	9.914.430
1966	17.031.000	1987	18.465.887
1967	17.331.000	1988	17.081.983
1968	19.035.000	1989	18.288.616
1969	19.613.000	1990	17.004.200
1970	17.085.000	1991	21.133.000
1971	18.399.000	1992	18.807.300
1972	19.215.000	1993	17.848.407
1973	19.817.000	1994	17.271.798
1974	13.279.000	1995	14.553.847
1975	14.604.000	1996	15.446.892
1976	15.611.151	1997	16.771.856
1977	10.082.907	1998	18.225.355
1978	12.550.973	1999	23.021.544
1979	12.010.287	2000	18.213.947
1980	15.209.488	2001	23.464.206
1981	15.911.704	2002	27.997.049
		2003	25.705.785

### 1.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A importância do café na economia mundial é indiscutível. Levantamentos obtidos (SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CAFÉ DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2004) indicam o montante de 50 bilhões de dólares ao ano, no faturamento da cadeia agroindustrial do café, incluindo cultivo, primeiro processamento, transporte, segundo processamento (torrefação, moagem e solubilização) e distribuição.

Conforme dados da Organização Internacional do Café, existem cerca de 72 países produtores de grãos no mundo. Essa multiplicidade de produtores deve-se à extensa faixa apta à produção da cultura do café, que vai do Trópico de Câncer ao de Capricórnio, ultrapassando ligeiramente os paralelos 24º, em ambos os hemisférios.

Essa variação das condições climáticas propicia a produção de *blends* de características peculiares, graças a estilos diferenciados de tratamentos culturais.

Os principais países produtores concentram-se na América do Sul (Brasil e Colômbia), América Central e Ásia (Vietnã), que são responsáveis por cerca de 80% da produção mundial.

Por mais de um século, o café foi a grande riqueza brasileira, sendo considerado a “primeira atividade mercantil não colonial”.

As divisas geradas pela economia cafeeira aceleraram o desenvolvimento brasileiro, através da diversificação da estrutura social, acompanhada do surgimento da vida urbana, bem como das transições nas relações de trabalho e implantação de leis. Resulta daí a inserção do Brasil nas relações internacionais de comércio.

Foi com a mão-de-obra livre, oriunda principalmente da imigração europeia, que a atividade tomou fôlego, apesar de inicialmente estar calcada no uso de mão-de-obra cativa, que se estendeu até 1888, ano da assinatura da Lei Áurea.

Essa mudança coincide com a *transição capitalista*, que definiu a nova divisão do trabalho, base das relações imperialistas, com a conseqüente expansão do movimento internacional de capitais, que, ao entrarem em nosso país, impulsionaram o desenvolvimento cultural.

Os recursos para essa expansão, em geral, foram oriundos de empréstimos realizados junto a bancos estrangeiros, para financiar a produção e sua infra-estrutura (estradas, portos, pontos de beneficiamento, etc.).

Grandes cidades, em todo o interior do Estado de São Paulo, norte do Paraná e sul de Minas surgiram, com o advento da cultura do café. Grandes indústrias de torrefação se instalaram no país e principalmente grandes empresas exportadoras (tanto de capital nacional, como multinacionais), cujos faturamentos representam uma das maiores divisas de nossa balança comercial.

Dados do Ministério da Agricultura indicam que a safra 2002/2003 ultrapassou a quantia de 40 milhões de sacas, produzidas no Brasil.

A figura 01 mostra grãos de café no galho em época de colheita.



Fig. 01 – Grãos de café no galho, em época de colheita.  
(fonte: COFFEE RESEARCH INSTITUTE 2001)

Da mesma forma que a cafeicultura trouxe o desenvolvimento das estradas de ferro, e, de diversas rodovias para escoar a produção de milhares de sacas de café todo mês, pelos portos nacionais (Rio de Janeiro, no início, depois Santos, Paranaguá e Vitória), trouxe, também, o desenvolvimento da indústria de máquinas para beneficiamento e rebeneficiamento, das selecionadoras cromáticas dos grãos e dos sistemas de transportes (para café ensacado e para café granelizado). Por decorrência, a engenharia civil também, sempre participou desta evolução, dando suporte e soluções técnicas para o aprimoramento desta cadeia sistêmica.

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 mais seguro, em caminhões tipo *containers*;
- ✓ custo mais barato do *container*, para embarcar nos navios para exportação;
- ✓ eliminação da mão-de-obra de manuseio;
- ✓ segurança maior contra incêndio;
- ✓ maior rapidez na carga e descarga;
- ✓ eliminação de gastos com valores não agregados ao produto.

A indústria eletro-mecânica já está em franco desenvolvimento nos processos de carga e descarga do produto, tanto para transporte dos grãos, como para enchimento dos *containers*, com velocidades cada vez maiores.

O caso é, então, fazer com que a construção civil no Brasil acompanhe esta evolução, apresentando idéias e soluções construtivas adequadas, de custos compatíveis e que tenham abrangência importante no mercado e na atividade do café.

## **1.4 OBJETIVOS**

O objetivo, deste trabalho, dentro do exposto acima, é estabelecer uma alternativa de armazenagem para café em relação aos métodos já existentes e tradicionais (armazenagem de café em sacos de 60 Kg, ou mesmo em sacos tipo *big-bags*, com capacidade individual de 900 kg ou 1200 kg), através de um sistema técnico-construtivo que contemple a sua armazenagem a granel, a movimentação e o transporte deste produto café, definindo assim um modelo para a execução de silos verticais e elevados, subdivididos em diversas células (silos multicelulares), com fundos comumente chamados *tremonhas*, em lajes do tipo *tronco-piramidal*, de forma a armazenar volumes desejados deste café *a granel*.

## **1.5 METODOLOGIA DO PROJETO**

O desenvolvimento desta pesquisa se pauta, portanto, em estudar as propriedades físicas do grão, as condições ideais de armazenagem, o projeto arquitetônico adequado para os silos, a definição das ações envolvendo as condições de pressões (células cheias, vazias e na descarga do produto), as capacidades (volumes) das células de armazenagem, de forma a atender aos requisitos de qualidade de conservação do café e aos requisitos impostos pela mecanização e transilagem do grão.

## 2. PROPRIEDADES DO PRODUTO CAFÉ

### 2.1 INFORMAÇÕES GERAIS

Esta pesquisa considera apenas o grão de café após receber o seu primeiro beneficiamento, ou seja, de maneira sintética:

- ✓ o grão de café, após a colheita, passa pelo processo de lavagem e separação dos grãos através do procedimento comumente identificado como *via úmida*, onde é lavado e separado (bóia, verde, cereja) e pode ou não sofrer o processo de “descascar a cereja” e de “desmucilar”;
- ✓ após isso, inicia-se o procedimento de *via seca*, onde este grão vai para um terreirão (área destinada a espalhar o café) para a secagem natural “a céu aberto”, quando então seguirá para secagem em máquinas secadoras específicas para café, e daí segue para tulhas de armazenagem para “café em coco” (nome já consagrado para este estado físico do grão);
- ✓ após a secagem, o café é transferido através de elevadores para a “tulha de descanso” e posteriormente para a máquina beneficiadora (retirada de cascas e separação de impurezas) onde recebe o primeiro beneficiamento.

Esse primeiro beneficiamento tem a finalidade de separar os grãos de café da casca e polpa seca (no caso de café natural) ou retirar o pergaminho (no caso de café despulpado). A partir da retirada da casca ou do pergaminho, inicia-se um processo detalhado de seleção dos grãos por tamanho e densidade, chamado de 2º beneficiamento.

Essa etapa é importante para se obter um bom produto, pois, também elimina grãos defeituosos, e prepara o chamado “café verde” para ser enviado ao torrefador.

Esse café, beneficiado através desses processos, é o produto tratado neste trabalho.

A figura 02 mostra grãos de café já beneficiados.

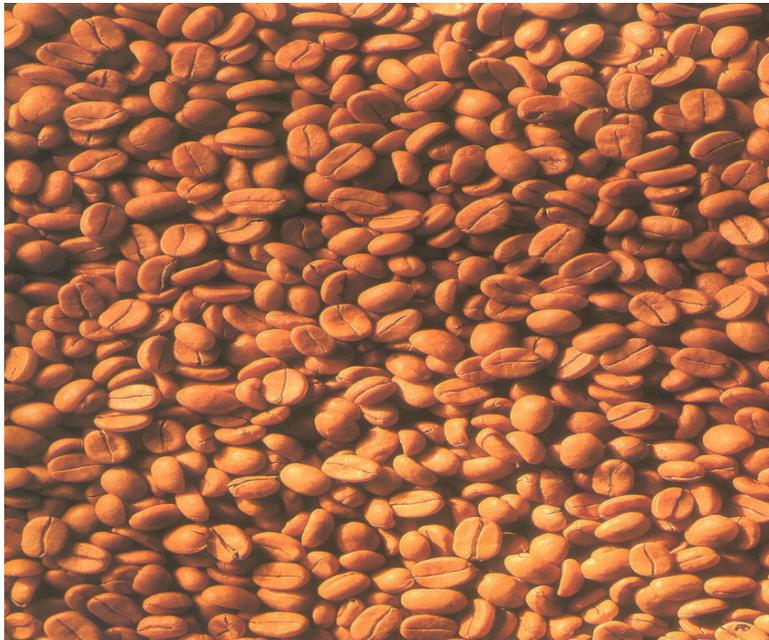


Fig. 02 – Grãos de café já beneficiados (fonte: PASCOAL, 1999).

O fluxograma das várias etapas do processamento das atividades pós-colheita do café está representado na figura 03.

## Fluxograma de Processamento de Café

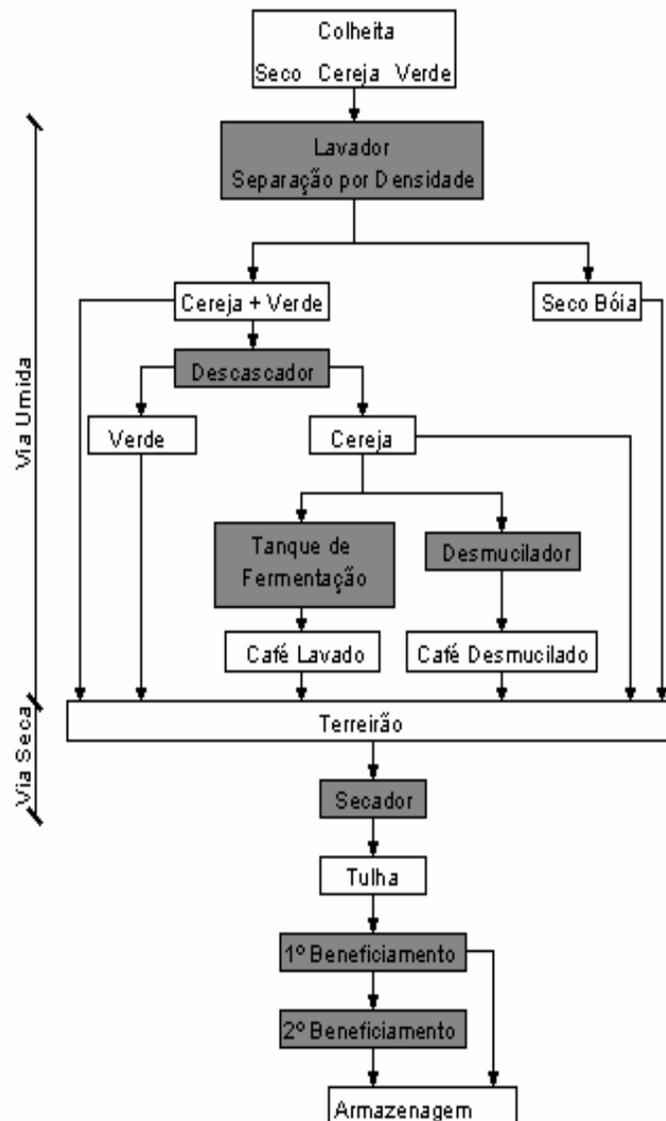


Fig. 03 – Fluxograma dos processos.

Qualquer grão é um ser vivo, portanto respira, elimina gás carbônico, água e calor. E têm, logicamente, a capacidade de enfrentar as doenças, os ataques dos insetos e dos microorganismos.

Segundo MARSANS (apud WEBER, 1995), os grãos possuem 3 características importantes:

- ✓ baixa condutibilidade térmica;
- ✓ capacidade de absorção e dissorção de água;
- ✓ natureza porosa .

Os grãos são produtos biológicos susceptíveis à deterioração, portanto, para uma boa armazenagem, suas características devem ser observadas, analisadas e preservadas.

Armazenar é, portanto, uma atividade que deve ser exercida no sentido de se preservar a massa de grãos viva, sadia e protegida dos ataques naturais (insetos, fungos, etc.), de forma a se evitar perdas quantitativas e qualitativas.

Para se projetar uma unidade armazenadora é necessário o conhecimento das características físicas, características biológicas e características químicas do café (CORDEIRO et al, 1987).

As principais características físicas a serem pesquisadas são:

- ✓ peso específico;
- ✓ ângulo de atrito interno, ou a tangente desse ângulo (coeficiente de atrito interno);
- ✓ ângulo de atrito entre o produto ensilado e as paredes da célula;
- ✓ ângulo de repouso;
- ✓ tamanho do grão;
- ✓ forma do grão;
- ✓ porosidade;
- ✓ cor;
- ✓ condutividade térmica;
- ✓ umidade de equilíbrio.

As principais características biológicas referem-se a:

- ✓ anatomia;
- ✓ respiração;
- ✓ microorganismos dos grãos.

As principais características químicas são decorrentes das propriedades dos grãos que, por serem materiais orgânicos compostos de água, carboidratos, proteínas, enzimas, gorduras, sais minerais e vitamínicos, em sua armazenagem, devem ser preservadas, mantendo-se o equilíbrio entre os compostos constituintes e o meio físico e biológico onde estão.

De acordo com o anexo I da Instrução Normativa Nº 048 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2002):

- ✓ entende-se por café beneficiado o endosperma do fruto de diversas espécies do gênero *Coffea*;
- ✓ o café beneficiado é classificado em categoria, subcategoria, grupo, subgrupo, classe e tipo, segundo a espécie, a granulometria, o aroma e o sabor, bebida, cor e qualidade;
- ✓ independente de sua classificação, os teores de umidade do café beneficiado não poderão exceder os limites máximos de tolerância de 12,5%;
- ✓ o percentual máximo de matérias estranhas e impurezas será de 1%.

## **2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS MAIS IMPORTANTES**

### Ângulo de Repouso

É o ângulo máximo do talude formado pela massa dos grãos, em relação à horizontal. Este ângulo é formado devido ao atrito dos grãos com a superfície e ao atrito entre os grãos.

A figura 04 explica melhor essa definição.

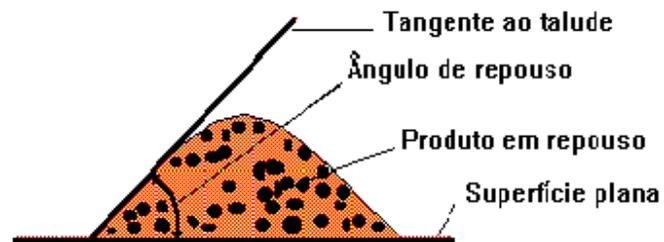


Fig. 04 – Representação esquemática do ângulo de repouso.

(fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2003)

Seu valor é necessário no cálculo e dimensionamento:

- ✓ da capacidade estática dos silos (células);
- ✓ da moega de despejo (ou tremonha).

#### Massa Específica Granular

É a razão entre a massa e o volume de uma quantidade do produto. A massa específica do café beneficiado é maior que a do café em coco.

Quando o volume é de 100 litros, a densidade é também chamada de *peso hectolítrico* (PH). A massa específica é usada no dimensionamento dos silos.

#### Massa Específica Aparente

É a razão entre a massa total (sem moagem) e o seu volume, excluindo os espaços intergranulares.

## Porosidade

É a porcentagem do volume total de uma massa de grãos que é ocupada pelo ar (espaço intergranular).

Os grãos armazenados em silos ou em sacos apresentam-se como uma massa porosa, constituída pelos grãos e pelo *espaço intersticial*, também chamado intergranular. A porosidade exerce grande influência no valor da queda de pressão (resistência oferecida à passagem de um fluxo de ar, que atravessa a massa dos grãos).

## Forma e Tamanho dos Grãos

De acordo com CALIL (apud FORTES F<sup>o</sup>, 1985), como o grão de café tem diâmetro maior de 0,42 cm, ele é classificado como produto granular.

As formas com que os grãos de café beneficiados se apresentam são basicamente: circular e esférica.

Esses parâmetros, juntamente com as dimensões dos grãos, são usados para classificar o tamanho e a forma dos grãos, através de peneiras, conforme o tamanho das aberturas. Peneiras com furos redondos classificam os cafés *chatos* e as de furos alongados, os cafés *mocas*.

A figura 05 mostra os diversos tipos de classificação do café.



Fig. 05 – Classificação (defeitos) do café (fonte: PASCOAL, 1999).

De acordo com PUZZI (2000), os valores para ângulo de repouso e massa específica, para os cafés beneficiados são:

- ✓ ângulo de repouso entre 27° a 30°,
- ✓ massa específica entre 600 a 680 kg / m<sup>3</sup>.

## Ângulos de Atrito

Para o cálculo dos silos é importante a obtenção dos valores dos ângulos de atrito interno (entre grãos), os ângulos de atrito entre grãos e paredes das células e entre grãos e concreto desempenado liso das tremonha. Esses valores são obtidos através de ensaios realizados em laboratório.

## Umidade

É uma propriedade do grão de café, que influencia na qualidade de conservação do grão, dentro das células do silo. O café muito úmido sofre ataque de insetos, fungos e bactérias.

Para se conhecer com segurança a condição dos grãos de café, é necessário saber o seu teor de umidade. Existem vários métodos e equipamentos que determinam a umidade de forma eletro-eletrônica.

O recomendado, através da literatura (PUZZI, 2000) é que o valor da umidade do café para armazenamento até 1 ano deva ser de 11% , e até 5 anos de 10%.

De acordo com o anexo I da Instrução Normativa Nº 048 (MINSTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DO BRASIL, 2002), independente da classificação do grão de café, os teores de umidade não podem ultrapassar 12,5%.

Para se obter um armazenamento eficiente, deve-se ter em vista que o principal fator está na garantia do baixo teor de umidade.

### **2.3 PROPRIEDADES BIOLÓGICAS MAIS IMPORTANTES**

Quanto à *anatomia*, o grão é classificado em 3 partes: tegumento, embrião e endosperma.

Quanto à *respiração*, o importante é salientar que, como o grão é um ser vivo, mesmo após a colheita, ele respira. Os principais fatores que influenciam a respiração são:

- ✓ *umidade* (quanto maior, maior a intensidade da respiração, maior liberação de calor e maior a possibilidade de deterioração). O termo “quebra técnica” é usado quando ocorre perda de massa por respiração. Considera-se perda de 0,01% por dia de armazenagem, como o máximo admissível;
- ✓ *temperatura*: a respiração é acelerada pelo aumento da temperatura, até um limite em torno de 40º a 60º C, acima da qual há intervenção de enzimas, exaustão dos substratos, limitação dos suprimentos de oxigênio e acúmulo de gás carbônico, fatores esses que diminuem a respiração dos grãos.

Quanto aos *microorganismos* e *insetos* presentes nos grãos, estes também respiram, de modo que, parte do gás carbônico produzido no processo respiratório é devido aos microorganismos, o mesmo valendo para os insetos.

A classificação do café por *cor* (que indica o grau de envelhecimento do café: verde, esverdeado, claro, amarelado, amarelo e velho) é decorrente, principalmente, da variação do teor de umidade, do tempo de exposição aos raios solares, do método de preparo e das condições de armazenagem a que foi submetido o produto (PUZZI, 2000).

## **2.4 PROPRIEDADES QUÍMICAS MAIS IMPORTANTES**

No café, uma das principais características é o *sabor da bebida*, fator primordial na classificação do café.

A influência das condições ecológicas das zonas de produção, dos cuidados da colheita e da preparação pós-colheita são fatores preponderantes nas propriedades químicas do grão, que qualificam o café pelo sabor.

A classificação por bebida é feita através de *prova de degustação*.

## **2.5 CONDIÇÕES MÍNIMAS PARA ARMAZENAGEM DE CAFÉ BENEFICIADO**

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

Desta forma, como já foi dito no item 2.1, “armazenar” 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%.

O grão de café deverá ser armazenado em ambiente escuro, pois ele perde cor, quando exposto à luz. A edificação de um sistema de armazenagem deverá garantir da melhor forma possível, as condições ideais expostas acima.



### **3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS EXISTENTES**

#### **3.1 ARMAZÉNS CONVENCIONAIS**

Historicamente, desde o início das atividades de comercialização de café, até os dias de hoje, a prática dominante de armazenagem é através de sacos de juta dispostos em blocos, empilhados uns sobre os outros, até uma altura correspondente entre 25 a 30 sacos.

Este sistema apresenta vários inconvenientes, como observado em PUZZI (2000):

- ✓ os grãos estocados em sacos ficam sujeitos às variações ambientais e, em regiões úmidas, a qualidade do produto é acentuadamente prejudicada pela ação dos fungos;
- ✓ os grãos, sendo de material higroscópico, absorvem umidade e favorecem a proliferação desses microorganismos;
- ✓ nessas condições, os grãos não podem ser armazenados por muito tempo;
- ✓ a movimentação interna para empilhamento e transporte é altamente dispendiosa, pois requer muita mão-de-obra;
- ✓ necessita muito espaço para armazenagem por unidade de peso dos grãos.

Porém, esse sistema oferece algumas vantagens:

- ✓ fácil manuseio de pequenas quantidades de sacos e de tipos de produtos;

- ✓ formações de pequenos lotes;
- ✓ em armazéns de cooperativas e em armazéns gerais, a possibilidade de formação separada de blocos ou lotes de cada depositante.

Em geral, as construções existentes para armazenagem de café em sacos apresentam as seguintes características:

- ✓ paredes de alvenaria (blocos de concreto e tijolos comuns), revestidas ou não;
- ✓ estrutura metálica em tesouras com 2 águas ou em arco, para vencer o vão livre do armazém e receber as telhas de cobertura, que geralmente são de aço galvanizado e, em alguns casos, de alumínio;
- ✓ o piso em concreto armado, com espessura média de 10cm, cimentado de forma a apresentar uma superfície bem lisa e desempenada. Estes pisos normalmente são, também, dimensionados para o uso de empilhadeiras;
- ✓ a altura do pé direito depende do volume projetado para armazenagem, considerando que deve-se deixar acima da pilha de café uma distância adequada para arejamento e manuseio.

Segundo tabela 2 de BRANDÃO (apud PUZZI, 2000), permite-se o cálculo da capacidade de uma armazenagem, multiplicando-se a área bruta por um coeficiente  $k$  (número de sacos por metro quadrado).

Tabela 02 – Cálculo da Capacidade de Armazenagem.  
(Fonte: PUZZI, 2000).

<b>produto</b>	<b>altura da pilha (m)</b>	<b>nº sacos por m<sup>2</sup> (k)</b>
Café beneficiado (10 sacos / m <sup>3</sup> )	4,00	32
	4,50	36
	5,00	40
	5,50	44
	6,00	48

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.

Abaixo, na figura 06, pode-se observar um empilhamento típico de sacarias de café. Da mesma forma, as figuras 07 e 08 mostram outras maneiras de emblocamento de cafés em sacos.

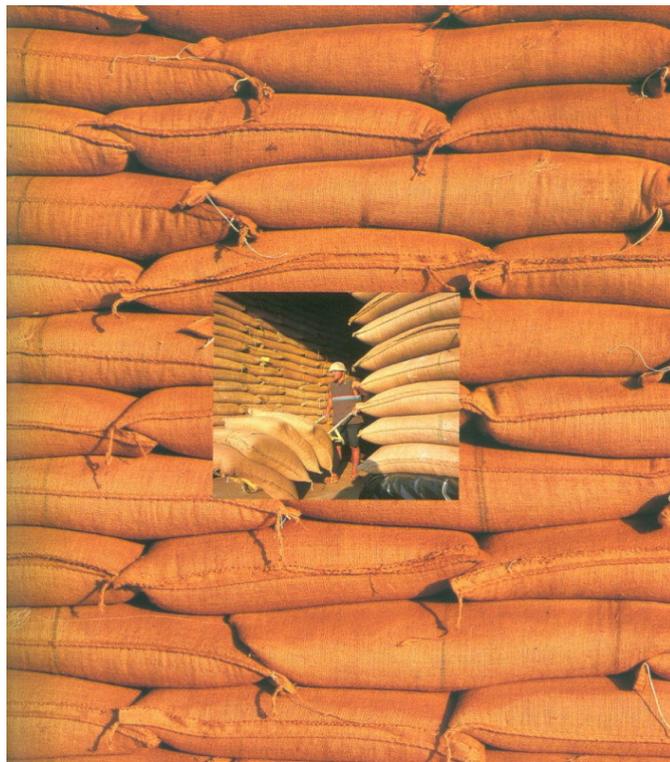


Fig. 06 – Sacos de cafés empilhados de maneira convencional.  
(fonte: PASCOAL, 1999).



Fig. 07 – Emblocamento de cafés em sacos: armazenagem em big-bags (à esquerda); armazenagem em sacos (à direita)



Fig. 08 – Sacos de café armazenados por empilhadeiras (pallets).

### 3.2 ARMAZENAGEM EM SACOS TIPO *BIG-BAGS*

Popularmente chamados de *big-bags*, esses sacos de armazenagem são contentores flexíveis, confeccionados em rafia de polipropileno 100% virgem, com tratamento contra raios UV, antiestáticos, anti-fibrilantes, destinados ao acondicionamento de produtos em pó, granulados, pastosas, etc.

São transportados de forma fracionada por qualquer tipo de modal, sendo dotados de dispositivos e acessórios que facilitam seu enchimento, movimentação e armazenagem.

Esses contentores estão sendo bastante usados para transporte e estocagem de café. Os modelos mais utilizados são:

- ✓ *big-bags* para 20 sacos, medindo 0,90 x 0,90 x 1,90m. com válvula superior de carga e válvula inferior de descarga;
- ✓ *big-bags* para 15 sacos, medindo 1,00 x 1,00 x 1,15m. com travamento interno, ideal para transporte de café em *container* de 20" , com válvula superior de carga e válvula inferior de descarga;
- ✓ *big-bags* para café em coco com 500 kg., medindo 0,90 x 0,90 x 1,00 m., com saia superior de carga e válvula inferior de descarga;
- ✓ *bulk liner container*, para transporte de café a granel em *container* de 20" , com dimensões de 2,40 x 2,40 x 6,00 m., cintas de travamento frontal e com válvula de carga.

As figuras 09, 10 e 11, ilustram o uso de *big-bags* para armazenagem de café e o sistema mais comum de transporte (empilhadeiras).

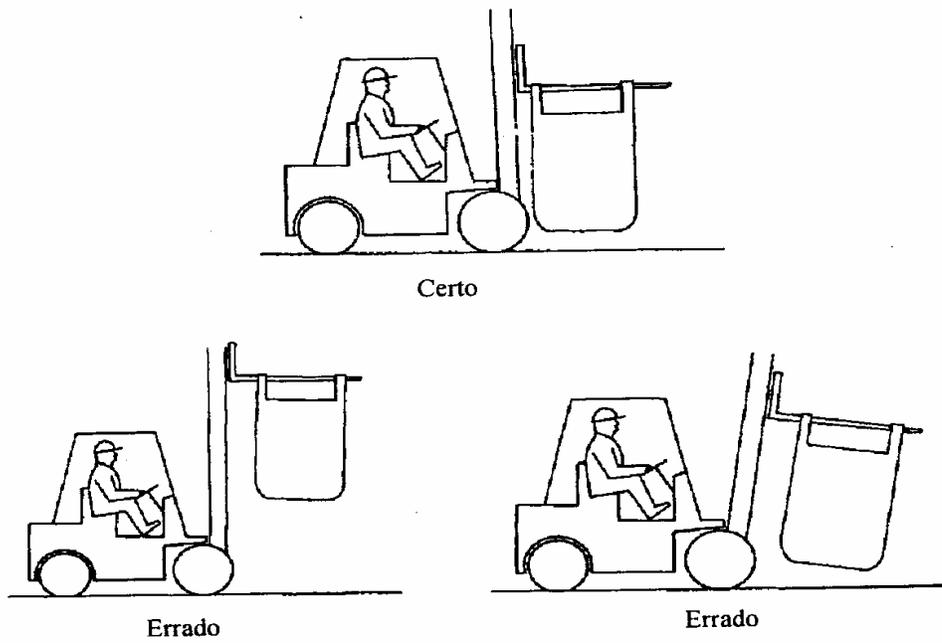


Fig. 09 – Sistema de transporte interno de *big-bags* através de empilhadeiras.  
 (fonte: QUALISACK EMBALAGENS ESPECIAIS, s/d).



Fig. 10 – Sistema de armazenagem em *big-bags*.



Fig. 11 – Armazenagem em *big-bags*

Os armazéns destinados à armazenagem de café através de *big-bags* seguem as mesmas características dos armazéns convencionais (paredes de alvenaria, estrutura metálica de cobertura, telhas de aço galvanizado, piso em concreto desempenado, etc.). Porém, a largura dos corredores existentes entre os empilhamentos dos sacos big-bags tem que ser bem maior que a do sistema convencional (para os sacos de juta), de forma a permitir as manobras de empilhadeiras que transportam esses *big-bags*.

### **3.3 ARMAZENAGEM A GRANEL PARA CAFÉ EM COCO**

No meio rural, em fazendas produtoras de café encontramos um sistema de armazenagem para o café em coco após secagem, através de tulhas construídas, em geral, de paredes de madeira (chapas de compensado ou tábuas), travadas por cantoneiras metálicas. Essas tulhas são construídas dentro de galpões ou pequenos armazéns, de paredes de alvenaria e cobertura de telhas cerâmicas ou de aço galvanizado (mais recentemente).

O piso dessas tulhas, em geral, é de assoalho de madeira sobre piso em concreto, de forma a manter uma passagem de ar internamente e não sofrer umidade do solo.

A saída do café em coco é feita através de poços de alvenaria escavados no solo, em geral com 2,50m de profundidade, permitindo a passagem dos equipamentos de transporte (esteira transportadora).

## **4. SISTEMA CONSTRUTIVO PROPOSTO**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Diante do exposto anteriormente, estamos convencidos das vantagens de se projetar *silos elevados graneleiros*, para armazenagem de café beneficiado a granel em grandes volumes, sendo esta opção adequada principalmente para empresas de armazéns gerais ou exportadoras de café, ou ainda para cooperativas.

As maiores vantagens são:

- ✓ menor custo de mão-de-obra;
- ✓ maior velocidade de recebimento e expedição;
- ✓ maior qualidade na conservação do produto;
- ✓ capacidade de armazenagem por metro quadrado bem maior que no sistema convencional.

Para tanto, é necessário se definir um modelo construtivo com materiais que possam ser utilizados e encontrados nas diversas regiões produtoras e zonas de escoamento do país e um sistema construtivo cujo processo de execução não precise utilizar mão-de-obra muito especializada, de forma a tornar este projeto cada vez mais abrangente.

Sabe-se que além dos Estados tradicionais na produção de café, como São Paulo e Minas Gerais, temos hoje um quadro de produção de café envolvendo outros Estados como Espírito Santo, Paraná, Bahia, Rondônia, Mato Grosso e Pará.

A implantação de um sistema de armazenagem de café, a granel, em silos, está intimamente ligada, também, às atividades que envolvem o *transporte* dessas cargas aos centros consumidores do café beneficiado. São os chamados corredores de transporte.

Como os centros produtivos estão migrando para novas regiões, cada vez mais afastadas, justifica-se a nossa intenção de escolhermos um sistema construtivo de concepção simples, em contrapartida a outros modelos que também seriam viáveis (como em concreto armado ou em estrutura pré-moldada), porém, de execução mais sofisticada e/ ou de custos maiores.

## **4.2 SISTEMA PROPOSTO**

Um sistema misto, no qual o concreto armado e a alvenaria estrutural são utilizados conjuntamente, foi a solução proposta para a unidade armazenadora concebida no presente trabalho e que é composta de silos multicelulares elevados com a finalidade de armazenar café beneficiado a granel.

Nesse estudo, para desenvolvimento do projeto civil, foram considerados os sistemas mecânicos para transporte do café, para enchimento das células, para a transilagem do produto, para pesagem deste café, tanto na entrada como na saída, e, também, para carregamento do café a granel em caminhões *containers* (figura 12). Dentro desse contexto, o estudo do fluxo de grãos, o funcionamento do sistema e a capacidade estática e dinâmica das células são itens importantes a serem considerados na concepção do projeto. Houve também a preocupação em encontrar uma solução que racionalizasse a execução construtiva, diminuísse os sistemas mecânicos de elevação dos grãos (elevadores) e facilitasse a carga e a descarga.



Fig. 12 – Caminhão container utilizado para transporte de café beneficiado a granel.

Basicamente, o café chega nas unidades armazenadoras em sacos de 60 kg. Para ser guardado ou armazenado a granel, normalmente ele é despejado em moegas de recebimento ao nível do solo, de onde, através de um sistema de transporte horizontal (correias transportadoras) e transporte vertical (elevadores de canecas) são transferidos aos silos elevados.

As partes que constituem um silo elevado são:

- ✓ fundação
- ✓ pilares de apoio
- ✓ fundo da célula
- ✓ célula ou corpo do silo
- ✓ cobertura
- ✓ torre

#### **4.2.1 Projeto arquitetônico**

Geometricamente, em virtude das facilidades para as operações mecânicas necessárias, a solução proposta é projetar células, geminadas 2 a 2 na largura e com o número necessário dessas células no comprimento, até se conseguir o volume desejado de armazenagem. Como as esteiras eletro-mecânicas que despejam e retiram o café dos silos correm em trilhos, a concepção arquitetônica deverá levar em consideração essas esteiras e, como tal, acompanhar o trajeto delas.

No centro do sistema será reservado um vão para a localização dos elevadores dos grãos, para a balança de fluxo (para controle da pesagem) e para um eventual sistema de retirada do pó que envolve as operações.

Esse sistema simétrico favorece a racionalidade operacional, permitindo excelente continuidade entre os fluxos de recebimento e de expedição.

A definição do projeto arquitetônico em relação às dimensões das células dos silos, dependerá do sistema de trabalho que o usuário queira adotar e quanto deseja armazenar por célula.

A figura 13 mostra a planta esquemática de um sistema de silos graneleiros para café; e as figuras 14 e 15, apresentam os cortes (longitudinal e transversal) das células, respectivamente.

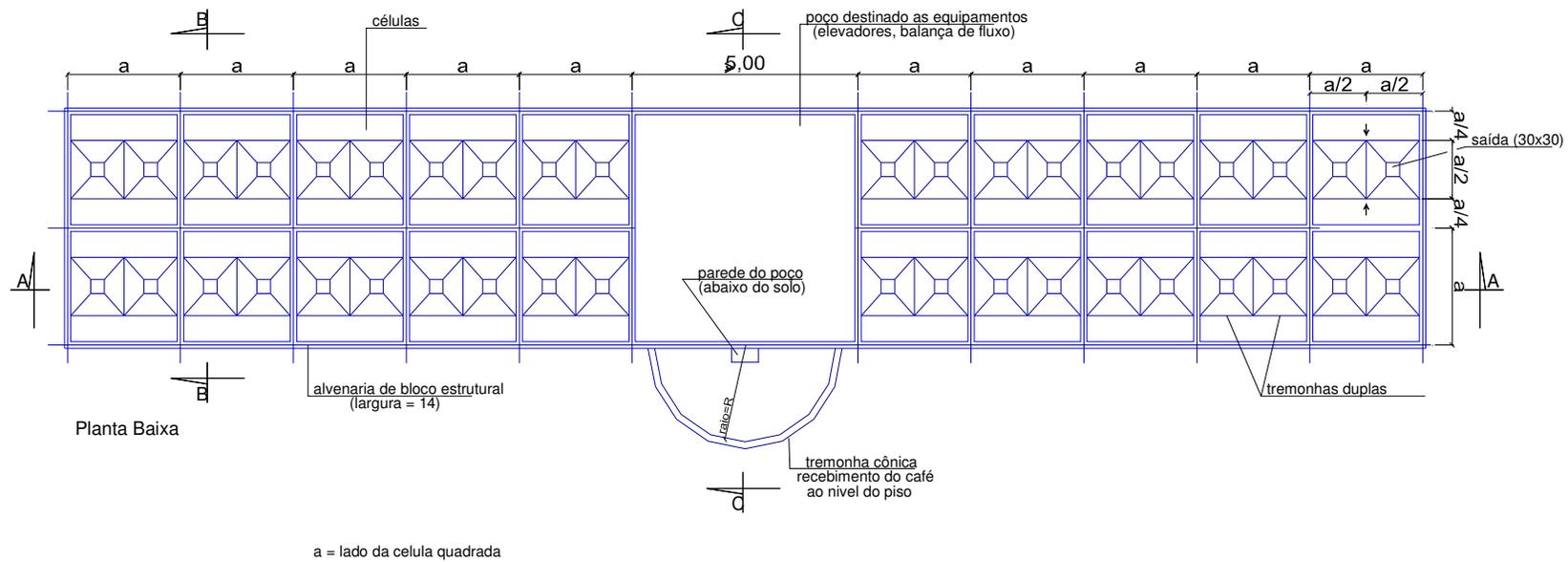


Fig. 13 – Planta esquemática de um sistema de silos graneleiros para café.

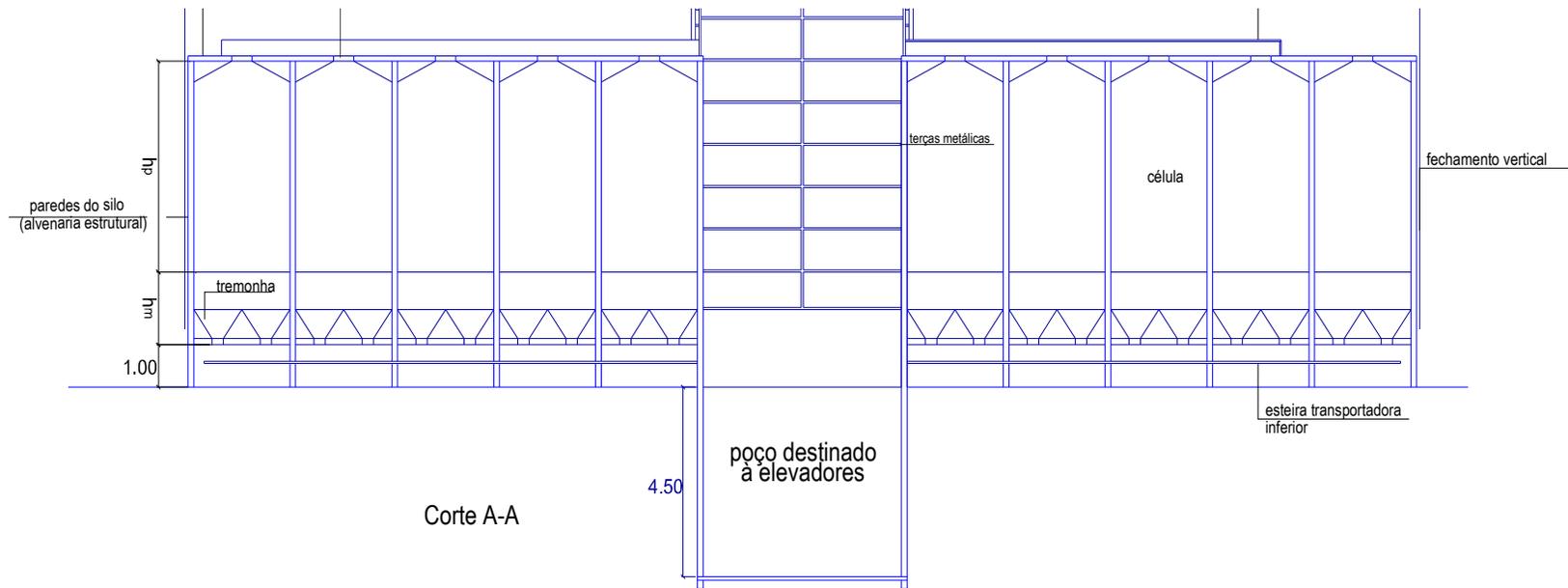


Fig. 14 – Corte longitudinal do sistema de silos graneleiros

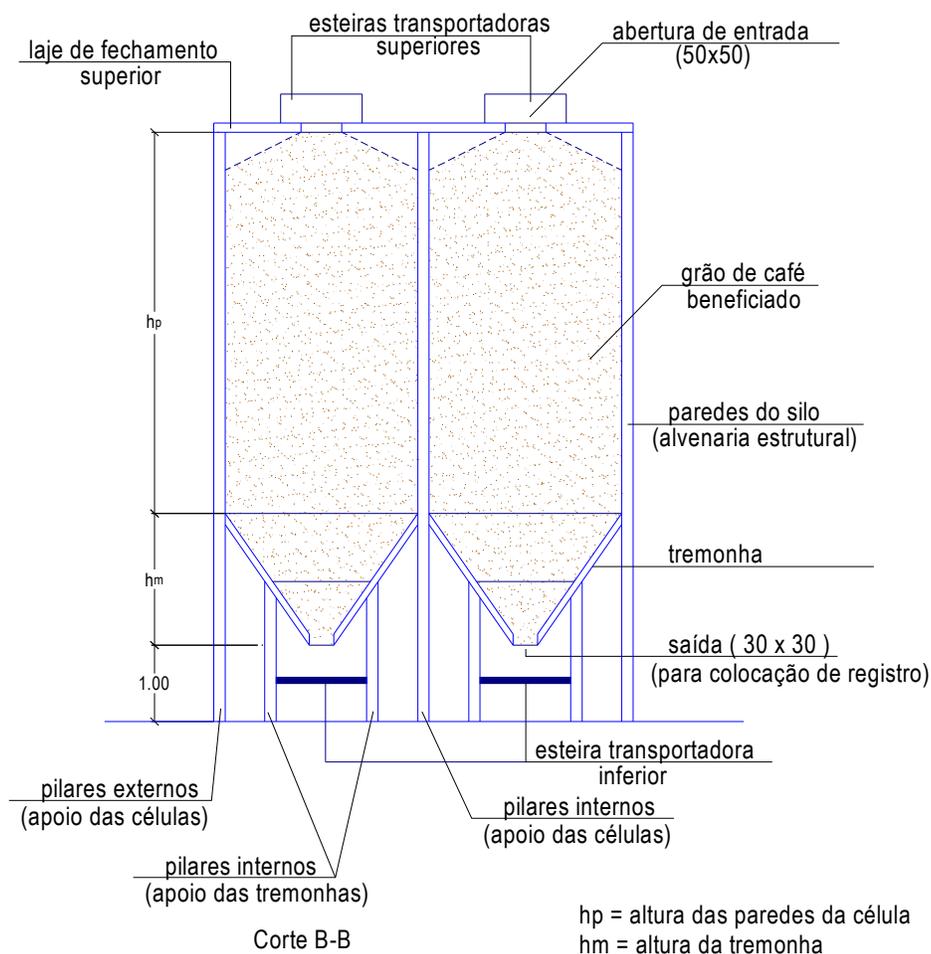


Fig. 15 – Corte transversal do sistema de silos graneleiros

#### 4.2.2 Cobertura dos silos

Para haver conforto térmico mais adequado na massa de grãos e garantir o que foi explicado no capítulo 2 com relação às propriedades físicas do café ensilado, existem vários tipos de cobertura que possibilitam tal condição. As que mais se destacam, pelas suas próprias características de absorvância (quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre essa mesma superfície) e de emissividade (quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura) são: telhas de alumínio, telhas de aço galvanizado, telhas duplas de aço

com espuma de poliuretano entre as faces, telhas de aço galvanizado pré-pintadas em uma face ou em ambas, entre outras.

A definição sobre a escolha das telhas deve levar em consideração o tipo de clima da região a ser implantado o sistema de silos.

Neste trabalho, telhas de aço galvanizado trapezoidais com espessura de 0,50 mm, fixadas em estruturas metálicas (tesouras metálicas de 2 águas), foram utilizadas para a cobertura. O mesmo tipo de telha, com espessura de 0,43 ou de 0,50 mm foi adotado para os fechamentos verticais laterais, a fim de impedir a presença de umidade, devida às águas de chuva, nas paredes do silo.

A tabela 03 e a figura 16 confirmam que as telhas de aço galvanizado são uma boa opção para o caso em questão.

Ainda melhor será a opção por telhas de aço pintadas eletrostaticamente na cor branca em sua face externa, aumentando consideravelmente os coeficientes de conforto térmico (vide também tabela 03 e figura 16): os índices de absorção quanto menores forem e quanto maiores os índices de emissividade, mais se evita a passagem de energia térmica pela superfície.

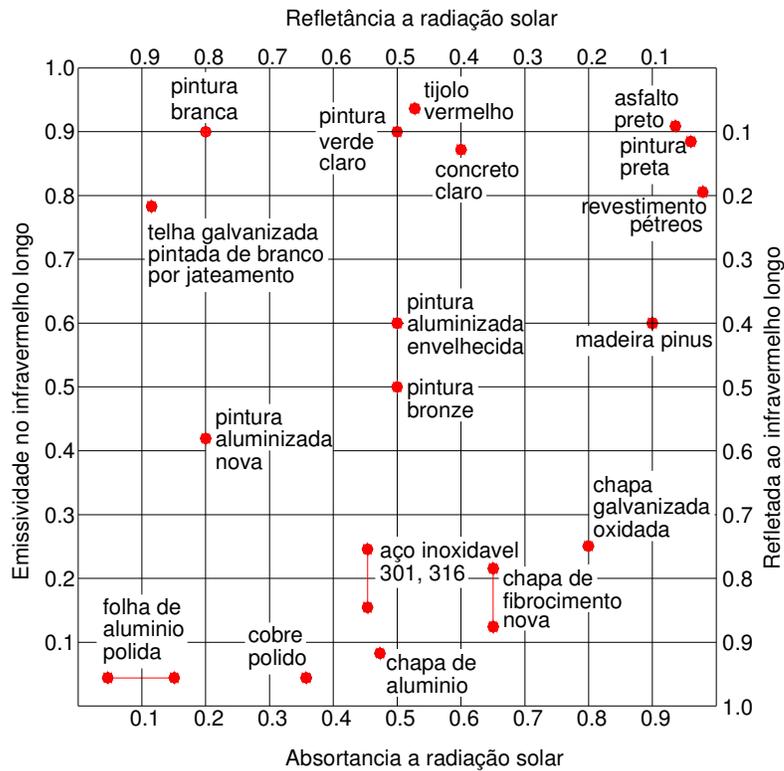


Fig. 16 – Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho de materiais de construção (Fairey, 1986, apud Vittorino et al, 2003).

Tabela 03 – Coeficientes de absorptância e emissividade para vários materiais. (Fonte: Projeto de Norma 02: 135.07-001, 1998).

Tipo de superfície		$\alpha$ absorptância	E emissividade
chapa de alumínio (nova e brilhante)		0,05	0,05
chapa de alumínio (oxidada)		0,15	0,12
<i>chapa de aço galvanizado (nova)</i>		<b>0,25</b>	<b>0,25</b>
caiação nova		0,12 / 0,15	0,90
concreto aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
telha de barro		0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
tijolo aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
reboco claro		0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
revestimento asfáltico		0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
vidro comum de janela		transparente	0,90 / 0,95
<i>pintura</i>	<i>branco</i>	<b>0,20</b>	<b>0,90</b>
	amarelo	0,30	0,90
	verde claro	0,40	0,90
	alumínio	0,40	0,50
	verde escuro	0,70	0,90
	vermelho	0,74	0,90
	preto	0,97	0,90

Além disto, o vão entre as telhas de fechamento vertical e as paredes do silo, facilita a passagem de ar, colaborando com o equilíbrio térmico desejado. A figura 17a mostra o colchão de ar formado entre a telha vertical e a parede e entre a telha de cobertura e a laje de fechamento superior da célula e a figura 17b mostra o fechamento vertical em telhas de aço na extremidade de um sistema de silos.

O dimensionamento dessa estrutura metálica para cobertura dos silos não foi incluído neste trabalho.

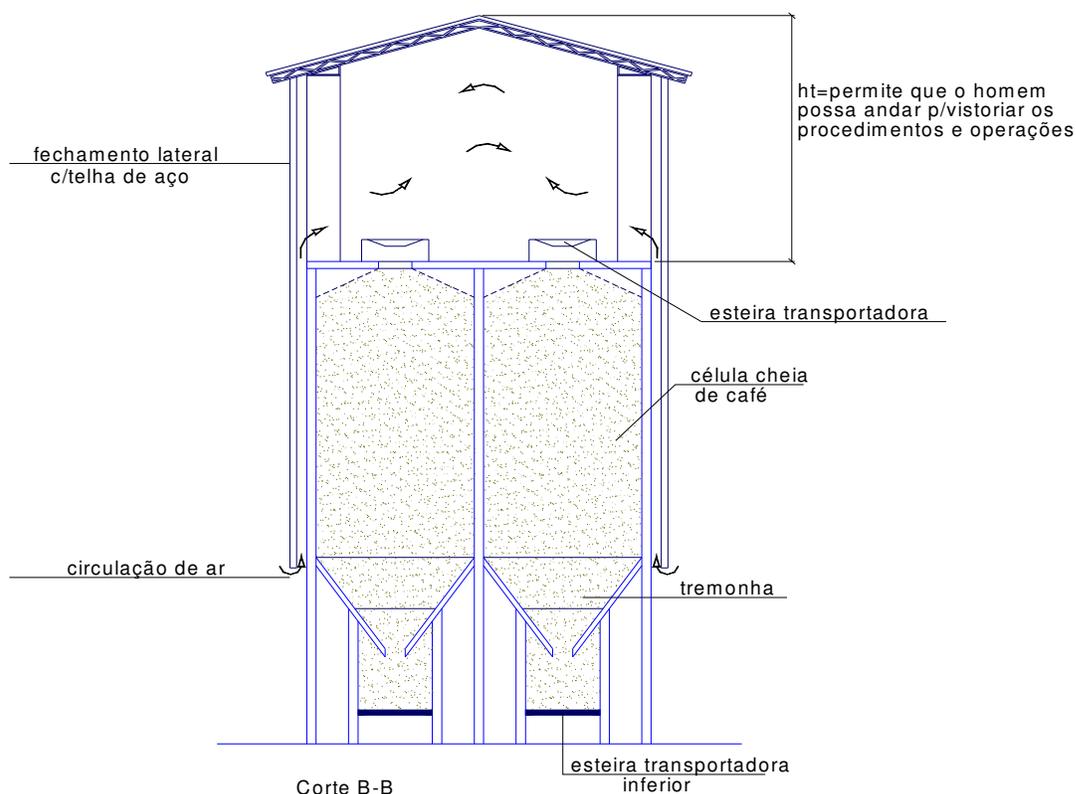


Fig. 17 a – Corte transversal do sistema de silos graneleiros.

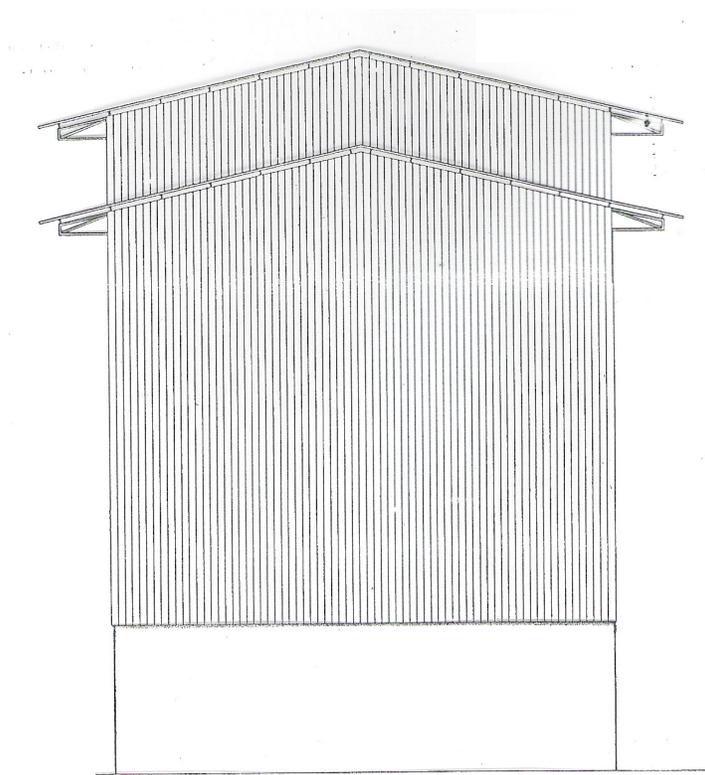


Fig. 17 b – Fechamento em telhas de aço, nas extremidades do silo.

#### 4.2.3 Laje de fechamento das células

A parte superior das células recebe uma laje que tem 2 funções:

- ✓ travar a parte superior das paredes (alvenaria estrutural) facilitando o dimensionamento destas,
- ✓ possibilitar o trânsito de pessoas na parte superior dos silos para eventual manutenção e verificação dos procedimentos.

Estas lajes têm um nicho no centro da cada célula, no tamanho de 50 x 50 cm, permitindo facilmente que o café saia das esteiras transportadoras superiores e encha a célula.

Analisando as possibilidades de execução dos diversos tipos de lajes (concreto armado, pré-moldada com capeamento de concreto) optou-se pela colocação

de lajes pré-moldadas com enchimentos de lajotas cerâmicas e capeamento de concreto, pela principal razão do escoramento ser muito mais fácil.

Devido à altura das células, o cimbramento e o escoramento de formas de madeira tornam-se bastante difíceis e complicados. A desforma também fica prejudicada pela dificuldade em se retirar o material após a concretagem.

Com a laje pré-moldada, basta se deixar um perfil metálico (metalon 80x80 mm, espessura chapa 1/8") de cada lado do orifício a ser deixado, chumbado no respaldo de alvenaria para servir de escoramento para a laje (figura 18). Esses perfis não serão retirados, mesmo após o período de cura da laje.

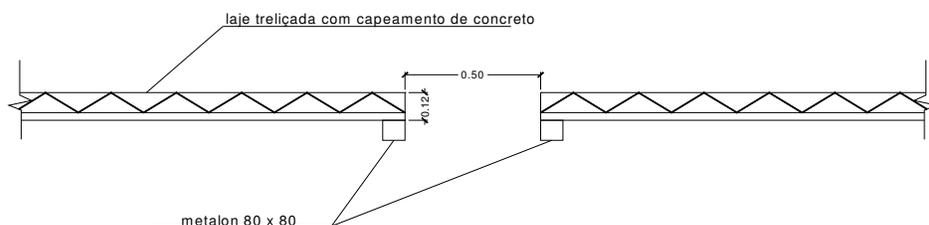


Fig. 18 – Detalhe do sistema de apoio da abertura da laje superior

#### 4.2.4 Paredes dos silos

As paredes dos silos são de blocos de concreto estrutural, dimensionadas através das Normas Brasileiras que regem o assunto: NBR – 8798, NBR – 10837 e NBR - 6136.

Os cálculos das pressões horizontais e verticais para as diversas condições de carregamento (carga e descarga) são considerados para o dimensionamento das paredes.

Nos silos multicelulares devem ser consideradas as várias situações de carregamento obtidas com combinações de células, cheias e vazias.

Quando se têm várias células, o número de combinações de carregamento é considerável. Porém, empregando-se o princípio da “envoltória dos esforços”, bastam alguns casos básicos de carregamento para se chegar aos valores máximos dos esforços solicitantes.

#### **4.2.5 Fundo da célula**

O fundo das células dos silos em questão é do tipo tremonha dupla, tronco piramidal, com saída central para cada uma.

As tremonhas são em painéis treliçados pré-moldados, também chamados de pré-lajes, com capeamento em concreto armado, dimensionadas para os esforços solicitantes atuantes.

Há, também, a possibilidade de se construir em concreto armado, porém, a solução é mais trabalhosa.

As principais vantagens do sistema de pré-lajes são:

- ✓ dispensa o revestimento inferior, pois, o acabamento é de excelente plástica,
- ✓ dispensa equipamento de içamento,
- ✓ economiza mão-de-obra e tempo de montagem,
- ✓ reduz o escoramento,
- ✓ é de fácil manuseio,
- ✓ permite a execução de lajes armadas em 1 ou 2 direções, facilitando os cálculos de dimensionamento.

A opção por tremonhas duplas tronco-piramidais justifica-se pelo fato de que para uma mesma célula, a altura destinada à tremonha é menor que no caso de tremonha única, fazendo com que a altura final dos silos também fique menor, facilitando a concepção arquitetônica e o custo das obras.

A figura 19 mostra o esquema típico de um painel pré-moldado (pré-laje) e a figura 20 mostra uma seqüência de pré-lajes.

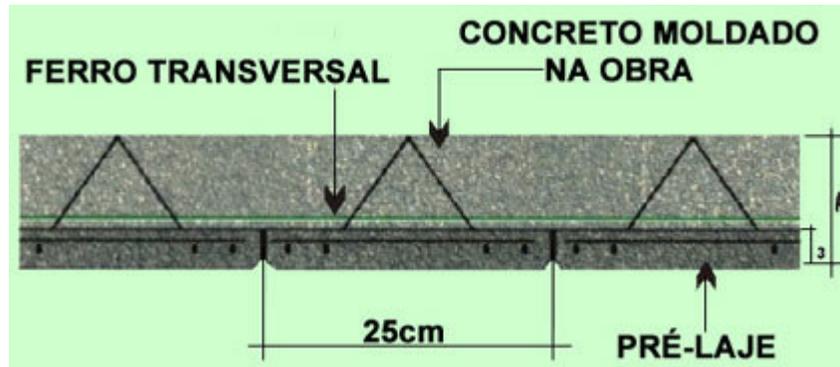


Fig. 19 – Detalhe genérico de uma pré-laje.  
(fonte: [www.premoldados.com.br](http://www.premoldados.com.br), 2003).



Fig. 20 – Exemplo de montagem de uma pré-laje.  
(fonte: [www.premoldados.com.br](http://www.premoldados.com.br), 2003).

As pré-lajes são sempre apoiadas no sentido transversal do silo sobre vigas projetadas no sentido longitudinal. No encontro inferior das pré-lajes (no fundo da tremonha) devem-se prever as aberturas (em geral 30 x 30 cm dependendo do projeto de mecanização) onde são fixados os *registros eletro-mecânicos* para a saída dos grãos. Isto é facilmente executado deixando-se uma forma de madeira nas medidas desse vão, antes da concretagem. Deve-se prever armaduras construtivas no contorno desse vão.

Para se concluir a concepção da tremonha, é necessário, que no sentido longitudinal do silo, após a concretagem da laje painel (pré-laje), faça-se um

*enchimento* de preferência de tijolos cerâmicos furados assentados com argamassa de cimento e areia, dando as declividades indicadas em projeto, para os orifícios de saída (ver figuras 21 e 22). Esse enchimento recebe um capeamento em cimentado liso desempenado, da mesma forma como o cimentado a ser feito no restante da tremonha, uniformizando o acabamento dessa superfície. O importante é que esse cimentado seja bem liso para que o coeficiente de atrito seja o menor possível. A escolha pelo tijolo cerâmico furado é em função de seu baixo peso específico e sua facilidade de manuseio no assentamento para se obter as declividades desejadas.

A inclinação das paredes da tremonha tronco-piramidal com a horizontal é a mesma para todos os lados.



Fig. 21 – Tremonha com saída dupla tronco-piramidal

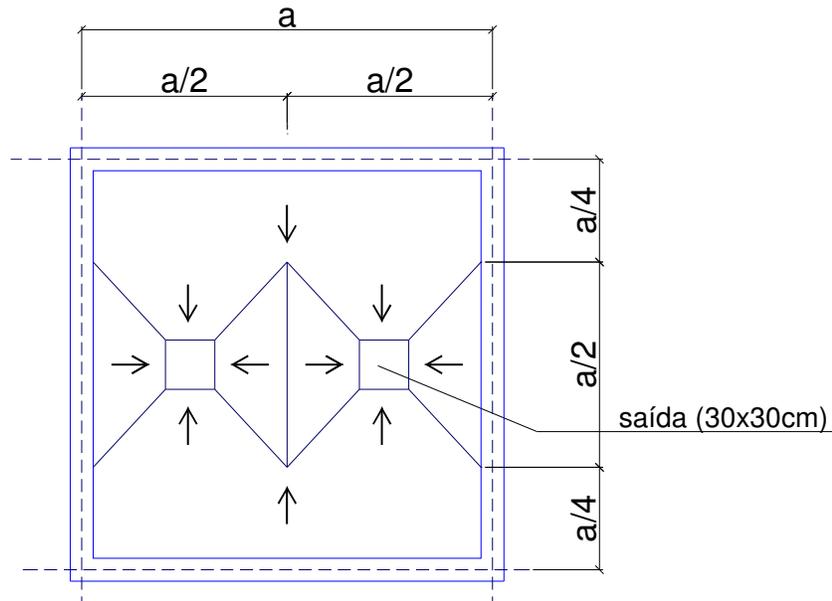


Fig. 22 – Projeto esquemático do fundo de uma célula (tremonha)

#### 4.2.6 Apoios das células e das tremonhas

Como os silos são elevados, a sustentação das células e das tremonhas é feita através de pilares e vigas de concreto armado, cujos topos são unidos às paredes das células e às tremonhas.

Visando facilitar o dimensionamento estrutural das tremonhas, além dos pilares externos, é projetado um sistema de pilares internos que sustentam as vigas de apoio das tremonhas (figura 23). A distância entre esses pilares, na seção transversal do silo, serve para permitir a passagem da esteira transportadora do café que sai das células e também para a fixação destas (ver figura 15).

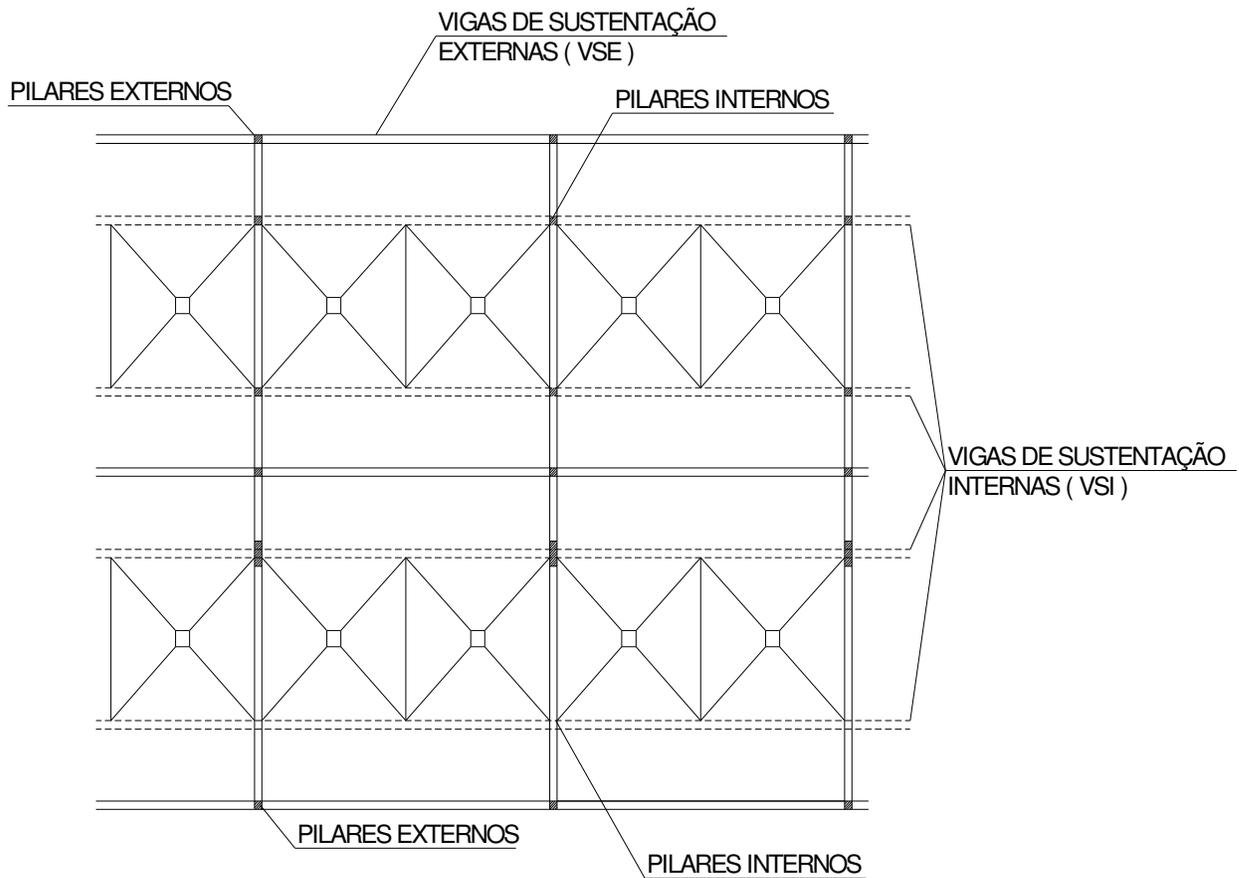


Fig. 23 – Sistema estrutural de apoio das células e tremonhas

#### 4.2.7 Considerações sobre a capacidade (volume) das células

A seguir é apresentado um modelo de cálculo do volume de armazenagem de uma célula do silo multicelular em questão, considerando-se, em primeiro lugar, a capacidade de armazenagem da tremonha tronco-piramidal com saída dupla e, depois a capacidade de armazenagem da célula propriamente dita.

Considere-se uma tremonha quadrada de lado  $a$  com saída dupla através de orifícios quadrados de lado  $b$ , conforme figura 24.

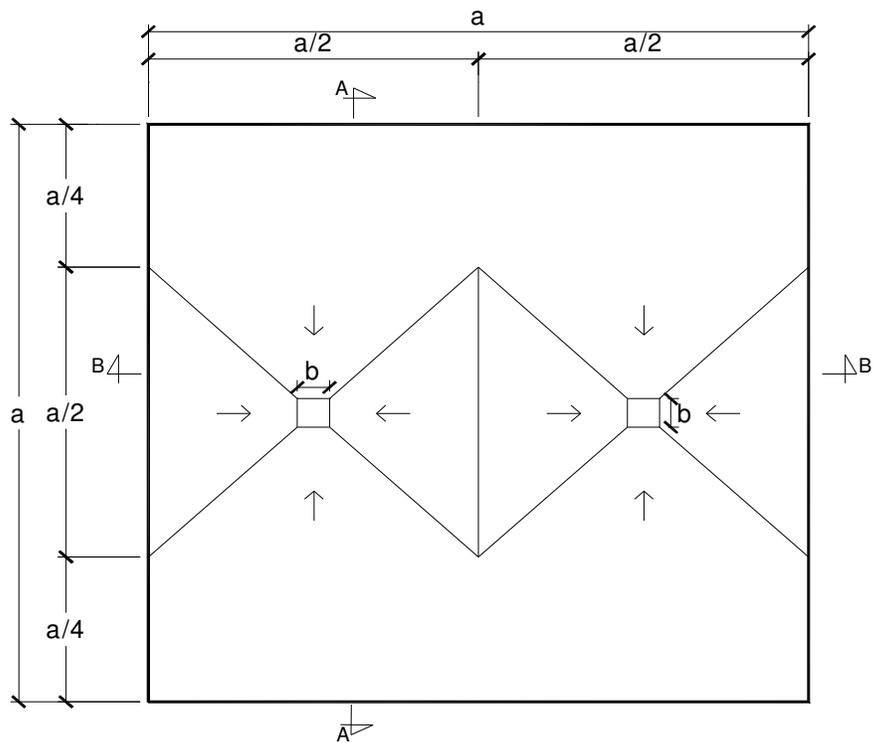


Fig. 24 – Esquema geométrico de uma tremonha tronco-piramidal

Dados:

$a$  = lado da tremonha quadrada

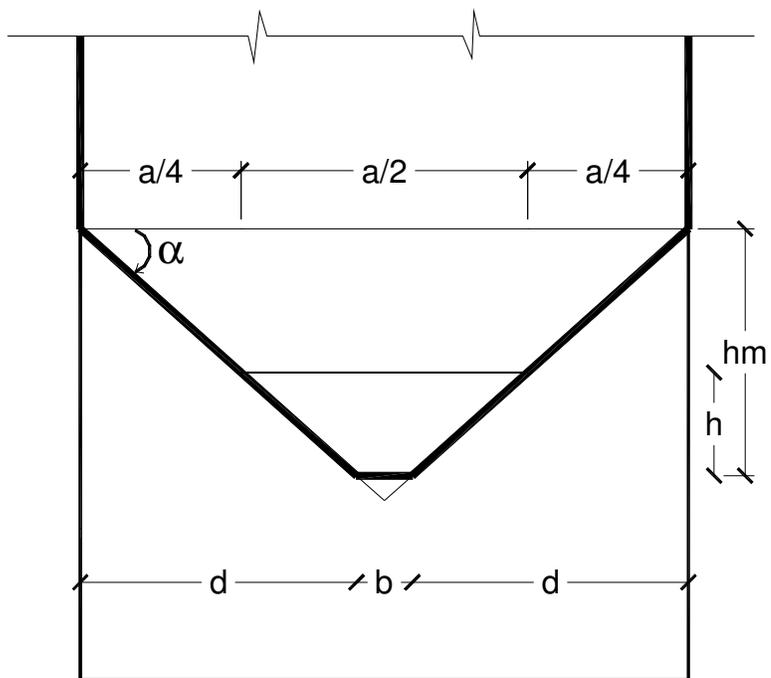
$b$  = lado da abertura de saída

$\alpha$  = ângulo de declividade da parede da tremonha

E sendo,

$h_m$  = altura total da tremonha

$h$  = altura do tronco da pirâmide inferior



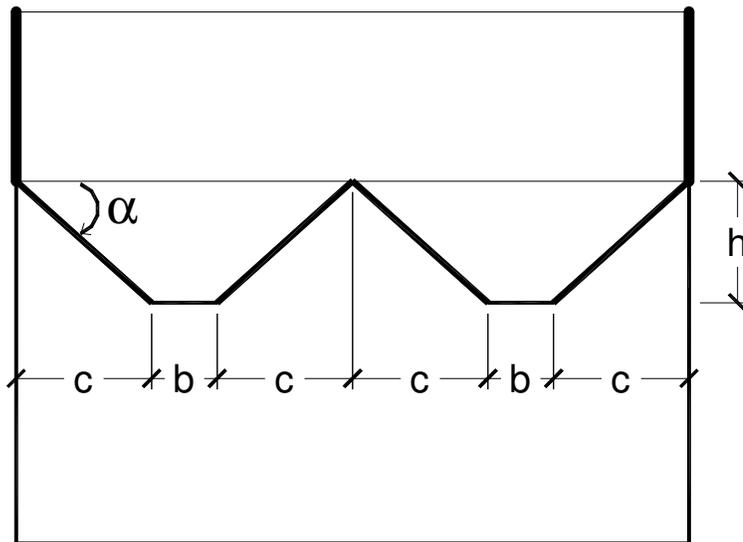
Corte AA

Fig. 25 – Corte A-A: corte transversal da tremonha

Obtêm-se:

$$d = \frac{a-b}{2} \quad \text{e} \quad c = \frac{(a/2-b)}{2} = \frac{a-2b}{4}$$

$$h_m = d \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{(a-b)}{2} \operatorname{tg} \alpha$$



Corte BB

Fig. 26 – Corte B-B: corte longitudinal da tremonha

$$h = c \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{(a - 2b)}{4} \operatorname{tg} \alpha$$

Para o cálculo do volume total, inicialmente considera-se o volume do tronco de pirâmide inferior conforme figura abaixo, dado por:

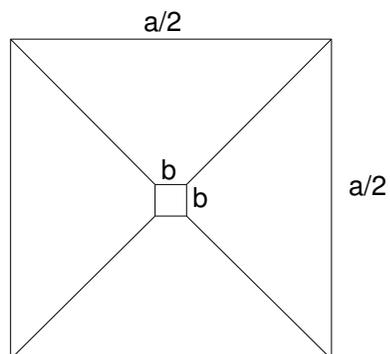


Fig. 27 – Esquema geométrico do tronco de pirâmide inferior

$$V1 = \frac{h}{3} \cdot \left\{ \frac{a}{2} \cdot \frac{a}{2} + b \cdot b + \left( \frac{a^2 \cdot b^2}{4} \right)^{1/2} \right\}$$

$$V1 = \frac{(a - 2b)}{4} \cdot \frac{\text{tg}\alpha}{3} \left( \frac{a^2}{4} + b^2 + \frac{ab}{2} \right)$$

$$V1 = \frac{(a - 2b)}{12} \cdot \text{tg}\alpha \left( \frac{a^2 + 4b^2 + 2ab}{4} \right) = \frac{1}{36} \cdot \text{tg}\alpha \cdot (a - 2b) \cdot (a^2 + 4b^2 + 2ab)$$

$$V1 = 0,021 \text{tg}\alpha (a^3 - 8b^3)$$

Em seguida, calcula-se o volume do tronco da pirâmide superior, conforme figura abaixo, dado por:

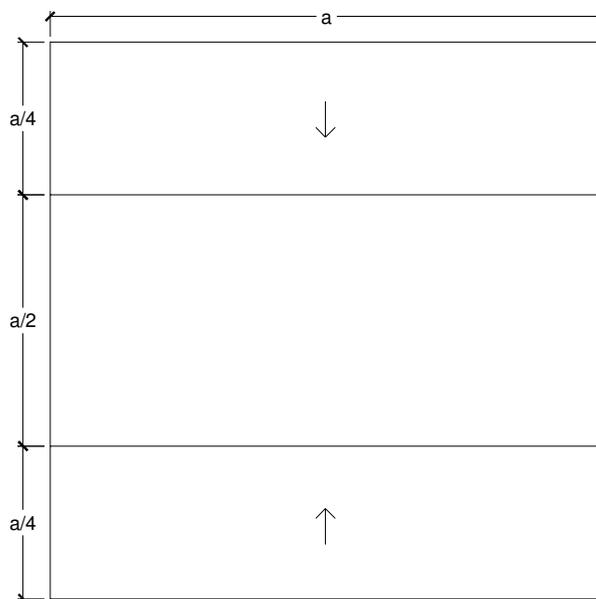


Fig. 28 – Esquema geométrico do tronco de pirâmide superior

$$V_2 = \frac{a/2 + a}{2} \cdot (h_m - h) \cdot a = \frac{3a}{4} \cdot \frac{a}{4} \operatorname{tg}\alpha \cdot a = \frac{3}{16} a^3 \operatorname{tg}\alpha$$

$$V_2 = 0,188 a^3 \operatorname{tg}\alpha$$

O volume total da tremonha  $V_T$  é dado, portanto, por:

$$V_T = V_2 + 2 V_1 = 0,188 a^3 \operatorname{tg}\alpha + 0,042 \operatorname{tg}\alpha ( a^3 - 8b^3 )$$

$$V_T = 0,188 a^3 \operatorname{tg}\alpha + 0,042 a^3 \operatorname{tg}\alpha - 0,336 b^3 \operatorname{tg}\alpha$$

$$V_T = 0,23 a^3 \operatorname{tg}\alpha - 0,336 b^3 \operatorname{tg}\alpha$$

Resultando finalmente em:

$$V_T = 0,23 \operatorname{tg}\alpha ( a^3 - 1,461 b^3 ) \dots\dots\dots(1)$$

Para o cálculo da capacidade máxima de armazenagem de café em uma célula quadrada, considera-se inicialmente o volume da pirâmide de café formada pelo ângulo de repouso quando o café é lançado dentro da célula (figura 29). Conforme já visto no item 2.2 este ângulo pode variar de 27° a 30°, dependendo das características do grão.

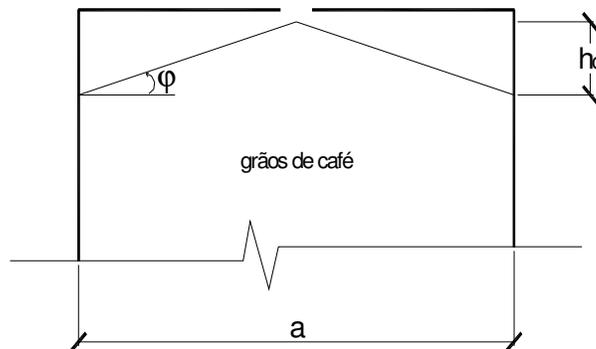


Fig. 29 – Pirâmide cônica formada pelo ângulo de repouso do café.

Neste trabalho, foi adotado o valor de  $\varphi = 30^\circ$  ( item 2.2 ).

Para calcular o volume desta pirâmide, aproximadamente cônica, formada pelos grãos de café, pode-se considerar a fórmula básica dada por:

$$V_c = \frac{\text{área da base} \times \text{altura} (h_c)}{3}$$

$$\text{e } h_c = \frac{1}{2} a \operatorname{tg} \varphi$$

resultando em:

$$V_c = \frac{a^3 \times a \operatorname{tg} \varphi}{6} = \frac{a^3 \operatorname{tg} \varphi}{6} \dots\dots\dots(2)$$

O volume de armazenagem confinado pelas paredes da célula é dado por:

$$V_p = a^2 (h_p - h_c) \dots\dots\dots(3)$$

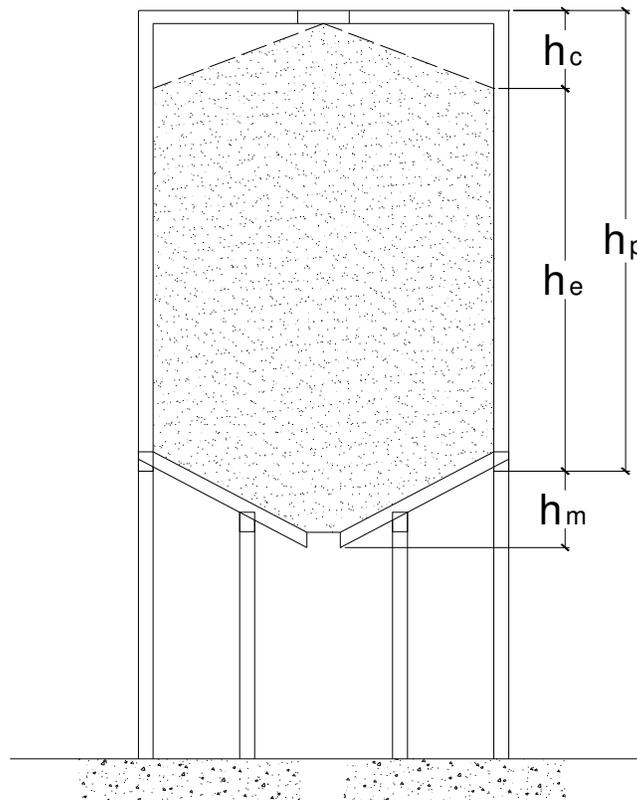


Fig. 30 – Esquema geométrico de uma célula.

O volume total da célula é obtido pela expressão:

$$V_{cel} = V_t + V_p + V_c \dots\dots\dots(4)$$

#### 4.2.8 Um exemplo prático

A seguir, são mostradas as fotos da execução do primeiro sistema de silos graneleiros elevados para armazenagem de café a granel (fig. 31, 32, 33, 34, 35, 36,37 e 38), construído em 1999 na cidade de Varginha – MG, para a empresa SENDAS COMERCIO EXTERIOR S.A.



Fig. 31 – Execução de paredes dos silos graneleiros



Fig. 32 – Perspectiva da construção do silo.



Fig. 33 – Perspectiva da construção do silo.



Fig. 34 – Vista da laje superior de fechamento das células.



Fig. 35 – Início da construção das tremonhas.



Fig. 36 – Detalhe da construção da tremonha



Fig. 37 – Vista da tremonha.



Fig. 38 – Detalhe do fechamento vertical em telhas de aço.

## **5. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS AÇÕES DECORRENTES DO PRODUTO ENSILADO**

Para se projetar um silo de forma segura e econômica, é necessário conhecer as forças que agem sobre ele.

Para isto, além das forças que normalmente solicitam uma estrutura, como, peso próprio, peso dos equipamentos, cargas acidentais, recalques de apoio e efeito do vento, desempenham papel fundamental as forças geradas durante as operações que ocorrem ao longo da vida da estrutura e que se traduzem nas pressões causadas pelo produto armazenado nas fases de carregamento, armazenamento e descarga (SILVA, 1993).

Ainda segundo SILVA (1993), as pressões dentro da massa ensilada e a pressão que essa massa exerce sobre as paredes do silo são influenciadas por fatores como:

- ✓ forma geométrica do silo;
- ✓ tipo de entrada e saída do produto;
- ✓ propriedades físicas do produto armazenado (tamanho do grão, peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, coeficiente de atrito com as paredes, teor de umidade e temperatura );
- ✓ características do tipo de fluxo;

- ✓ estágio da operação: carregamento do silo (estático, produto em repouso), descarga do silo (dinâmico).

## 5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PRODUTO EM REPOUSO NAS CÉLULAS

De acordo com vários autores, entre eles FORTES FILHO (1985), denominam-se *pressões estáticas* aquelas exercidas pelo produto em repouso, no interior das células e da tremonha. Após o enchimento dessas células, o peso do produto confinado é suportado pelas paredes (devido ao atrito entre o grão de café e a parede) e pela tremonha, existindo pressões perpendiculares às paredes, denominadas pressões horizontais ou pressões laterais, pressões paralelas às paredes devidas ao atrito e pressões verticais atuando na seção transversal da massa ensilada.

As principais teorias para o cálculo das pressões estáticas, tais como: Teoria Hidrostática, Teoria de Janssen, Teoria de Airy, Teoria de Reimbert, Teoria de Caquot e Kerisel e Teoria de Jaky estão descritas em FORTES FILHO (1985) .

A Teoria Hidrostática é muito antiga e considera as pressões exercidas pelo produto ensilado, idênticas àquelas exercidas por um líquido em repouso, com o mesmo peso específico do produto.

A Teoria de Janssen estabelece que a pressão vertical em uma seção transversal da massa ensilada é constante e que a relação entre a pressão horizontal ( $p$ ) e a pressão vertical ( $q$ ) é uma constante para qualquer profundidade.

A Teoria de Airy apresenta o cálculo da força horizontal atuando por unidade de comprimento do perímetro interno da seção transversal da célula, sendo esta força calculada isoladamente para cada parede. Estes cálculos foram estabelecidos para células baixas e células altas.

A Teoria de Caquot e Kerisel considera os grãos formando cúpulas ou abóbadas parabólicas sobrepostas, limitadas pelas paredes do silo, cada uma

suportada em parte pelo atrito entre as bordas destas formações de grãos e as paredes e em parte pela cúpula ou abóbada logo abaixo. Desta forma, o peso do produto a partir da superfície livre, até uma determinada profundidade, produz pressões verticais sobre as camadas abaixo desta profundidade e pressões contra as paredes, inclinadas em relação à horizontal de um ângulo igual ao ângulo de atrito entre o produto e a parede.

A Teoria de Jaky estabelece ser mais correto se tomar um ponto arbitrário dentro da massa ensilada, que se possa conhecer a distribuição das tensões normal e de cisalhamento. Considera que o problema das pressões nas células é essencialmente o mesmo das pressões atuando em um maciço de terra sem coesão, que pode ser resolvido através da teoria clássica das pressões em um maciço de terra, desde que se faça uma suposição plausível da configuração da superfície de ruptura.

A Teoria de Reimbert determina as pressões laterais baseando-se em resultados experimentais e matemáticos. Basicamente os autores estabeleceram, após vários ensaios experimentais, que o valor da pressão vertical ( $q$ ) cresce com a profundidade, porém, sofre acréscimos cada vez menores com o aumento da profundidade, tendendo a um valor máximo. A pressão horizontal ( $p$ ) contra as paredes das células tem comportamento similar. Esta teoria considera, também, a contribuição do peso do cone superior do produto ensilado, o que vem de encontro com a realidade do grão de café, quando armazenado desta forma.

A e M. REIMBERT (1971) desenvolveram sua teoria inicialmente para células de seção cilíndrica. Para silos de seção transversal poligonal regular, baseando-se em resultados experimentais, que mostravam ser a força máxima vertical dependente da forma do silo, os autores estabeleceram uma relação entre essas forças, da seguinte forma:

$$Q_{\text{máx},p} = k.Q_{\text{máx},c}$$

onde,

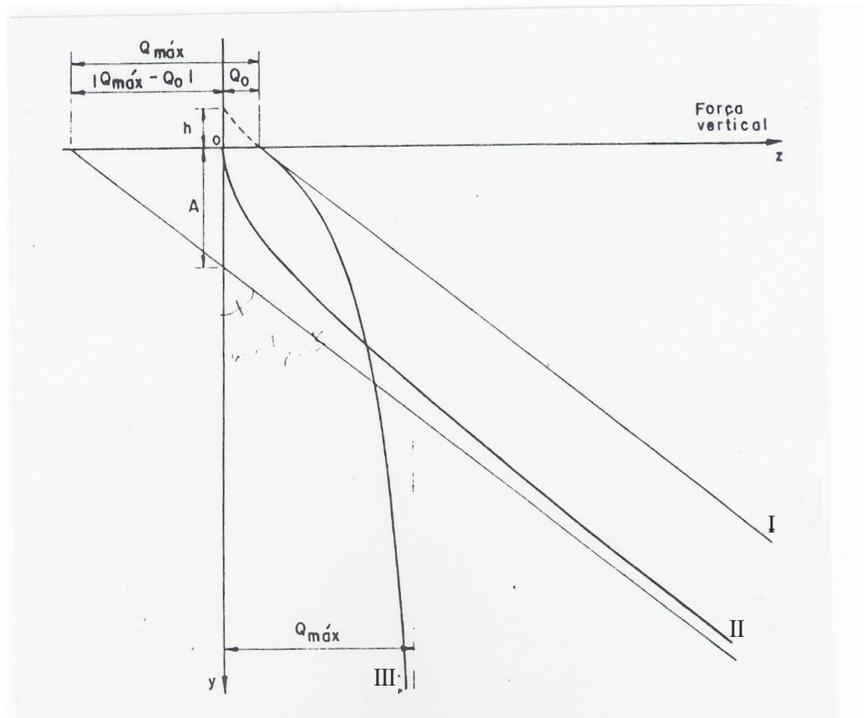
$Q_{\text{máx},p}$  = força vertical máxima numa célula de seção transversal poligonal

$Q_{\text{máx},c}$  = força vertical máxima na seção transversal de uma célula cilíndrica;

$k =$  constante igual à razão entre o perímetro da seção transversal do polígono regular e o perímetro do círculo inscrito nessa seção  $= \frac{U}{\pi.D}$ .

O valor de  $k$  para a seção transversal de uma célula quadrada é igual a 1,273.

A figura 39 representa a variação das forças verticais com a profundidade segundo a Teoria de Reimbert.



Reta I – Força vertical atuando na seção do produto ensilado considerando – se nulo o atrito entre grãos e paredes.

Curva II – Força vertical atuando nas paredes da célula decorrente do atrito entre grãos e paredes.

Curva III – Força vertical atuando na seção transversal do produto ensilado, existindo atrito entre grãos e paredes.

Fig. 39 – Variação das forças verticais com a profundidade segundo a teoria de Reimbert (fonte: SAFARIAN, 1985).

SAFARIAN (1985) estabelece uma comparação entre as pressões estáticas definidas pelos métodos de Janssen, de Reimbert e de Airy e conclui, comparando com resultados obtidos experimentalmente que, para o cálculo de

pressões estáticas horizontais, o método de Janssen é o mais indicado, enquanto que para pressões estáticas verticais o melhor é o método de Reimbert .

Não se pode deixar de citar outros autores importantes que também estudaram as pressões em silos, como JENIKE (1968, 1973), WALKER (1966), WATERS (1973), com destaque para Jenike que estudou profundamente as cargas de fluxo em silos com fluxo de massa e com fluxo de funil, além de ter desenvolvido um equipamento para determinação de algumas propriedades físicas de grãos, assuntos esses que são tratados em 5.3 e 6.2.

Porém, todas esses estudos e teorias assumem que a pressão na parede varia somente com a altura do silo não considerando a variação de pressão na parede no plano horizontal (CALIL, 1990).

As ações em silos devidas ao produto armazenado são variáveis no espaço e no tempo, e, portanto, não podem ser calculadas com certeza absoluta. (CALIL et al, 1997).

Outros autores, conforme citado em SILVA (1993), também estudaram pressões de silos, tanto teoricamente como experimentalmente, correlacionando sempre as propriedades físicas do produto com a capacidade da célula, com o tipo de estrutura e com o padrão do fluxo do produto ensilado.

Existem várias normas internacionais que estabelecem as pressões em silos: a australiana AS 3774 (1990), a alemã DIN 1055 (1987), a canadense NRC-NFBC (1995) e a americana ACI 313-97, 313R-97 (1998). Basicamente, todas utilizam a teoria de Janssen.

A norma DIN 1055 (1987) sempre foi muito usada e recomendada para projetos de silos, principalmente para o cálculo de silos altos.

A norma ACI 313-97 (1998) é utilizada para silos de concreto para materiais granulares. Essa norma foi feita inicialmente em 1968 e revisada em 1977, 1983, 1991 e finalmente em 1997.

A norma NRC – CNRC (1995) é a versão revisada e atualizada da norma de 1983, e estabelece os conceitos estruturais para construções rurais de armazenagem, ou seja, silos e tanques, para grãos, frutas, vegetais e líquidos.

A norma AS 3774 (1990) determina as cargas para os projetos de estruturas de armazenagem para sólidos granulares. Não se aplica para armazenagem de silagem.

O presente trabalho não tem como objetivo analisar detalhadamente as teorias e normas existentes sobre o assunto, mas sim, definir os conceitos e formulações necessárias para um projeto de silos elevados para café beneficiado que justifique a técnica construtiva adotada, em função das propriedades físicas, químicas e biológicas do produto a ser armazenado.

## **5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PRESSÕES NAS TREMONHAS**

Para o cálculo das pressões estáticas nas tremonhas, também existem alguns métodos, segundo seus autores:

- ✓ Reimbert
- ✓ Baikov
- ✓ Sarrazin

Todos esses métodos propõem uma maneira de se considerar as pressões ao longo das paredes das tremonhas.

O *método de Reimbert* considera as pressões horizontais e verticais constantes em cada parede e iguais àquelas obtidas para uma profundidade igual à

distância da superfície livre até o centróide de um triângulo de altura  $h_z$  (FORTES FILHO, 1985).

O *método de Baikov* determina as pressões na direção normal ( $p_n$ ) e paralela ( $v_n$ ) à superfície média das paredes da tremonha, a partir da decomposição, nessas direções, das pressões  $p$  e  $q$  obtidas através de alguma das teorias para cálculo de pressão nas células, sem considerar a redução da seção transversal do silo, ou seja, como se as paredes verticais da tremonha se prolongassem até o nível da abertura de saída. Neste método, as pressões nas paredes da tremonha variam com a profundidade (FORTES FILHO, 1985).

O *método de Sarrazin* considera que o produto no interior da tremonha está submetido a um estado ativo de pressões, podendo se relacionar à pressão vertical e à horizontal no interior dessa massa ensilada, através do coeficiente de empuxo ativo, definido pela teoria clássica de empuxo de Rankine (FORTES FILHO, 1985).

A figura 40 mostra o esquema de pressões que está submetida uma tremonha, sendo  $\alpha$  o ângulo de inclinação da parede considerada com a horizontal.

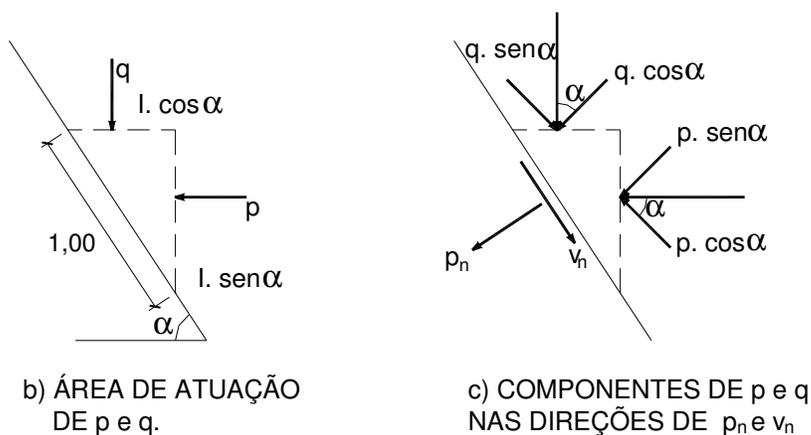


Fig. 40 – Pressões nas paredes de uma tremonha

Todas as normas citadas em 5.1 (DIN 1055, NRC-CNRC-1995, AS 3774-1990 e ACI 313-97) apresentam formulações matemáticas para os cálculos das pressões nas paredes de tremonhas, cada qual com sua particularidade, porém todas decorrentes de equações de equilíbrio do produto ensilado.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MOVIMENTO DO PRODUTO ENSILADO

#### a) Durante a carga

No caso do projeto de silos apresentado neste trabalho, o produto a ser ensilado (café) é lançado no interior das células através de sistemas mecanizados (esteiras transportadoras) localizados na laje superior das células, acionados através de motor elétrico, e que mantêm uma velocidade constante no lançamento dos grãos e lançando sempre através de abertura central existente na laje de fechamento da célula (figura 41).

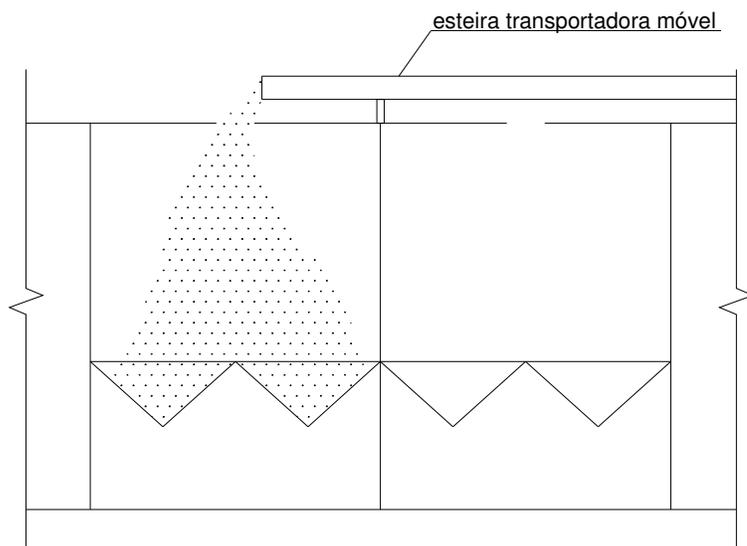


Fig. 41 – Enchimento de uma célula

Portanto, o carregamento da célula é feito de modo que o jorro dos grãos dirija-se ao centro do fundo desta célula, aonde os grãos vão caindo uns sobre os outros, rolando sobre a superfície livre, fazendo com que cada camada do produto sofra um adensamento por um certo tempo, devido ao peso das camadas superiores.

A compactação desses grãos, notadamente, é maior na região em que o jorro golpeia a superfície livre.

Há muitas variáveis que influenciam os valores dessa compactação: velocidade da carga, volume dos grãos lançados por unidade de tempo, variação da altura de queda dos grãos ao longo do carregamento e o tempo para estabilização dessa compactação.

Tudo isso se traduz em variabilidade das propriedades físicas dos grãos, dentro da massa ensilada.

Nesta operação de carga ocorre tanto o fenômeno da *compactação* dos grãos (impacto com a superfície livre), como o do *adensamento* (acomodação dos grãos com o tempo).

#### b) Durante a descarga

A descarga dos grãos de café das células será feita sempre pela ação da gravidade, decorrente da abertura do registro de saída dos orifícios das tremonhas.

Existem basicamente 2 tipos de escoamento (movimentação do produto) durante a descarga:

- ✓ escoamento tipo funil ( *funnel flow* )
- ✓ escoamento tipo massa ( *mass flow* )

O tipo de fluxo determina as características de descarga do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente (CALIL, 1990).

O escoamento tipo funil é aquele em que, ao abrir-se o orifício de saída da célula, apenas os grãos logo acima deste entram em movimento, surgindo um caminho de fluxo destes grãos, a partir desta abertura. Esse caminho chama-se canal de escoamento. Esse canal tende a atingir a superfície livre da massa granular e os grãos fora desse canal permanecem inertes. Os grãos inertes só começam a se movimentar quando são atingidos pelos limites do canal de escoamento.

No escoamento tipo massa todos ou quase todos os grãos ensilados começam a se movimentar a partir da abertura do orifício de saída. Neste caso, os limites do canal de escoamento coincidem com as paredes do silo. A superfície livre da massa ensilada, neste tipo de escoamento, tem um movimento descendente, sem modificar sua forma, ou no máximo apresenta uma pequena depressão central, mantendo-se desta forma, até a uma certa distância do orifício de saída, quando então começa a se desmoronar.

O comportamento do produto ensilado depende, portanto, da rugosidade das paredes do silo, do ângulo de atrito interno, da inclinação das paredes da tremonha e da forma e tamanho do orifício de saída.

A experiência mostra que a massa ensilada de grãos de café obedece geralmente ao escoamento tipo massa, devido, principalmente, à sua granulometria, a seus ângulos de atrito e às inclinações necessárias das tremonhas, que são projetadas justamente para forjar este tipo de escoamento. Porém, a forma da tremonha definida neste projeto (tronco piramidal) poderá dificultar o escoamento tipo massa, pois na região junto às arestas poderá permanecer material inerte.

As vantagens do escoamento tipo massa são que a massa ensilada tem um escoamento uniforme, não apresentando variações com o tempo, durante a maior parte da descarga; o peso específico do produto retirado é praticamente constante, independentemente da altura dos grãos no interior dos silos, o que facilita a mecanização da retirada do café através das esteiras transportadoras inferiores.

O tipo de escoamento influi nas pressões horizontais nas paredes das células, durante a descarga. Trabalhos experimentais indicaram que as pressões horizontais, na descarga, são maiores que as pressões horizontais estáticas. Vários autores falam sobre este fenômeno, como DEUTSCH e CLYDE, BROWN e RICHARDS e JENIKE e JOHANSON citados em FORTES FILHO (1985).

Segundo RAVENET (1977) uma inclinação de 45° da parede da tremonha com a vertical evita problemas de escoamento para produtos granulares não coesivos. BAIKOV (apud FORTES FILHO, 1985) recomenda que para produtos não coesivos (caso do café), o ângulo de inclinação deve ser o ângulo de talude natural mais 5 a 10% do seu valor. CALIL (1990) e CALIL et al (1997) apresentam uma formulação matemática para cálculo do ângulo de inclinação da tremonha. Essa formulação é utilizada no item 6.2 deste trabalho.

#### **5.4 SOBREPRESSÕES DURANTE A CARGA E A DESCARGA**

Conforme explicado acima, o movimento de carga e descarga dos grãos ensilados provoca aumento das pressões nas paredes, com relação às pressões estáticas. Quando as funções de carga e descarga ocorrem, essas pressões são chamadas de sobrepressões ou pressões dinâmicas.

A quantificação dessas pressões dinâmicas pode ser feita através de 3 formas:

- a) através de teorias elaboradas por alguns autores: Caquot, Kortun e Platonov, Lenczner e Vivancos;
- b) majorando-se as pressões estáticas, através de coeficientes de majoração fornecidos por normas;
- c) através de resultados de experiências realizadas com o grão a ser ensilado.

Durante o carregamento da célula, o impacto dos grãos no fundo provoca pressões verticais nesta região e, conforme vai ocorrendo o preenchimento da célula, a expansão lateral do grão, causada pela pressão vertical provoca pressões horizontais ligeiramente maiores que as pressões horizontais estáticas (FORTES FILHO, 1985).

Durante a descarga, as sobrepressões oriundas deste movimento, principalmente as pressões horizontais contra as paredes, merecem maior consideração.

Os problemas de quantificação das pressões estáticas e suas correspondentes pressões dinâmicas, tanto na carga como na descarga do produto ensilado, foram objetivos principais de muitos pesquisadores ao longo do século passado.

O que se percebe é que não existe uma regra geral válida para a quantificação das pressões dinâmicas nas paredes dos silos, nem para correlacionar essas pressões horizontais com as verticais, para uma determinada seção da célula. O que se conclui é que na grande maioria dos casos, as pressões dinâmicas horizontais como as verticais são maiores quando da descarga do produto do que na carga.

Muitos desses ensaios chegaram a valores muito superiores aos que se encontravam na teoria. Por isso é que se observam definições de coeficiente de majoração para as sobrepressões que vão desde 1,15 até 3,00, conforme o caso.

Não cabe aqui, neste trabalho, aprofundar a análise destas teorias e experimentos. O que se pretende é, de uma maneira mais prática possível, se chegar a valores que possam garantir a segurança e estabilidade da estrutura projetada, dentro de um custo-benefício mais razoável possível.

Para isto, para se projetar um silo, presumidamente, deve-se observar o seguinte, segundo RAVENET (1977):

- ✓ definir a geometria da célula e a relação altura pelo lado ou diâmetro da célula
- ✓ conhecer todas as propriedades físicas do produto a ensilar: ângulo de atrito interno, ângulo do cone de descarga, sabendo-se, assim, o nível em que o cone de descarga intercepta a parede, pois é nesta seção que ocorrem as maiores sobrepressões na descarga.
- ✓ as sobrepressões não ocorrem particularmente na parte alta da célula, nem tampouco na parte baixa, mas dependem, sim, da relação entre a altura e o lado da célula e do tipo e características físicas do produto a ser ensilado.
- ✓ para cada tipo de célula, deve-se aplicar coeficientes de sobrepressão ( $C_d$ ) sobre as pressões horizontais dadas pela teoria de Janssen. Esses coeficientes são:

$$\text{para descarga central} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{se } \frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 6,00 \Rightarrow C_d = 1,65 \\ \text{se } \frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 1,50 \Rightarrow C_d = 1,30 \end{array} \right.$$

$$\text{para descarga excêntrica} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 7,00 \Rightarrow C_d = 1,95 \text{ (lado oposto à abertura de saída)} \\ \phantom{\frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 7,00 \Rightarrow} C_d = 0,66 \text{ (lado próximo à abertura de saída)} \\ \frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 1,50 \Rightarrow C_d = 1,48 \text{ (lado oposto à abertura de saída)} \\ \phantom{\frac{\text{altura}}{\text{lado}} = 1,50 \Rightarrow} C_d = 0,74 \text{ (lado próximo à abertura de saída)} \end{array} \right.$$

Segundo SAFARIAN (1985), entretanto, a determinação das pressões dinâmicas a partir das pressões estáticas fornecidas pela teoria de Janssen ou Reimbert, através da aplicação de coeficientes de majoração, pode ser feita através dos valores da tabela 04, para escoamento tipo funil. Para escoamento de massa (*mass flow*), os valores obtidos devem ser acrescidos entre 10 a 25%.

Tabela 04 – Coeficientes de majoração Cd  
(Fonte: SAFARIAN, 1985).

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO	SILO DE CONCRETO		SILO DE AÇO	
	REIMBERT	JANSSEN	REIMBERT	JANSSEN
<b>I - VALORES DE Cd PARA DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES HORIZONTAIS DINÂMICAS (FIG. 42)</b>				
<b>1. SILO UNICELULAR CIRCULAR OU POLIGONAL</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/D = 1,5	1,50	1,65	1,95
	H/D > 4,5	1,75	1,95	1,95
<b>2. GRUPO DE CELULAS CIRCULARES OU POLIGONAIS EM LINHA RETA E TORRE DE CONTROLE</b>				
<b>(A). CELULAS EXTERNAS</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/D = 1,5	1,50	1,65	1,95
	H/D > 4,5	1,75	1,95	1,95
<b>(B). CELULAS INTERNAS</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/D = 1,5	1,25	1,40	1,65
	H/D > 4,5	1,50	1,65	1,65
<b>3. CELULAS INTERSTICIAIS</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/D = 1,5	1,25	1,40	1,65
	H/D > 4,5	1,50	1,65	1,65
<b>4. PEQUENAS CELULAS NO INTERIOR DE QUALQUER ARRANJO DESTAS E CELULAS EXTERNAS CONECTADAS A PEQUENAS CELULAS</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/D = 1,5	1,75	1,10	1,50
	H/D > 4,5	2,00	2,20	2,20
<b>5. SILOS UNICELULARES E MULTICELULARES QUADRADOS OU RETANGULARES</b>				
TRECHO SUP. COM EXTENSÃO H1	1,00	1,35	1,10	1,50
TRECHO INFERIOR COM EXTENSÃO 2/3 H	H/(a OU b) = 1,50	1,25	1,40	1,65
	H/(a OU b) > 4,50	1,50	1,65	1,65
	H1 = Dtg Φ < H/3 (H1)a = btgΦ < H/3 (H1)b = atgΦ < H/3			

Tabela 04 – Coeficientes de majoração  $C_d$  continuação  
(Fonte: SAFARIAN, 1985)

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. TREMONHAS 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	1,50
(B). PARA TODOS TIPOS DE CEREAIS	1,50	1,25	1,50	1,25
(C). TODOS TIPOS DE MATERIAIS GRANULARES EXCETO OS DOS ITENS (A) E (B) ACIMA	2,50	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.				

As ações dos grãos em movimento são dadas por:

$$p_d = C_d \cdot p \quad \text{e} \quad q_d = C_d \cdot q$$

$$F_{ad} = F_a \quad (\text{para silos de concreto}) \quad \text{e} \quad F_{ad} = \frac{F_a}{0,9} \quad (\text{para silos de aço})$$

SAFARIAN (1985) observou, ainda, que o valor da pressão vertical não deve ser maior que o produto do peso específico pela altura da célula. Caso isto aconteça, deve-se tomar como valor para a pressão vertical este último.

O gráfico da figura 42 expressa as situações estabelecidas por Safarian.

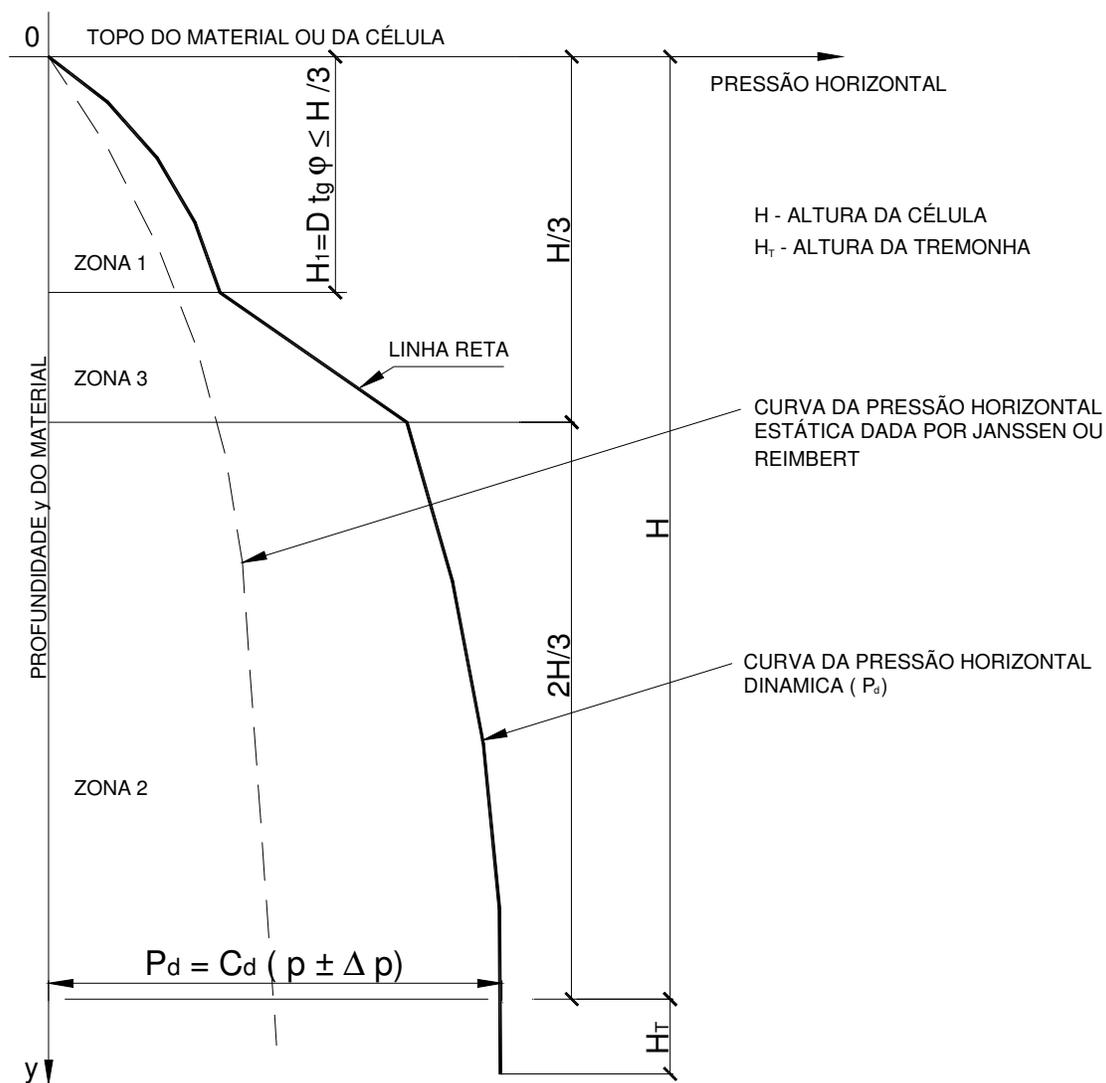


Fig. 42 – Variação da pressão horizontal dinâmica com a profundidade proposta por SAFARIAN (1985).

A norma americana ACI 313-97 prevê um coeficiente de sobrepressão de 1,50 em adição ao fator de sobrecarga de carregamento estipulado em 1,70 sobre as pressões estáticas, para descargas centrais. Entretanto este valor poderá ser menor desde que experiências comprovem o uso de coeficientes menores. Para descargas

excêntricas, a ACI 313-97 ainda não estabeleceu valores definitivos, ficando por conta do projetista esta avaliação. Para cargas permanentes (peso próprio da estrutura) a norma determina a aplicação do coeficiente de carregamento de 1,40.

A norma australiana AS 3774 (1990) prevê um valor de coeficiente de sobrepressão também de 1,50 , porém , sugere o valor de 1,25 para o fator de sobrecarga referente ao carregamento do produto ensilado. Para as cargas permanentes, também adota o valor de 1,40.

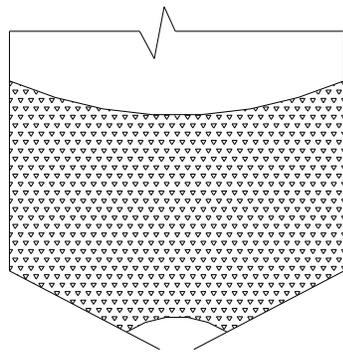
Para as pressões nas paredes da tremonha, a norma ACI 313-97 define o coeficiente de sobrepressão em 1,35 aplicado ao valor da pressão vertical ( $q_0$ ) que entra nos cálculos das pressões normais e das pressões paralelas à superfície da tremonha.

## **5.5 OBSTRUÇÕES DO FLUXO DURANTE A DESCARGA**

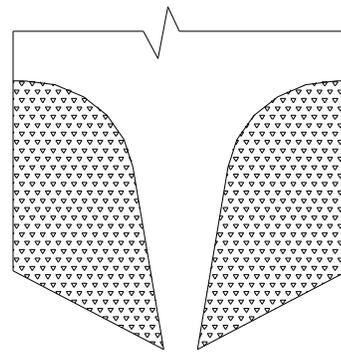
O primeiro objetivo no projeto de células de armazenamento é assegurar que o produto armazenado flua por gravidade sem ocorrência de obstruções do fluxo (CALIL, 1990). Os principais tipos de obstruções de fluxo são:

- ✓ arqueamento
- ✓ formação de tubos

Esses fenômenos podem ser observados a seguir, na figura 43.



a) Fenômeno de arqueamento na saída do silo



b) Fenômeno de formação de tubo

Fig. 43 – Tipos de obstruções do fluxo

De acordo com CALIL (1990), para a formação de uma área estável ou tubo, o produto armazenado adquire dentro do contorno da célula (ou tremonha) resistência suficiente para suportá-la. Essa resistência é função do grau de consolidação do produto ensilado. CALIL (1990) observa, também, que a relação entre essa resistência versus a pressão de consolidação chama-se *função fluxo (FF)*.

O colapso de um arco provoca grandes alterações de pressão nas paredes da célula e da tremonha, podendo comprometer a estabilidade da estrutura. A região abaixo do arqueamento fica vazia ou com material de pouca densidade.

Esse fenômeno do arqueamento pode ocorrer na região da célula ou na região da tremonha, em intervalos de tempo arbitrários e com diferentes períodos de existência (FORTES FILHO, 1985).

Porém, na região da tremonha, ele ocorre em geral em situações onde a razão entre o diâmetro inscrito no orifício de saída e o tamanho da partícula armazenada é pequena e quando o produto apresenta bastante coesão, ou ainda quando o atrito entre a estrutura laminar dos grãos e a superfície em que se apóia é grande.

No caso de grão de café, esse fenômeno pode ocorrer quando a abertura de saída do orifício e a inclinação da tremonha sejam insuficientes, fazendo com que as pressões devidas ao peso próprio se equilibrem principalmente com as provenientes dos atritos entre os grãos, na região de saída do orifício.

Para se evitar a formação de arqueamento de produtos granulares secos e com partículas não diminutas, como o caso do café, deve-se projetar o orifício de saída e a inclinação da tremonha com dimensões adequadas para que impeçam a formação de choques entre os grãos.

LENCZNER (apud FORTES FILHO, 1985) aconselha que o valor seguro para tal orifício deva ser quando a razão entre a menor dimensão da abertura de saída e a maior dimensão do grão ensilado seja maior que 3. Outros autores recomendam que esta relação seja maior que 6 e nunca inferior a 60 cm (BAIKOV, apud FORTES FILHO, 1985).

Em função de nossas experiências anteriores, adotamos os valores mínimos desses orifícios em 30cm visto que, nas células projetadas, as saídas são duplas (dois orifícios de 30 x 30 cm.) e também porque a capacidade de transporte do café pelas correias transportadoras inferiores está adequada e dimensionada para estes tamanhos de orifícios.

A forma, a rugosidade da superfície interna das paredes da tremonha e sua inclinação com relação à horizontal são características que influenciam demasiadamente no escoamento do produto ensilado, bem como, do surgimento do fenômeno de arqueamento.

Devido ao sistema de execução construtivo definido neste trabalho, a opção escolhida foi a de tremonha tronco-piramidal com saída dupla para cada célula.

A recomendação construtiva é para que, nas arestas da tremonha o acabamento final (cimentado bem liso) seja abaulado, de forma a evitar a presença de material inerte e facilitar o escoamento da forma global.

Sucintamente, paredes de tremonhas mais íngremes, faces internas dessas paredes bem lisas e orifícios de saída com medidas adequadas facilitam o escoamento do produto, dificultando a existência do arqueamento e de material inerte nesta região.

## 6. PROJETO ESTRUTURAL

O projeto estrutural do sistema de silos graneleiros é dividido em 4 partes:

- ✓ definição dos carregamentos
- ✓ determinação das propriedades físicas do produto
- ✓ cálculo dos esforços na estrutura
- ✓ dimensionamento

### 6.1 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Para o cálculo estrutural de um sistema de silos conforme proposto, consideram-se inicialmente as *ações* que agem sobre ele.

As principais ações são:

- ✓ peso próprio do silo,
- ✓ pressões e forças de atrito provocadas pelo produto ensilado,
- ✓ peso próprio dos equipamentos,
- ✓ efeito do vento,
- ✓ variação da temperatura.

O peso próprio do silo é determinado através do peso dos elementos estruturais definidos na concepção arquitetônica segundo as normas existentes, principalmente para os blocos de concreto, lajes treliçadas e painéis pré-moldados, que compõem a estrutura da célula. Há que se considerar, também, o peso próprio da estrutura metálica da cobertura e do fechamento lateral.

As ações provenientes do produto ensilado são determinadas através do procedimento proposto pela norma ACI 313-97 e que é apresentado no item 6.4.1.

O efeito do vento deve ser considerado no cálculo estrutural do fechamento lateral da estrutura metálica/ telhas de aço galvanizado, cujas terças estão fixadas nas amarrações (pilares grauteados) da alvenaria estrutural das células. Conseqüentemente essas ações transmitem esforços para essas paredes, para os pilares de apoio das células e suas respectivas fundações. Esses cálculos devem seguir as orientações da Norma NBR-6123/1988.

As ações exercidas pelos equipamentos (esteiras transportadoras superiores e inferiores, e os registros de abertura para saída do café) são consideradas desprezíveis no cálculo dessas células, em virtude do pouco peso que representam em comparação com o restante.

A variação da temperatura poderá produzir esforços não desprezíveis, principalmente em silos multicelulares projetados para regiões com grande variação térmica diária. No sistema proposto, esse efeito é bastante atenuado, e suas considerações de cálculos nas estruturas de concreto e na alvenaria estrutural das paredes são desprezíveis em virtude da proteção térmica proporcionada pela cobertura de telhas de aço galvanizadas e pelos fechamentos verticais em todas as laterais do silo, também, com telhas de aço galvanizadas. Como o produto café será sempre lançado à temperatura ambiente para dentro das células, e em função das propriedades físicas do café terem que ser preservadas da melhor forma possível, o objetivo maior é, portanto, definir um sistema construtivo que garanta um conforto térmico adequado para o produto ensilado.

## 6.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CAFÉ BENEFICIADO E DA GEOMETRIA DA TREMONHA

### *Propriedades físicas*

A determinação das propriedades físicas dos grãos de café beneficiados é a primeira etapa para um projeto de fluxo e para um projeto estrutural de silos de armazenagem.

Essas propriedades (que foram explicadas no capítulo 2, item 2.2 ) mais importantes para o projeto dos silos são:

- ✓ densidade
- ✓ granulometria
- ✓ ângulo estático de atrito interno
- ✓ ângulo cinemático de atrito entre o produto armazenado e os materiais das paredes de contato (bloco de concreto e concreto liso)

A determinação das propriedades físicas de uma amostra de café beneficiado, da espécie *coffea arábica*, foi realizada no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira, LAMEM /EESC / USP, de acordo com a metodologia proposta por MILANI (1993), utilizando o aparelho de cisalhamento TSG 70-140 (*JENIKE Shear Tester*).

Para execução dos ensaios, foram utilizadas as seguintes referências:

- ✓ Operating Instructions for Translational Shear tester TSG 70-140;
- ✓ Manual SSTT (Standart shear Testing Technique). Trabalho desenvolvido pela Federação Européia de Engenharia Química WPMS – 1989;
- ✓ Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos (MILANI, 1993).

As figuras 44 e 45 mostram fotos do equipamento de cisalhamento *JENIKE SHEAR TESTER* utilizado para os ensaios.



Fig. 44 – Foto do equipamento Jenike Shear Tester



Fig. 45 – Vista superior do equipamento Jenike Shear Tester

A determinação dessas propriedades do grão depende do conhecimento do lugar geométrico de deslizamento, estabelecido pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o produto armazenado, avaliando-se como ocorre o deslizamento entre os grãos e entre grãos e o material das paredes do silo, cujos valores também são fornecidos pela *célula de Jenike*.

Para cada lugar geométrico instantâneo de deslizamento determina-se o ângulo de atrito interno ( $\Phi_i$  = ângulo que o lugar geométrico instantâneo de deslizamento forma com a horizontal) e o efetivo ângulo de atrito interno ( $\Phi_e$  = ângulo com a horizontal de uma linha entre a origem e a tangente ao lugar geométrico instantâneo de deslizamento, no semicírculo de Mohr, da maior tensão de consolidação).

Recomenda-se utilizar nos cálculos das ações, os valores dos seguintes ângulos (CALIL, 1997):

- ✓ para pressão horizontal máxima na parede do silo  $\Rightarrow \Phi_{wpi}$  e  $\Phi_{is}$
- ✓ para força máxima de atrito na parede de silo  $\Rightarrow \Phi_{wps}$  e  $\Phi_{is}$
- ✓ para carga vertical máxima na tremonha  $\Rightarrow \Phi_{wpi}$  e  $\Phi_{ij}$

Os resultados obtidos nos ensaios foram:

- ✓ peso específico inferior :  $\gamma_i = 6,75 \text{ kN/m}^3$
- ✓ peso específico superior:  $\gamma_s = 6,88 \text{ kN/m}^3$
- ✓ ângulo de atrito interno inferior:  $\Phi_{ij} = 34,5^\circ$
- ✓ ângulo de atrito interno superior:  $\Phi_{is} = 36,0^\circ$
- ✓ efetivo ângulo de atrito inferior:  $\Phi_{ei} = 35,0^\circ$
- ✓ efetivo ângulo de atrito superior:  $\Phi_{es} = 36,5^\circ$

✓ ângulo de atrito com a parede de bloco de concreto ( parede das células)

inferior:  $\Phi_{wpi} = 28,5^\circ$

superior:  $\Phi_{wps} = 31,0^\circ$

✓ ângulo de atrito com a parede de concreto liso ( tremonha)

inferior:  $\Phi_{wti} = 22,5^\circ$

superior:  $\Phi_{wts} = 23,5^\circ$

*Geometria da tremonha*

De acordo com CALIL et al (1997) pode-se calcular o ângulo da tremonha, para que ocorra fluxo de massa, através da equação:

$$\alpha = 0,5 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{1 - \text{sen } \Phi_{is}}{2 \text{ sen } \Phi_{is}} \right) + \beta \dots\dots\dots \text{em graus} \quad (5)$$

sendo que  $2\beta = \Phi_{wts} + \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen } \Phi_{wts}}{\text{sen } \Phi_{is}} \right) \dots\dots\dots \text{em graus} \quad (6)$

$\alpha$  = menor ângulo da tremonha com a horizontal, em graus, para fluxo de massa

Substituindo nas equações os valores obtidos nos ensaios, tem-se:

$$2\beta = 23,5^\circ + 84,5^\circ = 108,0^\circ \Rightarrow \beta = 54,0^\circ$$

e portanto,

$$\alpha = 54,5^\circ \sim 55,0^\circ$$

Recomenda-se (CALIL et al 1997) acrescentar de 3° a 5° a este valor para definição do  $\alpha$ . Portanto, neste caso,  $\alpha$  será igual a 58°.

Ainda segundo CALIL (1990), quando se requer a descarga completa dos silos sem equipamentos adicionais, é recomendável adotar  $\alpha = 25^\circ + \Phi_{wts}$ , que

neste caso seria  $\alpha = 25^\circ + 23,5^\circ = 48,5^\circ$ . Considerando os dois valores obtidos acima, adotaremos no nosso projeto  $\alpha = 50^\circ$ .

Sobre dimensões da boca de descarga para tremonhas em fluxo de massa ou de funil, temos a considerar:

- ✓ o produto armazenado tende a formar um arco ou cúpula na saída da tremonha, como explicado no item 5.5.
- ✓ porém, vários autores estudaram a questão, e as conclusões mais recentes indicam que esse fenômeno ocorre em função do peso específico do produto armazenado, das dimensões do orifício de saída, da tensão de deslizamento inconfined ( $\sigma_c$ ) e do ângulo de inclinação da tremonha.
- ✓ para aberturas quadradas ou retangulares, JENIKE e JOHANSON publicaram artigo em GAYLORD (1984) (apud CALIL et al, 1997) sugerindo as seguintes dimensões:

$$b = \frac{1,3 \sigma_c}{\gamma} \dots\dots\dots(7)$$

sendo  $b$  a largura do orifício de saída ( boca de descarga).

- ✓ o valor de  $\sigma_c$  está relacionado aos conceitos de fator fluxo (  $ff$  ) e função de fluxo (  $FF$  )
- ✓ CALIL et al (1997) e CALIL (1990) explicam bem a questão: fator fluxo representa a relação entre a tensão de consolidação que pode ser desenvolvida em um arco ( $\sigma_1$ ) e a tensão atuante nos apoios de arco ( $\sigma_1^*$ ) e a relação entre a resistência que o produto armazenado adquire dentro do contorno da célula ou da tremonha versus a pressão de consolidação chama-se *função fluxo* (figura 46).

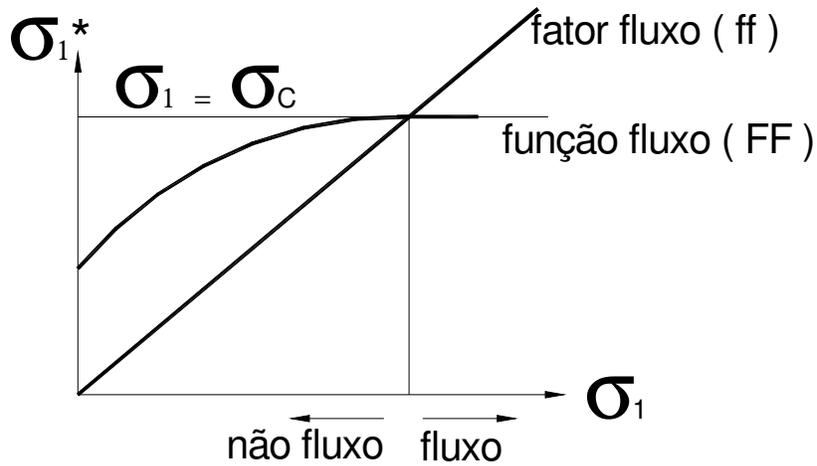


Fig. 46 – Função fluxo (FF) e fator fluxo (ff) para fluxo de massa.

$$ff = \frac{1 + \text{sen } \Phi_e}{\Delta} \quad \alpha + \Phi_{wt} \geq 45^\circ \dots\dots\dots(8)$$

$$ff = \frac{1 + \text{sen } \Phi_e}{\Delta} \text{sen } 2(\alpha + \Phi_w) \quad \alpha + \Phi_{wt} < 45^\circ \dots\dots\dots(9)$$

onde

$$\Delta = 2 \text{sen } \Phi_e \cdot \text{sen } 2(\alpha + \varepsilon) - \text{tg } \alpha [1 - \text{sen } \Phi_e \cdot \text{cos } 2(\alpha + \varepsilon)]$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\Phi_{wt} + \text{arc sen } (\text{sen } \Phi_{wt} / \text{sen } \Phi_e)]$$

Para se ter fluxo de massa por gravidade é necessário que  $\sigma_1/\sigma_c > ff$ .

Para o projeto dos silos em questão, onde a tremonha é tronco-piramidal com saídas duplas, e acabamento em concreto liso, é necessária uma adequação nos modelos matemáticos explicitados acima, o que não é objetivo deste trabalho.

Quando da execução da obra realizada, mostrada no capítulo 4, sub-item 4.2.8, houve um consenso, baseado em experiências anteriores deste autor e da equipe técnica da Pinhalense S/A Maquinas Agrícolas, em se adotar a largura dessas bocas de saída em 30cm em cada face, adaptando ao tamanho do registro mecânico de controle da vazão de saída, compatibilizando com a velocidade das esteiras transportadoras e evitando a formação do arqueamento, o que ficou comprovado após a construção dos silos e a utilização dos equipamentos. É importante acrescentar que os dois registros de saída abrem e fecham simultaneamente.

### 6.3 DEFINIÇÕES ARQUITETÔNICAS E GEOMÉTRICAS

Ao adotar silos multicelulares, geminados 2 a 2 (ver fig. 13), a largura que tem se mostrada adequada é de aproximadamente 10 metros (5,00 metros por célula). No sentido longitudinal, adota-se a mesma medida de 5,00 m por célula, podendo subdividi-las pela metade para facilitar a armazenagem dos vários tipos de café e sua transilagem.

A técnica da alvenaria estrutural indica que os valores geométricos das paredes sejam múltiplos de 0.40 m na horizontal e 0.20 m na vertical, mas poderá ser adotado outro valor, dentro das “famílias” dos blocos estruturais (Anexo A), o que será visto no sub-item 6.6 adiante.

Considerando-se um exemplo prático baseado nas medidas propostas acima, tem-se:

$$a = 5,00 \text{ m}$$

Voltando às figuras 24 e 25, tem-se:

$$b = 0,30 \text{ m}$$

portanto,

$$c = \frac{a - 2b}{4} = 1,10 \text{ m}$$

$$d = \frac{a - b}{2} = 2,35 \text{ m}$$

e 
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2,80}{2,35} = 1,191 \quad (\alpha = 50^\circ)$$

O volume de armazenagem da tremonha projetada, de acordo com a expressão (1), é dado por:

$$V_T = 0,23 \operatorname{tg} \alpha (a^3 - 1,461 b^3)$$

Portanto,  $V_T = 0,23 \times 1,191 \times 124,96 = 34,23 \text{ m}^3$ .

Adotando-se a massa específica do café beneficiado em  $680 \text{ kg/m}^3$  (ver item 2.2 e 5.3), a tremonha projetada deverá suportar  $23.276 \text{ kg}$  de grãos de café.

Na linguagem usual do setor cafeeiro, a unidade de medida sempre se refere a sacos de  $60 \text{ kg}$ . Portanto, neste caso, a tremonha armazenará aproximadamente  $387$  sacos de café.

Calculando-se o volume do cone superior  $V_c = \frac{a^3 \operatorname{tg} \varphi}{6}$  (ver item 4.2.7):

para  $\varphi = 30^\circ$  e  $a = 5,00 \text{ m}$ , obtém-se  $V_c = 12,03 \text{ m}^3$

e  $h_c = \frac{1}{2} a \operatorname{tg} \varphi = 1,44$  ( adotado  $h_c = 1,40 \text{ m}$  )

Como a massa específica do café beneficiado é  $680 \text{ kg/m}^3$ , esse volume representa em peso o valor de  $8.180 \text{ kg}$ , o que dá aproximadamente  $136$  sacos de café beneficiado.

A altura das células do silo é calculada em função da capacidade total de armazenamento desejada por cada célula, considerando-se as medidas até agora adotadas.

Por exemplo, para armazenar 2000 sacos, ou seja, 120 toneladas, já se sabe que na tremonha caberão 387 sacos e que no cone superior formado pelo ângulo de repouso do café caberão mais 136 sacos numa altura de aproximadamente 1,40m ( $h_c$ ), restando, portanto, 1.477 sacos, ou seja, 88.620 kg, ou ainda, 130,32 m<sup>3</sup> a serem confinados nesta célula, o que implica numa altura ( $h_e$ ) de aproximadamente 5,30 metros (foi adotada uma altura de 5,40 m).

Seguindo as referências apresentadas na figura 30, a forma geométrica da célula fica de acordo com o desenho apresentado na figura 47.

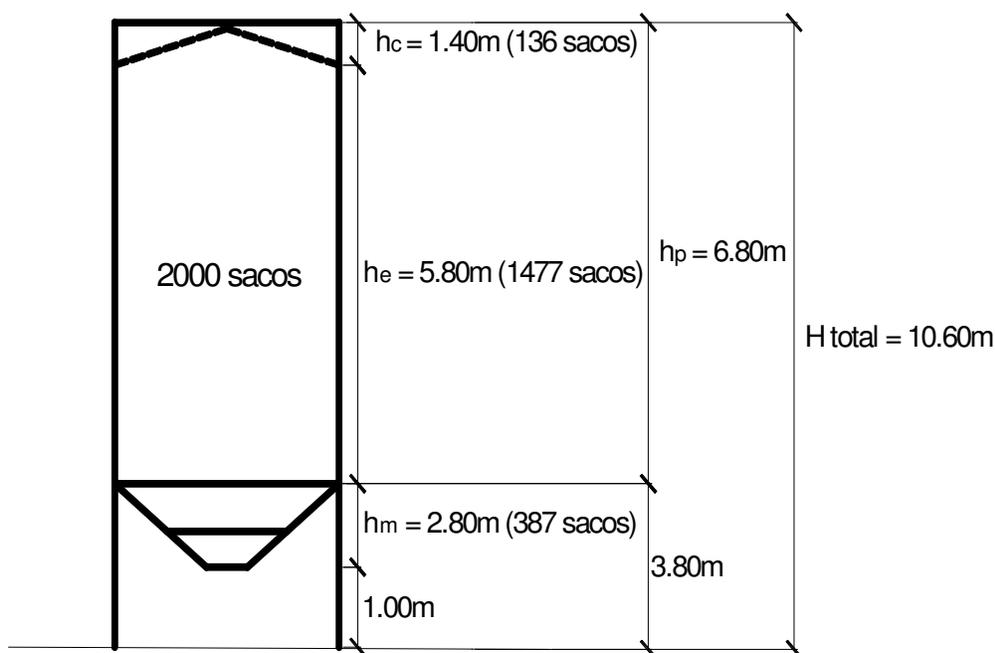


Fig. 47– Esquema geométrico de uma célula com capacidade para dois mil sacos de café.

Analogamente, a tabela 05 define os valores para a altura da célula ( $h_p$ ) necessária para a armazenagem de vários volumes de café.

Tabela 05 - Relação entre volume armazenado e dimensões da célula

VOLUME		ALTURA DA CÉLULA (m)			
Sacos 60 kg	Peso (tonelada)	$h_c$	$h_e$	$h_p$	H Total
2500	150	1,40	7,00	8,40	11,20
2000	120	1,40	5,40	6,80	10,60
1500	90	1,40	3,60	5,00	7,80
1000	60	1,40	1,80	3,20	6,00

Os valores definidos para as alturas ( $h_e$  e  $h_p$ ) foram arredondados para múltiplos de 0,20m em razão da modulação da alvenaria estrutural.

## 6.4 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

### 6.4.1 Pressões

Após a análise das principais teorias para o cálculo das pressões estáticas e das normas internacionais pertinentes sobre o assunto, como foi visto no item 5.1, e ainda, por não haver norma brasileira que aborde este tema, optou-se por adotar nos procedimentos de cálculo das pressões para as paredes e para as tremonhas, a norma americana ACI 313 -97 *Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Tubes for Storing Granular Materials (1997)*, que se baseia na Teoria de Janssen.

A figura 48, abaixo, servirá para esclarecer as formulações apresentadas a seguir:



y = profundidade do produto ensilado dentro do corpo da célula

h<sub>y</sub> = profundidade do produto ensilado dentro da tremonha.

Para as paredes das células:

a pressão vertical à profundidade y é dada por:

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k} \left( 1 - e^{-\mu' k y / R} \right) \dots\dots\dots(10)$$

a pressão horizontal à profundidade y é dada por:

$$p = k q \dots\dots\dots(11)$$

sendo  $k = 1 - \text{sen } \Phi$  , onde  $\Phi$  é o ângulo de atrito interno

a força de atrito vertical total por unidade de comprimento na seção perimetral da parede é dada por:

$$F_a = (\gamma y - q) R \dots\dots\dots(12)$$

As seguintes condições de cálculo devem ser observadas:

- (a) menor valor de  $\mu'$  e menor valor de K para a maior pressão vertical q.
- (b) menor valor de  $\mu'$  e maior valor de K para a maior pressão horizontal p.
- (c) maior valor de  $\mu'$  e maior valor de K para a maior força de atrito F<sub>a</sub>.

Para as tremonhas, a norma estabelece as equações abaixo para as pressões decorrentes do produto ensilado sem movimentação (carga estática). Todas as normas, porém, confirmam que as maiores pressões ocorrem na descarga do produto justamente na região de ligação das paredes com a estrutura da tremonha.

Para o produto em repouso a pressão vertical à profundidade  $h_y$ , abaixo do topo da tremonha é dada por:

$$q_y = q_0 + \gamma h_y \dots\dots\dots(13)$$

onde  $q_0$  =pressão vertical no topo da tremonha calculada através da equação (10)

A pressão normal à superfície da tremonha à profundidade  $h_y$  ( $p_n$ ) deve ser o maior valor entre :

$$p_n = q_y \operatorname{tg} \theta / ( \operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \Phi' ) \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{e } p_n = q_y ( \operatorname{sen}^2 \theta + k \operatorname{cos}^2 \theta ) \dots\dots\dots(15)$$

A força de atrito por unidade de área da superfície da parede da tremonha  $v_n$  é dada por:

$$v_n = p_n \cdot \operatorname{tg} \Phi' \dots\dots\dots(16) \quad \text{quando a equação (14) for a usada}$$

$$\text{ou } v_n = q_y ( 1 - k ) \operatorname{sen} \theta \operatorname{cos} \theta \dots\dots\dots(17) \quad \text{quando a equação (15) for a usada.}$$

Porém, para silos projetados com fluxo de massa ocorrem pressões adicionais na transição da parede com a tremonha de forma bastante acentuada. Diante disto, a ACI 313-97 determina que as pressões verticais aplicadas na superfície da tremonha, a uma profundidade  $h_y$ , seja calculada segundo a equação:

$$q_y = \frac{\gamma}{n-1} (h_m - h_y) \left\{ 1 - \left( \frac{h_m - h_y}{h_m} \right)^{n-1} \right\} + q_0 \left( \frac{h_m - h_y}{h_m} \right)^n \dots\dots\dots(18)$$

onde  $q_0$  é calculada pela equação (12) e  $n = B / \operatorname{tg} \theta$  ( mas nunca menor que 1),

$$\text{e } B = \operatorname{sen} \Phi \operatorname{sen} 2(\theta + \beta) \dots\dots\dots(19)$$

$$\text{e } \beta = \frac{1}{2} (\Phi_w + \operatorname{arc} \operatorname{sen} ( \operatorname{sen} \Phi_w / \operatorname{sen} \Phi )) \dots\dots\dots(20)$$

Por decorrência, o cálculo da pressão normal à superfície da tremonha é dado por:

$$p_n = q_y ( 1 + \text{sen } \Phi \cos 2 \beta ) / ( 1 - \text{sen } \Phi \cos 2 ( \theta + \beta ) ) \dots \dots \dots (21)$$

A figura 49 indica essas pressões em fluxo de massa.

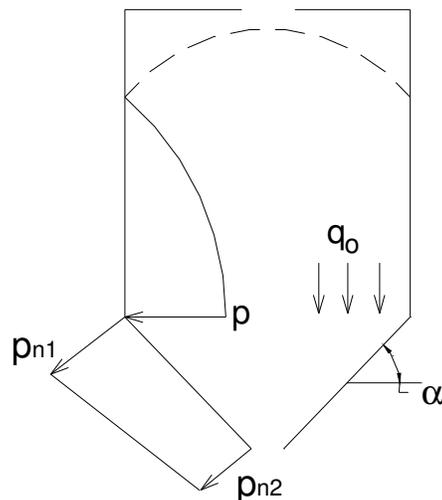


Fig. 49 – Pressões normais à superfície da tremonha em fluxo de massa. (fonte ACI 313-97)

#### 6.4.2 Células prismáticas

Após a definição das ações que atuam nas células e em função da arquitetura dos silos multicelulares de células prismáticas (quadradas ou retangulares) adotada no presente trabalho, duas situações críticas de carregamento são definidas:

- ✓ carregamento na célula unitária
- ✓ carregamento no conjunto de células

Para a célula unitária construída em paredes de alvenaria estrutural e fechamento superior em laje pré-moldada, com capeamento em concreto e tremonhas

de saída dupla construídas em painéis treliçados pré-moldados com capeamento em concreto, considera-se o seguinte esquema estático:

(a) para células quadradas

- ✓ considera-se uma faixa horizontal da parede da célula e de altura unitária, e as ações que agem sobre ela.
- ✓ nesta faixa, devido à pressão horizontal  $p$ , são gerados os momentos de engastamento  $M_e$  e os esforços de tração  $T$  (fig. 50 ).
- ✓ devido ao peso total do produto ensilado  $V$ , são geradas as tensões de compressão na espessura desta faixa de parede.
- ✓ devido à força de tração  $T$  surgem as tensões de tração horizontal

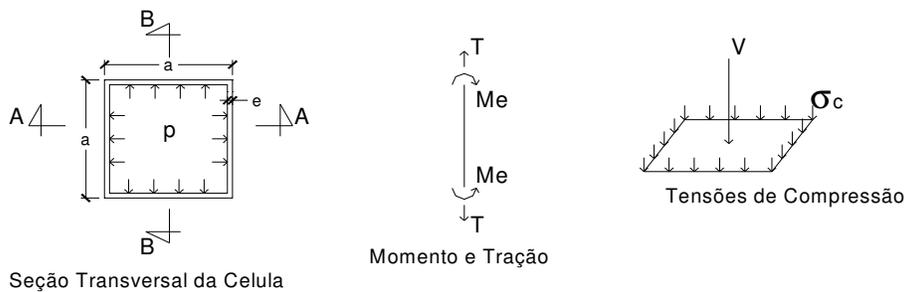


Fig. 50 – Esquema estático das ações e esforços.

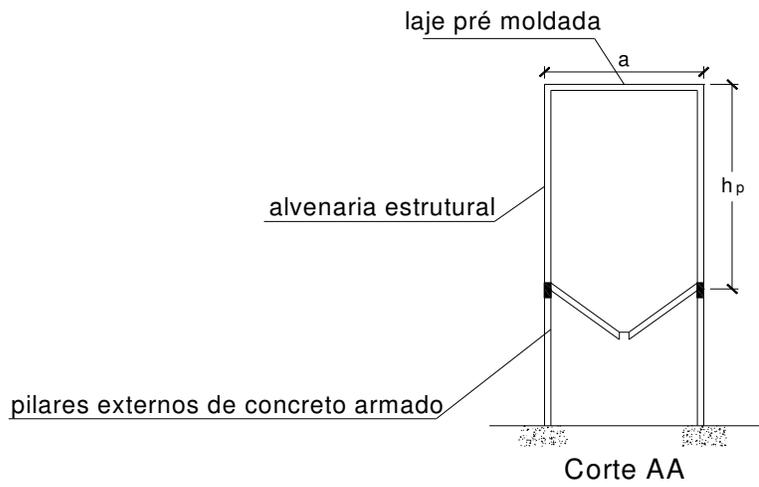


Fig. 51 – Corte longitudinal de uma célula

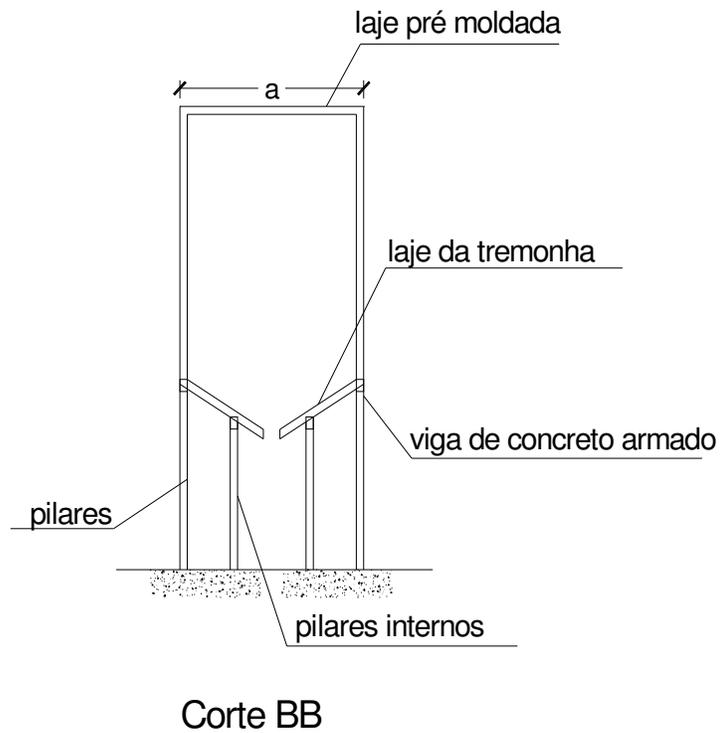
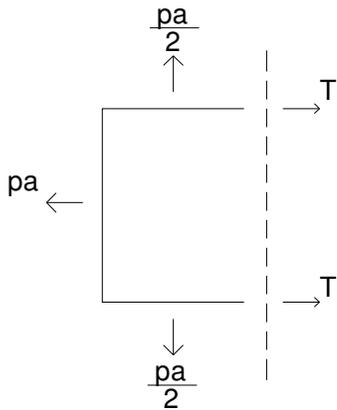


Fig. 52 – Corte transversal da célula.



Força atuando na metade da célula

$\sigma_t$  = tensões de tração nas paredes

$e$  = espessura da parede

$$2T = pa$$

$$T = \frac{pa}{2}$$

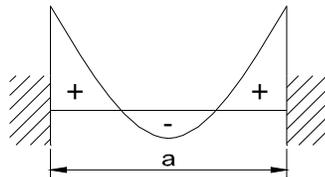
$$\frac{T}{pa} = \frac{1}{2} = 0.50$$

$$\sigma_t = \frac{T}{e} \rightarrow T = \sigma_t \cdot e$$

$$\frac{\sigma_t}{pa} \cdot e = 0.50$$

A tensão de Compressão é :

$$\sigma_c = \frac{V}{4 a e}$$

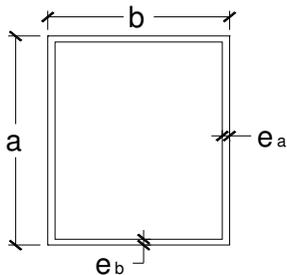


$$M_e = \frac{pa^2}{12}$$

$$\frac{pa^2}{12}$$

$$M_m = \frac{pa^2}{24}$$

(b) para células retangulares



$$\sigma_{ta} = \frac{p_b \cdot b}{2 e_a}$$

$$\sigma_{tb} = \frac{p_a \cdot a}{2 e_b}$$

$\sigma_{ta}$  = tensão de tração na parede de dimensão a

$\sigma_{tb}$  = tensão de tração na parede de dimensão b

$a$  = dimensão maior da seção

$b$  = dimensão menor da seção

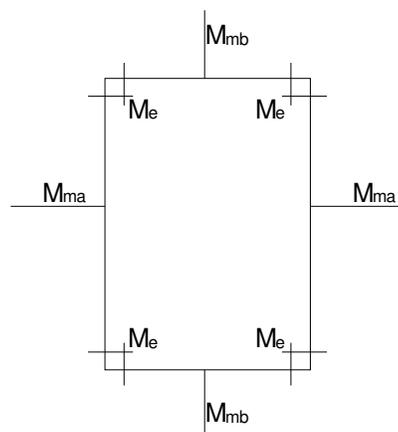
$p_a$  = pressão horizontal na parede de dimensão  $a$

$p_b$  = pressão horizontal na parede de dimensão  $b$

$e_a$  = espessura de parede de dimensão  $a$

$e_b$  = espessura de parede de dimensão  $b$

Segundo REIMBERT (1971), os momentos nestas seções retangulares podem ser calculados da seguinte forma:


$$M_e = \frac{p_a \cdot a^2 K + p_b \cdot b^2}{12 (K + 1)}$$
$$M_{ma} = M_e - \frac{p_a \cdot a^2}{8}$$
$$M_{mb} = M_e - \frac{p_b \cdot b^2}{8}$$
$$K = \frac{I_b \cdot a}{I_a \cdot b}$$

$M_e$  = momento fletor nas extremidades das faixas das paredes

$M_{ma}$  = momento fletor no meio da faixa de parede de dimensão  $a$ .

$M_{mb}$  = momento fletor no meio da faixa de parede de dimensão  $b$ .

$I_a$  = momento de inércia da seção transversal da faixa de parede de dimensão  $a$  em relação ao eixo principal contido na superfície média da parede.

$I_b$  = momento de inércia da seção transversal da faixa de parede de dimensão  $b$  em relação ao eixo principal contido na superfície média da parede.

As tensões de compressão nas seções transversais das paredes são:

$$\sigma_{ca} = \frac{V_a}{a \cdot e_a} \quad \sigma_{cb} = \frac{V_b}{b \cdot e_b}$$

onde:

$\sigma_{ca}$  = tensão de compressão na parede de dimensão a.

$\sigma_{cb}$  = tensão de compressão na parede de dimensão b.

$V_a$  = força vertical na parede de dimensão a

$V_b$  = força vertical na parede de dimensão b

$e_a$  = espessura da parede do lado a

$e_b$  = espessura da parede do lado b

Esforços secundários também ocorrem ao longo das paredes, principalmente em virtude de estarem assentadas sobre vigas de concreto que se apóiam em pilares discretos. Além dos momentos fletores considerados acima, outros momentos fletores aparecem ao longo do plano vertical das paredes. Na região de ligação entre essas paredes e as vigas de sustentação é que se concentram as maiores tensões, que podem ser determinadas considerando a parede como placa com a mesma vinculação e submetida ao mesmo carregamento da parede. Não se encontram na bibliografia expressões ou tabelas que forneçam as tensões numa placa submetida a um carregamento igual ao produzido pelo produto ensilado, podendo-se utilizar resultados obtidos por carregamentos semelhantes.

Como alternativa pode-se adotar as expressões definidas por GUERRIN (s/d) que analisa o caso de reservatório com laje de cobertura cuja direção preponderante é a vertical. Três casos são possíveis, conforme o tipo de apoio:

- ✓ parede articulada em cima e em baixo,
- ✓ parede engastada em cima e em baixo,
- ✓ parede articulada em cima e engastada em baixo.

A dificuldade prática reside na adoção do caso mais apropriado para o tipo de silo estudado (paredes de alvenaria estrutural sobre vigas e pilares de concreto armado). Admitiremos o 3º caso como o mais apropriado para a situação ora

considerada. GUERRIN (s/d) formulou as equações baseadas na teoria hidrostática e que resultaram no gráfico da figura 53 e nas fórmulas abaixo:

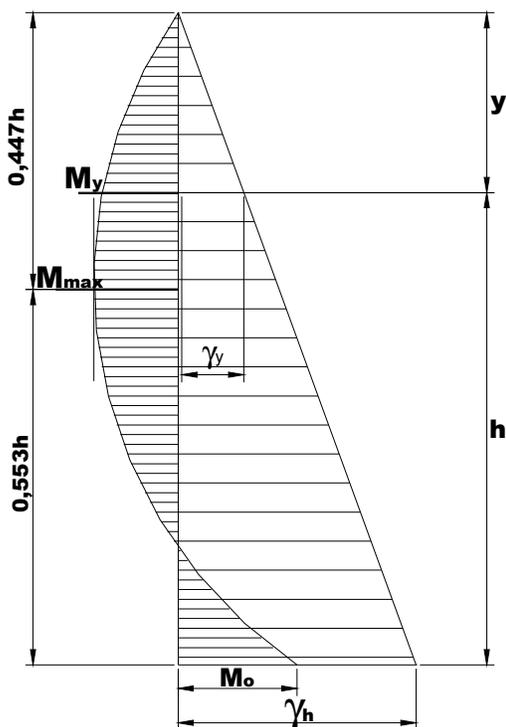


Fig. 53 – Gráfico indicando articulação em cima e engastamento embaixo, pressão hidrostática e momento (GUERRIN, s /d)

✓ para as reações de apoio:

$$\text{em cima} \dots\dots\dots R_s = (\gamma \cdot h) \cdot H / 10 \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{em baixo} \dots\dots\dots R_i = (\gamma \cdot h) \cdot 2 h / 5 \dots\dots\dots (23)$$

✓ para os momentos fletores :

$$M_x = (\gamma \cdot h) \frac{h x}{2} \left[ \frac{1}{5} - \frac{x^2}{3 h^2} \right] \dots\dots\dots (24)$$

$$M_o = - (\gamma \cdot h) \cdot \frac{h}{15} \dots\dots\dots (25)$$

momento máximo positivo para  $x = 0,447 h$

$$M_{\max} = (\gamma \cdot h) \frac{h}{33,6} \dots\dots\dots(26)$$

✓ para o esforço cortante  $T_c$ :

$$T_c = (\gamma \cdot h) \frac{h}{2} \left[ \frac{1}{5} - \frac{x^2}{h^2} \right] \dots\dots\dots(27)$$

Para o cálculo dos esforços nas paredes do silo, o fator  $(\gamma \cdot h)$  das fórmulas acima deverá ser substituído pelo valor da pressão horizontal equivalente  $p_{\text{hequiv}}$ . A pressão horizontal equivalente corresponde ao valor obtido através da integral da curva das pressões horizontais com relação ao eixo da profundidade  $y$ , dividido por  $y/2$  (considerando-se a equivalência do gráfico com a da teoria hidrostática), ou seja:

$$(p_{\text{hequiv}} \cdot y) / 2 = \int k \left( \frac{\gamma R}{\mu' k} (1 - e^{-\mu' k y / R}) \right) \dots\dots\dots(28)$$

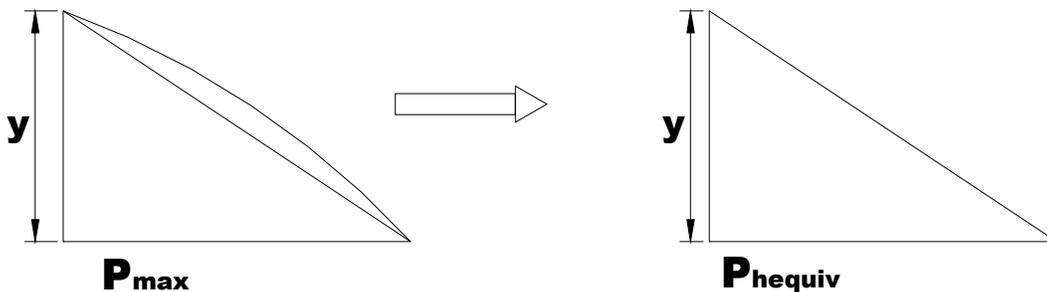


Fig. 54 – Equivalência das pressões para cálculo dos esforços através das fórmulas de GUERRIN (s /d).

No sistema de células geminadas a análise da tração deve ser feita considerando a tração devida à reação das duas paredes adjacentes (figura 55):

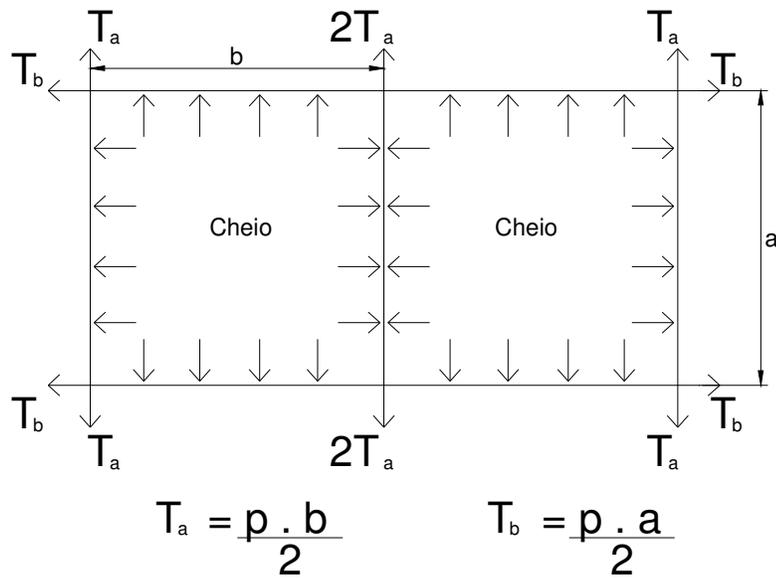


Fig. 55 – Tração nas células.

Quanto às forças de atrito:

- ✓ para silos retangulares a força de atrito de uma parede de lado  $\underline{a}$  é diferente da força de atrito de uma parede de lado  $\underline{b}$ .
- ✓ quando a parede é geminada, ou seja, tem célula de armazenamento em ambos os lados, as forças de atrito ocorrem dos dois lados (figura 56).

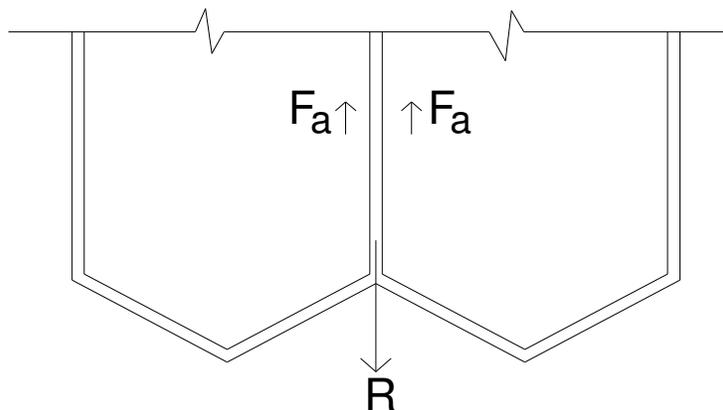


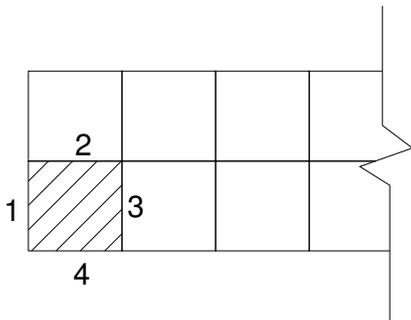
Fig. 56 – Força de atrito nas células.

A força  $R$  é a resultante das reações devidas às forças de atrito, mais a somatória do peso próprio da parede com a reação da laje de apoio superior e do peso dos equipamentos que estiverem apoiados nessa parede.

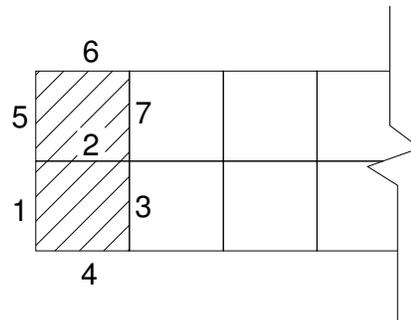
No caso de um conjunto de células (silos multicelulares), outro fator importante nos cálculos é a hipótese de se considerar células cheias (com carga estática), células em descarga e células vazias em suas várias opções, como é a situação do sistema proposto neste trabalho. O dimensionamento das paredes deve ser feito pela envoltória dos esforços.

A figura 57 indica as várias situações que podemos encontrar para o dimensionamento dos silos.

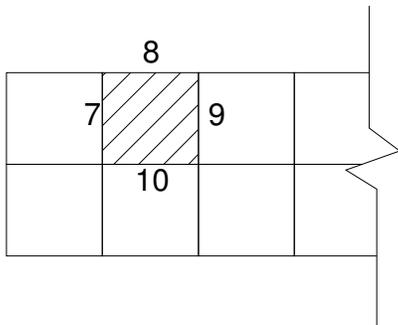
Hipótese ( A )



Hipótese ( B )



Hipótese ( C )



Hipótese ( D )

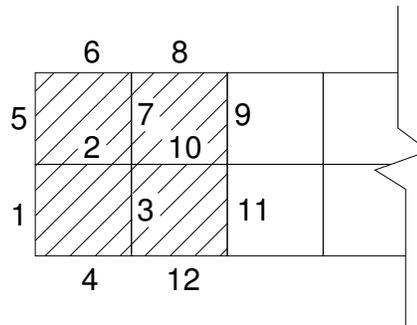


Fig. 57 – Hipóteses de enchimento das células.

Para se calcular as combinações críticas de carregamento das células para a quantificação dos valores das tensões horizontais, dos momentos fletores, e das cortantes precisam ser consideradas várias situações de células cheias, em descarga e células vazias.

É difícil saber quais células devem ser carregadas e quais esvaziadas para se conhecer as piores condições de momentos fletores, cortantes e tensões. A complexidade é grande, porém, a solução pode ser obtida com a utilização de ferramentas computacionais.

Às vezes o maior valor de momento ocorre numa determinada situação de carregamento, porém, o maior valor de força coaxial ocorre em outra situação. Os valores críticos não ocorrem simultaneamente.

A particularidade deste sistema de silos para café é que nunca ocorre o carregamento e o descarregamento simultâneo de 2 ou mais células numa mesma linha, pois a esteira transportadora dos cafés só opera para 1 célula de cada vez. A figura 58 explica melhor:

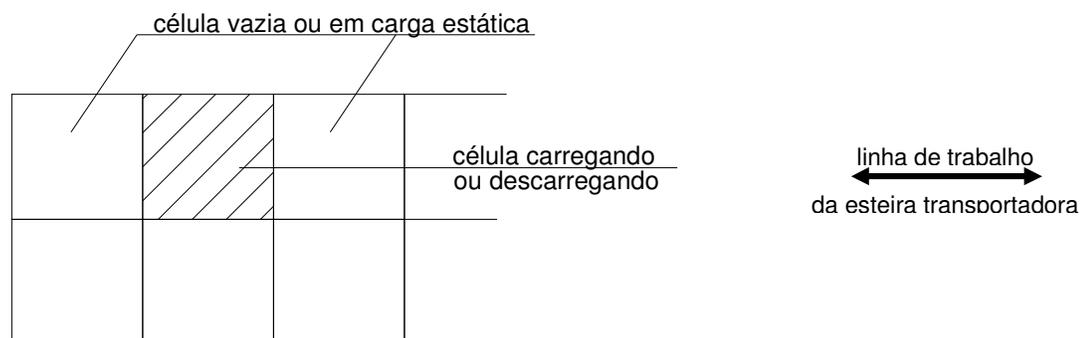


Fig. 58 – Esquema de carga / descarga das células.

De qualquer forma, para os esforços devem ser considerados os mesmos cálculos obtidos para uma célula unitária e deve-se verificar se esses esforços se anulam ou se somam, para cada caso.

### 6.4.3 Tremonhas tronco-piramidais

Essas tremonhas são projetadas em lajes tipo painéis treliçados com capeamento em concreto e são engastadas e / ou apoiadas em vigas de sustentação, conforme figuras 59 e 60.

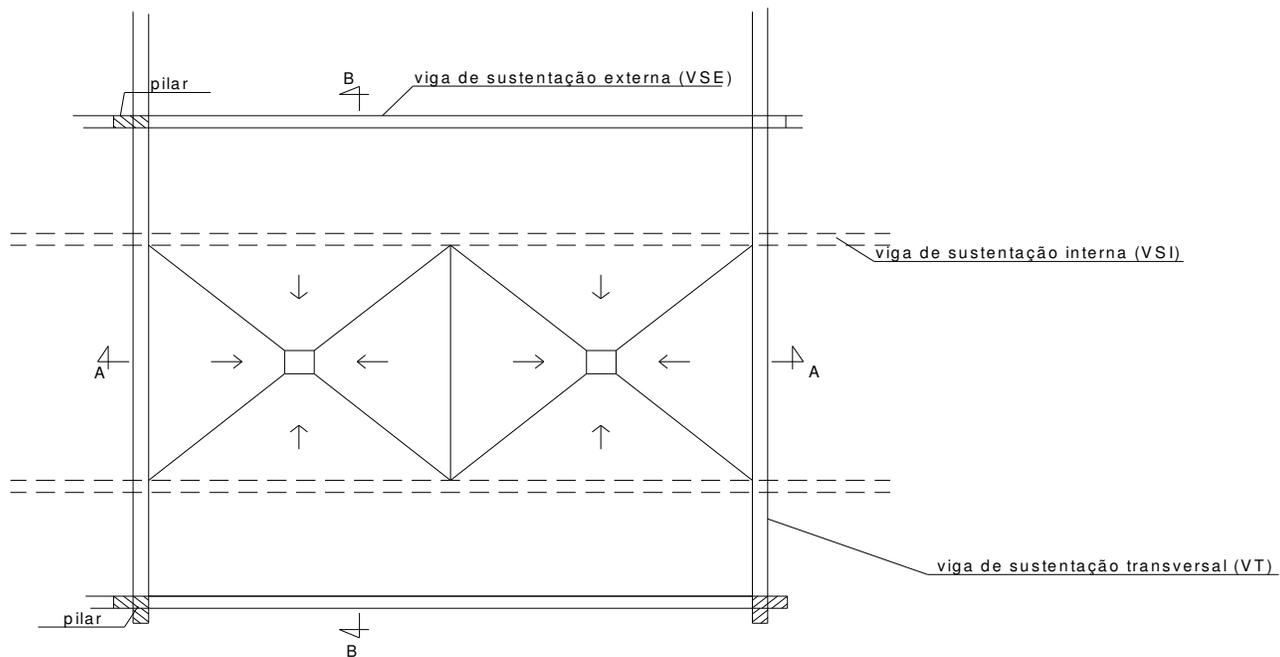


Fig. 59 – Esquema de tremonha em planta.

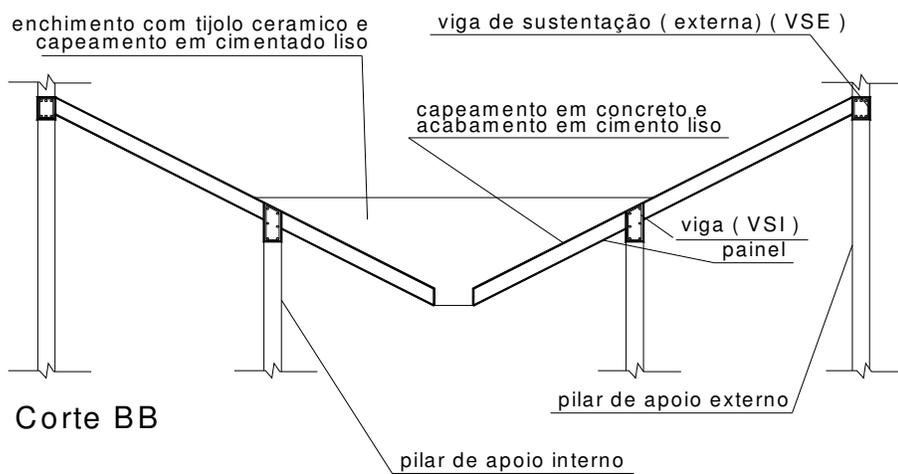


Fig. 60 – Corte transversal da tremonha.

Após a concretagem dos painéis treliçados é feito o enchimento de tijolos cerâmicos, assentados de forma a dar as declividades projetadas. A figura 61 indica o enchimento cônico.

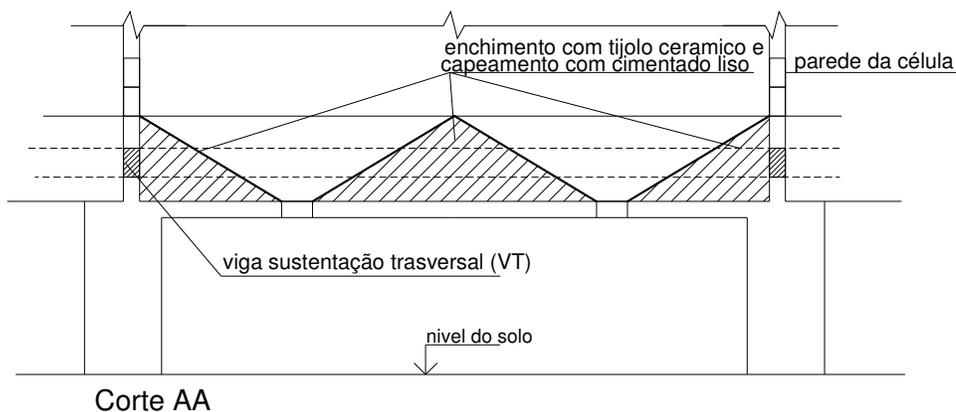
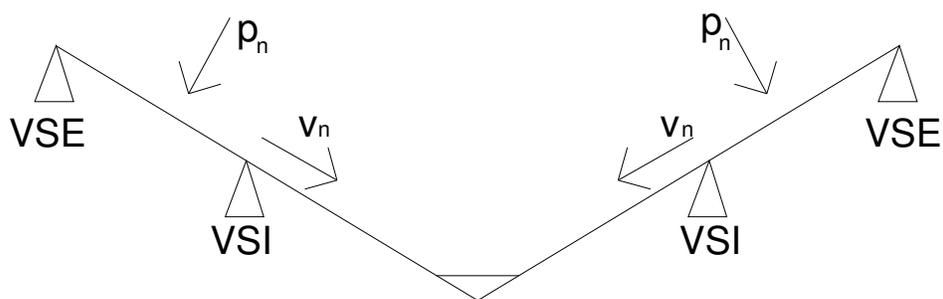


Fig. 61 – Corte Longitudinal da tremonha

O esquema estático da laje pré – moldada tipo painel para a tremonha em silo de uma única célula será:

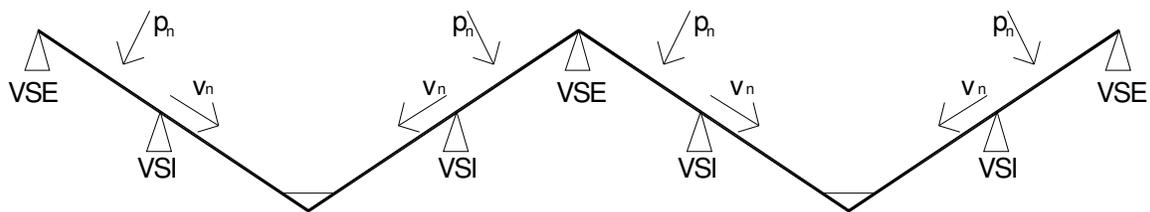


onde,

$p_n$  = carregamento na direção perpendicular à laje da tremonha

$v_n$  = carregamento na direção da geratriz da laje da tremonha.

E para silos geminados 2 a 2, será:



#### 6.4.4 Vigas de sustentação e pilares de apoio

A estrutura de apoio das células dos silos é composta pelas vigas de sustentação externa (VSE), vigas de sustentação interna (VSI-1 e VSI-2), vigas de sustentação transversal (VT), pilares de apoio externos e pilares de apoio internos.

Esse esqueleto estrutural pode ser analisado como um pórtico espacial, formado por elementos verticais, horizontais e inclinados. A figura 62 representa o esquema estático tridimensional de uma parte do silo e a figura 63 representa o esquema estático na seção transversal do silo.

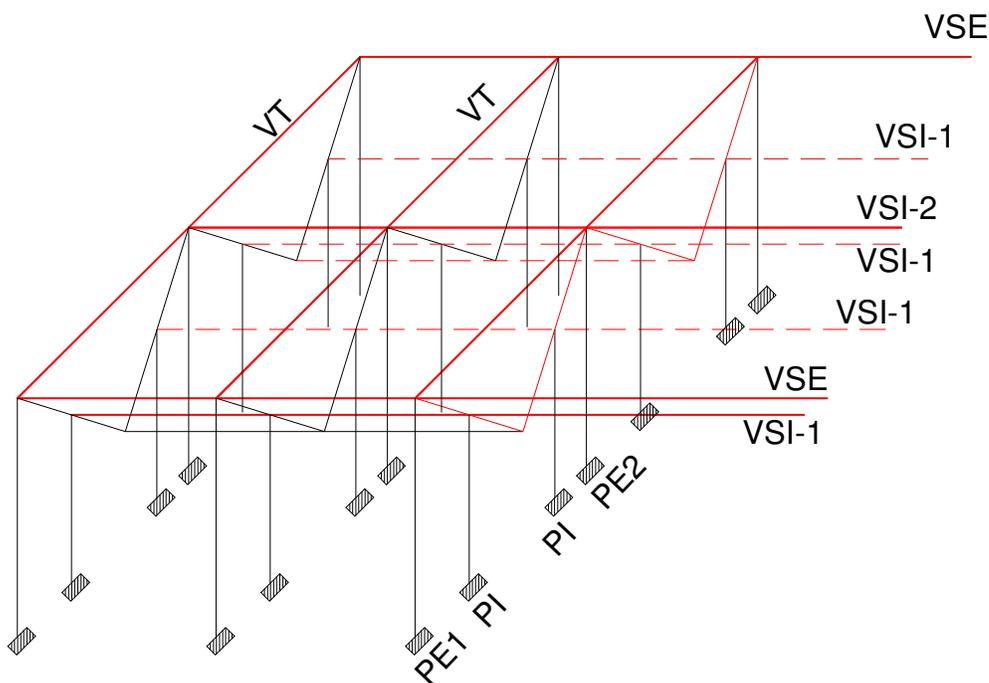


Fig. 62 – Visão espacial do pórtico

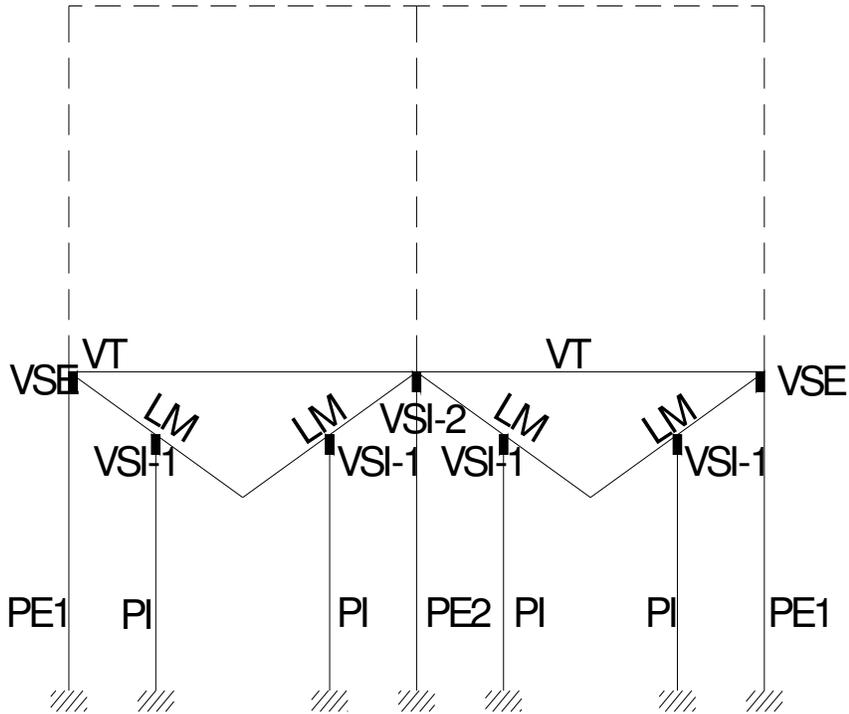


Fig. 63 – Seção transversal do silo multicelular

As vigas transversais (VT) e longitudinais (VSE e VSI-2) recebem o peso próprio das paredes das células, as respectivas reações das lajes de cobertura dessas células e os esforços provenientes das pressões horizontais e verticais do café ensilado, além das reações provenientes das lajes das tremonhas (LM).

As vigas longitudinais VSI-1 recebem apenas as cargas das lajes das tremonhas (LM).

As reações de apoio dessas vigas são transmitidas aos pilares PE1, PI e PE2.

Os cálculos deverão contemplar as condições mais desfavoráveis, conforme já explicado no item 6.4.1. A resultante da envoltória desses esforços será utilizada para o dimensionamento das vigas e pilares.

O efeito do vento também será considerado nesta fase.

## 6.5 CÁLCULOS E RESULTADOS

São consideradas para os cálculos as dimensões do projeto dos silos graneleiros em questão, ou seja, células quadradas com largura útil de  $a = 5.00\text{m}$  e altura da tremonha  $h_m = 2,80\text{ m}$ .

A altura das paredes da célula poderá variar dependendo da capacidade desejada, como já visto em 6.3.

Para efeito de ilustração deste trabalho, tomam-se como exemplo as células de capacidade para 2000 sacos:  $h_p = 6,80\text{ m}$  (figura 47).

Do capítulo 6, sub-item 6.4.1, para o cálculo das pressões horizontais nas paredes de células quadradas, tem-se as equações:

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k} \left[ 1 - e^{-\mu' k y / R} \right] \dots\dots\dots(29)$$

$$p = k q \dots\dots\dots(30)$$

$$F_a = (\gamma y - q) R \dots\dots\dots(31)$$

sendo  $k = 1 - \text{sen } \Phi$

Para o cálculo do raio hidráulico R, a norma ACI 313-97 determina:

- ✓ para células poligonais regulares  $R = d_e / 4$   
onde  $d_e$  = diâmetro do círculo de área equivalente à área interna da célula poligonal
- ✓ para células retangulares:  
 $R = a / 4$  ..... para calcular a pressão no lado menor

$R = 2 a b (a+b) / 4$  ..... para calcular a pressão no lado maior

Os valores das pressões verticais e horizontais e das forças de atrito são apresentados na tabela 06. Os valores utilizados para as propriedades físicas do café foram extraídos do item 6.2. A tabela A indica os resultados considerando-se o valor do ângulo de atrito com a parede inferior  $\Phi_{wpi}$  e o ângulo de atrito interno superior  $\Phi_{es}$ , a tabela B indica os resultados considerando-se o valor do ângulo de atrito com a parede superior  $\Phi_{wps}$  e o ângulo de atrito interno inferior  $\Phi_{ei}$  e a tabela C indica os resultados considerando-se o valor do ângulo de atrito com parede inferior  $\Phi_{wpi}$  e o ângulo de atrito interno inferior  $\Phi_{ei}$ .

Tabela 06 – Pressões verticais, horizontais e força de atrito em uma célula, para café beneficiado a granel em repouso.

	Ângulo de atrito com a parede (graus)	Ângulo de atrito interno (graus)	Profundidade do grão na célula			Pressão vertical à profundidade de y	Pressão horizontal à profundidade de y	Força de atrito vertical por unidade de comprimento de parede
<i>T</i>	$\Phi_{wpi}$	$\Phi_{es}$	<i>y</i> (m)	$tg\phi_{wpi}$	$k = 1 - \text{sen } \Phi_{es}$	<i>q</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>p</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>V</i> ( kN/m )
<i>A</i>	28,5	36,5	0,00	0,54296	0,4052	<b>0,00</b>	0,00	0,00
<i>B</i>	28,5	36,5	1,00	0,54296	0,4052	<b>6,24</b>	2,53	0,71
<i>E</i>	28,5	36,5	2,00	0,54296	0,4052	<b>11,46</b>	4,65	2,67
<i>L</i>	28,5	36,5	3,00	0,54296	0,4052	<b>15,85</b>	6,42	5,69
<i>A</i>	28,5	36,5	4,00	0,54296	0,4052	<b>19,53</b>	7,91	9,59
	28,5	36,5	5,00	0,54296	0,4052	<b>22,61</b>	9,16	14,24
<i>A</i>	28,5	36,5	5,40	0,54296	0,4052	<b>23,10</b>	9,60	16,27
<i>T</i>	$\Phi_{wps}$	$\Phi_{ei}$	<i>y</i> (m)	$tg\phi_{wps}$	$k = 1 - \text{sen } \Phi_{es}$	<i>q</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>p</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>V</i> ( kN/m )
<i>A</i>	31,0	35,0	0,00	0,60086	0,4264	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<i>B</i>	31,0	35,0	1,00	0,60086	0,4264	6,15	2,62	<b>0,81</b>
<i>E</i>	31,0	35,0	2,00	0,60086	0,4264	11,16	4,76	<b>3,05</b>
<i>L</i>	31,0	35,0	3,00	0,60086	0,4264	15,24	6,50	<b>6,45</b>
<i>A</i>	31,0	35,0	4,00	0,60086	0,4264	18,56	7,92	<b>10,80</b>
	31,0	35,0	5,00	0,60086	0,4264	21,27	9,07	<b>15,91</b>
<i>B</i>	31,0	35,0	5,40	0,60086	0,4264	22,21	9,77	<b>18,14</b>
<i>T</i>	$\Phi_{wpi}$	$\Phi_{ei}$	<i>y</i> (m)	$tg\phi_{wpi}$	$k = 1 - \text{sen } \Phi_{es}$	<i>q</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>p</i> ( kN/m <sup>2</sup> )	<i>V</i> ( kN/m )
<i>A</i>	28,5	35,0	0,00	0,54296	0,4264	0,00	<b>0,00</b>	0,00
<i>B</i>	28,5	35,0	1,00	0,54296	0,4264	6,21	<b>2,65</b>	0,74
<i>E</i>	28,5	35,0	2,00	0,54296	0,4264	11,37	<b>4,85</b>	2,79
<i>L</i>	28,5	35,0	3,00	0,54296	0,4264	15,65	<b>6,67</b>	5,94
<i>A</i>	28,5	35,0	4,00	0,54296	0,4264	19,21	<b>8,19</b>	9,98
	28,5	35,0	5,00	0,54296	0,4264	22,17	<b>9,45</b>	14,79
<i>C</i>	28,5	35,0	5,40	0,54296	0,4264	23,21	<b>9,90</b>	16,89

Adotando os valores dos coeficientes de sobrepressão  $C_d$  da tabela 05 , para silos multicelulares, baseado na teoria de Janssem, e sendo  $H / a \cong 1,50$  m , tem-se:

✓ para o trecho superior com extensão  $H_1 = 5,00 \times tg 30^\circ = 2,89$  m  $> 1/3$  H

portanto  $H_1 = 1/3$  H = 1,90 m  $\Rightarrow C_{d1} = 1,35$ ;

✓ para o trecho inferior com extensão  $2/3 H$  .....  $\Rightarrow C_{d2} = 1,50$ .

Considerando o escoamento para fluxo de massa, acresce-se de 10 a 25% os valores acima (vide item 5.4), resultando nos coeficientes finais de sobrepressão  $C_{d1}$  entre 1,48 e 1,68 e para  $C_{d2}$  entre 1,65 e 1,87 , que poderão ser usados para multiplicar os valores de  $p$  ,  $q$ , e  $F_a$  para o cálculo das pressões e força de atrito na descarga do café, segundo Safarian (1985).

Porém, de acordo com a norma americana ACI - 313-97, conforme já visto em 5.4, pode-se adotar os coeficientes de sobrepressão para as paredes em 1,50.

Comparando-se os resultados das tabelas A, B e C verifica-se que os maiores valores para as pressões verticais estáticas foram obtidos nas condições da tabela A, os maiores valores para as pressões horizontais estáticas foram obtidos nas condições da tabela C e os maiores valores da força de atrito vertical foram os da tabela B. Os gráficos da figura 64 relacionam essas situações, ou seja, mostram a relação das pressões horizontais estáticas com a profundidade do café na célula pela tabela C, e as forças de atrito com a profundidade do café na célula pela tabela B.

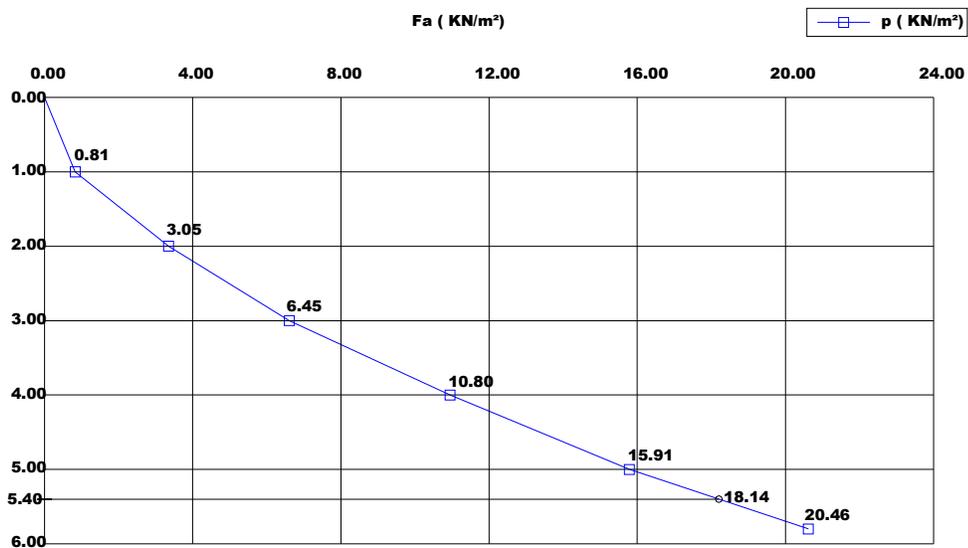
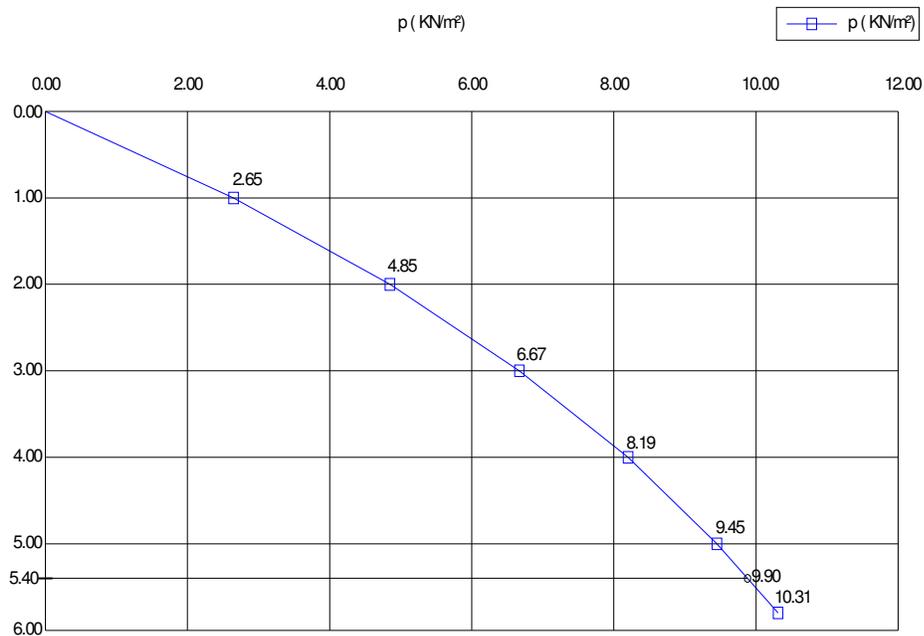


Fig. 64 – Gráfico das pressões horizontais com a profundidade do café na célula, e da força de atrito com a profundidade do café na célula.

Para o cálculo das pressões nas superfícies da tremonha, será adotado as equações estabelecidas pela norma ACI 313-97, cuja formulação simplifica bastante os cálculos das pressões:

$$q_y = q_0 + \gamma h_y \dots\dots\dots(32)$$

$$\text{maior valor entre : } p_n = q_y \text{ tg}\theta / ( \text{tg}\theta + \text{tg } \Phi' ) \dots\dots\dots(33)$$

$$p_n = q_y ( \text{sen}^2 \theta + k \text{cos}^2 \theta ) \dots\dots\dots(34)$$

$$v_n = p_n \cdot \text{tg}\Phi' \dots\dots\dots(35) \quad \text{quando a equação (33) for a usada}$$

$$\text{ou } v_n = q_y ( 1 - k ) \text{tg}\theta \text{cos}\theta \dots\dots\dots(36) \quad \text{quando a equação (34) for a usada.}$$

Os resultados foram obtidos na tabela 07, considerando-se a condição de maior valor para  $q_0$ .

Tabela 07 – Pressões verticais, horizontais e força de atrito nas paredes da tremonha, para café beneficiado em repouso.

Dados : $\alpha = 50^\circ$ , $\theta = 40^\circ$ , $\gamma = 6,8 \text{ kN/m}^3$ e $q_0 = 24,72 \text{ kN/m}^2$									
Ângulo de atrito com a parede da tremonha (em graus)	Ângulo de atrito interno (em graus)	Altura da tremonha					Pressão vertical à profundidade y	Pressão horizontal à profundidade y	Força de atrito vertical por unidade de comprimento de parede
$\Phi_{wti}$	$\Phi_{es}$	y (m)	$\text{tg}\Phi_{wti}$	$k=1-\text{sen}\Phi_{es}$	$\text{tg}\theta / (\text{tg}\theta + \text{tg}\Phi_{es})$	$\text{sen}^2\theta + \text{cos}^2\theta$	$q_y$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p_n$ (kN/m <sup>2</sup> )	$v_n$ (kN/m)
22,5	36,5	0,00	0,414214	0,4052	0,5314	0,6510	<b>24,72</b>	<b>16,09</b>	<b>7,24</b>
22,5	36,5	1,00	0,414214	0,4052	0,5314	0,6510	<b>31,52</b>	<b>20,52</b>	<b>9,23</b>
22,5	36,5	2,00	0,414214	0,4052	0,5314	0,6510	<b>38,32</b>	<b>24,95</b>	<b>11,22</b>
22,5	36,5	2,80	0,414214	0,4052	0,5314	0,6510	<b>43,76</b>	<b>28,49</b>	<b>12,82</b>

O gráfico da figura 65 mostra a relação das pressões normais à superfície da tremonha projetada ( $p_n$ ) com a altura desta.

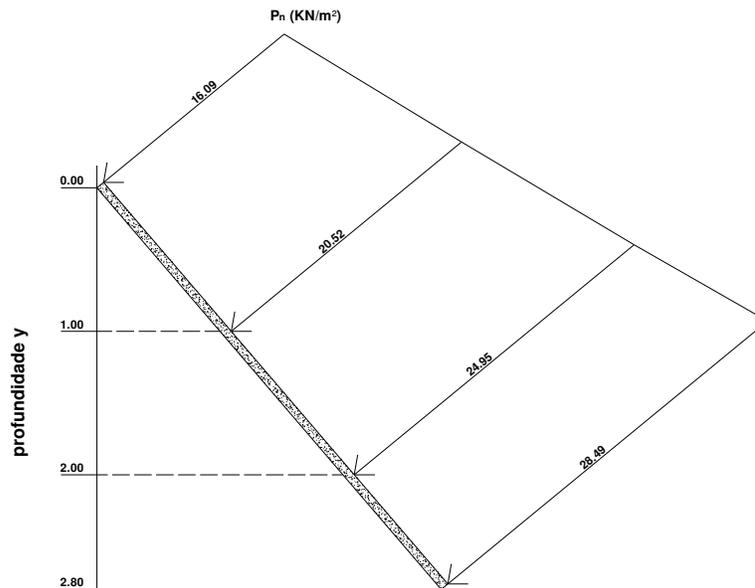


Fig. 65 – Gráfico das pressões na parede da tremonha para carga estática.

Para o cálculo das forças de tração nas paredes, do capítulo 6, sub-item 6.4.2, tem-se:

$$T = \frac{p \cdot a}{2}$$

que representa a tração de uma parede solicitada pela pressão do produto de apenas uma célula. Caso a célula geminada também esteja com carga estática, o valor da tração será 2T.

As paredes centrais do sistema de silos, no sentido longitudinal, podem receber pressões do produto em descarga, tanto de um lado como de outro. Daí, o valor da tração será igual a  $p \cdot a$

Para exemplificar, os valores da tração e dos momentos horizontais para o caso analisado acima, considerando a possibilidade de carga estática em uma célula, estão indicados a seguir.

Tabela 08 – Pressões, tração e momentos horizontais para café beneficiado em repouso.

y (m)	p ( kN/m <sup>2</sup> )	T (kN/m)	M <sub>e</sub> (kN.m/m)	M <sub>m</sub> (kN.m/m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	2,65	6,62	5,51	2,76
2,00	4,85	12,12	10,10	5,05
3,00	6,67	16,68	13,90	6,95
4,00	8,19	20,48	17,07	8,53
5,00	9,45	23,64	19,70	9,85
5,40	9,90	24,75	20,63	10,31

Para os momentos fletores que agem na seção vertical das paredes consideram-se as equações (24) e (25) com o valor de ( $\gamma h$ ) substituído pela pressão horizontal equivalente  $p_{hequi}$  (figura 54) da seguinte forma :

$$p_{hequi} = \left\{ \int 15,6542 ( 1 - e^{-0,1852y} ) / (y / 2) \right\} \dots\dots\dots(37)$$

que resulta , para o exemplo em questão , na tabela 09 abaixo , onde  $M_y$  é o momento fletor à profundidade y.

Tabela 09 – Pressões equivalentes e momentos verticais.

y (m)	$p_{hequiv}$ ( kN/m <sup>2</sup> )	$M_y$ (kN.m)
0,00	0,00	0,00
1,00	2,09	1,15
2,00	4,18	3,89
3,00	6,27	6,05
4,00	8,36	4,03
5,00	10,45	-7,20
5,40	11,29	-13,22

Para concluir os cálculos das ações que agem nas paredes dos silos, falta a consideração do peso próprio dessas paredes, da resultante da reação de apoio

da laje de fechamento superior da célula e do peso dos equipamentos mecânicos que possam estar apoiados em algumas dessas paredes.

No exemplo são consideradas paredes executadas em blocos de concreto da família de espessura 19 (ver subitem 6.7.1, a seguir). Para efeito do cálculo do peso próprio ( $14 \text{ kN/m}^3 \times 0,19 \text{ m} = 2,66 \text{ kN/m}^2$ ), não é levado em conta o peso dos equipamentos de mecanização. O peso próprio da laje de fechamento (laje pré-moldada) é considerado igual a  $1,3 \text{ kN/m}^2$  mais uma sobrecarga de  $0,50 \text{ kN/m}^2$ .

A tabela 10, abaixo, apresenta os valores do peso próprio da parede, a reação da laje de cobertura, a força de atrito, e a tensão vertical final.

Tabela 10 – Peso da parede, reação da laje de cobertura, força de atrito e tensão vertical na parede da célula.

<b>y (m)</b>	<b><math>P_{alv}</math> (kN/m) (a)</b>	<b><math>R_{lajecob}</math> (kN/m) (b)</b>	<b><math>F_a</math> (kN/m) (c)</b>	<b>Total forças verticais (kN/m) (a + b + c)</b>	<b>Tensão Vertical <math>\sigma_c</math> (kN/ m<sup>2</sup>)</b>
0,00	0,00	4,50	0,00	4,50	23,68
1,00	2,66	4,50	0,81	7,97	41,97
2,00	5,32	4,50	3,05	12,87	67,76
3,00	7,98	4,50	6,45	18,93	99,65
4,00	10,64	4,50	10,80	25,94	136,51
5,00	13,30	4,50	15,91	33,71	177,43
5,40	15,43	4,50	18,14	37,00	194,76

Resumindo, numa seção de parede do silo de altura unitária, são considerados agindo sobre ela as ações e os esforços apresentados na figura 66.

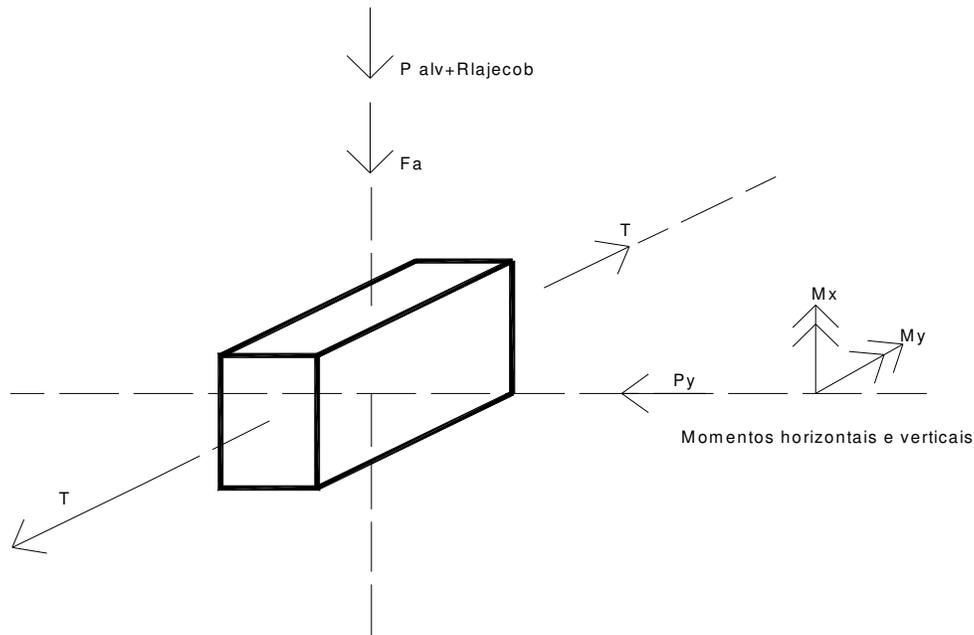


Fig. 66 – Ações e esforços que atuam numa seção de parede.

## 6.6 DIMENSIONAMENTO

Com os esforços obtidos através dos procedimentos de cálculo apresentados, passa-se ao dimensionamento dos elementos estruturais: laje de fechamento superior, paredes de alvenaria estrutural das células, laje da tremonha, vigas de sustentação internas e externas, vigas transversais, pilares de sustentação internos e externos e fundações.

O dimensionamento das paredes estruturais é função das ações provenientes do produto ensilado (como visto nos capítulos anteriores), das ações provenientes de seu peso próprio e do peso da laje de fechamento superior que se apóia sobre elas. No dimensionamento, também, se deve levar em conta a envoltória das as ações que ocorrem nas três situações de operação a que o produto armazenado fica sujeito no interior do silo: repouso, carga e descarga.

Esse dimensionamento determinará não só a geometria, a resistência à compressão necessária e as especificações técnicas dos blocos, como também as características necessárias para as argamassas de assentamento e para as argamassas de grauteamento.

Tomando-se por base o exemplo adotado e reunindo-se os resultados das tabelas 08, 09 e 10, chega-se ao resumo das ações e dos esforços a serem considerados no dimensionamento. O resumo é apresentado na tabela 11.

Tabela 11 – Resumo das ações e esforços provenientes do produto ensilado.

y (m)	p (kN/m <sup>2</sup> )	Total Forças Verticais (kN/m)	T (kN/m)	Me (N.m/m)	Mm (kN.m/m)	My (kN.m/m)
0,00	0,00	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	2,65	7,97	6,62	5,57	2,76	1,15
2,00	4,85	12,87	12,12	10,10	5,05	3,89
3,00	6,67	18,93	16,68	13,90	6,95	6,05
4,00	8,19	25,94	20,48	17,07	8,53	4,03
5,00	9,45	33,74	23,64	19,70	9,85	7,20
5,40	9,90	37,00	24,75	20,63	10,31	13,22

O cálculo estrutural propriamente dito não será discutido aqui em sua essência, o que poderá ser feito em futuros trabalhos. O objetivo do presente trabalho é apresentar um sistema construtivo para execução de silos graneleiros que tenham como finalidade o armazenamento de café beneficiado a granel, e definir as ações que atuam sobre seus componentes construtivos, ou seja, proporcionar informações, ferramentas e subsídios necessários para a análise dos componentes estruturais, contribuindo para a evolução e para o desenvolvimento desse sistema construtivo.

Apenas para justificar o uso da alvenaria estrutural armada e se ter uma ordem de grandeza, alguns critérios de cálculo para a obtenção das armaduras podem ser adotados, como segue:

- ✓ dividir a altura  $h_p$  da célula em vários trechos; para cada trecho adotar os valores mais desfavoráveis para  $T$ ,  $M_e$ ,  $M_m$ , e  $M_y$  .
- ✓ para cada valor de  $T$  , dividi-lo pela resistência do aço e multiplicá-lo pelo coeficiente de segurança 1,15, ou seja, por exemplo:

$$T = 24,75 \text{ kN/m}$$

$$A_s = ( 24,75 / 50 ) \times 1,15 = 0,57 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad ( 1 \varnothing 6,3 \text{ c/100 cm} )$$

- ✓ para cada valor de momento , considerar para o bloco de 19 cm de largura, uma altura útil de 16 cm, e calcular a armadura como se faz para laje , ou seja:

$$M_e = 20,63 \text{ kN.m} / \text{m}$$

$$K_c = (100 \times 16^2) / 206 = 124$$

$$A_s = 4,38 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad ( 2 \varnothing 12,5 \text{ c/ 60} )$$

$$M_m = 10,31 \text{ kN.m} / \text{m}$$

$$K_c = (100 \times 16^2) / 103 = 238$$

$$A_s = 2,19 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad ( 1 \varnothing 12,5 \text{ c/ 60} )$$

$$M_y = - 13,22 \text{ kN.m} / \text{m}$$

$$K_c = (100 \times 16^2) / 132 = 194$$

$$A_s = 2,80 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad ( 2 \varnothing 12,5 \text{ c/ 90} )$$

Essas armaduras deverão estar sempre envolvidas por concreto (graute) dentro dos vãos dos blocos, tanto horizontalmente como verticalmente, e posicionadas convenientemente dentro desses blocos de forma a resistir aos esforços de tração.

## **6.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO CONSTRUTIVO**

### **6.7.1 Considerações sobre as paredes de alvenaria estrutural**

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo racionalizado, no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, projetados segundo modelos matemáticos pré-estabelecidos.

Em função da presença ou não de armaduras a alvenaria pode ser classificada como armada, parcialmente armada ou não armada.

Em função do tipo de material empregado, ela pode ser de blocos de concreto, de cerâmica ou de sílico-calcário. No projeto em questão adotamos a alvenaria de blocos de concreto.

Na alvenaria estrutural consegue-se importante simplificação de processo construtivo, reduzindo etapas e mão-de-obra, com conseqüente redução de tempo de execução.

Utilizando-se de alvenaria estrutural feita com blocos de concreto pode-se aplicar a técnica da “coordenação modular”, que implica em estabelecer todas as dimensões da obra como múltipla da unidade básica. Dessa forma são evitados cortes, desperdícios e improvisações. Enfim, é possível se estabelecer um sistema racionalizado que resulta na melhoria de qualidade do produto final e em significativa economia.

O Anexo A mostra a família dos blocos de espessura 14 cm e de espessura 19 cm e seus diversos componentes.

“Para a racionalização da construção é básica a utilização de componentes padronizados e coordenados dimensionalmente, através da qual atingem-

se maiores níveis de produtividade e tem-se redução de desperdícios pela eliminação de cortes e ajuste de componentes” (MELHADO, 1994).

“As juntas de argamassa assumem funções primordiais ao desempenho dos painéis de alvenaria no sentido de dar-lhes monolicidade, unindo solidamente os blocos e ajudando-os a resistir a esforços laterais, distribuindo uniformemente as cargas atuantes por toda a área resistente dos blocos, observando as deformações materiais a que esteja sujeito e contribuindo, nas paredes externas, para a sua resistência à penetração das águas de chuva e de outros agentes deletérios” (SILVA, 2003).

“Nas paredes submetidas a esforços excepcionais é recomendado o preenchimento de todas as juntas verticais visando travar a alvenaria, tornando-a menos deformável” (SILVA, 2003).

“Providências construtivas que mais contribuem para existência de forças de interação elevadas e, portanto, uma maior uniformização das cargas verticais, em caso de cantos e bordas são:

- ✓ amarração das paredes em cantos e bordas sem juntas a prumo,
- ✓ existência de cinta sob a laje do pavimento e à meia altura,
- ✓ pavimento em laje maciça “, (RAMALHO, 2003).

Além da função de fechamento, as paredes de alvenaria armada suportam esforços solicitantes, e são geralmente composto por blocos de concreto vazados, assentados com argamassa à base de cimento, tendo os vazios tanto horizontais como verticais de seus blocos em locais definidos pelo projeto estrutural, preenchidos por uma argamassa de concreto (*grout*) após a colocação da armadura necessária.

No escopo deste trabalho são apresentadas sugestões das amarrações geométricas da 1ª e 2ª fiadas desta alvenaria estrutural (figuras 67 e 68) considerando as medidas das células conforme o sistema proposto no (item 4.2) e mais

especificamente no item 5.4 (células quadradas com aproximadamente 5.00m de cada lado) e as análises sobre as argamassas de assentamento e argamassas de grauteamento.

De acordo com a tabela 05, verifica-se que para uma armazenagem de 1000 sacos de café em uma célula, necessita-se de uma altura de parede de 3.20m e para 2500 sacos de café necessita-se de uma altura de parede da célula de 8,40m.

Na prática, sabe-se que dificilmente será projetado um sistema de silos graneleiros para café beneficiado com capacidade menor que 1500 sacos por célula, pois os custos de construção e de mecanização seriam muito altos em relação à capacidade armazenadora. Para esse volume (1500 sacos) a altura da parede será de 5.00m.

Isso não quer dizer que não haverá a possibilidade de armazenar valores inferiores em cada célula. Basta controlar a entrada de café através de uma balança de fluxo, (equipamento desenvolvido para pesar o café beneficiado tanto na entrada como na saída do café dessas células).

Sendo assim, as alturas das paredes variarão, para cada caso, entre 5,00m a 8,40m.

Portanto, no projeto desses silos haverá a necessidade de se prever pilares enrijecedores intermediários nas paredes das células para facilitar o dimensionamento dessas paredes. Esses pilares poderão ser de concreto armado ou pilares armados, grauteados, embutidos dentro dos blocos convenientemente projetados da alvenaria.

## Estudo da 1ª Fiada da alvenaria

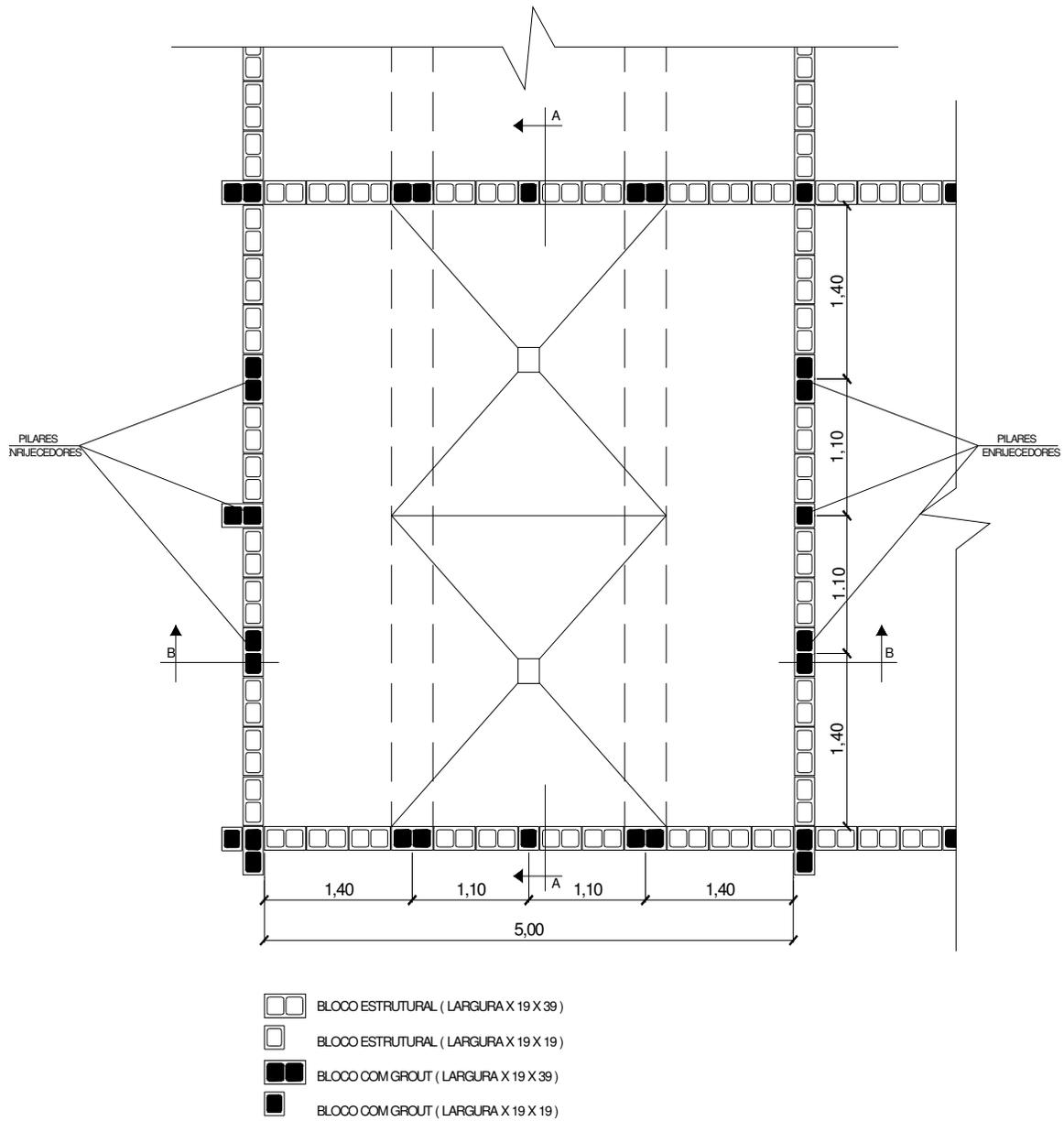


Fig. 67 – Planta da 1ª fiada da alvenaria

## Estudo da 2ª Fiada da alvenaria

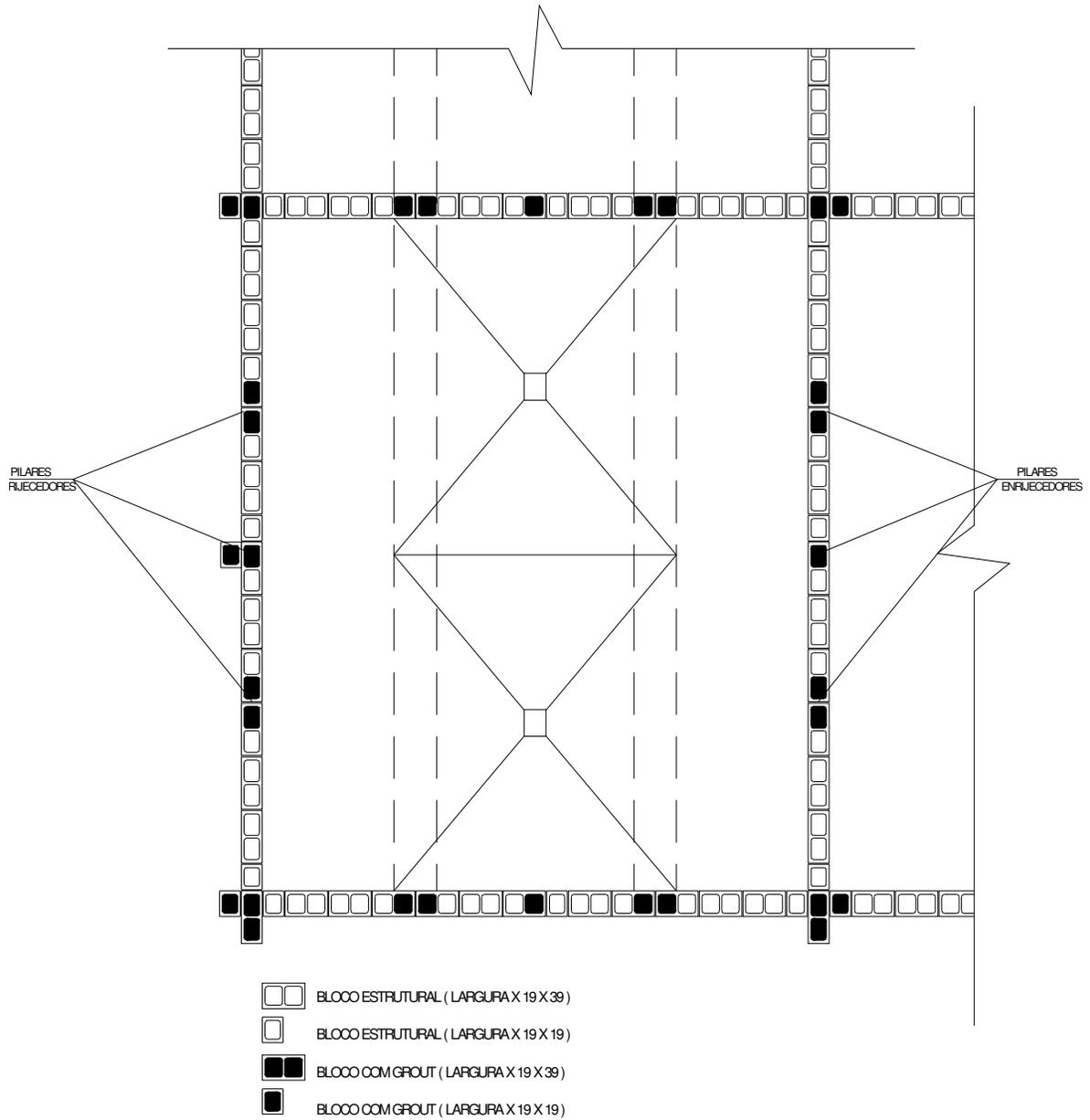


Fig. 68 – Planta da 2ª fiada da alvenaria

As figuras 69 e 70 representam os cortes transversais e longitudinais.

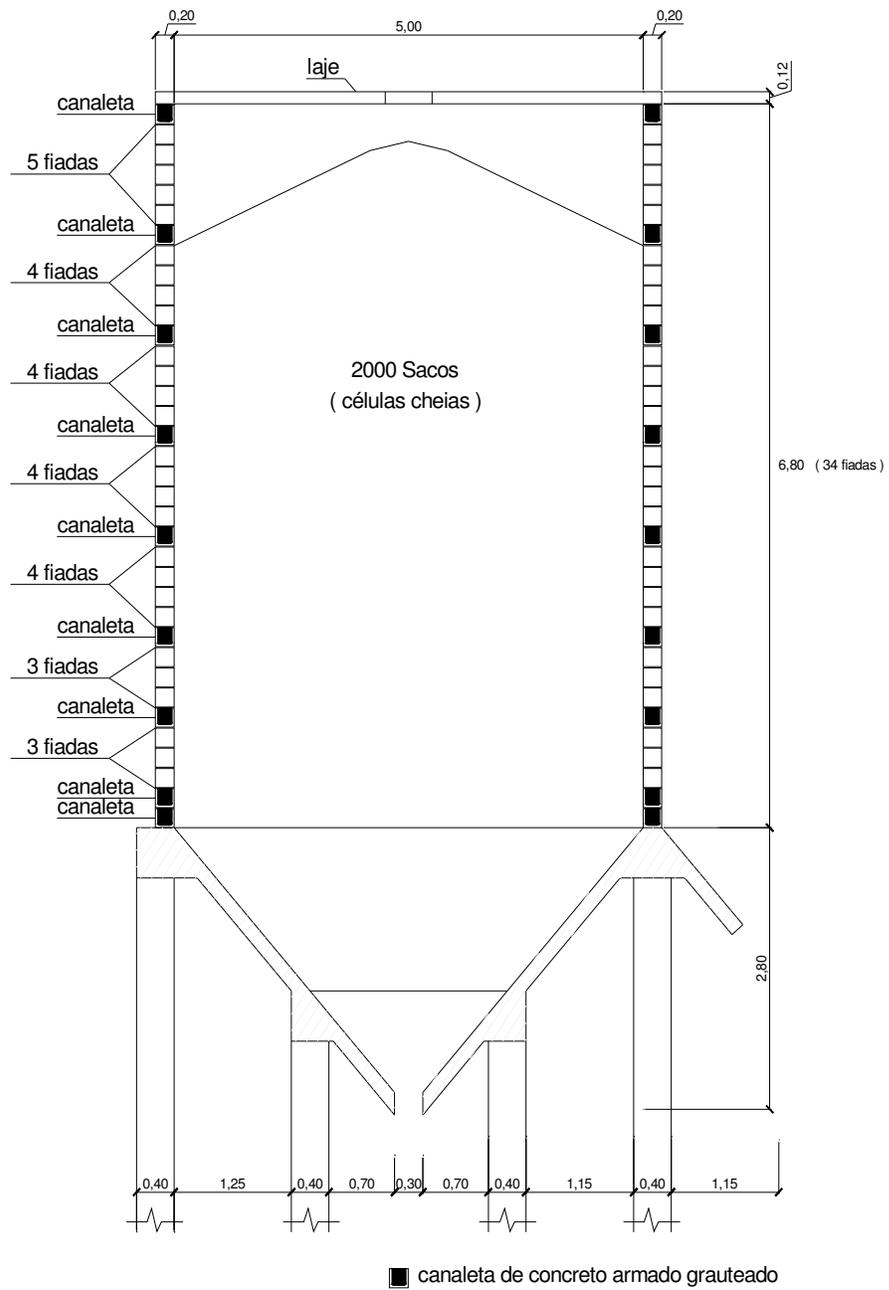


Fig. 69 – Corte B-B: corte transversal indicando as fiadas de bloco e as canaletas de concreto.

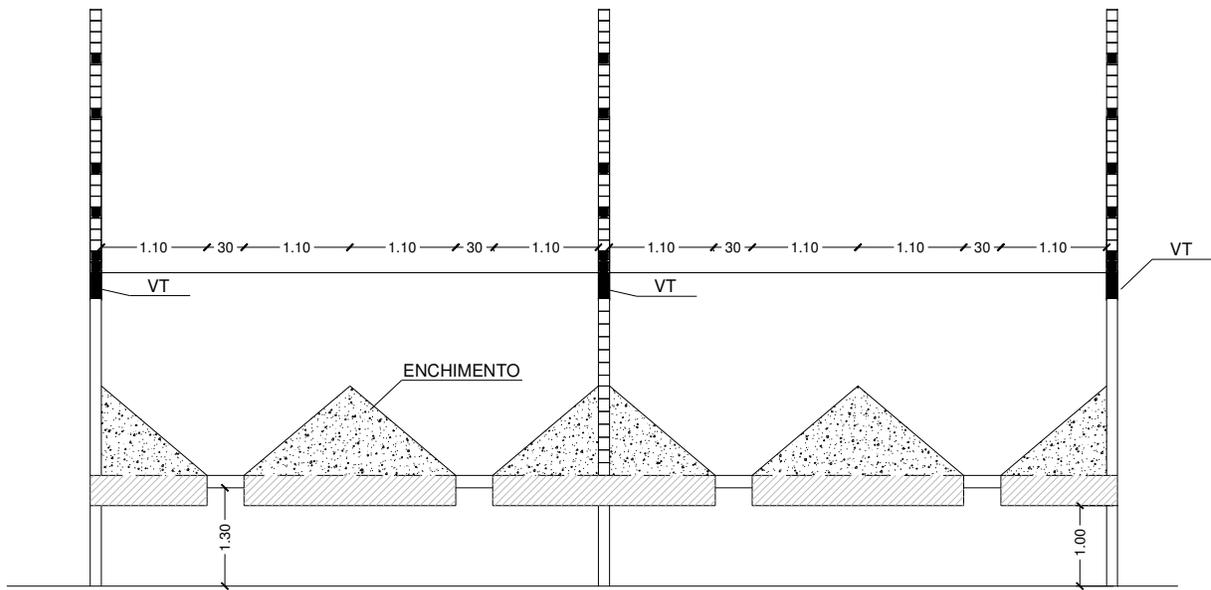


Fig. 70 – Corte A-A: corte longitudinal.

### 6.7.2 Considerações sobre a argamassa de assentamento da alvenaria estrutural

As propriedades mecânicas das argamassas contribuem de forma significativa para a resistência da alvenaria, visto que o mecanismo de ruptura da parede está diretamente ligado à interação entre as juntas e os blocos (BARBOSA, apud SANCHES FILHO, 2002).

Para todo projeto estrutural de alvenaria é necessário o conhecimento da resistência média à compressão da argamassa, pois a norma brasileira NBR-10837/89 especifica valores de tensões admissíveis à tração e ao cisalhamento para a alvenaria não armada em função desse parâmetro, ou seja, a resistência média da argamassa ( $f_a$ ) deve ficar entre 5,0 MPa a 17 MPa. A referida norma define que esses limites de resistência média de argamassa ( $f_a$ ) também se aplicam à alvenaria armada. e estabelece que a espessura da junta horizontal entre blocos deve ser igual a 1cm.

A norma brasileira NBR-8798/85 recomenda o emprego dos seguintes materiais constituintes para a confecção das argamassas de assentamento de alvenaria estrutural:

- ✓ cimento: CP I, II, III, IV e V, devem atender aos requisitos de suas normalizações.
- ✓ cal hidratada: atender.0. a NBR-7175/2003
- ✓ agregado: atender a NBR-7211/2005
- ✓ água: isenta de teores prejudiciais e PH entre 5.8 e 8

Para dosagens não experimentais, realizadas em canteiros de obras, os traços das argamassas devem obedecer as seguintes condições mínimas:

- ✓ traços em volume: cimento = 1 saco  
cal  $\leq 10 \text{ dm}^3$   
agregado seco  $\leq 133 \text{ dm}^3$   
água  $\leq 40 \text{ dm}^3$

Para obras de vulto deve-se preceder a dosagens experimentais através da normalização brasileira:

- ✓ a fixação da relação água/cimento deve decorrer da resistência da dosagem aos 28 dias, e das peculiaridades da obra relativas à sua durabilidade;
- ✓ a trabalhabilidade deve ser compatível com as características dos materiais constituintes, com o equipamento e as etapas da produção;
- ✓ o teor de cal em relação ao cimento, em volume, deve ser igual ou inferior a 0,25 e de 0,10 para grautes.

A normalização americana ASTM C-270 classifica as argamassas em 4 tipos (BARBOSA, apud SANCHES Fº, 2002):

- ✓ M – argamassas de alta resistência para alvenaria estrutural onde há cargas de compressão. São apropriadas em estruturas que estão tanto abaixo como acima do solo.
- ✓ S – argamassa de alta aderência, próprias para o emprego em solicitações de tração. São recomendadas para estruturas submetidas à força de compressão, mas que requerem resistência de aderência quando submetidas à flexão.
- ✓ N – argamassas usuais para estruturas acima do nível do sol, para paredes internas ou externas. Apresentam boa trabalhabilidade, resistência à compressão e à flexão, e custos compatíveis para utilizações usuais.
- ✓ O – argamassas que possuem alto teor de cal, portanto, baixa resistência. São recomendadas para paredes não estruturais. Tem boa trabalhabilidade e baixo custo.

Segundo a ASTM C-270, as resistências à compressão aos 28 dias para esses tipos de argamassas são:

- ✓ Tipo M = 17,50 MPa
- ✓ Tipo S = 12,00 MPa
- ✓ Tipo N = 5,30 MPa
- ✓ Tipo O = 2,50 MPa

Para as condições encontradas no cálculo e dimensionamento do nosso sistema de silos, recomendamos a utilização da argamassa tipo S, e como segunda alternativa a do tipo M.

O traço dessas argamassas, de acordo com a ASTM C-270, em volume é dado pela tabela 12.

Tabela 12 – Traço das argamassas  
(Fonte: ASTM C-270)

	cimento	cal		Areia	
		mínimo	máximo	mínimo	máximo
Tipo M	1	X	0,25	2,81	3.37
Tipo S	1	0,25	X	2,81	3.37
		X	0,50	3,37	4,50

No caso dos silos em questão, a alvenaria das paredes não será revestida, porém as juntas deverão ser “rasadas” imediatamente após o assentamento, tendo-se o cuidado de não remover as porções de argamassa interna nem deslocar os blocos de suas posições.

Na prática, se recomenda que a argamassa de assentamento deve ter como resistência um valor entre 70 a 100% da própria resistência do bloco (GOMES, apud RAMALHO, 2003).

### 6.7.3 Considerações sobre o graute para a alvenaria armada

A alvenaria armada é uma subdivisão da alvenaria e seu dimensionamento é normalizado pela NBR 10837/89. Basicamente representa a técnica de se construir paredes, que além da função de fechamento, suportem esforços solicitantes. Essas paredes são compostas por blocos de concreto vazados, cujos vazios são preenchidos pela colocação de armaduras e por uma argamassa chamada *graute*.

Essas argamassas de preenchimento (micro-cimento) devem ser dosadas de forma que as alvenarias compostas pelos blocos de concreto, as armaduras e estas argamassas, resultem em peças homogêneas, dimensionadas para suportar os esforços solicitantes causados pelas ações envolvidas no processo.

Devem apresentar trabalhabilidade adequada para o preenchimento dos vazios (furos dos blocos com armação), retração muito reduzida (quase nula) e fluência

desprezível em presença de tensões elevadas, geralmente aplicadas nas primeiras idades do processo de hidratação do cimento (GAIOFATTO apud SÁNCHEZ FILHO, 2002).

As características mecânicas, tais como, resistência à compressão e à tração e o módulo de deformação longitudinal são muito importantes, visto que, essas argamassas devem suportar os esforços a elas transferidas de forma integrada com os concretos que foram feitos os blocos.

Essas características são definidas pelo projeto estrutural e devem ser confirmadas na obra através de dosagem adequada dos componentes da argamassa. E como todo processo envolvendo cimento, o período de cura deve ser respeitado.

Como no concreto, as resistências à tração e à compressão das argamassas estão diretamente relacionadas ao fator água-cimento.

Sem considerar fatores externos indesejáveis (região de altas temperaturas ambientais, por exemplo), recomenda-se que o consumo de cimento seja entre 350 a 450kg/m<sup>3</sup> de argamassa e o fator água-cimento entre 0,45 a 0,55.

De acordo com a norma NBR – 8798/1985, a dimensão do agregado deve ser inferior a 1/3 da menor dimensão dos furos a preencher; e que a consistência exigida, tenha o mínimo de 20 + ou – 3cm; e ainda que a resistência à compressão axial (NBR – 5738/2003 e NBR – 5739/1994) seja maior ou igual 14 MPa ou maior ou igual  $f_{gk,j}$  (resistência característica à idade de j dias definida pelo projeto estrutural).

Os blocos de concreto devem obedecer à norma NBR – 6136/1994.

As tensões admissíveis na alvenaria armada também são definidas pela norma NBR – 10837/1989.

## **7. RECOMENDAÇÕES PARA PROJETOS DE SILOS ELEVADOS DE CÉLULAS QUADRADAS OU RETANGULARES PARA CAFÉS BENEFICIADOS A GRANEL**

### **7.1 PROCEDIMENTOS DE PROJETO E DE CÁLCULO**

Para o projeto e para o cálculo, os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- a) determinar a geometria do silo, através das capacidades de armazenagem das células necessárias para atender à demanda do usuário ( cliente). A relação largura x altura deve ser definida nesta etapa, bem como, a inclinação da tremonha;
- b) considerar as propriedades físicas do café beneficiado ( peso específico, coeficientes de atrito entre grãos e grãos , entre grãos e parede do silo, entre grãos e superfície da tremonha, etc.);
- c) determinar as forças transmitidas à estrutura das paredes provenientes do peso da laje de fechamento superior , dos equipamentos de mecanização, e da estrutura metálica de cobertura e de fechamento vertical;
- d) considerar os cálculos das pressões laterais horizontais e pressões verticais nas paredes da célula, ao longo de sua altura. Adotar, também, nesta fase os valores das sobrepressões a serem consideradas;
- e) considerar as forças atuantes na superfície da tremonha e, também , os valores das sobrepressões;

- f) considerar o projeto geral das células geminadas , para a consideração das situações mais desfavoráveis de células cheias, vazias e em descarga, para o dimensionamento dos elementos estruturais;
- g) dimensionamento das paredes e das tremonhas para a situação mais desfavorável;
- h) dimensionamento das vigas de sustentação externas e internas com os carregamentos mais desfavoráveis;
- i) dimensionamento dos pilares externos e internos e suas respectivas fundações.

## **7.2 PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS**

Para a execução de um sistema de silos elevados para café a granel, algumas recomendações construtivas são necessárias:

- a) concretar as tremonhas com acabamento desempenado rústico. Após a execução dos enchimentos (tijolos furados) para dar as declividades necessárias, deve-se proceder à execução de um cimentado liso, bem desempenado, aplicando-o simultaneamente na laje e no enchimento, com cimento e areia traço 1: 2,5 (mínimo), procurando-se arredondar todo e qualquer canto existente;
- b) se possível, associar à esse cimentado um componente “endurecedor” de forma à evitar o fenômeno da erosão causado pelo impacto dos grãos na superfície da tremonha;
- c) prever, antes da concretagem da laje da tremonha, a colocação dos arranques de ferro que constituirão os pilares grauteados das alvenarias ;
- d) executar o assentamento dos blocos de concreto com padronização das juntas de amarração em torno de 1cm;
- e) preencher totalmente com argamassa tanto as juntas horizontais como verticais ( não deixar “junta seca”). A argamassa deve ter acabamento rente

com a face do bloco, não deixando furos, nem vazios, nem excesso de argamassa;

- f) preencher totalmente com argamassa de graute os furos dos blocos previstos para tal fim.
- g) prever armação construtiva no capeamento de concreto das lajes pré-moldadas de fechamento superior nas duas direções, de forma a travar ambas paredes que a circundam.



## **8. COMPARAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM: CONVENCIONAL X SILOS**

No capítulo 3, tabela 2, indicou-se a capacidade de armazenagem de café pelo sistema convencional, ou seja, através de empilhamento vertical e horizontal de sacos de juta de 60 kg de café cada.

Nesta tabela, verifica-se que para uma capacidade grande, consegue-se atingir o valor de 48 sacos por metro quadrado de armazenagem, numa altura de pilha de 6,00m. Portanto, a edificação destinada à esta armazenagem deverá ter, no mínimo, 7,00 m de pé-direito e uma área total que além de permitir a estocagem dos sacos, permita a circulação pelos corredores de passagem que necessariamente tem que existir entre os emblocamentos do café, para as operações de carga, descarga e manuseio.

Nesta situação , o valor de 48 sacos por m<sup>2</sup> de armazenagem cai para algo em torno de 24 a 25 sacos por m<sup>2</sup> de área construída. SILVA (2000) cita o valor de 28,30 sacos por m<sup>2</sup>.

Considerando o sistema de armazenagem a granel proposto, conforme estudos de capacidades definidos pela tabela 04, verifica-se que:

- ✓ para 1.500 sacos de café beneficiado necessita-se de um silo com altura de célula  $h_p = 5,00$  m , para uma área de célula igual a  $25,00$  m<sup>2</sup> ( $5,00 \times 5,00$ m), portanto, armazenando-se nela 60 sacos de café por m<sup>2</sup> de área construída.
- ✓ para 2.000 sacos necessita-se de um silo com  $h_p = 6,80$  m , para uma mesma área de célula ( $25,00$  m<sup>2</sup>), o que resulta numa armazenagem de 80 sacos de café por m<sup>2</sup> de área construída.

Logicamente, os valores de armazenagem obtidos através dos silos graneleiros superam em muito os valores dos armazéns convencionais. Embora haja essa diferença é necessário avaliar o custo-benefício do empreendimento como um todo considerando: o custo das construções, o custo dos equipamentos eletromecânicos para cada caso, e também, o valor do terreno a ser implantado.

## 9. CONSIDERAÇÕES SOBRE O EXEMPLO PRÁTICO: OBRA JÁ CONSTRUÍDA

A figura 71, a seguir, mostra o esquema estrutural utilizado na construção dos silos elevados para café beneficiado, para a empresa Sendas Comercio Exterior S.<sup>a</sup>, em Varginha – MG.

Algumas análises a respeito são necessárias:

- ✓ no referido projeto, a tremonha foi concebida com dois ângulos de inclinação o que, além de não ser necessário (como comprovam as considerações feitas nos capítulos anteriores), dificultou sobremaneira a execução da obra, pois a parte mais inclinada exigiu que se fizesse forma de madeira compensada do lado superior, para conter o deslizamento do concreto. Dentro do trabalho apresentado ficou comprovado que basta uma inclinação com um ângulo adequado, para satisfazer às condições de fluxo exigidas para o produto café.
- ✓ outro fator construtivo a se destacar foi a execução de vigas horizontais de concreto armado na construção das paredes dos silos, intercalando-as com as alvenarias armadas (canaletas de concreto). Com a aplicação correta das teorias de cálculo das pressões horizontais e dos demais esforços, é desejável que para o dimensionamento das alvenarias estruturais seja necessário apenas a definição de pilares e canaletas grauteadas na extensão dessas paredes. O uso de vigas de concreto armado é mais trabalhoso, mais caro e mais moroso.

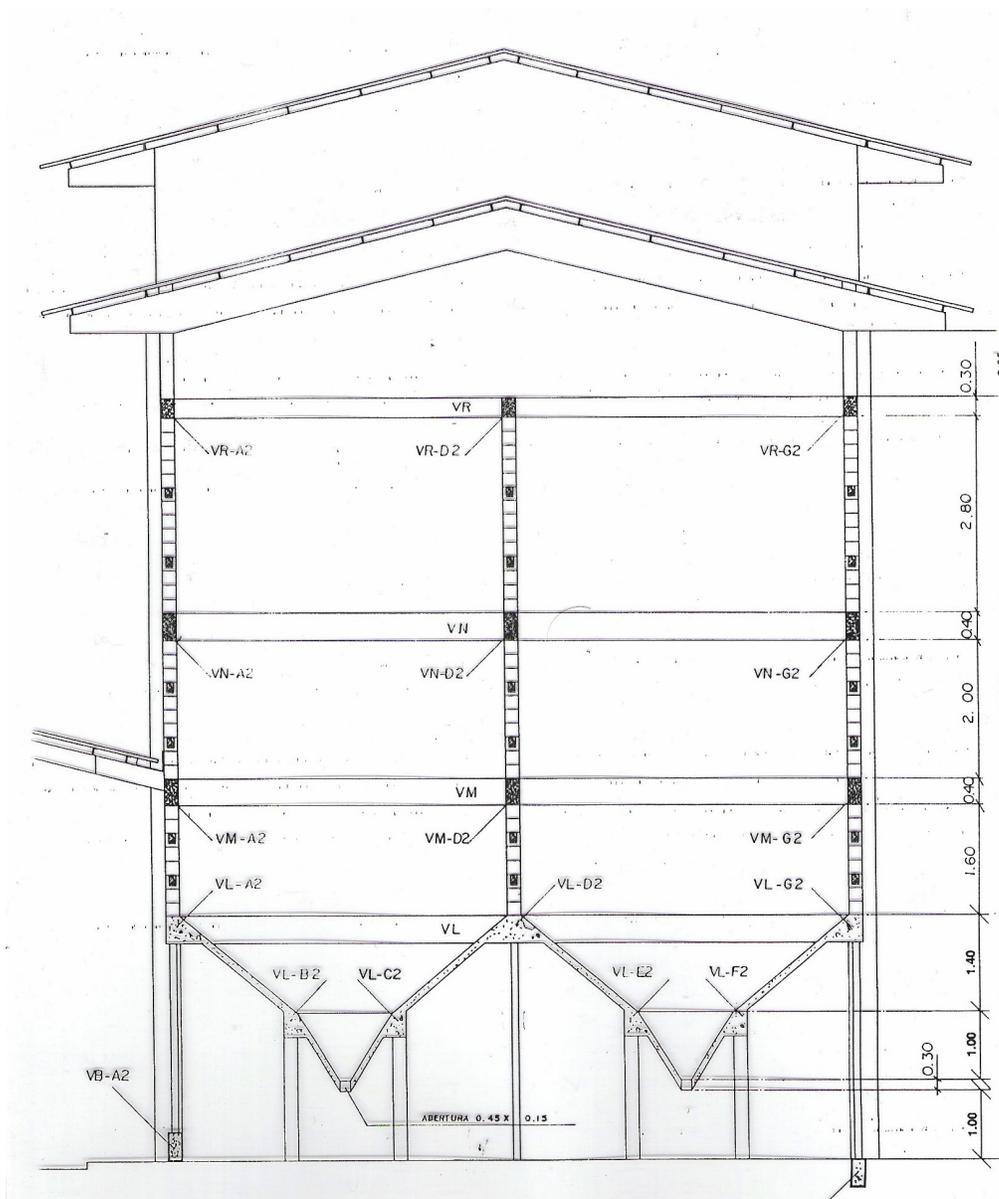


Fig. 71 – Esquema estrutural dos silos construídos em Varginha

## 10. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

Muitos são os fatores que motivaram a realização deste trabalho, dentre os quais destacam-se:

- ✓ o desafio que foi em projetar e construir um sistema de silos graneleiros para café beneficiado, em modelo construtivo pioneiro (concreto e alvenaria estrutural ) para tal finalidade;
- ✓ a constatação de que dificuldades construtivas ensejavam um estudo mais aprofundado das ações que agem na estrutura, provenientes do produto ensilado; tinham que ser melhor estudadas e definidas para que soluções mais simples pudessem ser alcançadas;
- ✓ a possibilidade de que este trabalho possa, na prática, servir de base para novos empreendimentos e ser ferramenta para outros profissionais que atuam no *agribusiness* do café.

É importante salientar que, na literatura, a maioria dos trabalhos e pesquisas realizadas foram para silos metálicos ou de concreto armado. Para um sistema misto, como o que foi proposto, há escassez de bibliografia, principalmente no que tange ao dimensionamento da alvenaria estrutural, com relação às pressões horizontais. O assunto é vasto e precisaria de novos trabalhos para esgotá-los completamente.

Com relação aos cálculos das pressões foi constatado que várias das teorias existentes sobre o assunto baseiam-se na Teoria de Janssen. As maiores diferenças entre elas são causadas pela escolha do coeficiente K (relação entre as pressões horizontais e verticais) e pelos valores adotados para os coeficientes de sobrepressão  $C_d$ . Como afirma CALIL (1990): “a maioria desses parâmetros são determinados por meio de métodos probabilísticos e empíricos, e obviamente não faz sentido usar fórmulas que são muito complicadas para o projeto de silos”.

Por outro lado, várias definições contempladas neste trabalho foram conclusivas:

- ✓ para armazenagem de café a granel em silos, a forma quadrada ou retangular é a mais adequada, visto que, a forma circular é de difícil construção em alvenaria estrutural de blocos de concreto;
- ✓ o sistema adotado de células duplas geminadas é ,também, melhor utilizado com células quadradas ou retangulares , do que com células circulares , onde haveria vazios entre elas;
- ✓ a definição da aplicação de alvenaria estrutural para as paredes das células , para o caso em questão, e de lajes tipo painéis com capeamento em concreto para as tremonhas, são soluções muito adequadas para serem utilizadas em qualquer parte do país;
- ✓ a cobertura e o fechamento vertical em telhas de aço galvanizado contribuem bastante para o conforto térmico e para a garantia da conservação das propriedades físicas, químicas e biológicas do produto café.

Em função da extensão dos assuntos ora abordados, jamais seria pretensão esgotá-los apenas neste trabalho. Algumas sugestões para trabalhos futuros e para aperfeiçoamento de novas pesquisas são pertinentes, tais como:

- ✓ aprofundamento sobre os procedimentos para o dimensionamento da alvenaria estrutural das paredes das células, para as capacidades de armazenagem de 1.500, 2.000 , e 2.500 sacos de café;

- ✓ desenvolvimento de um programa computacional para cálculo das pressões e sobrepressões , para as capacidades de 1.500, 2.000, e 2.500 sacos de café, na situações de carga estática e de descarga, utilizando os dados das propriedades já obtidos neste trabalho;
- ✓ cálculo do pórtico de apoio das células , através de um programa computacional, considerando os diversos carregamentos possíveis;
- ✓ estudos experimentais sobre o valor dos coeficientes de majoração ( $C_d$ ) para café beneficiado nas condições aqui pesquisadas;
- ✓ avaliação e comparação dos custos de construção de um empreendimento de armazenagem de café beneficiado, considerando as diversas formas de fazê-lo: sistema convencional, sistema em big-bags, e sistema em silos graneleiros.



## ANEXO A: TIPOS DE BLOCOS ESTRUTURAIS

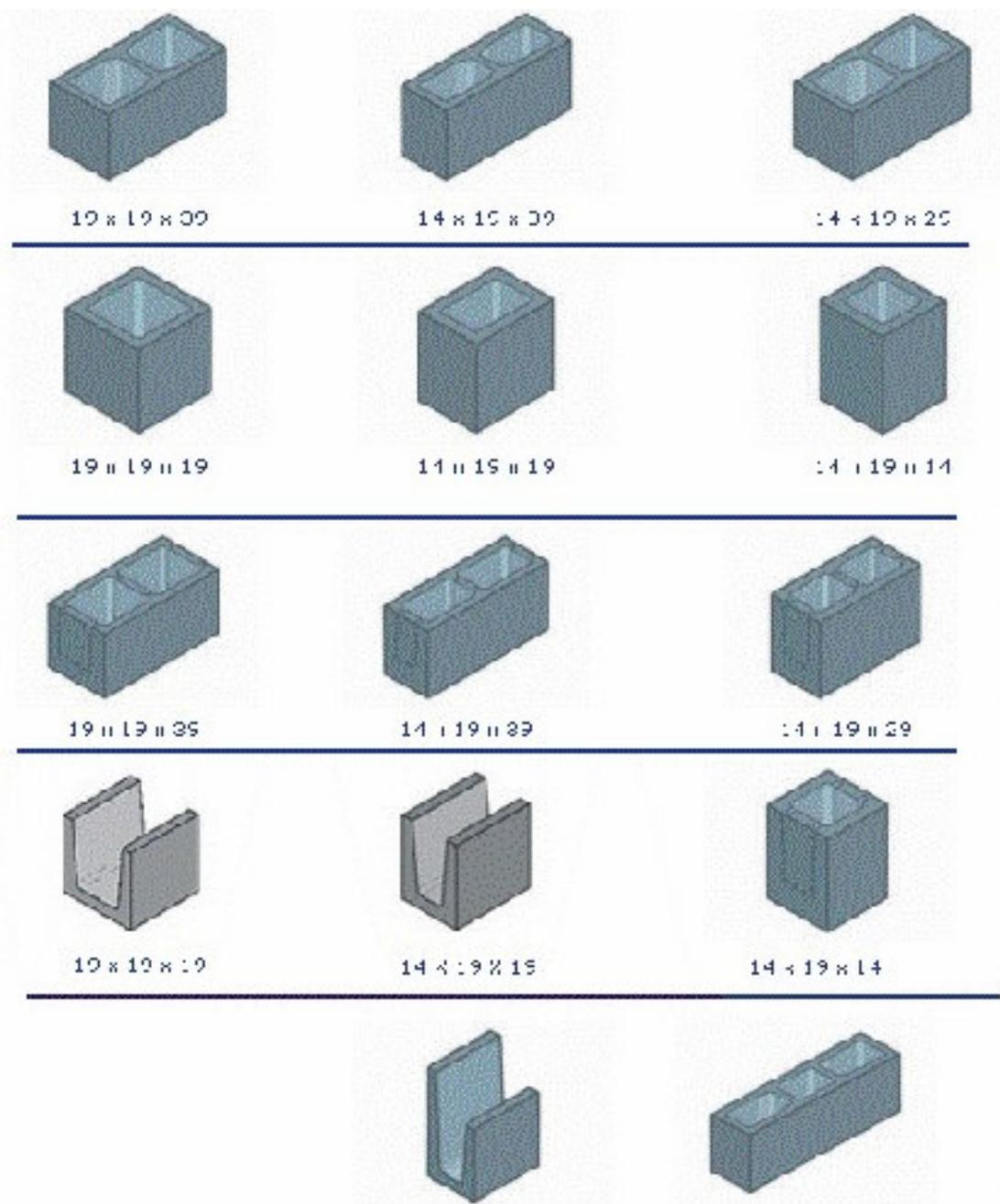


Fig. 72 – Família dos blocos estruturais (fonte: [www.glasser.com.br](http://www.glasser.com.br))



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313-97, ACI 313R-97: Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-97) and Commentary – ACI 313R-97.** USA, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-270-03b; Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.** USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. [s.n]. [s.d]. Disponível em <http://www.abic.com.br>. Acesso em 14 /03/2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10837: Cálculo de alvenaria de blocos vazados de concreto.** Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-2: Lajes pré-fabricadas. Requisito – Parte 2: lajes bidimensionadas.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14860-1: Laje pré-moldada – pré laje. Requisito – Parte 1: lajes unidirecionais.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14860-2: Laje pré-moldada – pré laje. Requisito – Parte 2: lajes unidirecionais.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8798: Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto.** Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas. Requisito.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregado para concreto. Especificação.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Norma 02:135.07-001: Desempenho Térmico de Edificações.** Rio de Janeiro, 1998.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774 – Loads on bulk solids containers.** 1990.

CALIL JUNIOR, C. **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais.** 1990. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CALIL JUNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W.; ARAUJO, E. C. **Silos Metálicos Multicelulares.** 1997. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CAMARGO, R.; TELLES JR., A. Q. **O Café no Brasil.** 1953. Volume I. Rio de Janeiro. Editora Guarani.

CAPUZZO NETO, V.; CORREA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. **A Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural Submetidas a Ações Verticais.** 2000. XXIX JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL.

COFFEE RESEARCH INSTITUTE. USA. [s.n.]. 2001. Disponível em <http://www.Coffeeresearch.com>. Acesso em 07/09/2003 .

CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ. [S.L.]. [s.n.]. Disponível em <http://www.cafenarede.com.br> . Acesso em 07/09/2003.

CORDEIRO, João Amaro B.; FUJII, Armando Kazuo; QUEIROZ, Marlene Rita de. **Curso de Armazenagem de Grãos.** 1987. Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

CORREIAS MERCURIO S. <sup>a</sup> Manual Técnico. 1985 – 2<sup>a</sup> edição. 145p. Jundiaí, São Paulo.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055 Part 6 – Loads in silo bins.** 1987

FORTES FILHO, Jorge. **Uma Introdução ao Estudo dos Silos.** 1985. 426 p. Tese de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GUERRIN, A; LAVAU, R.C. **TRATADO DE CONCRETO ARMADO.**s / d. Volume 5. 417p. Hemus Editora Limitada. São Paulo – SP.

JENIKE, A. W. **Storage and Flow of Solids**.1968. Bolletin of the University of Utah. USA.

JENIKE, A. W. JOHANSON, J. R.; CARSON, J. W. **Bin Loads in 3 parts** . 1973. ASCE. USA.

LOVATO, Glaucia Celeste. **Comportamento de Paredes em Alvenaria Estrutural Sujeito às Ações Paralelas e Perpendiculares a seu Plano Médio**. 2002. Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.

MELHADO, S.B. **Qualidade do projeto na construção de edifícios: aplicação ao caso das empresas de corporação e construção**. São Paulo, 1994. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MILANI, Adhemar Pitelli. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DO BRASIL. **Instrução Normativa nº 048 de 16 de agosto de 2002**. Disponível em [www.pos-colheita.com.br](http://www.pos-colheita.com.br). Acesso em 7/9/2003.

NACIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. **NRC-CNRC National Farm Building Code of Canada 1995**. Canada, 1995.

PASCOAL, Luiz Norberto. **Aroma de Café**. 1999. Editora Fundação Educar - DPaschoal. São Paulo.

PROJETOS ESTRUTURAIS E CONSULTORIA. (s.n.). (s.d.). Disponível em <http://www.premoldados.com/lajespremoldadas> . Acesso em 02/11/2003.

PUZZI, Domingos. **Abastecimento e Armazenamento de Grãos**. 2000. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola.

QUALISACK EMBALAGENS ESPECIAIS. **Manual de Segurança**. CORREA MERCURIO S, A. Manual Técnico. 1985 - 2ª edição. 145p. Jundiaí, São Paulo.

RAMALHO, Marcio A.; CORRÊA, Marcio R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. 2003. 1ª edição. Editora Pini. São Paulo. SP

RAVENET, J. **Silos: teoria, investigacion, construccion**. 1977. Editores Técnicos Asociados. Barcelona. Espanha.

REIMBERT, Marcel; REIMBERT, André. **Silos: theorie et pratique: calcul, fonctionnement, realisations**. 1971, 6ª edição.

SAFARIAN, Sargis S. **Design and Construction of Silos and Bunkers**.1985. Van Nostrand Reinhold. New York. USA.

SANCHES FILHO, Emil de Souza. **Alvenaria Estrutural, Novas Tendências Técnicas e de Mercado**. 2002. Editora Interciência. Rio de Janeiro – RJ.

SILVA, Juarez de Souza. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2000. Editora Aprenda Fácil. Viçosa - Minas Gerais.

SILVA, Margarete Maria de Araújo. **Diretrizes para o projeto de alvenaria de vedação**. São Paulo, 2003. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da USP.

SILVA, Maria Cecília Amorim Teixeira da. **Estudo da Variabilidade de Pressões em Silos**. 1993. 192p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SINDICAFÉ - SINDICATO DA INDUSTRIA DE CAFÉ DO ESTADO DE MINAS GERAIS. [s.n.]. [s.d.]. Disponível em <http://www.sindicafe-mg.com.br> . Acesso em 14/03/2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Departamento de Engenharia Agrícola. [s.n.]. [s.d.]. Disponível em <http://www.deg.ufla.br/armazem>. Acesso em 19/09/2003.

VITTORINO, F.; SATO, Neide M. N.; AKUTSU, Maria. **Desempenho Térmico de Isolantes Refletivos e Barreiras Radiantes aplicados em Coberturas**.2003. Revista Techné. Editora Pini.

WALKER, D.M. **An approximate theory for pressures and arching in hoppers**. 1966. Chemical Engineering Science. V21.

WATERS, J.K. **A theoretical analysis of stress in axially symmetric hopper and bunkers**. 1973. Chemical Engineering Science.

WEBER, Érico A. **Armazenagem Agrícola**. 1995. Kepler Weber Industrial.