

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

LEANDRO FARIA DE SOUZA

DIMENSIONAMENTO DE UM SILO INDUSTRIAL

Belo Horizonte

2022

Leandro Faria de Souza

"DIMENSIONAMENTO DE UM SILO INDUSTRIAL"

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Estruturas".

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **vinte e nove** dias do mês de **novembro de 2022**, às 18h, o estudante **Leandro Faria de Souza**, matrícula 2022683140, defendeu o Trabalho intitulado “**Dimensionamento de um Silo Industrial**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 90 (noventa pontos)

Orientador(a): Prof. Rodrigo Barreto Caldas

Nota: 90 (noventa pontos)

Examinador(a): Dr. Lucas Figueiredo Grilo



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 06/12/2022, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Figueiredo Grilo, Usuário Externo**, em 06/12/2022, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1937583** e o código CRC **22DC863F**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Agradecimento

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me abençoar nas estradas por percorrer 220 km nos dias de aula de ida e volta para Belo Horizonte e poder conciliar trabalho e estudo, ao meu orientador e professor Rodrigo Barreto Caldas por aceitar conduzir o meu trabalho de conclusão de curso, a todos os professores do curso de especialização em estruturas da UFMG pela excelência da qualidade técnica de cada um, ao meu pai Antônio e minha irmã Elisângela que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória e a minha esposa Ana Flávia pela compreensão das ausências, pela paciência e afastamentos temporários durante o período do curso.

Resumo

O presente trabalho consiste em dimensionar e analisar um silo industrial para armazenagem e pesagem de produtos a granel para o setor industrial. Para isso, foi projetado um corpo em chapa de aço com quatro bases de apoio onde o equipamento será colocado sobre células de cargas. O equipamento é constituído também de porta de bloqueio e descarga com acionamento de cilindro pneumático fixado em mancais com buchas lubrificadas com graxeiras.

Os silos, quando corretamente projetados e bem conduzidos, apresentam inúmeras vantagens para as unidades do processo industrial. Em contrapartida, o dimensionamento correto, seguro e econômico de um silo exige um conhecimento técnico e prático, além de ser indispensável o conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos produtos. Assim, este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento linear estático de um silo engastado-livre através do método dos elementos finitos, por meio do programa Creo Parametric®. A metodologia utilizada se divide essencialmente em três etapas: fundamentação teórica, modelagem numérica e obtenção de resultados.

Foram utilizados materiais estruturais convencionais encontrados no mercado visando produção frequente para aplicação industrial.

Palavras-chave: *Silo industrial, base de apoio, porta de bloqueio e descarga.*

Abstract

The present work consists of sizing and industrial silo for storing and weighing bulk products for the industrial sector. For this, it was designed a steel plate body with four support bases where the equipment will be supported on load cells. The equipment is also composed of a locking/unloading door driven by a pneumatic cylinder drive fixed on bearings with lubricated bushings with grease fittings.

The silo, when correctly designed and well conducted, presents numerous advantages over the units of the industrial process. On the other hand, the correct, safe and economical silo sizing requires technical and practical knowledge, besides being indispensable the knowledge of the physical and flow properties of the products. Thus, this paper aims to study the static linear behavior of a crimped-free silo through the finite element method, using the Creo Parametric® program. The methodology used is divided into three steps: theoretical background, numerical modeling, obtaining results.

Conventional structural materials found in the market were used aiming at frequent production for industrial application.

Keywords: *Industrial silo, support shoes, locking/unloading door.*

Lista de figuras

Figura 1 – Colapso de Silo	21
Figura 2 - Classificação dos Silos Segundo a Posição do Plano de Ruptura	21
Figura 3 – Principais Tipos de Fluxo	23
Figura 4 –Tipos de Fluxo de Massa.	25
Figura 5 – Principais Tipos de Fluxo de Funil. Fonte: CALIL Jr (2007).....	25
Figura 6 – Efeitos da Esbeltez no Fluxo do Silo.	26
Figura 7 – Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.....	27
Figura 8 – Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.....	27
Figura 9 – Análise para formação de obstrução em abóbada em silos com fluxo de massa.....	31
Figura 10 – Função fluxo do produto armazenado e fator fluxo da tremonha	31
Figura 11 – Pressões geradas pelo produto armazenado.....	33
Figura 12 – Definição do Projeto do Silo.....	34
Figura 13 – Definição da Geometria do Silo – Dimensões Internas.....	35
Figura 14 – Diagrama para Projeto de Tremonha.....	36
Figura 15 – Gráfico para Determinação do Fator de Fluxo.....	38
Figura 16 – Determinação da Função H (α) para Tremonhas Cônicas e em Cunha.....	39
Figura 17 – Formas de Bocas de Descarga para Silos com Fluxo de Funil	40
Figura 18 – Determinação da Função G (ϕ).....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	16
3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES	17
3.1.	SILO	17
3.2.	CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS.....	17
4.	FLUXO DOS MATERIAIS	21
4.1.	Tipo de Tremonha.....	21
4.2.	Tipo de Fluxo.....	23
4.2.1.	Fluxo de Funil.....	23
4.2.2.	Fluxo de Massa	24
4.2.3.	Fluxo de Funil Misto	26
4.3.	Vantagens e Desvantagens do Tipo de Fluxo.....	28
4.4.	Obstrução de Fluxo.....	29
5.	REQUISITOS PARA EVITAR OBSTRUÇÕES DE FLUXO	29
6.	PRESSÃO NO SILO	32
7.	DEFINIÇÃO DO PROJETO DO SILO	33
7.1.	Definição da Geometria do Silo – Dimensões Internas.....	35
7.2.	Ângulo da Tremonha	35
7.2.1.	Determinação da Inclinação da Parede.....	36

7.2.2.	Determinação do Fator Fluxo da Tremonha (ff).....	37
7.2.3.	Determinação da Tensão Crítica.....	39
7.2.4.	Determinação da Função H (α).....	39
7.2.5.	Determinação da Dimensão Mínima da Boca de Descarga.....	40
7.3.	Propriedades	42
7.3.1.	Propriedades do Material.....	42
7.3.2.	Propriedades do Silo.....	42
7.4.	Cálculo da Tensão Admissível	42
7.5.	Cálculo do Carregamento na Parede Vertical:.....	43
7.6.	Cálculo do Carregamento Tronco de Pirâmide	43
8.	PREPARAÇÃO E DEFINIÇÃO DE MALHAS	45
9.	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS	47
10.	PROJETO EXECUTIVO DO SILO	49
10.1.	Carcaça	50
10.2.	Mancal de Fixação do Cilindro.....	51
10.3.	Porta de Bloqueio / Descarga	52
10.4.	Peças Misclenâneas	53
11.	CONCLUSÃO	55
12.	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Os silos de armazenamento ou tremonhas de recebimento são equipamento que movimentam produtos ou materiais a granel que, quando adequadamente projetados e bem dimensionados, oferecem diversas vantagens, sendo possível destacar:

- a) melhores condições de armazenamento;
- b) estocagem racional e segura, além de econômica, devido à redução dos custos por meio de big bags a granel e emprego de mão-de-obra;
- c) economia no transporte, pois uma quantidade maior de produto a granel pode ser transportada;
- d) mecanização, com redução significativa do trabalho necessário para monitorar o produto armazenado para garantir sua preservação;
- e) melhor relação entre a área disponível e o volume armazenado.

Por outro lado, o dimensionamento correto, seguro e econômico de um silo requer, além dos conhecimentos necessários sobre as propriedades físicas e vazão dos produtos, conhecimentos técnicos para a execução e gerenciamento da obra.

O Brasil não possui uma norma para o dimensionamento de silos, apenas referências aos componentes para silos de grãos:

- TB-374:1990 - Silos cilíndricos para grãos vegetais
- TB-377:1990 - Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais.

Segundo Calil Júnior (1990) junto a SILVA, 2003, p. 8), o objetivo dos requisitos de capacidade resistente busca fornecer condições para o projeto de estruturas de silos seguras e econômicas. Para que a estrutura do equipamento seja segura e econômica, é importante que as ações não sejam subestimadas ou consideradas maiores do que o necessário. A segurança estrutural só pode ser determinada se forem conhecidos os possíveis tipos de falhas que podem ocorrer na estrutura.

Relacionado às ações do material armazenado nas paredes e fundo dos silos devem ser considerados alguns aspectos como:

- Comportamento parcial de produtos granulados;
- Maneira incomum de obter propriedades físicas;
- Interação complexa entre produto e estrutura do silo;
- Heterogeneidade do produto armazenado;
- Várias propriedades físicas;
- Várias situações de armazenamento.

A figura 1 mostra dois exemplos clássicos de falha de silo: em (a), a estrutura desabou devido a aberturas aleatórias causando um fluxo assimétrico do produto armazenado; e em (b) a pressão não foi suportada pela estrutura.



(a) Fonte Canal Rural, Campo Verde/MT
2016



(b) Fonte Jornal O Pioneiro, Canarana,
Araguaia MS 2013

Figura 1- Colapso de Silos

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento linear estático e dinâmico de silos para armazenamento e pesagem de produtos industriais a granel pelo método dos elementos finitos utilizando o programa Ansys Workbench.

As pressões atuantes são consideradas de acordo com as disposições da norma europeia EN 1991- (EUROCODE, 2006). As ações causadas pelo vento não são levadas em consideração, pois o equipamento será considerado dentro de um galpão coberto e com tapamentos laterais.

3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

3.1. SILO

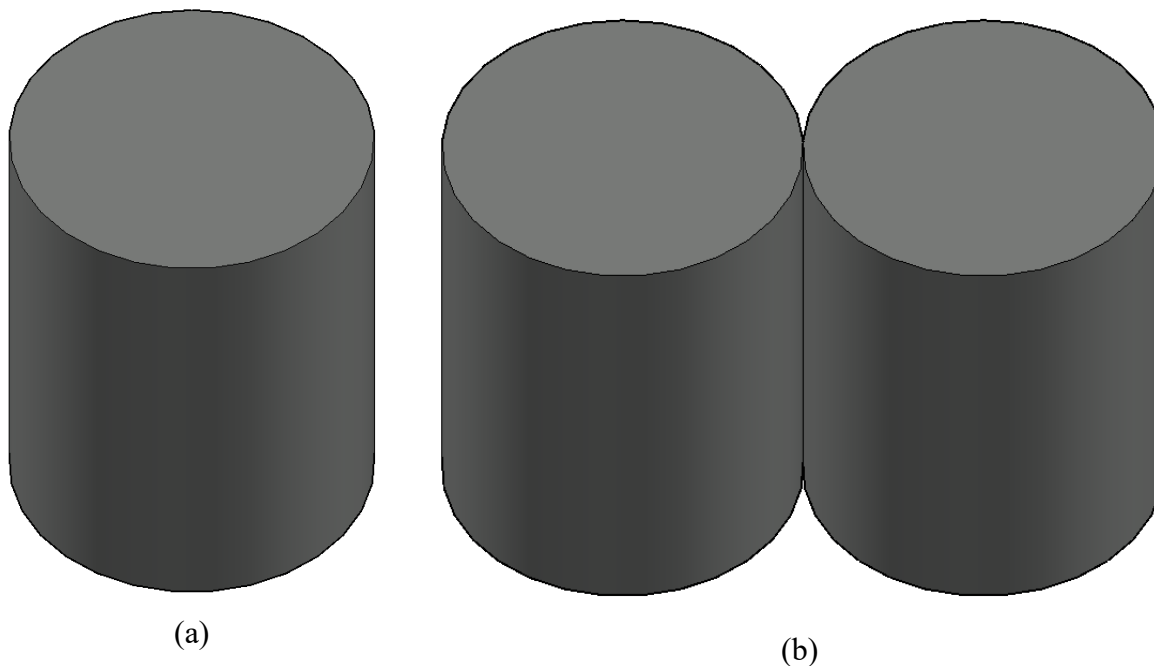
Silo é o nome genérico para todos os equipamentos de armazenamento de produtos a granel ou pulverulentos. Geralmente, possuem bocais e dispositivos de descarga sendo capaz de serem esvaziados preferencialmente por gravidade ou através de meios pneumáticos ou mecânicos.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Os silos podem ser classificados em função de cinco características:

- 1) Número de células;
- 2) Geometria do silo;
- 3) Tipo de fundo;
- 4) Tipo de fluxo durante o descarregamento;
- 5) Geometria do fluxo.

Quanto ao número de células, os silos podem ser unicelulares (figura 3.2a), quando possuem uma única célula, ou multicelulares (figura 3.2b), quando possuem duas ou mais células.



Fonte: Figura do Autor

Quanto a construção em relação ao solo, podem-se dividir em 3 grupos:

- **Silos elevados ou aéreos:** são aqueles construídos acima do nível do solo ou sobre estruturas;
- **Silos subterrâneos:** são aqueles em que os compartimentos para a estocagem se localizam abaixo do nível do solo. São construções mais simples que os silos elevados, porém são mais susceptíveis a infiltrações de água e tem um esvaziamento mais difícil;
- **Silos semi subterrâneos:** tem características entre os dois tipos citados anteriormente.



(a) Silo Unicelular Elevado



(b) Silo Multicelular Elevado

Fonte: Internet - Google

Segundo CALIL Jr, (2007. 240 p.) a geometria de um silo é outro fator de classificação:

- **Silos baixos:** são aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro menor que 1,5;
- **Silo esbeltos:** são aqueles que possuem uma relação entre altura e o diâmetro maior ou igual a 1,5;

- **Silos horizontais:** são aqueles cuja dimensão horizontal é preponderante sobre as outras dimensões.

Quanto a entrada de ar:

- **Silos herméticos:** silos que não possibilitam a troca de ar do interior da célula com exterior;
- **Silos não herméticos:** silos que permitem a troca de ar com o exterior.

Algumas normas apresentam as relações de classificação de silos quanto a esbeltez, e que está apresentada na tabela a seguir.

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	BAIXO	MEDIANAMENTE ESBELTOS	ESBELTOS
Australia AS3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
Europeias EN-1991-4:2006 DIN 1055-03:2006	$0,4 \leq H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D > 2,0$
Americanas ACI-313:1991 ANSI/ASAE EP433:2001	$H/D < 2,0$	-	$H/D > 2,0$
Canadense CFBC:1983	$H/D \leq 1,0$ ou $H/D < \tan^2$ $(\theta_e/2 + \pi/4)$	-	$H/D > 1,0$ e $H/D \geq \tan^2 (\theta_e/2 + \pi/4)$
Nota: H = Altura total do silo com a tremonha D = Diâmetro do corpo do silo θ_e = Ângulo de repouso do produto			

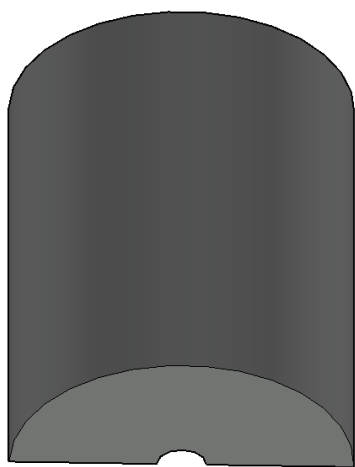
Dois aspectos merecem atenção com relação à classificação segundo a posição do plano de ruptura do produto. O plano de ruptura é dado, segundo a teoria de Coulomb, por um ângulo de $45^\circ - \theta_e/2$ formado com a vertical, onde θ_e é o ângulo de repouso do produto, não levando em conta o atrito entre o produto e a parede. Segundo Troitsky (1905 apud GUERRA, 2006) não

há acordo sobre o ponto de partida para delinear este plano no fundo da tremonha ou no início da parede vertical.

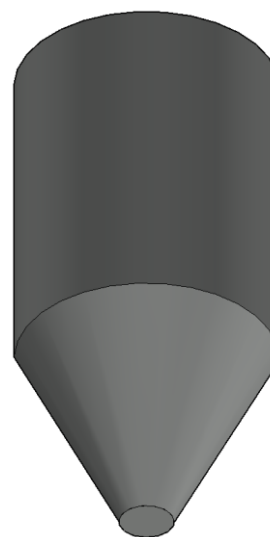
Os silos podem apresentar dois tipos de fundo:

Fundo plano: este tipo de fundo é projetado quando é horizontal ou inclinado de um ângulo α pequeno com relação à horizontal. Segundo a norma europeia EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) este ângulo α deve ser menor que 5° .

Fundo com tremonha: este tipo de fundo é projetado em forma de funil.



Fundo Plano



Fundo com Tremonha

A norma europeia EN 1991-4 (EUROCODE, 2006) faz ainda uma subdivisão, entre tremonha íngreme e abatida. A tremonha é dita íngreme quando satisfaz a seguinte condição:

$$\text{tag } \beta < \frac{1 - K}{2 \mu h}$$

β = ângulo que a parede da tremonha forma com a vertical;

K = limite inferior do coeficiente de empuxo lateral nas paredes verticais;

μh = limite inferior do coeficiente de atrito com a parede da tremonha.

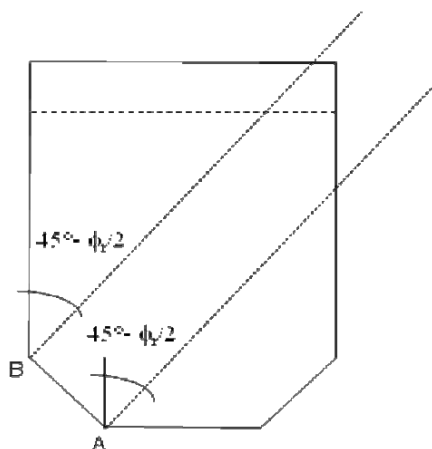


Figura 2 - Classificação dos Silos Segundo a Posição do Plano de Ruptura
 Fonte: TROITSKY, 1990⁶ *apud* GUERRA, 2006, p. 36 – “modificada pelo autor”

4. FLUXO DOS MATERIAIS

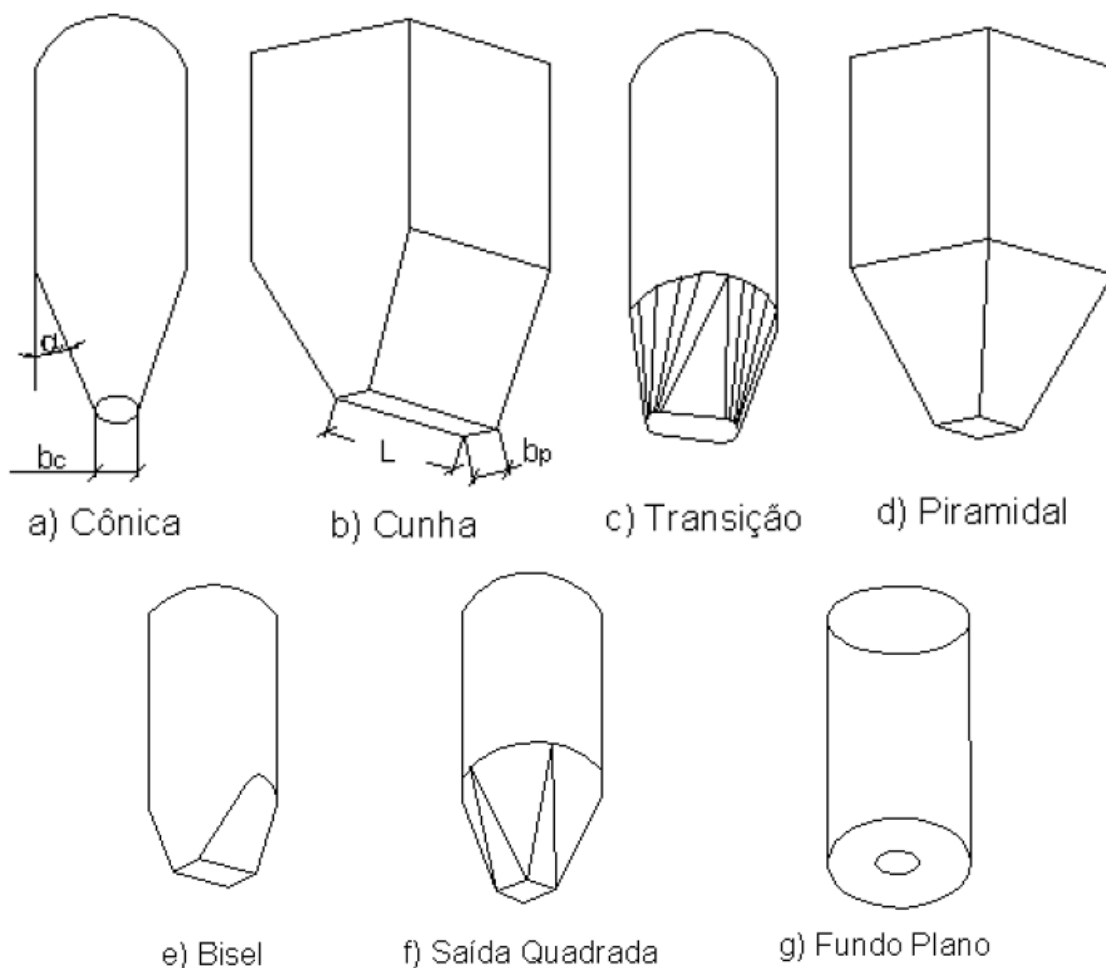
As pressões nas paredes dependem do fluxo dos materiais e portanto devem ser analisado durante o projeto do silos. Para isto é necessário conhecer os principais parâmetro que podem interferir no fluxo dos materiais e produtos, tais como:

- a) Tipo do silo;
- b) Máximo e mínimo material a ser armazenado;
- c) Tolerância de segregação;
- d) Necessidade de mistura;
- e) Duração de armazenamento;
- f) Vazão de descarregamento;
- g) Função fluxo;
- h) Fator fluxo.

4.1. Tipo de Tremonha

Dependendo do tipo de material e o tipo de fluxo existem várias geometrias de tremonha que podem ser escolhidas para o sistema de armazenamento e podem ser divididas em dois grupos:

- a) Tremonha de fluxo plano;
- b) Tremonha de fluxo axissimétrico.



Segundo Jenike (1964), as tremonhas em cunha (fluxo plano) permitem inclinações um pouco maiores (geralmente de 8° a 10°). Portanto, a tremonha em cunha necessita de menor altura quando comparada com a tremonha cônica. Além disso, a dimensão da boca de saída b_c para a tremonha cônica é normalmente maior que a largura b_p para a tremonha em cunha. A desvantagem da tremonha em cunha é que a abertura de descarga tem comprimento igual à largura do silo. O comprimento mínimo da abertura é $L = 3 b_p$, que, na prática, é muito menor que a largura do silo. Por essa razão, a tremonha em transição vem sendo mais utilizada. No caso de silos com fluxo de funil, o ângulo de inclinação da tremonha com a vertical é maior que para o fluxo de massa. Portanto, a tremonha, para esse tipo de fluxo, tem menor altura e pode ser usada em locais onde a altura do silo é limitada. Contudo, geralmente, necessitam de dispositivos promotores de fluxo como vibradores, quando se forma, por exemplo, uma obstrução.

4.2. Tipo de Fluxo

De acordo com Calil Jr. (2007), o tipo de escoamento caracteriza descarga do produto, o tipo de separação, a presença não da formação zonas estacionárias do produto e a possibilidade esvaziamento completo tremonha. Determina também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, e a integridade e custo da construção. O fluxo é dividido em dois tipos distintos conforme apresenta a figura 3.

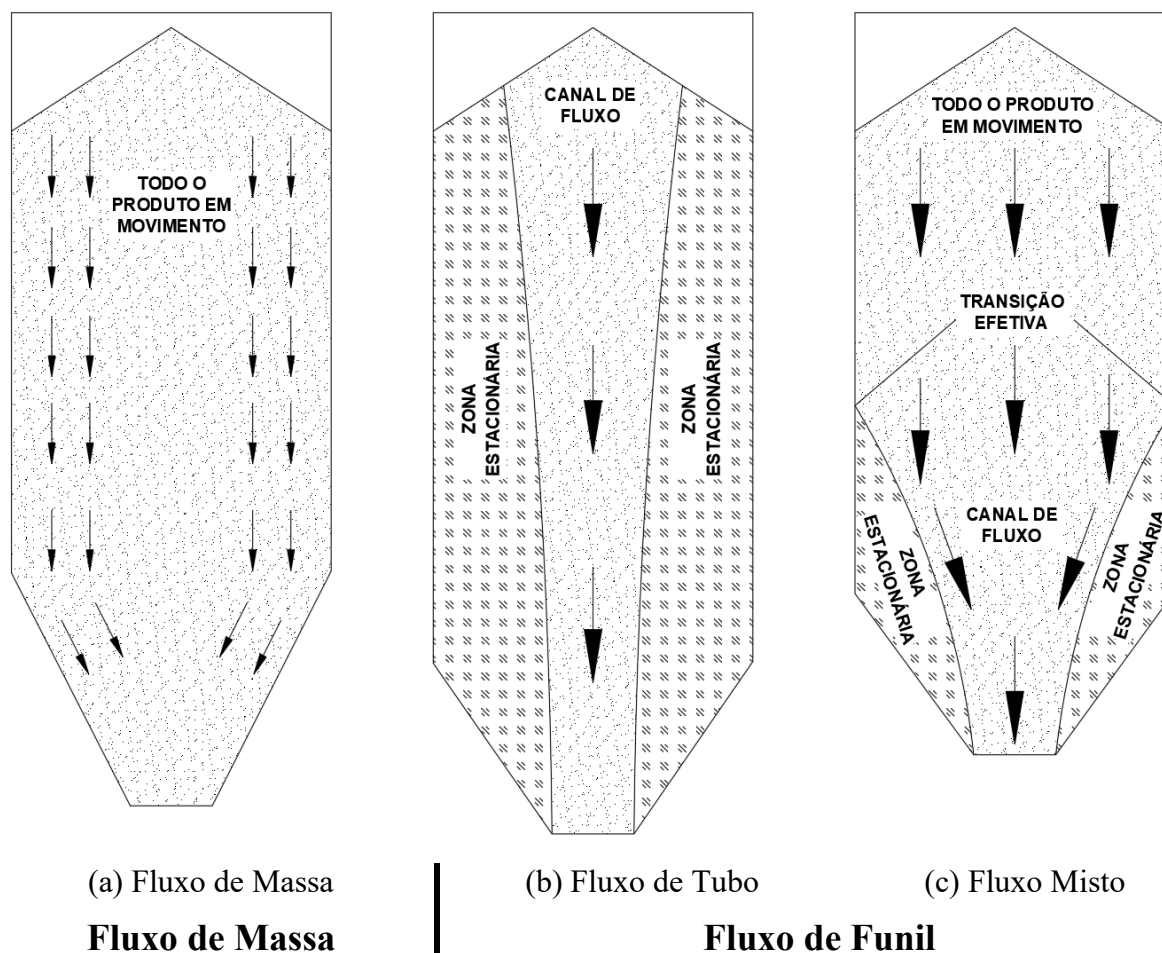


Figura 3 – Principais Tipos de Fluxo
 Fonte: CALIL Jr (2007)

4.2.1. Fluxo de Funil

Caracterizado pela formação de um canal de fluxo alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona parada ou estagnada na qual o produto permanece estático.

Durante o descarregamento do material do silo, a parte que está em contato com as paredes no nível mais alto vai desmoronando e alimentando o canal central de descarregamento. Entretanto, para produtos que apresentam uma ligação harmônica, a descarga pode até ser interrompida, ocorrendo a formação de um canal vazio, cercado de produtos estáticos. Para silos onde a razão entre a altura e o diâmetro é inferior a 1, o cone se estende até o topo.

Durante a abertura da porta de descarga o produto não se desloca todo de uma vez e a vazão de fluxo do tende a ser irregular durante a descarga.

Alguns materiais armazenados, dependendo do seu tipo e granulometria, tendem a se deteriorar com o tempo, então aqueles materiais acumulados próximo à parede das zonas estagnadas serão os mais degradados.

4.2.2. Fluxo de Massa

Este tipo de fluxo é o ideal e deve ser obtido operacionalmente sempre que possível. É caracterizado pelo fato de que todas as partículas do material armazenado apresentam deslocamento durante a operação de descarga. Dessa forma, nenhuma partícula de material permanece na sua posição original, todas elas se movimentam impedindo a formação de zonas estacionárias. Na figura 4 serão apresentados os tipos de fluxos de massa (4a) interno paralelo concêntrico, (4b) interno inclinado concêntrico, (4c) interno paralelo excêntrico e (4d) interno inclinado excêntrico. Na figura 5 serão apresentados os tipos de fluxos de funil (5a) concêntrico transição desigual, (5b) completamente excêntrico e (5c) parcialmente excêntrico.

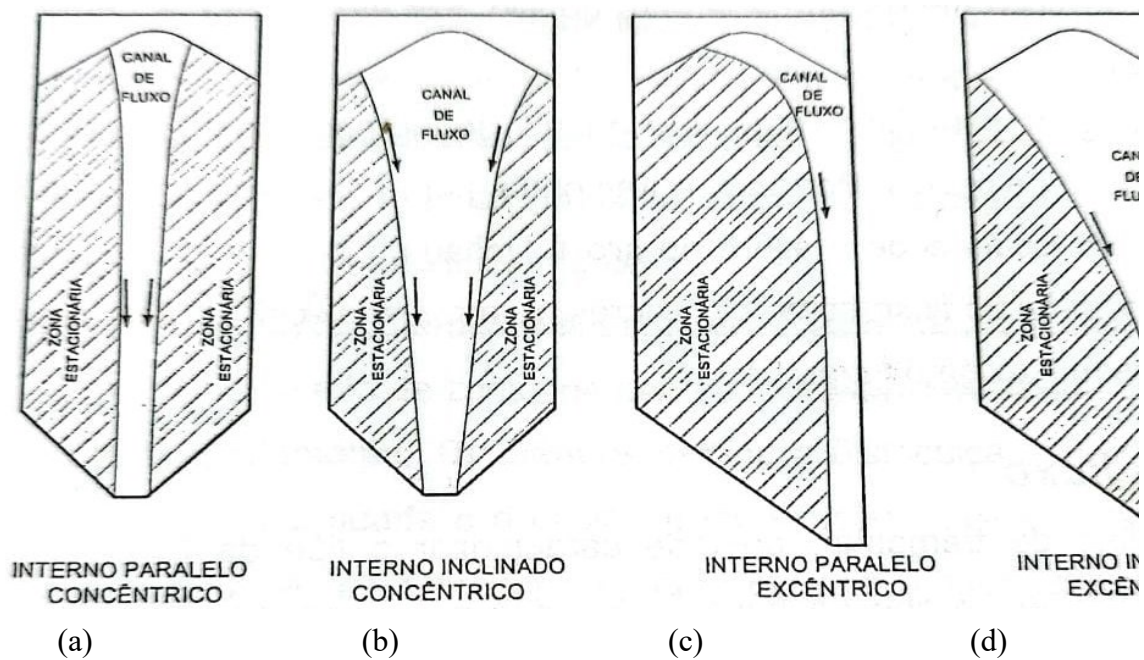


Figura 4 – Tipos de Fluxo de Massa.

Fonte: CALIL Jr (2007)

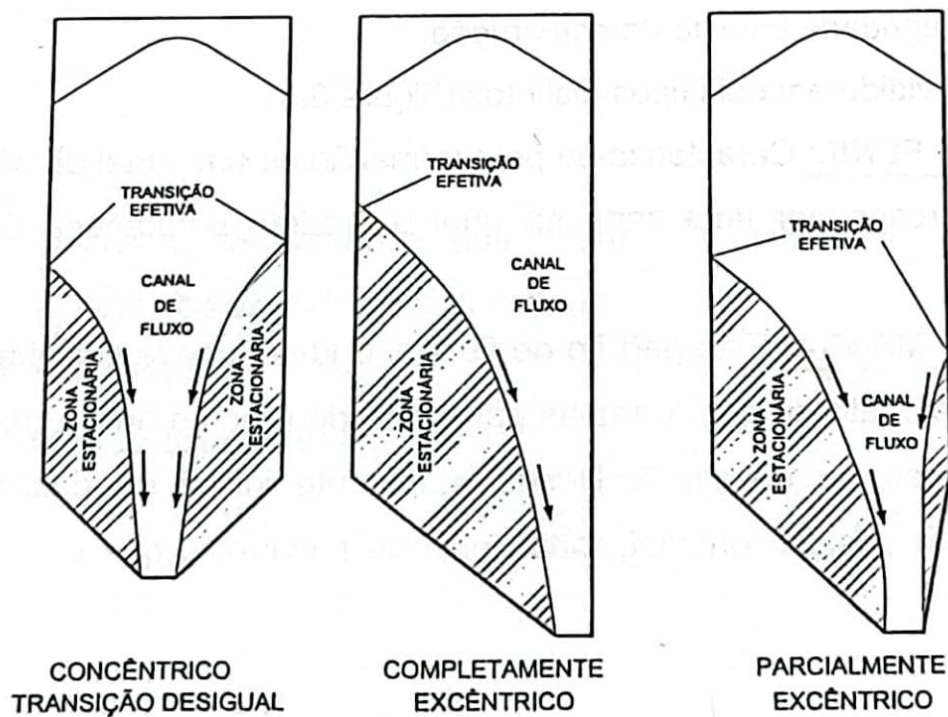


Figura 5 – Principais Tipos de Fluxo de Funil.

Fonte: CALIL Jr (2007)

4.2.3. Fluxo de Funil Misto

A saída excêntrica em silos com fluxo misto provoca o carregamento assimétricos que apresentam ser muito problemáticos para silos metálicos devido as pequenas espessuras das paredes e mesmo para saídas concêntricas, a transição efetiva não pode ocorrer na mesma altura em todo o perímetro. A figura 6 mostra o efeito da esbeltez no fluxo do silo e provoca uma interpretação diferenciada no cálculo das pressões para silos de diferentes geometrias.

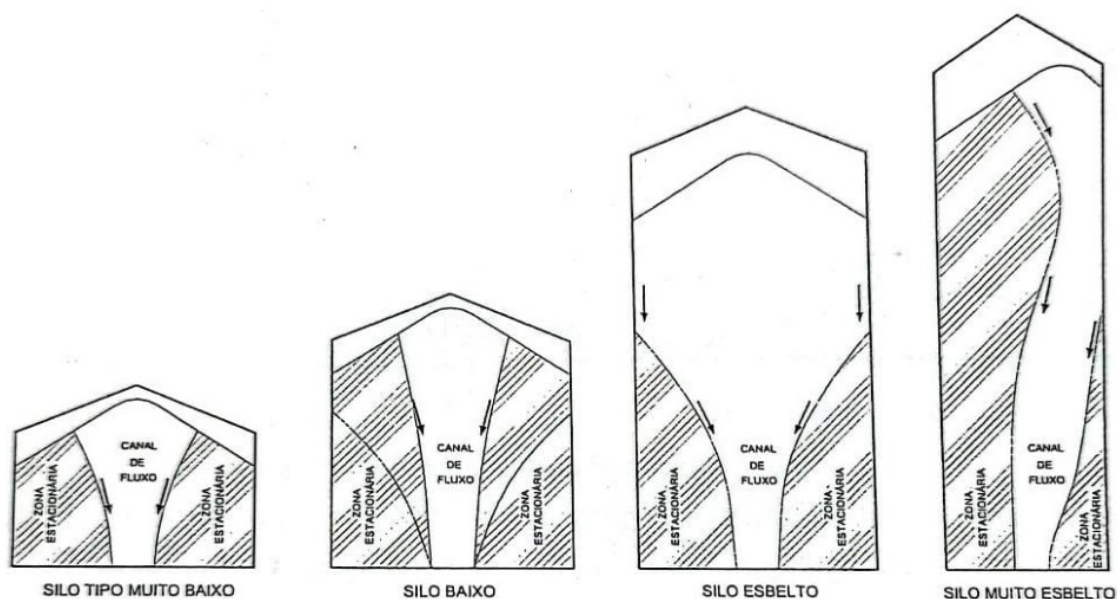


Figura 6 – Efeitos da Esbeltez no Fluxo do Silo.

Fonte: CALIL Jr (2007)

Cabe destacar que as principais normas internacionais apresentam dois gráficos para determinar o tipo de fluxo que irá ocorrer no equipamento. Esses gráficos apresentam o tipo de fluxo em função do ângulo ou do coeficiente de atrito com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e do tipo de tremonha, que geralmente são cônicas ou em cunhas concêntricas.

Na figuras 7 e 8 são apresentados gráficos para determinação do tipo de fluxo conforme as normas internacionais. Para se obter um padrão de fluxo seguro na escolha do ângulo α , deve sempre diminuir 3° devido às incertezas embutidas no processo.

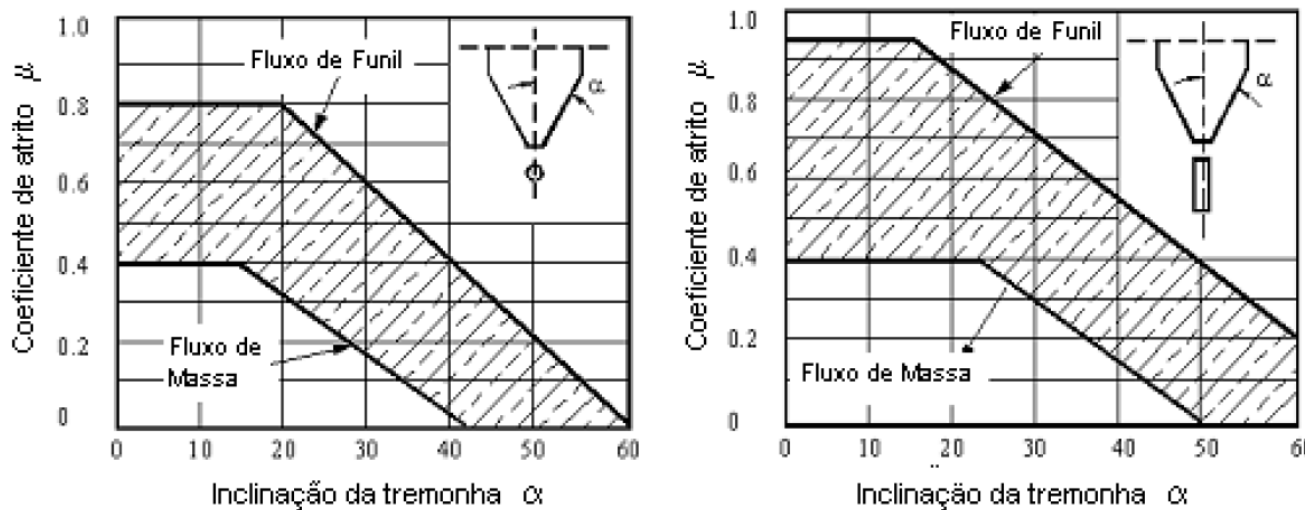


Figura 7 – Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

Fonte: AS 3774:1996

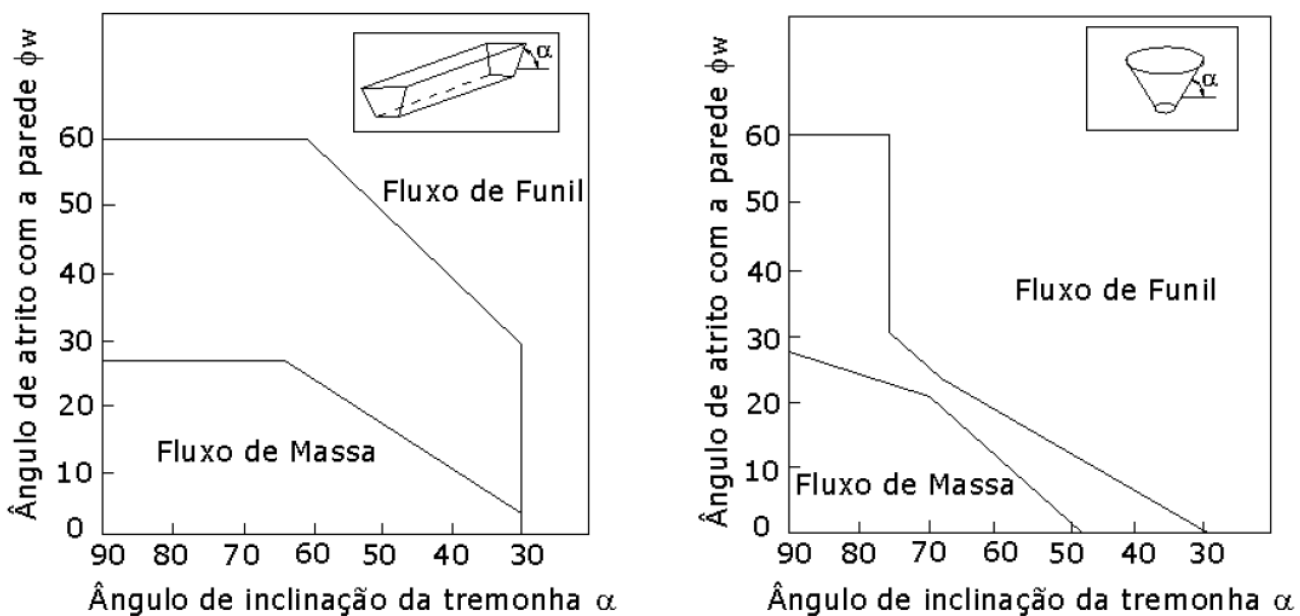


Figura 8 – Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

Fonte: Adaptado PrEN 1991-4:2003

De acordo com Roberts (1987d), o modelo de fluxo de um silo de fluxo de massa é comparativamente fácil de gerar e determinar, enquanto é mais difícil investigar o fluxo de funil. A menos que haja razões para não o fazer, os silos devem, portanto, ser projetados com formas geométricas simples e carregamento simétrico.

Carson et al. (1993) afirmam que é possível, ou até mesmo provável, que a geometria do canal de fluxo depende das propriedades que ainda não são habitualmente medida (tais como a dilatação desenvolvida pelo fluxo) por isso, a correlação entre as medidas conhecidas para uma grande faixa de produtos e experimentos é deficiente.

As avaliações de fluxo em silos envolvem:

- Conhecimento relativo ao contorno entre o fluxo de massa e funil;
- Experimentos de fluxo em modelos e silos reais;
- Correlações dos padrões de fluxo com propriedades dos materiais;
- Conceitos mecânicos relacionados aos contornos do fluxo interno;
- Conceitos empíricos, simples e conservadores.

Além disso, o processo de enchimento, a distribuição do material, padrão de tensão no silo que afeta o desenvolvimento de coesão, parâmetros de rigidez e resistência do material, geometria e superfície das paredes do silo afetam consideravelmente o padrão dos fluxos nos silos.

4.3. Vantagens e Desvantagens do Tipo de Fluxo

Os tipos de fluxos apresentam suas vantagens e desvantagens. A tabela a seguir apresenta as principais características dos fluxos de massa e de funil.

FLUXO DE MASSA		FLUXO FUNIL	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição da tremonha	Menor altura da tremonha	Flutuações na vazão
Efeito de segregação radial reduzido, com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha	Segregação de sólidos
Campo de tensões mais previsível	Necessidade de tremonhas mais inclinadas e lisas	Menor desgaste superficial da parede	Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções de fluxo
Toda capacidade utilizada	Maior energia de elevação		Deterioração dos produtos por causa da região estagnada

Maior capacidade de armazenamento, pois não possui regiões com produto estagnado	As partículas devem resistir à queda livre de alturas maiores		Redução da capacidade de armazenagem
			Formação de tubos
			Picos de pressões na região de transição efetiva

Fonte: CALIL Jr (2007)

4.4. Obstrução de Fluxo

A formação de uma obstrução de fluxo deve-se ao fato de que o material armazenado adquire resistência suficiente para suportar seu próprio peso, devido a consolidação do material. Existem 2 tipos de obstruções de fluxo: arco e tubo. É provável que durante a descarga do material, se nenhuma dessas duas obstruções ocorrerem, um fluxo satisfatório acontecerá.

Essas obstruções causam sérios danos ao silo e principalmente para a tremonha, pois, quando rompem, atuam como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos na bica de descarga e paredes laterais.

As obstruções vão depender das propriedades do material armazenado e da geometria.

- Função fluxo (FF): depende da resistência inconfínada (σ_{ic}), da tensão principal de consolidação (σ_1) e do tempo (t). Os materiais geralmente estão em altas umidades, altas temperaturas e são armazenados por curto e longo período. Geralmente é difícil estimar mudanças nas propriedades físicas dos materiais para um tempo não conhecido de armazenamento.
- Fator fluxo da tremonha (ff): depende da geometria, do efetivo ângulo de atrito interno do material e do ângulo de atrito do material com a parede.

5. REQUISITOS PARA EVITAR OBSTRUÇÕES DE FLUXO

A abertura da boca de descarga de um silo deve ser suficientemente dimensionada para que não ocorram obstruções durante o descarregamento do material armazenado. Para silos com fluxo

de massa, é importante evitar a formação da obstrução na abóbada e para silos com fluxo de funil, evitar a formação da obstrução em tubo.

Na figura 9 será apresentado o que acontece com uma partícula de material armazenado durante a operação de descarga em um silo com fluxo de massa. Abastecendo o material no topo do silo, a partícula estava inconsolidada, pois sobre ela não apresentava nenhuma pressão. Conforme a partícula do material vai escoando no interior do silo, a consolidação aumenta e consequentemente a tensão de consolidação σ_1 também.

Na medida que aumenta a profundidade a pressão também aumenta, permanecendo constante a partir de uma certa altura. Na transição entre a parede vertical e a tremonha ocorre o pico de pressão. A partir deste ponto, a pressão vai diminuindo à medida que o material vai sendo descarregado. Como resultado, a tensão inconfínada de ruptura σ_c (resistência do produto) também aumenta. Entretanto a partícula do material está sendo solicitada todo tempo por uma tensão σ_1' , cuja intensidade depende da posição da partícula no silo.

Conforme mostra a figura 9(a), em todo o momento a tensão σ_1' a que está submetida a partícula é maior que a tensão inconfínada de ruptura σ_c , e dessa forma não ocorre a formação de abóbada durante a descarga do produto.

Entretanto, se as dimensões da abertura da boca de descarga são diminuídas de b_1 para o b_2 conforme mostra a figura 9b, mantendo-se constantes as demais variáveis, como a inclinação da tremonha, material, umidade, entre outras, de forma que se a tensão inconfínada de ruptura σ_c a tensão σ_1' , ocorrerá a formação de abóbada. O ponto onde σ_c intercepta σ_1' , representa a dimensão de abertura crítica ou mínima para a qual não se forma obstrução em abóbada.

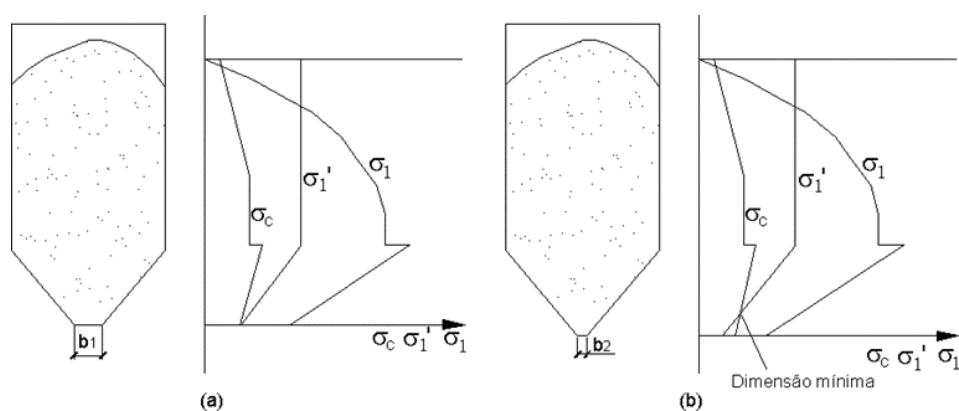


Figura 9 – Análise para formação de obstrução em abóbada em silos com fluxo de massa.
 Fonte: CALIL Jr (2007)

Na prática para efeitos de projetos, o critério de fluxo ou não fluxo proposto por JENIKE apud ROBERTS (1987a) é o utilizado. Na figura 10, a tensão inconfina σ_c , que representa a resistência do material armazenado, é plotada contra a maior tensão de consolidação. A curva formada é chamada de função fluxo (FF). A outra linha apresentada na figura 10, é chamada de fator fluxo (ff). representa a condição de tensão no arco. A linha ff abaixo da curva de FF, consiste nas insuficiências de tensões na abóbada para causar o fluxo. Após a tensão crítica, a linha de ff apresenta-se acima da curva de FF, onde as tensões na abóbada excedem a resistência do material e o fluxo ocorrerá. A intersecção da linha ff com a curva FF é o ponto crítico, ou seja, uma tensão crítica para calcular a dimensão D da abertura da boca de descarga, ou seja, quando $\sigma_c = \sigma_1'$.

Se a função do fluxo com o tempo FF fosse plotada na figura 10, o ponto de intersecção seria acima do ponto já determinado. Concluindo-se que as aberturas da boca de descarga maiores são necessárias para evitar uma obstrução em abóbada de material que aumentam a consolidação com o período de armazenagem.

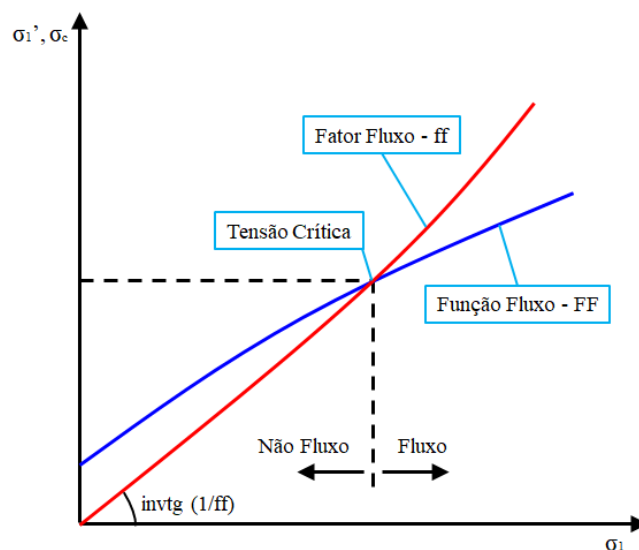


Figura 10 – Função fluxo do produto armazenado e fator fluxo da tremonha
 Fonte: CALIL Jr (2007)

Portanto para ocorrer fluxo por gravidade deve-se ter $FF \geq ff$. Caso o fator fluxo da tremonha variar sempre acima da função fluxo do produto armazenado, então a análise anterior não pode ser utilizada para determinar a dimensão mínima da boca de descarga. Produtos que apresentam este comportamento, geralmente não possuem coesão, portanto são de fluxo livre. Neste caso, a dimensão mínima da boca de descarga pode ser determinada em função do dispositivo de descarga ou, no caso de partículas grandes, por uma dimensão de boca de descarga, em média 8 vezes a dimensão da maior partícula para abertura circular, 9 vezes para abertura quadrada ou retangular e 4 vezes para aberturas em forma de canal com razão entre comprimento e largura maior que 6.

Quando o fator fluxo da tremonha variar sempre abaixo da função fluxo do material, o material armazenado não irá fluir somente por gravidade. Neste caso, pode-se substituir o material da parede da tremonha por um outro com o coeficiente de atrito baixo, ou mesmo, revesti-la com outro material, diminuindo a rugosidade das paredes. Se, mesmo assim, permanecer a situação de não fluxo, deverão ser usados dispositivos para facilitar a descarga.

Para os materiais que apresentam consolidação com o tempo de armazenagem, caso o fator fluxo da tremonha interromper o fluxo do material e não interceptar a função fluxo do material com o tempo, dispositivos mecânicos, como vibradores, deverão ser instalados para iniciar o fluxo. Nesses casos, a abertura da boca de descarga será projetada com um fator de segurança para levar em conta os efeitos desfavoráveis da vibração.

6. PRESSÃO NO SILO

A pressão no silo é gerada de acordo com as operações de carga, armazenamento e descarga. Em cada uma dessas etapas, a estrutura se comporta de uma maneira específica. Segundo Cheung (2007, p. 46), há uma série de variáveis que afetam o comportamento estrutural de um silo:

- Propriedades do produto armazenado;
- Material empregado na construção das paredes do silo;
- Tipo de fluxo do sistema;
- Forma da tremonha;

- Altura e forma do carregamento;
- Geometria do silo;
- Imperfeições geométricas da parede do silo;
- Temperatura e umidade;
- Degradação das paredes do silo com o tempo.

Normalmente, além da tensão vertical dentro do próprio material, o produto armazenado terá pressões normais e paralelas às paredes verticais e da tremonha do silo, conforme mostra a figura 11, na qual:

- p_h - pressão horizontal na parede vertical devido ao produto armazenado;
- p_n - pressão normal nas paredes da tremonha devido ao produto armazenado;
- p_t - pressão de atrito do produto armazenado contra as paredes da tremonha;
- p_v - tensão vertical no produto armazenado;
- p_w - pressão de atrito do produto armazenado nas paredes verticais.

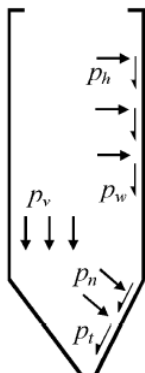


Figura 11 – Pressões geradas pelo produto armazenado

Fonte: EN 1991-4, 2006, p. 9

7. DEFINIÇÃO DO PROJETO DO SILO

A seguir serão apresentadas principais vistas e detalhes do modelo 3D do silo, definição da geometria, ângulo da tremonha, preparação e definição das malhas, obtenção dos resultados e projeto executivo contendo as dimensões básicas.

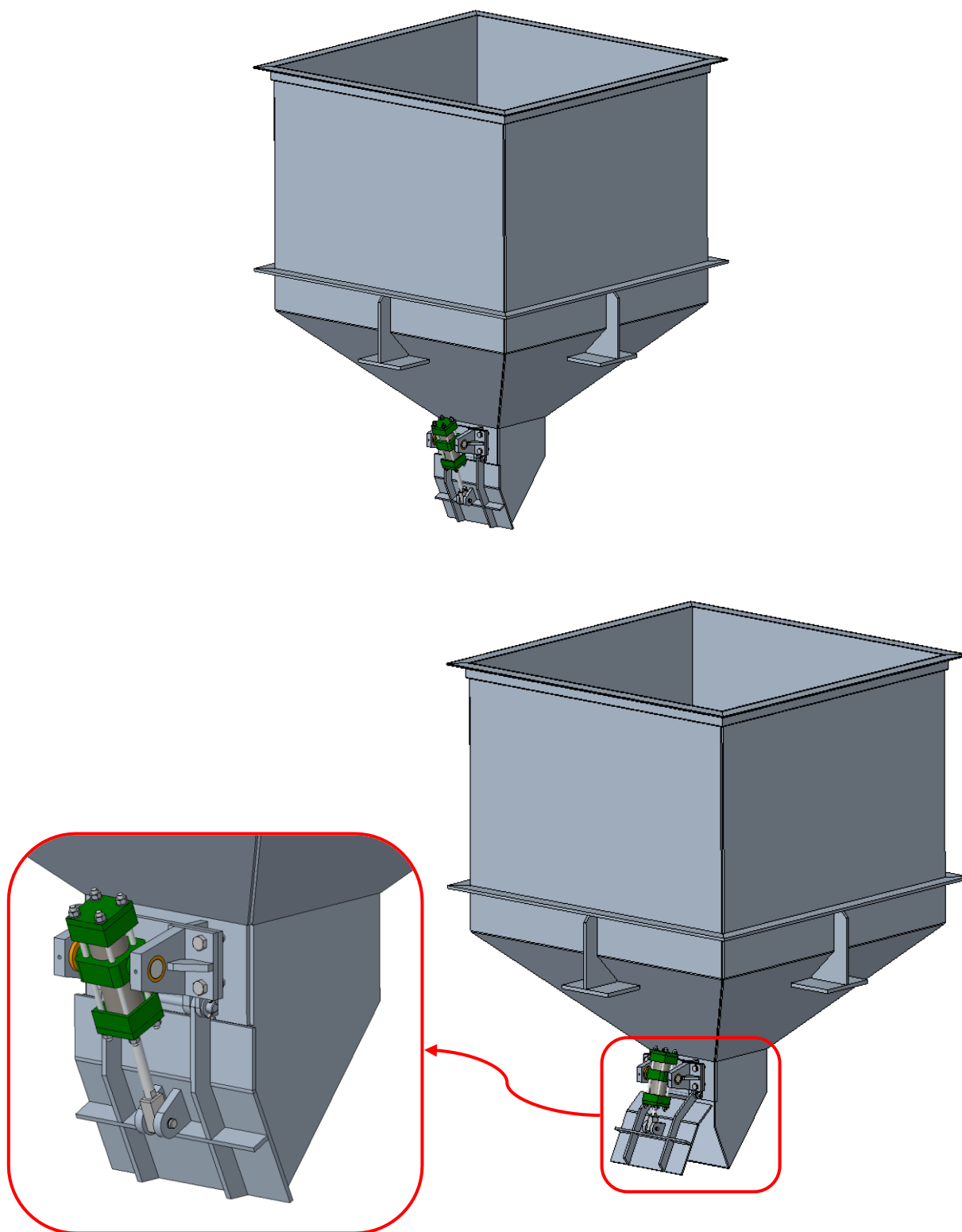


Figura 12 – Definição do Projeto do Silo

7.1. Definição da Geometria do Silo – Dimensões Internas

A seguir serão apresentadas as principais dimensões internas do silo, onde o material terá contato direto com as superfícies do equipamento.

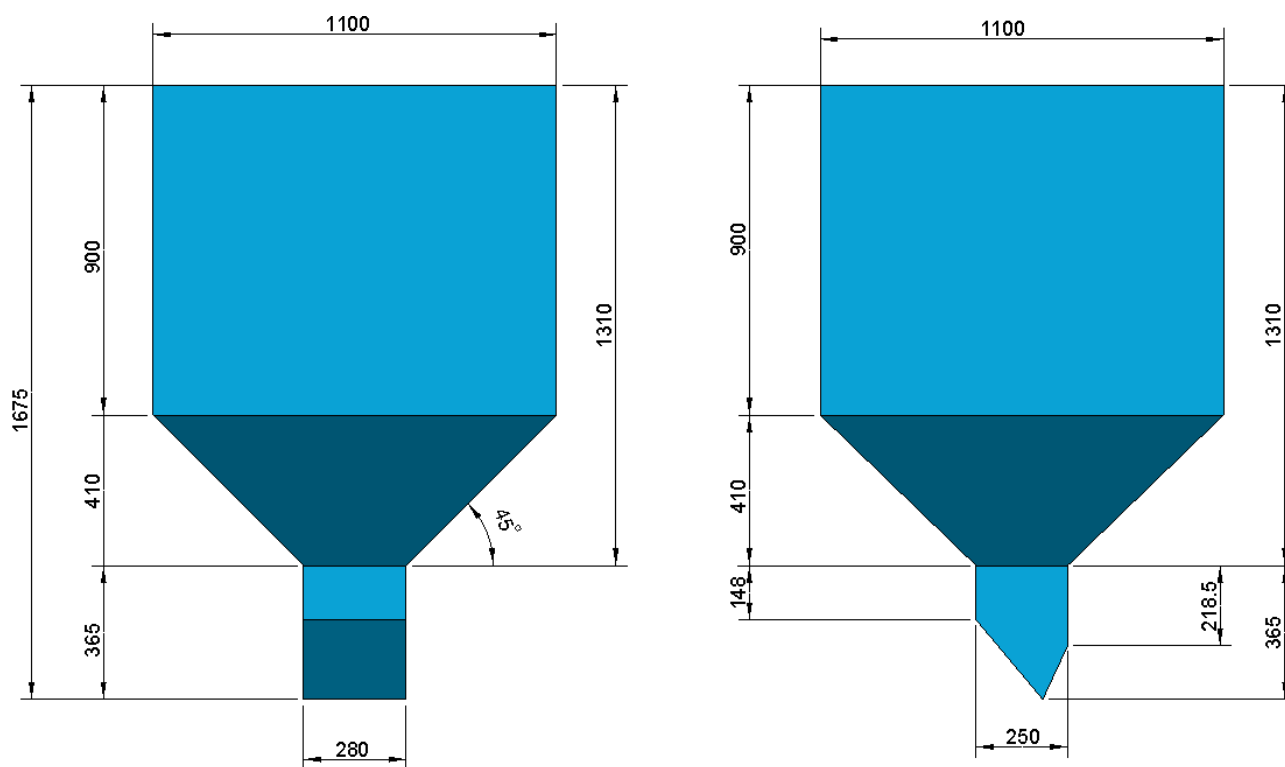


Figura 13 – Definição da Geometria do Silo – Dimensões Internas

7.2. Ângulo da Tremonha

O primeiro passo no projeto de silos e tremonhas é determinar as características físicas do produto armazenado. Isso pode ser feito testando ou consultando o formulário apropriado. O próximo passo é selecionar a geometria da tremonha mencionada no item 4.1.

7.2.1. Determinação da Inclinação da Parede

Após escolher a geometria da tremonha, e determinar o ângulo de atrito com a parede e o ângulo de atrito interno efetivo, pode-se determinar a inclinação máxima da tremonha em relação à vertical para garantir o fluxo de massa, conforme mostrado na figura 14 para tremonhas cônicas e em forma de cunha.

A fronteira entre fluxo de massa e fluxo de funil é o resultado da resolução da equação proposta por JENIKE (1964). No diagrama a inclinação da tremonha é medida verticalmente. O ângulo efetivo do atrito interno é o parâmetro das linhas entre o fluxo de massa e o fluxo de funil. As linhas divisórias desintegraram todos os pares de valores que levam ao fluxo de massa daqueles que levam ao fluxo de funil.

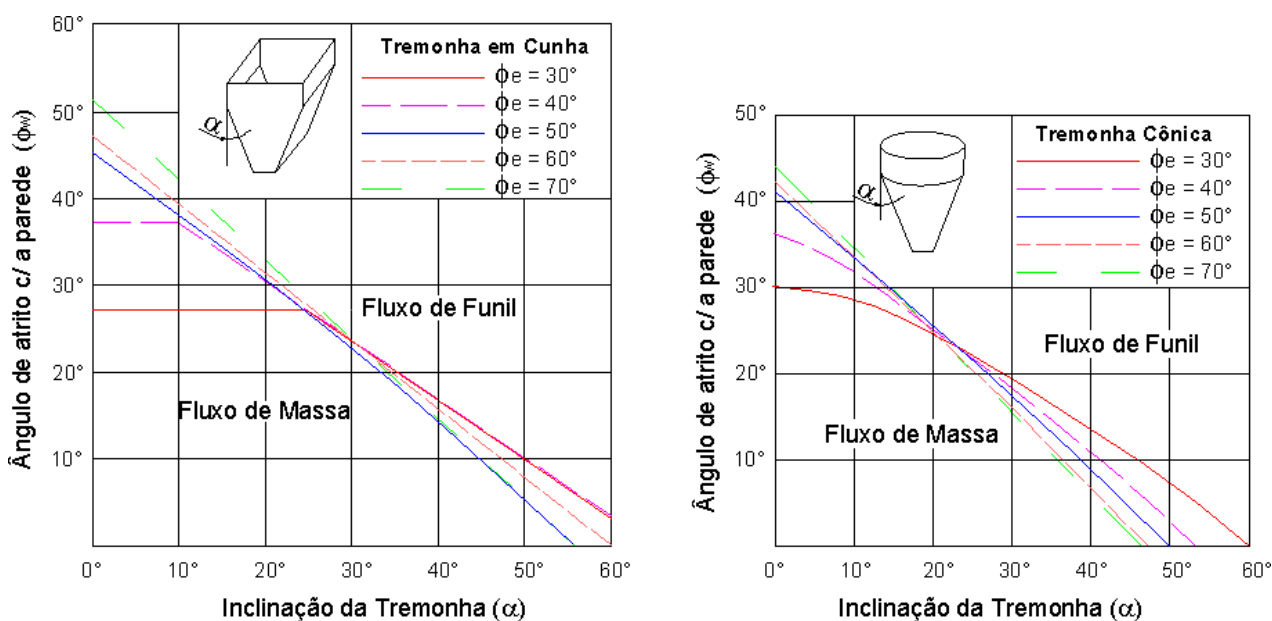


Figura 14 – Diagrama para Projeto de Tremonha

Fonte: JENIKE, A. (1964)

Conforme JENIKE (1985), a inclinação da tremonha para os fluxos de massa prediz muito bem, embora resultados dos testes indiquem que os valores são um pouco conservadores. Para os silos

com fluxo de funil, os valores apresentados nos gráficos predizem incorretamente o ângulo de inclinação de tremonhas de eixo simétrico.

Entretanto, McLEAN (1986), sugere o seguinte equacionamento para a determinação da inclinação máxima da tremonha para fluxo de massa:

- Para tremonhas de eixo simétrico:

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

- Para tremonhas em cunha:

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

Segundo GAYLORD & GAYLORD (1984), para tremonhas em bisel e em cunha, o fluxo de massa ocorrerá se:

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

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

$$L \geq 6 \text{ bp}$$

7.2.2. Determinação do Fator Fluxo da Tremonha (*ff*)

O fator pode ser obtido graficamente a partir de um gráfico publicado por JENIKE (1964). Esses gráficos são uma função da geometria e inclinação da tremonha, ângulo de atrito contra a parede e o ângulo efetivo de atrito interno. A figura 15 mostra um desses gráficos.

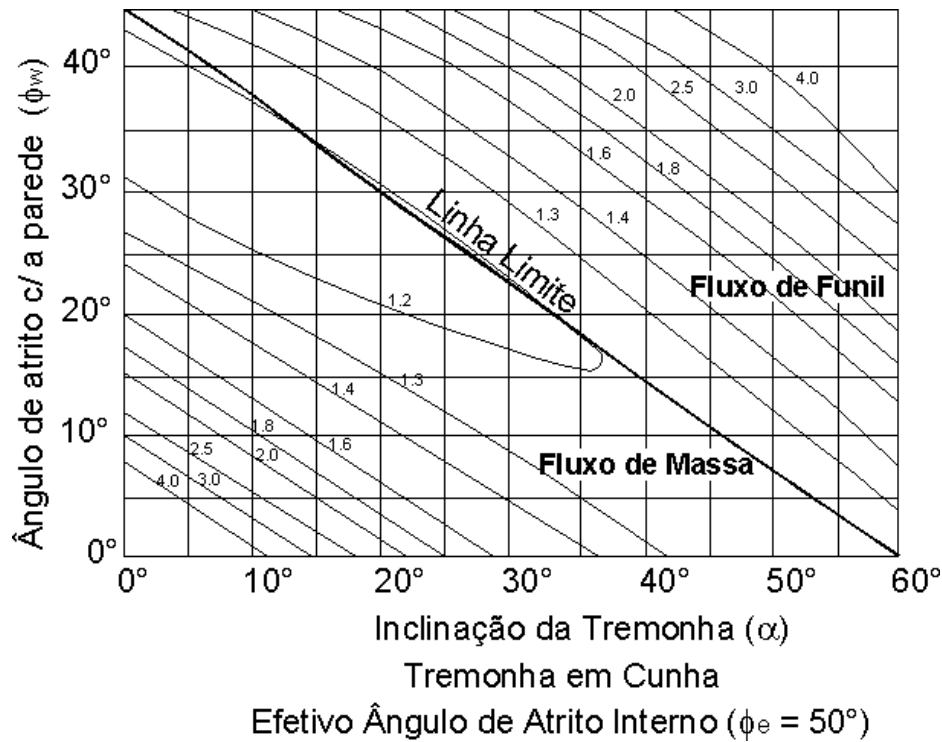


Figura 15 – Gráfico para Determinação do Fator de Fluxo
 Fonte: JENIKE, A. (1964)

Abaixo introduz-se a equação proposta por ENSTAD (1975), que permite determinar o fator de vazão com boa aproximação.

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

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

$$\theta = \beta + \alpha$$

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

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

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

Onde:

- f_{es} = valor superior do efetivo ângulo de atrito interno.
- f_{ws} = valor superior do ângulo de atrito com a parede
- $m = 0$ para tremonhas retangulares, onde $L \geq 30$
- $m = 1$ para tremonhas de eixo simétrico

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

7.2.3. Determinação da Tensão Crítica

Para determinar a tensão crítica, as tensões combinadas σ_1 e σ_c , são plotadas num gráfico. A combinação de pontos provê um gráfico da função de fluxo do produto. Em seguida, traça-se uma linha reta com inclinação $\text{inv}tg(1 / ff)$ trespassando pelo ponto inicial para obter o fator de enchimento da tremonha. O ponto de intersecção entre a reta ff e a curva FF fornece a tensão crítica (σ_{crit}).

7.2.4. Determinação da Função $H(\alpha)$

JENIKE (1964) usa a função $H(\alpha)$ para determinar o tamanho da saída. Esta função depende da forma geométrica e da inclinação da tremonha. A figura 16 apresenta gráficos para determinar os valores de $H(\alpha)$ para tremonhas cônicas e em forma de cunha.

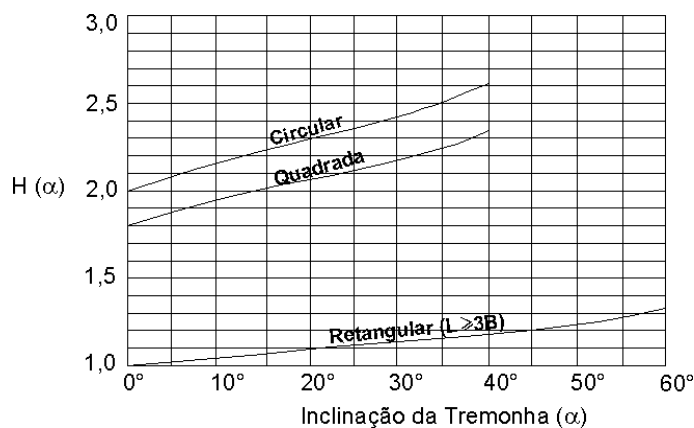


Figura 16 – Determinação da Função $H(\alpha)$ para Tremonhas Cônicas e em Cunha
 Fonte: JENIKE, A. (1964)

7.2.5. Determinação da Dimensão Mínima da Boca de Descarga

Silos com fluxo de massa

A dimensão mínima da boca de descarga é dada por:

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

Para evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, JENIKE (1964) recomenda aumentar o tamanho da saída para um mínimo de 20%.

Com boa aproximação, JENIKE & JOHANSON apud GAYLORD & GAYLORD (1984), recomendam as seguintes equações:

$$b_{min} \geq \frac{2,2 \sigma_{crit}}{\gamma_i}, \text{ para bocas de descarga circulares;}$$

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

Silos com fluxo de funil

Para garantir que ocorra um fluxo satisfatório em um silo com fluxo de funil, é necessário que a dimensão da boca de descarga seja grande o suficiente para que não ocorram obstruções de fluxo em arco e tubo. Uma forma típica de saída é mostrada na figura 17.

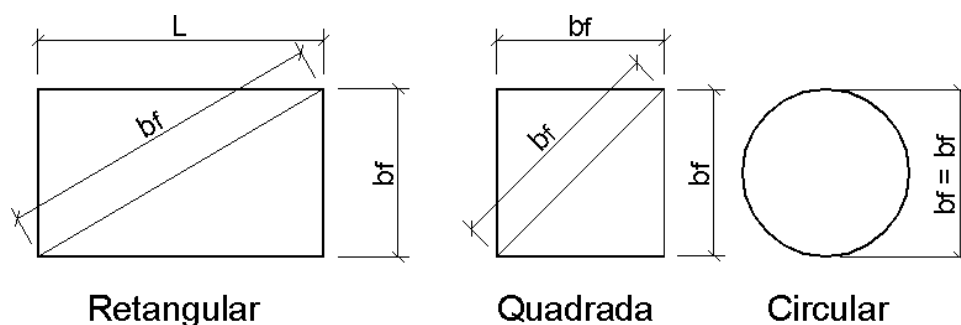


Figura 17 – Formas de Bocas de Descarga para Silos com Fluxo de Funil

A dimensão mínima da boca de descarga é dada por:

$$l_{f \min} = \frac{G(\phi_i) \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i}$$

A função $G(\phi_i)$ é denominada fator de tubo e pode ser determinada pelo gráfico proposto por JENIKE (1964) conforme mostra a figura 18. O valor desta função depende do ângulo de atrito interno.

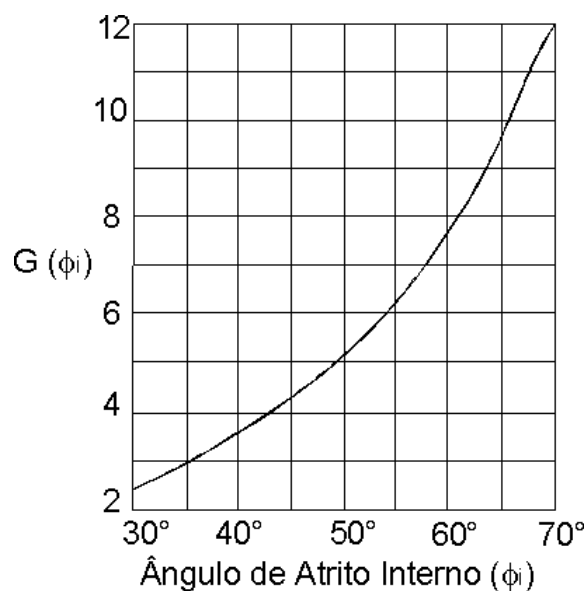


Figura 18 – Determinação da Função $G(\phi_i)$
Fonte: JENIKE, A. (1964)

McLEAN apud CALIL Jr. (1990) propõe a seguinte expressão empírica para $G(\phi_i)$:

$$G(\phi_i) = 0,7502 \cdot e^{0,0387\phi_i}$$

Para saídas redondas ou quadradas em fluxo de funil, é suficiente definir b_f para evitar a formação de obstruções em arco e tubo. Enquanto que, para boca de descarga retangulares devem ser especificados com dimensões diferentes (b_p) para evitar a obstrução do arco.

Para determinação de b_p , ROBERTS (1987d) sugere um fator fluxo $ff = 1,7$. Isto permite um ângulo de inclinação da tremonha $\alpha = 30^\circ$ para o maior ângulo de atrito interno.

Como $\alpha = 30^\circ$, da figura 16 para uma solução retangular, temos que $H(\alpha) = 1,15$.

Portanto,

$$h_p = \frac{1,15 \cdot \sigma_{crit}}{\gamma_i}$$

Obs.: σ_{crit} será obtido com fator fluxo $ff = 1,7$.

7.3. Propriedades

7.3.1. Propriedades do Material

Material: minério de ferro

Densidade: $\gamma = 2200 \text{ kgf/m}^3$

Ângulo de repouso: $\theta = 35^\circ$

7.3.2. Propriedades do Silo

Volume Total: $1,32 \text{ m}^3$

Volume de Trabalho: 1 m^3

Peso Total do Silo (exceto material): $344,2 \text{ kg}$

Material de Construção:

Chapa, cantoneira, barra chata = ASTM A36

Barra Redonda = SAE 1020

Barra Redonda = SAE 660

7.4. Cálculo da Tensão Admissível

A tensão admissível é calculada seguindo a norma ANSI/AISC 360:2016, assim podemos aplicar a tensão de escoamento dividida por um fator de segurança $\Omega = 1,67$.

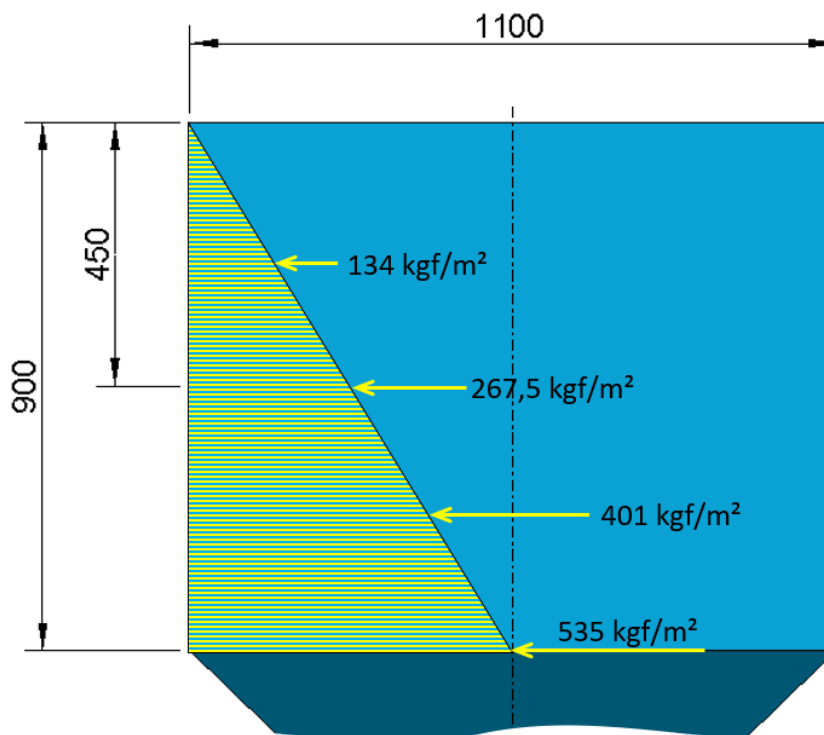
$$\text{Tensão Admissível ASTM A36} = \frac{250 \text{ MPa}}{1,67} = 149,7 \text{ MPa}$$

7.5. Cálculo do Carregamento na Parede Vertical:

$$k = \frac{1 - \operatorname{sen}\theta}{1 + \operatorname{sen}\theta} \rightarrow \frac{1 - \operatorname{sen} 35^\circ}{1 + \operatorname{sen} 35^\circ} = 0,27$$

$$P_h = k \cdot \gamma \cdot h \rightarrow 0,27 \cdot 2200 \cdot 0,90 = 534,6 \text{ kgf/m}^2$$

Nota: O cálculo do carregamento na parede vertical foi considerado o volume total do silo de 1.32 m³.



7.6. Cálculo do Carregamento Tronco de Pirâmide

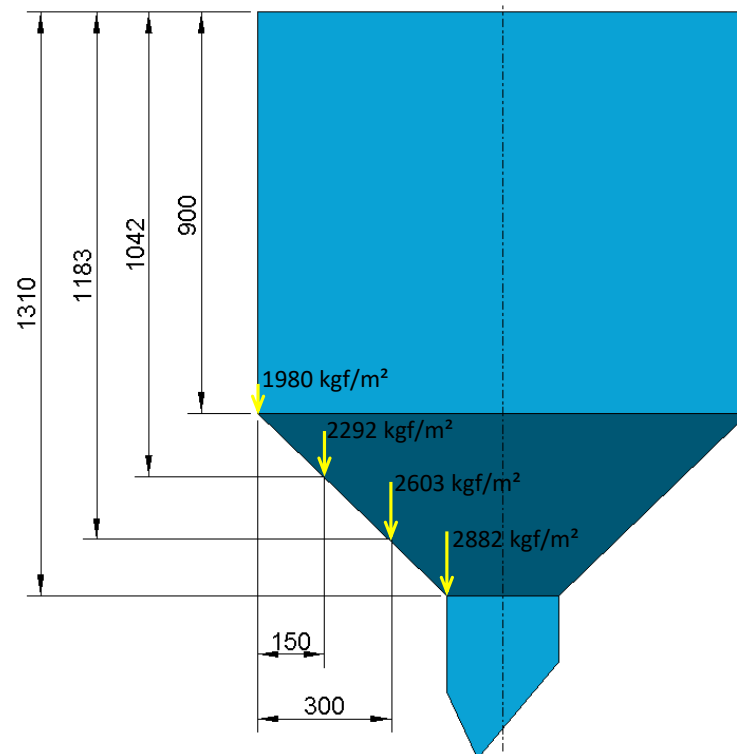
Cálculo Força Vertical

$$q_v = 2200 \cdot 0,9 = 1980 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{v1} = 2200 \cdot 1,042 = 2292 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{v2} = 2200 \cdot 1,183 = 2603 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{v3} = 2200 \cdot 1,31 = 2882 \text{ kgf/m}^2$$



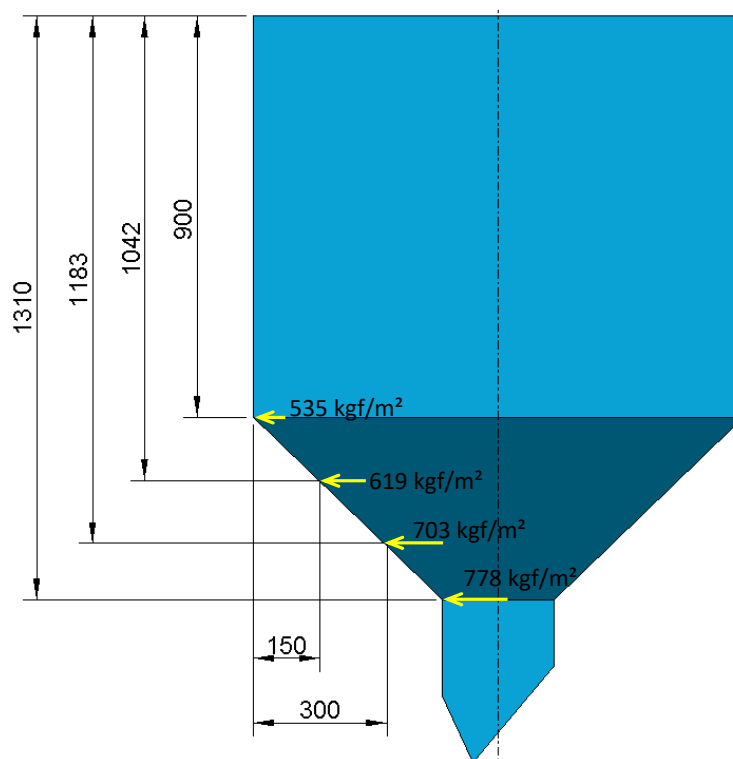
Cálculo Força Horizontal

$$q_h = 0,27 \cdot 2200 \cdot 0,9 = 535 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{h1} = 0,27 \cdot 2200 \cdot 1,042 = 619 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{h2} = 0,27 \cdot 2200 \cdot 1,183 = 703 \text{ kgf/m}^2$$

$$q_{h3} = 0,27 \cdot 2200 \cdot 1,310 = 778 \text{ kgf/m}^2$$

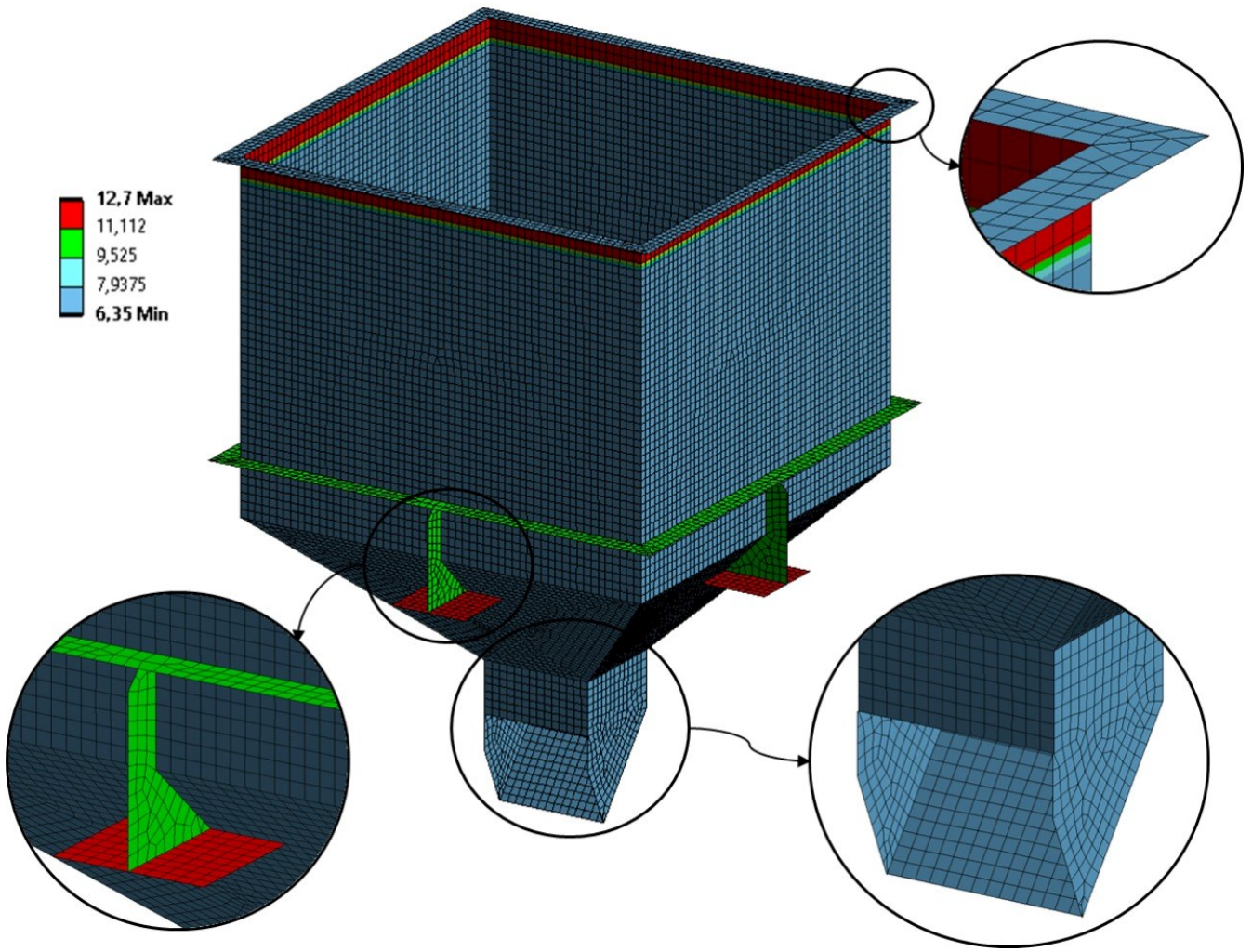


8. PREPARAÇÃO E DEFINIÇÃO DE MALHAS

A qualidade da malha dependerá da modelagem, geração da malha e outros recursos adotados na simulação.

A densidade da malha de elementos finitos pode variar ao longo da estrutura, dependendo da complexidade da geometria e do nível de tensão esperado para uma determinada área. Portanto, regiões com maiores gradientes de tensão necessitam de uma densidade de malha mais refinada.

A seguir estão os tipos de elementos de malha usados na análise de silos. A seguir será apresentado malhas com suas respectivas espessuras de chapas.



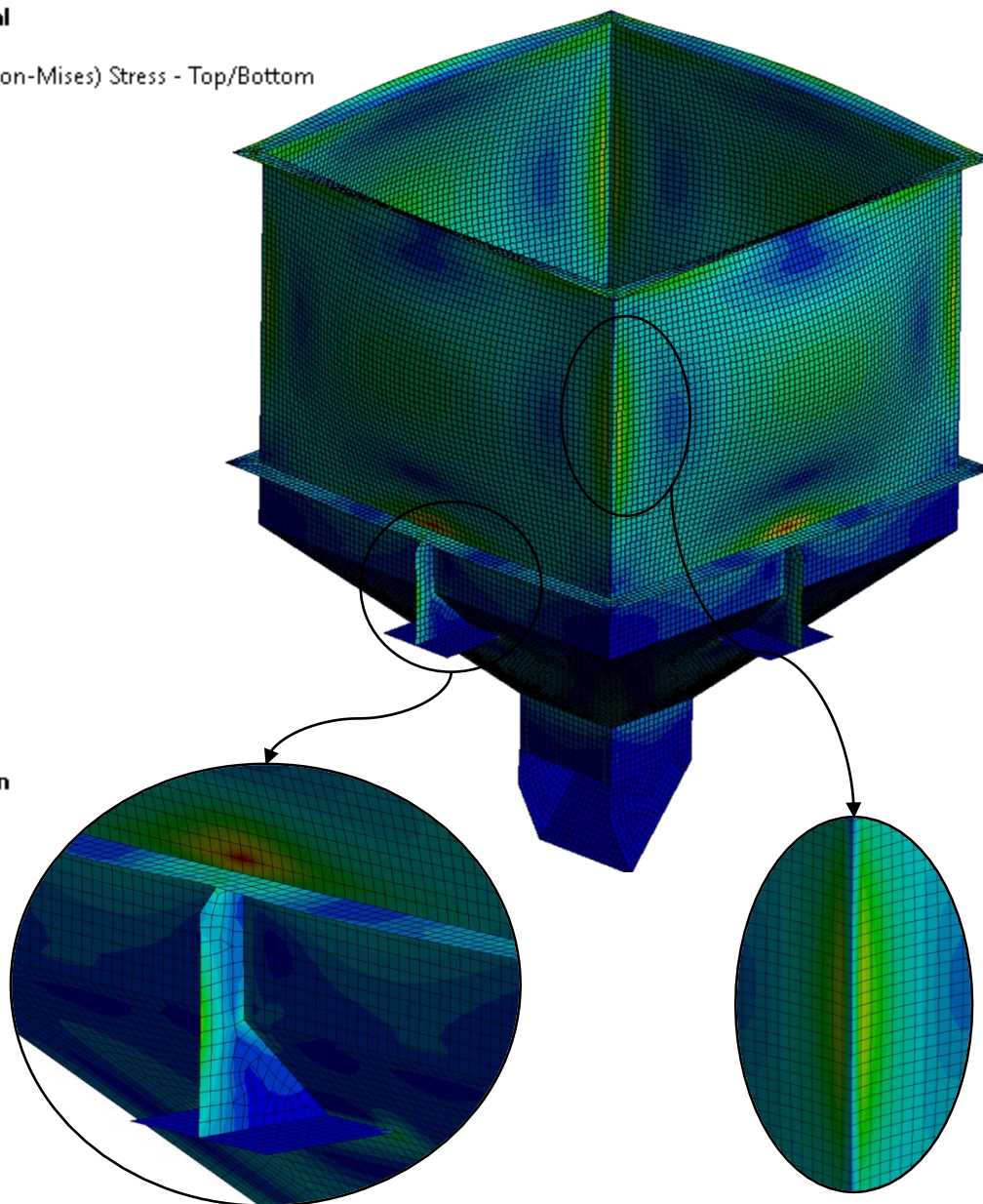
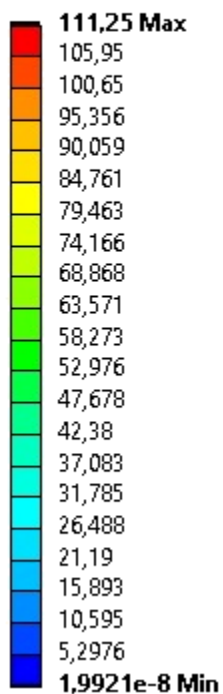
9. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

A: Static Structural

Equivalent Stress

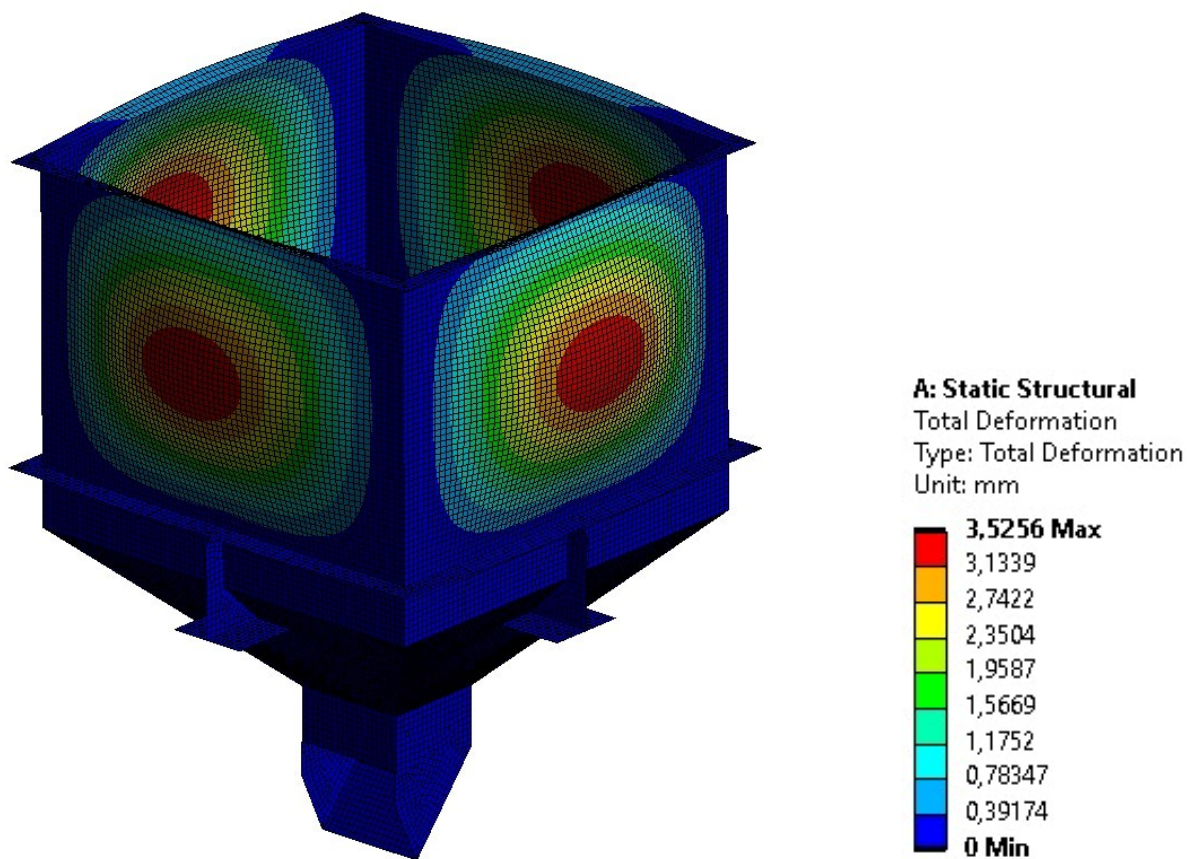
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa



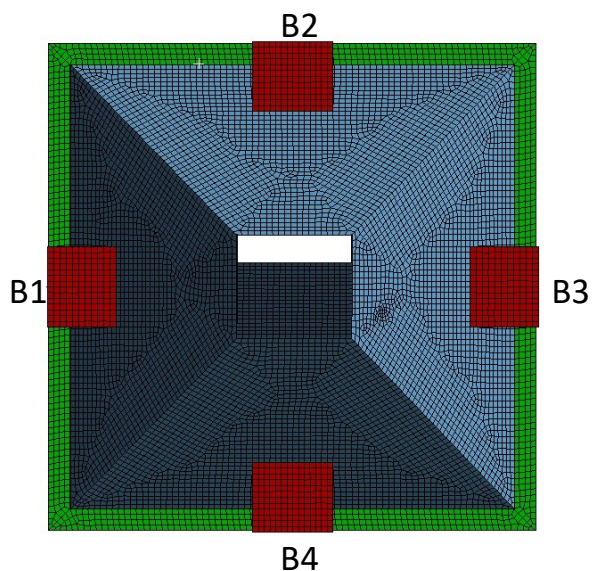
Tensão Von Mises 111,25 MPa < Tensão Admissível 149,7 MPa

Após a análise das tensões de Von Mises, verifica-se que as pressões variam significativamente, destacando-se a região de apoio do silo onde há maior concentração, porém menor que a tensão admissível.



Deformação Máximo 3.52 mm

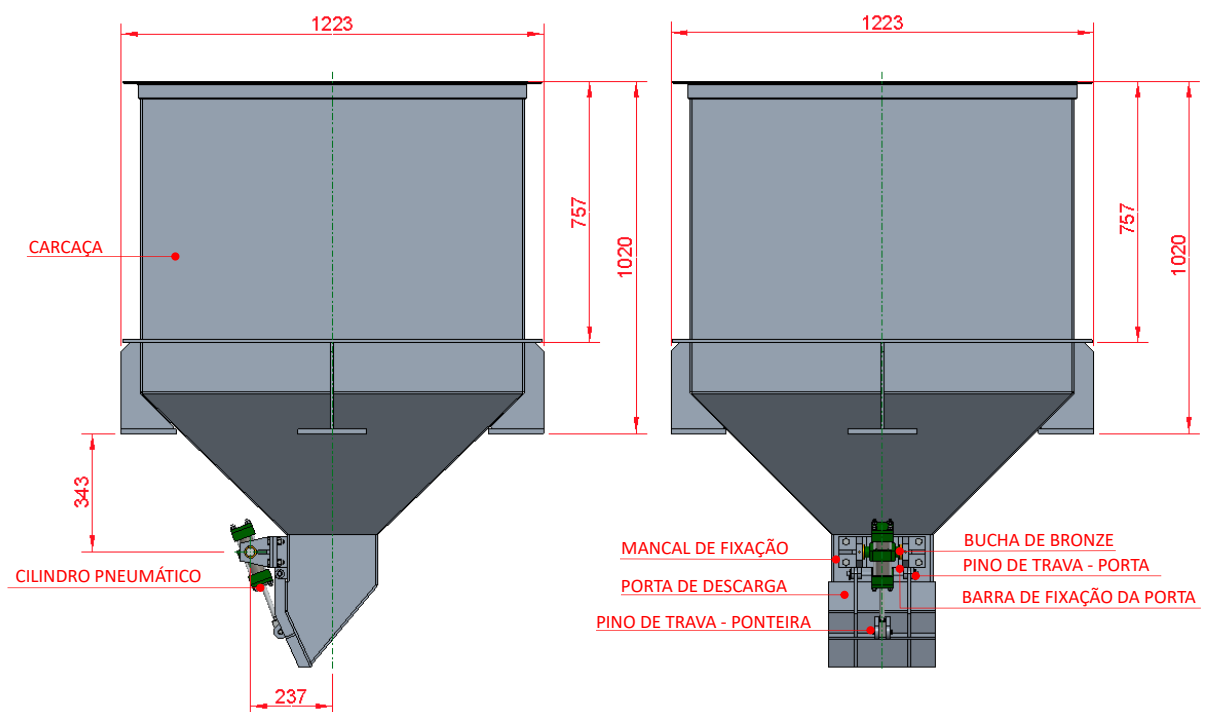
Esta análise final mostra que a deformação máxima das paredes laterais do silo pode ser de até 3,52 mm após o carregamento, que é uma deformação aceitável para o fluxo de trabalho. A Figura a seguir apresenta as reações nas bases do silo.



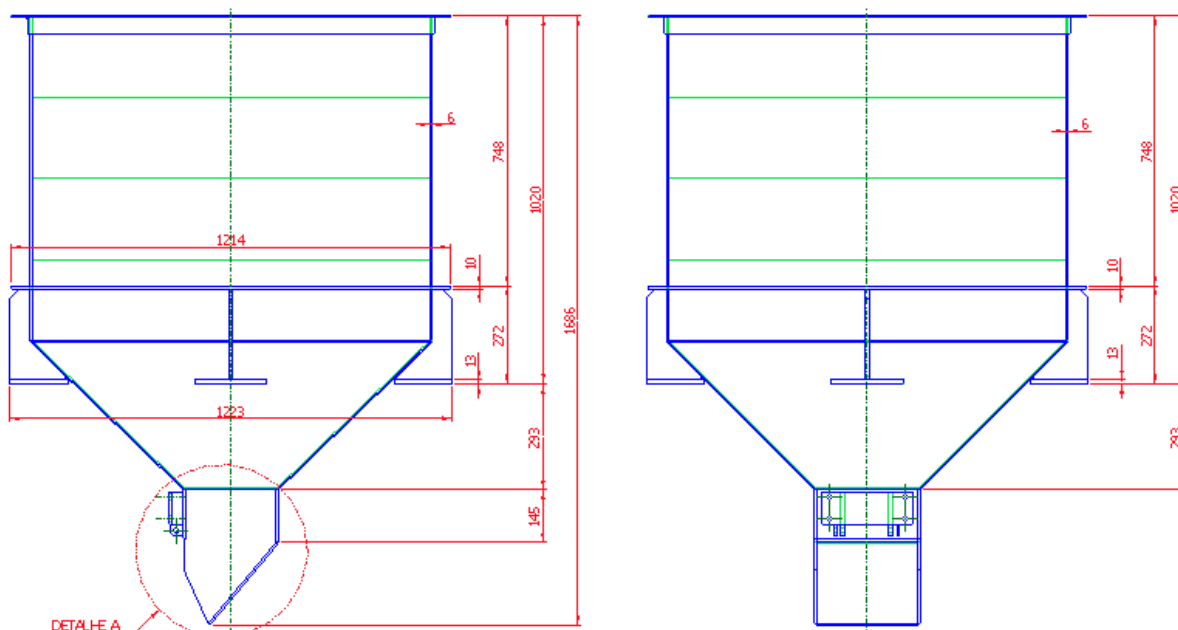
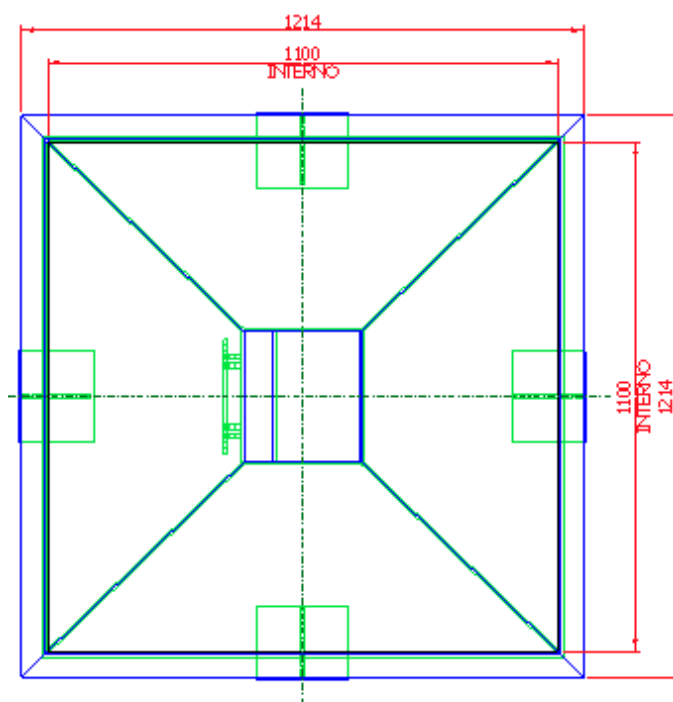
REAÇÃO NAS BASES		
POSIÇÃO	VALOR	UNID.
B1	0,82	t
B2	0,82	t
B3	0,82	t
B4	0,82	t

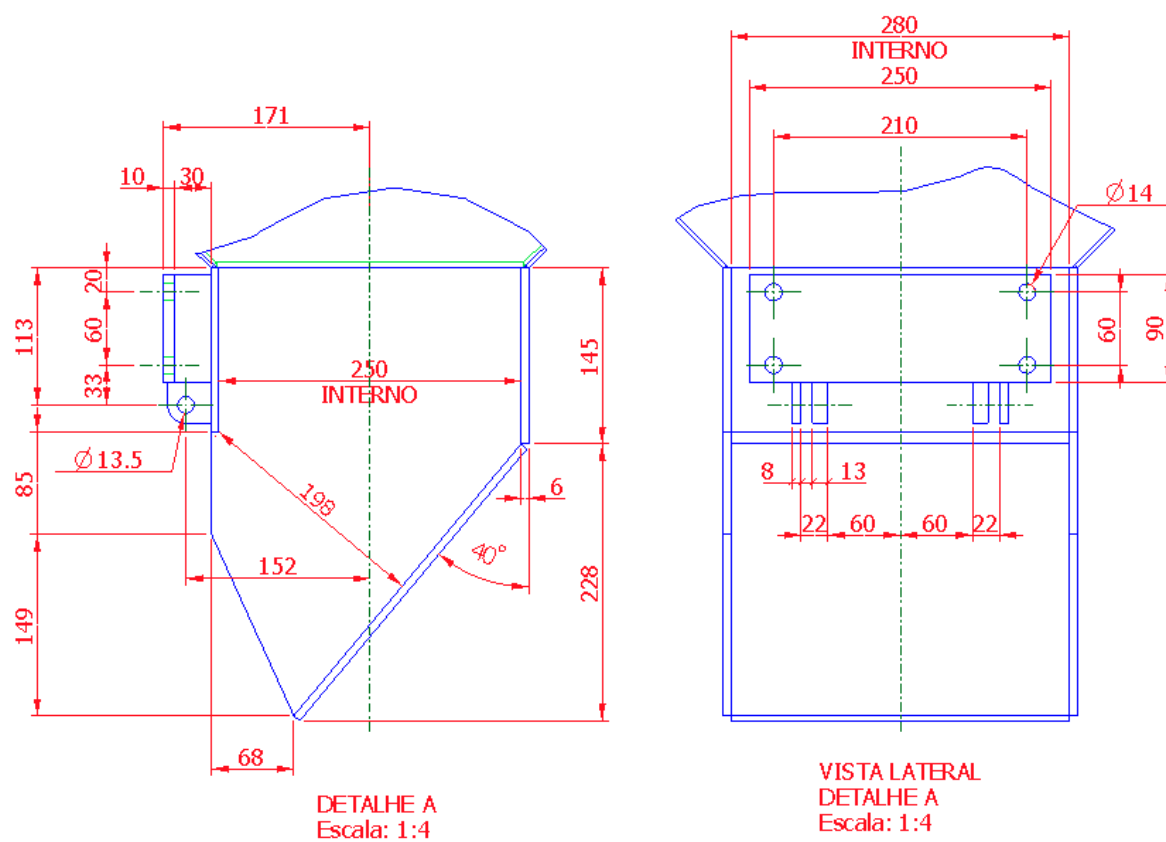
10.PROJETO EXECUTIVO DO SILO

Após as soluções geométricas definidas e os carregamentos aplicados, será apresentado um modelo com as dimensões parametrizada de forma possibilitar futuros ajustes e alterações facilmente para novas análises.

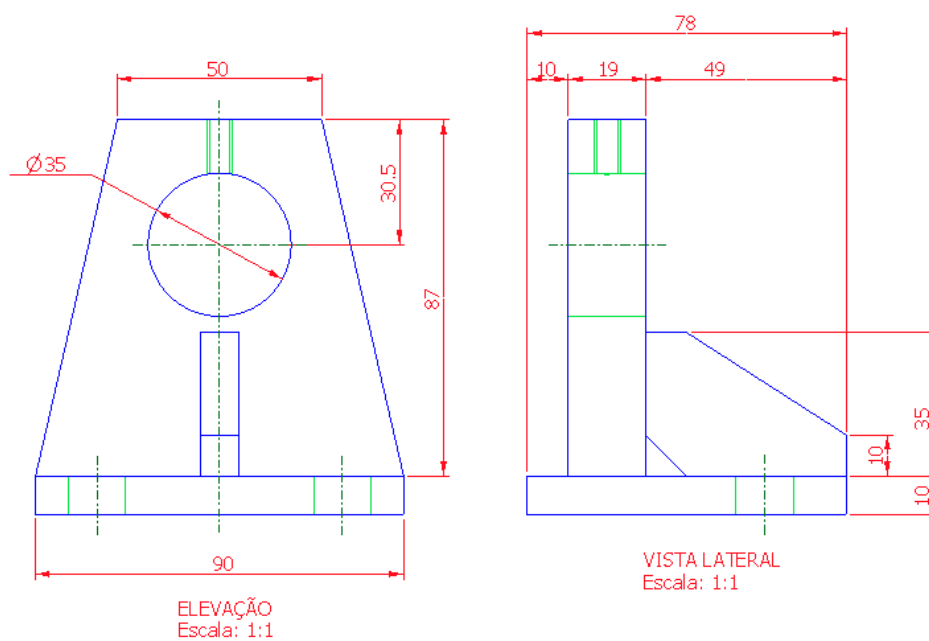


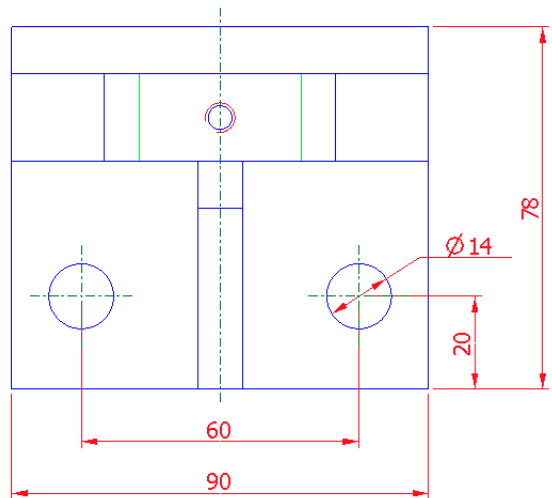
10.1. Carça

ELEVÃO
Escala: 1:7.5VISTALATERAL
Escala: 1:7.5VISTADE PLANTA
Escala: 1:7.5

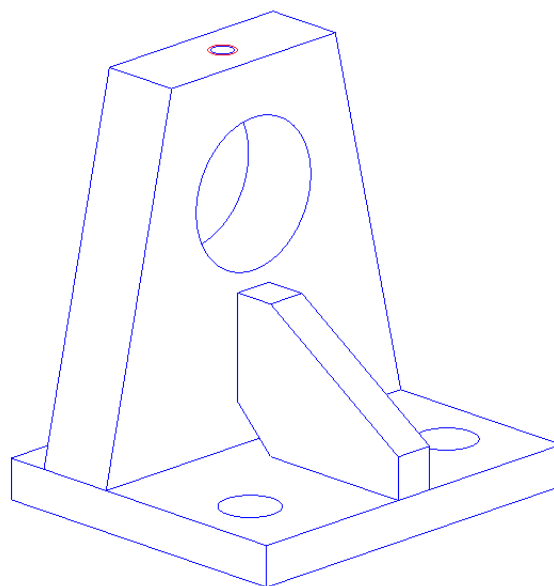


10.2. Mancal de Fixação do Cilindro

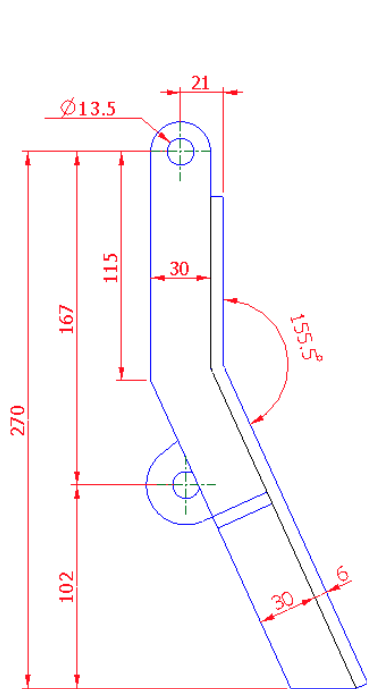




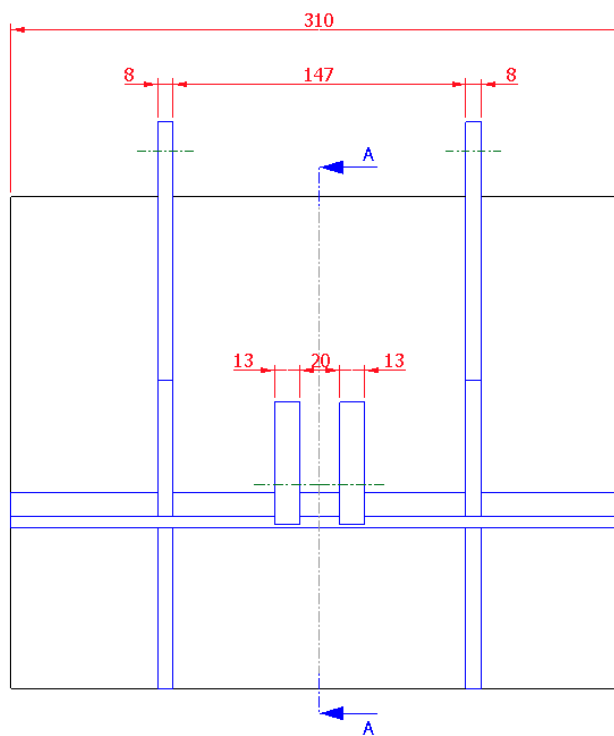
VISTA DE PLANTA
Escala: 1:1



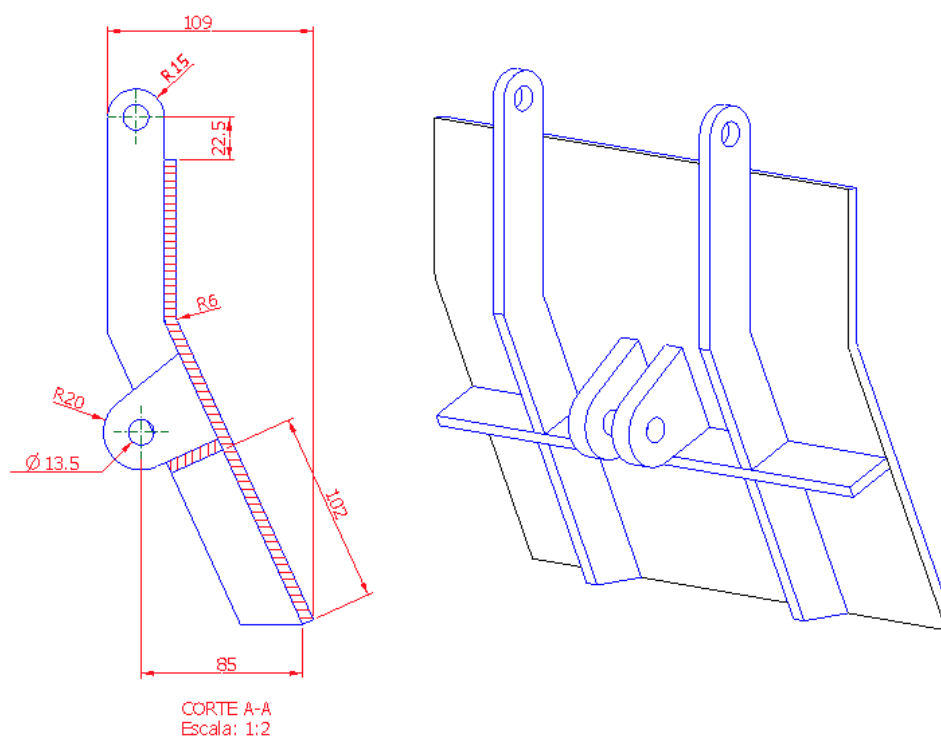
10.3. Porta de Bloqueio / Descarga



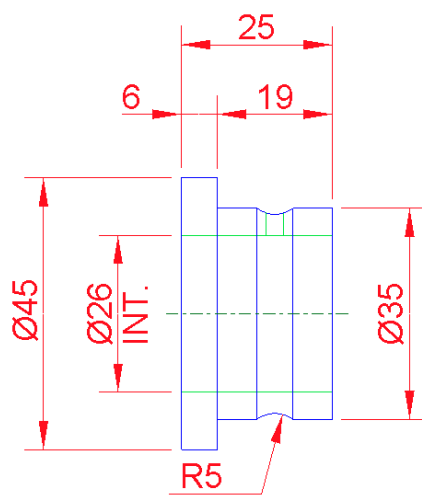
ELEVAÇÃO
Escala: 1:2



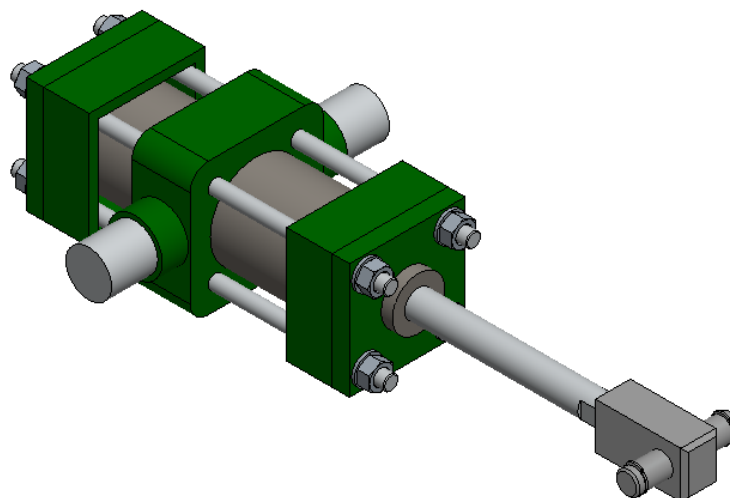
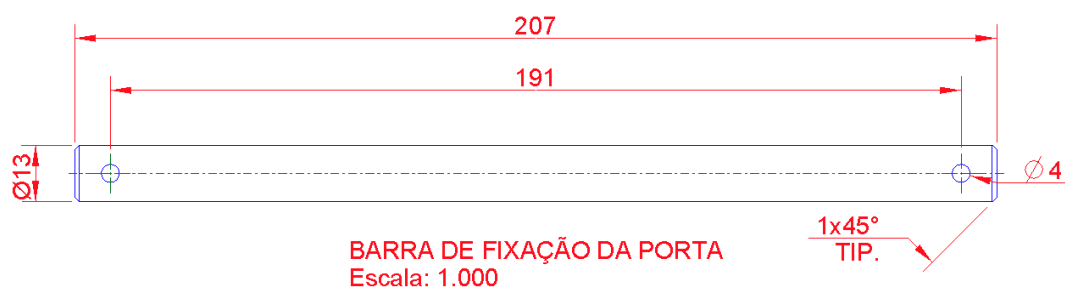
VISTA LATERAL
Escala: 1:2



10.4. Peças Misclenâneas



BUCHA DE BRONZE
Escala: 1.000



Características do cilindro pneumático 3400-0161-132-74:

Fabricante = Parker

Êmbolo standard e rosca NPT

Ø do cilindro = 2"

Ø da haste = 5/8" com rosca externa M12 x 1,75 - duplo amortecimento com sanfona de proteção

Apoio = munhão central

Curso = 74 mm

Ponteira macho = 3400-0292

Conjunto pino + anéis = 3520-3345

Tabela 2 - Forças Estáticas em kgf. Cilindros de Dupla Ação de 1 1/2" a 12"

Ø do Cilindro	Ø da haste	bar	2,06	2,75	3,44	4,13	4,82	5,51	6,19	6,89	8,26	9,64	13,78	17,22	20,67
		psig	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	200	250	300
1 1/2"	5/8"	Avanço	24	32	40	48	56	64	72	80	96	112	160	200	240
		Retorno	20	26	33	40	46	53	60	66	79	93	133	166	199
2"	5/8"	Avanço	43	57	71	85	100	114	128	142	171	199	285	356	427
		Retorno	38	51	64	77	90	103	116	129	154	180	257	321	386
	1"	Retorno	32	43	53	64	75	85	96	107	128	150	214	267	321

11.CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou praticar os conceitos e habilidades adquiridos ao longo de todo o curso de especialização em estruturas provido pela Universidade Federal de Minas Gerais, conhecer mais sobre um assunto novo, que são as estruturas metálicas de armazenamentos.

Os resultados obtidos são concretos, os quais somente puderam ser alcançados à medida que foram encontradas oportunidades e falhas, sendo estas corrigidas ao longo da análise, as tensões e deformações de deslocamentos do silo e seus elementos apresentaram resultados abaixo do seu limite admissível.

A norma EUROCODE utilizada para as pressões do material é a única que aborda sobre enchimentos e descarregamentos não concêntricos, sendo a mais utilizada pelos projetistas. Para os cálculos teóricos, a referência mais utilizada para as pressões de carregamento é a da Janssen.

12.REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *AISC 360-16 Specification for Structure Steel*. New York - NY, July 2016. 620 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro - RJ, 2008. 274 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - procedimento*. Rio de Janeiro - RJ, 2004. 15 p.

CALIL Jr, C.; CHEUNG, A. B. *Silos: Pressões, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo*. 1st. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2007. 240 p.

EUROCODE. *EN 1991-4: Actions on structures – Part 4: Silos and tanks*. European Committee for Normalization. 2006, 109 p.

JENIKE, A. W. *Storage and flow of solids*. Utah: University of Utah, 1980. 209 p.

PALMA, G. *Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$)*. Dissertação (Mestrado de Engenharia em Estruturas) — Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 121 p.