



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

ANA CAROLINA CAVALCANTI MORAES

**PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DE MILHO COM DIFERENTES
TEORES DE UMIDADE PARA O CÁLCULO DE PRESSÕES EM SILOS
METÁLICOS**

Campina Grande - PB

FEVEREIRO - 2022

ANA CAROLINA CAVALCANTI MORAES

**PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DE MILHO COM DIFERENTES
TEORES DE UMIDADE PARA O CÁLCULO DE PRESSÕES EM SILOS
METÁLICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - PB

FEVEREIRO - 2022

M827p

Moraes, Ana Carolina Cavalcanti.

Propriedades físicas e de fluxo de milho com diferentes teores de umidade para o cálculo de pressões em silos metálicos / Ana Carolina Cavalcanti Moraes. – Campina Grande, 2022.

93 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

“Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento”.

Referências.

1. Silos Metálicos. 2. Milho – Teor de Umidade. 3. Construções Rurais e Ambiente. 4. Jenike Shear Cell – Aparelho de Cisalhamento. 5. Pressões – Silos Metálicos. I. Nascimento, José Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 631.24(043)

ANA CAROLINA CAVALCANTI MORAES

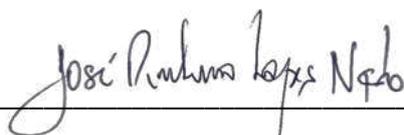
**PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DE MILHO COM DIFERENTES
TEORES DE UMIDADE PARA O CÁLCULO DE PRESSÕES EM SILOS
METÁLICOS**

Dissertação aprovada em 22 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Orientador - PPGEA/CTRN/UFCG

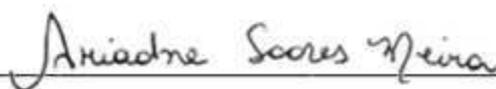


Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Examinador Interno - PPGEA/CTRN/UFCG



Francisco Carlos Gomes
Prof. Titular
D.Sc Engenharia Civil-Estrutur
CPPPADEA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Examinador Externo - DEA/UFLA



Profa. Dra. Ariadne Soares Meira
Examinadora Externa - UFR/DEAA

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO - 2022

*Dedico esta Dissertação ao meu amado pai Joselito:
Minha grande inspiração para trilhar os rumos da engenharia.
“Tudo de bom em mim começou com você, pai.”*

AGRADECIMENTOS

Ao Mestre Jesus e sua Mãe Maria em primeiro lugar, por mais esta conquista.

Aos meus amores sublimes e incondicionais, minha mãe Paula e meu pai Joselito pelo apoio em todos os momentos deste mestrado, e por todo o amparo, incentivo e paciência. E ao meu pequeno irmão Théo pela ajuda e interesse na minha pesquisa, mesmo em sua tão tenra idade.

A João, meu grande amor e leal companheiro desde a graduação em Engenharia Civil, por toda a assistência, carinho e cuidado.

Aos inestimáveis amigos que a graduação em Engenharia Civil me proporcionou - Adrielle, Camila, Erivan e Sérgio - por todo o apoio desde meu ingresso neste mestrado; e à minha querida amiga Iasmin, por todo o carinho e incentivo, mesmo à distância. Obrigada por tornarem os meus dias muito mais felizes.

Às minhas estimadas tias Ana Patrícia, Martha e Lúcia por me apoiarem neste mestrado, como em todas as etapas da minha vida, com seu amor e carinho imensuráveis.

Aos meus amados avós Aderaldo e Neves, pelo apoio e pelas orações carinhosas que me deram força nos momentos de incerteza.

À UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), pela oportunidade de realização desta pesquisa e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelos recursos financeiros destinados à minha formação.

Ao Professor e Orientador Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, pela orientação e por me conduzir ao interesse pela área de construções de silos. À colega Yokiny Chanti por todo o auxílio, paciência e ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho e aos professores Dermeval Araújo, Valéria Borges e José Pinheiro Neto que transmitiram seus preciosos conhecimentos ao longo deste mestrado.

“Eu sei agora. As pessoas nessas histórias tiveram muitas chances de voltar atrás, só que não o fizeram. Eles continuaram, porque estavam segurando em algo. [...] O bem que há neste mundo, Sr. Frodo, pelo qual vale a pena lutar.”

O Senhor dos Anéis, J. R. R. Tolkien

RESUMO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho e uma das principais etapas após a colheita é o armazenamento, influenciado entre muitos fatores pelo teor de umidade dos grãos. Neste sentido, objetivou-se neste trabalho determinar as propriedades físicas e de fluxo do milho bem como a determinação analítica das pressões exercidas nas paredes dos silos metálicos verticais esbeltos. As propriedades foram obtidas através de ensaios realizados com o aparelho de cisalhamento direto “Jenike Shear Cell”. Os cálculos de pressões horizontais, verticais e de atrito na parede, para carregamento e descarregamento foram realizados a partir da norma Americana ANSI/ASAE EP433. Verificou-se que a função fluxo média diminuiu seu valor com o aumento da umidade, aumentando a coesão entre as partículas. Os ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno, apresentaram pouca variação com a mudança de umidade. Os ângulos de atrito com a parede e os ângulos de inclinação da tremonha aumentaram de maneira diretamente proporcional ao aumento da umidade, enquanto o fator fluxo diminuiu suavemente. Quanto as pressões, o aumento no teor de umidade mudou o peso específico consolidado dos grãos armazenados interferindo proporcionalmente no valor das pressões exercidas no interior do silo, podendo comprometer a sua segurança estrutural.

Palavras-chave: Jenike Shear Cell, ângulos de atrito interno, função fluxo.

ABSTRACT

Brazil is the third-largest producer of maize in the world, and one of the main stages after harvest is storage, influenced among many factors by the moisture content of the grains. This work aims to determine the physical and flow properties of maize as well as the analytical determination of the pressures exerted on the walls of slender vertical metallic silos. The studied properties were obtained through tests carried out with the direct shear apparatus “Jenike Shear Cell”. The calculations of horizontal, vertical, and wall friction pressures for loading and unloading were performed using the American standard ANSI/ASAE EP433. The average flow function decreased its value with the increase of humidity, increasing the cohesion between the particles. The internal friction angles and effective internal friction angles showed little variation with the change in humidity. The wall friction angles and hopper tilt angles increased in direct proportion to the increase in humidity, while the flow factor decreased smoothly. As for the pressures, the increase in the moisture content changed the consolidated specific weight of the stored grains, proportionally interfering in the value of the pressures exerted inside the silo, which could compromise its structural safety.

Keywords: Jenike Shear Cell, internal friction angles, flow function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo matemático de Janssen.	20
Figura 2- Função fluxo derivada a partir de testes de cisalhamento direto de Jenike.	22
Figura 3- Testador de cisalhamento de Jenike (TSG 70-140) do Laboratório de Construções Rurais e Ambientação (UFCG).	22
Figura 4- Funções de fluxo não coesivo e coesivo nas classificações de fluidez de Jenike	23
Figura 5 - Pressão lateral média na parede do silo influenciada pelo aumento do teor de umidade.	24
Figura 6 - Medidor de umidade portátil Agrologic (AL-101).	27
Figura 7 - Representação gráfica do Semi-círculo de Möhr.	31
Figura 8 - Lugar geométrico de deslizamento com a parede.	33
Figura 9 - Pressões atuantes no silo.	36
Figura 10 – Densidade consolidada em função do teor de umidade	38
Figura 11 – Ângulo de atrito interno em função do teor de umidade.	38
Figura 12 – Efetivo ângulo de atrito interno em função do teor de umidade	39
Figura 13 – Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço liso	39
Figura 14 – Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço rugoso	40
Figura 15 – Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço zincado.	40
Figura 16 - Função Fluxo para diferentes teores de umidade.	44
Figura 17 - Função fluxo média em função do teor de umidade dos grãos.	45
Figura 18 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 9,5% para um silo em aço liso	46
Figura 19 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 9,5% para um silo em aço rugoso	46
Figura 20 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 13% para um silo em aço liso	47
Figura 21 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 13% para um silo em aço rugoso	47

Figura 22 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 18% para um silo em aço liso	48
Figura 23 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 18% para um silo em aço rugoso	48
Figura 24 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 22% para um silo em aço liso	49
Figura 25 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 22% para um silo em aço rugoso	49
Figura 26 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 30% para um silo em aço liso	50
Figura 27 - Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 30% para um silo em aço rugoso	50
Figura 28 - Pressões horizontais de carregamento $L(Y)$ em diferentes teores de umidade	51
Figura 29 - Pressões horizontais de descarregamento - $L(Y)d$ em diferentes teores de umidade	52
Figura 30 - Pressões de atrito de carregamento S_v em diferentes teores de umidade....	52
Figura 31 - Pressões de atrito de descarregamento S_{vd} em diferentes teores de umidade	52
Figura 32 - Pressões verticais de carregamento $V(Y)$ em diferentes teores de umidade	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do projeto do silo	26
Tabela 2 - Cargas aplicadas no aparelho de cisalhamento direto	28
Tabela 3 - Variáveis obtidas do equipamento TSG 70-140.....	28
Tabela 4 - Limite de FF.....	34
Tabela 5 - Ângulos de atrito interno, efetivos ângulos de atrito interno e densidade para teores de umidade variados.....	37
Tabela 6 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 9,5%	41
Tabela 7 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 13%	41
Tabela 8 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 18%	41
Tabela 9 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 22%	42
Tabela 10 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 30%	42
Tabela 11 - Função fluxo para teor de umidade igual a 9,5%	42
Tabela 12 - Função fluxo para teor de umidade igual a 13%	43
Tabela 13 - Função fluxo para teor de umidade igual a 18%	43
Tabela 14 - Função fluxo para teor de umidade igual a 22%	43
Tabela 15 - Função fluxo para teor de umidade igual a 30%	44
Tabela 16 - Classificação do produto segundo a coesão	45

LISTA DE SÍMBOLOS

- W – Peso específico (ANSI/ASAE EP433)
- R – Perímetro interno do plano da seção do silo
- G – Constante gravitacional
- μ - Coeficiente de atrito
- K – Valor característico de pressão lateral
- Y – Profundidade equivalente do sólido abaixo da superfície
- F – Coeficiente de sobrepressão
- D – Diâmetro do silo
- S_v – Pressão de atrito nas paredes (carregamento)
- S_{vd} - Pressão de atrito nas paredes (descarregamento)
- L(Y) – Pressão horizontal (carregamento)
- L(Y)_d – Pressão horizontal (descarregamento)
- V(Y) – Pressão vertical
- FF – Função fluxo
- ff* – Fator fluxo
- σ – Tensão normal
- σ_{cr} – Tensão crítica
- τ – Tensão de cisalhamento
- γ - Peso específico do produto
- θ - Inclinação da tremonha em relação a horizontal
- α - Inclinação da tremonha em relação a vertical
- ϕ_w – Ângulo de atrito com a parede
- ϕ_i – Ângulo de atrito interno
- ϕ_e - Efetivo ângulo de atrito interno
- U – Umidade da amostra em base úmida
- m_{água} – Massa de água da amostra
- m_T – massa total da amostra
- $\sigma_{prc,max}$ - tensão máxima principal
- σ_{inconf} - tensão não confinada

θ_{emax} - Maior valor do efetivo ângulo de atrito interno

θ_{mth} - Menor ângulo da tremonha

ϕ_{wi} - Ângulo de atrito com a parede (limite inferior)

ϕ_{ws} - Ângulo de atrito com a parede (limite superior)

σ_{maxpc} - Tensão principal máxima

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1.	2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1.	PRESSÕES E FLUXO DE GRÃOS EM SILOS	19
3.2.	AÇÕES ATUANTES NAS PAREDES DOS SILOS	20
3.3.	O TESTE DE CISLHAMENTO DIRETO DE JENIKE.....	21
3.4.	EFEITO DO TEOR DE UMIDADE NOS GRÃOS	23
3.5.	ANSI/ ASAE EP433	24
4.	MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1.	CARACTERÍSTICAS GERAIS DE PROJETO.....	26
4.2.	TEORES DE UMIDADE.....	26
4.3.	OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	27
4.4.	DADOS DE ENTRADA REFERENTES ÀS PAREDES	29
4.5.	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS PRODUTOS.....	29
4.5.1.	Peso específico consolidado (γ)	30
4.5.2.	Tensões.....	30
4.5.3.	Ângulo de atrito interno (ϕ_i).....	32
4.5.4.	Tensão de consolidação principal máxima $\Sigma_{\max\text{prc}}$	32
4.5.5.	Tensão não confinada Σ_{INC}	32
4.5.6.	Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	32
4.5.7.	Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w)	33
4.5.8.	Função fluxo (FF).....	33
4.5.9.	Fator fluxo da tremonha (ff)	34
4.6.	CÁLCULO DAS PRESSÕES.....	35
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1.	ÂNGULOS DE ATRITO INTERNO (ϕ_i) E EFETIVO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ_e).....	37
5.2.	ÂNGULO DE ATRITO COM A PAREDE.....	39
5.3.	FATOR FLUXO DA TREMONHA (ff)	41
5.4.	FUNÇÃO FLUXO (FF).....	42
5.5.	CÁLCULO DAS PRESSÕES.....	46
6.	CONCLUSÕES.....	54
6.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
8.	APÊNDICES	60

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, estando atrás apenas dos Estados Unidos e China, segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2021) e classificando-se como o segundo maior exportador mundial do grão com cerca de 19,8% das exportações mundiais totais (EMBRAPA, 2021). Uma das principais etapas após a colheita destes grãos, e que interfere diretamente em sua qualidade final é o armazenamento, sendo influenciado pelo processo de secagem, teor de umidade dos grãos, temperatura e umidade relativa do ar, controle de pragas, presença de impurezas, microrganismos, insetos e atmosfera (Domenico et al., 2015), devendo portanto ser realizado de maneira segura e eficaz, por se tratar de um elemento importante na cadeia de abastecimento de alimentos e proporcionar segurança alimentar, além de evitar flutuações excessivas de preços (Gitonga et al., 2013).

Os silos metálicos são estruturas de engenharia utilizadas para armazenar produtos sólidos a granel e pulverulentos, desde setores agrícolas à indústrias de alimentos, transporte marítimo, química, processamento de minerais, mineração, entre outras (Wojcik et al. 2017; Mehrethran & Maleki, 2018; Maleki et al., 2019). Esses silos podem ter capacidades de armazenamento bastante variadas, inferiores a dez toneladas até cerca de cem mil toneladas e sua estrutura deve ser projetada para suportar tensões de tração e compressão, devido à fricção dos sólidos em seu interior (Sondej et al., 2015).

Assim como qualquer estrutura de engenharia, no projeto de silos é essencial a determinação correta das cargas que serão suportadas durante a vida útil da estrutura, e as cargas de sólidos a granel durante os processos de carregamento e descarga são fatores básicos a serem avaliados neste tipo de projeto (Mehrethran & Maleki, 2018). Os sólidos a granel armazenados no silo sujeitam a estrutura à pressões e tração de atrito entre partículas, apesar de serem projetadas para resistir a tensões de compressão vertical e tensões de tração circunferenciais (Sondej et al. 2015). É possível que pressões de parede horizontais não uniformes possam se desenvolver e contribuir para flexões indesejadas e uma distribuição assimétrica das forças de compressão da parede, podendo surgir através de deformações dos elementos estruturais do silo, ou imprecisões geométricas durante a sua construção (Iwickik et al., 2015). Assim, as forças de fricção na parede dos silos podem submetê-los à flambagem, principalmente durante a descarga excêntrica, o que é difícil de evitar devido ao caráter não homogêneo dos sólidos armazenados em seu interior (Wojcik & Tejchman, 2015).

Uma das principais características dos materiais granulares, que influencia o seu armazenamento e pode comprometer sua qualidade, gerando maior aderência e coesão entre as partículas e dificultando o fluxo no silo, é o teor de umidade (Costa, 2013), cujo aumento pode resultar em um acréscimo de seis vezes na pressão que atua na parede do silo, além de ocasionar problemas de fluxo, como arqueamento, fluxo irregular e segregação (Kibar & Öztürk, 2009). O aumento do teor de umidade acontece dentro da massa de grãos armazenados devido a correntes de convecção natural induzidas pelo calor que são verificadas dentro de silos metálicos preenchidos com grãos, especialmente com milho, e grande parte das propriedades físicas destes grãos sofrem alterações devido a esta variação, como o ângulo de repouso, ângulo de atrito interno, força de coesão e o ângulo de atrito com a parede, influenciando o fluxo de descarga (Costa, 2013; Jian et al., 2009).

Neste estudo, os parâmetros físico-mecânicos de grãos de milho em diferentes teores de umidade (densidade, ângulo de atrito interno, função fluxo, fator fluxo, entre outros) necessários para projetar estruturas de armazenamento foram investigados através de ensaios com o aparelho de cisalhamento direto de translação (TSG 70-140), conhecido como aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell), a fim de compreender os prováveis efeitos que o aumento do teor de umidade dos grãos armazenados podem exercer no dimensionamento de silos metálicos verticais.

2.OBJETIVOS

Analisar o efeito de diferentes teores de umidade do milho na determinação das pressões internas dos silos metálicos verticais esbeltos

2.1. 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as propriedades de fluxo do milho em diferentes umidades;
- Verificar o efeito da variação do teor de umidade nas pressões horizontais, verticais e de atrito na parede, para carregamento e descarregamento, calculadas a partir da norma americana ANSI/ASAE EP433 de 1988.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. PRESSÕES E FLUXO DE GRÃOS EM SILOS

Pode-se definir fluxo de grãos como sendo o movimento de certo volume de partículas entre partículas vizinhas ou ao longo de uma superfície, sendo fundamental conhecer as suas propriedades como peso específico consolidado, função de escoamento, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito interno, entre outros, para assegurar a estabilidade do silo durante o processo de armazenagem, manuseio e processamento dos produtos a granel (Ganesan et al., 2007).

Apesar da existência de extensos dados experimentais e teóricos acerca dos problemas recorrentes em silos, ainda se verificam falhas graves, principalmente durante o processo de esvaziamento, podendo levar ao colapso de estruturas inteiras com frequência, muitas vezes, devido ao pouco conhecimento de fenômenos característicos do escoamento do sólido a granel, como a localização de cisalhamento e efeitos dinâmicos (Krzyżanowski et al., 2020). Estas propriedades de fluxo são críticas em relação ao projeto e a operação de equipamentos industriais e à prevenção de problemas como segregação de sólidos e arqueamento em silos, que podem ocasionar a paralização dos processos ou resultar em um produto de má qualidade (Opaliński et al., 2012).

É importante ressaltar que o tamanho dos grãos influencia o tipo de fluxo que se desenvolverá ao longo do processo de descarga do silo, uma vez que produtos granulares possuem fluxo livre, com baixa ou nenhuma coesão, diferentemente dos produtos pulverulentos que são coesivos e sua presença em forma de pó junto aos grãos pode acarretar interrupções no fluxo (Calil & Cheung, 2007). A maneira como o produto deve fluir por gravidade no silo é governada pelas suas propriedades de fluxo, assim como pela geometria e estrutura da superfície da tremonha, geralmente, os problemas de obstrução observados pela indústria estão, provavelmente, associados a um tipo inadequado de fluxo em virtude da coesão que o produto pode adquirir sob ação de esforços de compressão, formando um arco suficientemente resistente para suportar o seu próprio peso (Lopes Neto et al., 2007). Para garantir fluxo estável e confiável é fundamental caracterizar com precisão o comportamento do fluxo destes produtos (Ganesan et al., 2007).

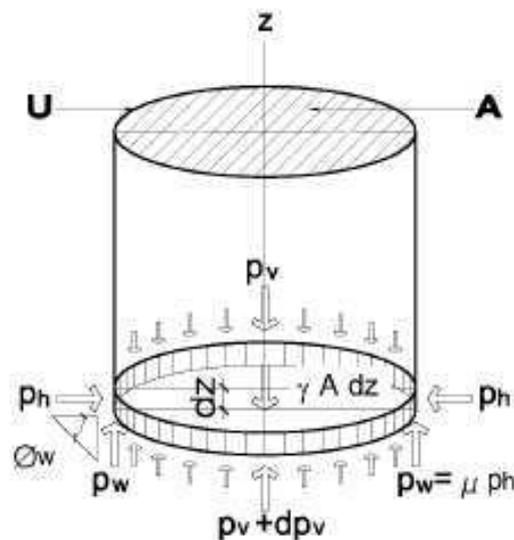
3.2. AÇÕES ATUANTES NAS PAREDES DOS SILOS

Nos silos verticais, as ações atuantes variam desde o peso próprio dos grãos, peso dos equipamentos, ações sísmicas e recalques, bem como os ventos, e principalmente, as pressões verticais e horizontais causadas pelo atrito nas suas paredes internas (Silva & Carvalho, 2015). Os primeiros registros científicos sobre ações de produtos em paredes foram realizados por volta do século XIX, com a teoria de Coulomb, apresentando o conceito de atrito entre produto armazenado e parede de contenção, possivelmente baseado no mesmo princípio de estacas de fundação em que surge uma pressão entre o fuste e o solo, equilibrando a carga vertical (Ito, 2016).

Utilizando estes conceitos, as influências das tensões na parede dos silos contendo produtos granulares começaram a ser investigadas por Janssen no século XIX, o qual descobriu que estas ações saturam com a profundidade em vez de aumentar linearmente, como ocorre em reservatórios de líquidos, e concluiu ainda, que isto ocorre devido à tensão de cisalhamento exercida pelos sólidos na parede do silo, fornecendo uma equação para o cálculo destas tensões conhecida como “equação de Janssen” (Equação 1) (An et al., 2021). A teoria de Janssen (Figura 1) até hoje serve de base para os métodos e normas técnicas estrangeiras, aplicando-se ao cálculo das cargas estáticas assim como as pressões dinâmicas durante o fluxo de descarga (Ito, 2016).

$$p_h(z) = \frac{\gamma \cdot A}{i \cdot U} (1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu \cdot \frac{U}{A}}) \quad (1)$$

Figura 1- Modelo matemático de Janssen.



Fonte: (Ito, 2016)

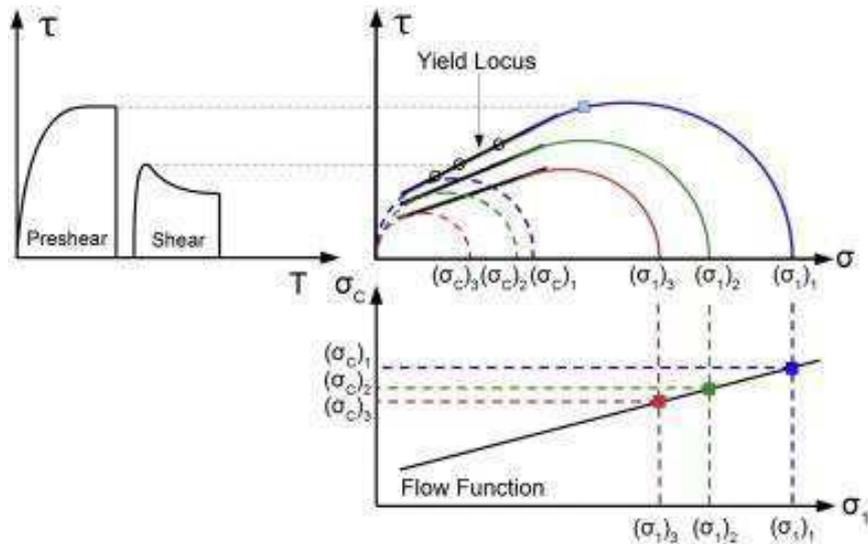
A pressão de atrito exerce esforços de compressão na parede que é distribuída na superfície interior e equilibra parte do peso do produto. A existência do atrito faz com que pressões horizontais, que o produto exerce nas paredes, não aumentem linearmente com a altura assim como ocorre com as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento que tende a um valor máximo exponencial (Anjos, 2018).

Os silos de armazenamento em indústria são normalmente fabricados com chapas corrugadas e reforçadas por longarinas verticais, por oferecerem montagem mais rápidas e um custo menor de aço em relação aos silos de paredes planas (Sondej et al., 2015). O formato curvo das paredes onduladas é uma solução técnica amplamente utilizada, já que elimina a flambagem local. No entanto, o atrito entre estas paredes e o produto granular é maior que em silos de chapas planas e, portanto, as forças de atrito na parede vertical são maiores, causando alterações no fluxo ou na formação da faixa de cisalhamento (Gallego et al., 2019).

3.3. O TESTE DE CISALHAMENTO DIRETO DE JENIKE

Paredes finas fabricadas com chapas laminadas isotrópicas soldadas no perímetro de cascas cilíndricas de metal são adotadas com frequência na indústria de silos, no entanto, estas estruturas ficam vulneráveis à força de tração causada pelo fluxo dos grãos entre si e entre as paredes do silo (Wójcik & Tejchman, 2015). Dentre os testes mais aceitos para medir a função fluxo (Figura 2) desses produtos granulares, melhorando a compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem nos silos, está o teste de cisalhamento direto, utilizando os anéis de Jenike (Chen et al., 2017). Tal abordagem permite a elaboração de projetos que minimizem a segregação e forneçam fluxo mais controlado, assegurando qualidade mais uniforme dos produtos (Søgaard et al., 2017).

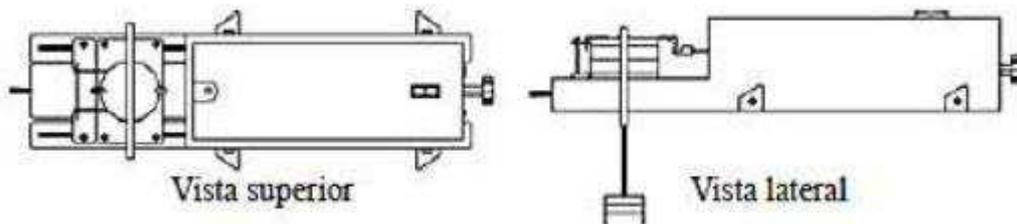
Figura 2- Função fluxo derivada a partir de testes de cisalhamento direto de Jenike.



Fonte: Chen et al. (2017)

No estudo do comportamento do fluxo de partículas sólidas, Jenike (1964) partiu do princípio da falha plástica, aplicando os critérios de falha de Mohr-Coulomb. A célula de cisalhamento de Jenike é composta por uma base cilíndrica fixa, anel de cisalhamento, anel molde, tampa de torção e tampa de cisalhamento, em que o diâmetro dos anéis e o diâmetro interno sempre coincidem, sendo esta célula colocada no aparelho TSG 70-140 (Figura 3) em que o ensaio é realizado.

Figura 3- Testador de cisalhamento de Jenike (TSG 70-140) do Laboratório de Construções Rurais e Ambientância (UFCG).

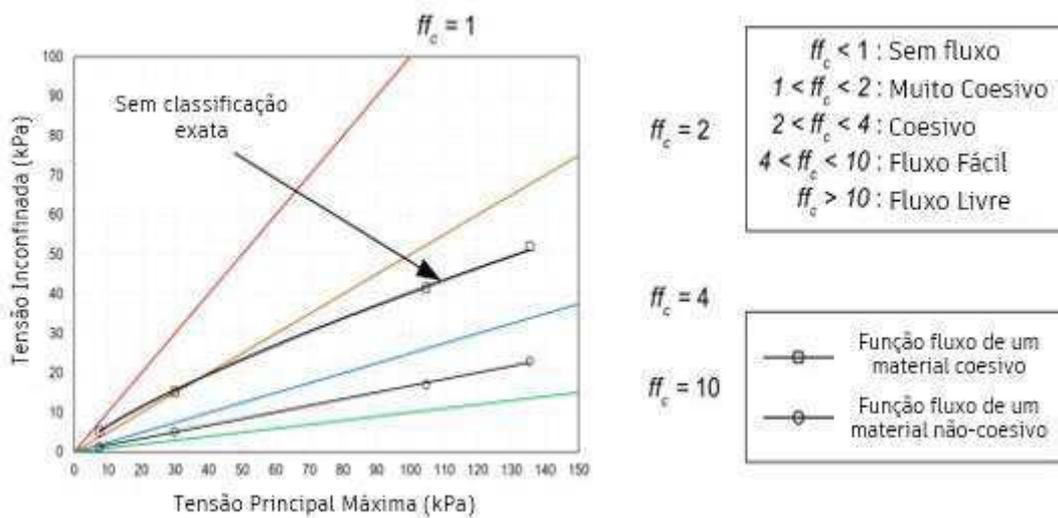


Fonte: Lopes Neto & Nascimento (2013)

A tensão de consolidação aplicada (σ_1) e a tensão de escoamento não confinada resultante (σ_c), caracterizam a fluidez (ff_c) de um material a granel e o método de Jenike propõe uma classificação expressa por $ff_c = \sigma_1 / \sigma_c$ baseado na sua pesquisa sobre fluxo

de massa, conforme mostrado na Figura 4, em que podem ser identificados cinco comportamentos de fluidez de acordo com o valor de (ff_c) (Chen & Roberts, 2018).

Figura 4- Funções de fluxo não coesivo e coesivo nas classificações de fluidez de Jenike.



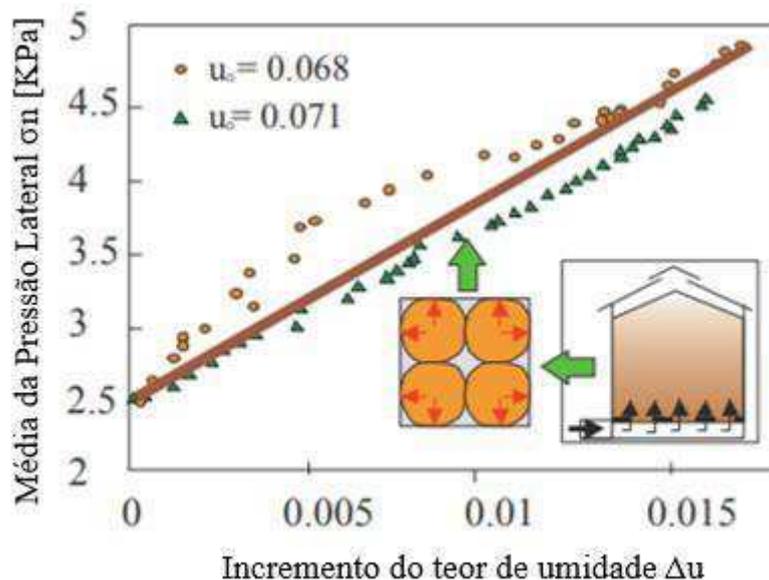
Fonte: Chen & Roberts (2018)

3.4. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE NOS GRÃOS

Os grãos são constituídos por certa quantidade de água e de substâncias sólidas, que compõem sua fração de matéria seca (Elias et al., 2017). O teor de umidade influencia diretamente o comportamento mecânico e a deformabilidade dos grãos (Kibar & Öztürk, 2009), porque ao contrário dos materiais de origem mineral, a água penetra no interior do grão, levando em alguns casos a mudanças qualitativas em suas características físicas (Horabik & Molenda, 2014).

O aumento descontrolado do teor de umidade pode ocorrer em grãos armazenados devido à respiração de grãos ou como resultado de umedecimento através do ar durante a aeração ocasionando aumento de volume (Horabik & Molenda, 2014). As paredes do silo confinam a deformação do grão na direção horizontal que pode levar a um aumento da pressão lateral (Figura 5). Estudo realizado por Molenda & Horabik (2005) indicam que o aumento do teor de umidade do grão armazenado pode resultar em um aumento de seis vezes na pressão que atua na parede do silo.

Figura 5 - Pressão lateral média na parede do silo influenciada pelo aumento do teor de umidade.



Fonte: Horabik & Molenda (2014)

É possível ocorrer diminuição no módulo de elasticidade do grão devido ao aumento do teor de umidade (Horabick & Molenda, 2000), de vez que quando os grãos incham, as forças de contato aumentam ao mesmo tempo, o módulo de elasticidade diminui e, como consequência, a pressão atingiu seu valor máximo e depois diminuiu (Horabik e Molenda, 2014). A deformação volumétrica resultante é uma soma de dois componentes independentes: a deformação gerada pela pressão externa e a deformação resultante do inchamento do grão (Horabik & Molenda, 2014).

3.5. ANSI/ ASAE EP433

A versão mais recente da ANSI/ ASAE EP433 “Cargas exercidas por grãos de fluxo livre em silos” foi adotada pela ASAE (*American Society of Agricultural Engineers*) em dezembro de 1988 e aprovada pelo ANSI (*American National Standards Institute*) em setembro de 1991, sendo reafirmada anualmente e revisada editorialmente pela ASAE em março de 2000. A versão atual foi reafirmada pela ANSI em fevereiro de 2011 e no geral, a norma trata de uma recomendação prática destinada a uma limitada gama de aplicações em produtos de fluxo livre (Cheung et. al., 2015).

De acordo com Carson & Craig (2015) o inchamento de grãos devido ao aumento do teor de umidade é uma das principais causas de falhas em silos, e considerando este aspecto a ANSI/ASAE EP433 observa-se em seu item 4.4.2.1 que “aumentos de umidade durante o armazenamento de 4% ou mais podem fazer com que as pressões laterais aumentem várias vezes as condições de carga estática”. A norma observa ainda que “os grãos armazenados são higroscópicos; ou seja, absorvem umidade de fontes líquidas e da atmosfera. Quando os grãos absorvem a umidade, eles se expandem. Quando os grãos estão confinados dentro de uma estrutura, a expansão é restringida. A consequência é um aumento na pressão da parede do silo.” Carson & Craig (2015) detalham ainda que os dados sobre este assunto na literatura são escassos em número e escopo, mas que alguns estudos relataram que as pressões laterais aumentaram por um fator de seis quando a umidade do grão aumentou em 4%, e por um fator de dez para um aumento de 10% de aumento do teor de umidade dos grãos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) do Centro de Tecnologias e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande (CTRN/UFCG), em Campina Grande, PB. Para determinação das propriedades de fluxo dos grãos utilizados neste estudo (milho), foi utilizado o aparelho de cisalhamento direto de translação (TSG 70-140), conhecido como aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell), adotando-se a metodologia proposta pela norma BMHB (1985).

4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DE PROJETO

O projeto do silo foi concebido levando em consideração as condições preliminares apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do projeto do silo

CARACTERÍSTICAS	CONDIÇÕES
Tipo de silo	Cilíndrico
Capacidade	Vinte toneladas
Norma para cálculo de pressões	Americana (ANSI/ASAE EP433)
Material do silo	Aço liso (Inox), aço rugoso e aço zincado
Tipo de fluxo	Fluxo de massa
Tremonha	Fundo plano
Relação H/D	2

4.2. TEORES DE UMIDADE

Os teores de umidade variados (9,5, 13, 18, 22 e 30%) foram obtidos através da secagem natural dos grãos, em que os valores foram monitorados através do medidor de umidade portátil Agrologic (AL-101) e a medição final mais precisa foi realizada através do método tradicional da estufa, em que são identificadas a massa da amostra no seu estado natural e a massa após completa secagem durante 24 h em estufa a 105 ± 5 °C. Em seguida os teores de umidade foram calculados através da Equação 2.

$$U = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

U – Umidade da amostra em base úmida (%);

$m_{\text{água}}$ – Massa de água da amostra (g);

m_T – massa total da amostra (g).

Figura 6 – Medidor de umidade portátil Agrologic (AL-101).



Foram estudados teores de umidade acima dos 13% recomendados para armazenamento de grãos amiláceos pelas portarias do Ministério da Agricultura, a fim de verificar como as pressões nas paredes de silos se comportam em situações extremas de alta umidade dos grãos.

4.3. OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

A determinação dos dados para o cálculo das propriedades de fluxo do milho foi realizada através do aparelho de cisalhamento direto de translação (TSG 70-140) utilizando-se as séries apresentadas na Tabela 2 como cargas de pré-cisalhamento e de cisalhamento. Foram realizadas cinco repetições para cada teor de umidade, compostos de duas partes distintas: o cisalhamento do produto e cisalhamento do produto com o material da parede em aço liso, aço rugoso e aço zincado com o objetivo de obter as forças normais e forças cisalhantes e determinar, de maneira contínua, as tensões normais e cisalhantes; o ângulo de atrito interno; o efetivo ângulo de atrito interno; o ângulo de atrito com a parede; a coesão do produto; a tensão máxima principal e a tensão inconfineda (ou não-confinada). As cargas utilizadas no experimento são descritas na Tabela 2. É necessário calcular, em cada ponto de medida, a tensão normal (σ) e a tensão de

cisalhamento (τ) para o estado de consolidação (ponto de pré-cisalhamento ou *pré-shear*) e início de falha, bem como a densidade do produto.

Tabela 2 - Cargas aplicadas no aparelho de cisalhamento direto

Pré-cisalhamento (N)	Cisalhamento (N)	Nº repetições
100	70 - 50 - 35	5
70	50 - 35 - 20	5
50	35 - 20 - 10	5

Na Tabela 3 são detalhadas as variáveis referentes ao equipamento TSG 70-140 que deverão ser consideradas em cálculo posteriormente.

Tabela 3 - Variáveis obtidas do equipamento TSG 70-140

Variável	Unidade de medida
Massa total do produto	[Kg]
Massa do anel da base	[Kg]
Massa do anel de cisalhamento	[Kg]
Massa da tampa	[Kg]
Massa da haste	[Kg]
Massa durante o pré-cisalhamento (Para disco de ferro de 5,0; 3,5; 2,0 kg)	[Kg]
Massa durante o cisalhamento (Para disco de ferro 3,5; 2,0; 1,0; 0,7 kg)	[Kg]
Área da seção transversal do anel de cisalhamento	[m ²]
Volume total da célula de cisalhamento	[m ³]
Volume correspondente ao anel de cisalhamento	[m ³]

4.4. DADOS DE ENTRADA REFERENTES ÀS PAREDES

Para a determinação do ângulo de atrito com a parede (φ_w) foram utilizadas três amostras do material da parede em formato de placas: uma de aço liso, uma de aço rugoso e uma de aço zincado no lugar do o anel inferior, utilizando os níveis de carga normais de: 50, 40, 30, 20, 10 e 4,4 N. O estado das tensões na parede é calculado de acordo com as equações descritas abaixo:

$$\text{Tensão Normal } (\sigma) = \frac{(\text{massa disco} + \text{massa haste} + \text{massa da tampa}) \times 9,81}{\text{Área do anel}} \quad (3)$$

$$\text{Tensão Cisalhante } (\tau) = \frac{\text{Massa cisalhante} \times 9,81}{\text{Área do anel}} \quad (4)$$

Com a união dos pontos da tensão normal e da tensão cisalhante obtém-se o lugar geométrico de deslizamento com a parede. Quando este lugar for uma reta, o ângulo de atrito com a parede (φ_w) é constante. Outra maneira consiste em calcular o ângulo de atrito com a parede através da Equação 5.

$$\varphi_w = \arctan \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (5)$$

Em que φ_w é o ângulo de atrito com a parede em graus ($^\circ$).

4.5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DOS PRODUTOS

As propriedades de fluxo analisadas no projeto do silo para armazenamento de milho foram:

- Peso específico consolidado (γ);
- Ângulo de atrito interno (φ_i);
- Efetivo ângulo de atrito interno (φ_e);
- Ângulo de atrito do produto com a parede (φ_w) (depende do tipo de material escolhido para a confecção do silo);
- Função fluxo (FF) (instantânea ou com o tempo);
- Fator fluxo da tremonha (ff).

De acordo com Calil Júnior. & Cheung (2007), as obstruções dependem principalmente das propriedades físicas do produto, da geometria e dos materiais constituintes.

- Função fluxo (FF) depende da resistência inconfina (σ_{inc}), da tensão principal de consolidação (σ_{maxprc}) e do tempo;
- Fator fluxo da tremonha (ff) que depende da geometria, do efetivo ângulo de atrito (φ_e) e do ângulo de atrito com a parede (φ_w).

4.5.1. Peso específico consolidado (γ)

O cálculo do peso específico consolidado, é realizado pela divisão da proporção do peso (P) de uma quantidade de sólidos a granel, pelo seu volume (V) (Equação 6), dada em N/m^3 .

$$\gamma = \frac{(Massa\ Total - massa\ do\ anel\ base - massa\ anel\ cisalhante - massa\ da\ tampa) * 9,81}{VOLUME\ (anel\ base + anel\ cisalhante)} \quad (6)$$

A densidade está sujeita à influência de diferentes fatores, como o estado de "compactação" ou "compressão" da massa sólida. Segundo Calil Júnior. (2007) a densidade do produto não pode ser usada como um fator de fluxo, porque não há uma relação linear direta entre fluxo e densidade, entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada, por se tratar de um importante parâmetro para a determinação do fluxo e das pressões em silos.

4.5.2. Tensões

O cálculo das tensões no pré-cisalhamento (tensão normal e tensão de cisalhamento), bem como as tensões no cisalhamento (tensão normal e tensão de cisalhamento), foram realizados usando as seguintes as Equações 7 e 8.

a) Pré-cisalhamento

Tensão normal:

$$\sigma_p = \frac{(massa\ disco + massa\ haste + massa\ da\ tampa) * g}{A} \quad (7)$$

Tensão de cisalhamento (dados obtidos no ensaio com a TSG 70-140):

$$\tau_p = \frac{\text{massa cisalhante} * g}{A} \quad (8)$$

Considerando a aceleração da gravidade (g) igual a 9,81 m/s². A massa cisalhante foi obtida diretamente da máquina de Jenike.

b) Cisalhamento

Tensão Normal:

$$\sigma_c = \frac{(\text{massa disco} + \text{massa haste} + \text{massa da tampa}) * g}{A} \quad (9)$$

Tensão de Cisalhamento (dados obtidos diretamente no ensaio com a TSG 70-140):

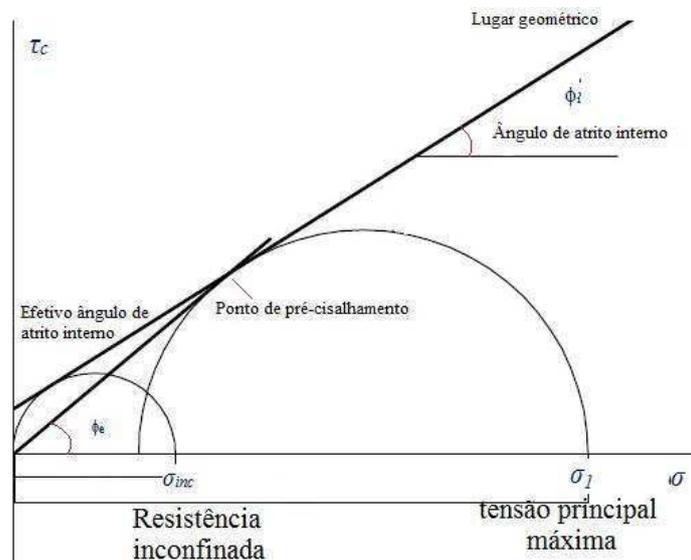
$$\tau_j = \frac{\text{massa cisalhante} * 9,81}{A} \quad (10)$$

$$\tau_c = \tau_j \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (11)$$

Em que: τ_j é a tensão cisalhamento obtida durante o ensaio com a TSG 70-140.

A partir dos dados obtidos com as equações acima, foram traçados os Gráficos do Semicírculo de Mohr, como pode ser observado na Figura 7. Trata-se de método gráfico bidimensional, onde a abscissa (σ_c) e a ordenada (τ_c) de cada ponto do círculo são as magnitudes da tensão normal e da tensão cisalhante atuando sobre um sistema de coordenadas rotacionado.

Figura 7 - Representação gráfica do Semi-círculo de Mohr



O círculo de Mohr foi traçado para cada série de massa (10, 7 e 5) e para as cinco repetições em cada teor de umidade, totalizando então 75 gráficos. O valor da coesão é dado pelo ponto que a reta de Lugar geométrico toca na reta da ordenada. A maior intersecção do círculo grande com a reta abcissa será $\sigma_{prc,max}$ (tensão máxima principal) que é igual σ_{inconf} (a tensão não confinada).

4.5.3. Ângulo de atrito interno (ϕ_I)

O ângulo de atrito interno (grão/grão) varia de acordo com o produto e obedece a uma relação com seu tipo e superfície, além da pressão na superfície do produto (compressão) e da umidade. A determinação do ângulo de atrito interno (ϕ_I) está relacionada com o conhecimento do IYL (lugar geométrico de deslizamento) e para traçar a reta IYL é necessário conhecer as tensões normais e suas correspondentes tensões cisalhantes, formando, no mínimo, três pontos de coordenadas. O ângulo de atrito interno (ϕ_I) corresponde à inclinação que o IYL forma com o eixo horizontal do Círculo de Mohr de Tensões, traçado neste trabalho através do software AutoCad 2020.

4.5.4. Tensão de consolidação principal máxima Σ_{maxprc}

O semi círculo é desenhado passando através do ponto P (pré-shear, que é a média das tensões normais no pré-cisalhamento e tensão de pré-cisalhamento) e tangente ao lugar geométrico instantâneo (Figura 7), sendo considerado válido só o círculo de Mohr, com o ponto P situado abaixo da reta e coincidindo com o ponto de tangência (B). A tensão principal máxima σ_1 , é definida pelo ponto maior de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ_{maxprc} .

4.5.5. Tensão não confinada Σ_{INC}

A tensão não confinada (σ_{inc}) do produto é determinada através do ponto máximo da intersecção do círculo de Mohr com o eixo x. Este parâmetro é determinado através do traçado de um semi-círculo passando pela origem e tangenciando a reta do lugar geométrico instantâneo, no software AutoCad 2020.

4.5.6. Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

O efetivo ângulo de atrito interno relaciona-se da mesma forma que o ângulo de atrito interno, com o conhecimento IYL. O ângulo (ϕ_i) formado pela reta do lugar geométrico de deslizamento com sua horizontal é o ângulo de atrito interno. Por sua vez, a reta que une o ponto de tangência do lugar geométrico com o semi-círculo de Mohr de

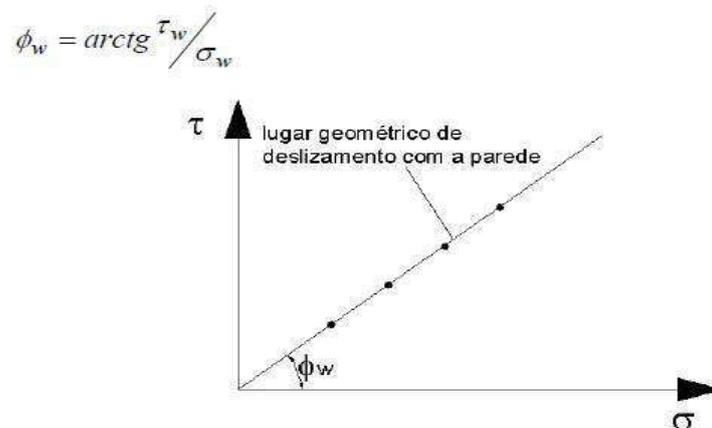
maior tensão e a origem da coordenada forma o ângulo que é denominado de efetivo ângulo de atrito interno (φ_e). Ou seja, o efetivo ângulo de atrito interno é obtido a partir da reta que parte da origem e tangencia o primeiro Semicírculo de Möhr.

O coeficiente angular do lugar geométrico é o ângulo de atrito interno φ_i . A linha reta, passando através da origem e do ponto de tangência do círculo de Möhr da tensão principal máxima σ_{maxpre} , define o efetivo lugar geométrico (EYL). O Coeficiente angular do efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito interno φ_e , como mostra a Figura 7.

4.5.7. Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w)

O atrito entre o produto armazenado e a parede interna do silo ocorre quando o produto desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede forma uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL) (Figura 8). A sua inclinação indica o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo

Figura 8 - Lugar geométrico de deslizamento com a parede.



Fonte: Palma (2005)

4.5.8. Função fluxo (FF)

A função fluxo é calculada para estimar a capacidade dos sólidos em fluir através da gravidade, e trata-se de uma propriedade que apresenta uma relação direta entre a tensão principal máxima e tensão não-confinada, (Lopes Neto & Nascimento, 2009; Lopes Neto & Nascimento, 2013) conforme equação:

$$\text{Função Fluxo} = \frac{\text{Tensão Normal max. principal}}{\text{Tensão normal inconfinada}} \quad (12)$$

As tensões são calculadas através do círculo de Möhr, conforme é possível observar na Figura x. A função fluxo permite a qualificação do comportamento de fluxo dos produtos armazenados, e quanto maior seu valor, maior é a capacidade de fluidez do produto armazenado. Jenike (1964) classifica os produtos de acordo com sua função limite de fluxo (FF), como na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Limite de FF

Limite de FF	Classificação quanto ao fluxo
FF < 2	Muito coesivo
2 < FF < 4	Coesivo
4 < FF < 10	Fluxo fácil
10 < FF	Fluxo livre

Fonte: Adaptado de Jenike (1964)

4.5.9. Fator fluxo da tremonha (*ff*)

O fator fluxo é um parâmetro essencial para o estudo da fluidez dos produtos armazenados, por tratar-se de uma propriedade acerca da geometria, ângulo de atrito interno com a parede e produto. Consiste na relação da tensão consolidada e a inconfinada. Para calcular o fator fluxo, é necessário conhecer: o efetivo ângulo de atrito interno do produto, o ângulo de atrito interno do produto com a parede, a geometria e a inclinação da tremonha. Para cálculo do fator fluxo da tremonha (*ff*) utilizou-se a *Teoria Continuum Mechanics* (Mecânica dos meios contínuos) propostas por Enstad (1981).

$$ff = \frac{Y * (1 + \text{seno } \theta_{emax})}{2 * (X - 1) * F(\theta_{mth}) * \text{Cos}(\theta_{mth})} \quad (13)$$

Em que:

- θ_{emax} é o maior valor do efetivo ângulo de atrito interno;
- θ_{mth} é o menor ângulo da tremonha, calculado através da expressão:

$$\theta_{mth} = 0,5 * \text{ARCCOS} \left(\frac{1 - \text{seno } \theta_{em}}{2 * \text{seno } \theta_{em}} \right) + \beta \quad (14)$$

Então o ângulo β é calculado através da expressão:

$$\beta = \frac{\theta_w + \text{ARCSENO} \left(\frac{\text{seno } \theta_{wm}}{\text{seno } \theta_{em}} \right)}{2} \quad (15)$$

Em que θ_{wmax} é o maior valor do ângulo de atrito interno com a parede.

Além destes valores, as expressões para o cálculo de X, Y e F são as seguintes:

$$Y = \frac{[(2 - 2 * \cos\alpha)^m * (\alpha)^{1-m} * (\cos\theta_{mth})^1] + [\text{seno}\beta + \text{seno}\alpha^{1+m}]}{(1 - \text{seno}\theta_{em}) * (\text{seno}\alpha)^{2+m}} \quad (16)$$

Deve-se considerar que o valor de m varia com a excentricidade. Será 0 se for excêntrico e será 1 se for concêntrico. Por sua vez, o valor será dado por:

$$\alpha = \beta + 90^\circ - \vartheta_{mth} \quad (17)$$

$$X = \frac{2^m * \text{seno}\theta_{em}}{1 - \text{seno}\theta_{em}} * \left(\left[\frac{\text{seno}(\beta + \alpha)}{\cos\theta_{mth}} \right] + 1 \right) \quad (18)$$

$$F(\theta_{mth}) = \left(\frac{(65)}{(220 - \theta_{mth})} \right)^m * \left(\frac{(200)}{(290 - \theta_{mth})} \right)^{1-m} \quad (19)$$

4.6. CÁLCULO DAS PRESSÕES

Para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito na parede, a norma utilizada será a Americana (ANSI/ASAE EP433). No carregamento, os valores de pressão horizontal $L(Y)$, de pressão de atrito com a parede (S_v) e pressão verticais $V(Y)$ em qualquer profundidade após enchimento e durante o armazenamento foi determinado como:

- Pressão vertical:

$$V(Y) = \frac{w.R.G}{\mu.k} \times \left[1 - e^{-\frac{\mu.k.Y}{R}} \right] \quad (22)$$

- Pressão horizontal:

$$L(Y) = k \times V(Y) \quad (23)$$

- Pressão de atrito nas paredes:

$$S_v = \mu \times L(Y) \quad (24)$$

Em que:

w - valor característico da densidade (kg/m^3);

R - perímetro interno do plano de secção transversal do silo (m);

μ - coeficiente de atrito (adimensional)

k - valor característico da razão da pressão lateral (0,5 para aço nesta norma);

Y - profundidade abaixo da superfície equivalente do sólido (m);

G – aceleração da gravidade igual a 9,82 m/s²

R - perímetro interno da secção do silo (m).

No descarregamento, para fluxo de massa ($H/D \geq 2,0$), a norma sugere considerar as equações anteriormente apresentadas multiplicadas por um coeficiente de sobrepressão igual a $F = 1,4$ como mostrado adiante:

- Pressão horizontal:

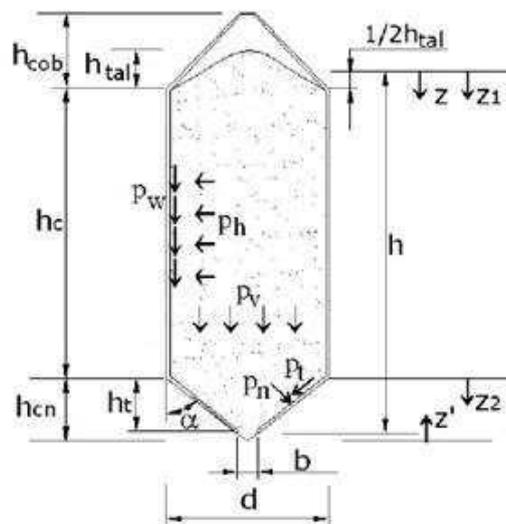
$$L(Y)d = L(Y) \times F \quad (25)$$

- Pressão de atrito nas paredes:

$$S_v d = S_v \times F \quad (26)$$

As normas estrangeiras utilizam a teoria de Janssen para predição das pressões estáticas em silos esbeltos. Na Figura 9 observam-se todas as pressões atuantes.

Figura 9 - Pressões atuantes no silo.



Fonte: Palma (2005)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ÂNGULOS DE ATRITO INTERNO (ϕ_i) E EFETIVO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ_e)

Na Tabela 5 encontram-se as medidas referentes aos ângulos de atrito interno (ϕ_i), bem como efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) para cada teor de umidade analisado. Consta também o peso específico do produto.

Tabela 5 - Ângulos de atrito interno, efetivos ângulos de atrito interno e densidade para teores de umidade variados

Teor de Umidade (%)	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)		Peso Específico (N/m ³)	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
9,5	17°	23°	21°	24°	7262,7	7748,8
13,0	18°	23°	22°	25°	7613,1	8043,6
18,0	25°	32°	28°	32°	6583,1	7242,5
22,0	23°	30°	28°	33°	6207,1	6948,2
30,0	19°	27°	25°	30°	5847,4	6741,1

De modo geral, os valores de densidade consolidada do milho apresentaram valores inferiores aos das normas ISO 11697 e Eurocode, cujos valores recomendados são de 7500 e 8500 N/m³ para os limites inferior e superior, respectivamente (Tabela 5), com exceção no limite inferior da umidade de 13%. Isso pode ser explicado devido ao conjunto de fatores como tipo de carregamento, taxa e altura de queda durante este processo, tempo de armazenamento e sobrepressões que fazem divergir os valores encontrados nas pesquisas e normas (Dornelas et al., 2021; Fürll & Hoffmann, 2015).

O aumento do teor de umidade pode ocorrer em grãos armazenados devido à respiração de grãos e resulta em aumento de volume, além de modificar suas propriedades físicas (Horabik & Molenda, 2014). Pode-se observar desta maneira, a partir das Figuras 10, 11 e 12, que o peso específico do milho tende a diminuir com o aumento do teor de umidade quando inseridas na célula de cisalhamento de Jenike. Além disso, é possível identificar aumento no ângulo de atrito interno bem como no efetivo ângulo de atrito

interno em função do teor de umidade, até o teor 18%, e queda nestes mesmos ângulos também a partir deste teor, assim como verificado pelos autores Horabick & Molenda (2014) justificado pela queda no módulo de elasticidade do grão devido ao aumento do teor de umidade, resultando conseqüentemente no aumento das forças de contato entre os grãos de milho.

Figura 10- Peso específico consolidado em função do teor de umidade

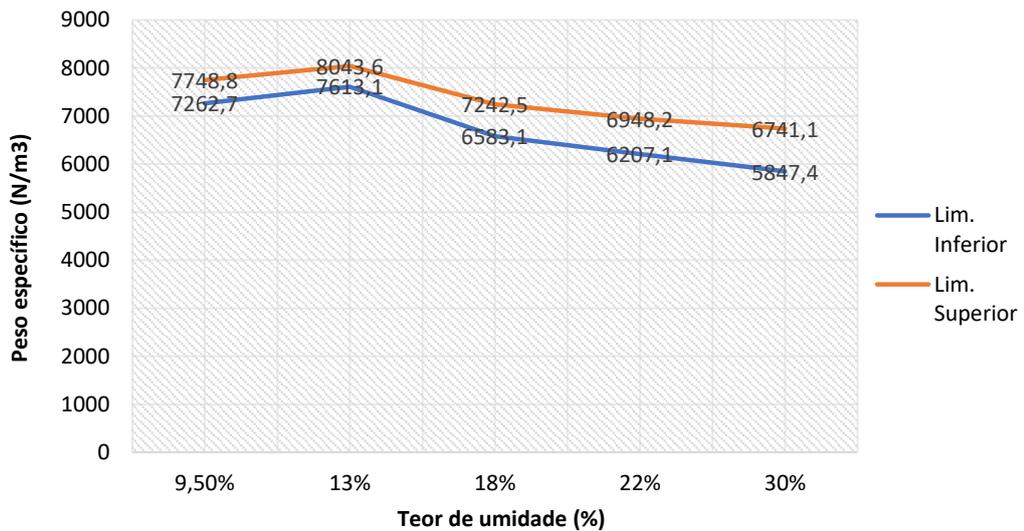


Figura 11- Ângulo de atrito interno em função do teor de umidade

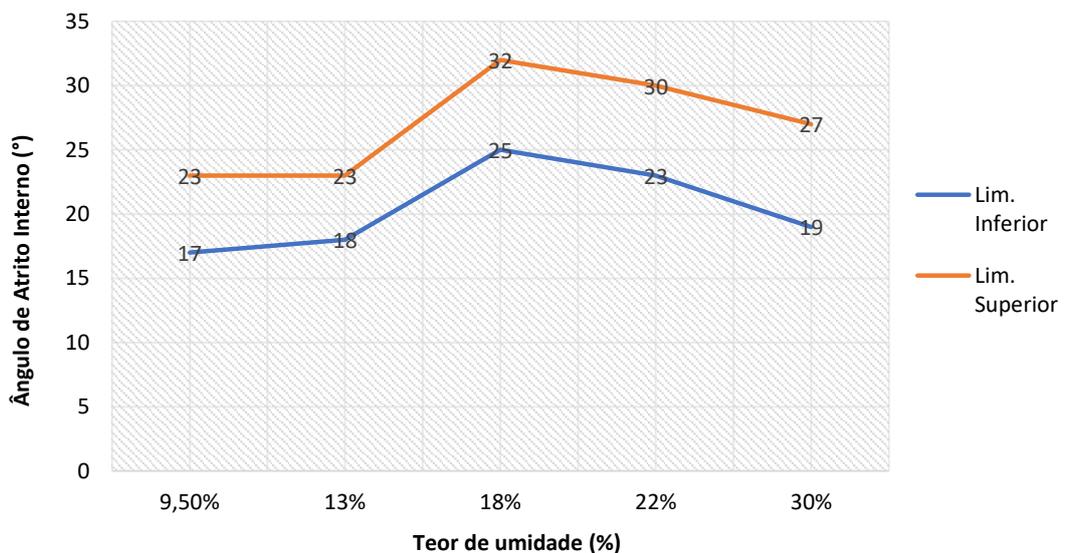
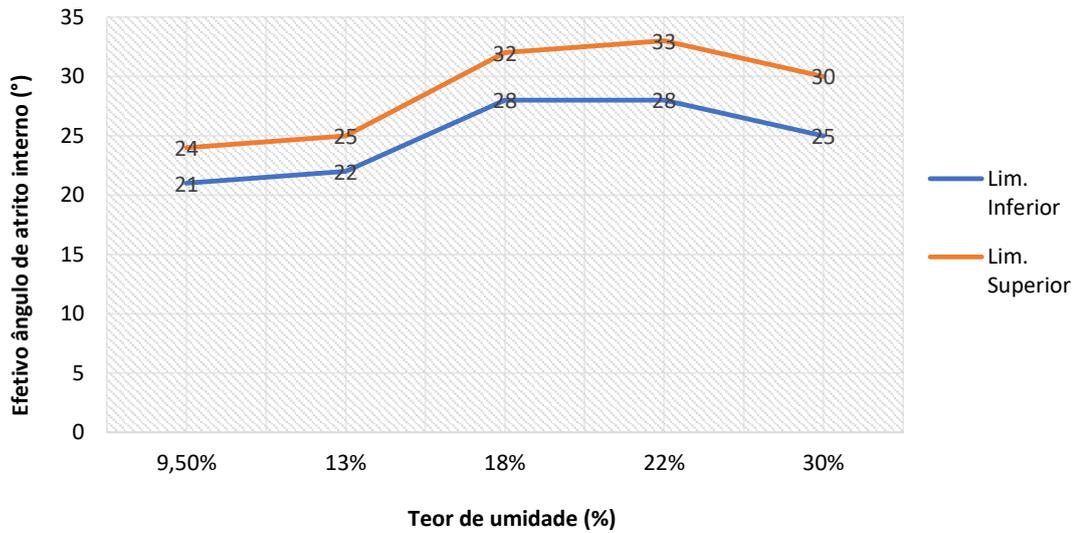


Figura 12- Efetivo ângulo de atrito interno em função do teor de umidade



5.2. ÂNGULO DE ATRITO COM A PAREDE

Os gráficos a seguir referem-se aos limites inferior e superior do ângulo de atrito do produto com a parede. A determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis, como teor de umidade, corrosão, abrasão e revestimento da superfície. (Calil Júnior, 2007).

Figura 13- Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço liso

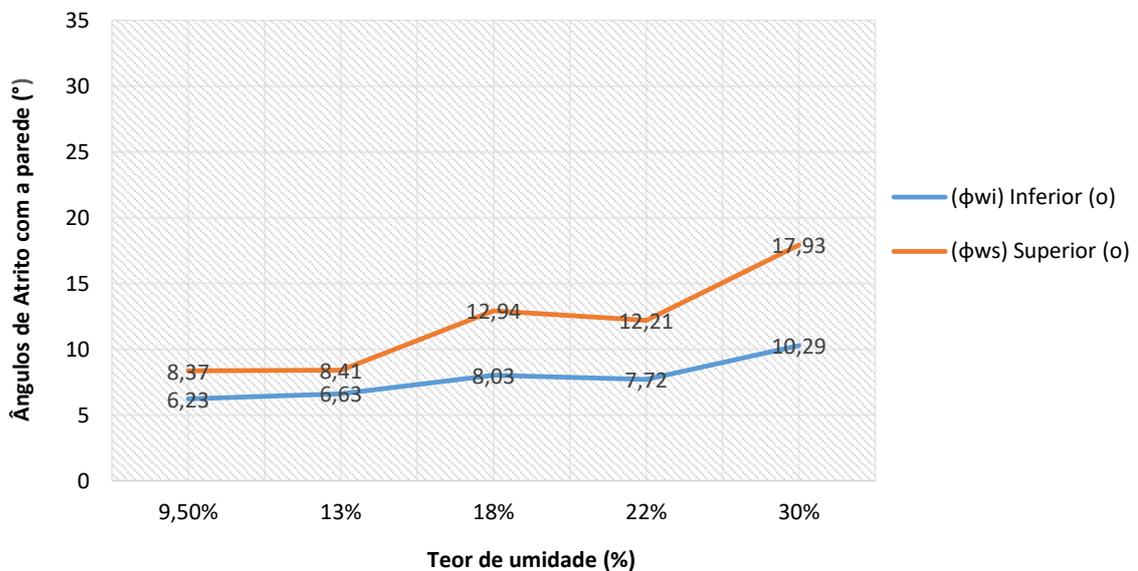


Figura 14- Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço rugoso

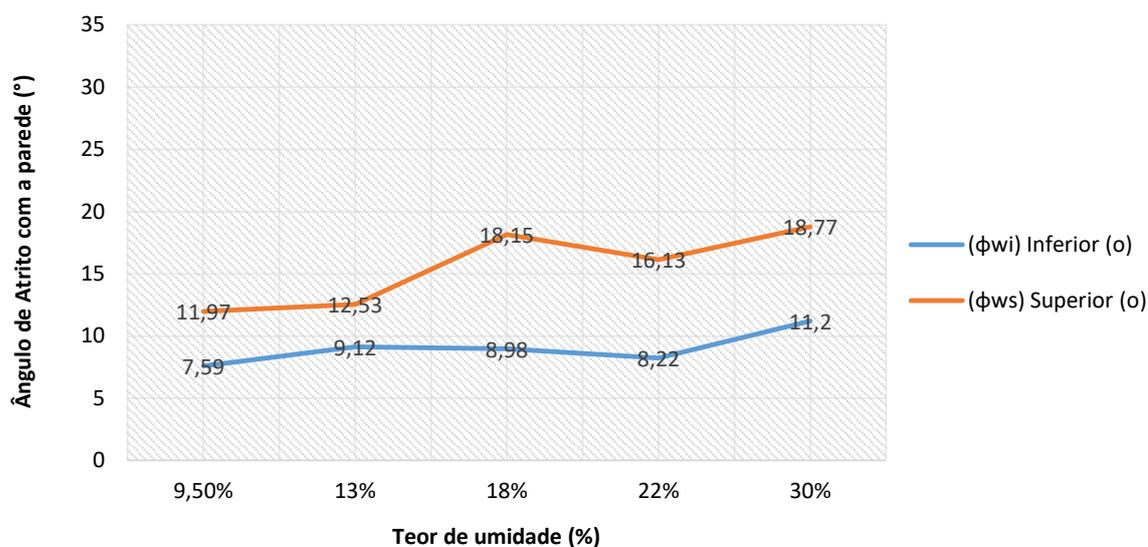
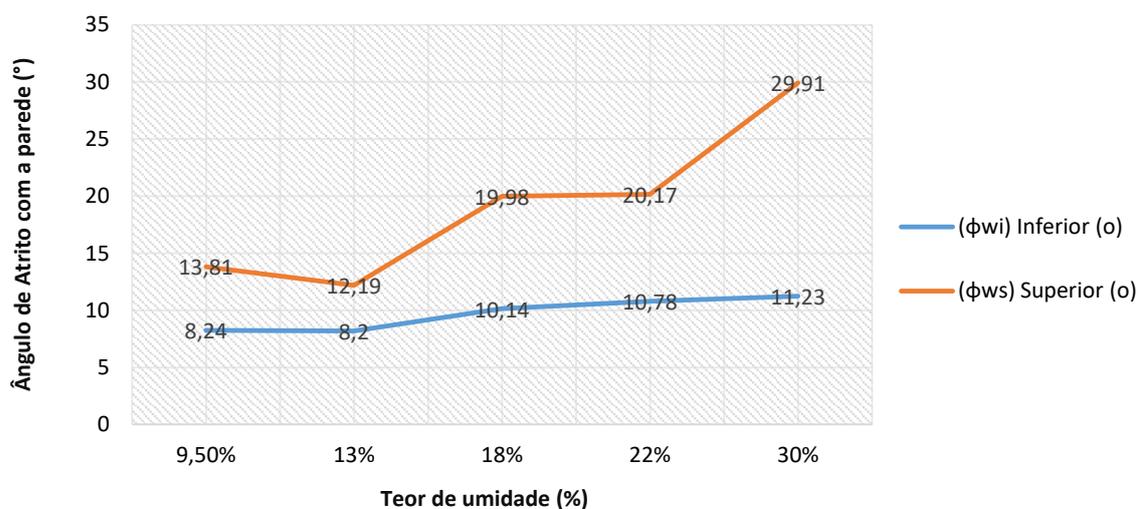


Figura 15 Ângulos de atrito com a parede em função do teor de umidade para aço zincado



Os ângulos de atritos inferiores e superiores com a parede e os ângulos de inclinação da tremonha aumentaram proporcionalmente ao teor de umidade, ocasionando dificuldade de escoamento do produto no caso do ângulo de atrito, e sendo os maiores valores observados para aço zincado, valores intermediários para aço rugoso, e menores valores para aço liso. Além disso, de modo geral os valores dos ângulos de atrito com a parede registrado para o aço zincado e rugoso foram superiores ao aço liso, o que pode ser explicado por estes serem mais ásperos em comparação ao aço liso, e com isso

ocorrerá maior força de compressão vertical nas paredes dos silos assim como observado por Dornelas et al. (2021).

5.3. FATOR FLUXO DA TREMONHA (*ff*)

As Tabelas de 7 a 10 se referem ao fator fluxo da tremonha (*ff*) para os diferentes teores de umidade analisados. Pode-se observar que os valores de *ff* variaram em função da umidade e do material da parede. O maior valor de *ff* foi registrado para o menor teor de umidade (9,5%) e aço liso com valor igual 3,11 sendo classificado como coesivo, enquanto o menor valor de *ff* (1,74) ocorreu para o aço zincado e teor de umidade igual a 30%, sendo então classificado como muito coesivo.

Tabela 6 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 9,5%

Parede	θ_{mth} (°)	F(θ)	α (°)	X	Y	<i>ff</i>	Inclinação(°)
Aço Liso	35,3033	0,3519	68,4137	3,0355	2,5928	3,1194	18°
Aço Rugoso	42,8985	0,3670	68,4137	3,2429	2,6003	3,0329	18°
Aço Zincado	46,4543	0,3745	68,4137	3,3582	2,5882	2,9917	18°

Tabela 7 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 13%

Parede	θ_{mth} (°)	F(θ)	α (°)	X	Y	<i>ff</i>	Inclinação(°)
Aço Liso	37,7771	0,3567	66,5432	3,2925	2,6017	2,8631	19°
Aço Rugoso	45,1728	0,3717	66,5432	3,5395	2,6025	2,7812	20°
Aço Zincado	44,5478	0,3704	66,5432	3,5162	2,6041	2,7882	20°

Tabela 8 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 18%

Parede	θ_{mth} (°)	F(θ)	α (°)	X	Y	<i>ff</i>	Inclinação(°)
Aço Liso	50,1819	0,3827	58,1649	5,6783	2,8876	1,9263	27°
Aço Rugoso	56,4838	0,3975	58,1649	6,3056	2,8546	1,8750	28°
Aço Zincado	61,8945	0,4111	58,1649	7,0381	2,7987	1,8307	29°

Tabela 9 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 22%

Parede	θ_{mth} (°)	F(θ)	α (°)	X	Y	ff	Inclinação(°)
Aço Liso	50,1354	0,3826	57,3554	5,9943	2,9556	1,8634	28°
Aço Rugoso	56,0468	0,3964	57,3554	6,6195	2,9283	1,8175	29°
Aço Zincado	62,3696	0,4123	57,3554	7,5434	2,8645	1,7679	29°

Tabela 10 - Parâmetros para determinação do fator fluxo da tremonha para o teor de umidade igual a 30%

Parede	θ_{mth} (°)	F(θ)	α (°)	X	Y	ff	Inclinação(°)
Aço Liso	57,6474	0,4003	60,0000	5,7342	2,7193	2,0107	26°
Aço Rugoso	59,4166	0,4047	60,0000	5,9306	2,7009	1,9948	27°
Aço Zincado	87,7845	0,4916	60,0000	4,7718	2,0729	1,7490	30°

5.4. FUNÇÃO FLUXO (FF)

A função fluxo (FF) indica a capacidade que o produto tem em fluir por gravidade, logo o índice $FF_{média}$ demonstra se o produto escoará mais facilmente ou não. As Tabelas de 20 a 24 contém os valores de função fluxo para cada teor de umidade analisado, e verifica-se que a resistência ao escoamento não confinado aumenta para uma tensão de consolidação máxima à medida que a umidade relativa aumenta, ou seja, a fluidez diminui com o aumento da umidade. Tal fenômeno pode ser explicado devido à sorção de água pelo grão à medida que a sua umidade aumenta. A água adsorvida na superfície de uma partícula poderá dissolver componentes solúveis e formar pontes líquidas entre as partículas, tornando-as mais coesas (Teunou & Fitzpatrick, 1999).

Tabela 11 - Função fluxo para teor de umidade igual a 9,5%

Carga/Disco (Kg)	$\sigma_{prnc, max}$	σ_{inc}	FF
10,0	20694,93	1085,712	19,06116
7,0	15307,37	959,072	15,96061
5,0	11004,58	1079,264	10,19638
		FF médio	15,07272

Tabela 12 - Função fluxo para teor de umidade igual a 13%

Carga/Disco (Kg)	$\sigma_{prnc, max}$	σ_{inc}	FF
10,0	20743,71	1673,5	12,39541
7,0	16255,46	954,882	17,02353
5,0	10958,83	519,982	21,07539
		FF médio	16,83144

Tabela 13 - Função fluxo para teor de umidade igual a 18%

Carga/Disco (Kg)	$\sigma_{prnc, max}$	σ_{inc}	FF
10,0	22182,30	2389,472	9,283346
7,0	16914,79	749,144	22,57882
5,0	13553,04	1239,024	10,93848
		FF médio	14,26688

Tabela 14 - Função fluxo para teor de umidade igual a 22%

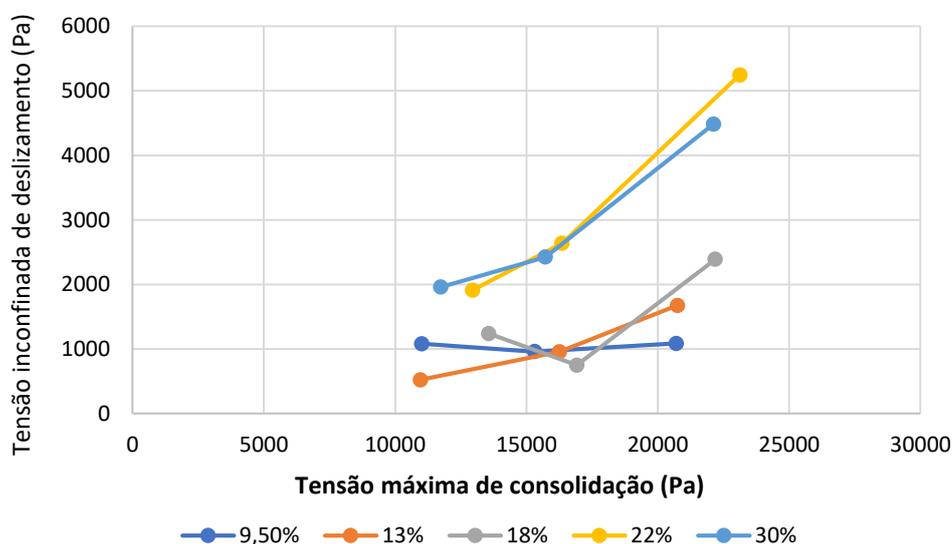
Carga/Disco (Kg)	$\sigma_{prnc, max}$	σ_{inc}	FF
10,0	23120,99	5245,210	4,40802
7,0	16353,44	2636,604	6,20246
5,0	12948,26	1910,384	6,77783
		FF médio	5,79610

Tabela 15 - Função fluxo para teor de umidade igual a 30%

Carga/Disco (Kg)	$\sigma_{prnc, max}$	σ_{inc}	FF
10,0	22124,51	4484,978	4,93302
7,0	15717,97	2422,974	6,48706
5,0	11728,97	1958,460	5,98887
		FF médico	5,80298

As curvas representativas da função fluxo (*FF*) são encontradas na Figura 16 com a maior inclinação sendo representada para os teores de umidade iguais a 22 e 30% correspondendo ao seu baixo índice de fluabilidade e fluxo mais dificultoso. Segundo Lopes Neto & Nascimento (2013), a curva mais próxima ao eixo horizontal representa um produto de fluxo mais fácil e, observando uma direção anti-horária, tal produto tende a apresentar maior resistência ao escoamento, evidenciando a sua condição de fluxo livre para o milho em grão com teor de umidade mais baixo.

Figura 16 - Função fluxo para diferentes teores de umidade



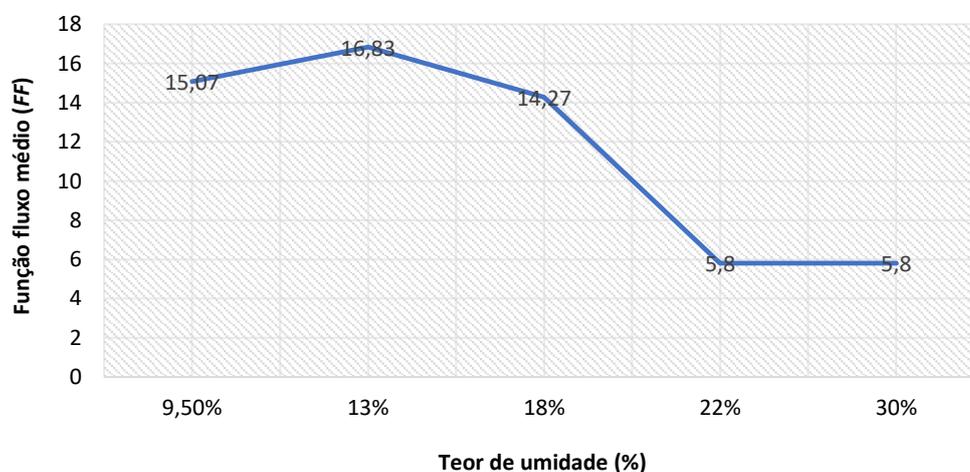
A Tabela 16 apresenta a classificação do produto de acordo com a sua coesão e com os seus respectivos teores de umidade.

Tabela 16 - Classificação do produto segundo a coesão

Teor de umidade	FF médio	Classificação
9,5%	15,07	Fluxo livre
13%	16,83	Fluxo livre
18%	14,27	Fluxo livre
22%	5,80	Fluxo fácil
30%	5,80	Fluxo fácil

Verificou-se que a fluidez dos grãos de milho foi bastante reduzida a partir de 22% de umidade (Tabela 16), já que a presença de água induz uma forte coesão entre as partículas. É válido ressaltar que durante o ensaio, os grãos eram dispersáveis dentro da célula com as umidades iguais a 9,5 e 13%, no entanto, a partir de 18% o processo com a alavanca tornou-se mais dificultoso, e em 22 e 30% o ensaio passou a ser consideravelmente lento e sua execução árdua, já que as partículas estavam altamente coesas. A Figura 10 ilustra como o aumento da umidade afeta a interação entre os grãos de milho. Opaliński et al (2021) destacam que efeito do teor de umidade nas propriedades mecânicas e potencial de fluidez de materiais granulares depende em grande parte do tamanho das partículas e do nível de saturação de água. O tamanho da partícula e o teor de umidade afetam a fluidez, no entanto para pós alimentares não há uma relação forte para tentar relacionar a fluidez com base apenas nessas propriedades físicas (Fitzpatrick et al., 2004). No estudo realizado por Abu-hardan & Hill (2010), os autores indicaram que o índice de coesão diminuiu em função do teor de água para farinha de milho.

Figura 17- Função fluxo média em função do teor de umidade dos grãos.



5.5. CÁLCULO DAS PRESSÕES

Considerando a altura do silo cilíndrico $Y = 6,0$ m e o seu diâmetro $D = 3,0$ m, são calculadas as pressões atuantes apresentadas a seguir, obtidas a partir das recomendações da norma ANSI/ASAE EP433. Sobre o produto analisado, em todos os teores de umidade considerados, a pressão horizontal de carregamento e descarregamento e a pressão vertical de carregamento apresentaram menores valores de pressão no aço rugoso do que no aço liso, e as pressões de atrito, tanto para carregamento como para descarregamento foram menores no aço liso e maiores no aço rugoso, devido ao aço rugoso ser mais áspero em relação ao aço liso, provocando maiores forças de compressão nas paredes.

Figura 18- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 9,5% para um silo em aço liso

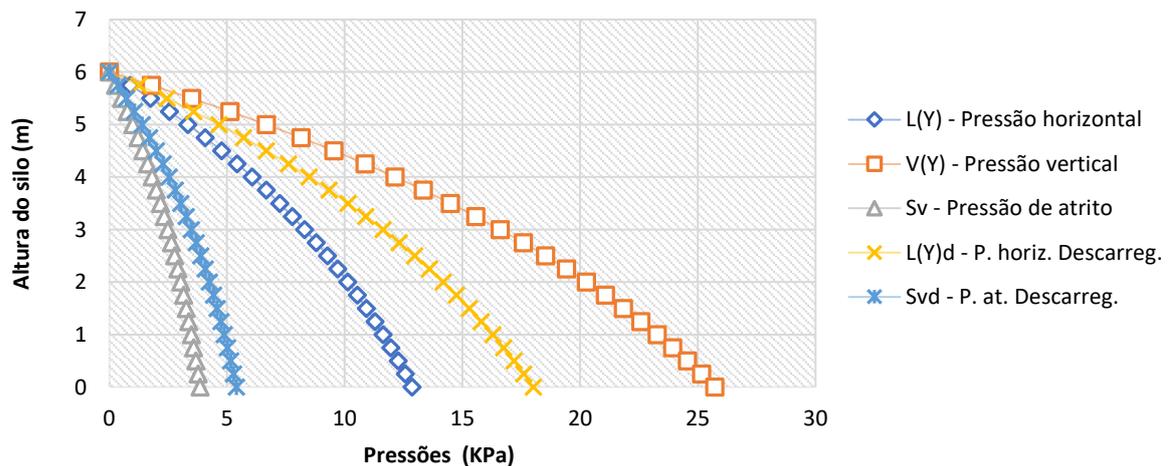


Figura 19- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 9,5% para um silo em aço rugoso

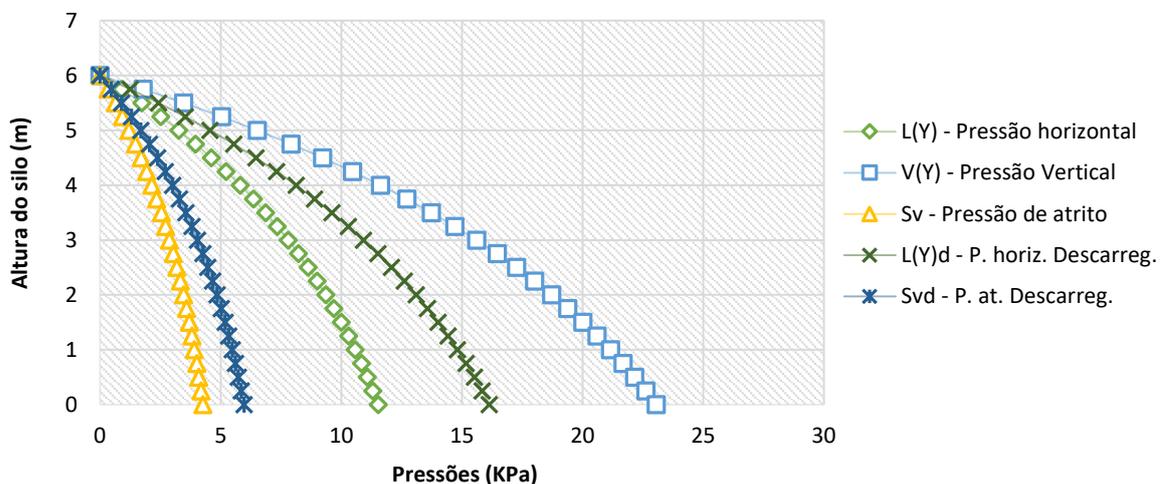


Figura 20- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 13% para um silo em aço liso

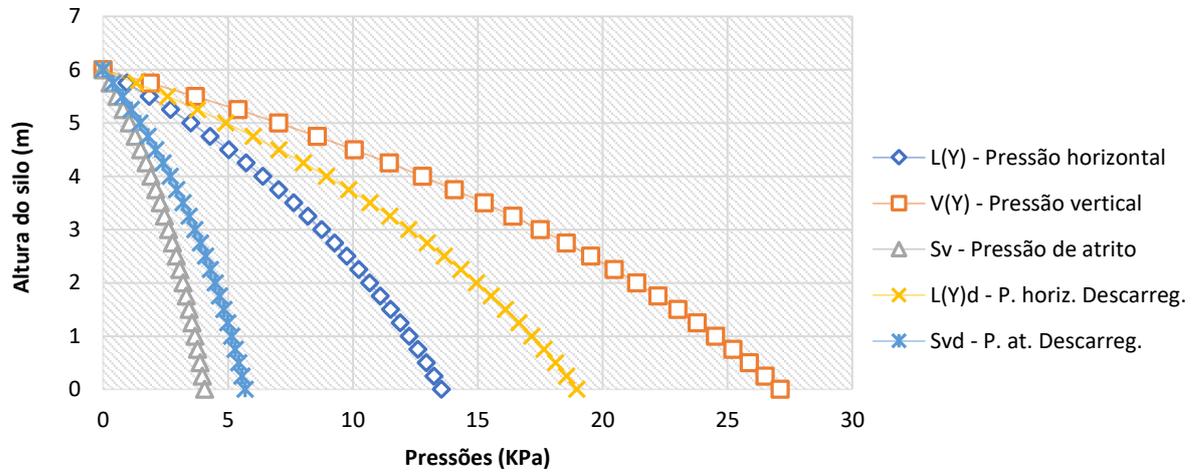


Figura 21- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 13% para um silo em aço rugoso

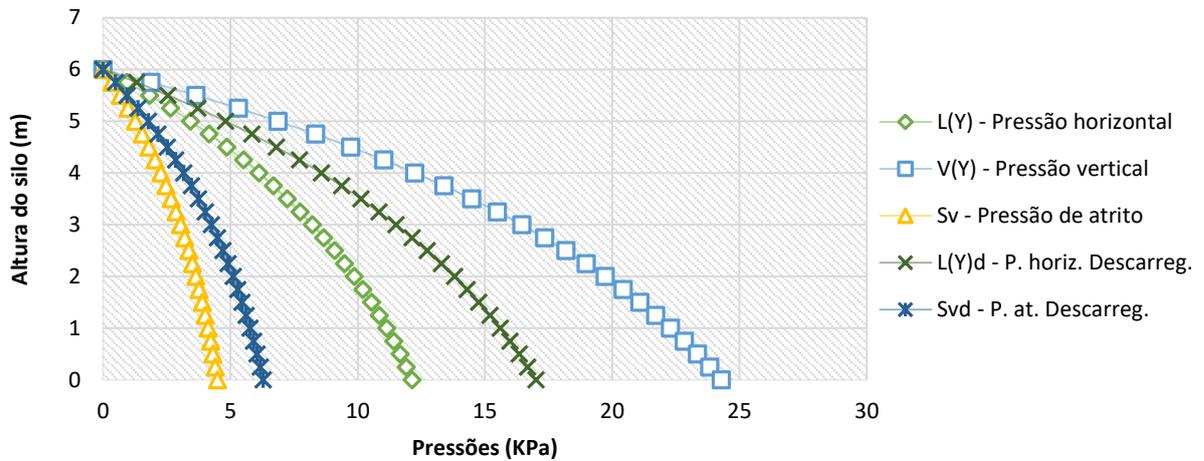


Figura 22- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 18% para um silo em aço liso

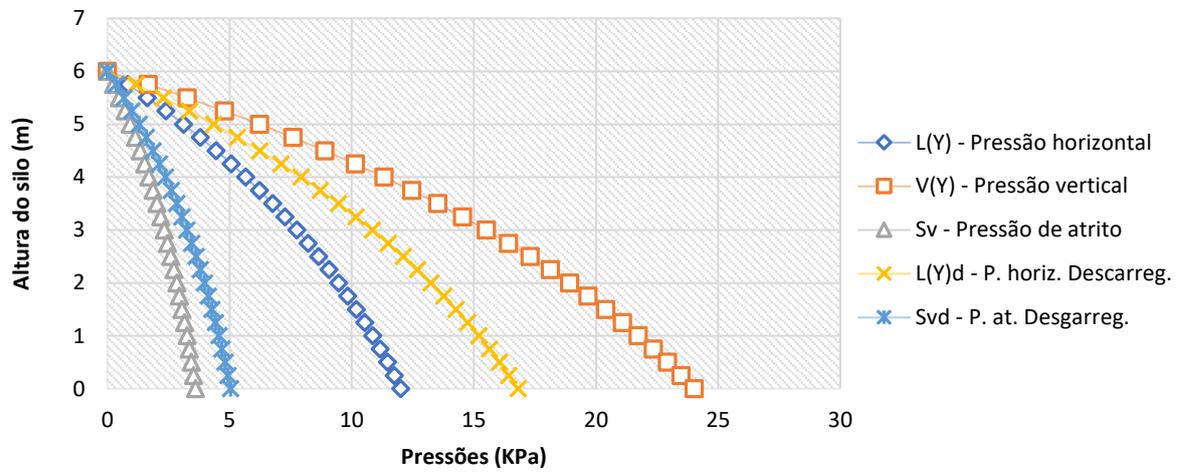


Figura 23- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 18% para um silo em aço rugoso

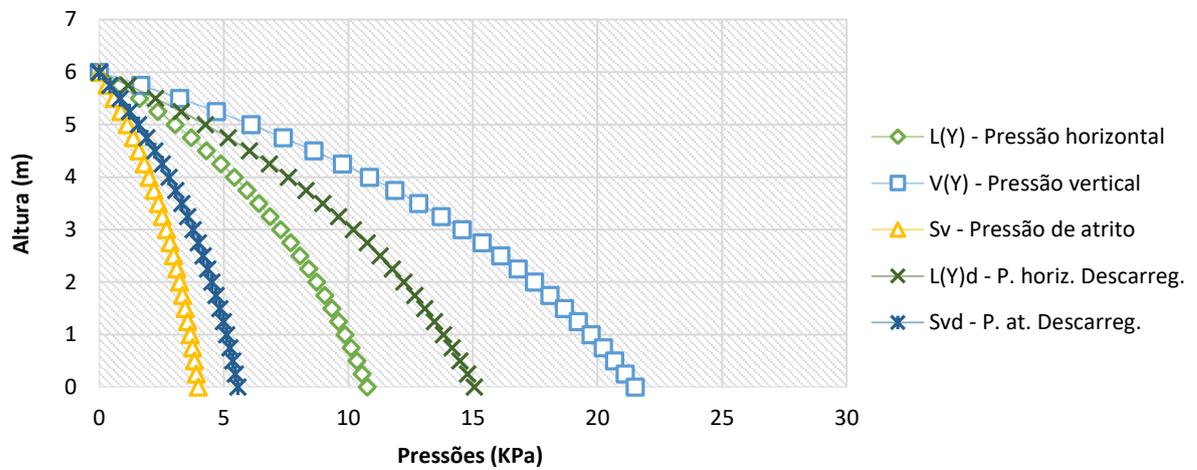


Figura 24- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 22% para um silo em aço liso

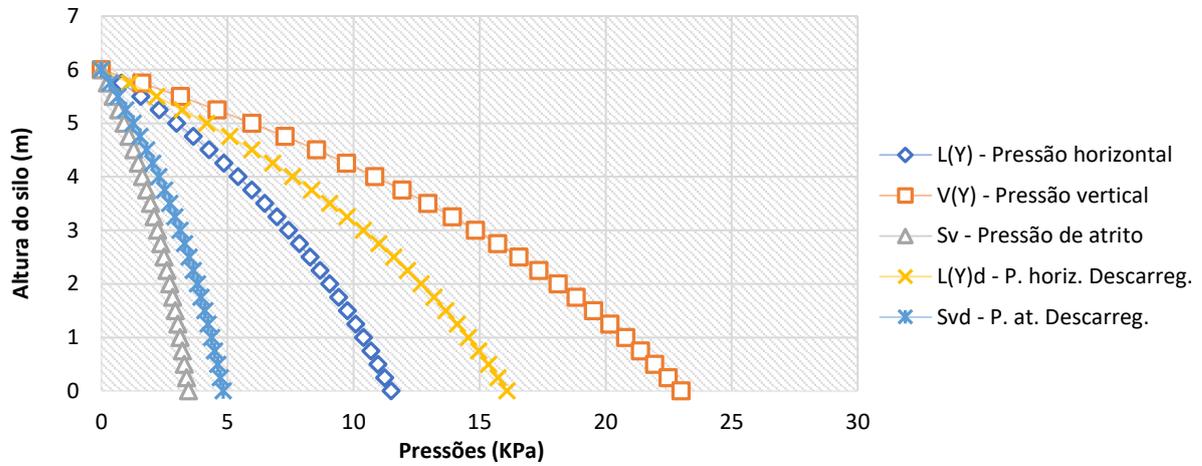


Figura 25- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 22% para um silo em aço rugoso

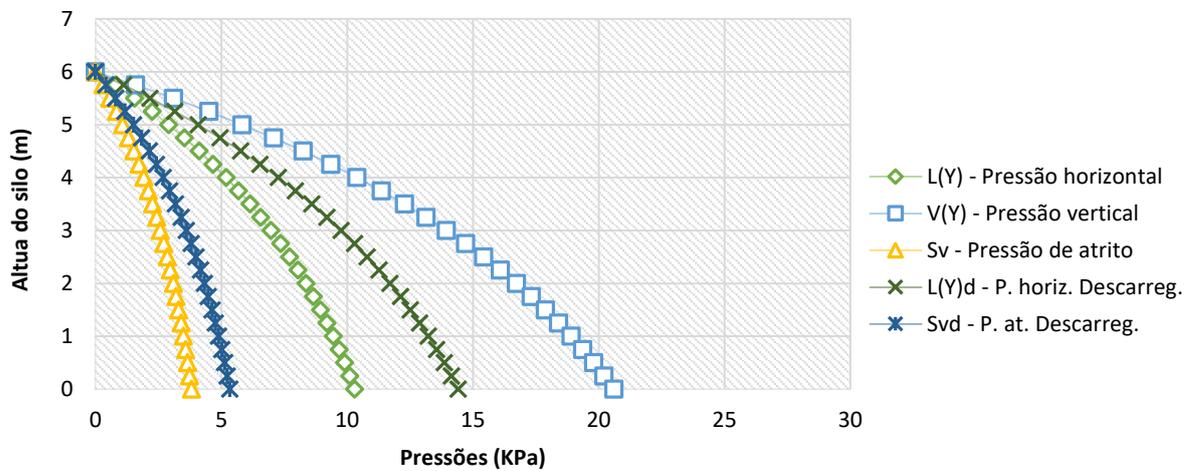


Figura 26- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 30% para um silo em aço liso

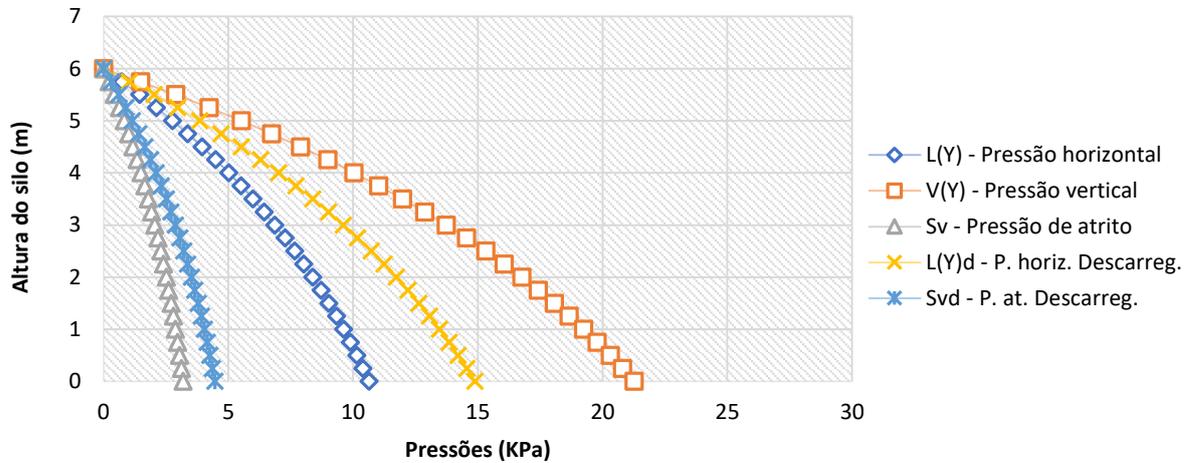
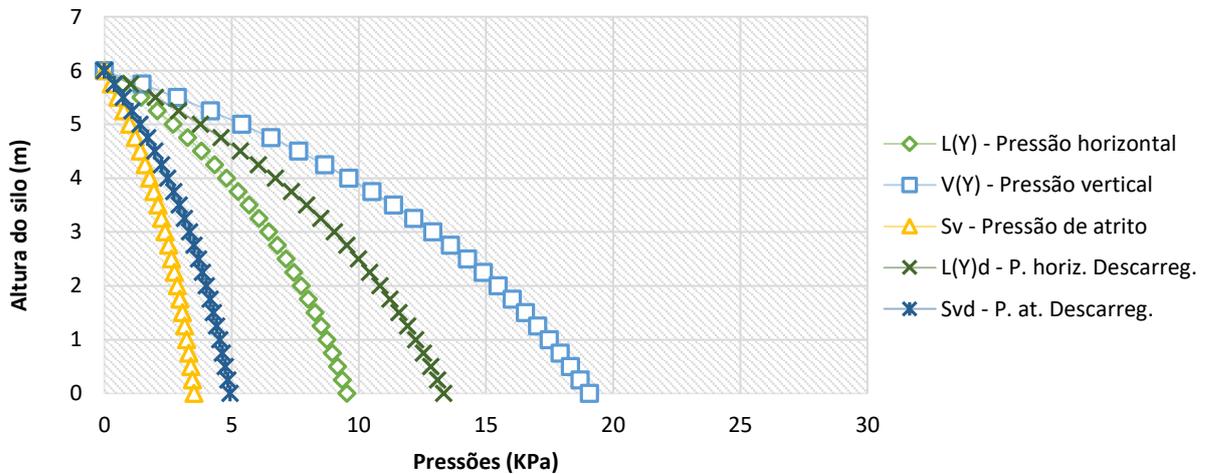


Figura 27- Pressões no carregamento e descarregamento de milho com teor de umidade igual a 30% para um silo em aço rugoso



Os gráficos a seguir representam as assíntotas de pressão horizontal, vertical e de atrito dos produtos com a parede no carregamento, assim como as assíntotas das pressões horizontais e de atrito com a parede no descarregamento do milho nos diferentes teores de umidade analisados (Figuras 27 a 31). A densidade, relação entre massa e volume dos produtos armazenados, apresenta correlação com o teor de umidade, bem como com o tipo de carregamento, taxa e a altura de queda durante este processo, ainda, com o tempo de armazenamento e com as sobrepensões que se desenvolvem (Fürl & Hoffmann, 2015).

Observa-se que o aumento do teor de umidade provocou diminuição da densidade registrada durante o experimento, justificado pelo fato de que quanto maior a quantidade de água presente nos grãos, maior é a porosidade, e portanto, a quantidade de grãos acomodados no interior da célula era cada vez menor. Este fenômeno foi também observado no decréscimo de pressão verificado com o aumento dos teores de umidade analisados, uma vez que o cálculo de pressões considera o valor da densidade dos grãos. Gao et al. (2018) consideraram a densidade como um parâmetro crítico nas pressões exercidas pelos grãos em silos e avaliaram em seus estudos a relação da densidade com o aumento do teor de umidade, verificando maior compressibilidade dos grãos com este aspecto. Chen et al. (2020) observaram em seu trabalho a diminuição gradual das pressões com o acréscimo no teor de umidade, justificada pelo aumento na força do arco coesivo, tornando-se estável em seguida. A partir deste fenômeno o material foi comprimido no centro e a pressão horizontal dentro do silo aumenta. No entanto, o aumento do teor de umidade reduz o atrito entre as partículas e a parede. A restrição da parede é diminuída, o que leva a uma diminuição da pressão normal da parede.

Figura 28- Pressões horizontais de carregamento $L(Y)$ em diferentes teores de umidade

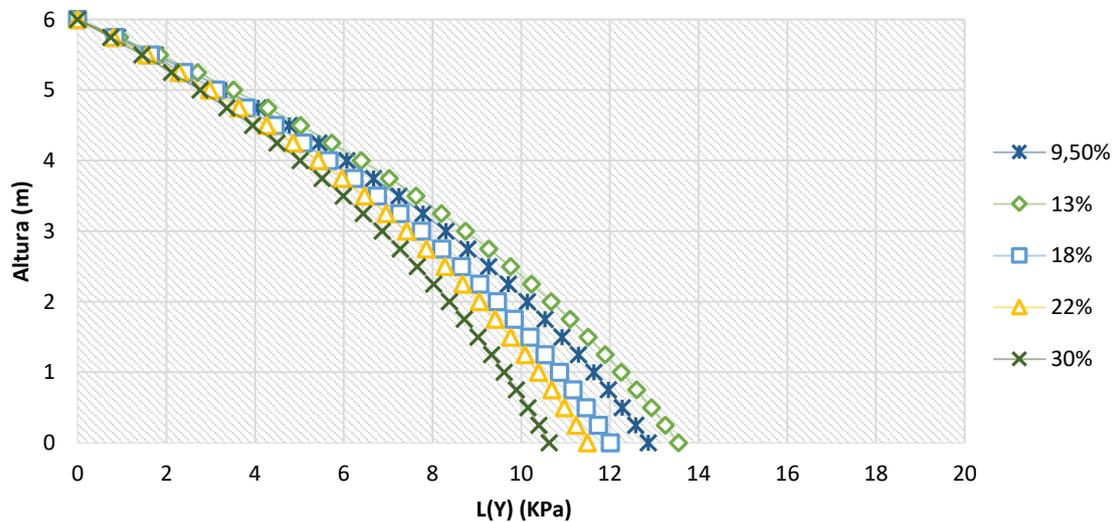


Figura 29 - Pressões horizontais de descarregamento - L(Y)d em diferentes teores de umidade

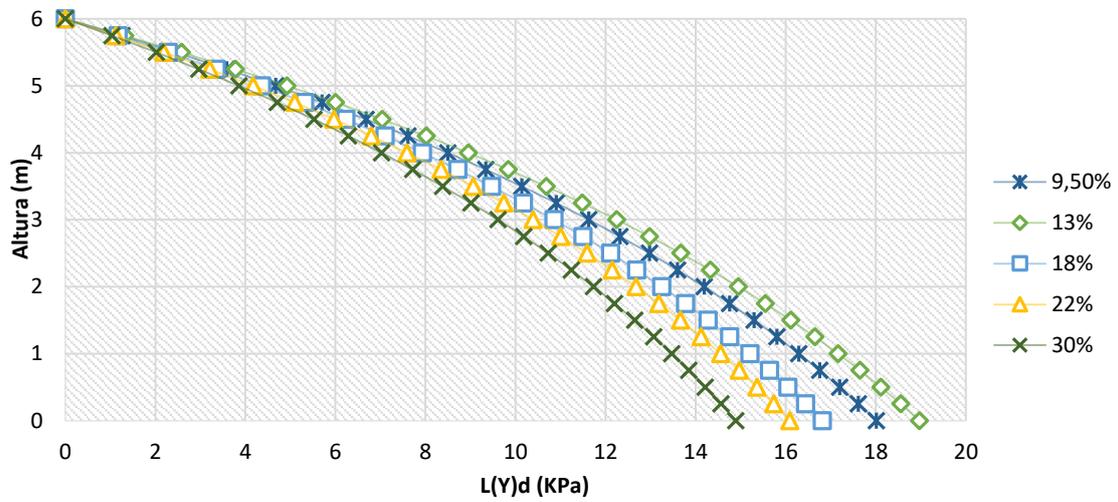


Figura 30 - Pressões de atrito de carregamento S_v em diferentes teores de umidade

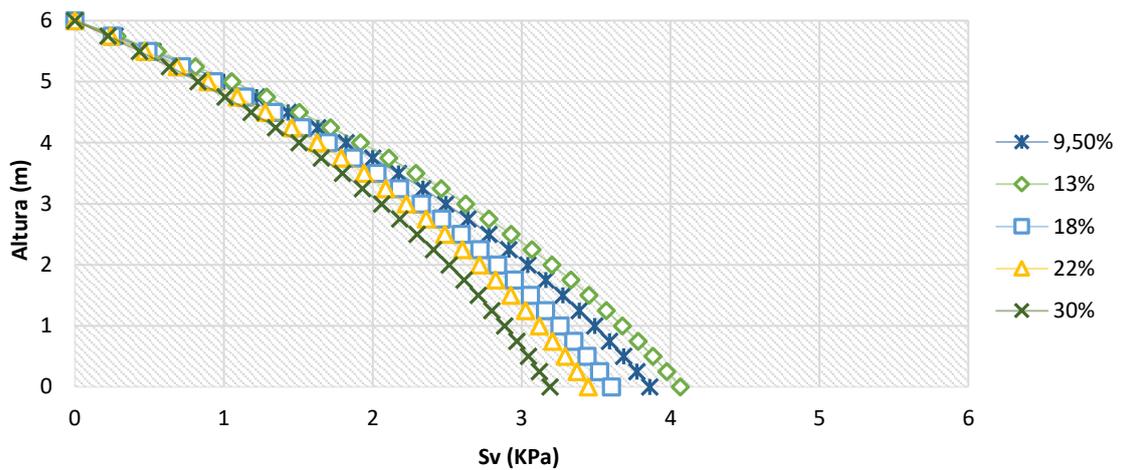


Figura 31 - Pressões de atrito de descarregamento S_{vd} em diferentes teores de umidade

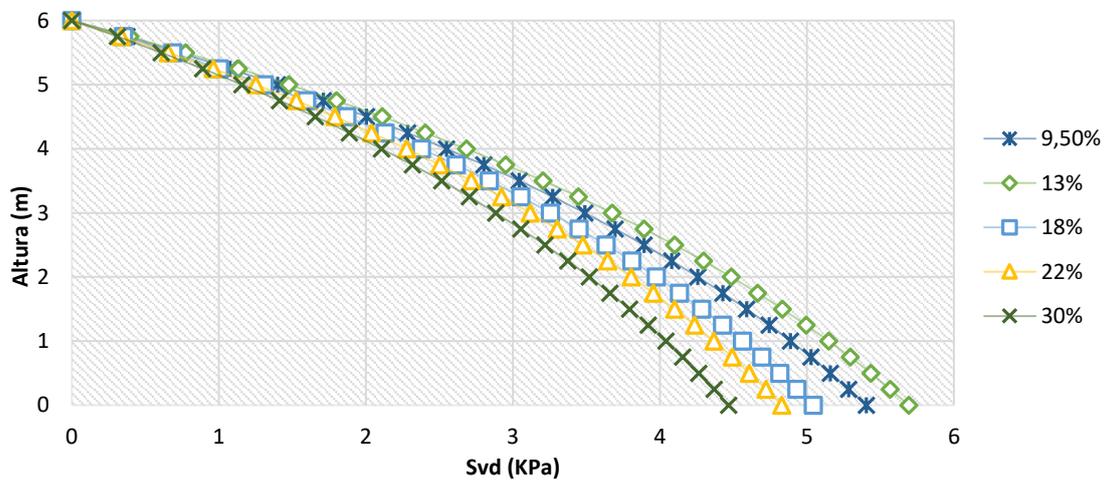
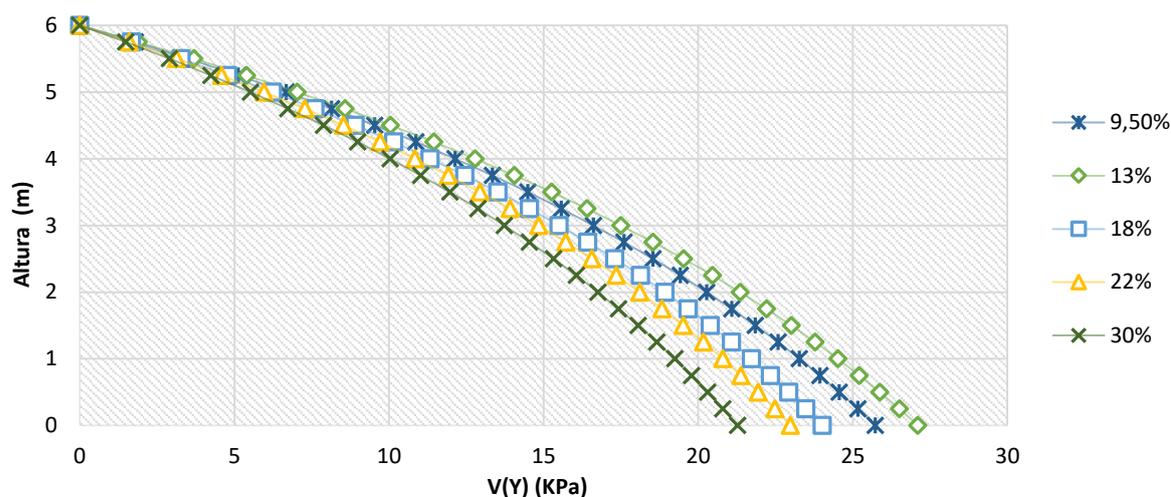


Figura 32- Pressões verticais de carregamento $V(Y)$ em diferentes teores de umidade



É importante observar que no interior do silo, havendo o aumento no teor de umidade dos grãos, como resultado da absorção de água por materiais higroscópicos ou fusão de alguns componentes da superfície da partícula, os produtos se expandem, uma vez que há o aumento na densidade da massa total armazenada e conseqüentemente na pressão exercida horizontalmente, verticalmente e também a pressão de atrito no interior do silo, podendo ocasionar seu colapso em situações mais críticas devido à restrição na expansão dos grãos provocada pela estrutura. Além disso, as pressões horizontais sofrem influência direta da massa de produto inserida no silo, deste modo na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha estão as maiores pressões. Meira et al. (2020) destacaram que neste ponto a mudança de direção das forças verticais atuantes durante o carregamento faz com que haja um pico de pressão exatamente no início do processo de descarregamento, onde há movimento do produto em direção ao orifício de descarga.

Dentre os teores de umidade estudados, o teor em torno de 13% é o que proporciona maiores pressões sobre as paredes dos silos. Santos (2006) destacou que além de influenciar a densidade, altos teores de umidade (acima de 18%) tornam os produtos vulneráveis a colonização por populações de insetos e fungos. Considerando este aspecto, as portarias do Ministério da Agricultura acerca de Normas e Padrão Comercial, recomendam que grãos amiláceos sejam colhidos com teor de umidade mais próximo possível de 13% ou que após pré-limpeza, secagem, limpeza e classificação a massa de grãos atinja este valor (Elias et al., 2017).

6. CONCLUSÕES

1. O aumento no teor de umidade dos grãos de milho exerce influência direta no seu peso específico consolidado, gerando ganho de massa, implicando, conseqüentemente, em alterações no volume do produto e provocando sua expansão.

2. Os ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno apresentam pouca variação com a mudança de teor de umidade. No entanto, os ângulos de atrito com a parede e os ângulos de inclinação da tremonha aumentaram de maneira diretamente proporcional ao aumento do teor de umidade, ocasionando dificuldade de escoamento do produto no caso do ângulo de atrito, e sendo os maiores valores observados para aço zincado, valores intermediários para aço rugoso, e os menores valores para aço liso.

3. O fator fluxo apresenta pouca variação, diminuindo suavemente o seu valor com o aumento do teor de umidade.

4. Quanto ao cálculo de conclui-se que mudanças no teor de umidade ocasionam mudanças no peso específico consolidado dos grãos armazenados e que este aumento interfere proporcionalmente no valor das pressões exercidas no interior do silo, tanto verticalmente como horizontalmente. Também foi observada a diminuição gradual das pressões com o aumento no teor de umidade, a partir de 18%. Estas variações também estão relacionadas ao peso específico dos grãos.

5. As pressões horizontais e de atrito no descarregamento são maiores do que as pressões exercidas no carregamento, para todos os teores de umidade observados.

6. Considerando os teores de umidade separadamente, as pressões verticais exercidas são as maiores observadas em todas as circunstâncias.

7. À medida que o teor de umidade aumenta, observa-se que a pressão vertical diminui gradualmente.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Dimensionar um silo protótipo para verificação das pressões nos teores de umidade variados, assim como para outros tipos de produtos que não apresentem as mesmas características de fluxo do grão de milho.

2. Realizar uma análise experimental do comportamento da vazão de massa dos grãos no silo protótipo.

3. Estudar o dimensionamento da abertura de descarga da tremonha para o milho, considerando os efeitos da umidade durante o processo de descarga no silo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu-Hardan, M.; Hill, S. E. Handling properties of cereal materials in the presence of moisture and oil. *Powder Technology*, v. 198, n. 1, p. 16-24, 2010.

An, H.; Wang, X.; Fang, X.; Liu, Z.; Liang, C. Wall normal stress characteristics in an experimental coal silo. *Powder Technology*, v.377, p.657-665, 2021.

Anjos, C. M. dos. Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2018.

Calil Júnior, C.; Cheung, A. B. Silos: Pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC. 2007.

Carson, J.; Craig, D. Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia engineering*, v. 102, p. 647-656, 2015.

Chen, W.; Robert, A.; Williams, K.; Miller, J.; Plinke, J. On uniaxial compression and Jenike direct shear testings of cohesive iron ore materials. *Powder Technology*, v. 312, p. 184-193, 2017.

Chen, W.; Roberts, A. W. A modified flowability classification model for moist and cohesive bulk solids. *Powder Technology*, v. 325, p. 639-650, 2018

Chen, Y.; Liang, C.; Wnag, X.; Guo, X.; Chen, X.; liu, D. Static pressure distribution characteristics of powders stored in silos. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 154, p. 1-10, 2020.

Cheung, A. B.; Calil Junior, C.; Bertocini, S. R. Investigação estrutural de silos metálicos e de concreto no Brasil. Lisboa: CONPAT, v. 10, 2015.

Costa, C. A. Propriedades físicas, mecânicas, e de fluxo de produtos agroindustriais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2013.

Domenico, A. S. di; Danner, M. A.; Busso, C.; Christ, D.; Coelho, S. R. M. Análise de trilha da contaminação por aflatoxinas em grãos de milho armazenados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 6, p. 441-449, 2015.

Dornelas, K. C.; Silva, V. R. da; Pessoa, Y. C. C.; Nascimento, J. W. B. do. Propriedades físicas e de fluxo de produtos granulares para projeto de silo. Research, Society and Development, v. 10, n. 10, p. 1-9, 2021.

Elias, M. C.; Oliveira, M.; Vanier, N. L.; Ferreira, C. Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos. Pelotas, UFPel, 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Estudos socioeconômicos e ambientais. Disponível: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acessado em 15 de Outubro de 2021.

Enstad, G. G. A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers. Bergen: The Michelsen Institute, 1981. 172 p.

Fitzpatrick, J. J.; Barringer, S. A.; Iqbal, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. Journal of Food Engineering, v. 61, n. 3, p. 399-405, 2004.

Fürll, C.; Hoffmann, T. Assessment of the flow properties of crushed grain products depending on the granulometric condition. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, v. 17, n. 4, p. 377-386, 2015.

Gao, M.; Cheng, X.; Du, Xi. Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis. Journal of Stored Products Research, v. 77, p. 1-8, 2018.

Gallego, E.; Fuentes, J. M.; Wiącek, J.; Villar, J. R.; Ayuga, F. DEM analysis of the flow and friction of spherical particles in steel silos with corrugated walls. Powder Technology, v. 355, p. 425-437, 2019.

Ganesan, V.; Muthukumarappan, K.; Rosentrater, K. A. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using Jenike shear testing. In: ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. p. 1.

Gitonga, Z. M.; Groote, H. de; Kassie, M.; Tefera, T. Impact of metal silos on households' maize storage, storage losses and food security: An application of a propensity score matching. *Food Policy*, v. 43, p. 44-55, 2013.

Horabik J, Molenda M. Grain pressure in a model silo as affected by moisture content increase. *International Agrophysics*, v. 14, p. 385-392, 2000.

Horabik, J.; Molenda, M. Mechanical properties of granular materials and their impact on load distribution in silo: a review. *Scientia Agriculturae Bohemica*, v. 45, n. 4, p. 203-211, 2014.

Ito, J. E. Colapso de Janssen - Princípios matemáticos do cálculo de silos cilíndricos para grãos. In: Congresso Latino-americano da Construção Metálica, São Paulo, SP, Construmetal, 2016.

Iwicki, P.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach. *Engineering Failure Analysis*, v. 57, p. 444-469, 2015.

Jenike, A. W. Storage and flow of silos. Bulletin 123. Salt Lake City: University of Utah, 89p. 1964.

Jian, F.; Jayas, D. S.; White, N. D. G. Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in a metal silo in Canada. *Journal of Stored Products Research*, v. 45, n. 2, p. 82-90, 2009.

Kibar, H.; Öztürk, T. The effect of moisture content on the physico-mechanical properties of some hazelnut varieties. *Journal of Stored Products Research*, v. 45, n. 1, p. 14-18, 2009.

Krzyżanowski, J.; Tejchman, J.; Sołowski, W.; Wójcik, M. Modelling of shear zones during quasi-static granular silo flow using material point method (MPM). *Powder Technology*, v. 378, p. 538-560, 2020.

Lopes Neto, J. P.; Nascimneto, J. W. B. do; Silva, V. P. da; Lopes, F. F, de M. Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, n. 3, p. 851-859, 2007.

Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 3, p. 339-345, 2013.

Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R. da; Nascimento; J. W. B. do. Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.639-644, 2009.

Maleki, S.; Mehrehtehran, A. M. 3D wind buckling analysis of steel silos with stepped walls. *Thin-Walled Structures*, v. 142, p. 236-261, 2019.

Mehrehtehran, A. M.; Maleki, S. 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. *Thin-Walled Structures*, v. 131, p. 654-667, 2018.

Meira, A. S.; do Nascimento, J. W. B. do; Silva, V. R. da; Nascimento, R. T. do; Soares, H. R. Análise comparativa de pressões horizontais durante o carregamento em silos verticais metálicos. *Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza*, v. 4, n. 30, 2020.

Opaliński, I.; Chutkowski, M.; Stasiak, M. Characterizing moist food-powder flowability using a Jenike shear-tester. *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 1, p. 51-58, 2012.

Palma, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

Santos, J. P. Controle de pragas durante o armazenamento de milho. *Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (Infoteca-E)*, 2006.

Silva, M.; Carvalho, L. S. Ferramenta computacional para dimensionamento de silo unicelular de concreto armado - Parte I: Silo de seção circular. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 2, p. 378-389, 2015.

Søgaard, S. V.; Olesen, N. E.; Hirschberg, C.; Madsen, M. H.; Allesø, M.; Garnaes, J.; Rantanen, J. An experimental evaluation of powder flow predictions in small-scale process equipment based on Jenike's hopper design methodology. *Powder Technology*, v. 321, p. 523-532, 2017.

Sondej, M.; Iwicki, P.; Tejchman, J.; Wójcik, M. Critical assessment of Eurocode approach to stability of metal cylindrical silos with corrugated walls and vertical stiffeners. *Thin-Walled Structures*, v. 95, p. 335-346, 2015.

Teunou, E.; Fitzpatrick, J. J. Effect of relative humidity and temperature on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, v. 42, n. 2, p. 109-116, 1999.

USDA, U.S. Department of Agriculture. Grains: World Markets and Trade. Disponível:<https://www.fas.usda.gov/report-release-announcement/grains-world-markets-and-trade-0>. Acessado em 15 de Outubro de 2021.

Wójcik, M.; Sondej, M.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. *Powder Technology*, v. 311, p. 537-555, 2017.

Wójcik, M.; Tejchman, J. Simulation of buckling process of cylindrical metal silos with flat sheets containing bulk solids. *Thin-Walled Structures*, v. 93, p. 122-136, 2015.

Zhang, Y.; Xue J.; Zhai, J.; Zhang, G.; Zhang, W.; Wang, K.; Ming, B.; Hou, P.; Xie, R.; Liu, C.; Li, s. Does nitrogen application rate affect the moisture content of corn grains? *Journal of Integrative Agriculture*, v. 20, n. 10, p. 2627-2638, 2021.

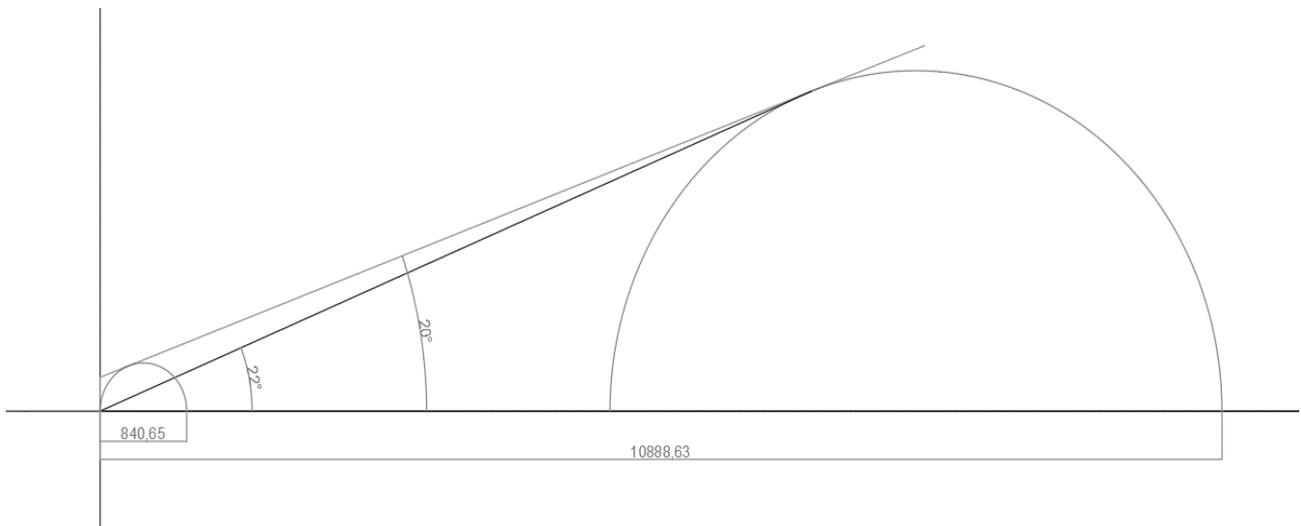
8. APÊNDICES

GRÁFICOS DOS ENSAIOS COM A TSG 70-140:

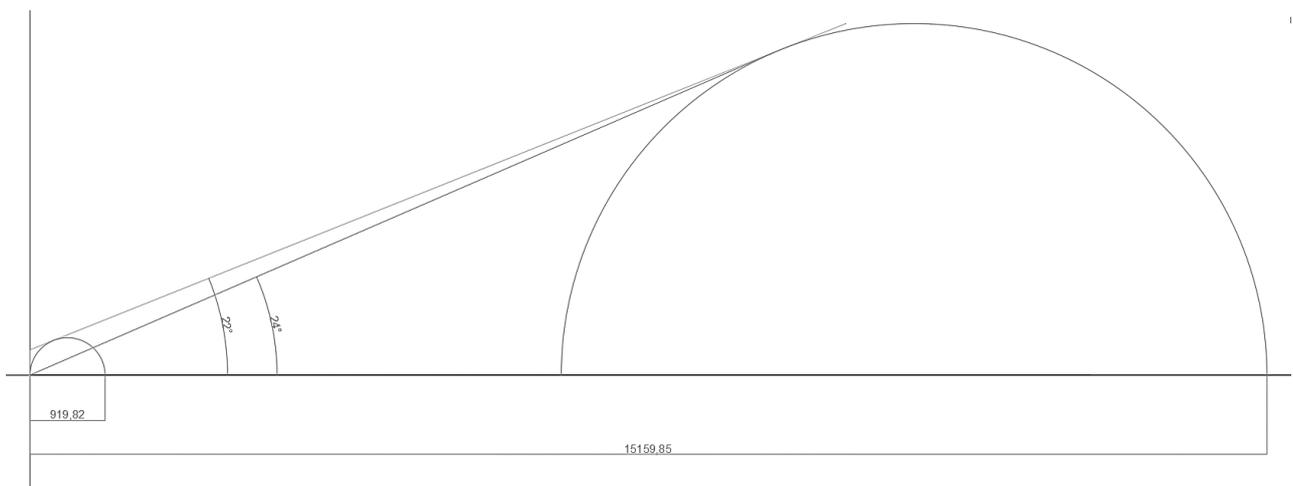
1. Umidade de 9.5 %

1.1. Repetição 1

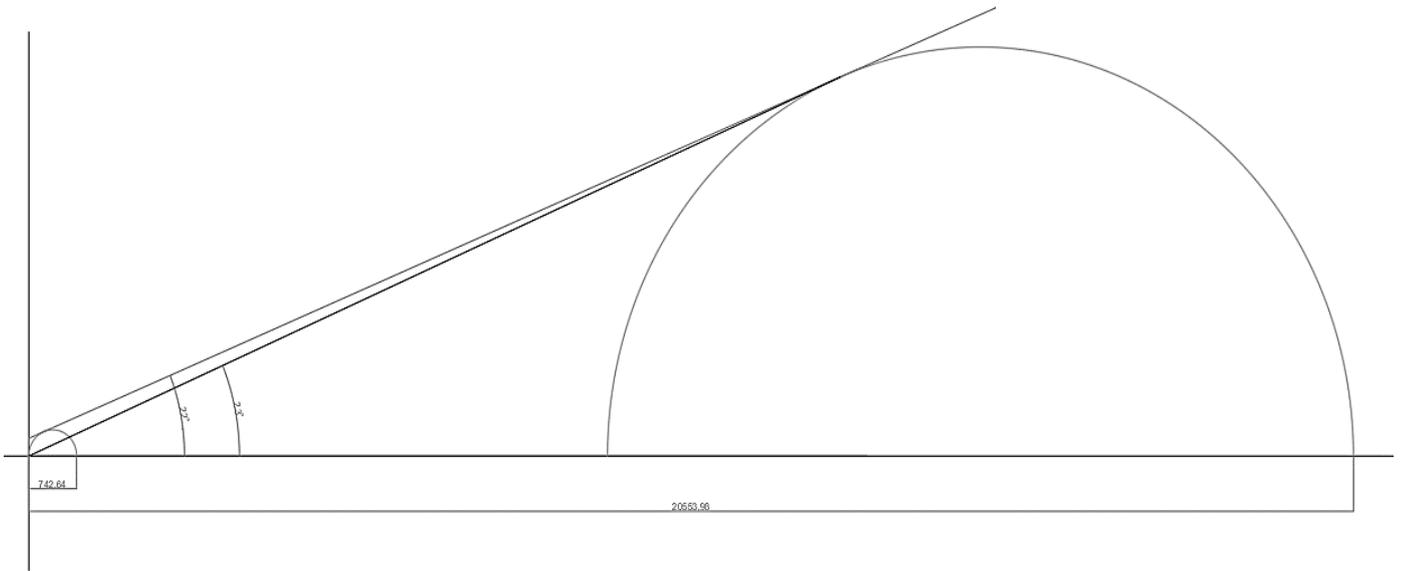
1.1.1. Família 5



1.1.2. Família 7

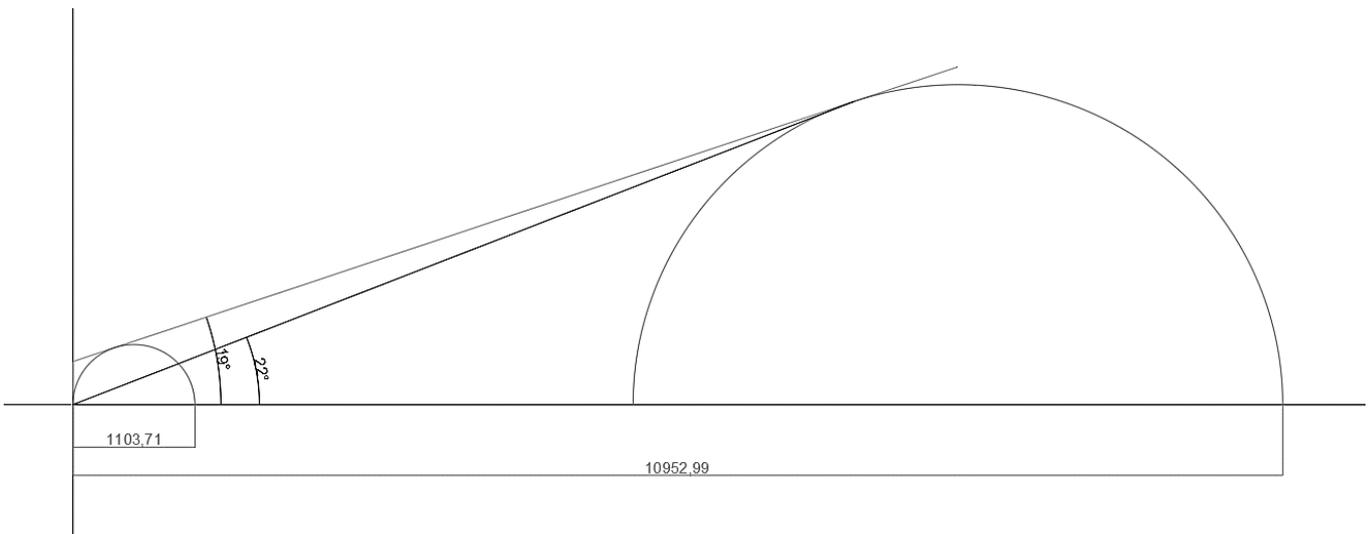


1.1.3 Família 10

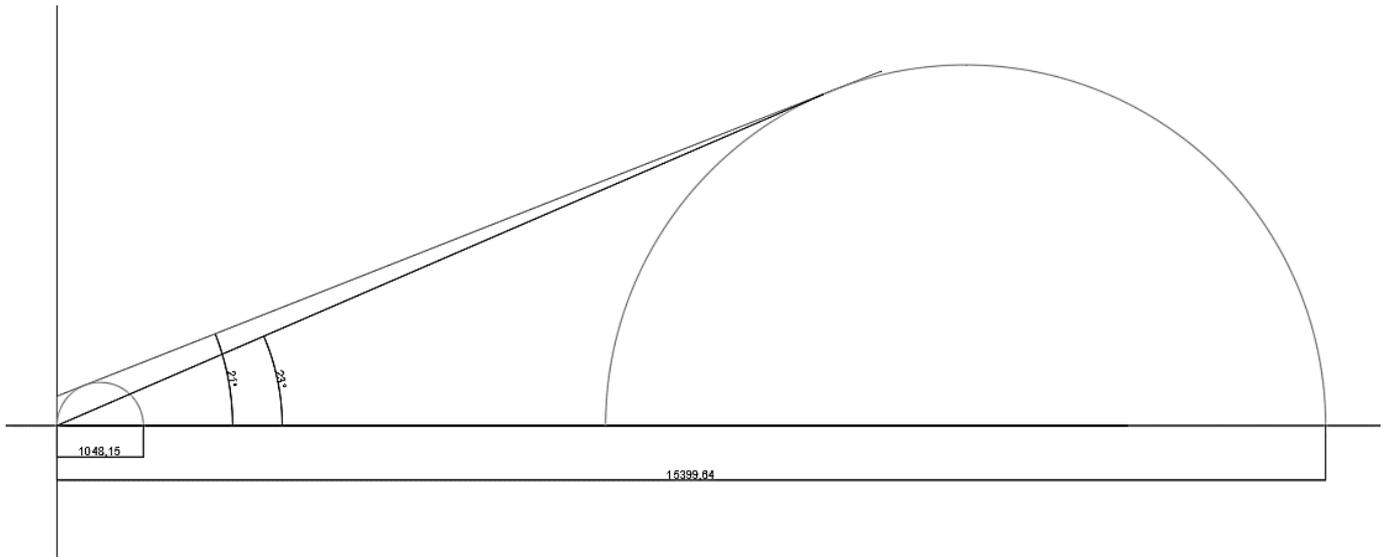


1.2. Repetição 2

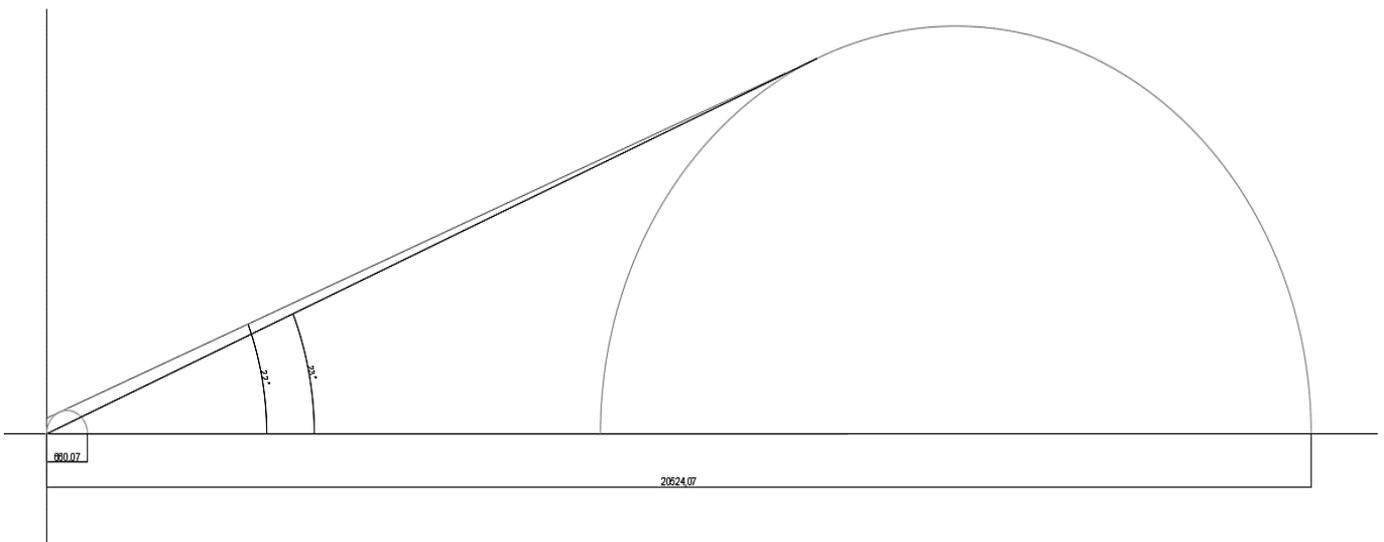
1.2.1. Família 5



1.2.2. Família 7

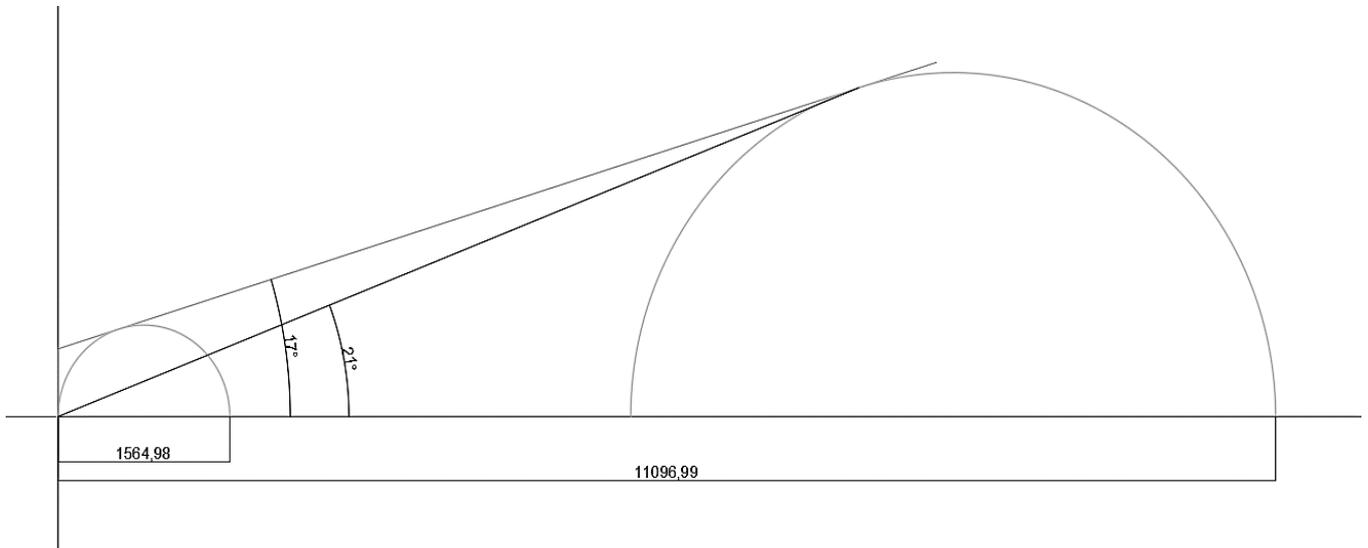


1.2.3 Família 10

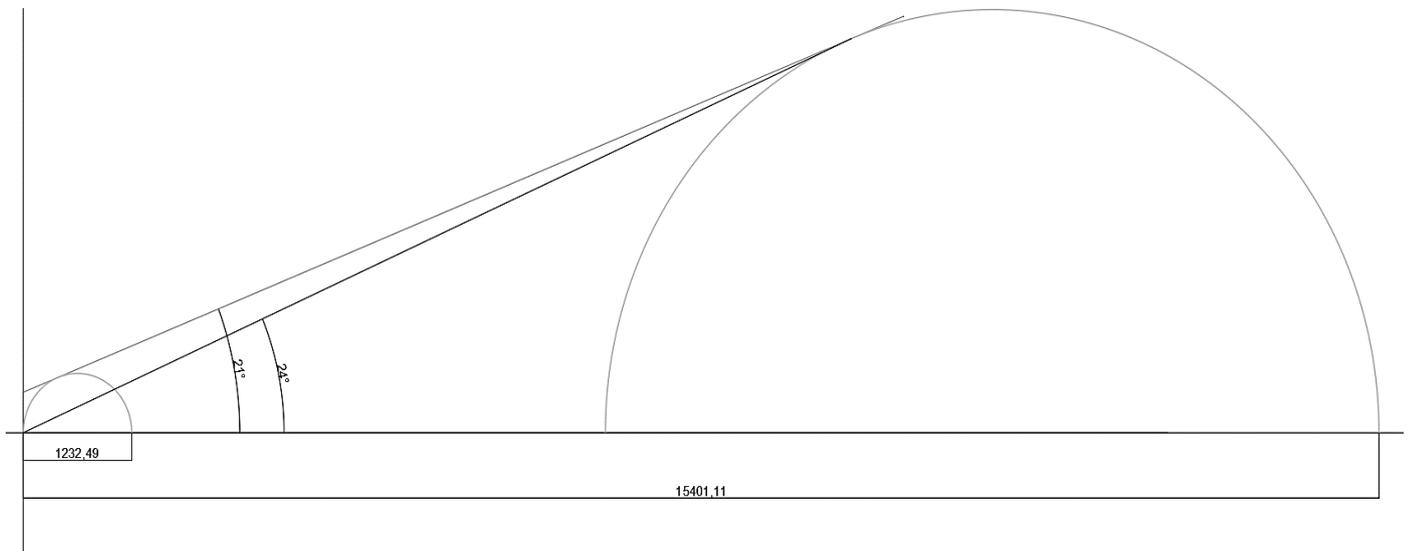


1.3. Repetição 3

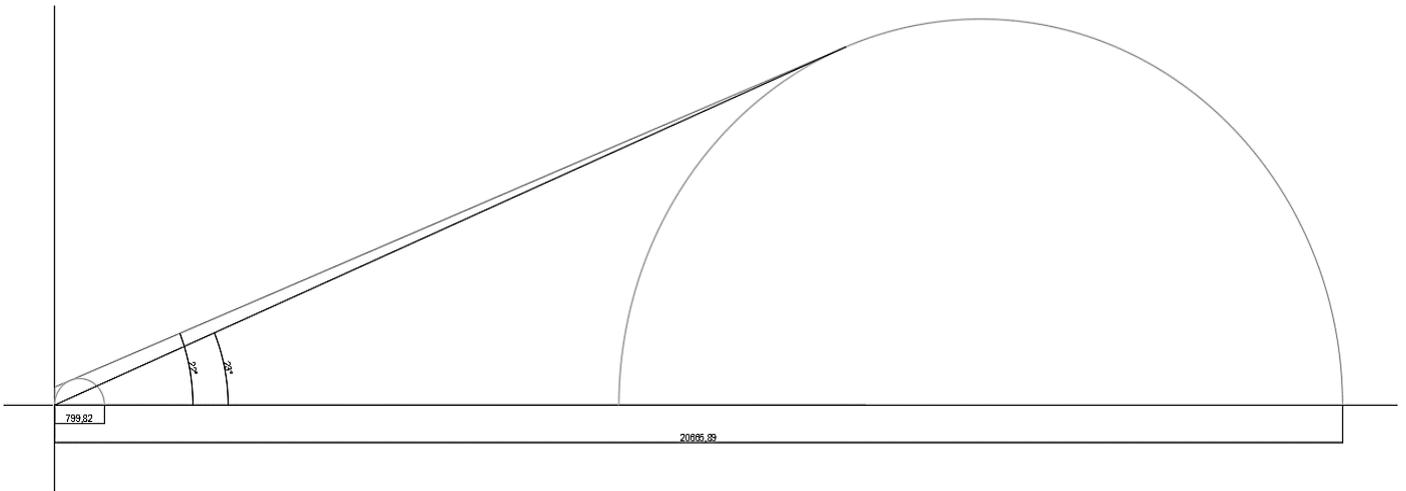
1.3.1. Família 5



1.3.2. Família 7

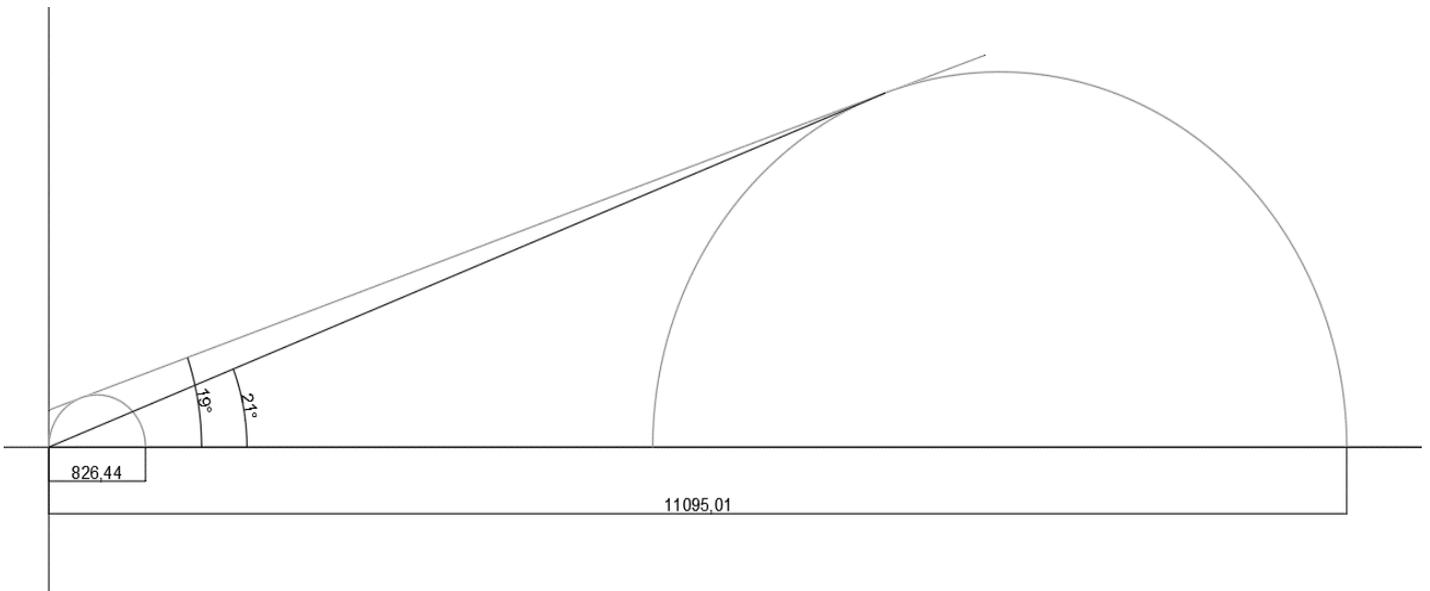


1.3.3 Família 10

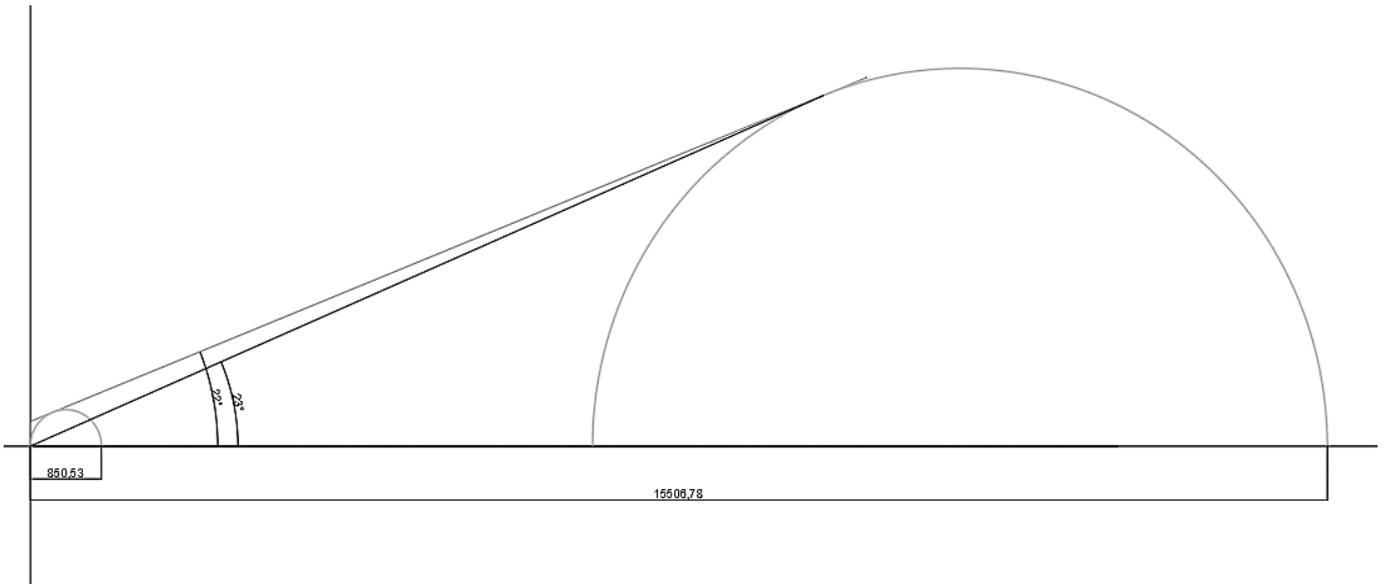


1.4. Repetição 4

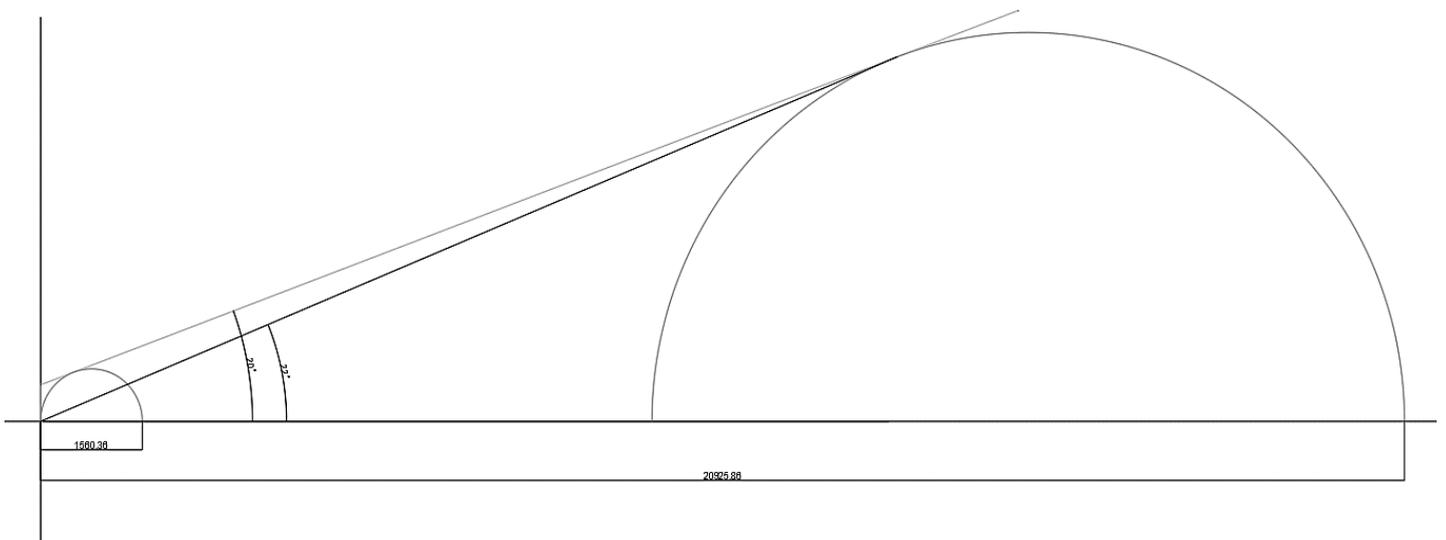
1.4.1. Família 5



1.4.2. Família 7

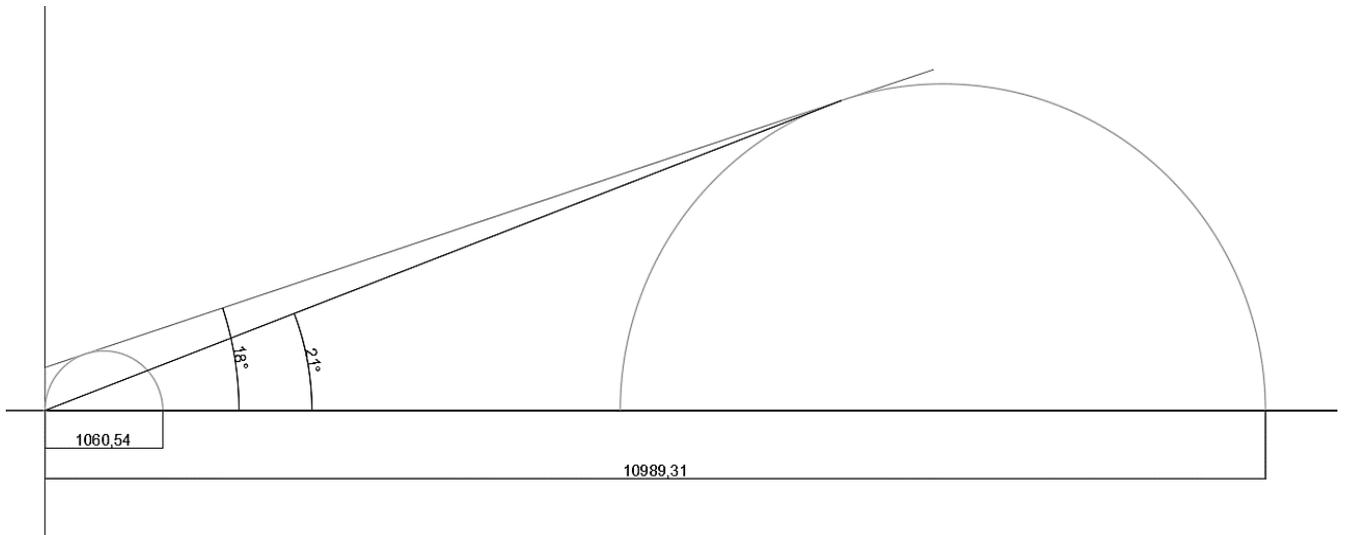


1.4.3 Família 10

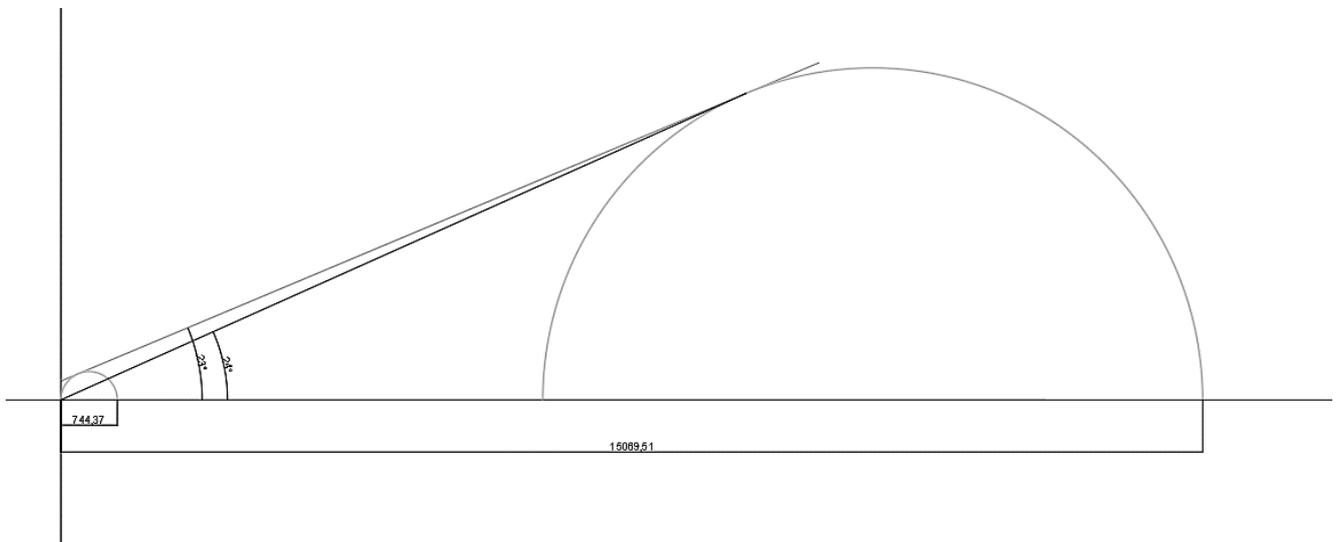


1.5. Repetição 5

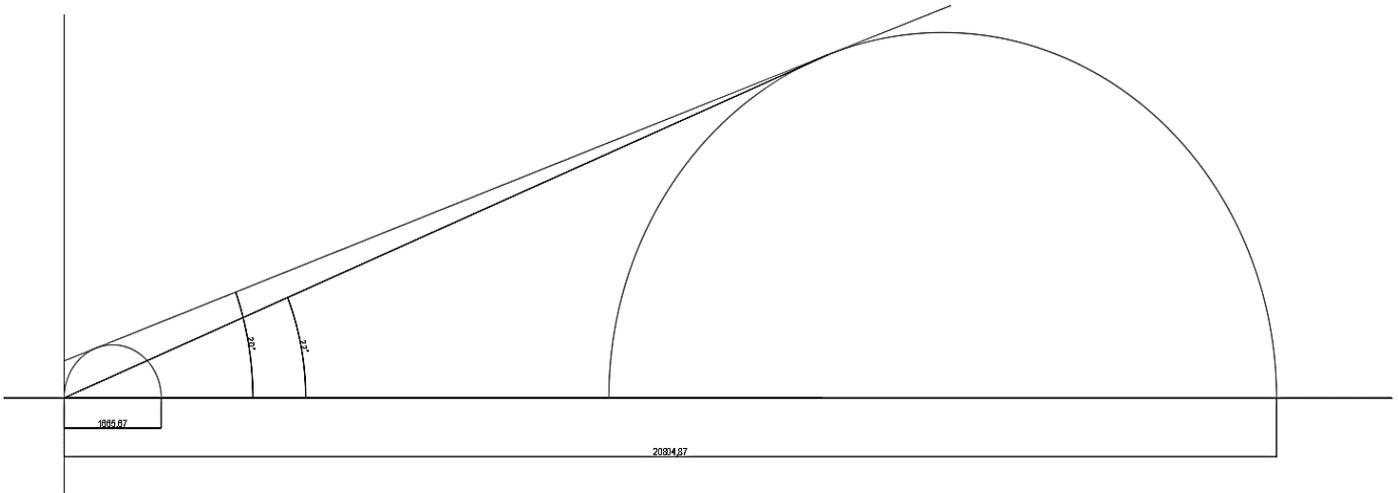
1.5.1. Família 5



1.5.2. Família 7



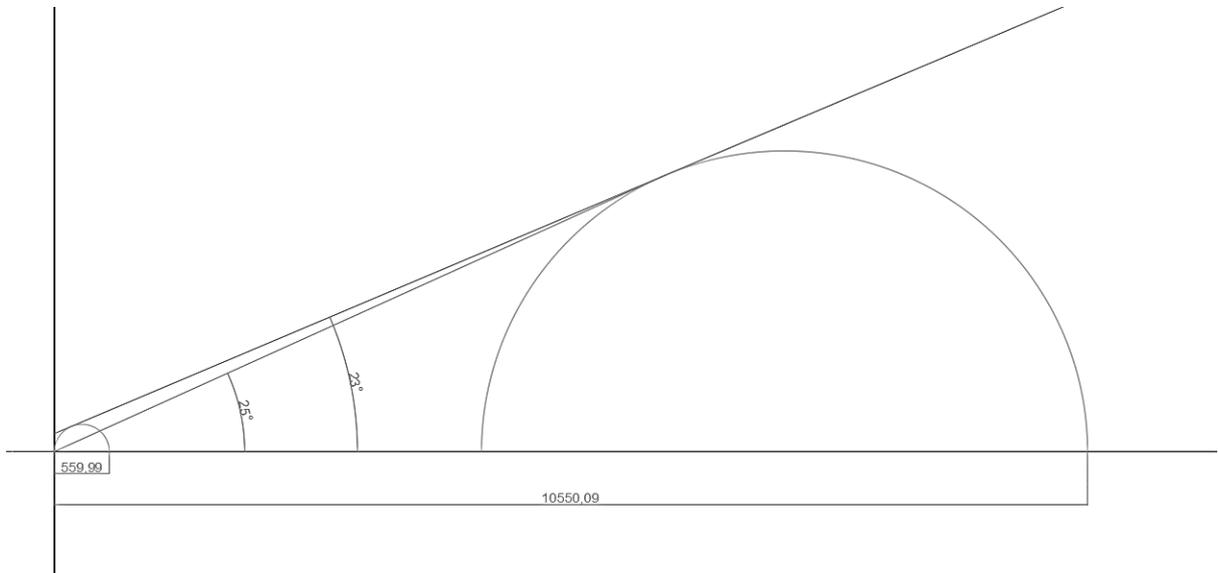
1.5.3 Família 10



2. Umidade de 13 %

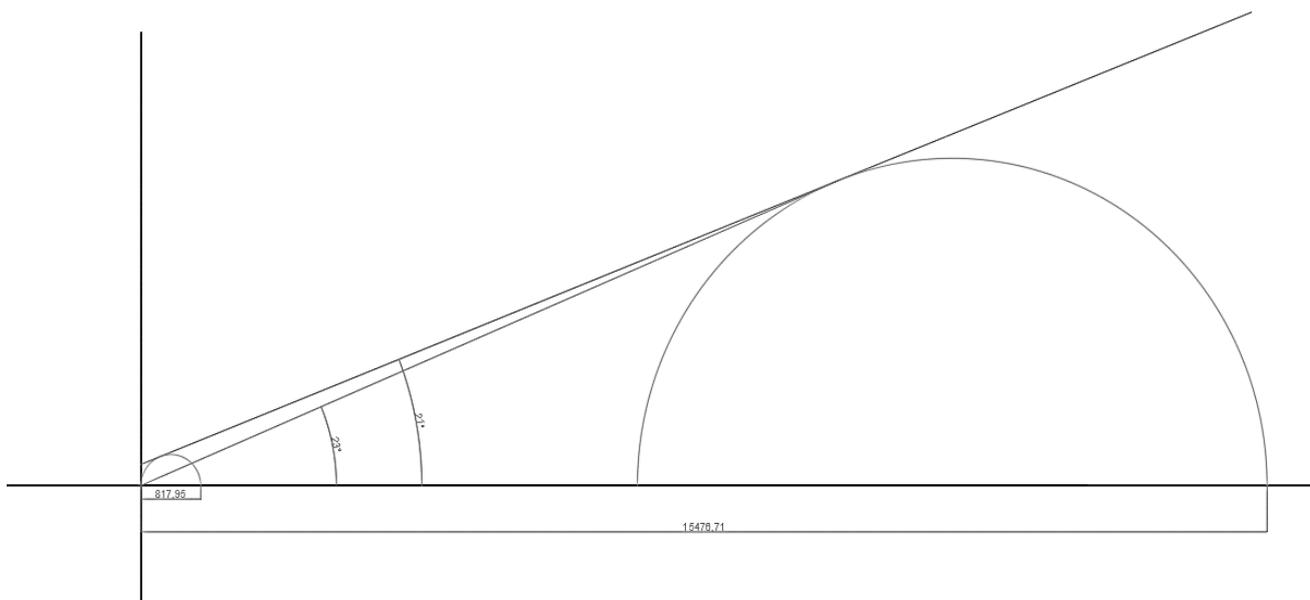
2.1. Repetição 1

2.1.1. Família 5

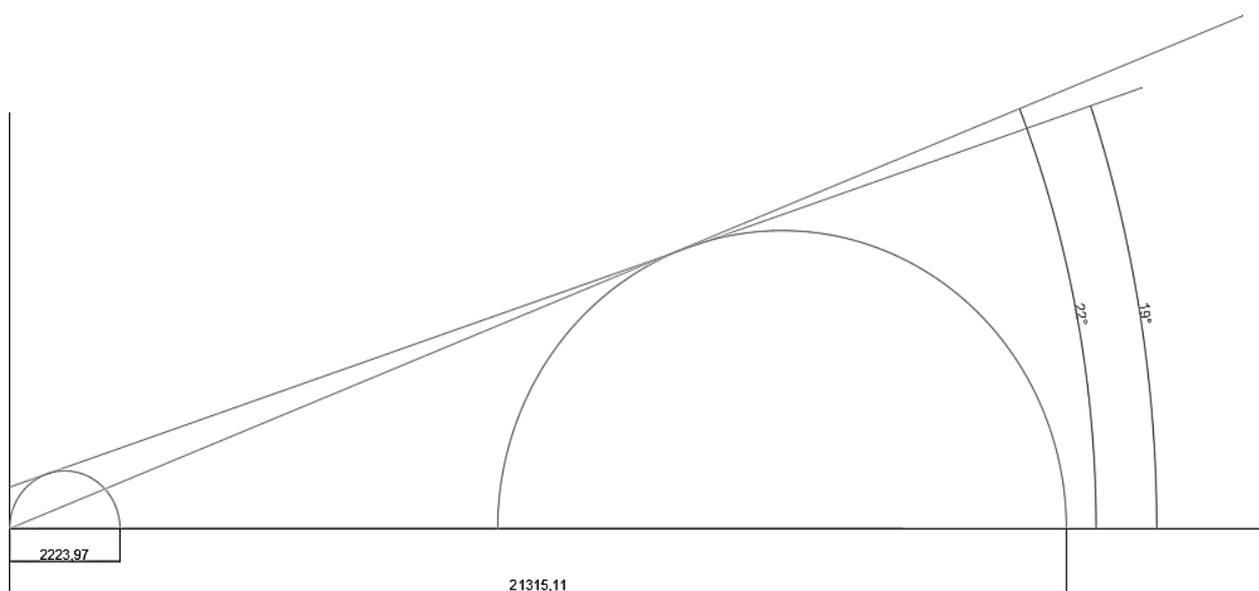


,

2.1.2. Família 7

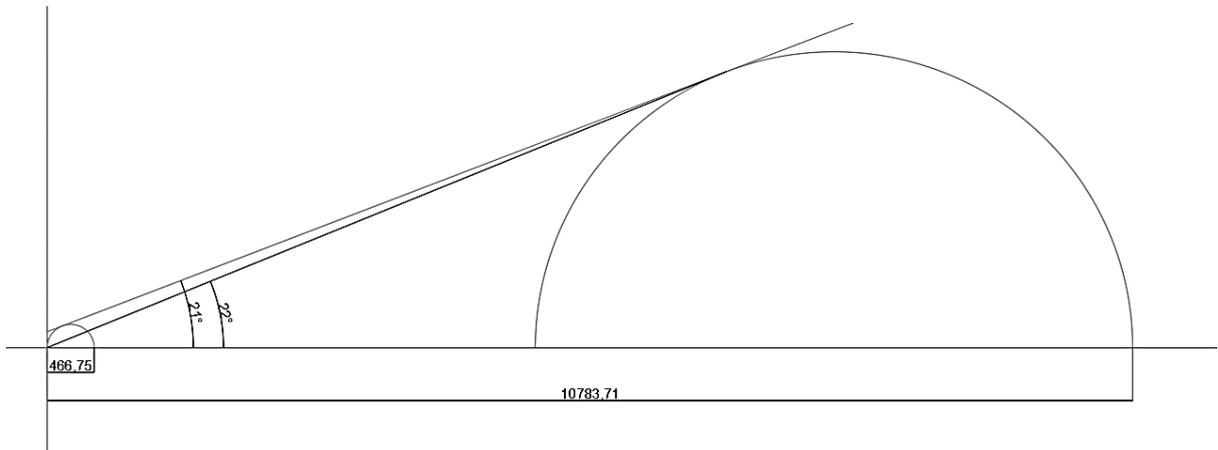


2.1.3 Família 10

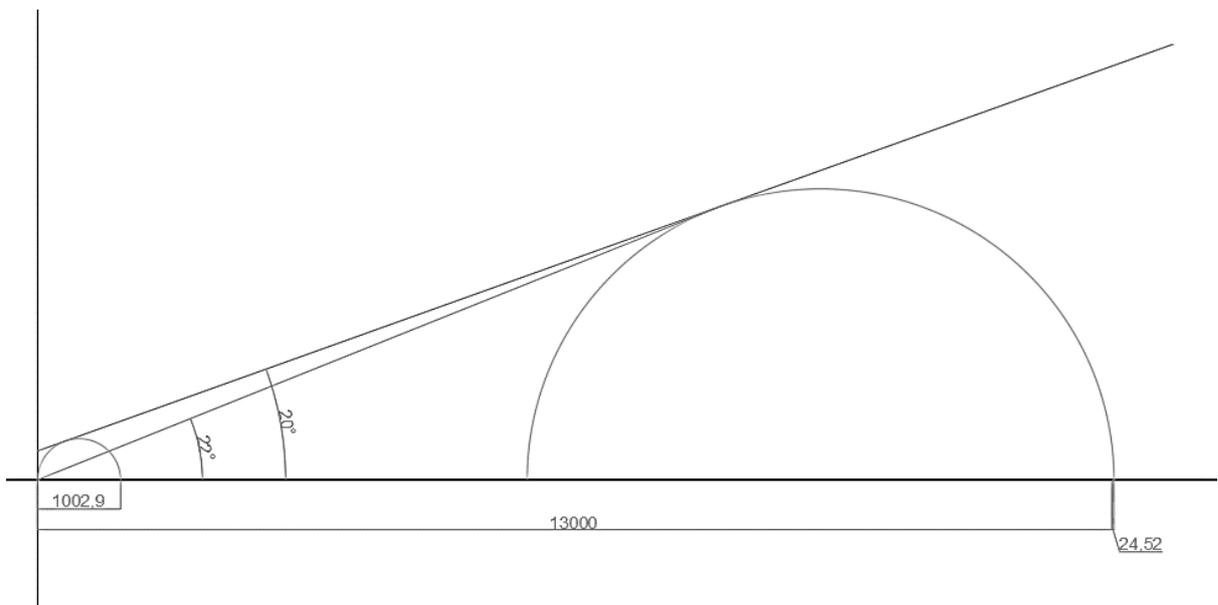


2.2. Repetição 2

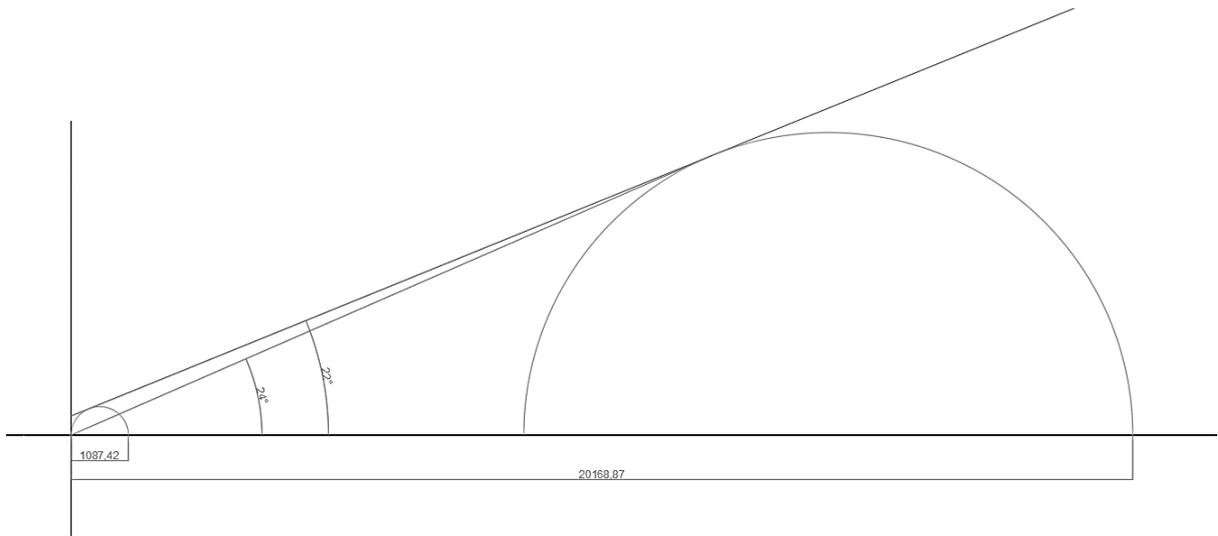
2.2.1. Família 5



2.2.2. Família 7

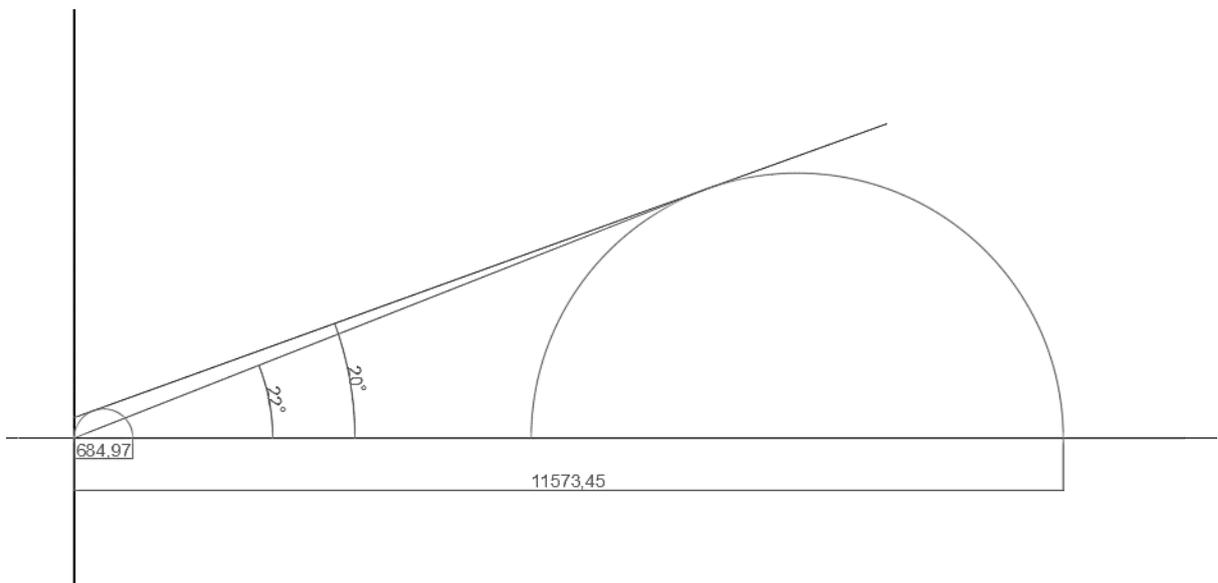


2.2.3 Família 10

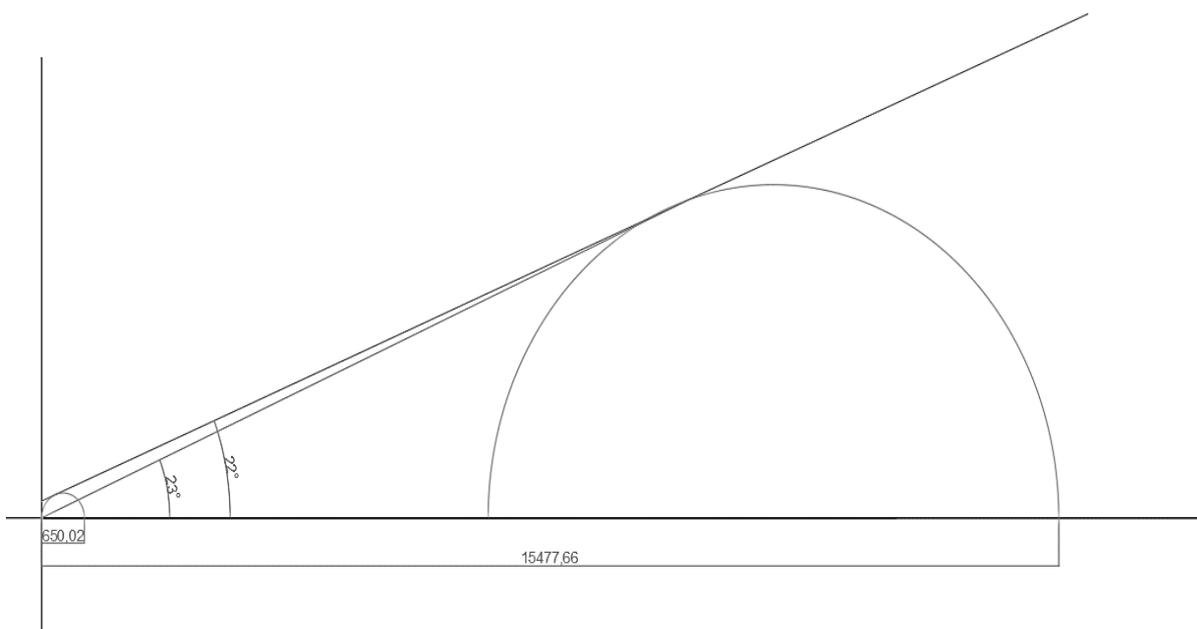


2.3. Repetição 3

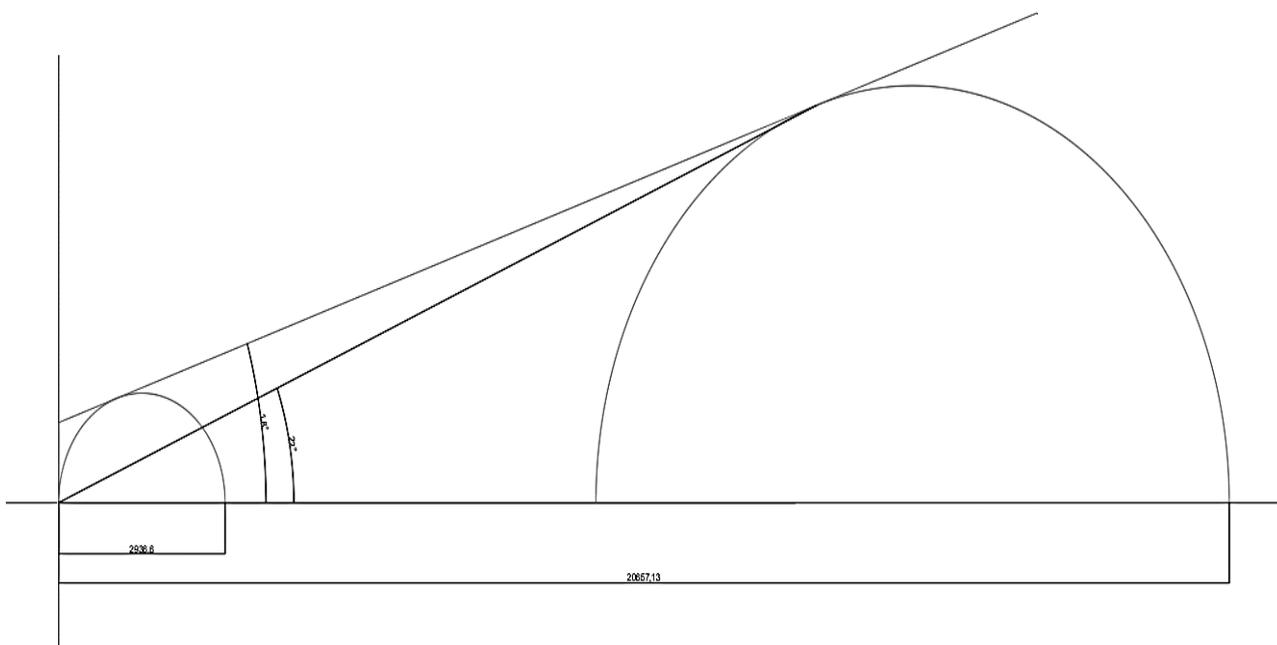
2.3.1. Família 5



2.3.2. Família 7

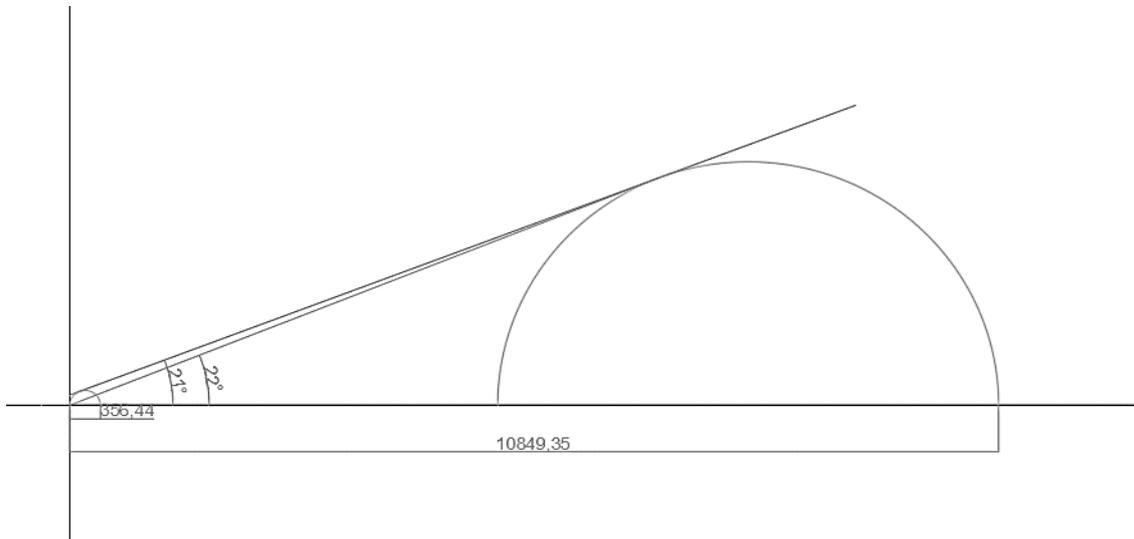


2.3.3 Família 10

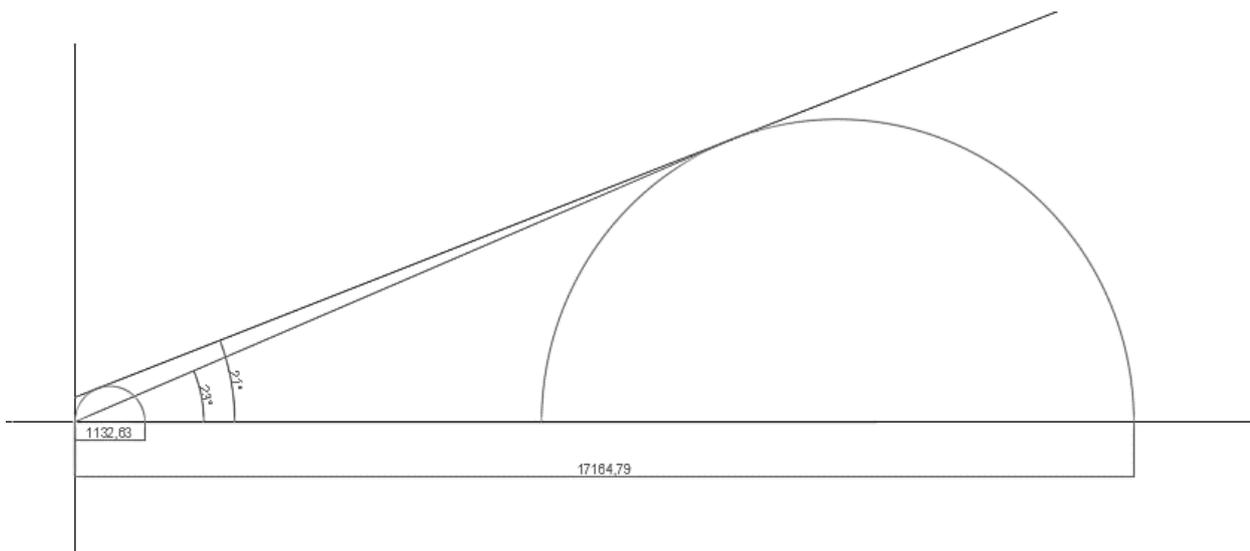


2.4. Repetição 4

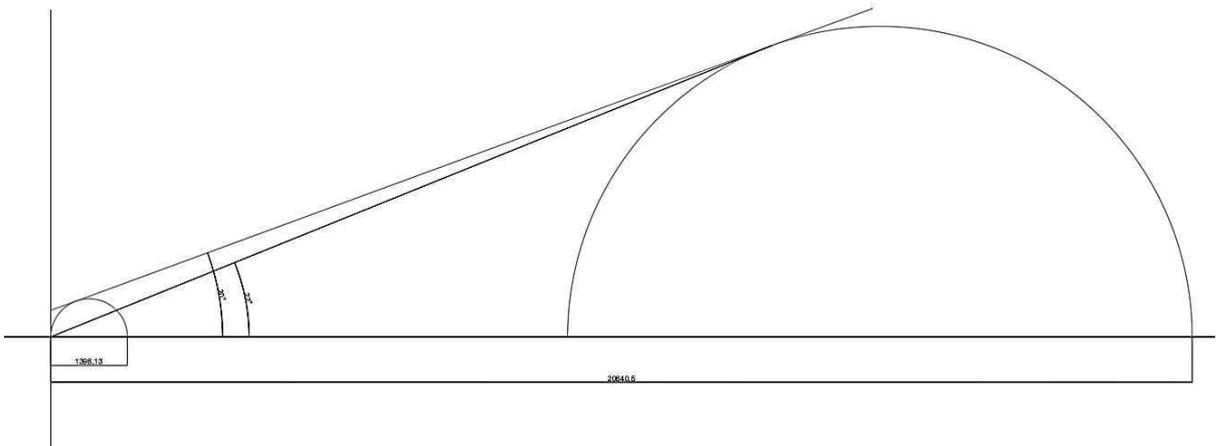
2.4.1. Família 5



2.4.2. Família 7

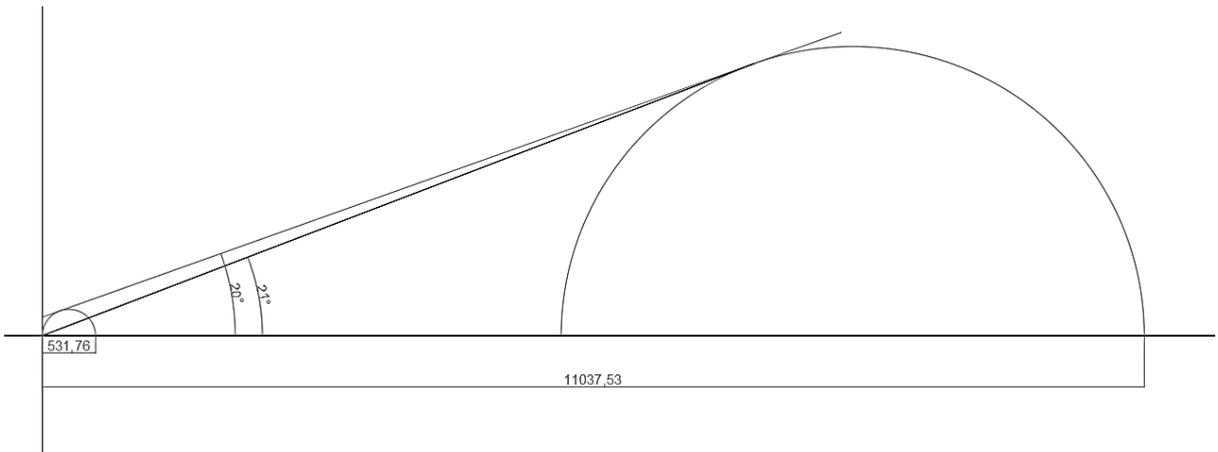


2.4.3. Família 10

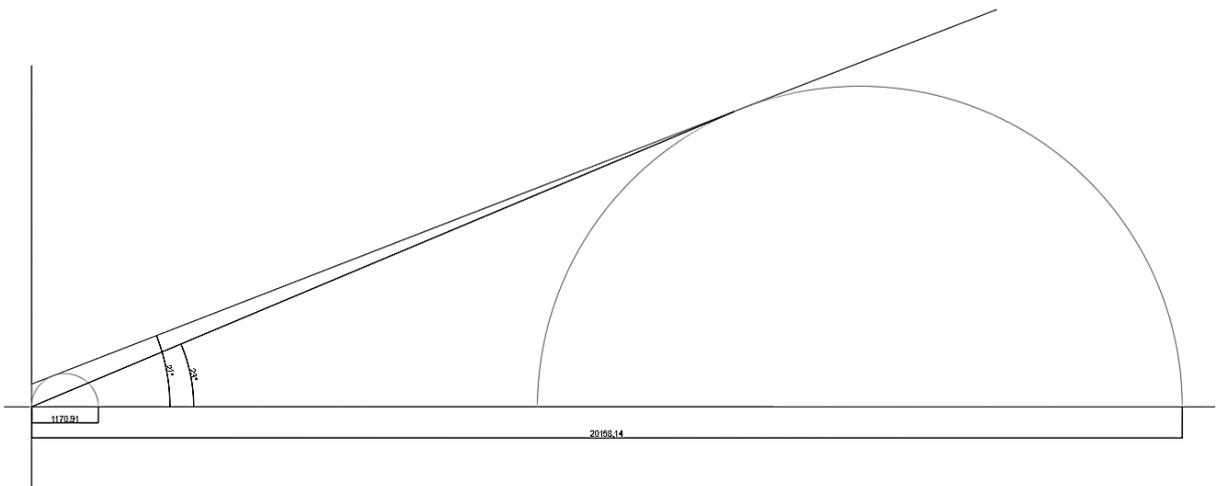


2.5. Repetição 5

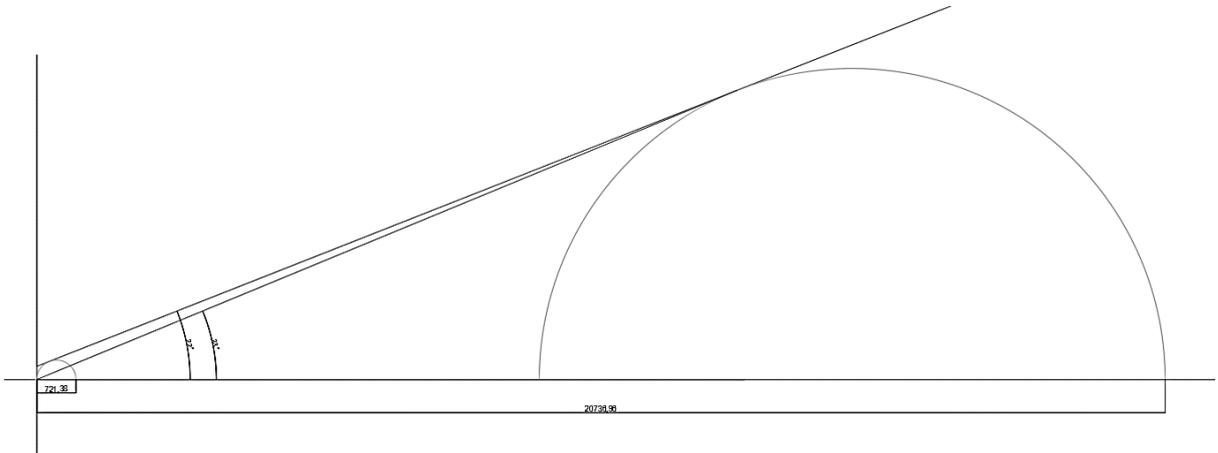
2.5.1. Família 5



2.5.2. Família 7



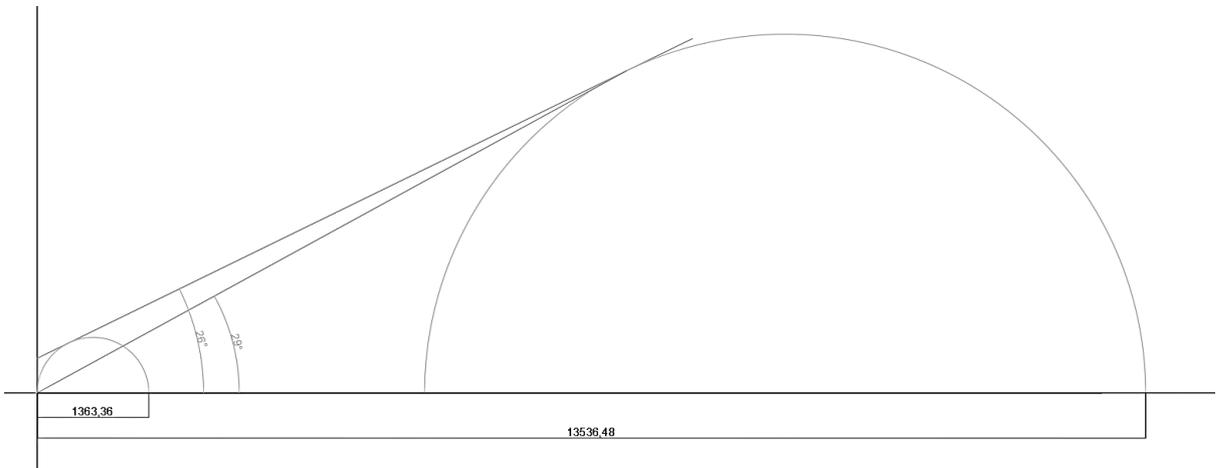
2.5.3. Família 10



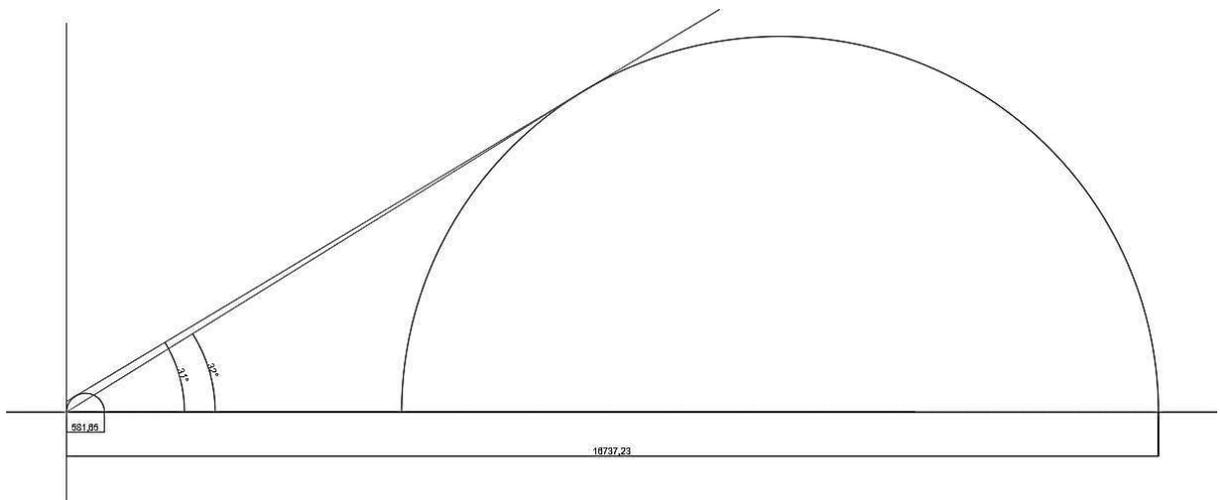
3. Umidade de 18 %

3.1. Repetição 1

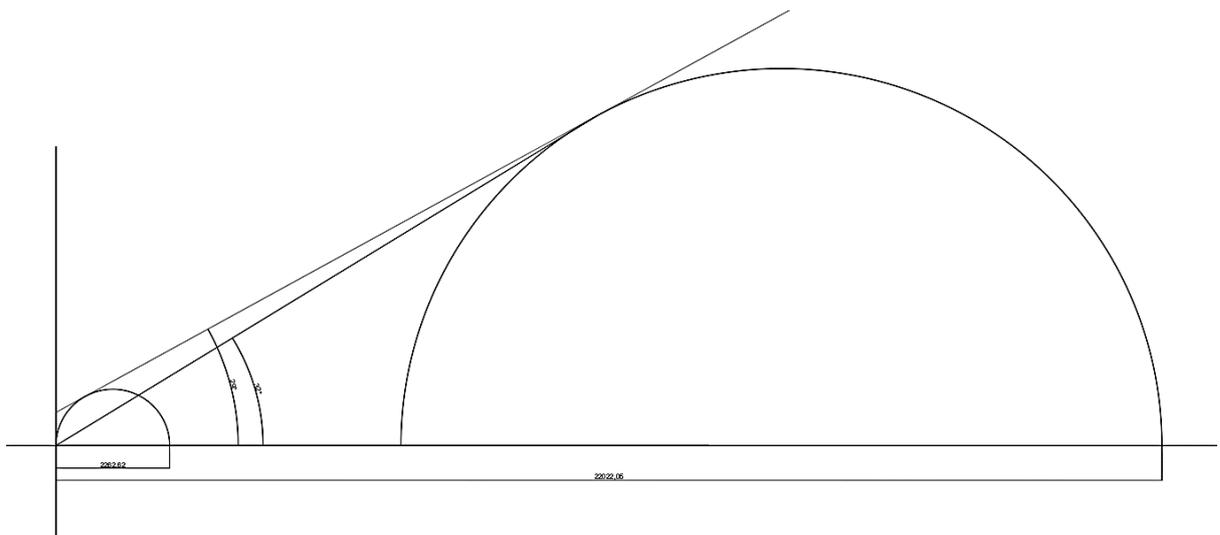
3.1.1. Família 5



3.1.2. Família 7

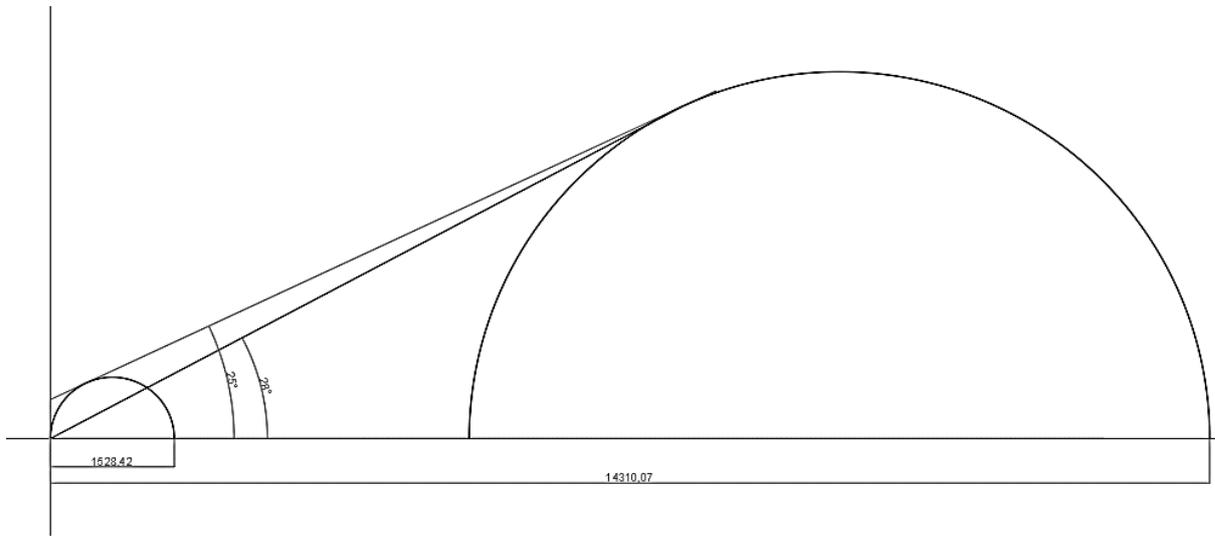


3.1.3 Família 10

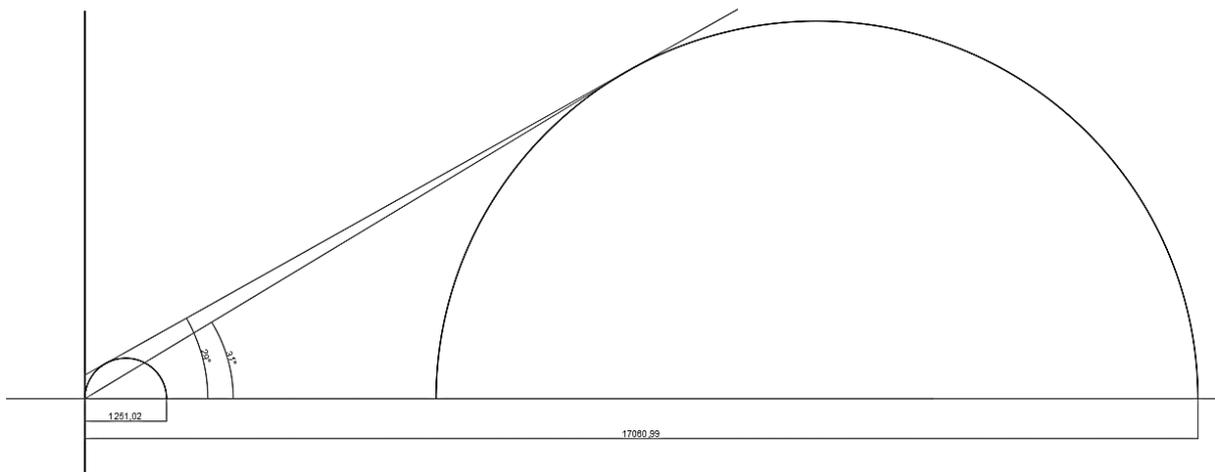


3.2. Repetição 2

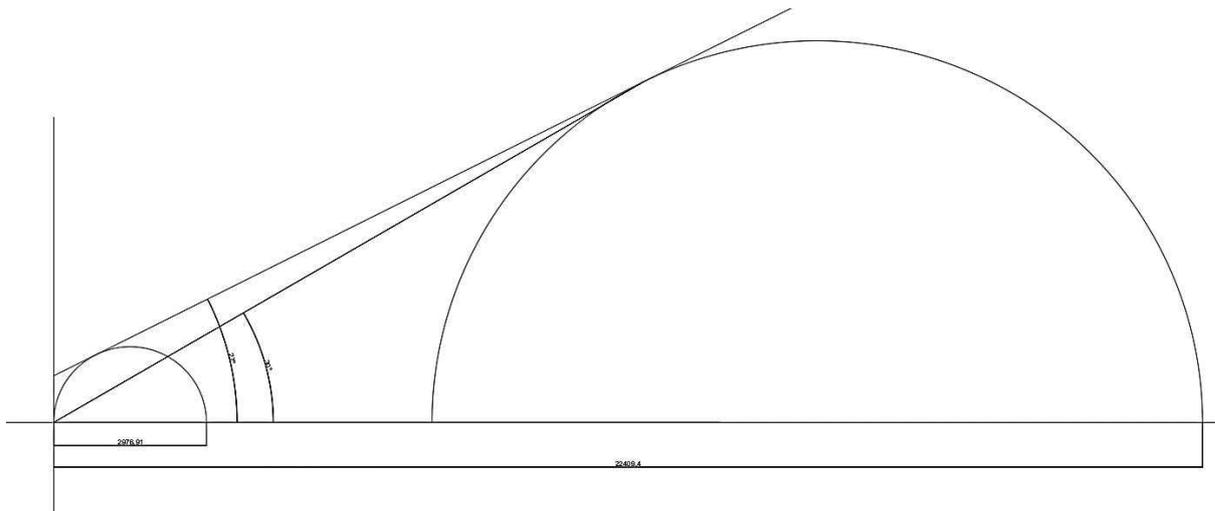
3.2.1. Família 5



3.2.2. Família 7

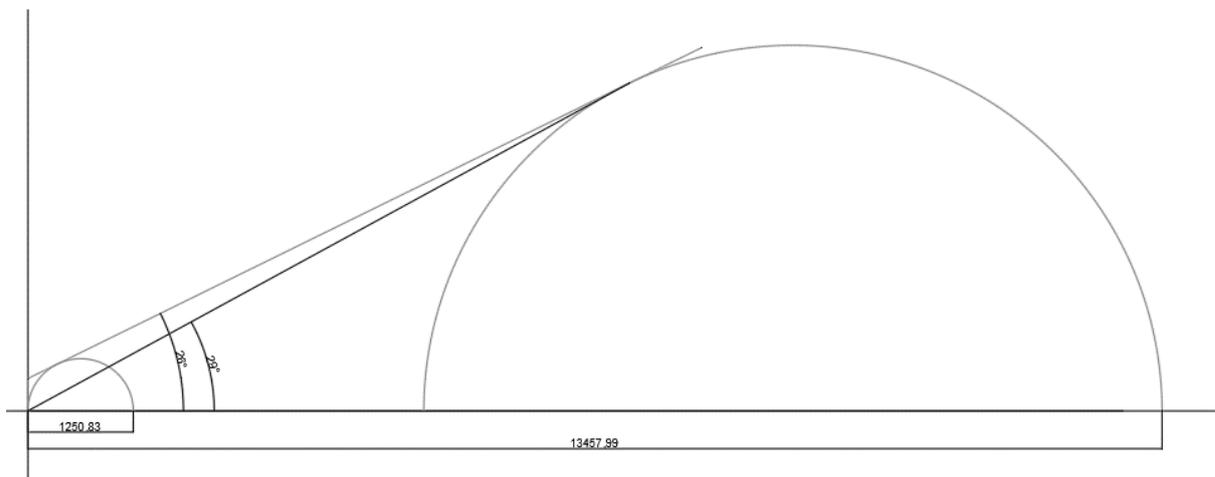


3.2.3 Família 10

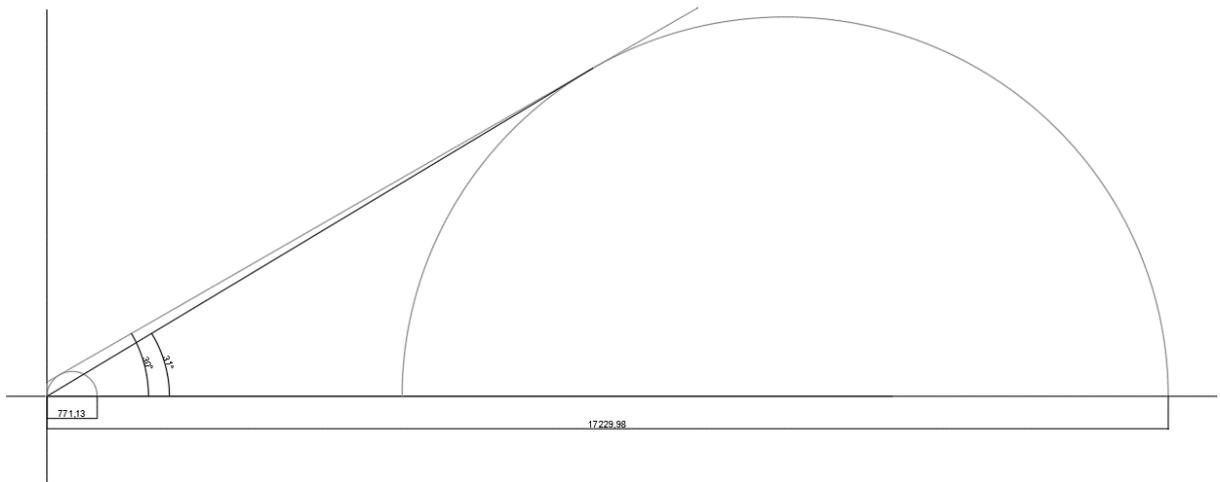


3.3. Repetição 3

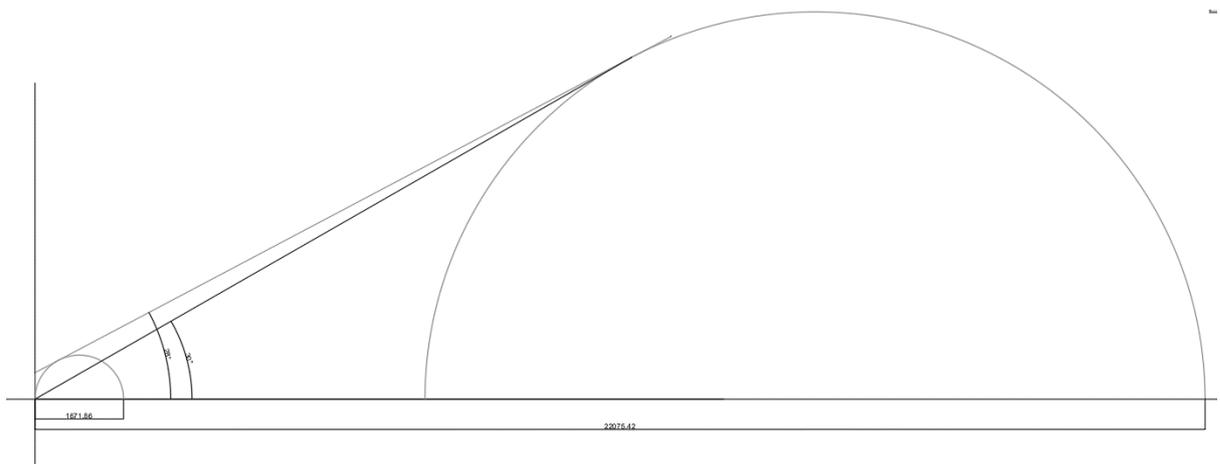
3.3.1. Família 5



3.3.2. Família 7

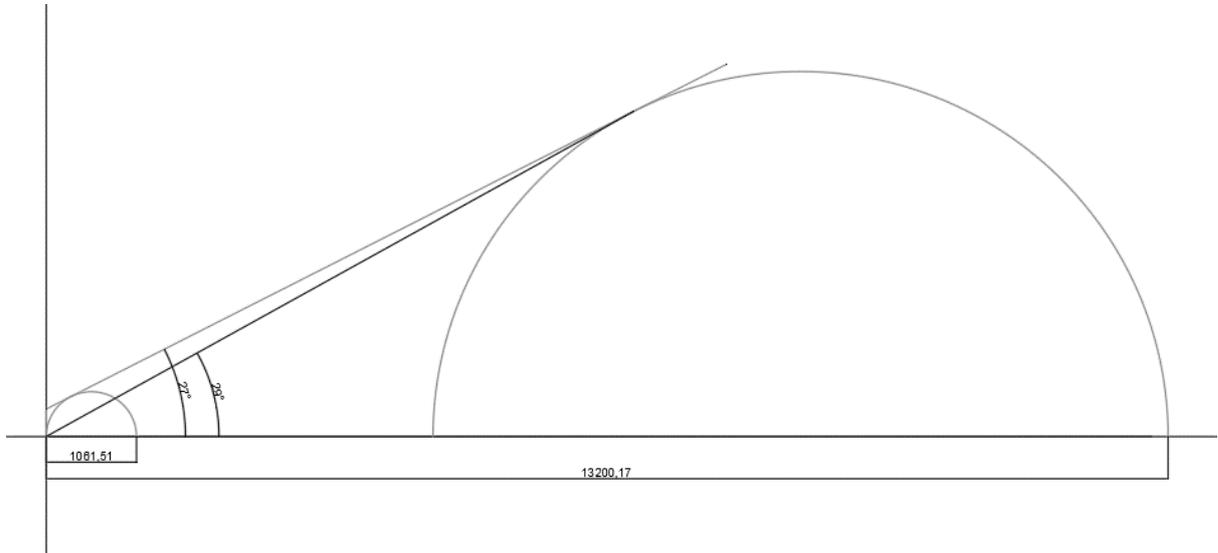


3.3.3 Família 10

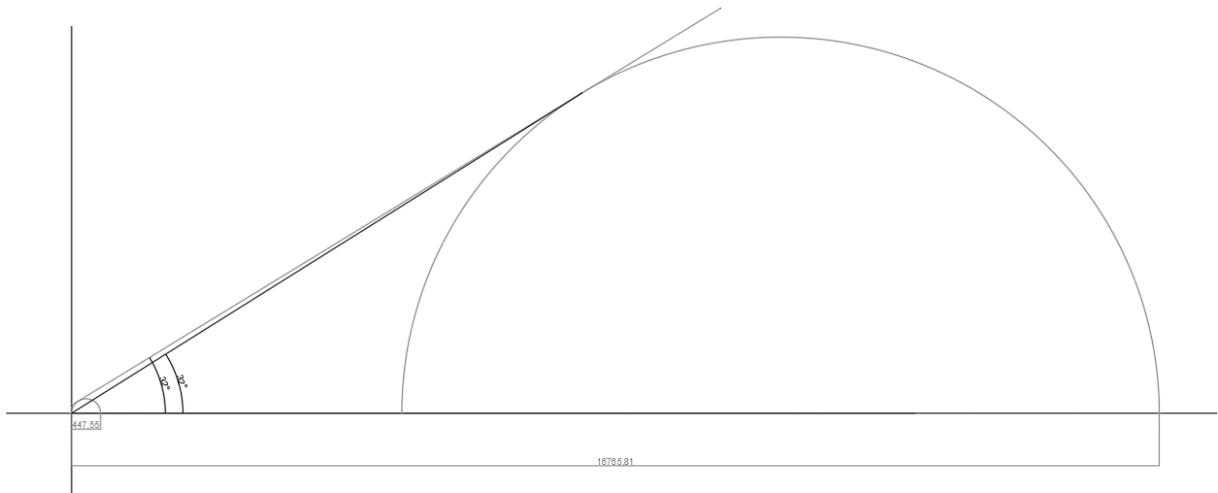


3.4. Repetição 4

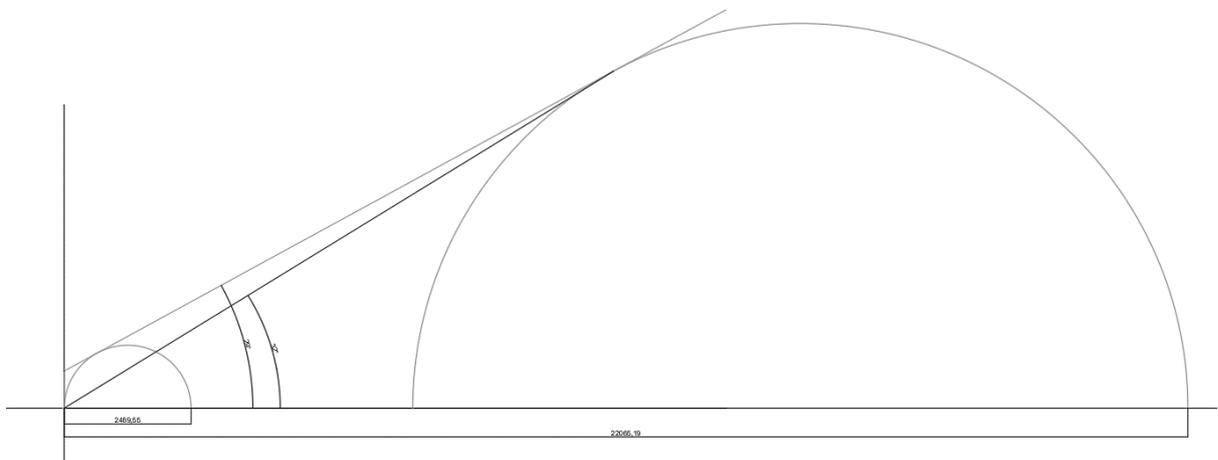
3.4.1. Família 5



3.4.2. Família 7

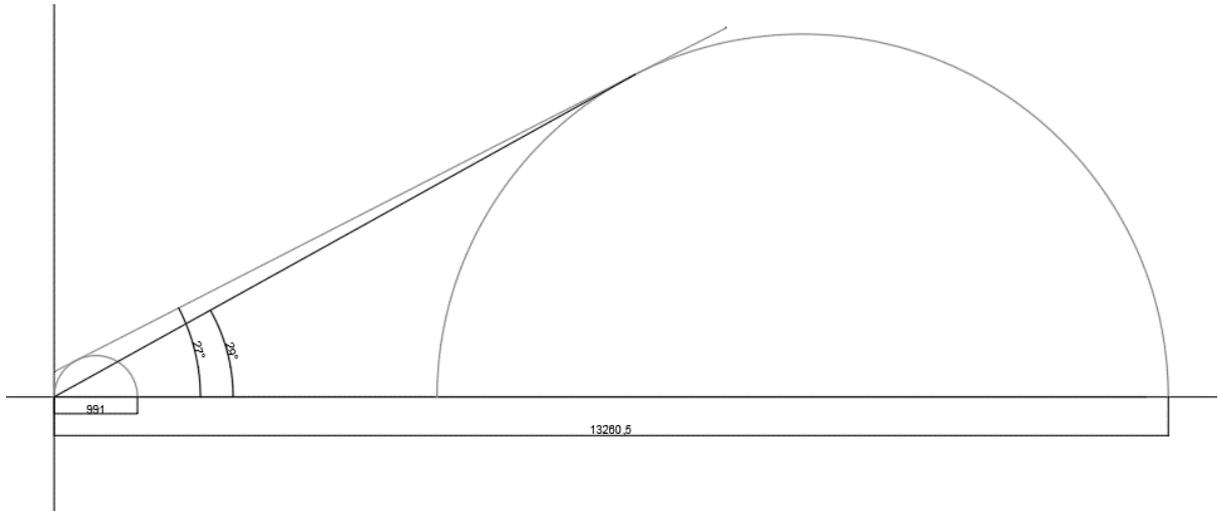


3.4.3. Família 10

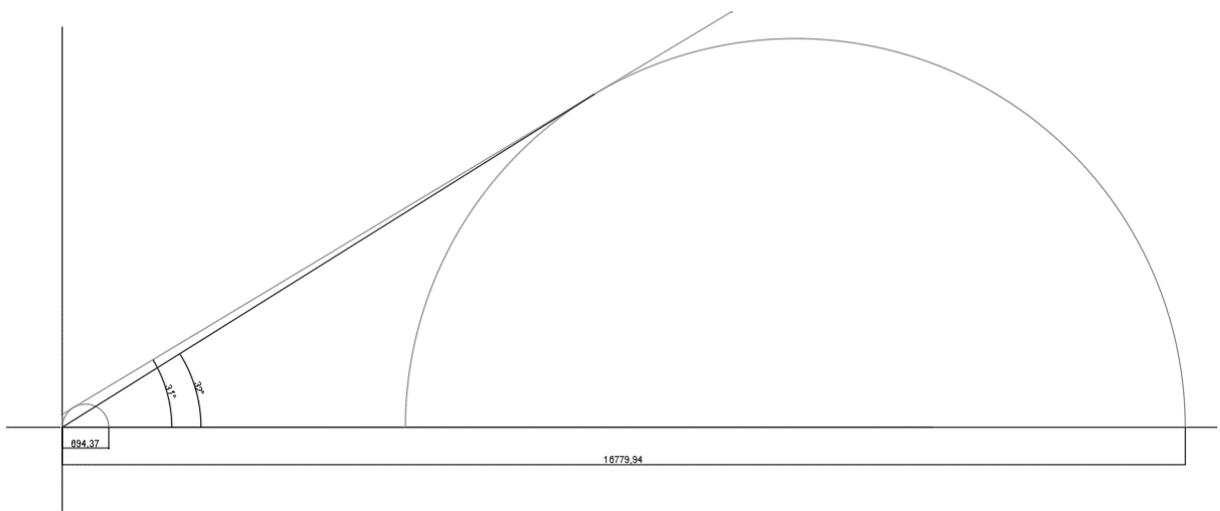


3.5. Repetição 5

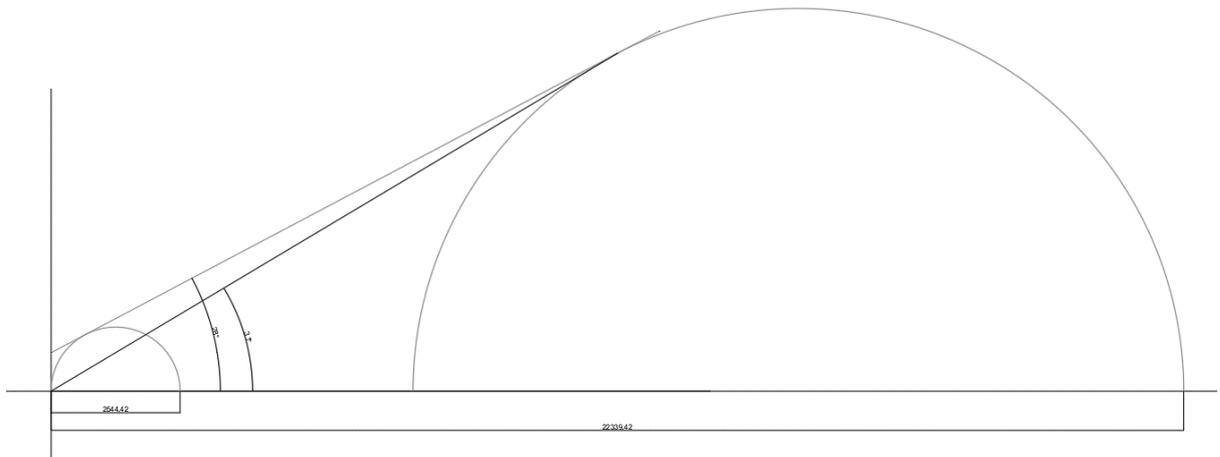
3.5.1. Família 5



3.5.2. Família 7



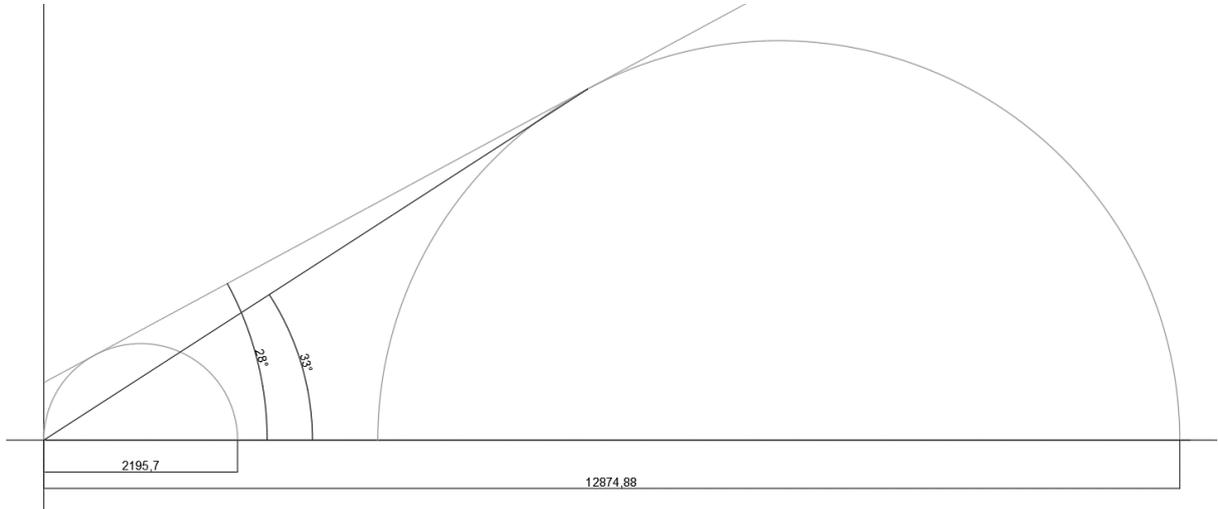
3.5.3. Família 10



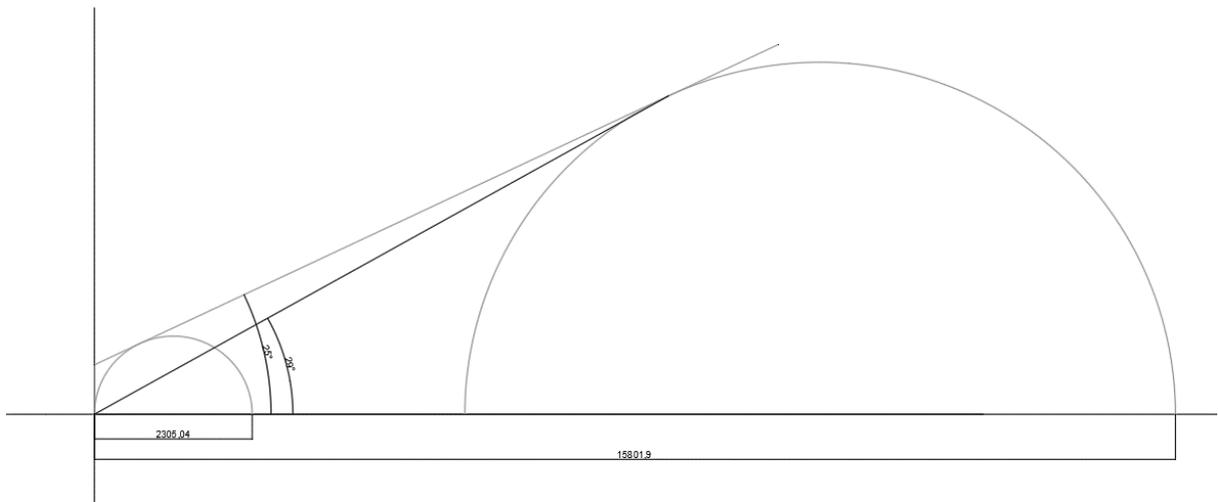
4. Umidade de 22 %

4.1. Repetição 1

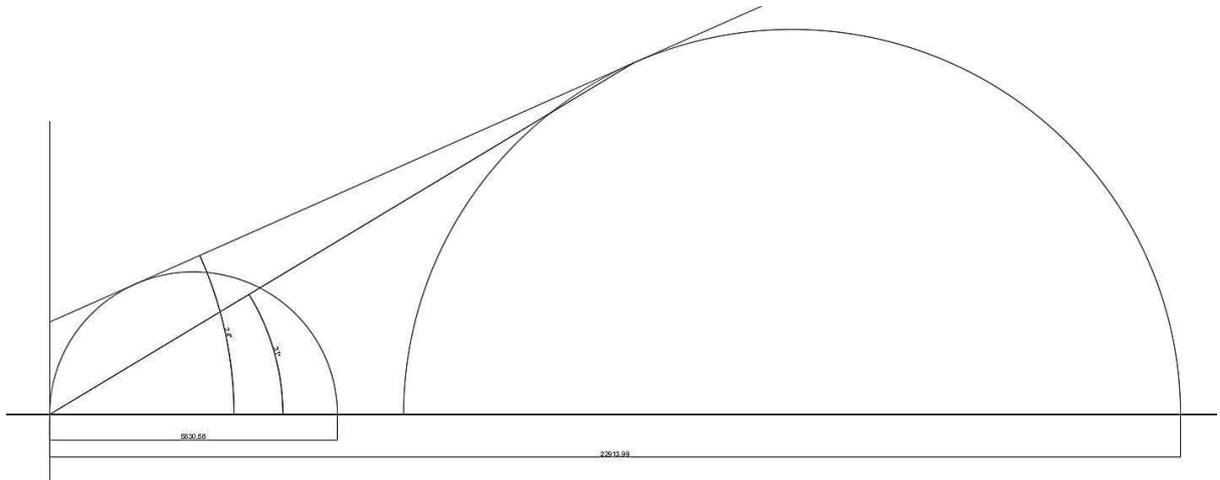
4.1.1. Família 5



4.1.2. Família 7

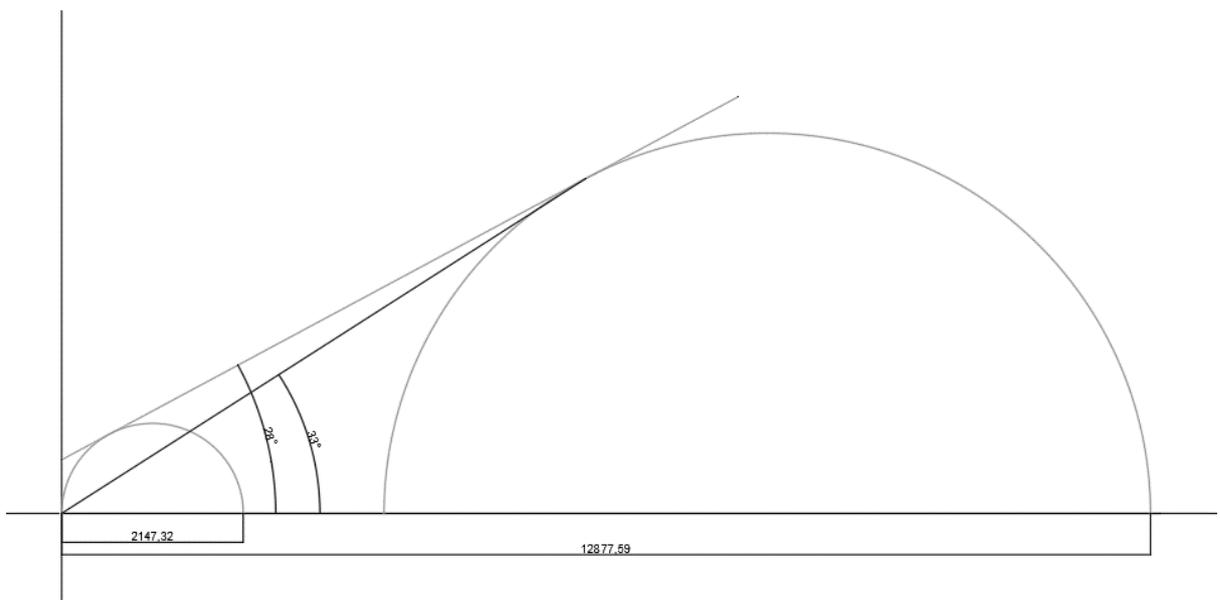


4.1.3 Família 10

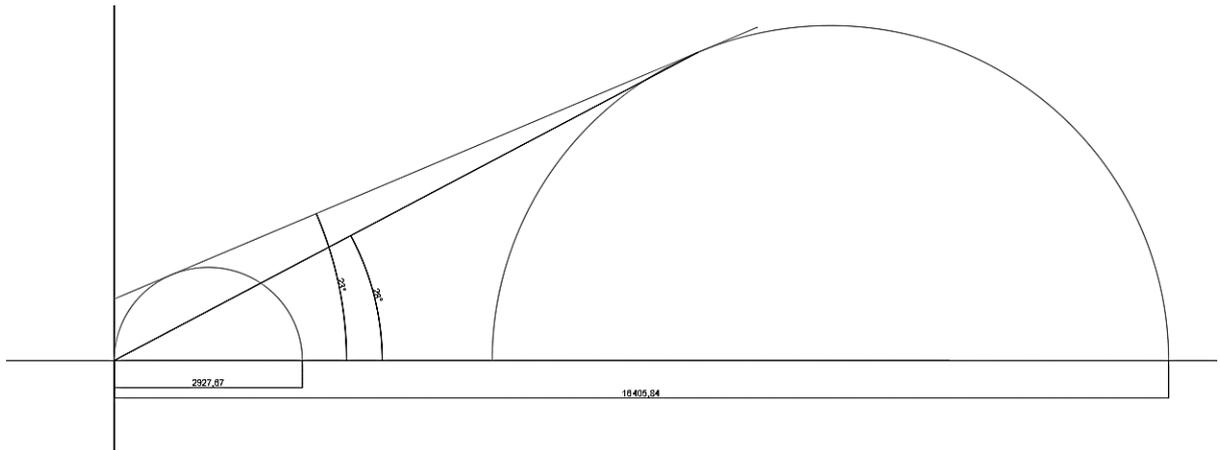


4.2. Repetição 2

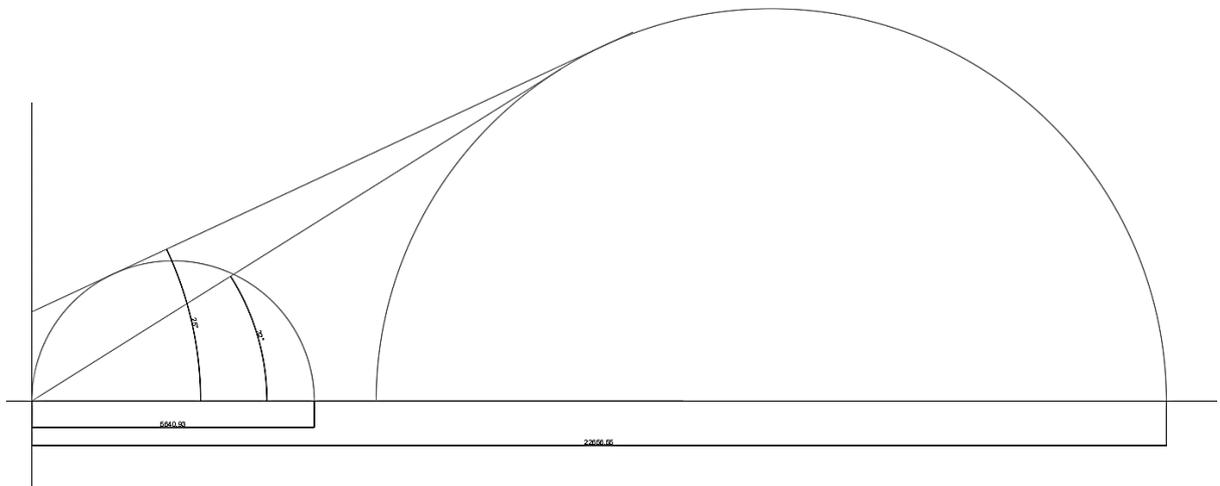
4.2.1. Família 5



4.2.2. Família 7

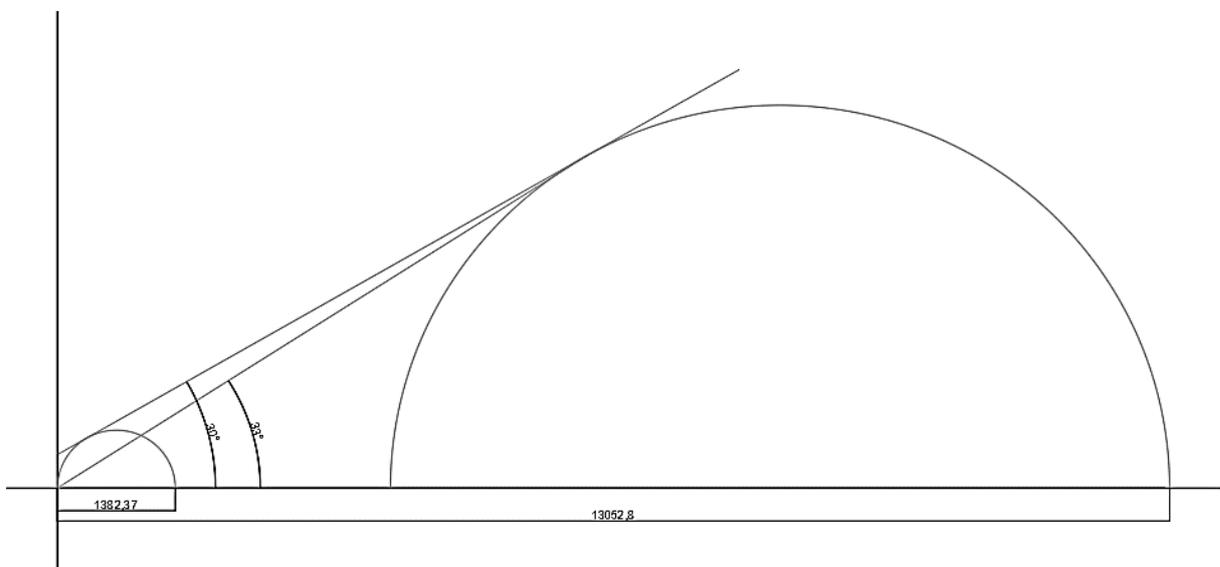


4.2.3 Família 10

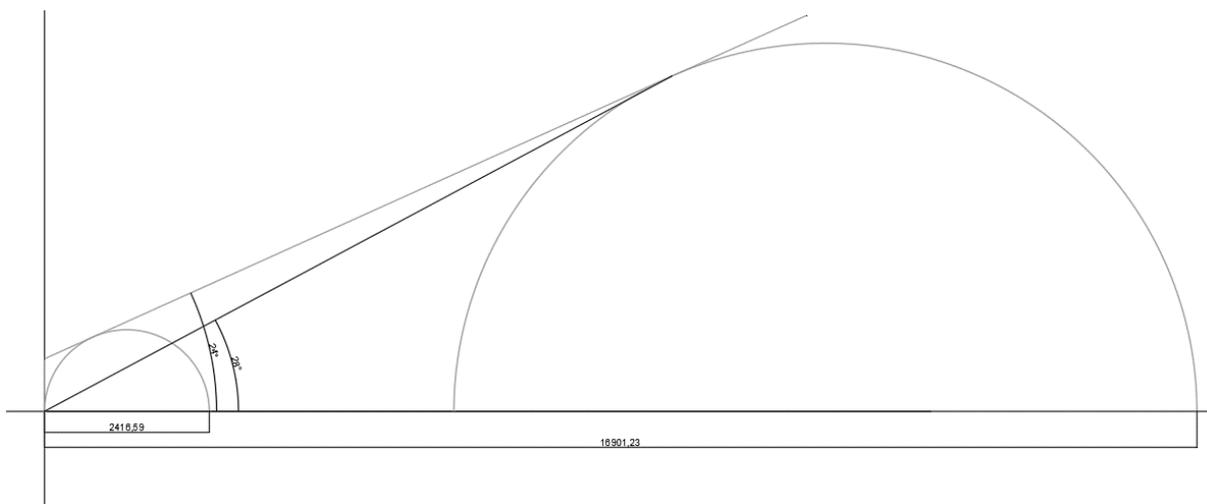


4.3. Repetição 3

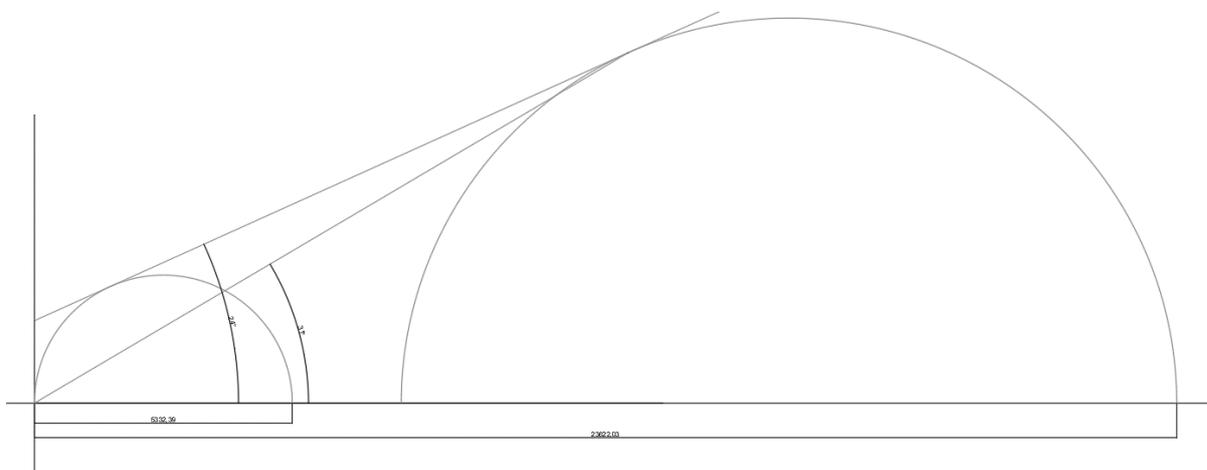
4.3.1. Família 5



4.3.2. Família 7

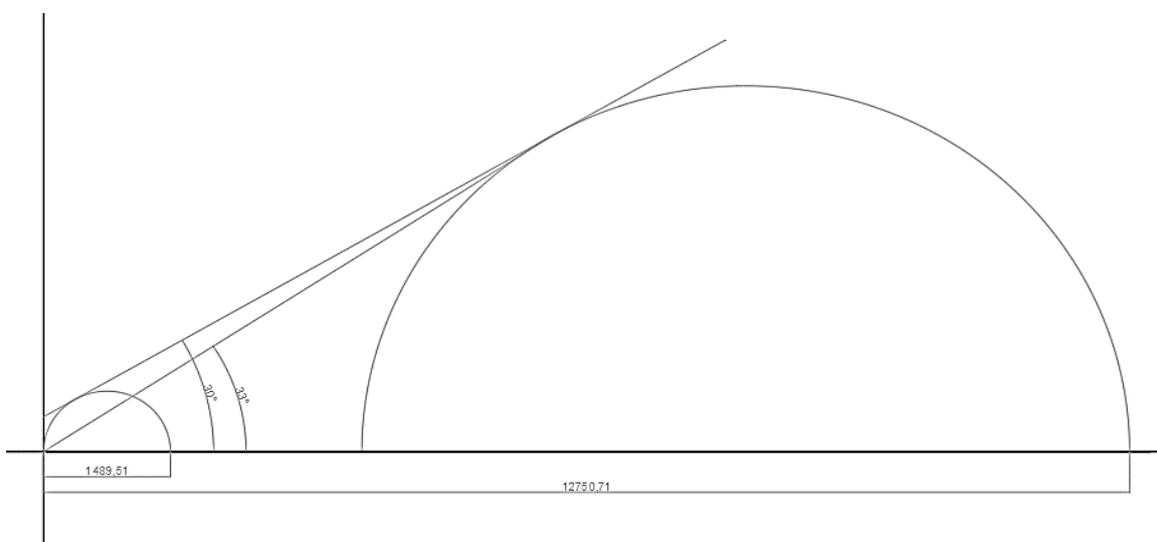


4.3.3 Família 10

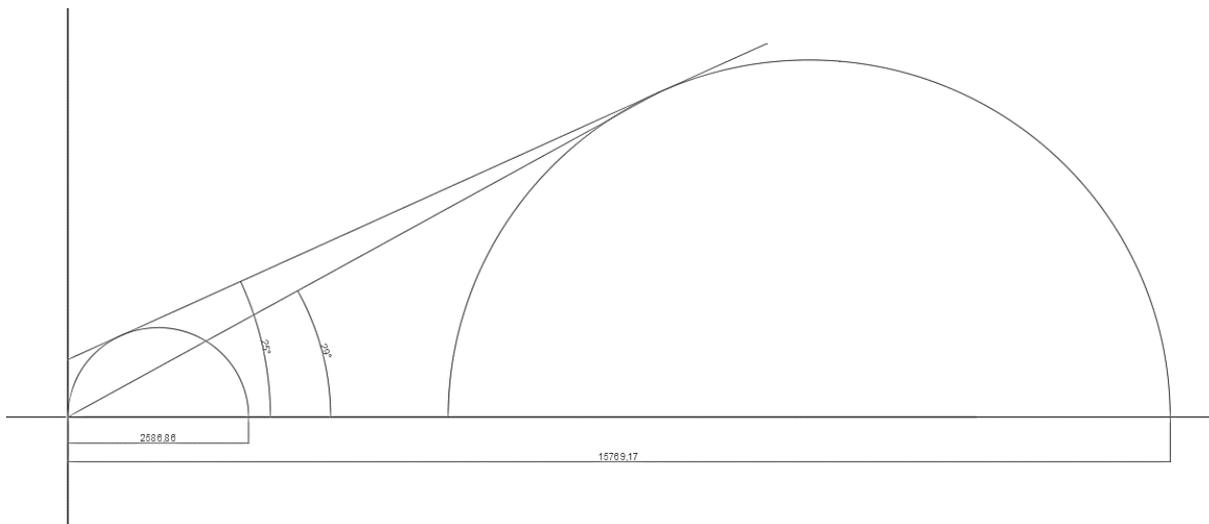


4.4. Repetição 4

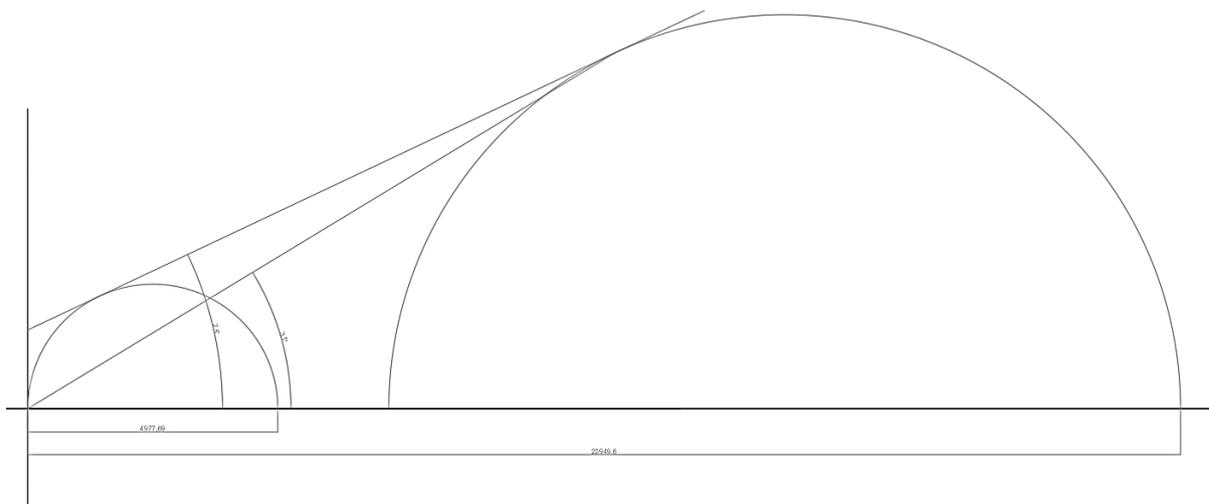
4.4.1. Família 5



4.4.2. Família 7

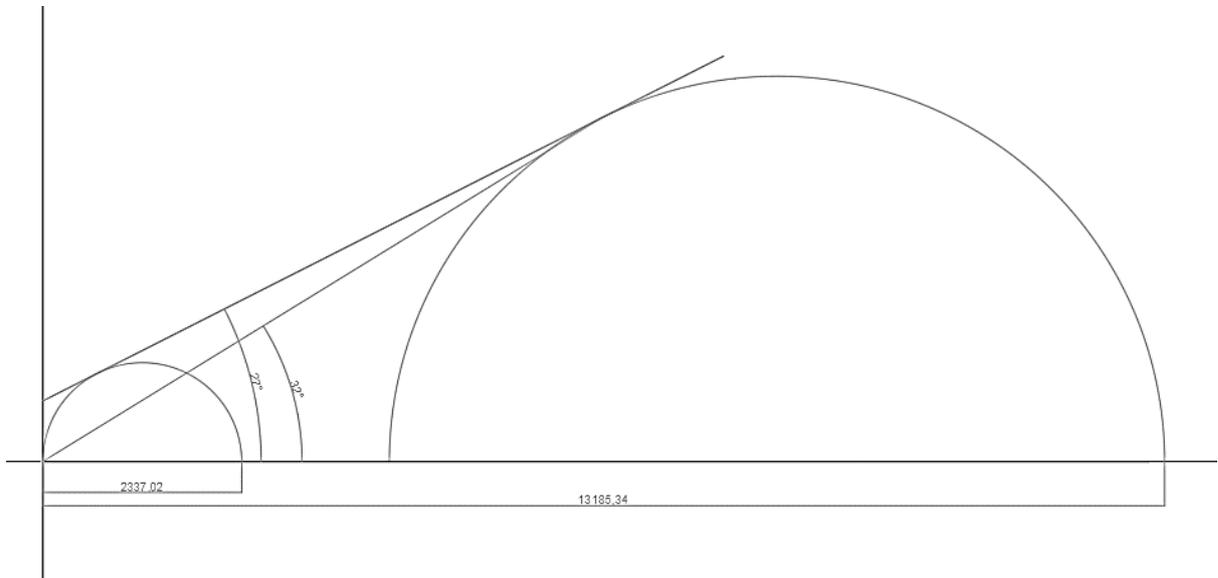


4.4.3. Família 10

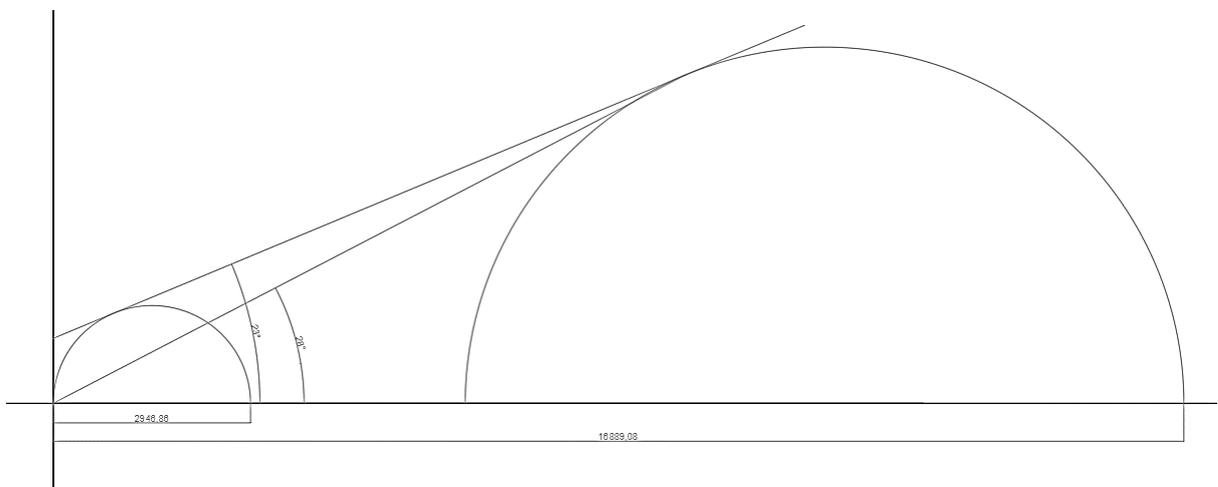


4.5. Repetição 5

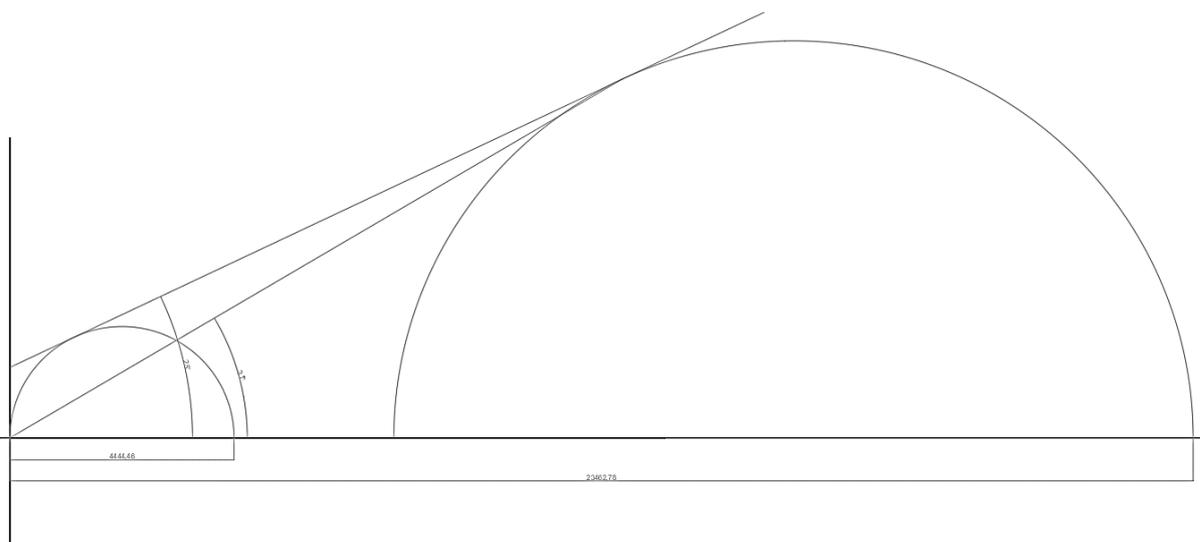
4.5.1. Família 5



4.5.2. Família 7



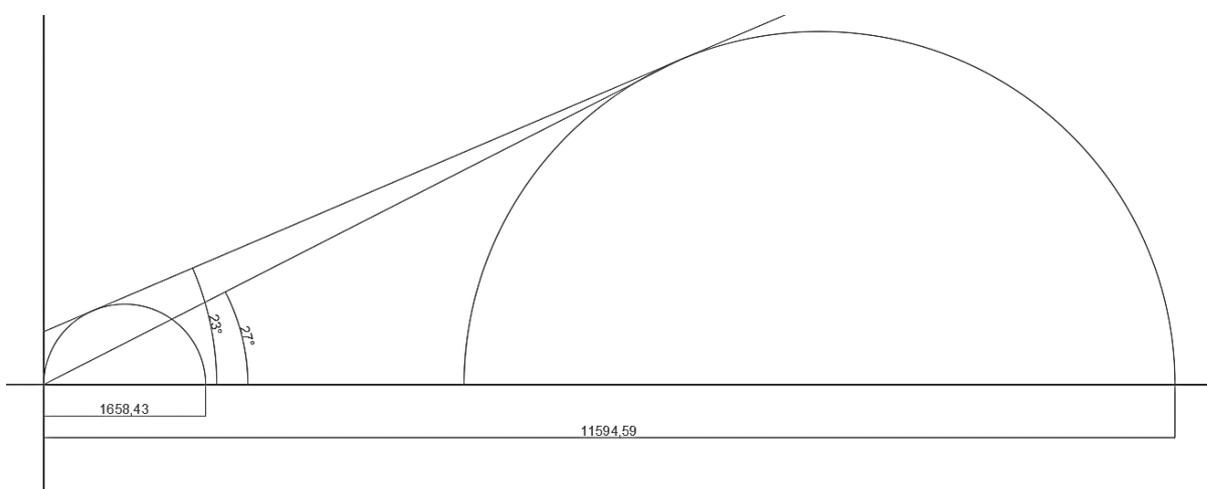
4.5.3. Família 10



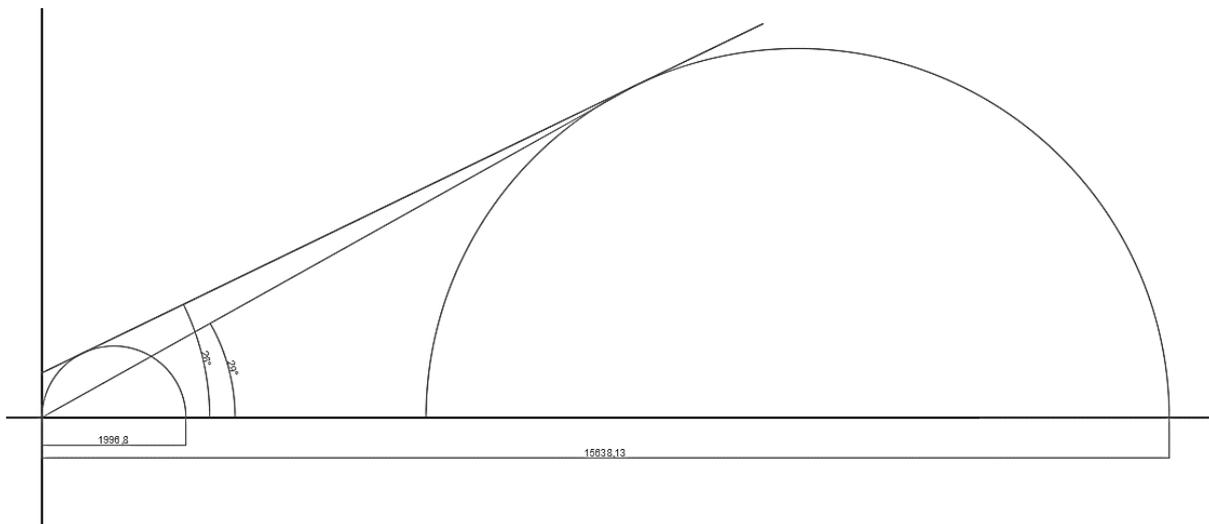
5. Umidade de 30 %

5.1. Repetição 1

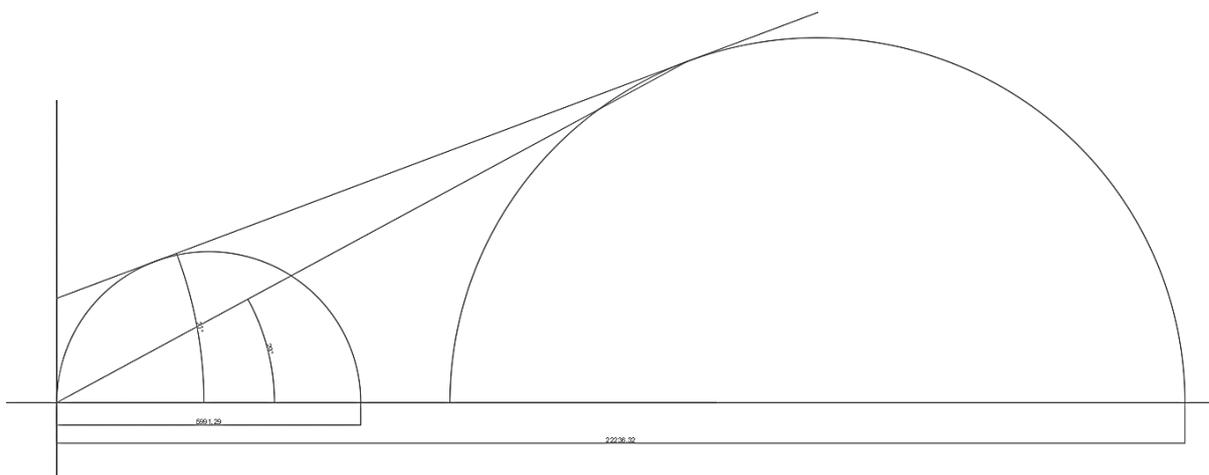
5.1.1. Família 5



5.1.2. Família 7

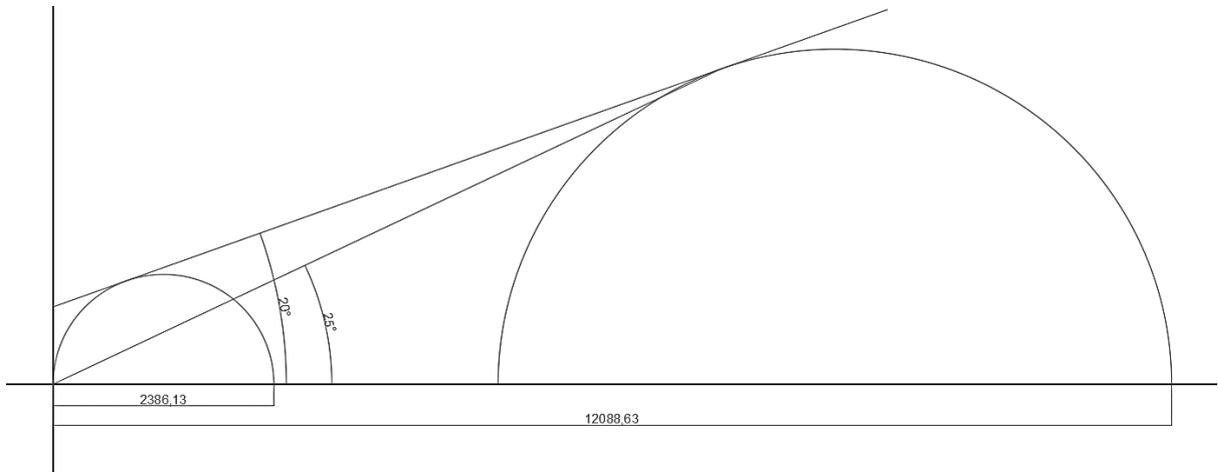


5.1.3 Família 10

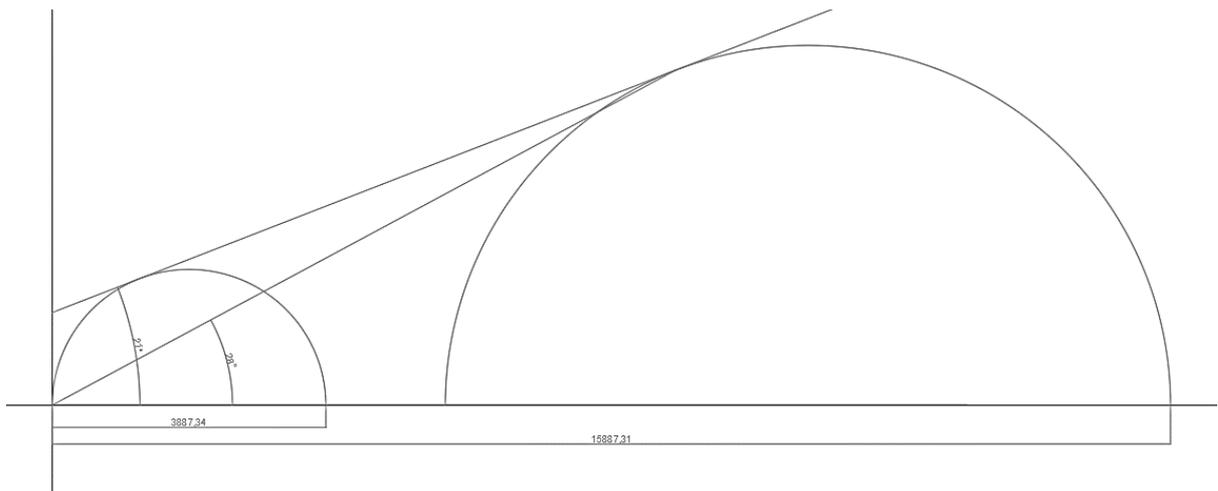


5.2. Repetição 2

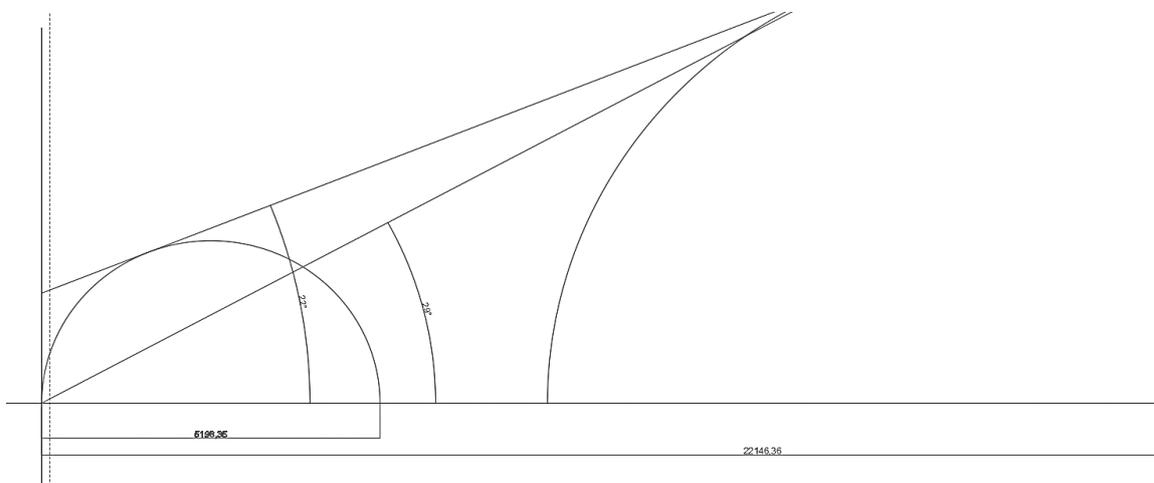
5.2.1. Família 5



5.2.2. Família 7

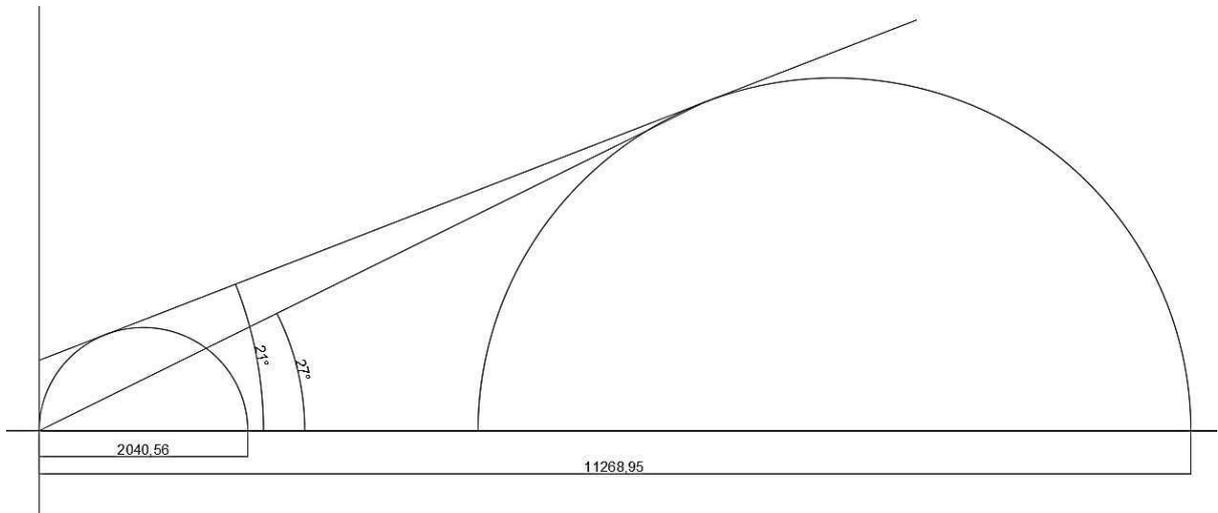


5.2.3 Família 10

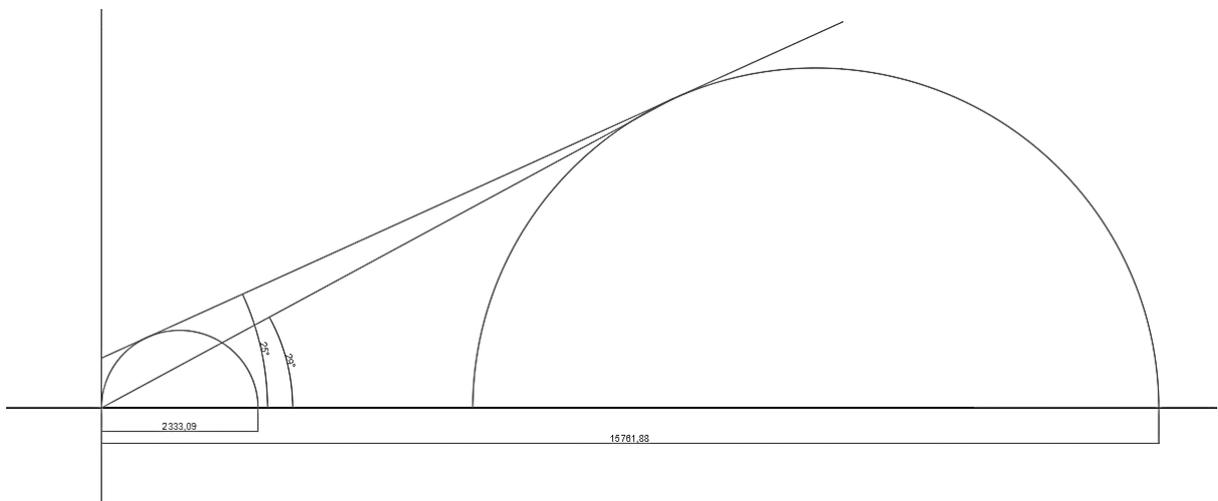


5.3. Repetição 3

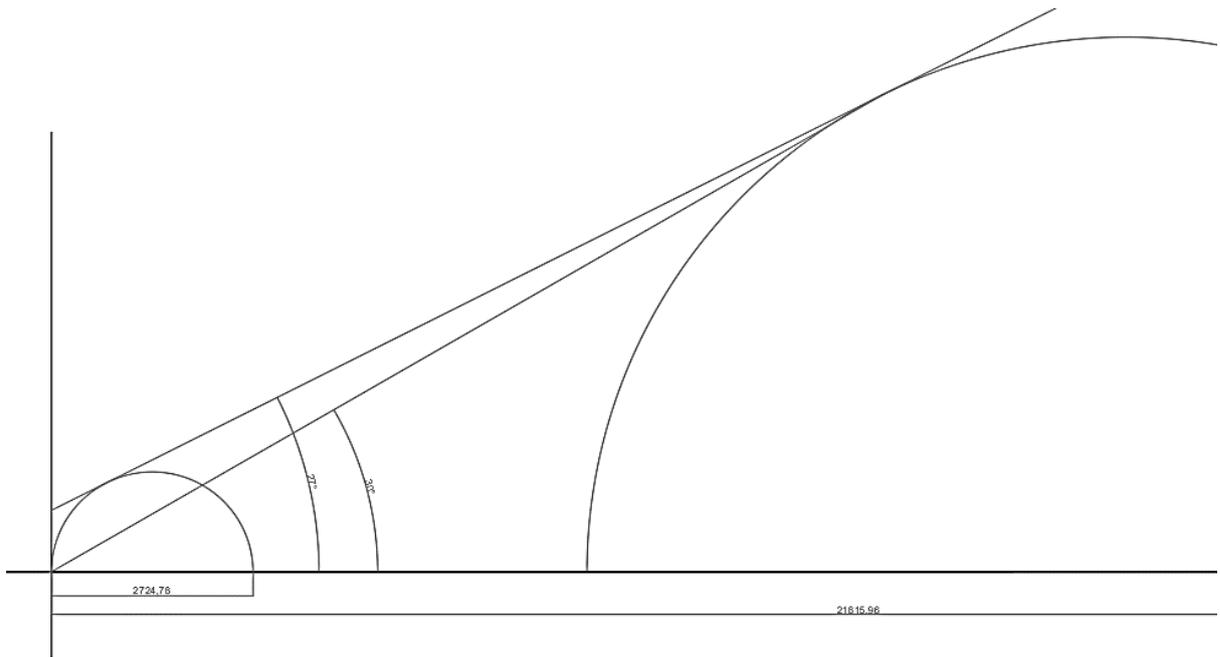
5.3.1. Família 5



5.3.2. Família 7

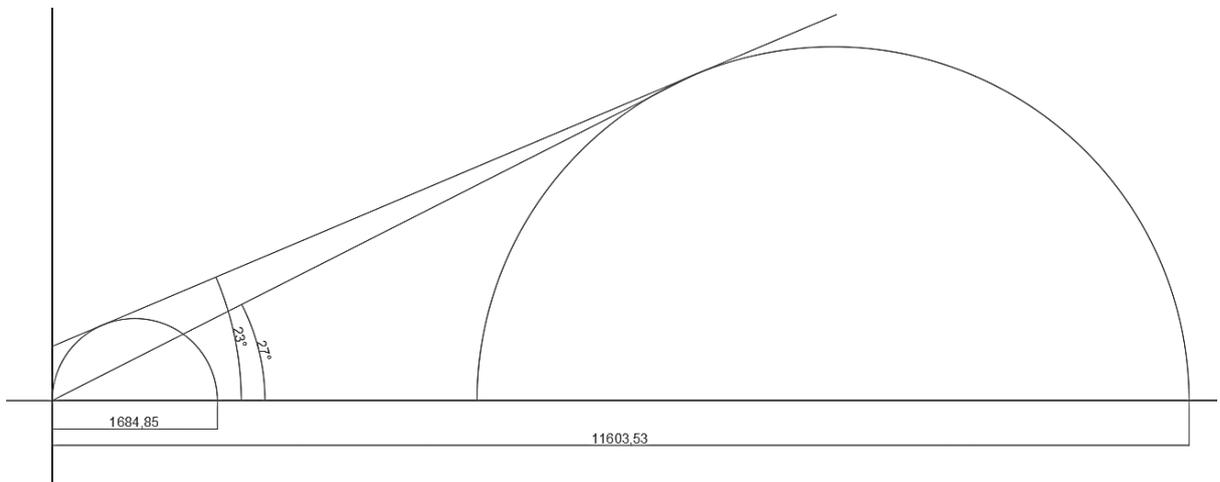


5.3.3 Família 10

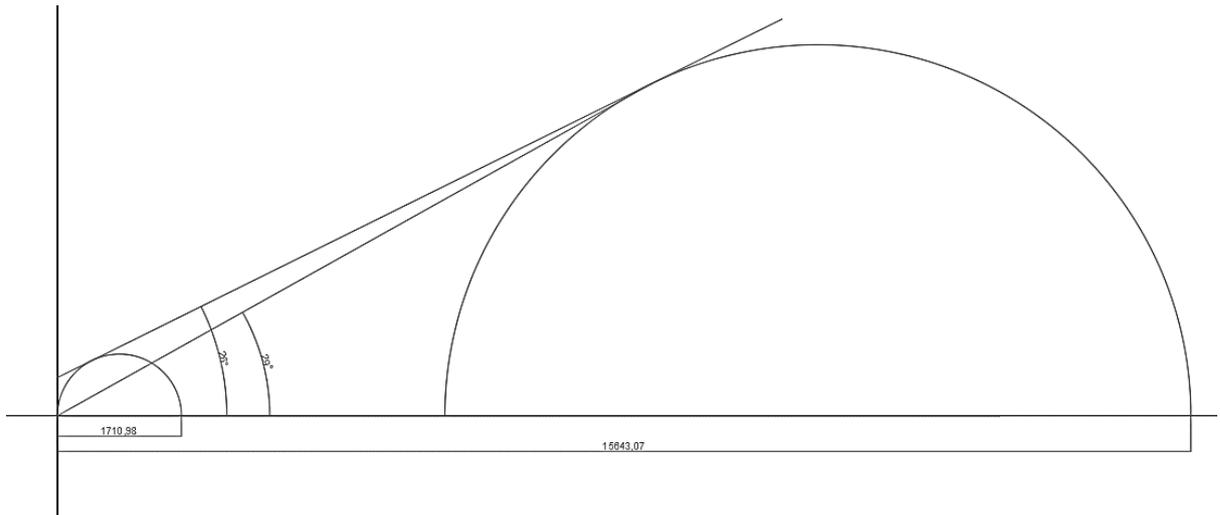


5.4. Repetição 4

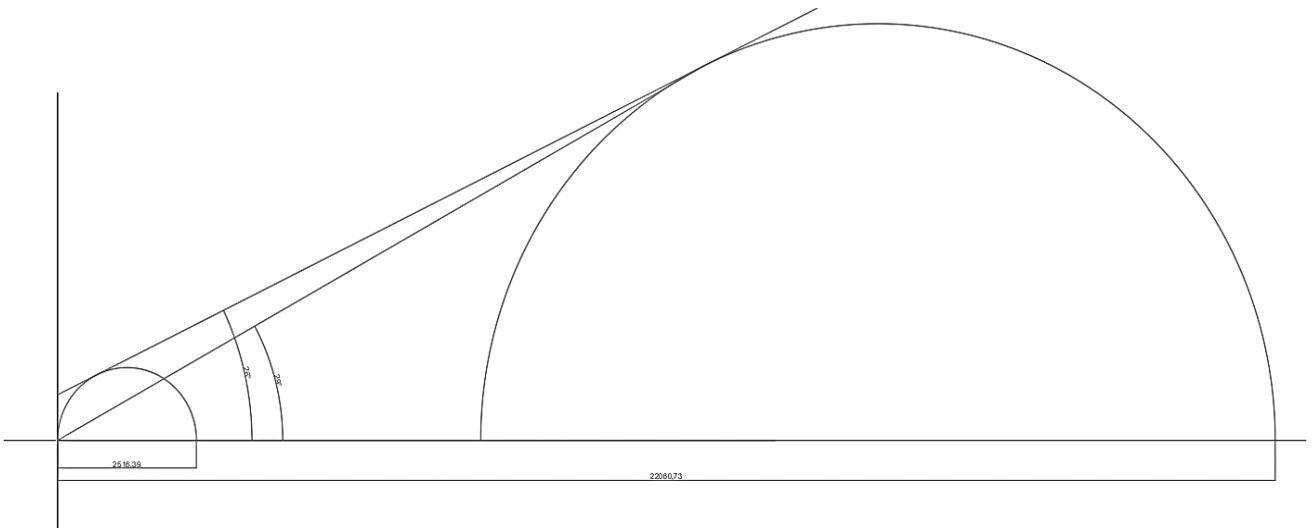
5.4.1. Família 5



5.4.2. Família 7

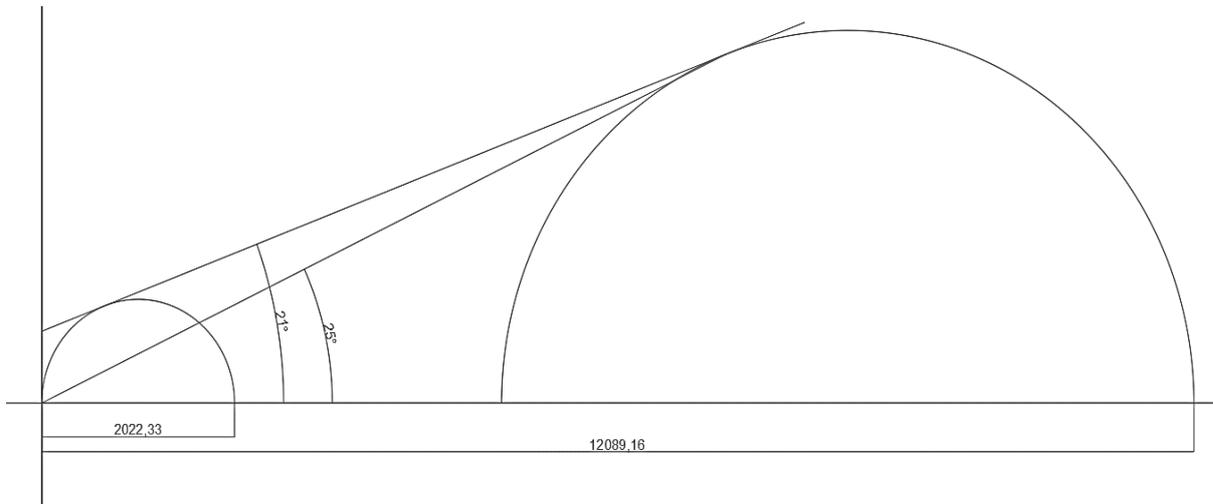


5.4.3. Família 10

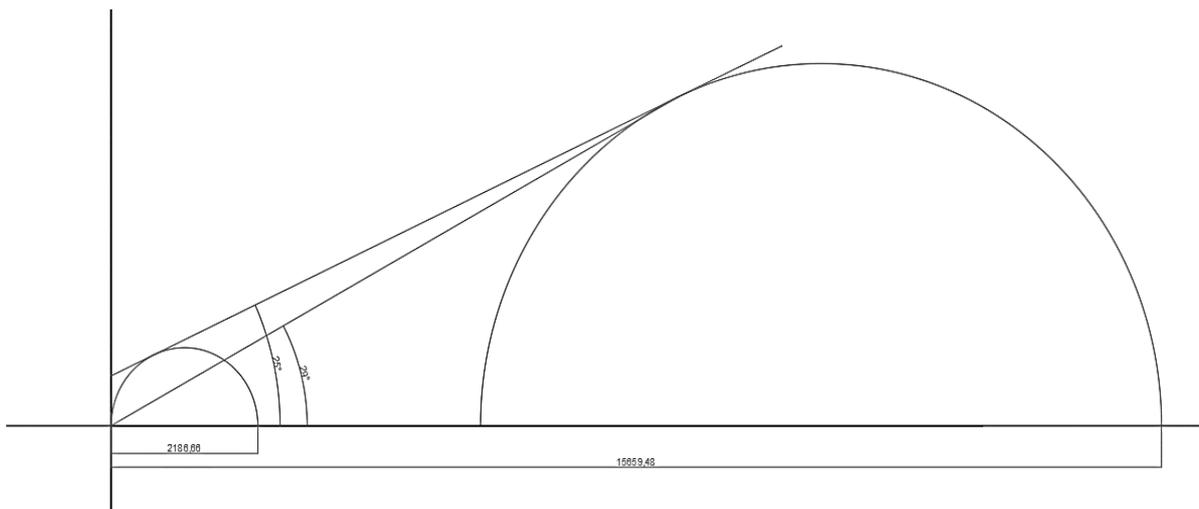


5.5. Repetição 5

5.5.1. Família 5



5.5.2. Família 7



5.5.3. Família 10

