



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RENAN GERMANN

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE AERAÇÃO PARA SILOS
ARMAZENADORES DE GRÃOS**

Porto Alegre
Novembro 2022

RENAN GERMANN

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE AERAÇÃO PARA SILOS
ARMAZENADORES DE GRÃOS**

Projeto de Pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Luiz Telles Bartex

RENAN GERMANN

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE AERAÇÃO PARA SILOS
ARMAZENADORES DE GRÃOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

_____, ____ de _____ de 20____.
Local dia mês ano

Prof. e orientador Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr.
Centro Universitário Ritter dos Reis

Prof. Avaliador Jean de Dieu Briand, Dr.
Centro Universitário Ritter dos Reis

Dedico este trabalho a minha família, que sempre estiveram incondicionalmente ao meu lado em todas as etapas.

AGRADECIMENTOS

A minha noiva Paula de Paula V. Batista e meus pais, Celson Germann e Cenita da Silva Pospichil, que foram meus alicerces durante estes anos de graduação e não mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a todos os professores com quem tive a oportunidade de aprender e consolidar conhecimentos, além de propulsionarem a minha evolução acadêmica. Em especial agradeço ao professor Sérgio Luiz Telles Bartex pela orientação, dedicação e incentivo acadêmico.

“O mundo não será salvo pelos caridosos, mas pelos eficientes” (**ROBERTO CAMPOS**)

RESUMO

A produção de grãos é um dos principais segmentos do setor agrícola tanto no cenário nacional quanto no internacional. Devido ao imenso potencial brasileiro para o aumento do cultivo de grãos, há a necessidade de minimizar perdas, preservando a sua qualidade durante o armazenamento em silos. Uma das boas práticas agrícolas de conservação é por meio do correto dimensionamento do sistema de aeração de silo armazenador, o qual consiste na movimentação forçada de ar ambiente, que promove a diminuição e padronização da temperatura dos grãos armazenados. Nessa perspectiva, o presente trabalho descreveu o método de cálculo para o dimensionamento de um sistema de aeração para milho ou soja armazenados em silos de concreto com 16 metros de altura e 16 metros de diâmetro, baseado na reconhecida obra do autor Érico Aquino Weber, denominada de “Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos (2005)”. Transcorreu através de validações das vinte e sete equações, oriundas da metodologia de Weber (2005), as quais foram divididas em três etapas: valores para a capacidade dos silos e dos produtos armazenados; cálculos da aeração; e cálculos dos dutos aeradores. Além disso, foram esclarecidos os valores para a pressão estática e a potência. Assim, o volume total de grão para o respectivo silo foi de 2.635 toneladas. Os tamanhos dos canais L1 e L2 foram determinados em 0,5 x 0,6 metros e 0,6 x 0,35 metros, respectivamente. Já o canal de distribuição definiu-se por 0,9 x 0,5 metros e o último canal por 1,46 x 0,5 metros. Por fim, 73,66 mm coluna d’água é o valor da pressão estática e o ventilador escolhido para atender o projeto é o de 15 CV. Concluiu-se que houve êxito deste trabalho no dimensionamento de um sistema de aeração para o respectivo silo armazenador, sendo inclusive economicamente viável.

Palavras-chave: Armazenamento; Grãos; Silos; Aeração; Movimentação de ar.

ABSTRACT

Grain production is one of the main segments of the agricultural sector both in the national and international scenario. Due to the immense Brazilian potential for increasing grain cultivation, there is a need to minimize losses, preserving their quality during storage in silos. One of the best conservation agricultural practices is through the correct dimensioning of the storage silo aeration system, which consists of the forced movement of ambient air, which promotes the decrease and standardization of the temperature of the stored grains. In this perspective, the present work described the calculation method for the dimensioning of an aeration system for corn or soybeans stored in concrete silos with 16 meters of height and 16 meters of diameter, based on the recognized work of the author Érico Aquino Weber, called from "Excellence in Grain Processing and Storage (2005)". It took place through the validation of twenty-seven equations, derived from the methodology of Weber (2005), which were divided into three stages: values for the capacity of silos and stored products; aeration calculations; and calculations of aerator ducts. In addition, the values for static pressure and power were clarified. Thus, the total grain volume for the respective silo was 2,635 tons. The sizes of channels L1 and L2 were determined to be 0.5 x 0.6 meters and 0.6 x 0.35 meters, respectively. The distribution channel was defined by 0.9 x 0.5 meters and the last channel by 1.46 x 0.5 meters. Finally, 73.66 mm of water column is the static pressure value and the fan chosen to meet the project is the 15 CV fan. It was concluded that this work was successful in designing an aeration system for the respective storage silo, and it was also economically viable.

Keywords: Storage; grains; Silos; Aeration; Air movement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Silos Metálicos	21
Figura 2 - Silos de concreto	22
Figura 3 - Armazém Graneleiro	22
Figura 4 - Silo Pulmão	23
Figura 5 - Plantação de Soja	25
Figura 6 - Gráfico das potências em aeração	26
Figura 7 - Componentes de um sistema de aeração	28
Figura 8 - Relação do caminho maior (C) e do menor (c)	30
Figura 9 - Arranjos de dutos de aeração	30
Figura 10 - Fluxo de ar na massa de grãos	32
Figura 11 - Ventilador Axial	35
Figura 12 - Ventilador Radial	36
Figura 13 - Gráfico de Sheed	37
Figura 14 – Silo armazenador cheio	38
Figura 15 - Fita transportadora dos silos	40
Figura 16 - Silos de concreto em construção	43
Figura 17 - Fluxograma de cálculo	44
Figura 18 - Croqui do silo	45
Figura 19 - Gráfico cálculo da pressão e da potência na aeração de milho	48
Figura 20 - Desenho dos canais	50
Figura 21 - Relação do maior e menor caminho	51
Figura 22 - Corte nos Dutos L1 e L2	58
Figura 23 - Corte no Duto L1	59
Figura 24 - Corte no Duto L2	60
Figura 25 - Corte no canal de distribuição	61
Figura 26 - Corte no canal de entrada do ar	61
Figura 27 - Seleção do Ventilador	62
Figura 28 - Curva característica do Ventilador	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	—	Área, produtividade e produção nacional do milho, por regiões	24
Tabela 2	—	Relação do maior e menor caminho a ser percorrido	29
Tabela 3	—	Velocidades indicadas nos dutos de ar	31
Tabela 4	—	Velocidades indicadas por instalação	33
Tabela 5	—	Vazão específica para aeração, conforme a umidade	33
Tabela 6	—	Classificação dos ventiladores	34
Tabela 7	—	Ângulo de repouso dos grãos	46
Tabela 8	—	Vazão específica para aeração	47
Tabela 9	—	Velocidades indicadas nos dutos de ar	49
Tabela 10	—	Apresentação dos resultados etapa 1	55
Tabela 11	—	Apresentação dos resultados etapa 2	56
Tabela 12	—	Apresentação dos resultados etapa 3	57
Tabela 13	—	Apresentação dos resultados etapa 4	58
Tabela 14	—	Apresentação dos resultados etapa 5	59
Tabela 15	—	Apresentação dos resultados etapa 6	60
Tabela 16	—	Especificações Técnicas do ventilador	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sb	—	Superfície da Base
V1	—	Volume do Cilindro 1
V2	—	Volume do Cilindro 2
Vt	—	Volume Total do Silo
Cmt	—	Capacidade do Silo em Toneladas
Cms	—	Capacidade do Silo em Sacas
Hm	—	Altura Média
Q	—	Vazão Total do Silo
Pe	—	Pressão Estática
Pm	—	Potência do Motor Elétrico
Pe	—	Potencia Efetiva do Motor
X	—	Espaçamento Entre Dutos
Lt	—	Soma dos Comprimentos dos Canais
V4	—	Velocidade da Entrada do Ar na Massa de Grãos
Qm	—	Fluxo de ar por Metro Linear
QI1	—	Fluxo de Ar no Duto L1
QI1m	—	Fluxo de Ar Médio no Duto L1
QI2	—	Fluxo de Ar no Duto L2
QI2m	—	Fluxo de ar Médio no Duto L2
V3L1	—	Deslocamento de Ar nos Aerodutos L1
V3L2	—	Deslocamento de ar nos Aerodutos L2
Qm	—	Fluxo de ar médio em Cada Lado do Canal
S2	—	Seção do Duto Canal de Distribuição
H2	—	Altura do Duto Canal de Distribuição
S1	—	Seção do Duto Canal de Entrada do Ar
H1	—	Altura do Duto Canal de Entrada do Ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	JUSTIFICATIVA	18
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	ARMAZENAGEM DE GRÃOS	20
2.2	SILOS E ARMAZÉNS	21
2.3	MILHO <i>VERSUS</i> SOJA: CULTURAS MAIS PLANTADAS NO BRASIL	23
2.3.1	Cultura de Milho	23
2.3.2	Cultura de Soja	24
2.3.3	Similaridade de Estocagem entre soja e milho	26
2.4	AERAÇÃO	27
2.4.1	Objetivos da Aeração	27
2.4.2	Componentes de um sistema de Aeração	27
2.4.3	Dutos	28
2.4.4	Movimentação do ar	31
2.4.5	Resistência dos grãos ao escoamento do ar	31
2.4.6	Fluxo de ar	32
2.4.7	Vazão Específica	33
2.5	VENTILADORES	34
2.5.1	Ventiladores axiais	34
2.5.2	Ventiladores radiais	35
2.5.3	Pressão Estática	36
2.6	SEGURANÇA DO TRABALHO EM SILOS ARMAZENADORES	37
2.6.1	NR - 31	38
2.6.2	NR - 33	39
2.6.3	NR - 12	39
2.7	ESTADO DA ARTE	40

3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	42
3.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS	42
4	RESULTADOS	55
4.1	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	55
4.1.1	Capacidade do silo e dos produtos armazenados	55
4.1.2	Cálculo da aeração	56
4.1.3	Cálculo dos dutos aeradores	56
4.2	DISCUSSÃO	61
5	CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO	64
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Desde 1970 até os dias atuais, o Brasil deixou de ser apenas um importador de grãos para ser um dos países exportadores mais notáveis em *commodities* agrícolas no mundo. O agronegócio brasileiro, em 2021, alcançou uma representatividade recorde no Produto Interno Bruto (PIB) de 27,4% (REVISTA EXAME, 2022).

A produção, o transporte, o beneficiamento, a armazenagem, a comercialização e o consumo de alimentos constituem uma cadeia de atividades vitais para a população, conforme Weber (2005). O mesmo autor ainda completa que essa perspectiva justifica a razão pela qual a armazenagem de grãos é uma das atividades mais e importantes dentro do agronegócio.

Diante desse cenário e percebendo a gama de oportunidades no setor agrícola, há uma busca de novas soluções tecnológicas a fim de evitar prejuízos na safra e no armazenamento de sementes. No tocante da produção de grãos, além de promover uma colheita rápida e ágil, é preciso uma grande capacidade de estocagem. Após a colheita, os grãos são limpos e secos antes de serem finalmente armazenados.

A estocagem pode ocorrer por longos períodos, dentro de armazéns ou silos, faz-se necessário um sistema de aeração para que os grãos se mantenham conservados. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), a capacidade de armazenamento do Brasil é de 176 milhões de toneladas no segundo semestre de 2020. No entanto, para uma aeração eficiente é fundamental que seja calculada de forma correta e projetada para evitar perdas durante a estocagem. Por estas razões, esta pesquisa se propõe em aprofundar os estudos a respeito da aeração em silos armazenadores.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O armazenamento de grãos, de acordo com Blaszk (2005), é o que propicia a sua conservação, diminuindo ao máximo suas perdas. Porém, ele ressalta que, antes do armazenamento, os grãos passam pelo processo de secagem onde tem sua umidade reduzida. Para Blaszk (2005), esse processo de armazenagem dispensa o uso de embalagens, sendo necessárias estruturas como silos metálicos, silos de concreto ou armazém graneleiro.

Já a aeração é caracterizada pela movimentação forçada de ar ambiente, em fluxo dimensionado cientificamente, a qual promove a diminuição e padronização da temperatura dos grãos armazenados como descrito por Weber (2005). Para esse autor, a aeração tem como finalidade favorecer a boa conservação dos grãos durante um longo período de tempo, devido à redução das atividades metabólicas dos mesmos e de organismos associados.

Diante desse cenário, como projetar um sistema de aeração com o correto dimensionamento para um silo? Por que conhecer o dimensionamento correto de aeração é importante para o agronegócio? Qual a importância de uma análise criteriosa do método de cálculo de um sistema de aeração? Assim, sendo essas as questões de pesquisa do presente projeto.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo delimita-se na discriminação do método de cálculo de um sistema de aeração para silos armazenadores de soja e milho feitos de concreto, com medição de altura de 16 metros e com diâmetro de 16 metros. Utilizar-se-á da literatura disponível de livros e artigos científicos.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

Este estudo visa projetar um sistema de aeração para silos armazenadores de milho e soja de concreto, com as seguintes dimensões: 16 metros de altura e 16 metros de diâmetro construídos no Paraná na cidade de Arapoti.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calcular o volume total de grãos em um silo de 16m de diâmetro e 16 m de altura.
- Estudar e descrever o método de cálculo mais adequado para um sistema de aeração para silos armazenadores desses grãos.

- Realizar o dimensionamento da aeração, economicamente viável, para o armazenamento de grãos.
- Estudar formas de promover melhorias no armazenamento de grãos.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Brasil, historicamente, sempre se mostrou um grande produtor agrícola. A CONAB (2021) nos mostra que o Brasil é o grande produtor e exportador mundial de soja e de muitos outros alimentos, o país é um dos maiores responsáveis pelo abastecimento alimentar no mundo. Apresenta posição de destaque no agronegócio, tornando-o cada vez mais competitivo no mercado. Vale ressaltar que os problemas de colheita, armazenamento e manuseio de grãos estão com frequência nas pautas de estudos entre os países influentes nesse setor, incluindo o Brasil. Desse modo, mostra-se fundamental a busca por estratégias para a redução de desperdícios dos grãos. E um dos recursos utilizados na cadeia dessas sementes, que requer estudos e aprimoramentos, é o sistema de aeração presente no processo de armazenagem.

O objetivo da armazenagem é em manter a conservação dos grãos fora de sua sazonalidade, utilizando silos armazenadores para tal função. Os produtores veem esse processo como uma alternativa viável, uma vez que poderão estocar para comercializá-los em um momento mais rentável. No entanto, para que se mantenha a qualidade física e fisiológica dos grãos, são necessárias boas práticas agrícolas, e uma delas é a eficiência do sistema de aeração. Para obter funcionalidade satisfatória desse sistema, é preciso o seu correto dimensionamento, a partir de métodos de cálculos, de acordo com o tamanho do silo utilizado. Assim, esses métodos de cálculo de um sistema de aeração para silos de concreto, com diâmetro de 16m, serão o que o presente estudo propõe a descrever, justificando a sua importância.

Os grãos são considerados sementes biologicamente vivas, com metabolismo que produz calor e CO₂ provenientes de sua transpiração. Durante a armazenagem ocorrem diversas reações bioquímicas, as quais as reservas energéticas dos grãos são consumidas, gerando degradação deles. Os autores completam que a velocidade dessas reações está diretamente influenciada pelo sistema de armazenamento, pelo teor de água dos grãos, pela temperatura e pela umidade relativa do ar. Além disso, segundo Weber (2005), uma variação anormal da temperatura, da pressão atmosférica, da umidade

relativa, do CO₂ ou do O₂, pode gerar condições favoráveis para o desenvolvimento e a multiplicação de insetos, de ácaros e até mesmo de ratos.

A degradação dos grãos, durante a armazenagem, poderá ser evitada com o dimensionamento assertivo do sistema de aeração. Esse recurso consiste em forçar a passagem de ar pela massa de grãos, com fluxo ordenado, promovendo a padronização de temperatura, o controle da umidade e a remoção de odores. Somente com uso adequado desse sistema é que se terá uma alternativa de prolongar o armazenamento dos grãos, impedindo o seu desperdício.

A partir da vivência profissional do autor desse estudo, em uma empresa do ramo de agronegócio, percebeu-se que o sistema de aeração, quando manejado de forma errônea, pode prejudicar ainda mais a condição dos grãos armazenados. Portanto, descrever os métodos de cálculo do sistema de aeração de um silo, poderá agregar valor para a comunidade agrícola, no tocante de qualificar os agricultores quanto ao recurso de aeração, de manter a qualidade da safra armazenada e favorecer os negócios agrícolas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro capítulo serão apresentados os problemas de pesquisa, abordando os questionamentos a cerca desse tema; a delimitação de pesquisa, que por sua vez esclarece os seus respectivos limites; o objetivo geral e os objetivos específicos, trazendo a luz sobre o foco da pesquisa; e, por fim, a justificativa, corroborando a importância do desenvolvimento desse trabalho para o agronegócio.

No capítulo dois, serão esclarecidos conceitos e processos referentes à armazenagem de grãos e ao sistema de aeração, bem como sobre a propriedade física dos mesmos. Esse referencial teórico permite a visão macro a respeito dos procedimentos agrícolas no cuidado de sementes.

No capítulo três, serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, que se caracteriza por uma metodologia de cálculos para dimensionamento de um sistema de aeração em um silo de 16 metros de diâmetro, respaldado por bibliografias reconhecidas no setor agrícola. Além de descrever técnicas e instrumentos para coleta de dados, e suas respectivas variáveis.

Por fim, no capítulo quatro, os resultados serão mostrados junto com uma breve discussão sobre o assunto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma introdução sobre os assuntos deste TCC, trazendo algumas definições relevantes para o entendimento das atividades que realizadas.

2.1 ARMAZENAGEM DE GRÃOS

O Brasil há anos vem ocupando um lugar de destaque mundial na produção de grãos e com isto vem tendo destaque no comércio internacional com um dos principais exportadores de grãos no mundo. Parte desta produção precisa ser armazenada durante um determinado período, sendo neste quesito que o Brasil vem enfrentando problemas em decorrência de falhas no processo de armazenagem. Além disso, muito embora apresente capacidade de armazenamento de 176 milhões de toneladas (EMPRAPA, 2021), há uma baixa capacidade de estocagem nos anos das grandes safras colhidas.

O armazenamento é uma etapa muito importante para os produtores rurais e as cooperativas, pois protege e oferece segurança ao produto armazenado, diminuindo ao máximo as perdas dos produtores. Antes do grão ser armazenado, ele passa pelo processo de pré-limpeza, após vai para a secagem nos secadores de grãos, onde sua umidade é reduzida para poder ser armazenada de forma eficaz (WEBER, 2005).

A vitalidade dos grãos pode ser preservada e a qualidade da moagem e das propriedades nutritivas como alimento pode ser mantida, porém não se pode melhorar a qualidade dos mesmos durante o processo de armazenagem. Os grãos colhidos de forma errônea serão de baixa qualidade, não importando como são armazenados. Mas boas condições durante o período de armazenagem serão fundamentais para conservar a qualidade inicial. O teor de umidade que o grão é armazenado e a temperatura do ar são variáveis determinantes na qualidade do grão armazenado. (BROOKER, 1982).

A armazenagem de grãos pode ser realiza das seguintes formas:

- a) A granel – os grãos são guardados sem embalagem em silos de concreto ou metais ou em armazéns graneleiro que tem maior capacidade de recebimento do que os silos.
- b) Convencional – nesta forma de armazenamento os grãos são armazenados em sacos, depositados em galpões ou armazéns que não possuem esta finalidade.

Mas são adaptados para receber os grãos na safra, não possuindo condições ideais para esta função.

2.2 SILOS E ARMAZÉNS

Atualmente, existem várias formas de se armazenar grãos e, dentro desta diversidade, há os silos armazenadores de concreto, os silos de metálicos, os armazéns armazenadores e os silos pulmões, que tanto servem para segregar os grãos na entrada como podem servir como armazenadores. Os silos podem variar de tamanho e diâmetro, conforme a necessidade do cliente, sendo produzidos em alvenaria ou aço metálico em forma cilíndrica. Já os armazéns têm uma forma geométrica diferente dos silos, nestas construções o comprimento é maior que a altura (WEBER, 2001).

Segundo Weber (2005), os silos metálicos, ilustrados na Figura 1, caracterizam-se com unidades armazenadores de grãos, constituídas por células ou compartimentos herméticos, ou semi- herméticos, sendo construídos por células em chapas metálicas parafusadas entre si. Possuem a vantagem de ter rápida montagem e estarem disponíveis em diversos tamanhos.

Figura 1 – Silos Metálicos.



Fonte: Kepler Weber - 2020

Os silos de concreto, como apresentado na Figura 2, possuem um investimento inicial maior do que os silos metálicos, porém conforme Knob (2010) apresentam várias vantagens como: baixo custo de manutenção quando comparados aos silos metálicos, uma vida útil muito maior, podem ser encontrados em diversos tamanhos, além destes silos proporcionarem um fácil sistema de manipulação de grãos, de forma econômica sendo possível armazenar diferentes variedades de grãos.

Figura 2 – Silos de concreto



Fonte: O autor (2021)

Os armazéns graneleiros, elucidados na Figura 3, são uma construção onde a estocagem dos grãos se desenvolve em sentido horizontal. Uma característica destas construções é que parte do armazém fica abaixo da linha do solo, em formato v, semi-v, w ou semi-w (KNOB, 2010).

Figura 3 – Armazém Graneleiro



Fonte: O autor (2021)

Weber (2005) saliente que vem crescendo o interesse das cooperativas na utilização de armazéns devido à rapidez na construção e seu baixo custo em relação aos silos. Uma peculiaridade destas construções é que se necessita deixar a massa de grãos com teor de umidade mais baixo do que em silos

Os silos elevados (conhecido como silos pulmões), ilustrados pela Figura 4, são utilizados para separar os grãos no recebimento e se pode segregar os grãos por teor de

umidade em seu recebimento, facilitando a operação de secagem, podendo por lotes de grãos com umidades parecidas dentro do secador.

Figura 4 – Silo Pulmão



Fonte: O autor (2021)

2.3 MILHO *VERSUS* SOJA: CULTURAS MAIS PLANTADAS NO BRASIL

É de consenso que, desde a década de 90, o Brasil vem se destacando no agronegócio, principalmente na plantação de milho e soja. Com a população mundial estimada em 8 bilhões de habitantes, exigirá cada vez mais o aumento da produção de alimentos de forma eficiente.

Devido ao grande potencial tecnológico que o País apresenta, as culturas de milho e soja estão em alta no cenário Mundial, sendo necessário otimizar os processos desde a plantação até a secagem e armazenagem (ALVES, 2007).

2.3.1 Cultura de Milho

O milho pertence à classe *Liliopsida*, família *Poaceae*, gênero *Zea*, sendo classificada cientificamente como *Zea mays* L. A história nos mostra que existem os primeiros registros de cultivo do milho há mais ou menos 7.300 anos, e foram

encontrados em pequenas ilhas próximas do litoral mexicano. Seu nome é de origem indígena caribenha e significa “sustento da vida”. O milho era o alimento mais consumido por várias civilizações importantes como Maias, Astecas e Incas ao longo dos séculos. (GUERREIRO, 2009).

Este grão é conhecido por ter um alto potencial produtivo e é bastante responsivo à tecnologia. É a espécie vegetal mais utilizada nas pesquisas genéticas. Também é uma planta chamada de C4, ou seja, é extremamente eficiente na conservação de CO₂, apresentando altas taxas de fotossíntese líquida, mesmo em elevados níveis de luz (ALVES, 2007).

A produção de milho, no Brasil, vem sendo realizada em duas épocas de plantio. Os plantios de verão são realizados na época tradicional deste cultivo, durante o período chuvoso, que varia entre fins de agosto na Região Sul, até os meses de outubro e novembro no Sudeste e Centro-Oeste. Temos também a chamada safrinha ou segunda safra, essa refere-se ao milho sequeiro, plantado entre janeiro e março.

Os maiores estados produtores de milho brasileiros são, nessa na ordem: Mato Grosso, Paraná, Mato Grosso do Sul (que deverá superar Goiás na atual safra) e Minas Gerais. A produção do Mato Grosso é superior, comparada à das demais regiões do País, se consideradas isoladamente, conforme elucidado pela Tabela 1. A colheita 2020/2021 foi finalizada com alta produtividade. Os preços elevados têm incentivado maiores investimentos, a escassez da oferta e a expansão da cultura. Além da demanda por milho para ração, as usinas de etanol fomentaram a produção de variedades específicas para suas necessidades. (CONAB, 2021).

Tabela 1 – Área, produtividade e produção nacional do milho, por regiões

Unidade Geográfica	Área (mil ha)			Produtividade (kg / ha)			Produção (mil t)		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21	2019/20	2020/21	2020/21
Centro - Oeste	8.544,2	9.238,5	9.895,0	6.197	6.122	5.126	52.825,9	56.836,0	51.612,4
Norte	739,3	804,8	857,4	4.161	4.372	4.043	3.076,3	3.518,7	3.466,5
Sul	3.695,6	3.757,2	4.039,5	6.849	5.766	5.156	25.310,3	21.663,1	20.828,2
Sudeste	2.027,3	2.054,5	2.225,0	5.995	5.726	5.238	12.153,4	11.764,0	11.655,1
Nordeste	2.506,5	2.627,3	2.823,8	2.664	3.351	3.127	6.676,8	8.804,6	8.829,9
Brasil	17.492,9	18.527,3	19.840,7	5.719	5.537	4.858	100.042,7	102.586,4	96.392,1

Fonte: Conab (2021)

2.3.2 Cultura de Soja

A soja é uma planta de origem asiática. O seu cultivo é totalmente diferente se comparado com o cultivo de milênios atrás, em que eram plantas rasteiras desenvolvidas próximas a rios e lagos, nomeada de soja selvagem (MOZZAQUATRO et al., 2017). Com o passar das décadas, a sua evolução começou com o surgimento de novas plantas das quais eram originárias do acasalamento natural de duas sojas silvestres, também domésticas e aprimoradas pelos chineses (MORAES, 2011). Como descrito acima a soja é uma cultura de origem do continente asiático, mais especificamente chinesa, historiadores datam que sua introdução na agricultura foi feita há mais de 5000 anos.

No Brasil, a expansão da soja começou a ocorrer no início da década 70 quando a indústria de óleo começou a mostrar que a demanda por soja estava aumentando em nosso país. Em meados da década de 70, o plantio era feito com técnicas baseadas nos Estados Unidos, modelo este que era bem adaptado nas regiões sul do Brasil, pois as condições de plantio eram bem parecidas com seu verdadeiro país de origem. Com isso, houve a criação do cultivar tropical, para as regiões tropicais do solo brasileiro e, logo após, houve outras criações de novos cultivares que possam se adaptar às demais localidades brasileiras. Vale ressaltar que, o cultivo da soja trouxe um aumento no mercado de sementes dando estabilidade para uma maior exploração econômica em regiões, onde as terras não tinham nada além de matas e cerrados (PONTES et al., 2009).

A safra de 2021 conforme figura 5 foi um marco para o país, quando se tornou o maior produtor de soja no mundo, com uma colheita de 135,409 milhões de toneladas, ultrapassando os Estados Unidos, que colheram 112,549 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2021).

Figura 5 – Plantação de Soja



Fonte: O autor (2022)

2.3.3 Similaridade de Estocagem entre soja e milho

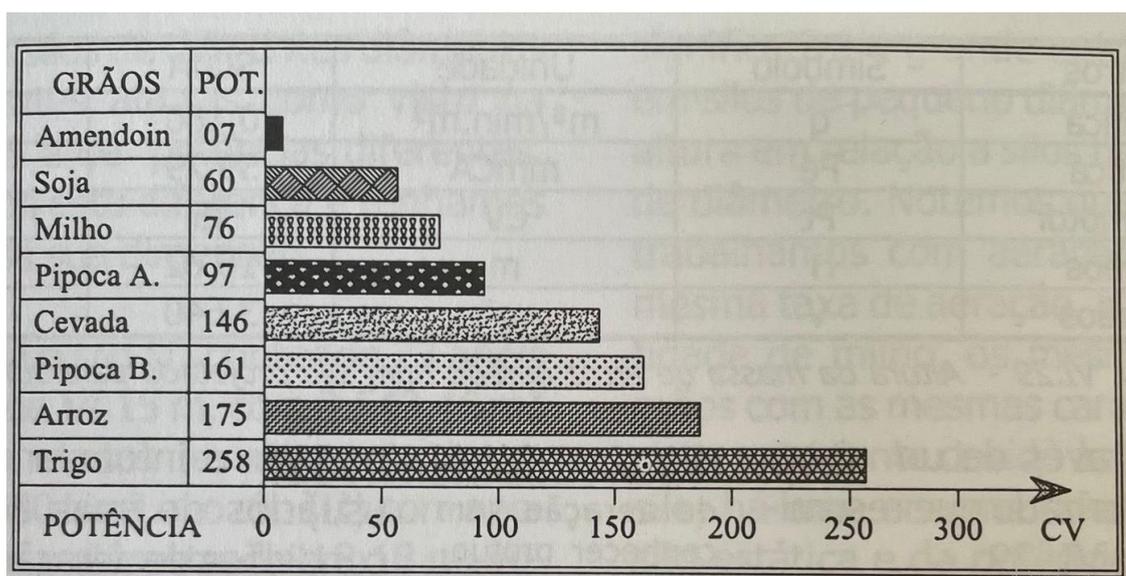
As culturas da soja e do milho são as que mais utilizam a técnica de armazenagem de grãos em sua cadeia produtiva, além disso, ambas as produções são as que geralmente ficam por mais tempo armazenadas. A Embrapa (2021) divulgou os números de estocagem referente ao ano de 2021 e nos mostra que a soja é de longe, o grão mais estocado no Brasil, passando das 36,7 milhões de toneladas, seguido pelo milho com um volume próximo a 11,4 milhões.

Soja e milho são grãos que apresentam uma sobrevida ao serem armazenados sem perder a qualidade, pois, entre outros fatores, lança-se mão de silos, estruturas agrícolas destinadas ao armazenamento e conservação dos grãos secos, tanto a soja quanto o milho são armazenados com teores de umidade parecidos, entre 13 e 14 % (WEBER, 2001).

Quando se calcula uma aeração para silos que irão armazenar soja e milho, o motor selecionado deve satisfazer igualmente a aeração de ambos os produtos. Esses grãos apresentam condições semelhantes de resistência a passagem do ar, porém a soja oferece menor resistência a passagem de grãos. Assim, um sistema calculado para grãos de milho será mais eficiente para soja, motivo pelo qual se deve calcular e utilizar os parâmetros de ventilação para milho (WEBER, 2005).

A Figura 6 apresenta o gráfico com as potências para aeração de diversos grãos, sendo possível confirmar que a soja e o milho são bem similares.

Figura 6 – Gráfico das potências em aeração



Fonte: Weber (2005)

2.4 AERAÇÃO

A técnica de aeração de grãos surgiu nos Estados Unidos e em alguns países da Europa desde os anos 40. Atualmente, esta técnica está muito difundida e é usada em praticamente todos os países produtores de grãos. Com o passar dos anos, as técnicas de aeração foram sendo aperfeiçoadas e são fundamentais em um silo ou armazém, já que beneficiam os produtores (CENTREINAR, 2009).

A aeração consiste na movimentação forçada do ar ambiente adequado através da massa de grãos, com o objetivo geral de diminuir e uniformizar a temperatura, proporcionando a essa massa de grãos condições favoráveis para conservação e qualidade durante um período prolongado dentro de silos ou armazéns (WEBER, 2001).

Para se fazer uma aeração, primeiramente, deve-se definir qual é a sua finalidade, por exemplo: armazenar certa massa de grãos e manter sua umidade relativa; controlar a temperatura na massa de grãos; entre outros. Além disso, a aeração depende de quatro variáveis: temperatura do grão, temperatura do ar ambiente, umidade do grão e umidade do ar ambiente (WEBER, 2005).

2.4.1 Objetivos da Aeração

A aeração tem como objetivo a manutenção dos grãos armazenados, sem causar prejuízo da qualidade de massa armazenada, através de um sistema de ventilação mecânico (WEBER, 2001).

Os principais objetivos são:

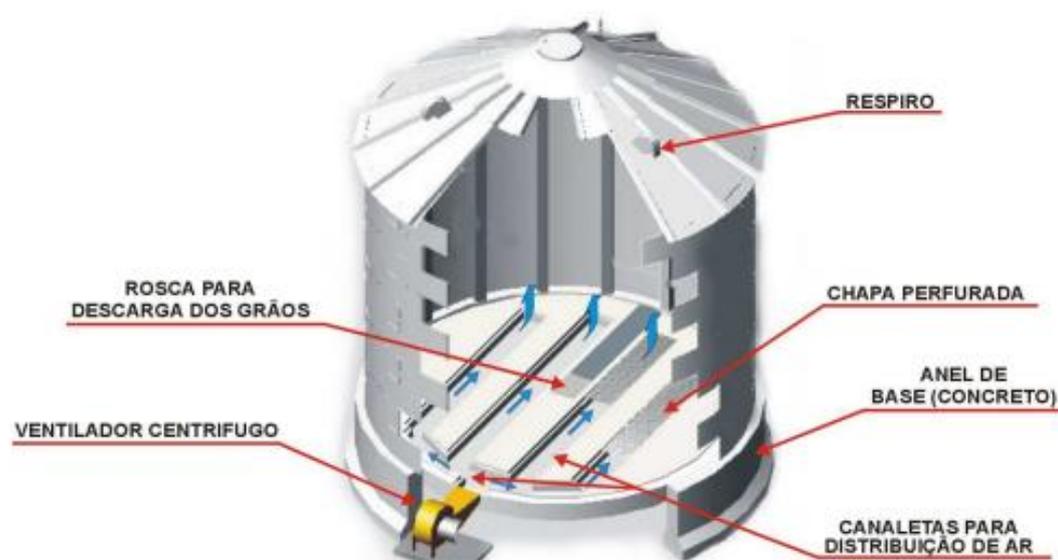
- a) Estabelecer condições que permita o resfriamento de pontos aquecidos na massa de grãos;
- b) Uniformizar a temperatura da massa de grãos;
- c) Controle de insetos e fungos;
- d) Evitar as correntes de ar de convecção;
- e) Evitar a transilagem, diminuindo os custos de armazenagem;
- f) Conservar as qualidades químicas e físicas dos grãos;
- g) Prevenir o aquecimento e regular o aquecimento de umidade dos produtos armazenados;
- h) Promover a remoção de odores.

2.4.2 Componentes de um sistema de Aeração:

Um sistema de aeração é composto por um conjunto de equipamentos mecânicos e elétricos, que são destinados a movimentar uniformemente certa quantidade de ar através de uma massa de grãos. Os principais componentes estão descritos abaixo (WEBER, 2005).:

- a) Ventiladores: fornecem ar necessário para a aeração;
- b) Dutos de distribuição e de suprimento: alimentam e distribuem ar pela massa de grãos que está armazenada em silos ou armazéns;
- c) Silos ou armazéns: armazenam a massa de grãos;
- d) Cobertura dos canais: são construídas com chapas perfuradas e estas permitem a passagem do ar dos dutos para a massa de grãos;
- e) Dispositivos de monitoramento: são dispositivos eletrônicos que controlam a temperatura e a umidade relativa nos silos ou armazéns.

Figura 7 – Componentes de um sistema de aeração



Fonte: Sperandio (2020)

2.4.3 Dutos:

Em silos armazenadores, os ventiladores fornecem o ar necessário para a operação da aeração. Os dutos de distribuição construídos nos silos levam o ar produzido para o fundo do silo. No fundo dos silos existem chapas perfuradas que permitem a passagem do ar para a massa de grãos. Este ar atravessa toda a massa de grão e sai pela parte superior dos silos (SPERANDIO, 2013).

Já entre os armazéns, que são construções horizontais, existem variações da altura de massa de grãos que está armazenada. Assim, os projetos de aeração são um

pouco mais complexos. Nestes projetos deve-se dividir a aeração em um duto central e dutos laterais. No duto central é aonde passa a maior vazão de ar, porque está no fundo do armazém, permitindo que o ar atravesse a massa de grãos saindo pela parte superior do armazém. Os dutos laterais servem de dutos auxiliares, pois pode ocorrer de o duto central não conseguir atingir as áreas laterais do armazém (CENTREINAR, 2009).

Os dutos precisam ser dimensionados de modo que haja a menor perda de carga possível. Normalmente, deve-se utilizar um duto principal que age como câmara de distribuição do ar, para conduzir o ar desde aonde o ventilador está instalado até os dutos que fazem a distribuição do ar na massa de grãos, armazenada dentro dos silos ou armazéns.

Weber (2005) nos traz em sua literatura que para se determinar a distância entre os dutos é preciso levar em conta que o ar percorre vários caminhos até conseguir chegar à superfície da massa de grãos. Com isso, há uma variação no tempo de resfriamento entre os grãos que estão na superfície dos dutos e os grãos que estão na metade do caminho entre eles. Portanto, a determinação da distância ideal entre os dutos tem o propósito de minimizar a não uniformidade na distribuição de ar na massa de grãos.

Os dutos devem ser posicionados de uma forma que garanta, no mínimo, os fluxos de ar recomendados na tabela 2:

Tabela 2 – Relação do maior e menor caminho a ser percorrido

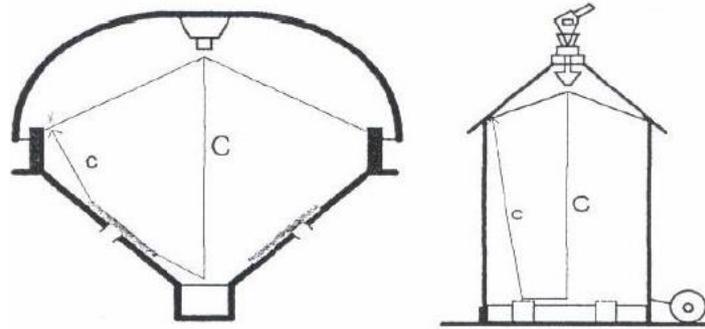
Armazéns	Silos
$C/c \leq 1,5$	$C/c \leq 1,8$

Fonte: Centreinar (2009)

A fim de esclarecimento, a letra “C”, em maiúsculo, representa a medida traçada no centro do silo e indica a altura máxima de grãos que o silo terá. Já a letra “c”, em minúsculo, representa a medida traçada a partir do centro da galeria de ar até a extremidade do silo, mostrando a altura que terá de grãos nesta área.

O fluxo de ar seguirá, preferencialmente, o percurso que oferecer menor resistência. Desta maneira, para executar um projeto de aeração, deve-se observar a relação do maior e menor trajeto a ser percorrido pelo ar. Esta relação é representada nas literaturas com as letras C e c, sendo possível visualizar essa relação na figura 8. É importante que se observe essa relação ao executar um projeto de aeração em silos ou armazéns graneleiros (CENTREINAR, 2009).

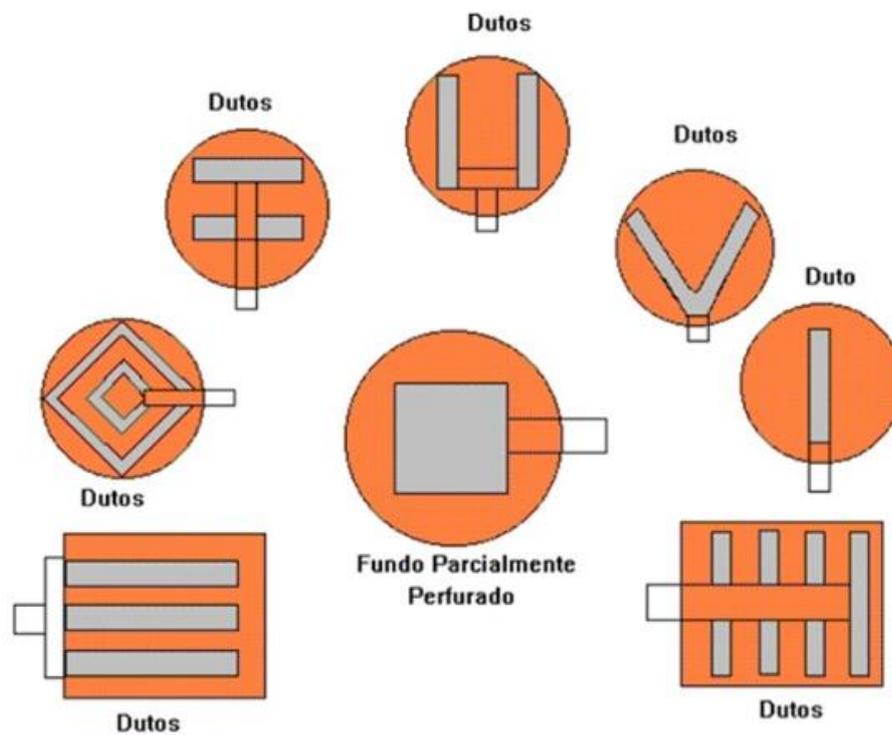
Figura 8 – Relação do caminho maior (C) e do menor (c)



Fonte: Centreinar (2009)

Conforme a vazão calculada e a estrutura que o projetista optar por construir os dutos, estes podem apresentar diferentes configurações, sendo as mais usuais, atualmente, nas construções as ilustradas na figura 9. (CENTREINAR, 2009).

Figura 9 – Arranjos de dutos de aeração



Fonte: SILVA (2008)

Os dutos mostrados na figura acima servem para conectar os ventiladores aos dutos de aeração. Esses dutos são dimensionados considerando as vazões a serem aplicadas e a velocidade do ar pelos dutos.

Para o dimensionamento e distribuição dos dutos inicia-se no cálculo da área necessária de chapa perfurada para aplicação do ar. Deste modo, é preciso considerar as

velocidades recomendadas em cada ponto do sistema de aeração, conforme mostra a Tabela 3:

Tabela 3 – Velocidades indicadas nos dutos de ar

Ponto de medição	Velocidades recomendadas	
	m/s	m/min
Saída do ventilador	10	600
Duto de suprimento	8	480
Duto de aeração	4	240
Saída da chapa perfurada	0,25 a 0,5	15 a 30

Fonte: Weber (2005)

2.4.4 Movimentação do ar:

Centreinar (2009) cita que o ar é muito utilizado no processamento de grãos. Nos secadores utiliza-se ar da fornalha para secar os grãos na umidade desejada e é muito usual nos transportes pneumáticos para captação de sujeira ao longo dos processos e levá-lo para uma caixa de impurezas. Ou ainda, é possível optar pela queima dessa sujeira na fornalha, fazendo economia de lenha e promovendo, na aeração, uma movimentação de ar.

Em um sistema de aeração, o ar passa a massa de grãos, com a ação de um ventilador, que transforma a energia mecânica em energia cinética. Essa transformação de energia gera uma pressão para vencer as resistências oferecidas pelo sistema ao escoamento de ar, sendo elas especialmente a massa de grãos, chapa perfurada e pelas perdas que ocorrem em dutos e transições ao longo do caminho percorrido pelo ar (WEBER, 2005).

As relações entre o volume de ar que passa a massa dos grãos, a resistência oferecida e a altura da camada de produto acima do sistema de distribuição de ar são importantes para o projeto. Como o custo de instalação e as operações destes dispositivos estão se tornando cada vez mais relevantes. É de suma importância que o projetista de um sistema de aeração saiba escolher e selecionar o melhor equipamento de movimentação de ar para qualquer instalação, levando em consideração os fatores técnicos e econômicos relacionados no projeto que deseja construir (CENTREINAR, 2009).

2.4.5 Resistência dos grãos ao escoamento do ar:

Conforme Weber (2005), quando o ar é forçado a passar em uma camada de grãos, a resistência ao escoamento (pressão estática) é resultado de perda de energia devido ao atrito e também à turbulência. É necessário determinar a quantidade de energia que o ventilador precisa transferir para o ar a fim de vencer a resistência oferecida pela massa de grãos e mantê-lo em movimento.

Cada grão tem sua especificidade técnica, logo a resistência à passagem de ar varia de um grão para outro, sendo os principais aspectos descritos abaixo:

- a) Dos parâmetros do fluxo de ar;
- b) Das características da superfície do produto;
- c) Da forma e tamanho das impurezas;
- d) Do tamanho e quantidade de grãos quebrados;
- e) Do grau de compactação da massa de grãos;
- f) Da homogeneidade da massa de grãos;
- g) Da altura da massa do produto;

Os dados de resistência ao escoamento de ar (pressão estática) são empíricos e, geralmente, são apresentados na forma de gráficos.

2.4.6 Fluxo de ar:

O fluxo de ar, como ilustrado pela Figura 10, é uma medida de um determinado valor de vazão que está fluindo em uma área, por metro cúbico de produto ou também por uma tonelada de produto.

Figura 10 – Fluxo de ar na massa de grãos



Fonte: Sperandio (2020)

Segundo Puzzi (1977), o tamanho e a forma dos grãos afetam a resistência ao fluxo de ar, pois grãos de tamanho menor apresentam uma resistência maior ao fluxo de ar. Esses grãos menores, quando armazenados dentro de silos ou armazéns, acabam formando uma massa mais compacta.

A tabela 4 mostra os fluxos de ar recomendados para cada tipo de instalação.

Tabela 4 – Velocidades indicadas por instalação

Tipo de instalação	Fluxo de ar	
	m ³ /min.m ²	L/min.m ³
Armazéns	0,1 a 0,2	78 a 156
Silos	0,03 a 0,1	23 a 78
Silo Pulmão	0,3 a 0,6	234 a 468

Fonte: SILVA (2008)

2.4.7 Vazão Específica:

Conforme Silva (2008), a vazão específica é a medição do volume de ar que passa em uma determinada seção de um duto por uma unidade de tempo.

Para se obter a vazão total de ar, calcula-se a partir da equação abaixo:

$$QC = Qr \times V$$

Onde:

Qc: Vazão total de ar [m³ / h];

Qr: Vazão específica recomendada para cada grão [m³ / min. m³];

V: Volume de grãos [m³];

A partir da tabela 4, consegue-se analisar como um projeto de aeração precisa ser construído, conforme a construção que será executada, pois existe diferenças no fluxo de ar de um silo pulmão para um silo armazenador, por exemplo. Para cada tipo de construção será necessário o conhecimento de qual conjunto de ventiladores, dutos e chapas perfuradas atenderá melhor o projeto, permitindo uma vazão específica devidamente calculada. Desta maneira, tornar a armazenagem segura e evita-se perdas.

A tabela 5 nos mostra as vazões específicas usadas para cada grão:

Tabela 5 – Vazão específica para aeração, conforme a umidade.

Grãos	Umidade (%)	Vazão Específica	
		m ³ / min. m ³	m ³ / h x t
Milho	14 - 16	0, 125	10,0
Soja	14 - 16	0, 075 – 0, 0187	6 - 15
Trigo	14 - 16	0, 083	6,66

Fonte: Weber (2005)

2.5 VENTILADORES

Ventilador é uma máquina rotativa que coloca o ar ou um gás em movimento. É possível definir como uma turbo máquina, a qual transmite energia para gerar a pressão necessária para manter um fluxo contínuo de ar (GOMES, 2010).

Como trata-se de aeração de grãos, o ventilador é um dos componentes mais importantes do projeto. Cada ventilador tem sua curva característica que correlaciona à vazão de ar, à potência requerida, à pressão estática e à rotação do eixo do ventilador. Estes dados são obtidos através dos manuais técnicos de cada fabricante.

O ventilador escolhido para um projeto de aeração precisa ser dimensionado corretamente. Caso o projetista errar algum cálculo ou fizer a escolha errada do ventilador, há chance de que, mesmo a máquina estando ligada, não haja movimento de ar através da massa granular estocada dentro dos silos, pois não vence a pressão estática. Na escolha do ventilador para aeração, além do aspecto da engenharia, e muito importante fazer a escolha sob o aspecto ambiental principalmente com relação ao nível de ruídos. (HARA, 2003).

Os ventiladores são classificados pelo tipo de rotor, número de estágios, nível de pressão e detalhes construtivos. Quanto ao tipo de rotor, o ventilador é classificado como radial ou axiais. A Tabela 6 apresenta as principais classificações.

Tabela 6 – Classificação dos ventiladores

Tipo	Nº estágios	Características	Tipo
Radial	1	Baixa pressão: até 150 mmH ₂ O	Radial
	1	Media pressão: até 250 mmH ₂ O	Radial
	1	Alta pressão: até 750 mmH ₂ O	Soprador
	>1	ΔP até 10 kgf/cm ² (100mmH ₂ O)	Compressor ou Turbo compressor
Axial	1	Hélice simples para movimentação de ar ambiente, ventilador de coluna, carcaça tubular envolve rotor único.	Ventilador helicoidal turbo axial
	>1	ΔP até 3 kgf/cm ² (30mmH ₂ O)	Turbo compressor

Fonte: Alé (2001)

2.5.1 Ventiladores axiais:

Perinazzo (2009) cita que os ventiladores axiais têm como princípio o movimento de grandes volumes de ar a partir de um ponto para outro com pressões estáticas baixas.

Este modelo de ventilador é usado em sistemas de insuflamento/exaustão que necessitam pouca perda de carga, ou seja, sistemas com dutos curtos.

Sua principal característica é ter potência máxima absorvida na pressão estática máxima, representando vazão igual a zero, aspecto este oposto ao dos ventiladores radiais.

Este modelo de ventilador tem algumas desvantagens. Uma das principais desvantagens está atrelada ao nível de ruídos e também um baixo rendimento se comparado aos ventiladores centrífugos (PERINAZZO, 2009).

Figura 11 – Ventilador Axial



Fonte: O autor (2022)

2.5.2 Ventiladores radiais:

Os ventiladores radiais são caracterizados por ter trajetória em que uma partícula gasosa no rotor aparece em uma superfície que é, aproximadamente, um plano normal ao eixo, conforme uma caixa espiral (PERINAZZO, 2009).

Este modelo de ventilador foi desenvolvido com características especiais para serem utilizados em sistemas de ventilação/exaustão com redes de dutos conectados, enquadrando-se nos sistemas de aeração. Uma particularidade é que estes modelos movimentam volumes de ar relativamente pequeno a grandes pressões (OTAM, 2020).

Um ventilador radial, elucidado pela Figura 12, é constituído de uma carcaça externa e o ar entra paralelamente ao eixo do motor. O rotor pode ser fabricado com pás curvadas para trás, curvadas para frente, radiais ou com pás retas.

Figura 12 – Ventilador Radial



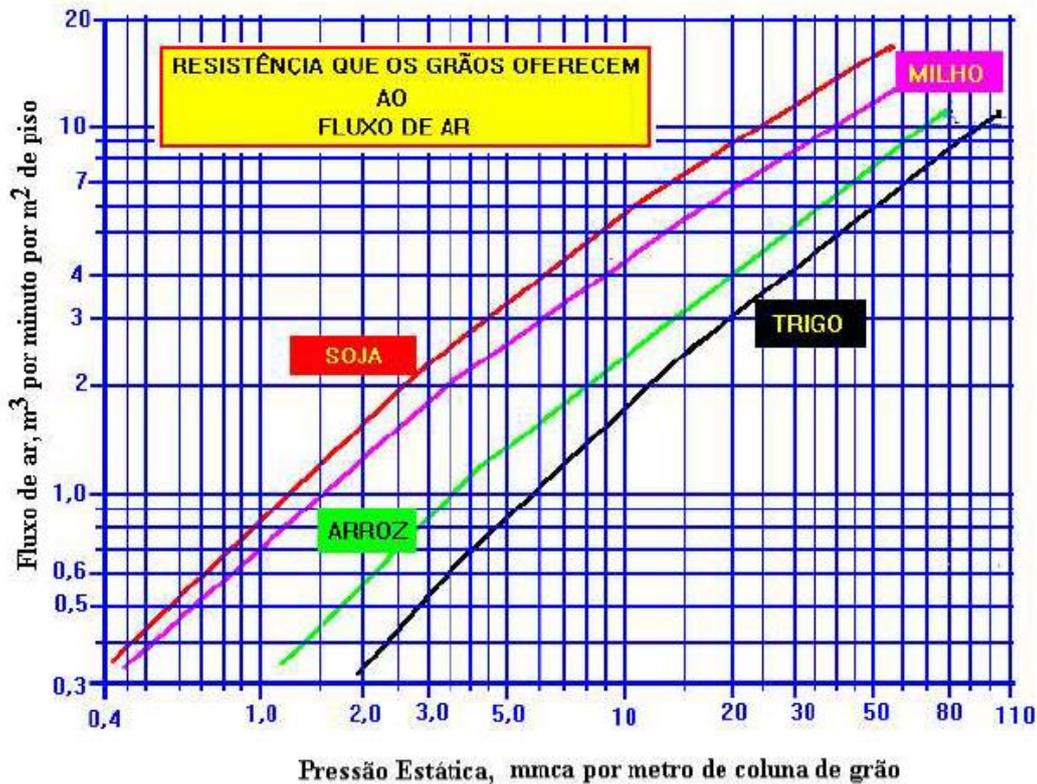
Fonte: O autor (2022)

2.5.3 Pressão Estática:

O ventilador projetado em um sistema de aeração precisa vencer a resistência da passagem do fluxo de ar, isto é, ter pressão superior à pressão estática do sistema, medida em força por unidade de área, e que equivale a resistência que os grãos armazenados e o sistema de distribuição de ar oferecem na passagem do ar.

A pressão estática é muito importante para conhecer o valor da potência do motor e escolher o ventilador adequado. Esta pressão varia diretamente com a altura da camada de grãos e com a velocidade com que o ar atravessa esta camada (SILVA, 2008). A Figura 13 é o gráfico de *Sheed*, o qual mostra a resistência em que os grãos promovem no fluxo de ar para as principais culturas plantadas no Brasil.

Figura 13 – Gráfico de Sheed



Fonte: Silva (2008)

2.6 SEGURANÇA DO TRABALHO EM SILOS ARMAZENADORES

A área de armazenagem de grãos é um ambiente de trabalho insalubre que são perigosos aos colaboradores das empresas. Nestes locais é recorrente relatos de acidentes de trabalho, inclusive com vítimas fatais.

É possível elencar diversos tipos de acidentes de trabalho em silos armazenadores, sendo o soterramento de trabalhadores na massa de grãos o de maior frequência. Este tipo de acidente ocorre quando o operador tenta andar sobre os grãos e, como o silo está com sua capacidade de armazenamento máxima, ilustrado pela Figura 14, criam-se bolsas de ar e acontece algo parecido como areia movediça, onde a pessoa não consegue mais respirar, pelo soterramento, e acaba vindo a óbito por asfixia (SILVA, 2015).

Os ambientes das instalações agroindustriais têm muita poeira oriunda dos grãos. Este pó pode provocar uma atmosfera explosiva devido à grande quantidade de partículas de vegetal em suspensão (COSTELLA, 2016).

Figura 14 – Silo armazenador cheio



Fonte: O autor (2022)

Atualmente, o Brasil tem muitas normas trabalhistas que visam promover o trabalho mais seguro em nosso país. Existem 37 normas regulamentadoras vigentes e, dentre estas, algumas se enquadram nos silos.

2.6.1 NR - 31:

A NR 31, denominada em por “Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e agricultura, ” é a norma voltada para os trabalhadores rurais, enquadrando-se para os trabalhadores que operam nas unidades de recebimento de grãos. Inserida nesta norma, temos uma parte dedicada exclusivamente para silos. Em destaque, os principais parágrafos relacionados aos silos abaixo:

31.13.4 Os silos devem ser projetados, montados e mantidos sob a responsabilidade de profissional legalmente habilitado, de acordo com as cargas e esforços prescritos pelo fabricante.

31.13.4.1 Os serviços de montagem, desmontagem e instalação em silos e estruturas interligadas devem ser realizadas pelo fabricante ou por empresa recomendada ou autorizada pelo fabricante.

31.13.4.2 Os silos devem possuir revestimento interno, elevadores e sistemas de alimentação que impeçam acúmulo de grãos, poeiras e formação de barreiras bem como dispositivos que controlem os riscos de combustão espontânea.

31.13.6 O acesso ao interior dos silos somente pode ocorrer:

- a) quando extremamente necessário, desde que não esteja em operação;
- b) com a presença de, no mínimo, dois trabalhadores, devendo um deles permanecer no exterior;
- c) com a utilização de sistema de proteção coletiva contra queda ou sistema de proteção individual contra queda, ancorado na estrutura do silo, permitindo o resgate do trabalhador em situações de emergência.
- d) após a avaliação dos riscos de engolfamento, afogamento, soterramento e sufocamento, bem com a adoção de medidas para controlar esses riscos.

31.13.8 Nos silos hermeticamente fechados, só deve ser permitida a entrada de trabalhadores após a renovação do ar ou com proteção respiratória adequada. (NR 31).

2.6.2 NR - 33:

A NR 33 é voltada ao trabalho em espaços confinados. No item 33.1.2 tem-se a seguinte definição: “Espaço confinado é qualquer área ou ambiente não projetado para ocupação humana contínua, que possua meios limitados de entrada e saída, cuja ventilação existente é insuficiente para remover contaminantes ou onde possa existir a deficiência ou enriquecimento de oxigênio”. Portanto, quando um operador for trabalhar em um silo, é preciso que esteja treinado adequadamente, visto que é um ambiente que apresenta muitos riscos.

2.6.3 NR - 12:

Esta NR é voltada para a segurança em máquinas, com a finalidade de evitar acidentes, tais como amputações, esmagamentos, entre outros, que podem advir de partes móveis das máquinas.

Os silos armazenadores tem roscas varredoras no fundo. A função destas roscas é para que, quando o silo for esvaziado, seja viável realizar uma limpeza eficiente no interior dos silos para poder trocar de produto, por exemplo, e não ter misturas de grãos.

Estas roscas têm helicoidais acionados por um motor elétrico. Esta parte móvel das roscas é muito perigosa, uma vez que gira em altas rotações e pode amputar algum membro dos trabalhadores. Importante ressaltar que as roscas precisam estar em adequação com a NR 12.

Os silos também têm fitas transportadoras inferiores e superiores, exemplificadas pela Figura 15. As fitas superiores têm como função trazer os grãos, depois de limpos e secos, para serem armazenados. Já através das fitas inferiores tira-se os grãos do interior dos silos para expedir para os caminhões, trens, etc.

Estas fitas são lonas que deslizam através de polias, as quais precisam estar adequadas às normas, pois se um trabalhador delas cair, pode ser esmagado em um *tripper* ou um aparador fim de fita.

Figura 15 – Fita transportadora dos silos



Fonte: O autor (2022)

2.7 ESTADO DA ARTE

Nascimento e Queiroz (2011) compilaram conteúdos sobre o desempenho de três diferentes estratégias de aeração de milho armazenado, sendo elas: aeração contínua, aeração noturna e aeração em condições de equilíbrio higroscópico entre os grãos e o ar ambiente. Utilizaram grãos de milho com dois níveis de teor de água, um de 11% e outro de 17%. Realizaram o monitoramento contínuo da temperatura e as amostras de grãos foram retiradas durante os ensaios para análise do teor de água. Observaram que todas as estratégias de aeração favoreceram a redução da temperatura nos grãos secos (11%) e umidificados (17%). A estratégia de aeração contínua foi a mais eficiente em grãos úmidos, uma vez que evitou aquecimento dos grãos durante o armazenamento. Nenhuma estratégia de aeração manteve-se a temperatura homogênea no interior dos grãos durante a armazenagem, pois variou conforme as condições climáticas. O teor de água dos grãos sofreu variações durante os ensaios, com tendência de secagem no final do processo.

Já para o autor Silva (2016), a adequada operação do sistema de aeração requer conhecimentos sobre as condições higroscópicas da massa de grãos e psicrométricas do

ar. Deste modo, é imprescindível que o operador esteja devidamente treinado para evitar: (a) a supersecagem ou o umedecimento do produto; e (b) a alteração das condições psicrométricas do ar intergranular potencializando o desenvolvimento de microrganismos (fungos e bactérias). É também necessário que o sistema de aeração esteja devidamente projetado, implantado e que durante a operação sejam monitorados: (a) a vazão de ar em diversos pontos da massa de grãos; e (b) o sistema de termometria para garantir a uniformidade dos valores das temperaturas do produto armazenado.

Quanto ao tempo de duração da operação, dependeu, basicamente, da intensidade do fluxo de ar empregado e das extensões dos períodos de tempo, em que, as condições do ar ambiente são propícias à condução da aeração. Para previsão desse tempo foram utilizados programas de computador baseados em modelos matemáticos, que descrevem as trocas de calor e massa entre o ar e o produto armazenado.

Conforme o artigo publicado por OLIVEIRA et al. (2007), o resfriamento de grãos por ventilação de ar ambiente aplica-se amplamente nas etapas finais de secagem e para controle posterior da temperatura de grãos armazenados. O objetivo do artigo foi em realizar o estudo teórico-experimental sobre o estado térmico de massa de grãos de soja sujeita à aeração. Foram obtidos dados experimentais sobre a dinâmica de resfriamento de massa pré-aquecida de grãos de soja para diferentes alturas da coluna de grãos e velocidades do ar. A análise dos resultados mostrou que a taxa de resfriamento varia significativamente durante todo o processo e em todo o domínio e a difusividade térmica das camadas não poderia ser considerada constante. Para simular a dinâmica de resfriamento, foram apresentados dois modelos matemáticos. No primeiro modelo, o domínio de resfriamento foi dividido pela fronteira móvel em duas zonas, representadas por diferentes difusividades térmicas (análogo de problema de Stefan). Já no outro modelo, todo o domínio foi dividido hipoteticamente em pequenas camadas e foi considerado que o processo de equilíbrio térmico entre o ar e a massa de grãos para essas camadas é atingido instantaneamente (“reatores homogêneos”). Os resultados de simulações mostraram concordância satisfatória com os dados experimentais.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo esclarecerá questões referentes aos procedimentos metodológicos no tocante à caracterização da pesquisa, desenhando o seu respectivo tipo. Além de descrever as técnicas e instrumentos que se tem como pretensão de uso para o desenvolvimento desse estudo, bem como a definição de suas variáveis.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa prática, pois, conforme o Demo (2002) essa categoria de pesquisa é “destinada a intervir diretamente, na realidade, a teorizar práticas, a produzir alternativas concretas, a comprometer-se com soluções.” (DEMO, 2002, P. 38). A partir dessa definição, entende-se que descrever os métodos de cálculo do sistema de aeração de um silo buscará aprimorar a realidade do agronegócio, a fim de manter a qualidade da safra armazenada.

3.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

Essa pesquisa lançará mão da técnica de observação, uma vez que “...utiliza os sentidos na obtenção de determinados aspectos da realidade. Consiste de ver, ouvir e examinar fatos ou fenômenos” (MARCONI & LAKATOS, 1999, p. 90). Quanto ao tipo de participação do observador será participativa, uma vez que o autor deste estudo faz parte do quadro de colaboradores de uma empresa do ramo de agronegócio. Além de ser sistemática, pois será baseada em equações da literatura; e não estruturada, já que haverá liberdade de observação.

O sistema de aeração deste trabalho será calculado para um silo de concreto. É na etapa de estocagem do milho e soja que se necessita obter ter muito cuidado, pois é nela que ocorrem as maiores variações de temperatura, alterações metabólicas dos grãos, possibilidade de infestações, entre outros, ocasionando acentuado declínio da qualidade. Os grãos armazenados devem ser mantidos com as temperaturas mais baixas possíveis durante a sua estocagem, proporcionando maior tempo de armazenamento para a mesma qualidade. Deve-se utilizar processos de aeração, a fim de dispersar, remover ou distribuir a umidade e o calor acumulado.

A questão da temperatura é um dos fatores determinantes e favoráveis ao uso de silos de concreto, uma vez que este material possui baixa condutividade térmica. Segue abaixo as vantagens dos silos de concreto:

- a) Pode ser moldado para assumir qualquer forma;
- b) É relativamente inerte, não sendo necessária a instalação de revestimento protetor entre o grão e a parede;
- c) Normalmente requer menos manutenção que outros materiais;
- d) Devido a sua maior espessura, paredes de concreto são menos propensas a amassamento ou flambarem.

Com fins de ilustração, a figura 16 exemplifica silos de concreto, construídos em cooperativas, apresentando as dimensões semelhantes as utilizadas neste trabalho, determinados em 16 metros de diâmetro e 16 metros de altura.

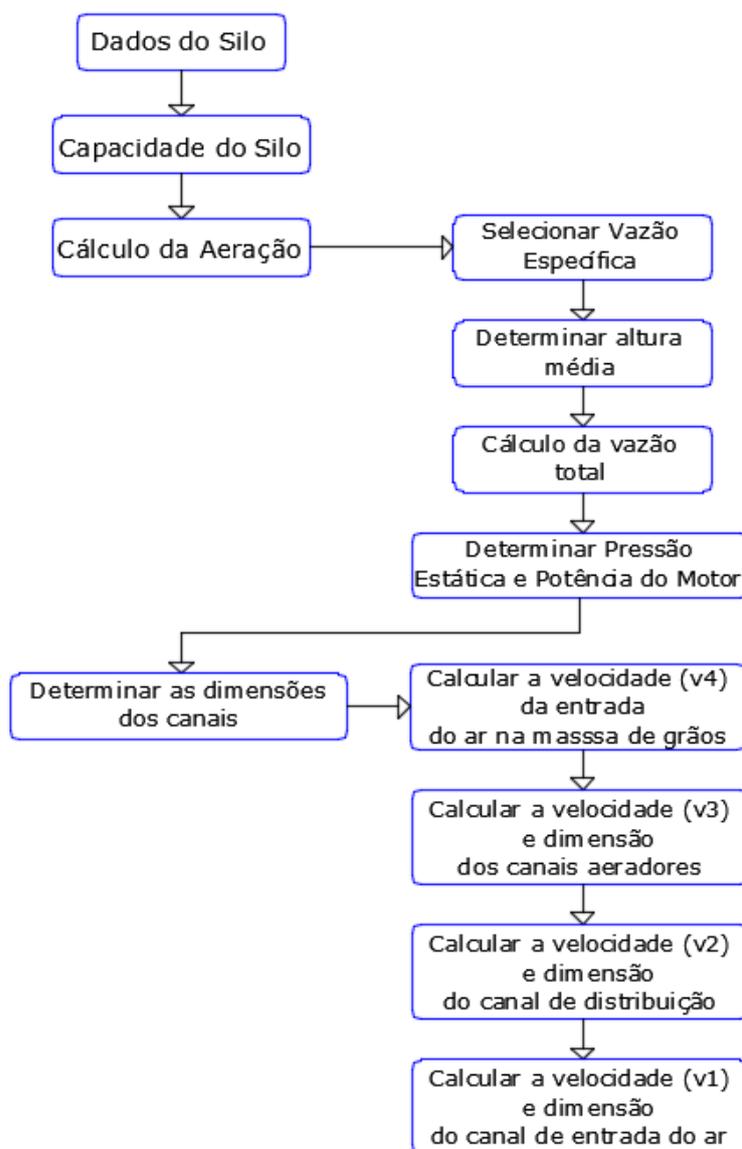
Figura 16 – Silos de concreto em construção



Fonte: O autor (2022)

Lança-se mão de um recurso, denominado de fluxograma, que tem a finalidade de auxiliar na compreensão da sequência de cálculos do sistema de aeração estipulado neste projeto. Esse fluxograma, representado pela Figura 17, indica uma a uma das variáveis presentes em cada etapa de mensuração deste dimensionamento.

Figura 17 – Fluxograma de cálculo

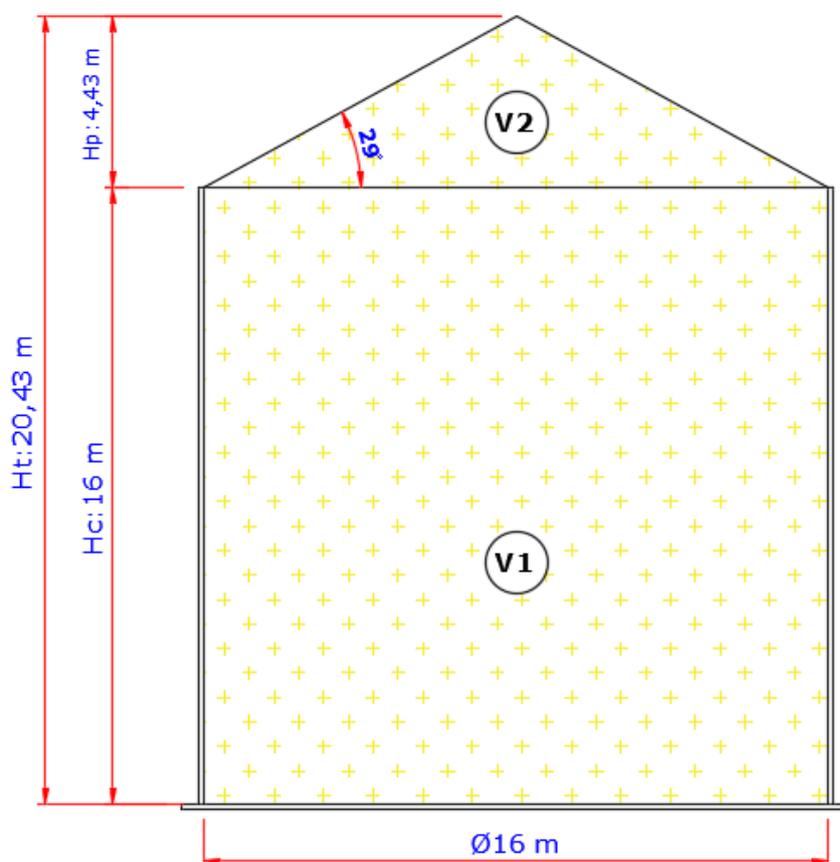


Fonte: O autor (2022)

Um fator determinante para a parametrização do silo estudado nesse projeto, é a vivência profissional do autor, visto que pratica dimensões semelhantes a 16 metros de diâmetro e 16 metros de altura em seu dia a dia. A fim de ilustrar, portanto, utiliza-se de um croqui de silo, com suas respectivas dimensões, desenhado através do software AUTO CAD 2016, conforme apresentado pela figura 18. A partir desse croqui, extrai-se as seguintes informações:

- a) Diâmetro do silo: D (m);
- b) Altura do cilindro: H_c (m);
- c) Altura do talude/pico: h_p (m);

Figura 18 – Croqui do silo



Fonte: O autor (2022)

Weber (2005) apresenta uma metodologia de cálculo de aeração para silos e armazéns, sendo essa a qual o presente trabalho baseou-se para o dimensionamento de aeração de um silo com as dimensões citadas anteriormente. Assim, a partir das informações do croqui e da metodologia do autor Weber, apresentar-se-á as equações pertinentes para esse trabalho.

Para calcular a capacidade do silo, de acordo com os dois volumes do cilindro, V1 e V2, é preciso conhecer a superfície da base (S_b) que é calculada a partir da equação 1. O resultado dessa equação também é utilizado para verificar a velocidade do ar que passa pela massa de grãos:

$$S_b = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (1)$$

O cálculo do volume do cilindro V1 é calculado a partir da equação 2:

$$V1 = S_b * H_c \quad (2)$$

Onde:

Sb= Superfície da base (m²);

Hc= Altura do cilindro (m);

Para calcular o volume do cilindro V2 (equação 3), são necessários os valores tanto da superfície da base, que já foi calculada na etapa anterior, quanto o valor de Hp, mostrado na figura 18. Além disso, é preciso identificar o ângulo que o grão forma quando está em repouso, a Tabela 7 apresenta estes valores:

Tabela 7 – Ângulo de repouso dos grãos

Material	Ângulos (graus)
Arroz com casca	36
Cevada	31
Feijão	31
Soja	29
Milho	27
Trigo	35

Fonte: Weber (2005)

$$V2 = \frac{Sb * Hp}{3} \quad (3)$$

Sb= Superfície da base (m²);

Hp= Altura do cone do V2 com seu determinado angulo (m);

O volume total do silo (Vt) é calculado a partir da soma dos volumes V1 e V2, já identificados anteriormente, sendo utilizado a equação 4.

$$Vt = V1 + V2 \quad (4)$$

Vt= Volume total (m³);

A capacidade do silo em toneladas e a capacidade em sacas pode ser calculado a partir da dimensão do silo, volume útil de armazenamento e o peso específico dos grãos, respectivamente pelas equações 5 e 6.

$$Cmt = Vt * Pem \quad (5)$$

C_{mt} = Capacidade do silo em toneladas;

V_t = Volume total (m^3);

P_{em} = Peso específico do grão (t/m^3);

$$C_{ms} = C_{mt} * \frac{1000}{60kg} \quad (6)$$

C_{ms} = Capacidade do silo em sacas;

Uma etapa subsequente do dimensionamento é a identificação da vazão específica para o milho e a soja. Todavia, a presente pesquisa utilizar-se-á apenas dos valores referentes ao milho, pois é o que oferece mais resistência ao ar. Tanto o milho quanto a soja podem ser frios e secos; quentes e secos com umidade de até 16%; apenas quentes; ou apenas frios. Os valores são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Vazão específica para aeração

Grãos	Umidade	Vazão Específica		
	(%)	($m^3/h * m^3$)	($m^3/min * m^3$)	($m^3/h * t$)
Milho	14 - 16	<u>7,5</u>	<u>0,125</u>	10,00
	16 - 18	12	0,200	16,00
	18 - 20	25	0,416	33,33
	20 - 24	40	0,666	53,33
Soja	14 - 16	5 - 12	0,075 – 0,187	6 - 15

Fonte: Weber (2005)

O próximo passo está em determinar a altura média, a partir da equação 7.

$$H_m = H_c + \frac{H_p}{2} \quad (7)$$

H_m = Altura média (m);

H_c = Altura do cilindro (m);

H_p = Altura do talude/pico (m);

A vazão total do silo é calculada a partir da vazão específica e do volume do silo, conforme a equação 8.

$$Q = q * C_m \quad (8)$$

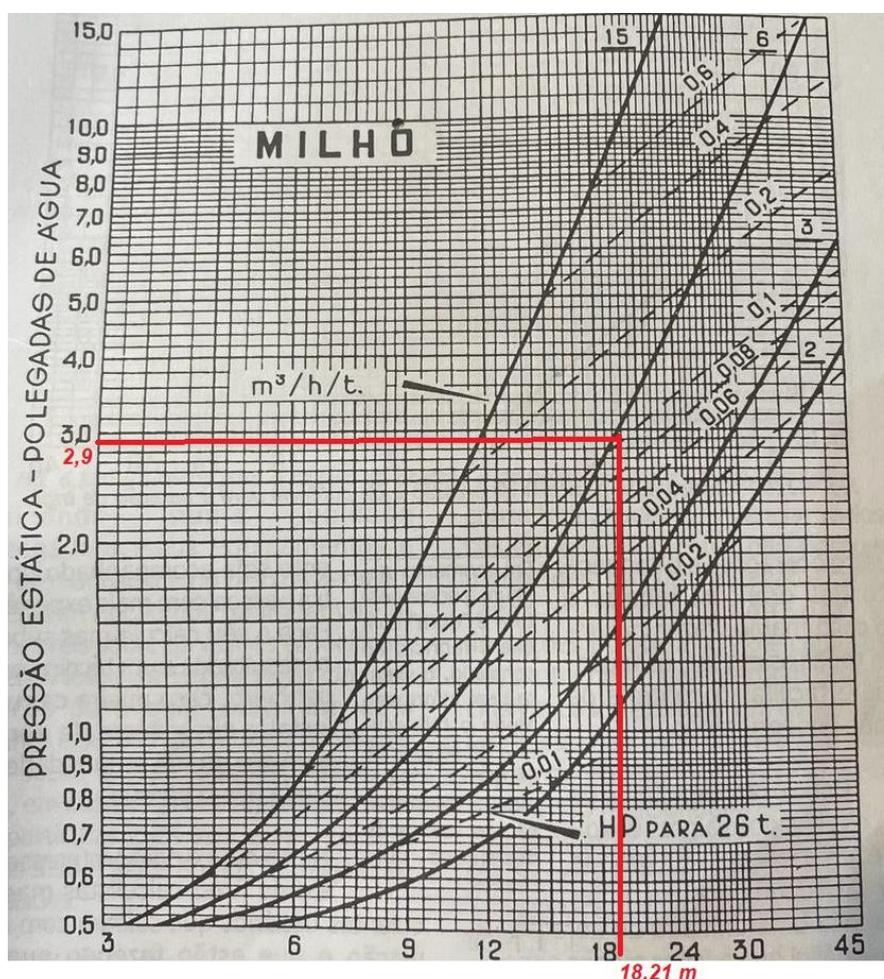
Q = Vazão total (m^3/s);

q = Vazão específica ($m^3/min * m^3$);

C_m = Volume do silo (m^3);

A determinação da pressão estática foi realizada através do gráfico da figura 19. No eixo horizontal é traçado uma linha vertical até a curva $5,625 m^3/h.t$ que deverá ser interpolada entre as curvas de 6 e $3 m^3/h.t$. Já no ponto de intersecção da interpolação foi traçado uma reta que determina a pressão estática, neste caso igual a $2,9''$. Para melhor compreensão, o valor da vazão específica foi convertido para a mesma unidade do gráfico ($m^3/h.t$), com o resultado de $5,625 m^3/h.t$.

Figura 19 – Gráfico para o cálculo da pressão e da potência na aeração de milho



Fonte: Weber (2005)

A conversão em milímetros do resultado da pressão estática, identificado anteriormente, é obtida por meio da equação 9.

$$Pe = \text{Valor obtido no gráfico} * 25 \text{ mm} \quad (9)$$

Pe= Pressão estática (mm c.a.)

A potência necessária para esta aeração também é extraída a partir do gráfico da figura 18, através da interpolação das retas paralelas de 0,1 e 0,2 HP. Nessa perspectiva, se interpolar o valor entre essas duas retas paralelas para que seja identificado o valor de 0,11 HP por tonelada de grãos no silo. Este valor se divide por $26T \times Cmt$. A equação 10 é utilizada para calcular a potência do motor elétrico, em CV (unidade comercial para compra).

$$P_m = \text{valor encontrado no gráfico} * 1,01387 \quad (10)$$

Pm= potência do motor elétrico (CV);

Weber (2005) também considera que é necessário adicionar de 20% a 40% de potência para compensar as perdas do acionamento por polias e correias, além do atrito nos canais, nas tubulações e da resistência à passagem do ar pelas chapas perfuradas. Assim, é a partir da equação 11 que é identificado a potência efetiva.

$$P_e = P_m * 1,4 \quad (11)$$

Pe= Potência efetiva (CV);

Pm= Potência do motor elétrico (CV);

O autor Weber (2005) ainda esclarece que há uma semelhança de resistência a passagem de ar entre milho e soja. No entanto, entre ambos, a soja oferece menor resistência a passagem do ar, sendo assim, um sistema calculado para grãos de milho será mais eficiente do que para a soja. Portanto, é recomendado calcular e utilizar o motor e o ventilador com referência ao milho.

Com a vazão total conhecida, é dimensionado os canais de aeração que é feito a partir das velocidades máximas recomendadas na tabela 9.

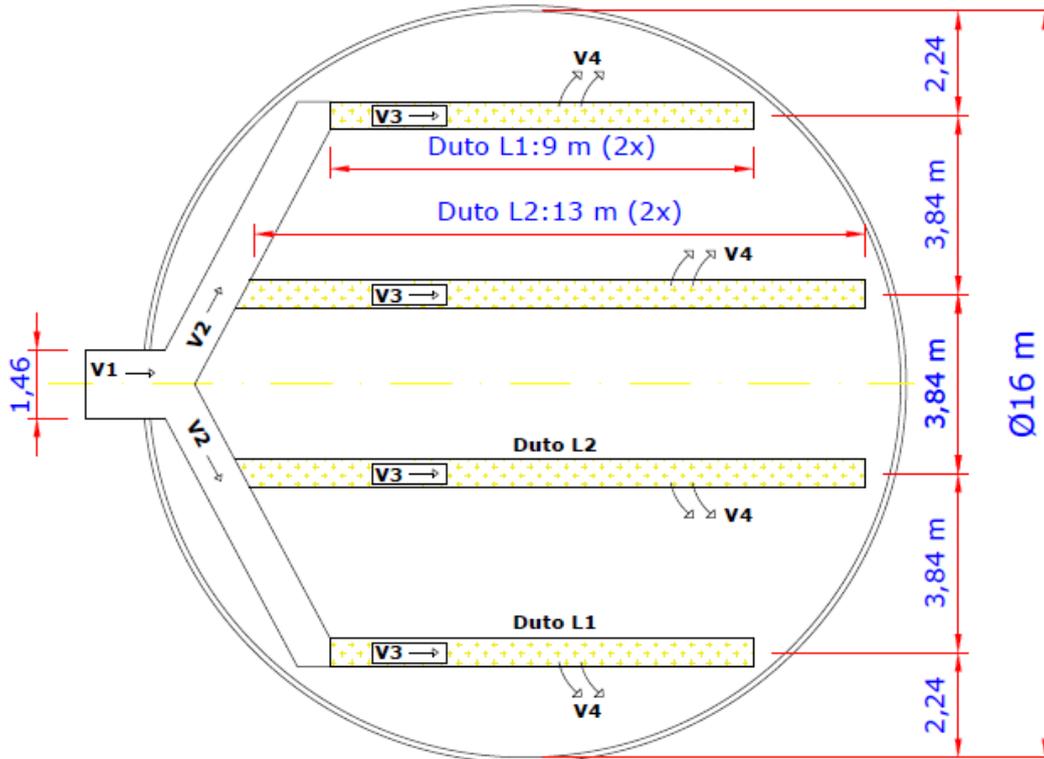
Tabela 9 – Velocidades indicadas nos dutos de ar

Ponto de medição	Velocidades recomendadas	
	m/s	m/min
Saída do ventilador (v1)	10	600
Duto de suprimento (v2)	8	480
Duto de aeração (v3)	4	240
Saída da chapa perfurada (v4)	0,25 a 0,5	15 a 30

Fonte: Weber (2005)

Já a Figura 20, é uma vista superior do silo e apresenta onde estão localizados os dutos indicados na Tabela 9.

Figura 20 – Desenho dos canais



Fonte: O autor (2022)

Na equação 12, o projeto deve atender o espaçamento dos dutos entre 1,2 e 1,7, na variável L. Esta medida deve ser testada para que contemple cada silo, conforme suas medidas. É necessário encontrar o valor de X, sendo este o afastamento entre dutos. Weber (2005) saliente que assegurar o entre centros de galerias simétricas facilita a construção civil, evitando erros no momento da execução.

$$\frac{(H + X)}{H} = L \quad (12)$$

H: altura do silo (m);

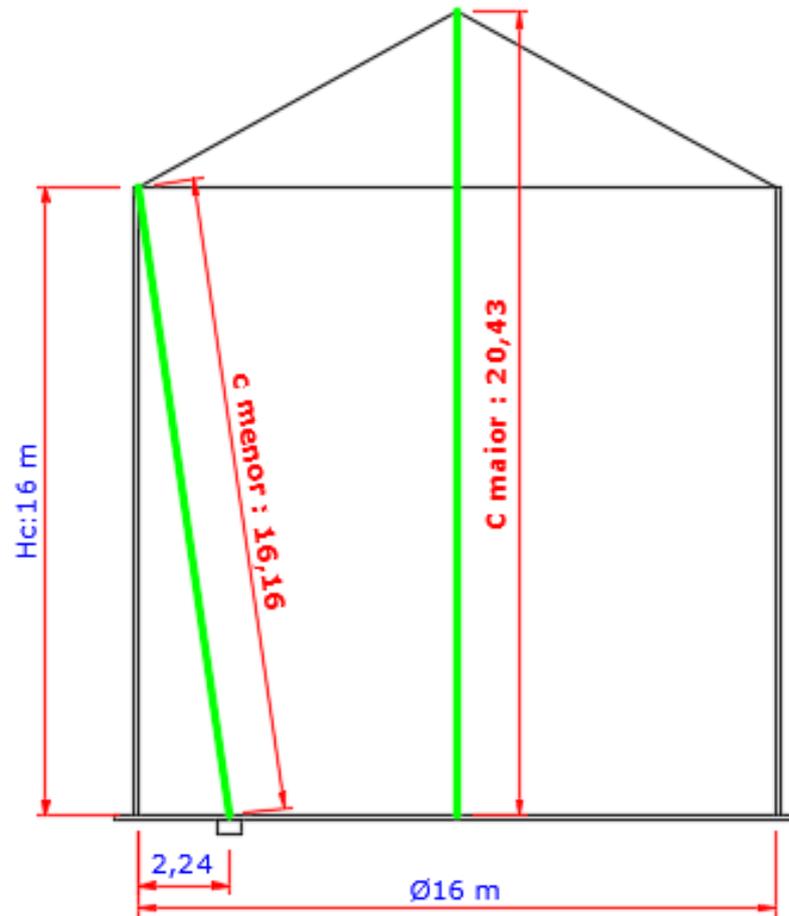
X: espaçamento entre dutos (m);

L: variável de 1,2 a 1,7;

Após definir o espaçamento entre os dutos, deve-se testar a relação do maior e menor caminho a ser percorrido, indicado na tabela 2. Já a figura 21 apresenta a relação após o cálculo do espaçamento entre dutos, sendo calculada por meio da equação 13.

$$\frac{C}{c} \leq 1,8 \quad (13)$$

Figura 21 – Relação do maior e menor caminho



Fonte: O autor (2022)

Com a vazão total mensurada, o próximo passo é realizar o cálculo dos dutos de aeração, os quais estão identificados pelo sistema de dutos paralelos na figura 19. O cálculo inicial é relacionado ao comprimento dos canais L1 e L2 e se a área dos canais aeradores são suficientes para que o ar passe para a massa de grãos com a velocidade determinada de $V_4 = 0,25$ mínima ou até a máxima de $0,50$ m/s.

A equação 14 é utilizada para somar os comprimentos dos canais (L1 e L2). Com o valor dessa soma, é verificada a velocidade da entrada do ar na massa de grãos (V_4), utilizando a equação 15. O resultado deve atender as indicações da tabela 9.

$$LT = 2 * l1 + 2 * l2 \quad (14)$$

Lt= Soma dos comprimentos dos canais (m);

L1= Comprimento canal 01 (m);

L2= Comprimento canal 02 (m);

$$V4 = \frac{Q}{E * LT} \quad (15)$$

V4 = Velocidade da entrada do ar na massa de grãos (m/s);

LT= Soma dos comprimentos dos canais (m);

Q= Vazão total (m³/s);

E= Largura útil do canal (m);

Com o valor da V4 identificado, o passo seguinte é calcular os canais aeradores e suas respectivas velocidades. A equação 16 vem para mensurar o fluxo de ar por metro linear de duto.

$$Qm = \frac{Q}{Lt} \quad (16)$$

Qm= Fluxo de ar por metro linear (m²/s);

Q= Vazão total (m³/s);

LT= Soma dos comprimentos dos canais (m);

A partir do resultado de Qm, é possível avançar para calcular o fluxo de ar que circula em cada duto, denominado de fluxo de ar no duto L1 (Ql1), por meio da equação 17. Porém, não se utiliza o valor integral, pois o ar, na medida que penetra no aeroduto, sai e entra na massa de grãos.

Desta forma, é recomendado utilizar utilizarmos o resultado extraído da equação 18, sendo o valor médio da vazão para efeito do cálculo da secção reta do aeroduto.

O fluxo de ar que se movimenta em cada duto, é proporcional ao comprimento do duto. Essa é a razão pela qual calcula-se o fluxo por metro para reconhecer os fluxos em L1 e L2, como citados nas equações 19 e 20.

$$Ql1 = L1 * Qm \quad (17)$$

Ql1 = Fluxo de ar no duto L1 (m³/s);

Qm= Fluxo de ar por metro linear (m²/s);

L1= Comprimento canal 01 (m);

$$Ql1m = Ql1/2 \quad (18)$$

Q_{l1m} = Fluxo de ar médio no duto L1 (m^3/s);

$$Q_{l2} = L2 * Q_m \quad (19)$$

Q_{l2} = Fluxo de ar no duto L2 (m^3/s);

Q_m = Fluxo de ar por metro linear (m^2/s);

$L2$ = Comprimento canal 02 (m);

$$Q_{l2m} = Q_{l2}/2 \quad (20)$$

Q_{l2m} = Fluxo de ar médio no duto L2 (m^3/s);

Após o resultado de Q_{l2m} , é preciso dimensionar o tamanho dos aerodutos e averiguar se as velocidades estão dentro do valor presentes na tabela 9. As equações 21 e 22 são utilizadas para mensurar velocidade v_3 em cada duto.

$$V_{3L1} = \frac{Q_{l1m}}{s_1} \quad (21)$$

V_{3L1} = deslocamento de ar nos aerodutos L1 (m/s)

S_1 = área do duto L1 (m^2);

Q_{l1m} = Fluxo de ar médio no duto L1 (m^3/s);

$$V_{3L2} = \frac{Q_{l2m}}{s_2} \quad (22)$$

V_{3L2} = deslocamento de ar nos aerodutos L2 (m/s)

S_2 = área do duto L2 (m^2);

Q_{l2m} = Fluxo de ar médio no duto L2 (m^3/s);

O processo subsequente é em obter a mensuração das dimensões do canal de distribuição. Considera-se a velocidade indicada na tabela 9, sendo de 8m/s. A figura 19 apresentam dois canais de distribuição, havendo uma divisão de ar do canal para dois lados. Para calcular o fluxo de ar para cada canal, utilizar-se a Equação 23.

$$Q_{\text{médio}} = Q/2 \quad (23)$$

$Q_{\text{médio}}$ = Fluxo de ar médio em cada lado do canal (m^3/s);

Posteriormente, com o resultado do fluxo médio, calcula-se o tamanho do duto de distribuição. Para isso, é preciso mensurar a seção do duto (S_2), com o uso da equação 24, e, após arbitrar a base do duto (a), adequando-o com as dimensões do silo, obtém-se a altura do duto (h_2) a partir da equação 25.

$$S_2 = \frac{Q_{\text{médio}}}{V_2} \quad (24)$$

S_2 = Seção do canal de entrada de ar (m^2);

$$h_2 = \frac{S_2}{a} \quad (25)$$

h_2 = Altura do canal de entrada de ar (m);

O último processo é o dimensionamento do canal de entrada de ar. A tabela 9 apresenta como recomendação que a velocidade máxima de entrada de ar seja $V_1 = 10$ m/s. Por meio da equação 26, encontra-se o valor da seção (S_1) e, com a equação 27, seleciona-se a altura do duto, resultando na largura do duto, obedecendo a velocidade mencionada anteriormente.

$$S_1 = \frac{Q}{V} \quad (26)$$

S_1 = Seção do canal de distribuição de ar (m^2);

$$H_1 = \frac{S_1}{a} \quad (27)$$

H_1 = Altura do canal de distribuição de ar (m);

Por conseguinte, após a realização de todas essas etapas, envolvendo a metodologia abordada por Weber (2005), através de 27 equações, atinge-se o dimensionamento de um sistema de aeração em um silo de concreto (de 16 metros de diâmetro e 16 metros de altura), utilizando-se como base o grão de milho.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos respectivos resultados obtidos para o dimensionamento da aeração em um silo de concreto de 16 metros de diâmetro com 16 metros de altura para armazenamento de milho ou soja. Os valores que serão apresentados a seguir são oriundos da metodologia de cálculo de aeração para silos e armazéns, a partir de uma sequência de fórmulas, estipuladas pelo autor Weber (2005).

4.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

As variáveis para o cálculo da aeração estão representadas no croqui de silo da Figura 18. A partir das respectivas medidas nele cotadas, realiza-se o dimensionamento deste sistema de aeração.

4.1.1 Capacidade do silo e dos produtos armazenados

A primeira etapa dos cálculos, como indicado no capítulo 3, é a capacidade do silo e dos produtos armazenados. A seguir, a tabela 10 condensa os resultados alcançados por meio de suas respectivas equações.

Tabela 10 – Apresentação dos resultados etapa 1

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Superfície da base (Sb)	201,6 m ²	Equação 1
Volume 1 (V1)	3.217m ³	Equação 2
Volume 2 (V2)	293m ³	Equação 3
Volume Total do Silo (Vt)	3.513 m ³	Equação 4
Capacidade do silo em toneladas (Cmt)	2.635 toneladas	Equação 5
Capacidade do silo em sacas (Cms)	±43.920 sacas	Equação 6

Fonte: O autor (2022)

A primeira sessão de cálculos inicia-se pela Superfície da Base. Ao prosseguir na mensuração de todos os parâmetros, encontra-se a capacidade do silo, inclusive o seu valor na unidade de toneladas.

Com base em silos disponíveis no mercado, o silo do presente estudo apresenta capacidade de 2.635 toneladas, sendo considerado um modelo de porte médio, o qual é muito utilizado em cooperativas de recebimento de grãos.

4.1.2 Cálculo da aeração

A segunda etapa de cálculos inicia pela Vazão Específica, extraída da Tabela 8, com valor de $0,125 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$, podendo ser convertido para $5,625 \text{ m}^3/\text{h.t.}$ A partir desses dados, são mensuradas as demais variáveis, como indica a Tabela 11.

Tabela 11 – Apresentação dos resultados etapa 2

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Altura Média (Hm)	18,21m	Equação 7
Vazão total do silo (Q)	7,31 m ³ /segundos	Equação 8
Pressão estática (Pe)	73,66 mm c.a	Equação 9
Potência do motor elétrico (Pm)	11,3 CV	Equação 10
Potência efetiva do motor elétrico (Pe)	15,8 CV	Equação 11

Fonte: O autor (2022)

É nessa fase que se estabelece a potência do motor elétrico necessário para o projeto de aeração. Iniciam-se os cálculos pela altura média e, após utilização do gráfico da Figura 18, encontra-se os valores da pressão estática e da potência do motor elétrico (determinado em 15,8 cv). Assim, a partir desses resultados que é possível determinar qual ventilador buscar no comércio para atender ao projeto calculado.

Já a vazão total do silo, mensurada através da Equação 8, é de suma importância, pois este valor será utilizado na próxima etapa para o dimensionamento dos dutos.

4.1.3 Cálculo dos dutos aeradores

Como explanado no capítulo anterior, é a partir da Equação 12 que se determina o valor do espaçamento entre dutos, sendo que a variável pode estar entre 1,2 e 1,7. No

silo do presente estudo foi determinado o valor de 1,24, uma vez que dutos simétricos facilitam a execução.

Com o espaçamento entre dutos mensurado, é preciso confirmar se a medida atende a relação do maior e menor trajeto a ser percorrido. Este valor é testado, a partir da Equação 13, e o resultado alcançar um valor menor ou igual a 1,8.

Ao obter o valor que atende essa relação, é possível avançar para os próximos passos já com o espaçamento entre os dutos definidos. A Tabela 12 indica os valores mensurados.

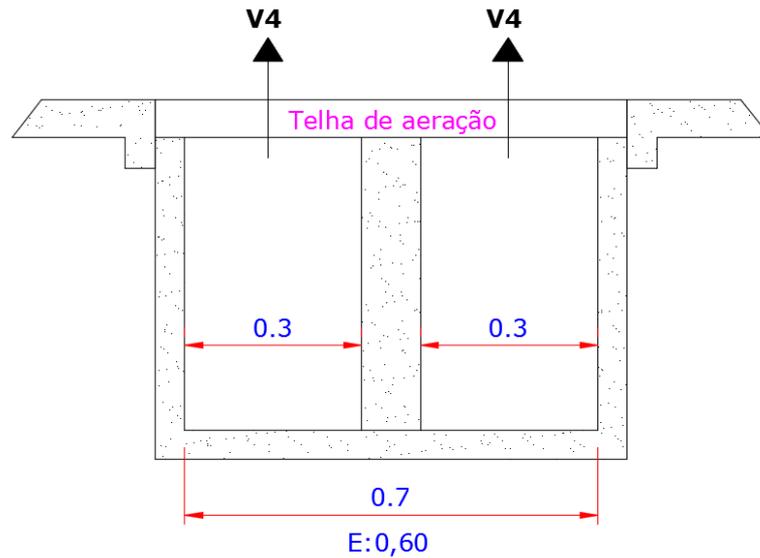
Tabela 12 – Apresentação dos resultados etapa 3

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Espaçamento ente dutos	3,84 m	Equação 12
Relação da maior e menor caminho	1,265	Equação 13
Soma dos comprimentos dos canais	44 m	Equação 14
Velocidade da entrada do ar na massa de grãos (V4)	0,27 m/s	Equação 15

Fonte: O autor (2022)

Com ilustra a Figura 22, os canais L1 e L2 estão definidos com 0,6 metros de largura. Identifica-se que o ar entra na massa de grãos com velocidade de 0,27 m/s, corroborando a recomendação presente na Tabela 9 para se manter a velocidade entre 0,25 até 0,50 m/s. Portanto, é possível confirmar que as dimensões determinadas para as tampas dos canais estão adequadas para o desempenho esperado dessa aeração.

Figura 22 – Corte nos Dutos L1 e L2 - dimensões em metro (m)



Fonte: O autor (2022)

Com o valor da V_4 identificado, o passo seguinte é calcular os canais aeradores e suas respectivas velocidades. Os cálculos começam com a equação 16 que vem para mensurar o fluxo de ar por metro linear de duto.

Tabela 13 – Apresentação dos resultados etapa 4

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Fluxo de ar por metro linear	0,1661 m ² /s	Equação 16
Fluxo de ar no duto L1	2,16 m ³ /s	Equação 17
Fluxo de ar médio no duto L1	1,08 m ³ /s	Equação 18
Fluxo de ar no duto L2	1,49 m ³ /s	Equação 19
Fluxo de ar médio no duto L2	0,75 m ³ /s	Equação 20

Fonte: O autor (2022)

Nesta etapa, calcula-se o fluxo de ar que circula em cada duto, denominado de fluxo de ar no duto L1 (Q_{L1}), por meio da equação 17. Porém, não se utiliza o valor integral, pois o ar, na medida que penetra no aeroduto, sai e entra na massa de grãos.

Desta forma, é recomendado utilizar o resultado extraído da Equação 18, sendo esse o valor médio da vazão para efeito de cálculo da secção reta do aeroduto.

O fluxo de ar, que se movimenta em cada duto, é proporcional ao comprimento do duto. Por isso, calcula-se o fluxo de ar para os dutos L1 e L2, conforme apresentado pela Tabela 13.

A etapa subsequente representa o dimensionamento do tamanho dos aerodutos e a averiguação se as velocidades estão em consonância com os valores presentes na Tabela 9. As Equações 21 e 22 que foram utilizadas para mensurar velocidade (V_3) em cada duto, sendo os resultados apresentados na Tabela 14.

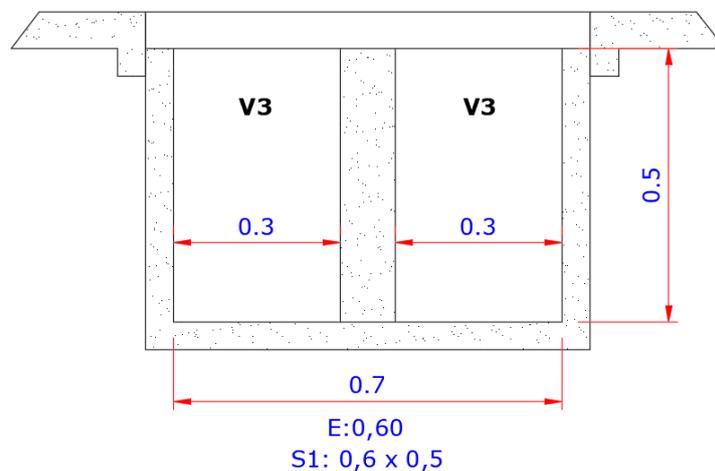
Tabela 14 – Apresentação dos resultados etapa 5

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Deslocamento de ar nos aerodutos L1	3,6 m/s	Equação 21
Deslocamento de ar nos aerodutos L2	3,57 m/s	Equação 22

Fonte: O autor (2022)

Como é possível verificar, os dutos L1 e L2 estão com suas dimensões corretas, obedecendo as velocidades indicadas na Tabela 9. O duto L1 (figura 23) apresenta dimensões de 0.6m x 0.5m, uma vez que a largura do canal aerador permite boa estrutura de cobertura (70 cm) com dois canais livres (30cm cada) e apoio central (10 cm) como ilustrado na Figura 23.

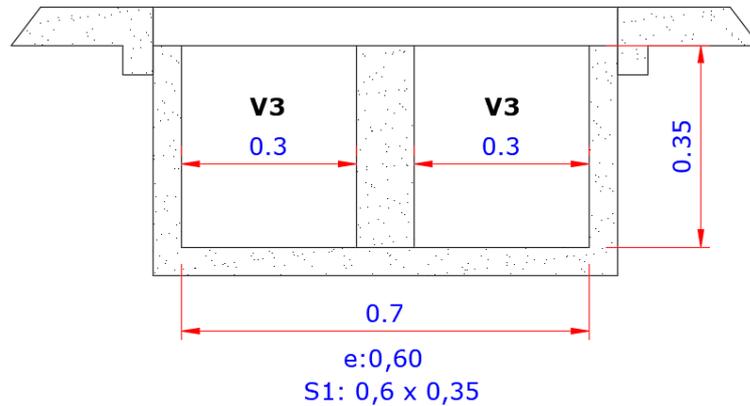
Figura 23 – Corte no Duto L1 – dimensões em metro (m)



Fonte: O autor (2022)

O canal L2 (figura 24) está dimensionado com 0.6m x 0.35m, sendo a dimensão que atende os valores de velocidade recomendados. Houve o cuidado de manter semelhantes as velocidades dos dutos L1 e L2.

Figura 24 – Corte no Duto L2 - dimensões em metro (m)



Fonte: O autor (2022)

A última fase de mensuração consiste em calcular as dimensões do canal de distribuição e do canal de entrada do ar. A Tabela 9 indica que o canal de distribuição tem velocidade de até 8m/s e o canal da entrada do ar de até 10m/s. Já a Tabela 15, apresenta os resultados para estes dutos.

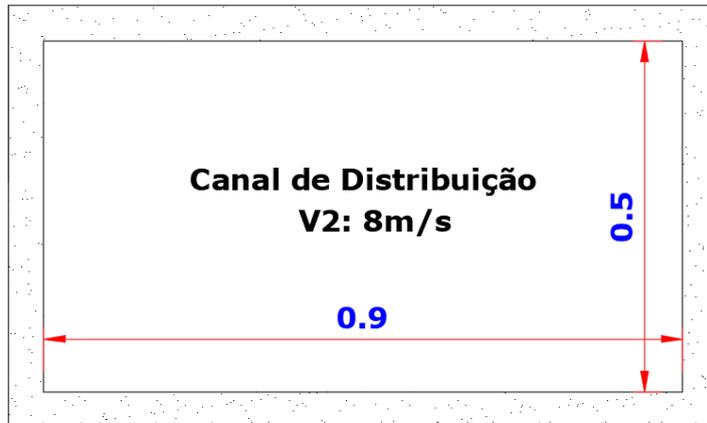
Tabela 15 – Apresentação dos resultados etapa 6

Parâmetro calculado	Resultado	Equação utilizada
Fluxo de ar médio em cada lado do canal	3,65 m ³ /s	Equação 23
Seção do duto (S2)	0,45 m ²	Equação 24
Altura do duto (h2)	0,5 m	Equação 25
Valor da seção (S1)	0,73 m ²	Equação 26
Altura do duto (H1)	1,46 m	Equação 27

Fonte: O autor (2022)

Os canais de distribuição foram divididos em dois, como mostra a Figura 20. Estes canais ligam o canal de entrada do ar com os dutos L1 e L2, os quais foram calculados para ter a velocidade máxima recomendada, determinada em 8m/s. Os mesmos também são feitos de concreto, como os dutos L1 e L2, e tem dimensões de 0,9m x 0,5m, como apresentado na Figura 25.

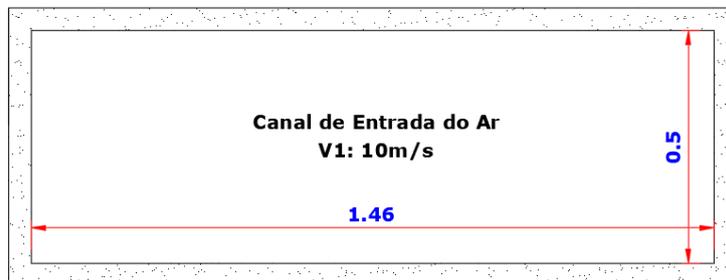
Figura 25 – Corte no canal de distribuição – dimensões em metros (m)



Fonte: O autor (2022)

O canal de entrada do ar é responsável por ligar o ventilador com os canais de distribuição, sendo projetado para ter a velocidade máxima, determinada em 10m/s, e com as medidas de 1,46m x 0.5m como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Corte no canal de entrada do ar – dimensões em metros (m)



Fonte: O autor (2022)

4.2 DISCUSSÃO

A escolha do ventilador foi determinada a partir da potência, a qual tem valor definido em 11,3 CV, de acordo com a Figura 18. A partir dessa informação, com uso da Equação 11, estabelece-se a potência do motor elétrico necessário para o projeto de aeração, sendo de 15,8 cv.

$$P_e = 11,3 * 1,4 = 15,8 \text{ cv}$$

Existem diversos tipos de ventiladores comercializados com modelos e rotações definidos. Portanto, a escolha do ventilador deve ser feita considerando os modelos disponíveis no mercado. Por esse motivo, o ventilador selecionado para a presente

pesquisa apresenta 4 polos e 1112 rpm, sendo do fabricante Projelmec. As principais características do ventilador estão discriminadas na Tabela 16. Já as figuras 27 e 28 mostram detalhadamente todas as especificações técnicas desse ventilador.

Tabela 16 – Especificações Técnicas do ventilador

Modelo	Diâmetro (mm)	Motor (CV)	Rotação (RPM)	Rendimento (%)
ILS 800	800	15	1112	74.6

Fonte: Projelmec – Seleção de ventiladores (2022)

Figura 27 – Seleção do Ventilador

Item	Ref	Qt	Modelo	Vazão m³/h	Press.Est. mmCA	Temp. °C	Altitude m	Densidade kg/m³
1		1		26000	73.66	20.0	0	1.205

ISS	CSS	PDI	ILS	CLS	IFS	CFS	PLL	TC
ISD	CSD	HVB	ILD	CLD	IFD	CFD	PAF	TC
ILS	630 III	710 II	800 II	900 I	1000 I	1120 I	1250 I	1400 I
Vazão m³/h	26000	26000	26000	26000	26000	26000	26000	26000
Vd m/s	22.1	17.4	14.3	11.3	9.0	7.2	5.8	4.6
RPM 1/min	1905	1439	1112	881	734	621	542	479
Rend %	58.4	67.3	74.6	79.2	81.0	80.4	77.9	74.8
PAbs.op CV	17.1	13.2	11.1	9.9	9.4	9.2	9.4	9.7
PAbs.std CV	17.1	13.2	11.1	9.9	9.4	9.2	9.4	9.7
Motor CV/P	20/4	20/4	15/4	12.5/4	12.5/4	12.5/4	12.5/4	12.5/4
LpA 1.5 m dBA ¹	89	86	82	79	76	76	76	77

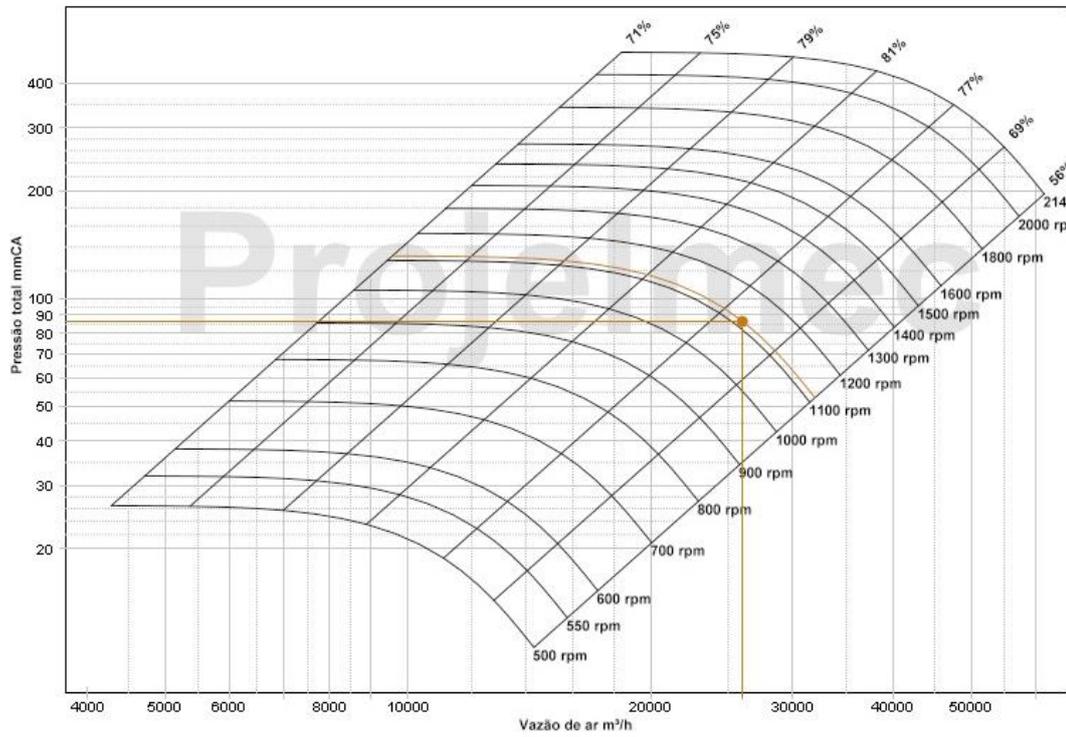
<input checked="" type="checkbox"/> Selecionar	<input type="checkbox"/> Rend.	<input type="checkbox"/> Nova Rot.	<input type="checkbox"/> Imp. Cálculo	1.5 m
--	--------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	-------

¹Pressão sonora no duto de aspiração ou descarga.

Fonte: Projelmec – Seleção de ventiladores (2022)

Com o auxílio do software da Projelmec, insere-se os dados de vazão e de pressão que representa o funcionamento do ventilador e, por isso, elenca-se o ventilador ILS 800, pois é o que atende as necessidades com a potência requerida de 15 CV. A Figura 28 apresenta, detalhadamente, a curva características deste ventilador.

Figura 28 – Curva característica do Ventilador



Fonte: Projelmecc – Seleção de ventiladores (2022)

5 CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO

A crescente produção de milho e soja no País, torna-se indispensável a redução de perdas e prolongamento do período de armazenagem desses grãos. A produção, o transporte, o beneficiamento, a armazenagem, a comercialização e o consumo de alimentos constituem uma cadeia de atividades vitais para a população, conforme Weber (2005), justificando a importância da estocagem para o agronegócio. Uma das formas de conservar a qualidade física e fisiológica desses grãos, fora de sua sazonalidade, estão nas boas práticas agrícolas relacionadas ao dimensionamento correto de um sistema de aeração para silos no processo de armazenagem, pois é a estratégia de maior eficiência para a redução de desperdícios dessas sementes.

A técnica de aeração de grãos, originada nos Estados Unidos e em alguns países da Europa (desde os anos 40), está em constante aperfeiçoamento e é considerada fundamental atualmente (CENTREINAR, 2009). Esse sistema consiste na movimentação forçada do ar ambiente adequado através da massa de grãos, com o propósito de diminuir e uniformizar a temperatura, proporcionando a essa massa de grãos condições favoráveis para conservação e qualidade durante um período prolongado dentro de silos ou armazéns (WEBER, 2001).

Diante da perspectiva sobre dimensionamento de um sistema de aeração para milho ou soja, o presente trabalho analisou os parâmetros de um silo de medidas bastante usuais e bastante praticadas pela vivência profissional do autor no agronegócio. As dimensões utilizadas foram de 16 metros de altura e 16 metros de diâmetro, bem como feito de concreto, pois, segundo Knob (2010), apresenta baixo custo de manutenção, vida útil muito maior e com fácil sistema de manipulação de grãos.

Por se tratar de um assunto bem específico ao agronegócio, há certa deficiência de profissionais capacitados no mercado de trabalho que dominem o tema. Por essa razão, a metodologia esplanada no presente estudo, ao ser apresentada detalhadamente, espera-se esclarecer e apoiar os profissionais que necessitam dimensionar um sistema de aeração para um silo ou armazém, com respectivas medidas, contribuindo para a Literatura.

A metodologia de cálculo deu-se a partir dos métodos apresentados na obra do autor Weber (2005). A sequência de equações descritas determinou em primeiro lugar, os valores para a capacidade dos silos e dos produtos armazenados; em segundo lugar, os cálculos da aeração; e, em terceiro lugar, os cálculos dos dutos aeradores. A partir dessa

metodologia, conclui-se que houve êxito deste trabalho no dimensionamento de um sistema de aeração para o respectivo silo armazenador de milho e soja, sendo inclusive economicamente viável.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, elenca-se o estudo da técnica de simulação por elementos finitos para predição da distribuição do fluxo de ar nos dutos. Além de estudos sobre a verificação se a velocidade do ar na superfície dos grãos tende a ser uniforme em todo o silo.

REFERÊNCIAS

ALÉ, J. V. **Sistema de Ventilação Industrial – Ventiladores**. PUCRS – Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, abril, 2001.

ALVES, G. C. **Efeito da inoculação de bactérias Diazotróficas dos gêneros Herbaspirillum e Bulkhorderia em genótipos de milho**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro – Seropédica, RJ, 2007.

BLASZAK, S. P. **Modelagem matemática do escoamento do ar em massa de grãos com porosidade variável**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2005.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora Nº 12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR12/NR-12.pdf>>. Acesso em: 17/09/2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora Nº 31: Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária**. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-31.pdf>. Acesso em: 17/09/2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora Nº 33: Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados**. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-33.pdf>. Acesso em: 18/09/2022.

BROOKER, D. B; BAKKER-ARKEMA, F.W; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. 5ª Ed. Wesport, The AVI Publishing Company, 1982.

CENTREINAR. **Aeração de Grãos partes I, II e III**. Viçosa, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2020/2021**. 9º. Levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 16/09/2022.

COSTELLA, Marcelo Fabiano. **Amostra de Poeira método de coleta e análise para avaliar os riscos de explosões de poeira em unidades de recebimento e armazenamento de grãos**. **Gestão & Produção**, v.23, n. 3, 2016.

EXAME. 2022. Disponível em: <<https://exame.com/agro/agro-gera-27-das-riquezas-do-brasil-e-e-setor-seguro-e-promissor-para-quem-quer-investir-veja-oportunidades/>>. Acesso em 20/09/2022.

GOMES, C. J. **Melhoramentos em um Ventilador Centrífugo através de uma Simulação Numérica**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GOMES, E. A. **Estudo dos Parâmetros para o Dimensionamento de Aeração de Silos**. Trabalho de Conclusão de Curso (1998), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUI, Ijuí.

GUERREIRO, R. T. **Seleção de *Bacillus ssp.* Promotores de crescimento de milho**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Oeste Paulista (UNOESTE) – Presidente Prudente, SP, 2009.

HARA, T. Aeração com Qualidade. **Cultivar**, Viçosa, 2003.

KNOB, A. H. **Aplicação do procedimento de imagens digitais para análise da anisotropia da massa de grãos**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, 2010

MORAES, Wanderson Bucker. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 2, 2011.

MOZZAQUATRO, E. M. S. S., ALMIRÃO, D. D. O., RIGHI, A. P., & LOPES, J. C. D. S. Viabilidade econômica da cultura da soja em uma propriedade rural. **REVISTA CONGREGRA-MOSTRA DE TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO – ISSN 2595-3605**, v.1 – 2017.

NASCIMENTO, G. R. V., QUEIROZ, R. M., Estratégia de Aeração de Milho Armazenado: Temperatura e Teor de Água Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/3yV3QvC6MFvC4hwRYgrWbWR/abstract/?lang=pt>>. Acesso em 18.09.2022

OLIVEIRA, A. F, KHATCHATOURIAN, O. BIHAIN, A. Estado Térmico de Produtos Armazenados em silos com sistema de areação: Estudo Teórico e Experimental (2007). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/7QCJJzR8tw3TPBfbnjrjRvR/?lang=pt>. Acesso em 15.09.2022.

OTAM VENTILADORES INDUSTRIAIS. **Manual Técnico. Boletim Técnico nº 2: Leis dos Ventiladores**. Porto Alegre.

PERINAZZO, A. F. **Desenvolvimento de bancada para testes de ventilador**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Centro Universitário Feevale, Novo Hamburgo, 2009.

PONTES, H. L. J., DO CARMO, B. B. T., & PORTO, A. J. V. (2009). **Problemas logísticos na exportação brasileira da soja em grão**. *Sistemas & Gestão*, v. 4, n. 2, 2009.

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grão: armazéns e silos**. Editora Agronômica Ceres. Campinas, 1977

SILVA, J. de S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2º Ed. Editora Aprenda Fácil. Viçosa, 2008.

Silva, L. C., **Boletim Técnico**: AG: 01/11 em 15/12/2011 – Revisado em 20/02/2016 - UFES – Universidade Federal do Espírito Santo Departamento de Engenharia de Alimentos – Campus de Alegre, Alegre: ES, (2016).

Silva, L. C., **Boletim Técnico**: AG: 02/05 em 29/03/2005 – Revisado em 06/07/2015 - UFES – Universidade Federal do Espírito Santo Departamento de Engenharia de Alimentos – Campus de Alegre, Alegre: ES, (2015).

SPERANDIO, Á. R. **Dimensionamento de um Sistema de Aeração para Silo e Simulação CFD**, Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI Panambi, 2013

SPERANDIO, A. R. **Análise de eficiência e consumo energético de um sistema de aeração para silo**. Trabalho Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

WEBER, E. A. **Armazenagem Agrícola**. Ed. Agropecuária, 2001.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. 1ª Ed. Panambi, 2005.