

Análise e dimensionamento de sistema de aeração para armazéns graneleiros fundo plano

Gustavo Henrique Brun Bebber, Engenharia Civil, Integrado, Brasil,
gustavobebber@hotmail.com

Resumo: O Brasil apresentou um aumento de 60,5% na produção de cereais e apenas 30,5% na capacidade de armazenagem de 2013 a 2023, isso traz um déficit de armazenagem. Junto com o aumento da produtividade houve um aumento da tecnologia empregada na colheita de cereais, que faz concentrar maior volume de recebimento no mesmo dia em uma unidade armazenadora, necessitando de maior velocidade de resfriamento dos produtos e conforme EMBRAPA 2023 apresenta para aumentar a velocidade de resfriamento é necessário aumentar a taxa de vazão específica da aeração. O intuito desse trabalho foi de realizar projeto de um sistema de aeração para um armazém fundo chato novo ou existente, aumentando a taxa específica de vazão de ar, com dutos esculpidos no concreto e garantindo melhor eficiência do embarque e qualidade do produto, auxiliando a evitar perdas financeiras por quebra técnica, em um armazém com dimensões de 35 m de largura por 70 m de comprimento. Usou-se a metodologia da UFV para cálculo da capacidade do armazém, para a seleção dos ventiladores foi utilizado a equação de Hukil e Ives para o cálculo de pressão e selecionado via software. Resultou-se capacidade estática para soja de 19.944 toneladas, gerando uma vazão de 3988 m³/min, pressão de 56,18 mmca, 249,3 m² de área de chapa perfurada, canais com 1,12 m² de área e relação de maior e menor caminho de 1,38. Mostrando a viabilidade da transformação e do aumento de taxa de aeração, servindo como apoio para futuros projetos e estudos.

Palavras-chave: Aeração. Armazéns. Graneleiros. Cubagem.

Summary: Brazil showed an increase of 60.5% in cereal production and only 30.5% in storage capacity from 2013 to 2023, resulting in a storage deficit. Along with the increase in productivity, there was an increase in the technology used in the harvesting of cereals, which concentrates a greater volume of receipt on the same day in a storage unit, requiring a greater speed of cooling of the products and as EMBRAPA 2023 presents to increase the speed of cooling it is necessary to increase the specific aeration flow rate. The aim of this work was to design an aeration system for a new or existing flat-bottom warehouse, increasing the specific air flow rate, with ducts carved into the concrete and ensuring better shipping efficiency and product quality, helping to avoid financial losses due to technical breakdown, in a warehouse measuring 35 m wide by 70 m long. The UFV methodology was used to calculate the warehouse capacity, for the selection of fans the Hukil and Ives equation was used to calculate pressure and selected via software. The result was a static capacity for soybeans of 19,944 tons, generating a flow of 3988 m³/min, pressure of 56.18 mmca, 249.3 m² of perforated plate area, channels with an area of 1.12 m² and a ratio of greater and shortest path of 1.38. Showing the feasibility of the transformation and increasing the aeration rate, serving as support for future projects and studies..

Keywords: Aeration. Warehouses. Bulk carriers. Cubage.

INTRODUÇÃO

A produtividade dos cereais tem apresentado um grande aumento ao longo dos anos, segundo o boletim CONAB (2023) de levantamento de safra 2022/2023. A estimativa de produção total no Brasil foi de 320,1 milhões de toneladas de grãos, o que representa um aumento de 60,5% em relação à safra 2013/2014, que foi de 193,7 milhões de toneladas. Esse aumento reflete na necessidade de aumento de capacidade estática de armazenagem, que neste mesmo período aumentou apenas 30,5%, e nos aumentos de eficiência do beneficiamento dos grãos.

O aumento dessa capacidade estática pode ser promovido através da construção de silos e armazéns graneleiros, que são unidades de concreto ou alvenaria em que a massa de grãos é separada por septos divisórios, apresentando fundo em “v”, “w” ou plano. Ou pela transformação de armazéns convencionais, que são unidades adequadas à guarda de grãos embalados em sacarias, em armazéns granelizados (Maia, 2013).

A principal adaptação para transformar um armazém convencional em um armazém graneleiro é a instalação de sistema de aeração, que nesses casos necessitariam de criar canaletas nos pisos ou instalação de dutos metálicos para a passagem do ar dos ventiladores que promoverão a aeração dos grãos (Mesquita et al., 2007).

O processo mais importante para um armazenamento de grão de qualidade é a aeração, que consiste na passagem forçada de ar ambiente adequado, com o objetivo geral de diminuir e uniformizar a temperatura, propiciando a essa massa condições favoráveis para a conservação de qualidade por um longo período (Weber, 2005).

Com o aumento de produtividade, o setor de equipamentos agrícolas de colheita desenvolveu colhedoras de grãos autopropelidas mais eficientes, com maior capacidade horária de colheita. Tal constatação explica os grandes fluxos de transporte do produto colhido e direcionamento às unidades de pré-processamento e armazenagem (Afonso, 2013). Os sistemas de aeração dimensionados no passado não trazem a eficiência e velocidade de resfriamento compatíveis com esses novos volumes de recebimento, sendo necessário a substituição ou melhoria nesses sistemas.

Para diminuir a velocidade de resfriamento dos grãos, foi necessário aumentar o volume de ar inserido no sistema, aumentando a capacidade dos ventiladores. No entanto, para que o balanço hidráulico dos fluidos (ar) se mantivesse seguindo os padrões desejados, foi necessário aumentar a seção transversal das canaletas, caso já existente. Essa abordagem seguiu as diretrizes apresentadas por Weber, em seu artigo de 2005, usando como base a equação 14 descrita no referido trabalho.

Os projetos de sistemas de aeração mais antigos tinham, em sua maioria, o dimensionamento da vazão de ar calculado de 0,1 m/s por tonelada de produto, pois para o volume de grãos recebido por dia, era o suficiente para um gradiente.

Tabela 1 – Fluxo de ar de aeração (silva, 2008)

Tipo de instalação	Fluxo de ar	
	m ³ /min.m ²	L/min.m ³
Silo graneleiros fundo plano	0,1 a 0,2	78 a 156
Silos	0,03 a 0,1	23 a 78
Silos-Pulmão	0,3 a 0,6	234 a 468
Silo-Secador	0,5 a 1,0	390 a 780

m²: metros quadrados; min: minutos; L: litros; m³: metros cúbicos.

Nos armazéns graneleiros, há variações de altura de massa de grãos que estão armazenados. Assim, nos projetos de aeração, é necessário lidar com uma complexidade maior. Nestes projetos, a aeração é dividida em duto central e dutos laterais. No duto central, passa um maior volume de ar (CENTREINAR 2009).

Os dutos de aeração em armazéns de fundo plano ou semi-v podem ser de canaletas esculpidas no concreto ou em dutos metálicos sob o piso. No entanto, existem diversas vantagens em realizar canaletas no concreto. Entre as principais está a eficiência e agilidade do embarque desses grãos armazenados com o auxílio da pá-carregadeira. Com o correto dimensionamento, permite que o veículo trafegue por todo o armazém, auxiliando na retirada e descarga dos grãos, sem a necessidade de remoção dos dutos. As imagens 1 e 2 trazem visualmente a facilidade de movimentação da máquina com os dutos esculpidos.



Figura 1 – Armazém Semi-V com dutos metálicos. Fonte: Autor



Figura 2 - Armazém Semi-V com dutos metálicos. Fonte: Autor

Outra vantagem é a redução da mão de obra para a execução da expedição de produtos. Com os dutos metálicos, é necessário que os funcionários do armazém retirem esses dutos metálicos conforme o armazém for esvaziando para que a pá carregadeira possa trabalhar, ou que utilizem rodos ou pás para puxar esses produtos das laterais até as descargas centrais, o que é considerado um trabalho insalubre e pouco ergonômico (Amarilla, 2012).

O armazenamento de grãos deve ser tratado como armazenamento de produtos alimentícios, então as questões de higiene e limpeza são importantíssimas para uma correta armazenagem. Com isso, as canaletas esculpidas no concreto apresentam mais uma vantagem em relação aos dutos metálicos, pois facilitam a limpeza do armazém, deixam menos produtos acumulados e facilitam o processo de expurgo, que é a eliminação de insetos do interior do armazém.

Este trabalho desenvolverá um projeto e dimensionamento de um sistema de aeração em armazém graneleiro de fundo “semi-v” ou plano, com dutos esculpidos no concreto do piso. O objetivo foi a substituição do sistema de aeração já existente de dutos metálicos, que dificultam a operação de embarque de produtos agrícolas (grãos), ou a transformação de armazéns convencionais, que realizam armazenagem com sacarias, em armazéns graneleiros para o armazenamento de cereais a granel, com aeração para o resfriamento desses. Isso visa aumentar a capacidade estática de armazenamento, melhorar a capacidade de resfriamento, possibilitando manter maior qualidade dos produtos, facilitar o manejo dos produtos e agilizar os processos agrícolas envolvidos para um armazém graneleiro. Serão apresentados os equipamentos necessários e o projeto executivo.

MÉTODO

Num projeto de sistema de aeração de armazém graneleiro, foi necessário elaborar a planta baixa e os cortes verticais e horizontais do armazém ou realizar levantamento das dimensões do referido. Juntamente com isso, foi necessário levantar quais os cereais seriam armazenados, pois essa informação traçaria todos os cálculos referentes à capacidade estática e pressão necessária. Os dimensionamentos de canais e a estrutura dos dutos dependeram dos cálculos de volume de ar e das escolhas dos ventiladores. Os grãos selecionados para serem armazenados foram soja e milho, e foram usados dados referentes a esses para o dimensionamento.

O projeto foi realizado com base em um armazém fundo chato existente, com dimensões conforme dados obtidos a campo. Cujas dimensões eram as seguintes:

Comprimento: 70 m

Largura: 35 m

Inclinação do talude lateral: 42°

Altura talude lateral: 3,15 m

Comprimento talude lateral: 2,82 m

Altura parede lateral: 4 m

Elaborou-se todos os cálculos necessários para dimensionar os ventiladores que atenderam a areação do armazém, o dimensionamento dos canais esculpido no concreto para o transporte do ar externo até o produto e as áreas de chapas perfuradas metálicas necessárias para passagem do ar com velocidade adequada. Atendeu-se as remediações normativas, garantindo manutenção da qualidade do produto e a eficiência do sistema de aeração.

A figura 3 apresentou o fluxograma de roteiro para o dimensionamento e execução, visando facilitar o entendimento.

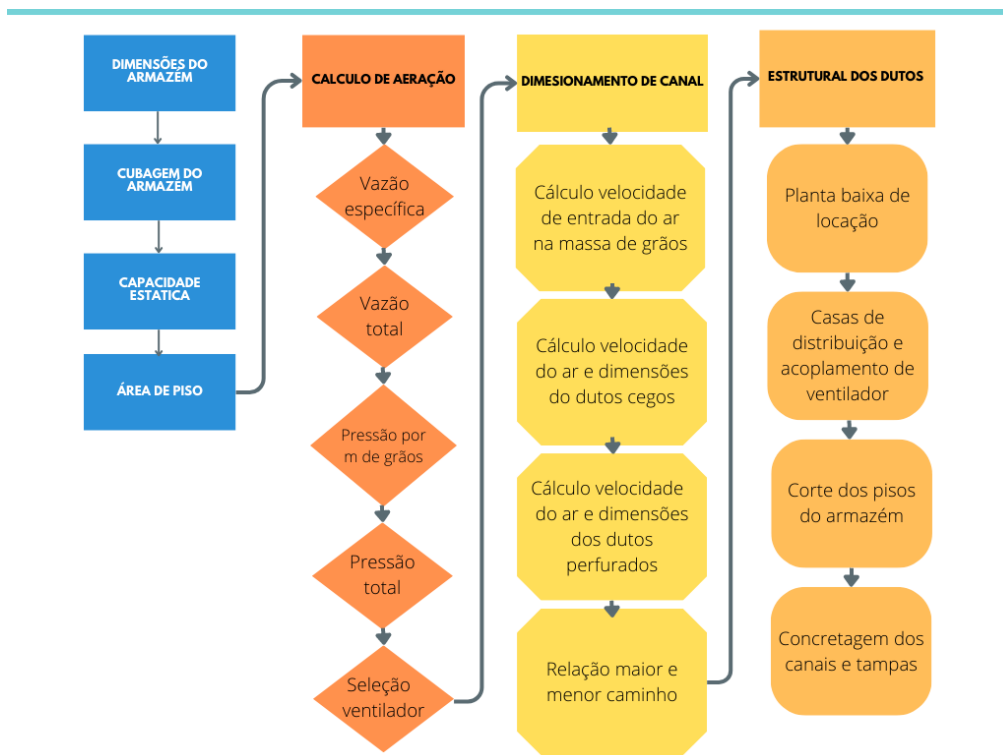


Figura 3 – fluxograma roteiro de dimensionamento e execução. Fonte: Autor

Para calcular a capacidade estática do armazém, seguindo a equação 1, multiplicará o volume total do armazém pelo peso específico do produto a ser armazenado. Neste caso, utilizará a soja como parâmetro, pois é o cereal mais produzido no Brasil, segundo a CONAB 2023, e usualmente utilizado como padrão para os dimensionamentos de armazéns, silos ou equipamentos.

$$Cap = \rho \cdot V \quad (1)$$

Onde: Cap é a capacidade estática, ρ é o peso específico do produto e V o volume do armazém

O cálculo volumétrico de um armazém graneleiro é também chamado de cubagem e depende não só das dimensões do armazém, mas da característica do produto. A característica do produto utilizada para a cubagem é o ângulo de repouso, que é o ângulo formado na acomodação dos grãos em relação a um plano vertical ou horizontal, utilizado como referência. Dentre os fatores que influenciam o ângulo de repouso estão os tamanhos e formas dos grãos, a orientação das partículas e, principalmente, a rugosidade da superfície dos grãos (Mohsenin, 1974).

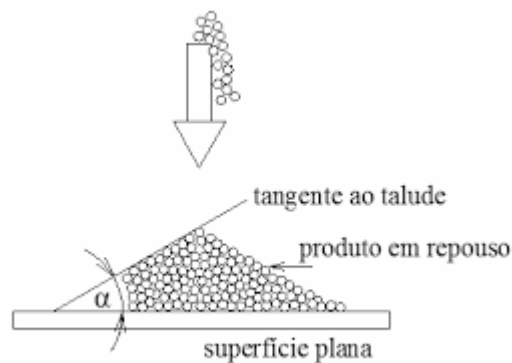


Figura 4 – ângulo de repouso. Fonte: UFV 2013

A Universidade Federal de Viçosa (1999) apresenta a metodologia para a cubagem do armazém graneleiro fundo “semi-v” que será utilizada neste trabalho.

A metodologia da cubagem da UFV consiste em dividir o volume total do armazém em prismas regulares, que contam com equações padrões para o cálculo do volume, facilitando o cálculo geral do armazém, conforme a figura 4 apresenta.

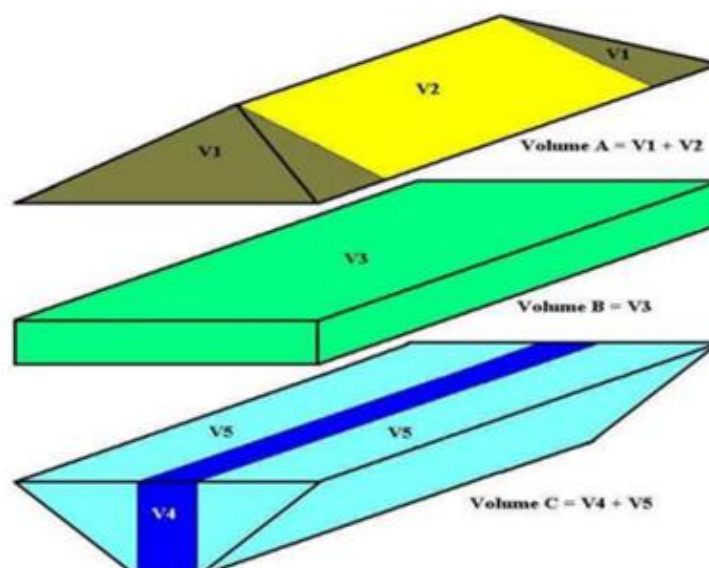


Figura 5 – Cubagem de armazém graneleiro. Fonte: UFV 2013

Conforme a imagem, o V_1 foi calculado utilizando a equação 02 do prisma pirâmide. O V_2 será calculado descobrindo a área do triângulo onde o lado maior é a largura do armazém e o comprimento de V_2 (equação 03). Esses dois volumes dependerão do ângulo de repouso dos grãos; esse ângulo para soja com teor de umidade de 14% é de 27°

$$V_1 = \frac{A_{blateral} \cdot H_{grãos}}{3} \quad (2)$$

$$V_2 = A_{triangulo} \cdot H_{grãos} \quad (3)$$

Para V_3 , o volume foi calculado através da equação do cubo (equação 04), onde as dimensões da base são o comprimento multiplicado pela largura do armazém, e a altura é a mesma das paredes laterais

$$V_3 = A_{horizontal} \cdot H_{parede} \quad (4)$$

O cálculo do V_4 utiliza a equação do cubo novamente; agora, foi utilizado a altura do piso até o início da parede multiplicado pela área de piso reto do armazém.

$$V_4 = A_{pisoreto} \cdot H_{pisoparede} \quad (5)$$

Para o V_5 , foi considerado o volume do prisma triangular, onde foi considerada a área do corte do talude de inclinação multiplicado pelo comprimento e pela largura do armazém, somando separadamente as duas parcelas.

$$V_5 = A_{talude} \cdot H_{pisoparede} \quad (6)$$

O volume total do armazém será a soma dos volumes parciais calculados

$$V = V_5 + V_4 + V_3 + V_2 + V_1 \quad (7)$$

A capacidade estática do armazém foi calculada utilizando o resultado da cubagem do graneleiro (volume) e o peso específico do produto armazenado, conforme informativo no Banco Central do Brasil (2014), sendo utilizado $0,75 \text{ kg/m}^3$. Essa medida também era utilizada por todos os fornecedores de equipamentos agrícolas como padrão de conversão.

Para o cálculo da resistência do ar pela influência dos grãos, foi usualmente utilizado o gráfico de Shedd ou a equação de Shedd proposta em 1951 no artigo "Some New Data on Resistance of Grains to Airflow". Foi estudada e definida a relação de resistência pela relação de volume de ar por m^2 de piso do armazém.

Para isso, foi necessário calcular a área de piso do graneleiro, somando a área do piso sem inclinação com a área do piso do talude.

$$A_{\text{piso}} = A_{\text{fundo}} \cdot A_{\text{talude}} \quad (8)$$

Conforme a Tabela 1, apresentada a vazão específica de ar por tonelada de produto, com o intuito de diminuir o tempo de aeração devido à necessidade de maiores velocidades de recebimento diário das unidades armazenadoras, utilizaremos a vazão de 0,2 m³/min por tonelada de produto. A Tabela 2 apresentada pela EMBRAPA (2023) demonstra que o aumento da vazão específica está relacionado à diminuição do tempo de aeração, sendo um dos intuitos desse trabalho.

Tabela 2 – tempo de aeração (EMBRAPA 2023)

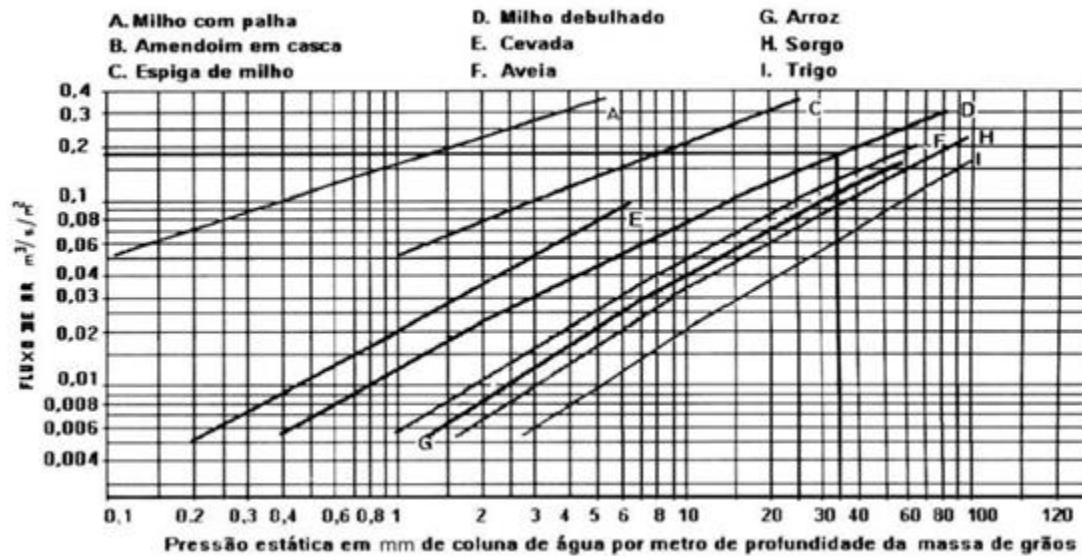
Produto	Vazão específicas de ar em m ³ / minuto/tonelada	Tempo de aeração em horas
Soja	0,05	400
	0,10	200
	0,25	80
	0,50	40
	0,75	27
	1,00	20
	1,50	13

m³: metros cúbicos.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{especifica}} \cdot \text{Capacidade} \quad (9)$$

A pressão do produto foi determinada de acordo com o tipo de produto e a altura dos grãos. Essa resistência está principalmente relacionada aos espaços intragranulares dos cereais, sendo que quanto menor o espaçamento, maior é a resistência à passagem do ar. O gráfico de Shedd apresentado abaixo mostra a correlação de pressão por volume específico de ar, pelo produto armazenado.

Gráfico 1 – Gráfico de Shedd (Shedd 1951)



O gráfico foi utilizado para obter as pressões, mas para um cálculo mais preciso, foi utilizada a equação de Hukill e Ives (1995), conforme descrito abaixo. Conforme Gratão (2012), este método foi utilizado para prever a queda de pressão na faixa de fluxo de 0,01 e 0,2 m³/s por m² de piso. A American Society of Agriculture and Biological Engineers (ASABE) recomendou essa equação.

$$\Delta P = \frac{a \cdot Q^2}{\ln(1+b \cdot Q)} \quad (10)$$

Sendo: ΔP : queda de pressão estática mmca, **a** e **b**: Constante dos referidos produtos, conforme tabela 3, **Q**: fluxo de ar em m³/min por m² de piso

Segue tabela de referência de constantes dos produtos.

Tabela 4 - Constante de shedd (Milman, 2002)

Produto	a	b
Arroz em casca	0,722	0,197
Aveia	0,718	0,243
Milho	0,583	0,512
Soja	0,333	0,302
Trigo	0,825	0,164

O milho foi utilizado como parâmetro, pois apresentava uma resistência maior do que a soja, conforme descrito por Mata & Duarte em seu trabalho de 2002. Isso se devia ao formato arredondado dos grãos de soja e ao índice de porosidade, que era maior na soja, facilitando a passagem do ar. Costumava-se observar que regiões que recebiam soja também recebiam milho (CONAB 2023), sendo

então dimensionado pelo mais crítico conforme as constantes relacionadas na tabela 4.

Para o cálculo da pressão total, foi necessário descobrir a altura máxima da coluna de grãos. Para isso, somou-se a altura do piso do armazém até o final da parede com a altura da pirâmide de grãos. Foi utilizada trigonometria, considerando a angulação de repouso dos grãos, que era de 27° , conforme demonstrado na figura 4, utilizando a metade da largura do armazém como cateto adjacente

$$\operatorname{Tg} 27^\circ = 0,5H \cdot L_{armazem} \quad (11)$$

$$H_{total} = H + H_{pisoparde} \quad (12)$$

$$P_{Total} = H_{total} \cdot \Delta P \quad (13)$$

Para a seleção dos ventiladores, foi necessário entender o mecanismo de funcionamento de um aerador, conforme o Manual Técnico da Otam. Uma curva de desempenho de um ventilador foi uma representação gráfica do seu desempenho, contendo características representadas em função da vazão do ventilador, como pressão estática, pressão total, potência, rendimento estático e rendimento total. As curvas de seleção foram muito úteis para a seleção de ventiladores.

Para este trabalho, foi utilizado o software Vortex da empresa Otam – Soler & Palau com licença gratuita. Neste software, foi possível, através da interface, indicar a vazão e a pressão de trabalho, e o programa indicou os ventiladores possíveis para essa operação. Optou-se pelos ventiladores com menos potência e maior rendimento para economia elétrica.

Para o dimensionamento dos dutos, foram utilizados como parâmetros o que Weber (2005) recomendou, onde se considerou as velocidades máximas recomendadas para a saída das chapas perfuradas, dos dutos com chapa perfurada e dos dutos “cegos” de distribuição (fechados).

Tabela 5 – Velocidades recomendadas (Weber 2005)

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

m: metros; s: segundos; min: minutos.

Iniciou-se pelo cálculo da área de chapa perfurada necessária, sendo essa área a relação da vazão total e da velocidade máxima. Optaram pelo menor valor (16 m/min) para que a área de chapa fosse maior, melhorando a distribuição.

A fórmula utilizada para calcular a área de chapa foi a seguinte:

$$A_{chapa} = \frac{Q_{total}}{V_{saída da chapa}} \quad (14)$$

A distribuição dos dutos também dependeu das velocidades admissíveis e do tamanho do armazém. Após realizar a distribuição, calcularam a largura e altura dos dutos, sendo que a largura deveria atender à área mínima total de chapa perfurada e consideraram a passagem do pneu da pá carregadora por cima dela. A profundidade foi limitada apenas pela velocidade admissível. Os dutos “cegos” somente sofreram interferência da velocidade, pois o fechamento foi realizado com concreto armado que suporta o trânsito da pá carregadeira.

Para a distribuição correta dos dutos no armazém, dependeram também da relação de maior e menor caminho, conforme proposto por Lasseran em 1981. Essa relação estabeleceu que o maior caminho de deslocamento não poderia ser 50% maior que o menor caminho do ar na massa de grão.

$$\frac{\text{Maior caminho}}{\text{menor caminho}} = 1,5 \quad (15)$$

A locação em planta baixa do sistema de aeração foi conforme a relação de maior e menor caminho, o comprimento dos dutos e a conformidade da distribuição no armazém. Foi necessário distribuir esses dutos de modo que o

armazém inteiro tivesse pontos de aeração, abrangendo o resfriamento em toda a massa de grãos.

Neste trabalho, locaram os dutos utilizando os cálculos de maior e menor caminho. Utilizaram também o conceito de vazão e pressão para locar os dutos maiores e menores, concentrando os dutos maiores no centro do armazém onde constava com maior quantidade de produto por área.

O software escolhido para o desenho e layout dos dutos e armazém graneleiro foi o AutoCAD® com licença de estudante, considerando a planta baixa e os cortes dos dutos. Facilitou o entendimento do dimensionamento e o próprio cálculo de maior e menor caminho.

Os aeradores/ventiladores que fizeram a insuflação de ar no armazém graneleiro necessitaram de uma base nivelada para serem locados, pois como se tratava de um rotor, se trabalhasse como uma base em desnível poderia desalinhar o eixo do ventilador, causando danos ao equipamento, perda de eficiência e vibrações elevadas. Além disso, foi recomendado que essa base fosse elevada para evitar que a água da chuva empossasse no pé do ventilador, podendo haver avarias.

Como os dutos de aeração foram escavados no concreto e um ventilador pôde alimentar vários dutos, foi preciso construir uma casa para a distribuição de ar e abrigo contra entrada da chuva nos canais alimentadores. Esta casa foi projetada para ser construída em blocos de concretos com uma cobertura em laje pré-moldada inclinada. Como ela serviu como distribuidor de ar, precisou garantir uma boa estanqueidade interna, pois qualquer fuga de ar poderia retirar a eficiência do sistema, pois o fluxo de ar seguiria, preferencialmente, o percurso que oferecesse menor resistência (CENTREINAR,2009).

Com a planta baixa em mãos, realizaram a marcação no piso na locação dos canais. Após a marcação adequada, recordaram o piso com auxílio de um cortador de concreto, realizando os cortes na dimensão efetiva do duto e ajustando posteriormente com uso de formão para exatidão nas dimensões. Após o corte do concreto, escavaram a terra até a profundidade desejada e realizaram um acabamento de concreto no fundo dos canais para facilidade de limpeza, evitar que a terra entrasse no sistema e melhorasse a distribuição de ar.

Para a movimentação da pá carregadeira dentro do armazém, foi necessário que a canaleta tivesse um rebaixo de 0,5 cm, garantindo que a chapa perfurada ficasse abaixo do piso do armazém. Isso foi essencial para o embarque dos produtos, já que a máquina raspa a pá no nível do piso para juntar os cereais.

Se a chapa estivesse no nível acima do piso, poderia danificá-la, necessitando manutenção.

Deveram considerar nas paredes de sustentação dos dutos vigas baldrames em todo o comprimento, isso evitou que a sobrecarga da pá-carregadeira sobre os dutos metálicos causasse alguma patologia ao piso de concreto, melhorando o apoio e evitando possíveis transtornos. Foi assentada a armadura conforme o projeto estrutural, inserido formas com a dimensão correta do canal e concretado conforme boas práticas.

Como a viga baldrame dessas canaletas ficou em contato direto com o solo, promoveram uma impermeabilização dela, garantindo que possíveis percolações de água do solo/concreto não atingissem os grãos, que poderiam deteriorar-se em contato com umidade.

Os dutos cegos foram confeccionados com tampas em concreto pré-moldado devido à característica construtiva e à dificuldade em desformar posterior cura. As tampas dos dutos cegos contemplaram armadura, pois trabalharam bi apoiadas nas vigas baldrames, contendo como carregamento o peso dos grãos e a carga dinâmica do trânsito da pá carregadeira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os dados e resultados foram apresentados com base nos dimensionamentos realizados seguindo as metodologias de cálculo de aeração.

Os dados das dimensões do armazém permitiram a aplicação das fórmulas mencionadas anteriormente, resultando na geração da Tabela 6, que apresenta os volumes, a capacidade do armazém em toneladas e a área de piso perfurada mínima para uma eficiente aeração.

Tabela 6 – Cálculos de cubagem do armazém graneleiro

Cálculo	Resultado
V1 (m ³)	3638,25
V2 (m ³)	5457,38
V3 (m ³)	10500,00
V4 (m ³)	1088,01
V5 (m ³)	5908,98
Vtotal (m ³)	26592,62
Capacidade estática (ton)	19944,47
Área do piso (m ²)	2648,82

m²: metros quadrados; m³: metros cúbicos; ton: toneladas.

Após a cubagem do armazém graneleiro, os cálculos foram conduzidos para determinar a pressão gerada pela altura da massa de grãos e o volume total necessário para a aeração completa do armazém, utilizando a taxa de 0,2 m³/min/tonelada de produto. A equação de Hukill e Ives foi empregada, inserindo a vazão por área de piso e as constantes relacionadas ao milho. Os resultados foram apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Cálculos de pressões

Cálculo	Resultado
Altura máxima (m)	16,21
Volume total de ar (m ³ /min)	3988,89
Vazão por área do piso (m ³ /min/m ²)	1,5059
Pressão massa de grãos por m (mmCa)	2,31
Pressão massa de grãos (mmCa)	37,4451
Pressão de trabalho (mmCa)	56,18

m: metros; m²: metros quadrados; m³: metros cúbicos; min: minutos

Conforme Shedd, C. K., os valores calculados de perda de carga foram acrescidos de 50% devido às possíveis compactações do produto quando carregado em um armazém. A pressão utilizada para o trabalho e seleção do ventilador foi de 56,18 mm de coluna d'água.

Os ventiladores foram selecionados por meio do software Vortex®, inserindo os dados de vazão por ventilador e a pressão de trabalho. A vazão por ventilador foi determinada dividindo o volume de ar total apresentado na Tabela 7 por seis, visando uma melhor distribuição do ar no armazém e a possibilidade de aeração de partes distintas do armazém. As Figuras 6 apresentam os modelos e especificações dos ventiladores selecionados, e a Tabela 8 demonstra os cálculos das vazões efetivas a serem instaladas no armazém. Germann R, 2002, em seu trabalho sobre dimensionamento de sistemas de aeração para silos, indicou uma vazão total de 26,316 m³/h para um silo de 2.635 toneladas, com altura de 18,21 m, encontrando uma pressão estática de 73,66 mmca. Apesar de apenas 2 metros (12%) a mais que o presente armazém, a pressão foi 76% maior devido ao gráfico exponencial Shedd. No entanto, as características do armazém, em comparação com o silo, por terem uma área de piso maior, tendem a resultar em uma pressão estática menor.

Tabela 8 – Cálculos de vazões

Cálculo	Resultado
Vazão ventilador (m ³ /h)	39888,93
Vazão ventilador selecionado (m ³ /h)	40000
Vazão total de ar instalado (m ³ /h)	240.000,00
Taxa de aeração instalada (m ³ /min/ton)	0,201

m³: metros cúbicos; min: minutos; h: horas; ton: toneladas.

Dados operacionais

Temperatura (°C): 20
 Pressão atmosférica (mmHg): 760
 Altitude em metros: 0
 Constante R: 287,04
 ou
 Densidade (kg/m³): 1,205
 Vazão (m³/h): 40000
 Pressão estática (mmca): 57

Dados ventilador

Tipo ventilador: AIRFOIL SIMPLES
 Modelo do ventilador: RFS
 Arranjo: 1

Dados motor

Tipo motor: IR3
 Tensão: 220/380
 Grau proteção: IP55
 Fases: 1F, 3F (selecionado)
 Frequência: 50 Hz, 60 Hz (selecionado)
 Polos: 2 polos, 4 polos, 6 polos (selecionado), 8 polos
 Marca: WEG

Tamanho	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
DIAM	RC	ANG	REND. (%)	RPM	POT. ABS (cv)	VEL. PERIF. (m/s)	VEL. DESC. (m/s)										
800		0	57,60%	1.519	22,10	63,62	21,70										
900		0	65,64%	1.130	16,94	53,27	17,15										
1000		0	73,32%	883	13,91	46,22	13,89										
1120		0	81,18%	692	11,78	40,58	11,07										
1250		0	86,98%	561	10,53	36,70	8,89										
1400		0	89,56%	464	9,94	34,04	7,09										
1600		0	86,97%	385	10,02	32,28	5,43										
1800		0	79,90%	337	10,78	31,72	4,29										

Observação

RFS 1400 Classe I

Temperatura operação: 20 °C
 Pressão barométrica: 760 mmHg
 Densidade do fluido: 1,205 kg/m³
 Vazão: 40000 m³/h
 Pr.est. (SE): 57 mmca
 Pr.total (SE): 60,1 mmca
 Pr.total (ST): 60,1 mmca
 Pr.est. (ST): 57,0 mmca
 Velocidade descarga: 7,09 m/s

Figura 6 – Seleção de ventilador software Vortex® - Otam. Fonte: Autor

Foram selecionados seis ventiladores com vazão unitária de 40.000 m³/h com pressão estática de 57 mmca. Modelo RFS 1400 Classe 1 com motores de 10 cv e um rendimento para essa configuração de 88,56% o maior rendimento entre as sugestões selecionadas pelo software. Oliveira, S. S. 2021 estudo um armazém graneleiro fundo V, usando a taxa de 0,1 m³ de ar/min/ton de milho para um graneleiro de 24.051 toneladas, os motores selecionados foram de 25 cv dividido também em 6 motores. Essa potência bem mais elevada, apesar da vazão específica menor, se dá pela característica do armazém fundo V, onde a altura de grãos referente ao piso é bem maior, o que eleva a pressão de produto, que no caso do trabalho de Oliveira foi de 195,55 mmca. Comparativamente o armazém fundo V tem maior capacidade estática e maior facilidade de esvaziamento, mas em contrapartida demanda de maior potência de motores e consequentemente maior consumo energético.

Para o projeto da distribuição dos dutos no armazém graneleiro foi necessário calcular a quantidade mínima de chapa perfurada para garantir a aeração completa do armazém com eficiência necessária, utilizando a equação 14 chegamos no resultado de 249,3 m² mínimos, utilizando 16 m/s de velocidade máxima. Gerando com auxílio do Autocad® a planta baixa mostrada na figura 7.

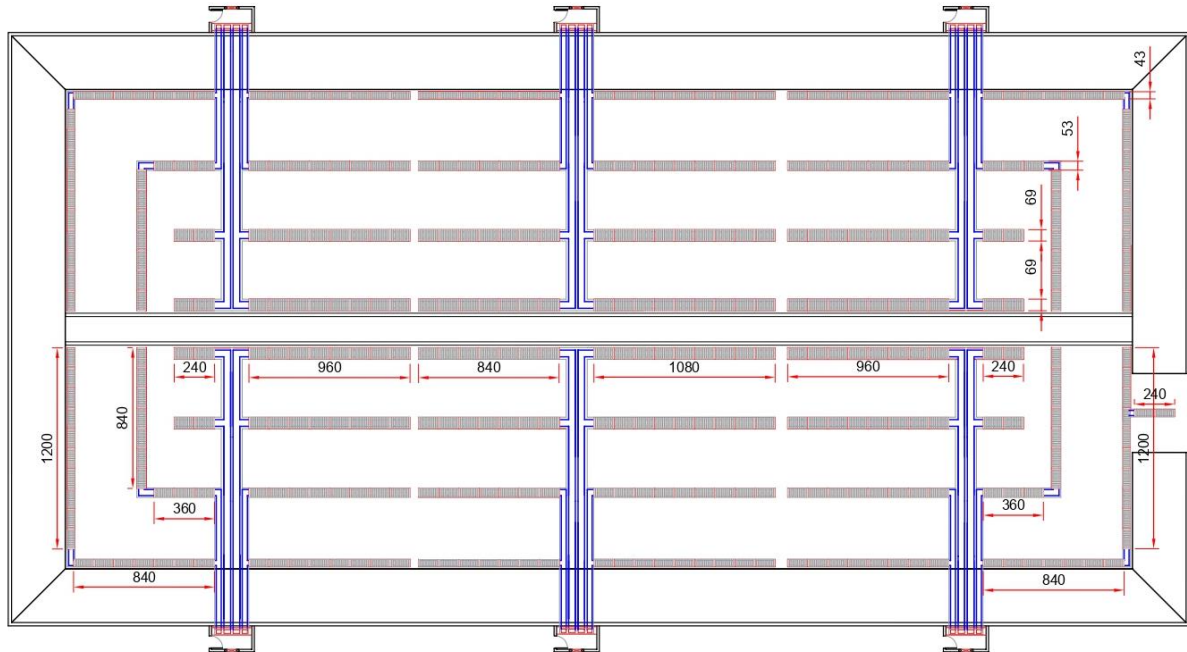


Figura 7 – planta baixa distribuição dos dutos de aeração. Fonte: Autor

As canaletas de aeração foram definidas com o auxílio da Tabela 5, limitando o valor de velocidade pela recomendação presente na bibliografia. Foi utilizado o conceito em que a vazão do ventilador dividida pela área resulta na velocidade recomendada. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensionamento dos dutos cegos de alimentação

Cálculo	Resultado
Área mínima por ventilador (m ²)	1,11
largura dutos centrais (dois dutos (m)	0,40
largura dutos laterais (dois dutos) (m)	0,30
profundidade (m)	0,80
Área efetiva (m ²)	1,12
Velocidade efetiva (m/min)	595,2380952

m²: metros quadrados; min: minutos; m: metros.

Tabela 10 – Dimensionamento dos dutos perfurados

Cálculo	Resultado
Vazão total dutos centrais (m ³ /min)	7500
Vazão total dutos laterais (m ³ /min)	2500
Velocidade efetiva laterais (m/min)	390,63
Velocidade efetiva laterais (m/min)	173,61

m³: metros cúbicos; min: minutos; m: metros.

Apresentadas na Tabela 5 as velocidades máximas para os dutos de alimentação (saída dos ventiladores), que foram de 600 m/min para os dutos de alimentação e 240 m/min para os dutos perfurados. Com base nesses valores, a área necessária para os dutos, conforme selecionado no projeto para uma distribuição adequada no armazém, foi dividida, sendo que cada saída de ventilador foi subdividida em quatro dutos. Dois desses dutos alimentaram a região central do armazém, enquanto os outros dois alimentaram a região periférica. Considerando que a região central concentra uma maior quantidade de produto devido ao carregamento central e apresenta um ângulo de repouso de 27°, a distribuição foi feita com 75% da aeração total no centro do armazém e 25% nas laterais, dividindo assim pela área dos dutos. A Figura 8 apresenta o corte dos dutos.

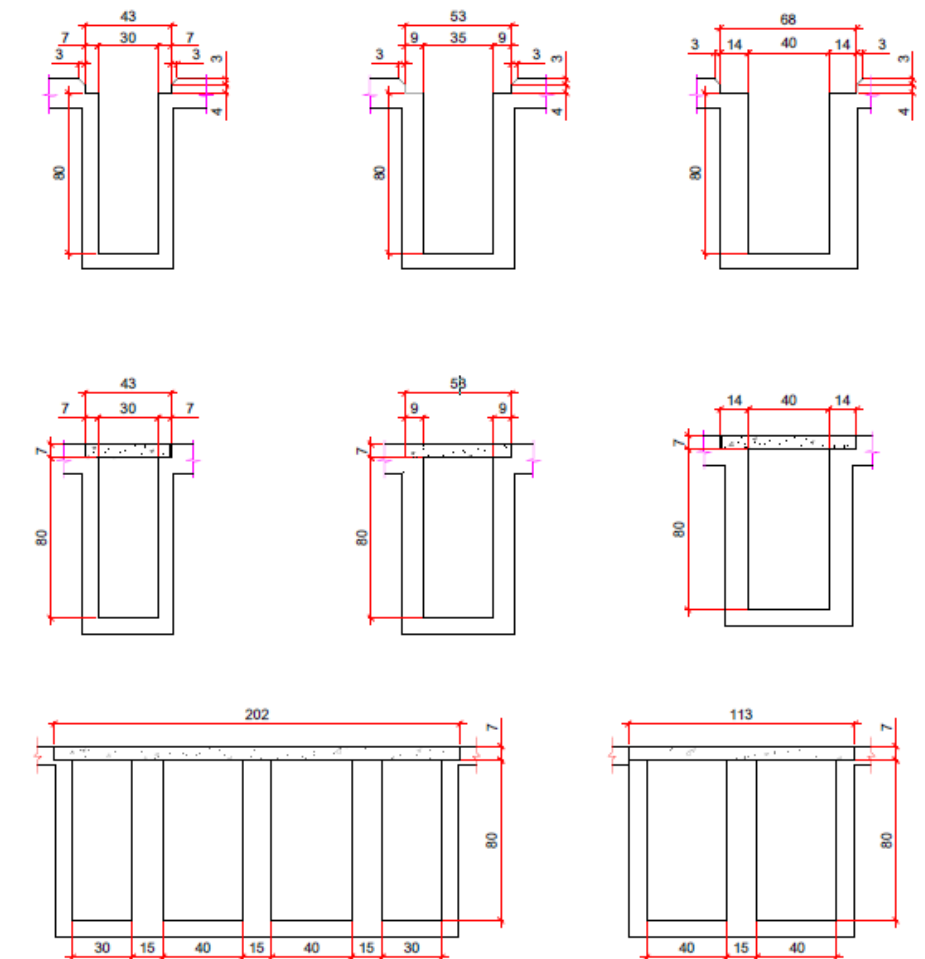


Figura 8 – dutos de aerção. Fonte: Autor

Os dutos centrais foram confeccionados com dimensões de 80 cm de altura e 40 cm de largura, enquanto os dutos de alimentação lateral ficaram com 80 cm de altura e 30 cm de largura, apresentando uma área total de 1,12 m², o que era necessário para atender à velocidade máxima do ventilador de 40.000 m³/h. Os dutos perfurados mantiveram as características dos dutos de saída do ventilador para facilitar a execução.

A distribuição foi realizada seguindo a relação de maior e menor caminho para evitar que o ar fosse direcionado apenas para uma parte do armazém, o que é de extrema importância para o bom funcionamento e efetividade do sistema de aerção como um todo. A equação 15 apresenta a fórmula para o cálculo dessa relação, e a Figura 9 traz o corte do armazém e as cotas geradas pelo AutoCAD® para demonstrar o maior e o menor caminho do ar dentro do armazém.

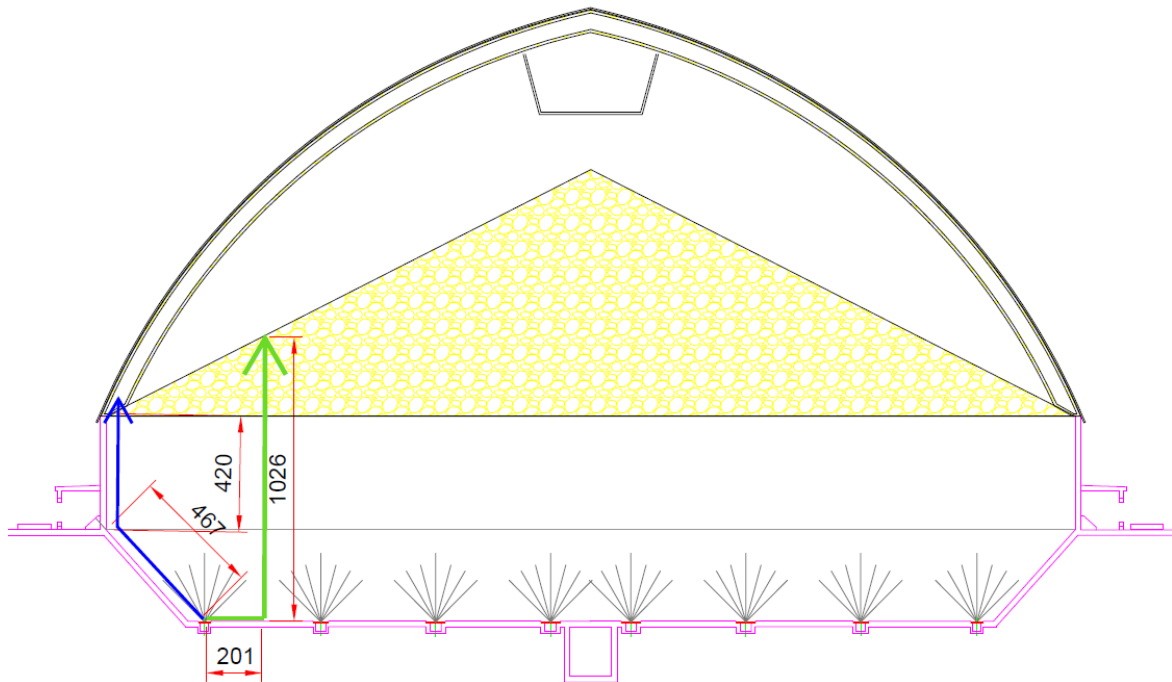


Figura 9 – Corte armazém, caminhos do ar. Fonte: Autor

A relação de maior e menor caminho sempre foi referente a um duto de distribuição, e normalmente, os dutos mais periféricos apresentavam essa relação maior, pois o possível caminho para a lateral do armazém costumava ser o menor. Neste caso, o maior caminho, apresentado pela flexa verde, continha 12,27 m, e o menor caminho 8,87 m. Aplicando a fórmula 15, o resultado foi de 1,38, atendendo à condição máxima que é de 1,5.

Com os dimensionamentos e desenhos, chegou-se a um sistema de aeração adequado à bibliografia e às boas práticas, podendo ser executado conforme apresentado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia aplicada neste trabalho mostrou-se eficiente para o dimensionamento e análise de sistemas de aeração para armazém graneleiro fundo plano, podendo ser empregada para execução.

A transformação de um armazém com aeração de meia-cana de dutos metálicos em armazém graneleiro com dutos esculpidos no piso foi considerada viável e possível, facilitando assim a operação e conservação de produtos. Com isso, o aumento da taxa de aeração também se mostrou viável, gerando sim necessidade de maiores áreas de dutos, maiores áreas de chapa perfurada e maior potência do motor, mas garantindo uma maior velocidade de refrigeração dos grãos, o que diminui a quebra técnica.

Há relativamente poucos estudos e metodologias para a aplicação de um sistema de aeração, por ser uma área específica de uma agroindústria, mas foi um estudo extremamente importante e rentável devido aos valores praticados em produtos agrícolas (cereais). Este trabalho pode servir de apoio para novos estudos e execuções de aeração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, amigos e professores pela ajuda e compreensão durante a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- (1) AFONSO, A. D. L. **Conservação de soja com alto teor de umidade**, UFV, Viçosa - MG, 2013.
- (2) AMARILLA, R. S. D. et al. **Aplicação das Normas Regulamentadoras para Gerenciar os Riscos na Operação de Silos Metálicos**. VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Junho de 2012.
- (3) CENTREINAR. **Aeração de Grãos partes I, II e III**. Viçosa, 2009
- (4) MAIA, G. B. S et al. **Panorama da armazenagem de produtos agricultura**.
- (4) CT – **Armazenamento do grão de soja com qualidade**: princípios importantes a serem observados. EMBRAPA, jun 2023.
- (5) Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB), Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 11º levantamento. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>.
- (6) Germann, R, **dimensionamento e análise de um sistema de aeração para silos armazenadores de grãos**, Centro universitário Ritter dos Reis, 2022.
- (7) GRATÃO, P.T.S. **perda de pressão estática em uma coluna de grãos de quinoa (Chenopodium quinoa Willdenow) e análise por elementos finitos**, UEG, Goiás 2012.

- (8) HARA, T. **Aeração com qualidade. Cultivar Máquinas**, ed. 21, maio-jun. 2003. p. 26-32. Disponível em: <https://docplayer.com.br/18825688-Aeracao-com-qualidade.html>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- (9) LASSERAN, J.C. **Aeração de grãos**. Tradução de José Carlos Celaro, Miryan Sponchiado Celaro e Míriam Costa Val Gomide. Viçosa, Centro Nacional de Armazenagem, 1981. 128p. (Centro Nacional de Armazenagem, n.2).
- (10) MATA, M; Duarte, M. E. M. **Porosidade intergranular de produtos agrícolas**. Revista brasileira de produtos agroindústrias, Campina Grande, v. 4, n. 1 p.79-93, 2002.
- (11) MAIA, G. B. S et al. **Panorama da armazenagem de produtos agricultura no Brasil**. IN Revista do BNDES. Brasília: v.40, p.161-194. 2013
- (12) Manual técnico Otam, soler & Palau 2022
- (13) MESQUITA, J.L.; MACEDO, M.A.S.; BARBOSA, A.C.T. **Avaliação do sistema brasileiro de armazenagem convencional e a granel: um estudo apoiado em Análise Envoltória de Dados (DEA)**. Sober – Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Londrina-PR, 2007.
- (14) MILMAN, Mário José **Equipamentos para pré-processamento de grãos** / Mário José Milman. – Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002.
- (15) MOHSEIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach, 1974.
- (16) OLIVEIRA, S. S. **Proposição de metodologia para dimensionamento de Sistema de aeração em graneleiros**. Universidade federal de Viçosa, Minas Gerais, 2021.
- (17) Produção Regional de Grãos e Estrutura de Armazenagem. Banco central do Brasil 2014, Disponível em <http://www.agricultura.gov.br>.
- (18) SHEDD, C.K. **Some new data on resistance of grains to airflow**. Agricultural Engineering, v. 32, p. 493-495, 1951.
- (19) SILVA, J. de S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2º Ed. Editora Aprenda Fácil. Viçosa, 2008.
- (20) WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. 1ª Ed. Panambi, 2005.