

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

SAMUEL SILVEIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSIÇÃO DE METOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE
AERAÇÃO EM GRANELEIROS**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

SAMUEL SILVEIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSIÇÃO DE METOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE
AERAÇÃO EM GRANELEIROS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luís César da Silva

Coorientador: MSc. Marcus Vinicius de Assis Silva

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

SAMUEL SILVEIRA DE OLIVEIRA

**PROPOSIÇÃO DE METOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE
AERAÇÃO EM GRANELEIROS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 14 de maio de 2021.

Assentimento:

Prof. Dr. Luís César da Silva
Orientador

Samuel Silveira de Oliveira
Aluno

A minha família, amigos e companheiros de curso

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus pela oportunidade de chegar até o fim do curso, reconhecendo a sua bondade e misericórdia.

Em segundo, agradeço aos meus pais, Marcelo e Márcia, e aos meus irmãos, Daniel e Marcela, pela compreensão, paciência e apoio.

Agradeço também aos meus professores, em especial aos do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental pelo aprendizado e conhecimento adquirido ao longo desses anos e espero poder colocá-los em prática.

Agradeço também aos amigos que conheci em Viçosa pelo companheirismo.

RESUMO

A aeração de grãos é de grande importância, pois essa operação visa preservar a qualidade dos grãos durante o armazenamento, bem como minimizar a deterioração por fungos e insetos-praga. O objetivo deste estudo foi propor uma metodologia para o dimensionamento do sistema de aeração de um graneleiro fundo “V”, em que as paredes transversais das células sejam retas. Para avaliar a metodologia proposta foi considerado o dimensionamento para dois cenários: primeiro – um graneleiro com uma única célula, e segundo – um graneleiro com duas células. No dimensionamento, a massa de produto foi segmentada segundo duas configurações de módulos: extremidades e central. Ao segmentar a massa de grãos em módulos, simplifica-se a análise do sistema e cria-se condições de replicar o dimensionamento do sistema de aeração para módulos equivalentes.

Palavras-chave: Armazenagem a Granel. Graneleiro. Unidade Armazenadora.

ABSTRACT

The aeration of grains has a great importance, since this operation aims to preserve the quality of the grains during storage, as well as to minimize the deterioration by fungi and pest insects. The objective of this study was to propose a methodology for designing the aeration system of a V-bottom flat storage with straight endwalls. To evaluate the proposed methodology, two scenarios had been considered: first - flat storage with a single cell, and then with two cells. In the sizing of the aeration system, the grain bulk was segmented according to two module configurations: extremities and central. By segmenting the grain bulk into modules, system analysis is simplified and the design of the aeration system can be replicated using equivalent modules.

Keywords: Bulk storage. Flat grain storage. Grain storage facility.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Cálculo da capacidade estática.....	10
2.1.1 Módulos de aeração	18
2.2 Cálculo da vazão	20
2.3 Cálculo da perda de carga do sistema	20
2.4 Estimativa da potência do motor do ventilador.....	22
2.5 Locação e dimensionamento dos dutos de aeração.....	23
2.6 Dimensionamento do duto principal.....	31
3 ESTUDO DE CASO	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 Dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro com uma única célula...33	
4.2 Dimensionamento do sistema de aeração para graneleiro com duas células.....34	
5 CONCLUSÕES.....	38
6 REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola tem crescido a cada ano, fato que consolida a posição do Brasil no mercado internacional como um dos maiores produtores. Segundo o sexto levantamento da safra 2020/21 da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção brasileira de grãos foi estimada em 272,3 milhões de toneladas (CONAB, 2021). No entanto, diante dessa alta produção de grãos, o Brasil tem enfrentado problemas em relação a capacidade estática da sua rede de armazenagem abaixo da demanda, ocasionando perdas entre a colheita e o armazenamento, que chegam a 20% do total produzido (SENAR, 2018). Segundo Baroni, Benedeti e Seidel (2017), o crescimento da produção agrícola brasileira tem sido superior ao aumento da capacidade estática de armazenagem, o que reforça a importância de investimento neste setor, como a construção e a adequação de armazéns às normas de armazenagem.

As unidades armazenadoras devem ser projetadas, estruturadas e gerenciadas com a finalidade de receber, limpar, secar, armazenar e expedir produtos limpos e secos (SILVA, L. et al., 2012). Durante o período de armazenagem, com o objetivo de preservar a qualidade, os grãos devem ser aerados. A aeração é uma operação que utiliza a movimentação forçada de ar para uniformizar a temperatura do produto e a umidade relativa do ar intergranular e promover a renovação do ar intergranular (NAVARRO & NOYES, 2001; DARBY, 2004). Para a correta aeração dos grãos armazenados é necessário a observância das condições psicrométricas e vazão do ar aplicado. As condições psicrométricas do ar insuflado devem proporcionar uma condição de equilíbrio higroscópico com a massa de grãos para evitar a ocorrência de secagem ou o aumento da umidade relativa do ar intergranular (SILVA, J., 2008).

O sistema de aeração é composto por um conjunto de ventiladores, dutos de distribuição de ar, exaustores e respiros. O conjunto de ventiladores é responsável pelo estabelecimento de uma vazão de ar adequada, sob determinada pressão, a ser distribuída na massa de grãos por meio de dutos de aeração. Os exaustores e respiros localizados no teto do silo são essenciais para que seja feita a exaustão dos gases provenientes da aeração. Além disso estes dispositivos evitam a estagnação do ar úmido no espaço entre a massa de grãos e o telhado do silo (WEBER, 2005). Todos estes componentes devem ser corretamente dimensionados para que a operação de aeração seja eficiente e atinja seus objetivos, distribuindo o ar de maneira uniforme pela massa de grãos.

Vários são os fatores que afetam a distribuição do ar na massa de grãos, tais como, a metodologia adotada para o carregamento do silo, a profundidade da massa de grãos, a

presença de impurezas, o grau de compactação, a porosidade e o teor de água dos grãos (PANIGRAHI et al., 2021). Em virtude do déficit de estruturas de armazenamento adequadas, os silos horizontais conhecidos como graneleiros são amplamente utilizados no Brasil (KHATCHATOURIAN et al., 2016). De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE 2020) 49,1% do total da capacidade estática de armazenagem de grãos no Brasil se dá em graneleiros. Porém o manejo da aeração nestes silos apresenta alguns problemas com relação a uniformidade na distribuição do ar. Em graneleiros, a massa de grãos forma um talude natural que é função do ângulo de repouso dos grãos, o que proporciona a formação de uma camada de grãos com profundidade variável além de favorecer a compactação e segregação dos grãos (NARENDRAN et al., 2019). A medida que o talude natural dos grãos se forma durante o carregamento, o local próximo ao ponto de descarga apresenta grãos com massa específica significativamente maior do que os grãos da periferia (PANIGRAHI et al., 2021). Este fenômeno, associado a presença de impurezas, favorece o escoamento preferencial do ar de aeração em determinados locais da massa de grãos, o que prejudica a distribuição uniforme do ar (KHATCHATOURIAN et al., 2016; BINELO et al., 2019).

Na literatura existem algumas metodologias para dimensionamento de sistemas de aeração em graneleiros de fundo plano (BROOKER et al., 1992; NAVARRO; NOYES, 2001). Entretanto para graneleiros de fundo inclinado, conhecido como fundo “V”, ainda faltam informações. Desse modo, em razão da carência de referências quanto ao dimensionamento de sistemas de aeração para graneleiros, objetivou-se com o presente trabalho propor uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de aeração em graneleiros de fundo “V”.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia proposta foi desenvolvida para graneleiros de fundo em “V”, com as paredes da extremidade retas e o dimensionamento foi feito para cada célula do graneleiro, que são unidades volumétricas formadas pela divisão do comprimento do graneleiro em septos. O dimensionamento do sistema de aeração compreendeu as seguintes etapas: cálculo da capacidade estática, cálculo da vazão, cálculo da perda de carga do sistema, estimativa da potência do motor do ventilador, dimensionamento e locação dos dutos de aeração e dimensionamento dos dutos principais.

2.1 Cálculo da capacidade estática

O cálculo da capacidade estática foi feito com base na determinação do volume da célula do graneleiro e na massa específica do grão a ser armazenado, processo conhecido como cubagem. Considerou-se que os grãos estejam previamente limpos e secos e, para efeito de cálculo, desconsiderou-se o grau de compactação da massa de grãos. Desta forma, a capacidade estática foi calculada a partir da Equação 1.

$$C_{ap} = \rho \cdot V \quad (1)$$

Em que:

C_{ap} = capacidade estática, (ton);

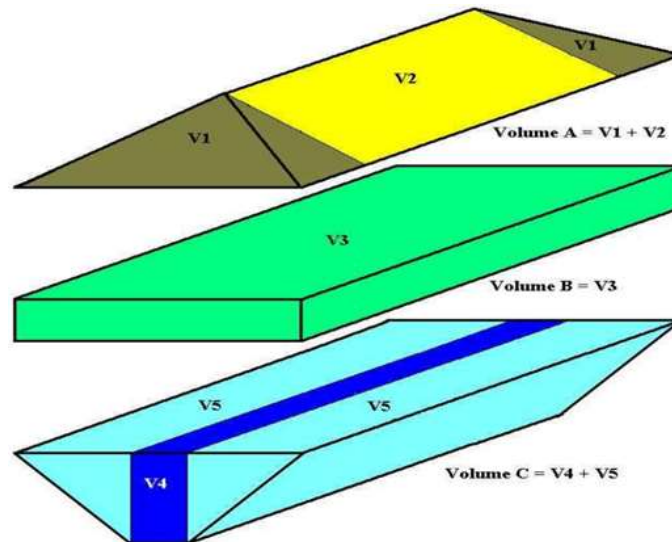
ρ = massa específica do grão, ($\text{ton} \cdot \text{m}^{-3}$);

V = volume da célula, (m^3).

Adotou-se o trigo como grão a ser armazenado, já que dentre os cereais da cultura brasileira é o que oferece maior perda de carga por metro de coluna de grãos, o que demanda maior potência do sistema de aeração. O cálculo do volume da massa de grãos armazenada na célula do graneleiro foi feito segundo preceitos de geometria, considerando que a massa de grãos assumia a configuração do fundo da célula, sem que haja nivelamento do topo. Deste modo, para o cálculo do volume da massa de grãos, levou-se em consideração as dimensões do fundo e a altura da parede externa do graneleiro, bem como o ângulo de repouso do grão para o cálculo do volume do topo da massa de grãos (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 1999).

Para simplificar o cálculo do volume, dividiu-se a massa de grãos em 3 volumes (Figura 1), sendo estes representados por V_A , V_B e V_C . Além disso, os volumes A e C foram subdivididos em V_1 e V_2 e em V_4 e V_5 , respectivamente.

Figura 1 – Representação volumétrica da massa de grãos no interior da célula do graneleiro

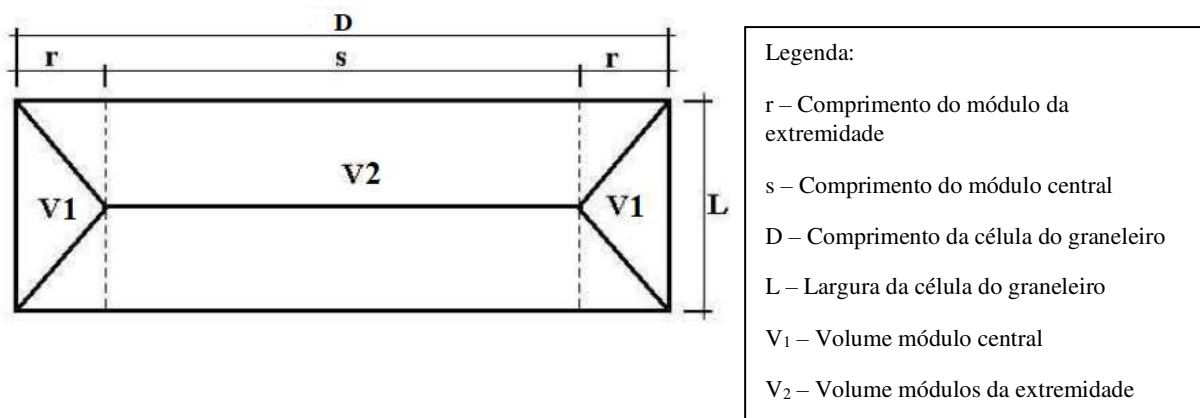


Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

O volume V_A representa o topo da massa de grãos (Figura 2) formado a partir do talude natural do grão considerado e é calculado a partir da soma dos volumes V_1 e V_2 , conforme representado na Equação 2.

$$V_A = V_1 + V_2 \quad (2)$$

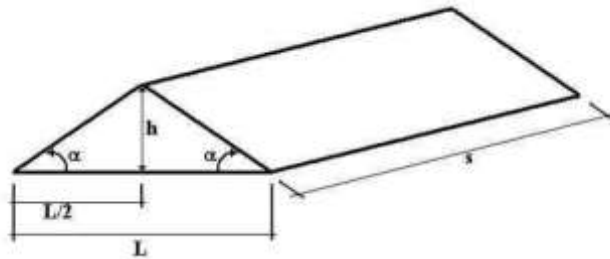
Figura 2 – Vista superior da célula do graneleiro, com as seções



Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

A partir das seções representadas na Figura 2, obteve-se a representação volumétrica do volume V_1 , conforme representado na Figura 3.

Figura 3 – Representação volumétrica do volume V_1



Legenda:

α – Ângulo de repouso

h – Altura do topo da massa de grãos

L – Largura da célula

s – Comprimento do módulo central

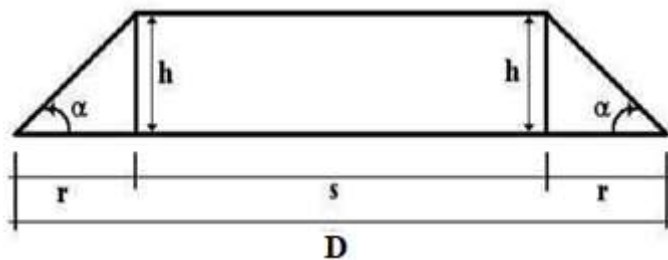
Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Em seguida, calculou-se a altura h do topo da massa de grãos em função da largura L da célula, representado na Equação 3.

$$h = \frac{L}{2} \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

O comprimento do módulo central foi calculado a partir de uma corte longitudinal no volume V_A , conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Corte longitudinal do volume V_A



Legenda:

α – Ângulo de repouso do grão

h – Altura do topo da massa de grãos

r – Comprimento do módulo da extremidade

s – Comprimento do módulo central

D – Comprimento da célula do graneleiro

Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Assim, obteve-se a seguinte relação para o comprimento do módulo central, representado pela Equação 4.

$$s = D - 2 \cdot r \quad (4)$$

Além disso, obteve-se a relação entre o comprimento r do módulo lateral e a altura h do topo da massa de grãos, representado na Equação 5.

$$r = \frac{h}{\tan \alpha} \quad (5)$$

Por conseguinte, substituindo a Equação 3 na Equação 5, obteve-se a seguinte relação, representada pela Equação 6.

$$r = \frac{L}{2} \quad (6)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 4, obteve-se a Equação 7.

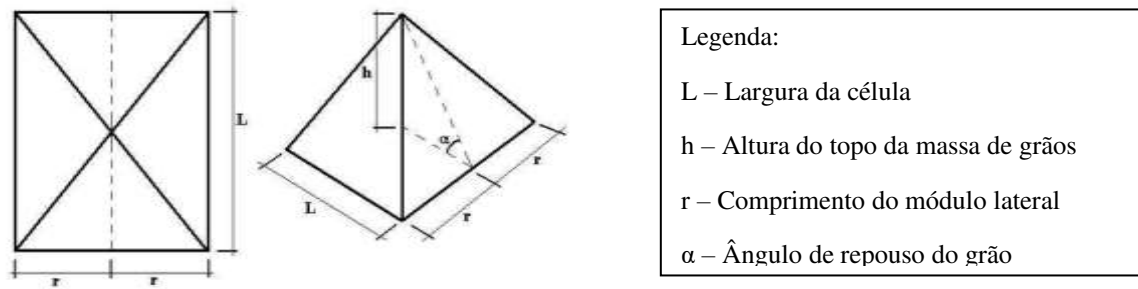
$$s = D - L \quad (7)$$

Por fim, o volume V_1 foi calculado através da Equação 8, a qual explicita este volume em função da largura L da célula, do comprimento D e o ângulo de repouso α .

$$V_1 = \frac{L^2}{4} \cdot \tan \alpha \cdot (D - L) \quad (8)$$

A partir das seções feitas no volume V_A , o cálculo do volume V_2 foi feito a partir da junção dos sólidos das extremidades, constituindo uma pirâmide (Figura 5).

Figura 5 – Vista superior e representação volumétrica do volume V_2



Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Sendo assim, o volume V_2 foi calculado em função do comprimento r do módulo lateral, da largura L da célula e da altura h do topo da massa de grãos, conforme representado pela Equação 9.

$$V_2 = \frac{2rLh}{3} \quad (9)$$

Em seguida, substituindo as Equações 3 e 6 na Equação 9, obteve-se a Equação 10.

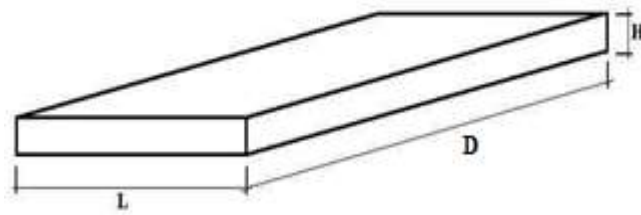
$$V_2 = \frac{L^3}{6} \cdot \tan \alpha \quad (10)$$

Portanto, substituindo as Equações 8 e 10 na Equação 2, obteve-se a Equação para cálculo do volume V_A , representado pela Equação 11.

$$V_A = \frac{L^2}{12} \cdot \tan \alpha \cdot (3D - L) \quad (11)$$

O volume V_B representa a massa de grãos que ocupa a porção intermediária do graneleiro (Figura 6), delimitada pela largura e comprimento da célula e pela altura da parede externa do graneleiro.

Figura 6 – Representação volumétrica do volume V_B



Legenda:

L – Largura da célula

D – Comprimento da célula

H – Altura da parede externa do graneleiro

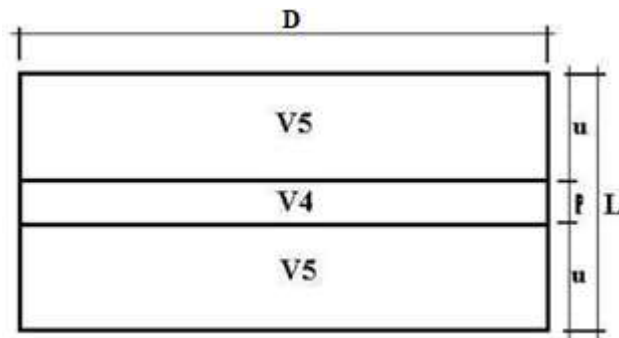
Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Assim, o volume V_B foi calculado a partir da Equação 12.

$$V_B = V_3 = L \cdot D \cdot H \quad (12)$$

O volume V_C (Figura 7) representa o formato da massa de grãos no fundo da célula.

Figura 7 – Vista superior do volume V_C



Legenda:

u – Projeção horizontal da rampa lateral

D – Comprimento da célula

l – Largura do túnel

L – Largura da célula

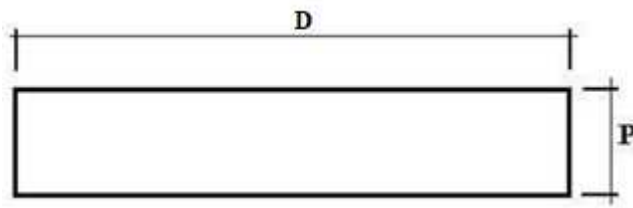
Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Dessa forma, o volume V_C é calculado a partir da soma dos volumes V_4 e V_5 , conforme representado na Equação 13.

$$V_C = V_4 + V_5 \quad (13)$$

O volume V_4 representa o paralelepípedo formado pela largura do túnel, pela profundidade do fundo da célula e pelo comprimento da célula. A partir de um corte longitudinal no volume V_4 (Figura 8), obteve-se a relação entre o comprimento e a profundidade da célula.

Figura 8 – Corte longitudinal do volume V_4



Legenda:

D – Comprimento da célula

P – Profundidade da célula

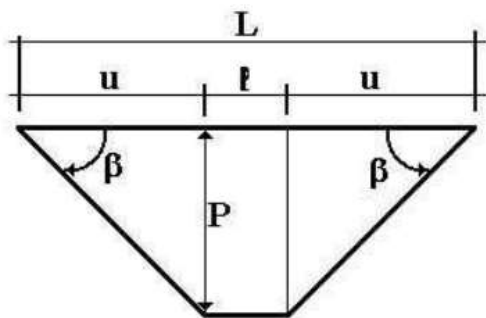
Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

A partir do retângulo formado, calculou-se a sua área A_r a partir da Equação 14.

$$A_r = D \cdot P \quad (14)$$

Para o cálculo da profundidade da célula, fez-se um corte transversal no volume V_C , representado na Figura 9.

Figura 9 – Corte transversal do volume V_C



Legenda:

L – Largura da célula

P – Profundidade da célula

u – Projeção horizontal da rampa lateral

l – Largura do túnel

β – Inclinação da rampa lateral

Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Dessa forma, calculou-se a profundidade da célula a partir da Equação 15.

$$P = u \cdot \tan \beta \quad (15)$$

Ainda a partir do corte transversal, a projeção horizontal u da rampa lateral foi calculada a partir da Equação 16.

$$u = \frac{L - l}{2} \quad (16)$$

Substituindo a Equação 16 na Equação 15, obteve-se a seguinte relação para a profundidade P da célula, representada pela Equação 17.

$$P = \frac{L - l}{2} \cdot \tan \beta \quad (17)$$

Portando, ao substituir a Equação 17 na Equação 14, obteve-se a Equação 18.

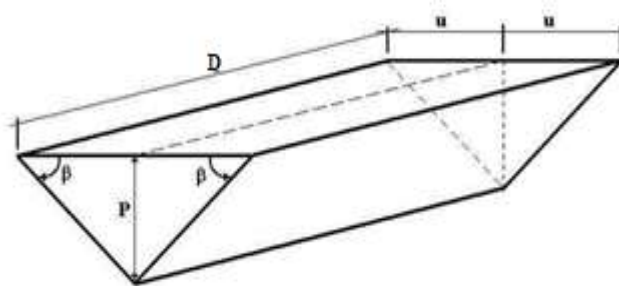
$$A_r = D \cdot \frac{L - l}{2} \cdot \tan \beta \quad (18)$$

Por fim, obteve-se o volume V_4 em função do comprimento D da célula, da largura L, da largura l do túnel e do ângulo de inclinação β da rampa, representado pela Equação 19.

$$V_4 = D \cdot \frac{L - l}{2} \cdot l \cdot \tan \beta \quad (19)$$

O volume V_5 , que representa o formato da massa de grãos no fundo da célula, foi obtido a partir da junção dos volumes da extremidade, após a remoção do volume V_4 . A Figura 10 representa a configuração do volume V_5 obtido.

Figura 10 – Representação volumétrica do volume V_5 .



Legenda:

D – Comprimento da célula

P – Profundidade da célula

u – Projeção horizontal da rampa lateral

β – Inclinação da rampa lateral

Fonte: Universidade Federal de Viçosa (1999).

Desta forma, o volume V_5 foi calculado através da Equação 20.

$$V_5 = \frac{2 \cdot u \cdot P}{2} \cdot D \quad (20)$$

Ao substituir as Equações 16 e 17 na Equação 20, obteve-se a Equação 21 para o volume V_5 .

$$V_5 = \left(\frac{L - l}{2} \right)^2 \cdot D \cdot \tan \beta \quad (21)$$

Logo, ao substituir as Equações 19 e 21 na Equação 13, obteve-se o volume V_C , representado pela Equação 22.

$$V_C = \frac{D \cdot \tan \beta}{4} \cdot (L^2 - l^2) \quad (22)$$

Por fim, obteve-se o volume da célula a partir da soma das Equações 11, 12 e 22, conforme representado na Equação 23.

$$V = \frac{L^2}{12} \cdot \tan \alpha \cdot (3D - L) + L \cdot D \cdot H + \frac{D \cdot \tan \beta}{4} \cdot (L^2 - l^2) \quad (23)$$

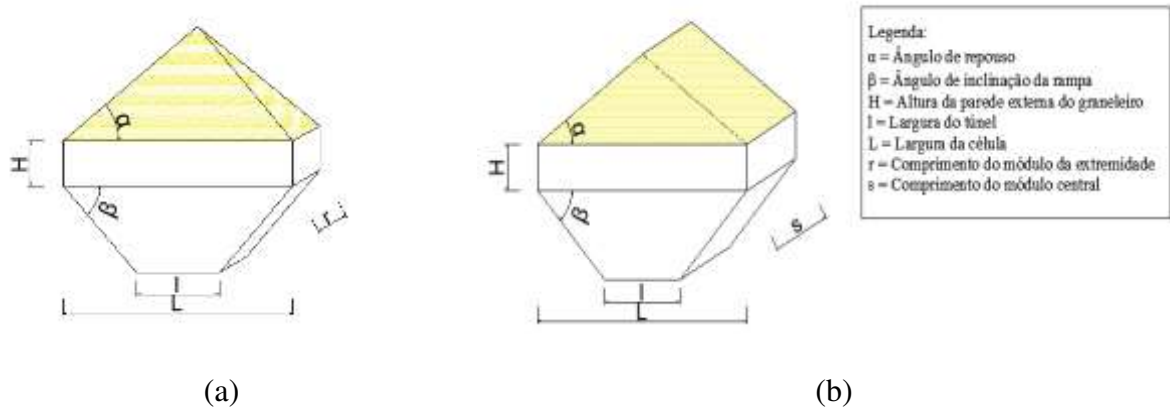
Portanto, o volume da célula foi calculado em função do seu comprimento, da sua largura, da altura da parede externa do graneleiro, da largura do túnel, do ângulo de repouso do grão e do ângulo de inclinação da rampa.

2.1.1 Módulos de aeração

Por ser uma estrutura extensa e de grandes dimensões, a célula do graneleiro foi dividida em módulos de aeração, com o objetivo de simplificar a análise do sistema de aeração a ser dimensionado. Estes módulos representam o formato da massa de grãos gerado a partir de dois cortes transversais ao longo do comprimento da célula, conforme especificado na Figura 2. Dessa forma, gerou-se duas configurações distintas para os módulos, os dois módulos da extremidade e o módulo central (Figura 11). O comprimento do módulo das extremidades foi obtido com base na Equação 6 e o comprimento do módulo central com base

na Equação 7. Como os módulos são sólidos geométricos gerados a partir de cortes transversais, as demais dimensões dos módulos serão as mesmas das dimensões da célula do graneleiro.

Figura 11 – Módulos de aeração das extremidades (a) e central (b), respectivamente



Fonte: Autores.

De maneira análoga à determinação do volume da célula do graneleiro, determinou-se o volume dos módulos, sendo o volume de cada módulo da extremidade V_e representado pela equação 24.

$$V_e = \frac{L^3}{12} \cdot \tan \alpha + \frac{L^2}{2} \cdot H + \frac{(L^2 - l^2)}{8} \cdot L \cdot \tan \beta \quad (24)$$

E o volume do módulo central V_c representado pela equação 25.

$$V_c = \frac{L^3}{4} \cdot \tan \alpha + L \cdot H \cdot (D - L) + \frac{(L^2 - l^2)}{4} \cdot (D - L) \cdot \tan \beta \quad (25)$$

Portanto, à semelhança da determinação do volume da célula do graneleiro, o volume dos dois tipos de módulos também foi determinado em função do comprimento e da largura da célula, da altura da parede externa, da largura do túnel, do ângulo de repouso do grão e do ângulo de inclinação da rampa. Desta forma, o dimensionamento do sistema de aeração do graneleiro foi realizado para cada um dos dois tipos de módulos, das extremidades e central.

2.2 Cálculo da vazão

Para aeração de estruturas horizontais, como graneleiros, recomenda-se vazão específica de 0,1 a 0,2 m³ de ar·min⁻¹·ton⁻¹ de produto (SILVA, J., 2008). Adotou-se a vazão específica de 0,1 m³ de ar·min⁻¹·ton⁻¹ de produto, que é a mínima recomendada pela Instrução Normativa n°29 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2011). Assim, a vazão de ar necessária foi obtida a partir da Equação 26.

$$Q = q \cdot C_{ap} \quad (26)$$

Em que:

Q = vazão necessária para aeração do módulo, (m³/min);

q = vazão específica, (m³/min·ton);

C_{ap} = capacidade estática do módulo, (ton).

2.3 Cálculo da perda de carga do sistema

Primeiramente, calculou-se o fluxo de ar, o qual foi calculado a partir da Equação 27.

$$F = \frac{Q}{A_b} \quad (27)$$

Em que:

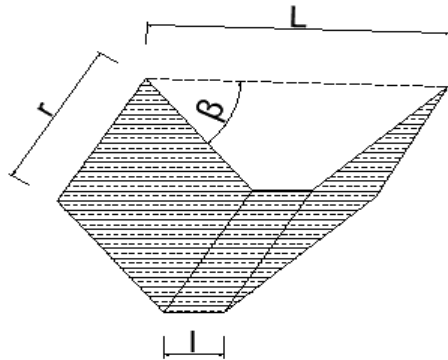
F = fluxo de ar no módulo, (m³/min·m²);

Q = vazão necessária para aeração do módulo, (m³/min);

A_b = área da base do módulo, (m²).

Considerou-se como área da base dos módulos os planos formados pelas rampas laterais e pelo túnel, conforme representado na Figura 12, para o módulo das extremidades, e na Figura 13 para o módulo central.

Figura 12 – Área da base do módulo das extremidades.



Legenda:

L – Largura da célula

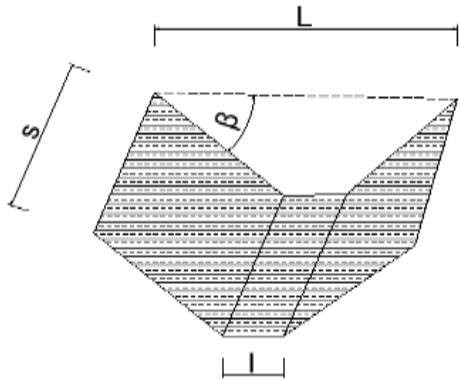
β – Inclinação da rampa lateral

l – Largura do túnel

r – Comprimento do módulo da extremidade

Fonte: Autores.

Figura 13 – Área da base do módulo central



Legenda:

L – Largura da célula

β – Inclinação da rampa lateral

l – Largura do túnel

s – Comprimento do módulo central

Fonte: Autores.

Em seguida, calculou-se a área da base do módulo das extremidades a partir da Equação 28.

$$A_{be} = \frac{L}{2} \cdot [(L - l) \cdot \sec \beta + l] \quad (28)$$

E a área da base do módulo central a partir da Equação 29.

$$A_{bc} = (D - L) \cdot [(L - l) \cdot \sec \beta + l] \quad (29)$$

Por fim, utilizou-se a Equação da ASAE D272.3 (ASABE STANDARDS, 1996) para estimar a perda de carga, representada pela equação 30.

$$P_e = \frac{a \cdot F^2}{\ln(1 + bF)} \cdot H_g \quad (30)$$

Em que:

P_e = perda de carga imposta pela coluna de grãos, (Pa);

F = fluxo de ar no módulo, ($\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$);

H_g = altura da coluna de grãos, (m);

a = constante definida em função do tipo de grão, ($\text{Pa} \cdot \text{min}^2/\text{m}^3$);

b = constante definida em função do tipo de grão, ($\text{m}^2 \cdot \text{min}/\text{m}^3$).

Caso o fluxo de ar no módulo seja superior à $12 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, deverá ser utilizado o diagrama “Curvas de Shedd” para determinação da perda de carga (SILVA, J., 2008). Considerando o armazenamento de trigo, os coeficientes a e b têm os respectivos valores de $7,5 \text{ Pa} \cdot \text{min}^2/\text{m}^3$ e $0,146 \text{ m}^2 \cdot \text{min}/\text{m}^3$. Multiplicou-se a perda de carga obtida por 0,102 para converter o valor de Pa para mmca.

Segundo Weber (2005), a pressão estática encontrada deve ser acrescida em 20 a 40%, para estimar a perda de carga devido a tubulações, curvas, registros, área de chapa perfurada e impurezas na massa de grãos. Portanto, adotou-se o coeficiente de 1,4 como margem de segurança, no intuito de que a potência do motor do ventilador seja suficiente para atender à pressão estática exigida pelo sistema.

2.4 Estimativa da potência do motor do ventilador

A potência do motor do ventilador foi estimada com base na Equação 31.

$$Pot = \frac{Q \cdot Pes}{4500 \cdot Rend} \quad (31)$$

Em que:

Pot = potência estimada do motor do ventilador por módulo, (cv);

Q = vazão de ar necessária para aeração do módulo, (m^3/min);

Pes = perda de carga do sistema, (mmca);

$Rend$ = rendimento do conjunto motor e ventilador, (decimal).

Devido as perdas por transmissão, adotou-se o valor do rendimento do conjunto motor-ventilador como 0,60. Além disso, definiu-se que serão utilizados 6 pontos de insuflação de ar no total, sendo 2 no módulo da extremidade esquerda, 2 no módulo da extremidade direita e 2 no módulo central, isto é, serão 2 pontos de insuflação de ar por módulo, um em cada lateral. O cálculo do número de ventiladores por ponto do módulo foi feito com base na potência comercial de motores elétricos e está representado na Equação 32.

$$n_{\text{ventiladores}} = \frac{Pot}{Pot_{\text{comercial}}} \quad (32)$$

Em que:

$n_{\text{ventiladores}}$ = número de ventiladores por módulo, (adimensional);

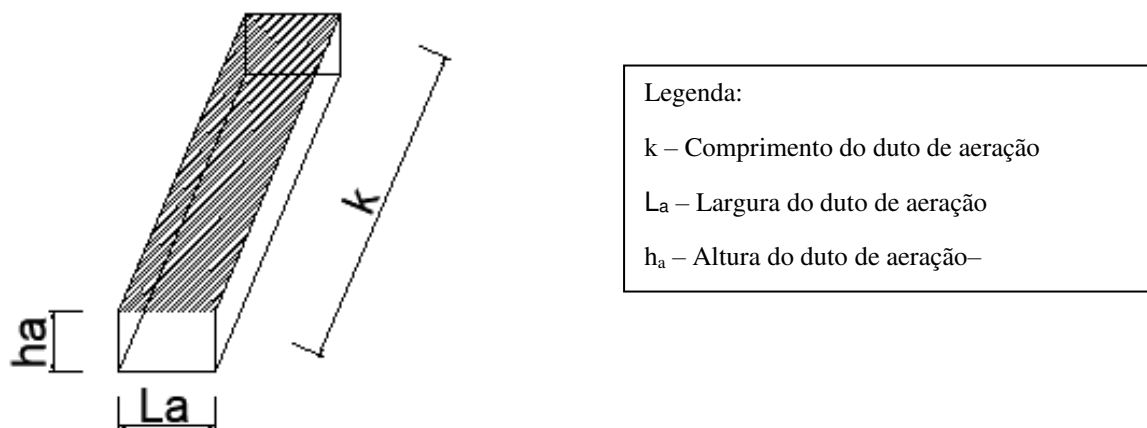
Pot = potência estimada do motor do ventilador por módulo, (cv);

Pot_{comercial} = potência comercial, (cv).

2.5 Locação e dimensionamento dos dutos de aeração

Os dutos de aeração são responsáveis pela distribuição do ar por toda a massa de grãos. Considerou-se que estes dutos serão enterrados em células de concreto e cobertos superficialmente por chapa metálica perfurada, conforme descrito por Lasseran (1981). A Figura 14 representa o esquema dos dutos de aeração.

Figura 14 – Representação do duto de aeração



Fonte: Lasseran (1981) – Adaptado.

Segundo Cunha (1999), a aeração pelo túnel é 40% menos eficiente, gasta 65% a mais de energia elétrica e oferece riscos ao controle de qualidade dos grãos. Portanto, adotou-se que a aeração será realizada de maneira lateral, em cada módulo. Os dutos de aeração serão alocados ao longo da largura da rampa.

Como cada módulo possui duas rampas laterais e em cada lateral do módulo foi considerado um ponto de insuflação de ar para produzir metade da vazão necessária à aeração da massa de grãos, a área da chapa perfurada foi calculada pela Equação 33.

$$A_{chapatotal} = \frac{Q}{2 \cdot v_{chapa}} \quad (33)$$

Em que:

$A_{chapatotal}$ = área total de chapa perfurada por rampa, (m²);

Q = vazão de ar necessária para aeração do módulo, (m³/min);

v_{chapa} = velocidade recomendada do ar de saída da chapa perfurada, (m/min).

Para aeração em graneleiros, em específico os de fundo plano, recomenda-se que a velocidade máxima do ar de saída da chapa perfurada seja de 9 m/min (NAVARRO; NOYES, 2001). Por outro lado, Weber (2005) recomenda que a velocidade do ar de saída da chapa perfurada seja de 15 a 30 m/min. Considerou-se a velocidade do ar de saída da chapa perfurada como 30 m/min, no intuito de reduzir a área da chapa necessária.

Em seguida, o comprimento total dos dutos foi calculado com base na Equação 34.

$$C_{total} = \frac{A_{chapatotal}}{L_a} \quad (34)$$

Em que:

C_{total} = comprimento total dos dutos de aeração por rampa, (m);

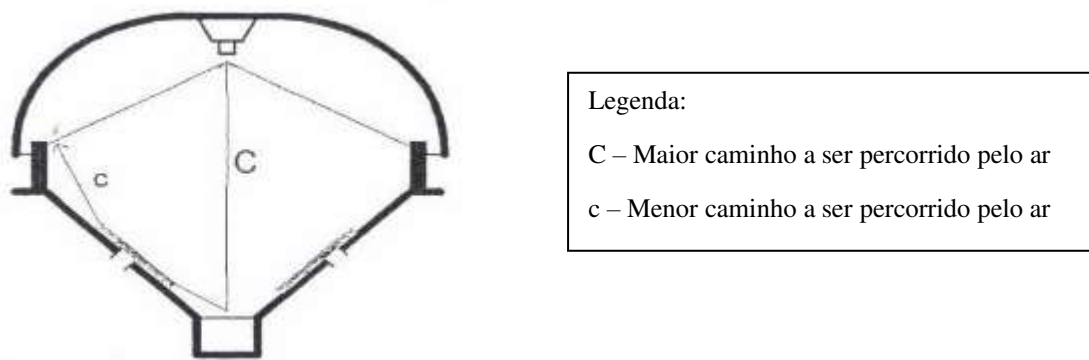
$A_{chapatotal}$ = área total de chapa perfurada por rampa, (m²);

L_a = largura do duto de aeração, (m).

No presente trabalho, adotou-se a largura dos dutos de aeração igual a 1 metro. Calculado o comprimento total dos dutos, a locação de cada duto deve ser feita de maneira a obedecer a relação C/c , que em graneiros não deve exceder o valor de 1,5, isto é, o maior

caminho C a ser percorrido pelo ar até a atingir a superfície dos grãos poderá ser maior que o menor caminho c em até 1,5 vezes (LASSERAN, 1981). A Figura 15 ilustra a relação entre o maior caminho e o menor caminho a ser percorrido pelo ar.

Figura 15 – Representação da relação C/c em graneleiro de fundo V



Fonte: Lasseran (1981).

Como o maior caminho é superior ao menor caminho a ser percorrido pelo ar ao sair do duto de aeração, alocou-se os dutos a partir do túnel, subindo a rampa, na tentativa de reduzir o maior caminho a ser percorrido pelo ar e diminuir o menor caminho.

Para a determinação da altura e do comprimento de cada duto de aeração, bem como o espaçamento entre eles, baseou-se no trabalho realizado por Watson e Brook (1990), os quais desenvolveram, em linguagem de programação C+, um código para determinação do número de dutos de forma a atender a relação C/c. Assim, adotou-se um número arbitrário de dutos, partindo de 4 dutos de aeração por módulo, isto é, 2 dutos em cada rampa.

Com base no número de dutos adotado para cada módulo, calculou-se o comprimento de cada duto, de acordo com a Equação 35, partindo do pressuposto de que todos os dutos tenham o mesmo comprimento.

$$k = \frac{C_{total}}{n} \quad (35)$$

Em que:

k = comprimento de cada duto de aeração, (m);

C_{total} = comprimento total dos dutos de aeração por rampa, (m);

n = número de dutos adotado, (adimensional).

Calculou-se também a altura de cada duto, a partir da Equação 36, considerando que a vazão proveniente do ventilador se distribua igualmente para o número de dutos adotado.

$$h_a = \frac{Q}{n \cdot v_a \cdot L_a} \quad (36)$$

Em que:

h_a = altura do duto de aeração, (m);

Q = vazão de ar necessária para aeração do módulo, (m³/min);

n = número de dutos adotado, (adimensional);

v_a = velocidade recomendada do ar no interior do duto de aeração, (m/min)

L_a = largura do duto, (m).

Considerou-se a velocidade do ar no interior do duto de aeração como 240 m/min, conforme recomendações feitas por Lasseran (1981) e por Weber (2005).

Para o espaçamento entre dutos, considerou-se a distância entre os eixos dos dutos, conforme proposto por Navarro e Noyes (2001). Logo, ainda com base no número de dutos adotado, calculou-se o espaçamento entre eles a partir da Equação 37.

$$e = \frac{R}{n} \quad (37)$$

Em que:

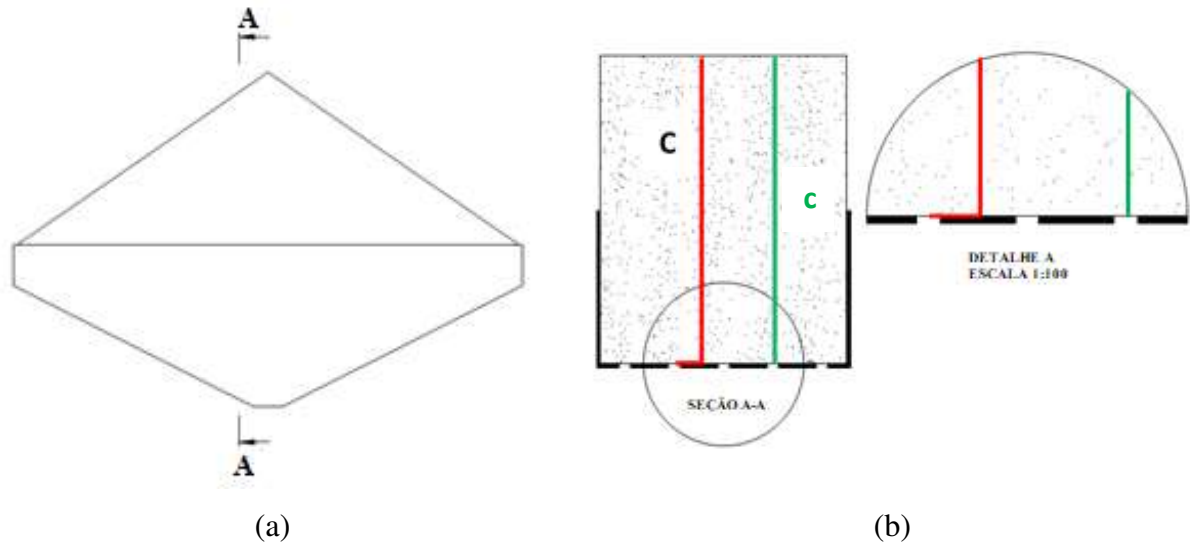
e = espaçamento entre dutos, (m);

R = comprimento do módulo, (m);

n = número de dutos adotado, (adimensional).

Contudo, para verificar se o espaçamento entre dutos atende à relação C/c, considerou-se como o maior caminho a ser percorrido pelo ar o segmento de reta constituído pela metade do espaçamento entre os dutos e pela altura da massa de grãos imediatamente acima dos dutos, conforme representado na Figura 16.

Figura 16- Corte longitudinal do módulo (a) e vista frontal do corte (b) evidenciando o maior e o menor caminho percorrido pelo ar ao sair do duto de aeração e atingir a superfície da massa de grãos



Fonte: Autores.

Assim, por geometria e com base nas Equações 16 e 17, obteve-se a relação C/c na longitudinal, representada pela Equação 38.

$$C/c_l = \frac{\frac{(L-l)}{2} \tan \alpha + H + \frac{(L-l)}{2} \tan \beta + \frac{e}{2}}{\frac{(L-l)}{2} \tan \alpha + H + \frac{(L-l)}{2} \tan \beta} \quad (38)$$

Em que:

C/c_l = relação entre o maior e o menor caminho na longitudinal, (adimensional);

L = largura da célula, (m);

l = largura do túnel, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

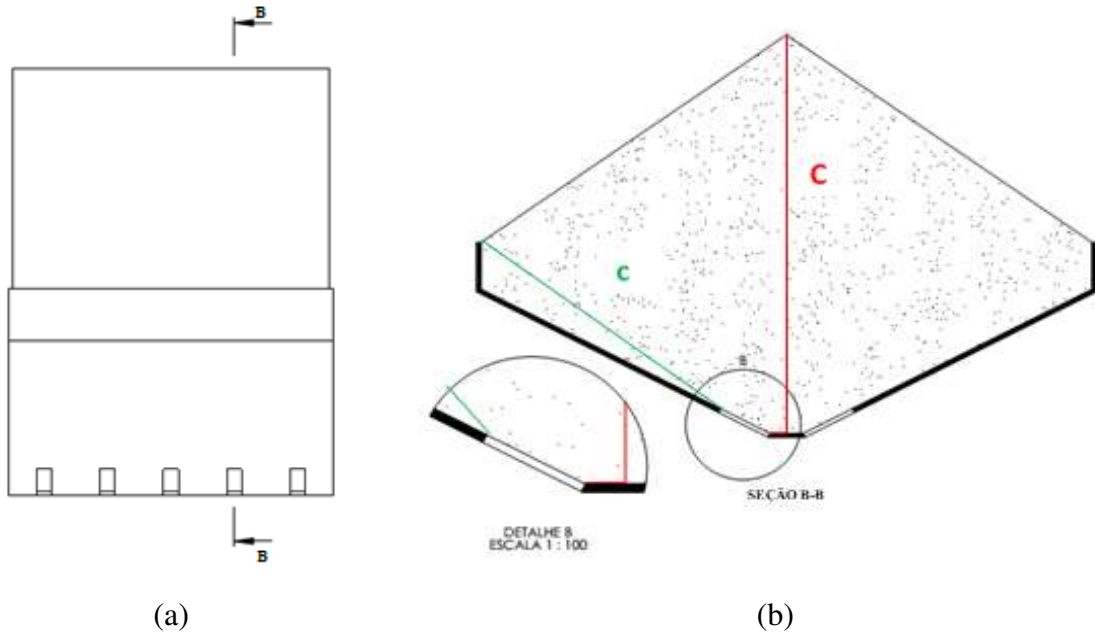
α = ângulo de repouso do grão, ($^\circ$);

β = ângulo de inclinação da rampa, ($^\circ$);

e = espaçamento entre dutos, (m).

E para a verificar a alocação e posicionamento do duto na rampa, adotou-se como menor caminho o segmento oblíquo partindo da extremidade do duto de aeração até a altura da parede externa do graneleiro, conforme representado na Figura 17.

Figura 17 – Corte transversal do módulo (a) e vista frontal do corte (b) evidenciando o maior e o menor caminho percorrido pelo ar ao sair do duto de aeração e atingir a superfície da massa de grãos



Fonte: Autores.

Logo, com base na Lei dos Cossenos, calculou-se o menor caminho a ser percorrido pelo ar através da Equação 39.

$$c = \sqrt{H^2 + \left(\frac{L-l}{2} \sec \beta - k\right)^2 + 2 \cdot H \cdot \left(\frac{L-l}{2} \sec \beta - k\right) \cdot \sin \beta} \quad (39)$$

Em que:

c = menor caminho percorrido pelo ar, (m);

L = largura da célula, (m);

l = largura da rampa, (m);

k = comprimento do duto, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

β = ângulo de inclinação da rampa a partir da horizontal, (°).

Com base na Equação 35, reescreveu-se a Equação 39, obtendo-se a Equação 40.

$$c = \sqrt{H^2 + \left(\frac{(L-l)}{2} \sec \beta - \frac{C_{total}}{n} \right)^2} + 2 \cdot H \cdot \left(\frac{(L-l)}{2} \sec \beta - \frac{C_{total}}{n} \right) \cdot \sin \beta \quad (40)$$

Em que:

L = largura da célula, (m);

l = largura do túnel, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

β = ângulo de inclinação da rampa, ($^\circ$);

C_{total} = comprimento total dos dutos de aeração por rampa, (m);

n = número de dutos adotado (adimensional).

Por sua vez, o maior caminho foi calculado pela Equação 41.

$$C = \frac{l}{2} + H_g \quad (41)$$

Em que:

C = maior caminho a ser percorrido pelo ar, (m);

l = largura do túnel, (m);

H_g = profundidade da massa de grãos, (m).

Para o cálculo da profundidade da massa de grãos, considerou-se a altura da parede externa do graneleiro, a altura do topo da massa de grãos e a profundidade do módulo, sendo estas duas últimas determinadas pelas Equações 3 e 17, respectivamente. Tomando essa situação como o pior cenário possível, calculou-se a profundidade da camada de grãos pela Equação 42.

$$H_g = \frac{L-l}{2} \cdot \tan \beta + H + \frac{L}{2} \cdot \tan \alpha \quad (42)$$

Em que:

H_g = altura da massa de grãos, (m);

L = largura da célula, (m);

l = largura do túnel, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

α = ângulo de repouso do grão, ($^\circ$);

β = ângulo de inclinação da rampa, ($^\circ$).

Assim, com base na Equação 42, a Equação 41 foi reescrita, sendo representada pela Equação 43.

$$C = \frac{l}{2} + \frac{L-l}{2} \cdot \tan \beta + H + \frac{L}{2} \cdot \tan \alpha \quad (43)$$

Em que:

C = maior caminho a ser percorrido pelo ar, (m);

L = largura do célula, (m);

l = largura do túnel, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

α = ângulo de repouso do grão, ($^\circ$);

β = ângulo de inclinação da rampa, ($^\circ$).

Assim, com base nas Equações 40 e 43, definiu-se a Equação da relação C/c na transversal, representada pela Equação 44.

$$C/c_t = \frac{\frac{l}{2} + \frac{L-l}{2} \cdot \tan \beta + H + \frac{L}{2} \cdot \tan \alpha}{\sqrt{H^2 + \left(\frac{(L-l)}{2} \cdot \sec \beta - \frac{C_{total}}{n} \right)^2 + 2 \cdot H \cdot \left(\frac{(L-l)}{2} \cdot \sec \beta - \frac{C_{total}}{n} \right) \cdot \sin \beta}} \quad (44)$$

Em que:

C/c_t = relação entre o maior e o menor caminho na transversal, (adimensional);

L = largura da célula, (m);

l = largura do túnel, (m);

H = altura da parede externa do graneleiro, (m);

α = ângulo de repouso do grão, ($^\circ$);

β = ângulo de inclinação da rampa a partir da horizontal, ($^\circ$);

C_{total} = comprimento total dos dutos de aeração por rampa, (m);

n = número de dutos adotado (adimensional).

Portanto, se a relação C/c , representada pelas Equações 38 e 44, for menor ou igual a 1,5 para o número de dutos adotado, o comprimento de cada duto, a altura e o espaçamento entre eles será definido pelas Equações 35, 36 e 37, respectivamente. Caso contrário, deve-se aumentar o número de dutos em 2 unidades por módulo, o que corresponde a um acréscimo de 1 duto por rampa, e verificar novamente se a relação C/c foi satisfeita.

2.6 Dimensionamento do duto principal

O duto principal é o que conduz a vazão do ventilador aos dutos de aeração. Segundo Lasseran (1981) e Weber (2005), a velocidade de ar máxima no interior do duto principal deve ser de 480 m/min. Desta forma, calculou-se a área da seção transversal do duto principal a partir da Equação 45.

$$A_p = \frac{Q}{n_{\text{ventiladores}} \cdot v_d} \quad (45)$$

Em que:

A_p = área da seção transversal do duto principal, (m²);

Q = vazão de ar necessária para aeração do módulo, (m³·min⁻¹);

v_d = velocidade recomendada do ar no interior do duto de distribuição, (m/min).

$n_{\text{ventiladores}}$ = número de ventiladores por módulo, (adimensional);

Considerou-se que os dutos principais serão de formato quadrado. Assim, as suas dimensões foram calculadas a partir da Equação 46.

$$L_p = \sqrt{A_p} \quad (46)$$

Em que:

L_p = dimensão do duto principal, (m)

A_p = área da seção transversal do duto principal, (m²).

3 ESTUDO DE CASO

Como forma de validar a metodologia, fez-se o estudo de caso para um graneleiro, cujas dimensões estão representadas na tabela 1, considerando dois cenários: dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro com uma única célula e o dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro com duas células. Posteriormente, com o sistema de aeração dimensionado para trigo, considerou-se o armazenamento de soja e de milho, a fim de verificar a vazão específica para estes produtos, cujas propriedades físicas estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 1 – Dimensões do graneleiro

Variáveis	Dimensão
Comprimento	100 metros
Largura	40 metros
Altura das paredes externas	3,5 metros
Largura da base do fundo	2,0 metros
Inclinação da rampa	27°

Fonte: Autores.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos grãos de trigo

Produto	Teor de umidade (%b.u.)	Massa específica (t.m ⁻³)	Ângulo de repouso (°)
Trigo ⁽¹⁾	14,1	0,756	31
Milho ⁽¹⁾	13	0,737	34,9
Soja ⁽²⁾	13,6	0,644	30,96

Fonte: ⁽¹⁾Silva (2008); ⁽²⁾Wandkar; Ukey; Pawar, (2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como o dimensionamento do sistema de aeração foi baseado nas dimensões das células do graneleiro e nas propriedades físicas do grão selecionado, como massa específica, ângulo de repouso e coeficientes associados à perda de carga imposta pela coluna de grãos, estes parâmetros foram utilizados como variáveis de entrada na planilha eletrônica, que foi elaborada com base nas equações e na sequência lógica desenvolvida na metodologia.

4.1 Dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro com uma única célula

Neste caso, tratou-se o graneleiro como uma única célula, sendo as dimensões desta igual às do graneleiro. Com base nas Tabelas 1 e 2, dimensionou-se o sistema de aeração para a célula do graneleiro, cujo resultado está representado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensionamento do sistema de aeração para graneleiro de uma única célula

	Módulo extremidade	Módulo central
Comprimento (m)	20	60
Volume (m ³)	10.070,60	35.018,69
Massa de grãos (t)	7.613,38	26.474,13
Vazão de ar necessária (m ³ .min)	761,34	2.647,41
Fluxo por área (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²)	0,85	0,99
Perda de carga do sistema (mmca)	167,21	195,55
Número de ventiladores	2	4
Potência estimada de cada ventilador (cv)	23,58	47,94
Número de dutos de aeração em cada lado da rampa	3	8
Comprimento de cada duto de aeração (m)	4,23	5,52
Altura de cada duto de aeração (m)	1,06	1,38
Relação C/c transversal	1,38	1,48
Espaçamento entre dutos (m)	6,67	7,50
Relação C/c longitudinal	1,19	1,15
Área transversal do duto principal (m x m)	0,36	1,17

Fonte: Autores.

Nota-se, pela Tabela 3, que para atender a potência demandada para cada módulo da extremidade, será necessário 2 motores de 25 cv, um em cada lateral dos módulos da extremidade, enquanto que para atender potência demandada para o módulo central será necessário 4 motores de 50 cv, dois em cada lado do módulo. A partir desse

dimensionamento, considerou-se o armazenamento de soja e o armazenamento de milho na célula e as vazões específicas obtidas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Vazão específica obtida para o armazenamento de milho e para o armazenamento de soja

	Vazão específica (m^3 de $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ de produto)	
	Módulo Extremidade	Módulo Central
Milho	0,103	0,100
Soja	0,125	0,123

Fonte: Autores.

Considerando o sistema de aeração dimensionado para trigo, ao ser armazenado soja ou milho, verificou-se que a vazão específica para soja foi maior em relação ao milho. Isso se deve ao formato arredondado dos grãos de soja e principalmente ao índice de porosidade, pois pelo fato desse índice ser menor para soja resulta em menor perda de carga (MATA; DUARTE, 2002; SILVA, J., 2008). Vale ressaltar que a vazão específica obtida tanto para milho quanto para soja estão dentro da faixa de 0,1 a 0,2 m^3 de $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{ton}^{-1}$ de produto, recomendada por Silva (2008).

4.2 Dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro com duas células

Considerou-se o dimensionamento do sistema de aeração para o graneleiro contendo 2 células, sendo o comprimento da primeira igual a 60 metros e o da segunda igual a 40 metros. O resultado do dimensionamento está disposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensionamento do sistema de aeração para as células do graneleiro

	Primeira Célula		Segunda Célula
	Módulo Extremidade	Módulo Central	Módulo Extremidade
Comprimento (m)	20	20	20
Volume (m ³)	10.070,40	11.672,90	10.070,40
Massa de grãos (t)	7.613,38	8.824,71	7.613,38
Vazão de ar necessária	761,34	882,47	761,34
Fluxo por área (m ³ .min ⁻¹ .t ⁻¹)	0,85	0,99	0,85
Perda de carga do sistema (mmca)	167,21	195,55	167,21
Número de ventiladores	2	2	2
Potência estimada de cada ventilador (cv)	23,58	31,96	23,58
Número de dutos de aeração em cada lado da rampa	3	3	3
Comprimento de cada duto de aeração (m)	4,23	4,90	4,23
Altura de cada duto de aeração (m)	1,06	1,23	1,06
Relação C/c transversal	1,38	1,43	1,38
Espaçamento entre dutos (m)	6,67	6,67	6,67
Relação C/c longitudinal	1,14	1,14	1,14
Área transversal do duto principal (m x m)	0,89	0,96	0,89

Fonte: Autores.

Para atender a potência demandada para cada módulo da extremidade, será necessário 2 motores de 25 cv, um em cada lateral dos módulos da extremidade, enquanto que para atender a potência demandada para o módulo central será necessário 2 motores de 40 cv, um em cada lado do módulo. Vale ressaltar que a potência estimada para os ventiladores, nos dois cenários, representa a potência mínima dos ventiladores, uma vez que considerou-se a vazão mínima recomendada pela Instrução Normativa n°29 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Como o comprimento do módulo da extremidade é obtido apenas em função da largura da célula, o comprimento do módulo central diminui à medida que se reduz o comprimento da célula. No caso em que o comprimento da célula tem o mesmo valor da sua largura, a configuração do topo da massa de grãos se assemelha a uma pirâmide e, portanto, o dimensionamento do sistema de aeração é realizado apenas para os módulos das extremidades, conforme observado na segunda célula (Tabela 5). Embora o comprimento do módulo central tenha reduzido ao se comparar o primeiro cenário (Tabela 3) com o segundo cenário (Tabela 5), a redução na vazão necessária para aeração do módulo foi compensada pela redução na área da base do módulo, por isso não houve alteração significativa no fluxo de ar, que influi diretamente na perda de carga. Como houve redução da vazão de ar para uma mesma pressão estática, a potência necessária para aeração do módulo foi menor, o que levou a um menor

número de ventiladores no módulo central do primeiro cenário em relação ao segundo cenário.

Após o dimensionamento do sistema de aeração, considerou-se o armazenamento de soja e o armazenamento de milho em cada célula e as vazões específicas obtidas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazão específica obtida para o armazenamento de milho e para o armazenamento de soja em cada célula

Vazão específica (m^3 de $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ de produto)			
		Módulo Extremidade	Módulo Central
Primeira Célula	Milho	0,103	0,120
	Soja	0,125	0,147
Segunda Célula	Milho	0,103	-
	Soja	0,125	-

Fonte: Autores.

Pelo fato das massas de grãos de soja e de milho proporcionarem menores índices de perda de carga em relação ao trigo, os valores das vazões específicas para milho e soja foram superiores ao de trigo, o que foi constatado para o dimensionamento do sistema de aeração para os cenários célula única e duas células, Tabelas 4 e 6, respectivamente. Os valores das vazões específicas calculados para soja e milho demonstram que o dimensionamento do sistema de aeração está adequado (SILVA, J., 2008).

O número de dutos para aeração obtido em ambos os cenários representa o número mínimo que satisfaz a relação C/c , ou seja, o número de dutos pode ser aumentado. Porém, o aumento no número de dutos implica em dutos com menor comprimento e altura, além de reduzir o espaçamento entre eles. Outro fato é que ao se aumentar o número de dutos, aumenta-se a perda de carga do sistema, decorrente de curvas e inserções no duto principal.

No presente trabalho, considerou-se as paredes finais da célula do graneleiro retas para simplificar a análise do volume dos módulos gerados a partir dos cortes transversais. Porém, para o caso de graneleiros com células de paredes finais inclinadas, além da redução da capacidade estática em relação a células com paredes finais retas, presume-se que o módulo central, gerado a partir de cortes transversais, irá acondicionar uma massa de grãos com profundidades distintas, já que o ângulo de inclinação das paredes finais não é o mesmo do ângulo de repouso do grão armazenado. Embora a inclinação das paredes finais do graneleiro

proporcione maior área para aeração dos grãos, devido a possibilidade de alocação de dutos nessas paredes, a análise da relação C/c para alocação dos dutos se torna mais complexa nos módulos da extremidade. Nesse aspecto, as paredes finais retas facilitam a distribuição dos dutos de aeração, principalmente ao se considerar a instalação dos ventiladores nas laterais do módulo.

Na metodologia proposta não foi considerado o grau de compactação dos grãos, o qual, segundo Weber (2005), é um dos fatores que contribui para o aumento da perda de carga do sistema, já que o aumento da resistência à passagem do ar pela massa de grãos implica em maior potência dos ventiladores. Portanto, futuros trabalhos pertinente a essa área poderão considerar o efeito da compactação dos grãos na potência necessária à aeração dos módulos. Além disso, poderá ser estudada uma maneira de implementar tal metodologia para células de graneleiros com paredes finais inclinadas. Por fim, esta metodologia poderá ser implementada em uma linguagem de programação, com o propósito de gerar um software de dimensionamento do sistema de aeração em graneleiros.

5 CONCLUSÕES

A metodologia proposta, em que a massa de grãos foi segmentada em módulos das extremidades e central, apresentou-se adequada ao dimensionamento de sistema de aeração em graneleiros fundo em “V” com as paredes das extremidades das células retas. Ao segmentar a massa de grãos em módulos, simplifica-se a análise do sistema e cria-se condições de replicar o dimensionamento do sistema de aeração para módulos equivalentes. Contudo, à medida que o comprimento da célula se aproxima da sua largura, o dimensionamento do sistema de aeração será realizado empregando apenas os módulos da extremidade, uma vez que o topo da massa de grãos assume o formato de uma pirâmide.

6 REFERÊNCIAS

ASABE STANDARDS. ASAE D272.3: Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. **ASAE Standards**, v. 1996, p. 1–7, 2016.

BARONI, G.; BENEDETI, P.; SEIDEL, D. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. **Revista Thema**, v. 14, n. 4, p. 55–64, 2017.

BINELO, M. O. et al. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, p. 104923, 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa no 29, de 8 de Junho de 2011. Aprova os Requisitos Técnicos Obrigatórios ou Recomendados para Certificação de Unidades Armazenadoras em Ambiente Natural e o Regulamento de Avaliação da Conformidade das Unidades Armazenadoras. Sistema Integrado de Legislação, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/infraestrutura-e-logistica/documentos/infraestrutura/29-2011.pdf>. Acesso em 14 de mai. de 2021.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra 2020/21 sexto levantamento**. Brasília, DF: CONAB, v.8, n.6, 2021.

CUNHA, O. P. **Domínio Operacional: Curso Operacional de preparação para a safra/98 e pós-colheita/99**. [S.I.: s.n.], c1999. Curso preparatório fornecido pela empresa DRYERATION.

DARBY, J. Aeration increases marketing choices. **Farming Ahead**, n. 144, p. 26–28, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Estoques Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/estoques/brasil>. Acesso em 13 de mar. de 2021.

KHATCHATOURIAN, O. A. et al. Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal storage bins. **Biosystems Engineering**, v. 142, p. 42-52, 2016.

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).

MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v4, n.1, .79-93, 2002.

NARENDRAN, R. B. et al. Segregation of canola, kidney bean, and soybean in wheat bulks during bin loading. **Powder Technology**, v. 344, p. 307-313, 2019.

NAVARRO, S.; NOYES, R. (Eds.). **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 672 p.

PANIGRAHI, S. S. et al. Strategies to mitigate dead-zones in on-farm stored grain silos fitted with aeration ducting modelled using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 205, p. 93-104, 2021.

RUAS, J.; SALVADOR, M.; AMAZONAS, L. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Companhia Nacional de Abastecimento, v. 7, n. 6, p. 1–89, 2020.

SENAR - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café**. Brasília: [s.n.].

SILVA, L. C. et al. A simulation toolset for modeling grain storage facilities. **Journal of Stored Products Research**, v. 48, p. 30-36, 2012.

SILVA, J. S (ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2008. xiv, 560 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. [Cubagem de graneleiro]. [S.I.:s.n.]. Trabalho realizado na disciplina ENG 370 – Secagem e Armazenagem de Grãos. Viçosa, MG, [1999?].

WANDKAR, S. V.; UKEY, P. D.; PAWAR, D. A. Determination of physical properties of soybean at different moisture levels. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 14, n. 2, p. 138–142, 2012.

WATSON, D. G.; BROOK, R. C. Aeration System Design for Flat Grain Storages with an Expert System. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 183–188, 1990.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Panambi: Salles, 2005. 586 p.