



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**VICTOR ABREU DE LIMA**

**AERODINÂMICA DE CAIXAS DE TRANSPORTE DE AVES**

**FORTALEZA**

**2025**

VICTOR ABREU DE LIMA

AERODINÂMICA DE CAIXAS DE TRANSPORTE DE AVES

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho.

FORTALEZA

2025

VICTOR ABREU DE LIMA

AERODINÂMICA DE CAIXAS DE TRANSPORTE DE AVES

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: 28/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Carla Renata Figueiredo Gadelha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Gurgel Pinheiro  
Instituto Federal de Educação e Ciência (IFCE)

---

Prof. Dr. Frederico Márcio Corrêa Vieira  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Prof. Dr. Nitalo André Farias Machado  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

*Ao meu filho Léo, minha esposa Tavani.*

*Aos meus pais e meu irmão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho, Zeca, por toda parceria, ensinamentos e amizade durante toda essa jornada.

Ao Prof. Mateus J.R. Paranhos da Costa, em memória, pela amizade e por toda contribuição em minha formação em bem-estar animal.

Aos Pesquisadores Antonio Velarde e Antonio Dalmau e toda a equipe do IRTA Monells pela ajuda, compreensão, orientação e incentivo durante minha estadia em Girona.

Aos professores Frederico, Carla, Nitalo e Daniel pelo incentivo e interesse, expressos como forma de enriquecimento do trabalho.

Ao Núcleo de Estudos em Ambiência Agrícola e Bem-Estar Animal (NEAMBE), pelas valiosas contribuições para a pesquisa.

A minha esposa, Tavani Rocha Camargo e meu filho Léo Rocha Lima, pelo apoio e compreensão durante essa jornada. Aos meus pais, Claudio e Margarida, meu irmão Ramon, vó Ivone, minha sogra Laura e meus cunhados por todo suporte.

Aos produtores de aves, empresas e seus colaboradores pelo empenho e dedicação na produção de aves.

A todos que contribuíram nessa etapa.

“Juntar-se é um começo; manter-se unido  
é progresso; trabalhar junto é sucesso.”

Henry Ford

## RESUMO

O transporte de aves representa um desafio significativo para o bem-estar animal, particularmente quando as aves são expostas ao estresse térmico durante a viagem, uma condição que pode comprometer a estabilidade fisiológica, o desempenho e a sobrevivência. Apesar da relevância dessa questão, a pesquisa sobre melhorias de engenharia em gaiolas de transporte de aves ainda é limitada. Neste estudo, quatro modelos de caixas de transporte de aves foram avaliados para determinar seu potencial de melhorar o conforto térmico e as condições de fluxo de ar interno. Simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) foram realizadas em três velocidades de transporte, complementadas por experimentos em túnel de vento utilizando protótipos em escala reduzida fabricados por manufatura aditiva. Os resultados da simulação CFD demonstraram que o modelo de caixa alternativa 3 (AC3) apresentou velocidades médias de fluxo de ar interno (IAFV) superiores em todas as velocidades, incluindo um aumento de 32,85% em comparação com a caixa convencional brasileira (CC) a 60 km/h. Os testes em túnel de vento confirmaram diferenças significativas entre as caixas. A AC3 apresentou temperatura do ar mais baixa do que a AC1 e umidade relativa reduzida em comparação com a CC e a AC2. Os índices bioclimáticos corroboraram esses resultados, com a AC3 apresentando o menor ITU e entalpia, indicando um microclima menos estressante. Em termos de fluxo de ar, as AC2 e AC3 alcançaram IAFV mais elevadas ( $19,27 \pm 8,49$  m/s e  $19,30 \pm 4,80$  m/s) do que as AC1 e CC. A AC3 também apresentou a menor pressão dinâmica, sugerindo menor resistência ao fluxo de ar e aerodinâmica mais eficiente. Portanto, a geometria aprimorada das caixas e o aumento da superfície de ventilação podem melhorar a distribuição do fluxo de ar, potencialmente reduzir o acúmulo de calor e melhorar o bem-estar animal. No entanto, são necessários mais estudos envolvendo aves vivas, densidades de alojamento realistas e simulações em escala real de reboques para validar esses benefícios em condições de transporte comercial.

**Palavras-chave:** Frangos de Corte, Protótipos; Transporte animal; Zootecnia de precisão.

## ABSTRACT

Poultry transportation presents a significant challenge to animal welfare, particularly when birds are exposed to thermal stress during travel, a condition that can compromise physiological stability, performance, and survival. Despite the relevance of this issue, research on engineering improvements in poultry transport crates remains limited. In this study, four poultry transport crates models were evaluated to determine their potential to improve thermal comfort and internal airflow conditions. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were performed at three transport speeds, complemented by wind tunnel experiments using reduced-scale prototypes manufactured by additive manufacturing. The CFD simulation results demonstrated that alternative crate model 3 (AC3) exhibited higher average internal airflow velocities (IAFV) at all speeds, including a 32.85% increase compared to the conventional Brazilian crate (CC) at 60 km/h. Wind tunnel tests confirmed significant differences between the crates. AC3 presented lower air temperature than AC1 and reduced relative humidity compared to CC and AC2. Bioclimatic indices corroborated these results, with AC3 presenting the lowest THI and enthalpy, indicating a less stressful microclimate. In terms of airflow, AC2 and AC3 achieved higher IAFV ( $19.27 \pm 8.49$  m/s and  $19.30 \pm 4.80$  m/s) than AC1 and CC. AC3 also presented the lowest dynamic pressure, suggesting less resistance to airflow and more efficient aerodynamics. Therefore, the improved geometry of the boxes and the increase in ventilation surface area may improve airflow distribution, potentially reducing heat accumulation and improving animal welfare. However, further studies involving live birds, realistic stocking densities, and full-scale trailer simulations are needed to validate these benefits under commercial transport conditions.

**Keywords:** Broiler Chickens, Prototypes; Animal Transport; Precision livestock

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zona termoneutra de aves. Fonte: LUDKE et al., 2010.....	19
Figura 2 – Esquema dos 5 domínios. Fonte: Adaptado de KELLS, 2021.....	23
Figura 3 – Velocidade do vento em um veículo de carga. Fonte: ACEVEDO - GIRALDO et al., 2018.....	27
Figura 4 – Modelo virtual da caixa convencional de transporte de aves (CC).....	30
Figura 5 – Modelo virtual da caixa alternativa 1 (AC1) para transporte de aves.....	31
Figura 6 – Modelo virtual da caixa alternativa 2 (AC2) para transporte de aves.....	32
Figura 7 – Modelo virtual da caixa alternativa 3 (AC3) para transporte de aves.....	32
Figura 8 – Equipamento de corte e peças para confecção de um modelo de caixa.....	35
Figura 9 – Fotos do protótipo da caixa convencional CC confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.....	36
Figura 10 – Fotos do protótipo da caixa convencional AC1 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.....	36
Figura 11 – Fotos do protótipo da caixa convencional AC2 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.....	36
Figura 12 – Fotos do protótipo da caixa convencional AC3 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.....	37
Figura 13 – Posicionamento, fixação da caixa e do tubo pitot com a vista lateral e com a vista frontal voltada para o curso do vento, respectivamente.....	38
Figura 14 – Posicionamento do tubo na caixa convencional (CC), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.....	38
Figura 15 – Posicionamento do tubo na caixa alternativa 1 (AC1), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.....	39
Figura 16 – Posicionamento do tubo na caixa alternativa 2 (AC2), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.....	39
Figura 17 – Posicionamento do tubo na caixa alternativa 3 (AC3), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.....	40
Figura 18 – Malha da caixa convencional (CC) para transporte de aves.....	42
Figura 19 – Malha da caixa alternativa 1 (AC1) para transporte de aves.....	42
Figura 20 – Malha da caixa alternativa 2 (AC2) para transporte de aves.....	43

Figura 21 – Malha da caixa alternativa 3 (AC3) para transporte de aves.....	43
Figura 22 – Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Convencional (CC).....	45
Figura 23 – Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 1 (AC1).....	46
Figura 24 – Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 2 (AC2).....	46
Figura 25 – Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 3 (AC3).....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Dimensões em centímetros da caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2), e caixa alternativa 3 (AC3).....	30
Tabela 2	– Áreas na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2) e caixa alternativa 3 (AC3).....	41
Tabela 3	– Velocidade simulada em m/s e as respectivas velocidades médias internas do fluxo de ar (IAFV, em m/s) e o erro padrão da média na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2) e caixa alternativa 3 (AC3).....	44
Tabela 4	– Temperatura do ar (TA), umidade relativa (UR), índice de temperatura e umidade (ITU), índice de entalpia (H), velocidade média do fluxo de ar interno (VMFI) e pressão dinâmica (PD) registrados na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (CA1), caixa alternativa 2 (CA2) e caixa alternativa 3 (CA3) durante os testes em túnel de vento.....	48

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1.	<b>Transporte de aves</b> .....	16
2.1.1	<i>Manejo das aves</i> .....	16
2.1.2	<i>Viagem, distância e tempo</i> .....	18
2.1.3	<i>Conforto térmico</i> .....	19
2.1.4	<i>Bem-estar animal</i> .....	21
2.2	<b>Zootecnia de Precisão</b> .....	25
2.2.1	<i>Desenho assistido por computador (computer aided design, CAD)</i> .....	25
2.2.2	<i>Dinâmica de fluidos computacional (computational fluid dynamics, CFD)</i> ....	26
2.2.3	<i>Novas Tecnologias</i> .....	27
3	<b>OBJETIVO</b> .....	29
3.1	<b>Objetivos específicos</b> .....	29
4	<b>MATERIAIS E METODOS</b> .....	29
4.1	<b>Domínio computacional, malhas e simulação numérica</b> .....	33
4.2	<b>Definições e cálculos de parâmetros</b> .....	33
4.3	<b>Testes de túnel de vento</b> .....	35
5	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	41
6	<b>RESULTADOS</b> .....	41
6.1	<b>Desenho das caixas</b> .....	41
6.2	<b>Desenho das malhas</b> .....	42
6.3	<b>Velocidades de fluxo interno de ar das caixas</b> .....	43
6.4	<b>Protótipos das caixas de transporte</b> .....	47
6.5	<b>Testes no túnel de vento</b> .....	47
7	<b>DISCUSSÃO</b> .....	49
8	<b>CONCLUSÃO</b> .....	52
9	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
	<b>REFERENCIAS</b> .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte de aves representa um desafio complexo para o bem-estar animal em todo o mundo. A operação de transporte envolve bilhões de aves que são transportadas anualmente e pode ocorrer diversas vezes ao longo do ciclo de produção (SANGOREMI, et al. 2025, WEEKS, et al. 2019; BENINCASA, et al. 2020; ALLEN et al. 2008). Durante as operações de transporte, vários fatores estressantes, como condições ambientais desconfortáveis, alta densidade de carga e manejo inadequado das aves durante a apanha e o empilhamento das caixas, podem causar estresse e perdas de produção (WURTZ et al., 2024; ADAM et al., 2025; DOS SANTOS et al. 2017; WANG et al. 2016). De acordo com o relatório da Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA), as principais consequências para o bem-estar das aves durante essa fase incluem fome e sede prolongada, estresse por movimento, sobrecarga sensorial, restrição de movimento, lesões, bem como estresse térmico por frio ou calor (NIELSEN et al. 2022).

Em regiões tropicais e subtropicais, como o Brasil e muitos outros países importantes na produção de aves, o transporte ocorre sob condições climáticas particularmente desafiadoras, caracterizadas por altas temperaturas ambientes (frequentemente superiores a 30 °C) e alta umidade relativa (muitas vezes acima de 70–80%), especialmente durante os meses mais quentes do ano (DOS SANTOS et al. 2017; ABIDIN et al. 2022; DOS SANTOS et al. 2020). Essas condições ambientais aumentam significativamente o risco de estresse térmico em aves, uma espécie já altamente suscetível devido à sua alta taxa metabólica, rápido crescimento e capacidade termorregulatória limitada, resultante da intensa seleção genética e da ausência de glândulas sudoríparas funcionais (MIFTAKHUTDINOV, et al 2022; DI MARTINO et al. 2017; JACOBS et al. 2016). Sob tais condições quentes e úmidas, mesmo o transporte de curta distância pode levar a um rápido aumento da temperatura e da umidade dentro das caixas, comprometendo a capacidade das aves de manter o equilíbrio térmico e aumentando a incidência de hipertermia, mortalidade (mortes na chegada – DOA) e defeitos na qualidade da carne, como carne pálida, mole e exsudativa (PSE) (WURTZ, et al. 2024; DOS SANTOS, et al. 2020; RUI et al 2011; SCHWARTZKOPF-GENSWEIN, et al 2012; HUSSNAIN, et al. 2020).

As aves são transportadas em gaiolas termodinamicamente ineficientes (NIELSEN, et al. 2022; BAKER et al. 1994). As aberturas das gaiolas dificultam a

colocação das aves, a estrutura transmite vibrações durante o transporte (RANDALL, et al. 1994) e o projeto do equipamento influencia as taxas de ventilação e o microclima interno (VINCO et al. 2016; PINHEIRO et al. 2021). Este cenário é particularmente preocupante dada a elevada suscetibilidade das aves ao estresse térmico, decorrente de sua taxa metabólica elevada e capacidade termorregulatória comprometida (SAEED et al. 2019). Algumas modificações nos veículos de transporte foram sugeridas para melhorar o perfil ambiental dentro das caixas de transporte, obtendo, além das melhorias no bem-estar animal, resultados positivos na redução da incidência de problemas de qualidade da carne (MACHADO et al. 2021). No entanto, os veículos de transporte de aves com ventilação natural não conseguem fornecer ventilação uniforme a todas as aves, e o microclima dentro da carroceria e das gaiolas pode variar significativamente dependendo de sua posição no veículo, da temperatura e umidade ambiente e da velocidade do caminhão (WEEKS et al. 2019; MACHADO et al. 2021).

A ventilação inadequada nas caixas aumenta a temperatura e a umidade, causando dificuldades para as aves manterem o equilíbrio térmico corporal, levando a problemas de bem-estar animal e, dependendo do microclima interno da gaiola, à morte das aves (ABIDIN et al. 2022; MIFTAKHUTDINOV, et al. 2022; PINHEIRO et al. 2022). Alguns pesquisadores questionam o design, a eficiência e o perfil aerodinâmico das gaiolas para fornecer ventilação interna adequada às aves (NIELSEN, et al. 2022; VINCO et al. 2016; PINHEIRO et al. 2021; GILKESON, et al. 2016). Pinheiro et al. (2021) concluíram que, durante o transporte de frangos de corte em climas tropicais, a ventilação entre as caixas pode ser melhorada com o uso de espaçadores; no entanto, o fluxo de ar dentro da caixa permanece inalterado. Os autores recomendam mais pesquisas sobre novos designs de caixas transportadoras. Portanto, a maioria dos desafios de ventilação decorre de obstruções estruturais dentro das gaiolas, o que exige uma reformulação completa.

Nesse contexto, há uma carência de pesquisas dedicadas à melhoria do design das caixas transportadoras com o objetivo de proporcionar melhores condições de bem-estar animal, e existe uma demanda eminente por novos modelos que visem otimizar o perfil aerodinâmico dos contêineres, permitindo assim maior circulação de ar e reduzindo o estresse térmico das aves.

Para atender a essa necessidade, uma proposta experimental viável seria realizar essa otimização *in silico*, por meio de simulações numéricas utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), uma abordagem que tem demonstrado resultados

satisfatórios na resolução de problemas em sistemas de produção animal (LI et al. 2016; HE et al. 2018; ILANGOVAN, et al 2021; AHMADI BABADI, et al 2022). A viabilidade dessa abordagem é sustentada pela redução de custos, aprimoramento de computadores, aumento do desempenho de processadores e avanços em softwares de simulação computacional, o que nos permite hipotetizar que o uso de CFD representa uma alternativa promissora para a avaliação e o aprimoramento de caixas e contêineres utilizados para o transporte de aves, possibilitando uma análise detalhada do fluxo de ar e a otimização do perfil aerodinâmico. Para complementar as simulações, também foram realizados testes em túnel de vento utilizando modelos em escala reduzida das caixas avaliadas.

Este estudo teve como objetivo avaliar o conforto térmico e os padrões de ventilação interna de quatro modelos de caixas para transporte de aves (um padrão e três alternativas) utilizando simulação computacional e técnicas e testes em túnel de vento com protótipos em escala reduzida fabricados por meio de prototipagem rápida.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Transporte de aves

O transporte dos animais de produção, diferente da criação e abate que é feito em estabelecimentos fechados, acontece em vias públicas e é possível que as pessoas conheçam e julguem as condições oferecidas aos animais (BRAGA, *et al.*, 2020). Nesse sentido é imprescindível que existam melhorias significativas nestas etapas pois as condições inadequadas durante o transporte impactam negativamente nas percepções dos consumidores sobre o bem-estar nas cadeias de fornecimento de proteína animal (QUEIROZ *et al.* 2018).

O transporte de carga viva envolve bilhões de animais anualmente e é considerado é um desafio complexo do ponto de vista do bem-estar animal (NIELSEN, *et al.* 2023). No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2024) foram abatidos 5,296 bilhões de frangos no Brasil sob algum tipo de serviço de inspeção sanitária. A maioria dessas aves foram transportadas mais de uma vez durante as suas vidas (LIMA, *et al.*, 2020). Diante desse cenário é fundamental que haja preocupação com relação a maneira com que esta etapa é realizada.

#### 2.1.1 Manejo das aves

O manejo das aves durante as etapas de transporte é um fator que gera estresse e somado as altas temperaturas, principalmente nas etapas de retirada dos animais da granja pode acarretar muitos problemas. Primeiramente os animais são manejados para entrar nos veículos e assim que estiverem acomodados enfrentarão um ambiente desconhecido com vibrações e barulhos incômodos, ausência de alimento e água, variações climáticas, distancias e tempos variados para chegar no local de abate (SCHWARTZKOPF-GENSWEIN *et al.*, 2012).

Durante a apanha, as aves são colocadas em caixas transportadoras que em seguida são empilhadas no assoalho dos veículos e finalmente travadas ou amarradas para em seguida serem transportadas pelas rodovias (RUI *et al.* 2011).

As condições do ambiente das aves nas caixas transportadoras durante a viagem são variáveis. Em função do movimento do veículo ocorre ventilação no interior de algumas caixas e dependendo do posicionamento, entre as caixas. Entretanto quando o

veículo está parado, ocorre um aumento significativo da temperatura gerando desafios para os animais. Além disso, a caixa de transporte de aves convencionalmente usada no Brasil apresenta muitas arestas e em condições de densidade de alojamento de aves elevada impedem a entrada e a circulação do eficiente do ar (NIELSEN, *et al.* 2022). Segundo a EFSA (2022), projetos com uso de novas tecnologias para gerar novos equipamentos, inclusive modelos diferentes de caixas transportadoras, são fundamentais para promover melhorias no bem-estar das aves durante o transporte.

Do ponto de vista microclimático, as áreas do caminhão, onde são alocadas as aves, apresentam diferença com relação a ventilação, temperatura e a umidade do ar no interior das caixas transportadoras. É possível afirmar que as caixas posicionadas nas partes traseiras e centrais são as regiões mais críticas com relação ao conforto térmico e mortalidade das aves (BARBOSA FILHO, *et al.* 2009). Adicionado a isso existe o desafio dos transportes de longas distâncias, por longos períodos e em períodos mais quentes do dia. Esses fatores são responsáveis por problemas de bem-estar animal e pelo aumento da mortalidade na chegada (VIEIRA *et al.*, 2024; RUI *et al.* 2011).

O manejo inadequado durante a apanha também corrobora aumentando os problemas. A apanha pelo pescoço aumenta as contusões de carcaça e fraturas hemorrágicas em 33% e 72%, respectivamente (LEANDRO *et al.* 2001). Algumas pesquisas indicaram, a partir de exames *post-mortem*, uma porcentagem de lesões que pode variar entre 0 e 13,97%, referentes a traumas, hematomas, fraturas e rupturas devido ao tipo de manejo feito durante o carregamento das aves (VIEIRA *et al.*, 2024).

Procedimentos adequados durante o manejo de apanha como: baixa iluminação na granja, utilização do método de carregamento pelo dorso individual, acomodação das aves nas caixas tranquilamente e treinamento de colaboradores, geram benefícios tanto para as aves como para os responsáveis pela realização do manejo (LIMA, *et al.*, 2019). Todos os envolvidos pela realização do manejo na granja, os motoristas e os colaboradores no frigorífico, tanto no Brasil quanto em outros lugares do mundo, como na Europa, precisam seguir legislações específicas e em alguns casos precisam de treinamento e certificado de competência para trabalhar diretamente com os animais como exigidos na Portaria 365/2021, Regulamento (CE) n.º 1099/ 2009, Regulamento (CE) n.º 1/2005).

Nesse sentido é importante que os treinamentos das equipes sejam focados em avaliação da aptidão dos animais para o transporte, manejo adequado, e avaliação da qualidade da insensibilização e sangria e dessa forma promover uma estratégia importante para diminuir os problemas e melhorar o nível de bem-estar dos animais nessas etapas (EICHLER et al.2023)

Além de capacitação de pessoas, outros fatores irão influenciar o bem-estar e a qualidade da carcaça durante o transporte, tais como: viagem e o tempo de transporte, densidade de aves por caixa, o microclima e a temperatura e umidade relativa na carga (BARBOSA FILHO, et al. 2009). Segundo BARBOSA FILHO et al. (2009) se o planejamento de transporte não levar em conta esses fatores, e for realizado de forma inadequada, pode provocar a morte de inúmeras aves durante a viagem.

### **2.1.2 Viagem, distância e tempo de transporte**

Segundo Nielsen et al. (2022), para calcular o tempo de transporte devem ser considerados a duração da viagem (período que o veículo fica em trânsito), o tempo que os animais ficam nas caixas transportadoras e o período anterior de retirada de ração na granja.

Muitos estudos indicam que duração de viagem maior que 2 horas é prejudicial para as aves e que quanto maior o tempo de viagem, maior a mortalidade dentro do caminhão (VIEIRA et al., 2024). Segundo Fu, et al. (2022), após 3 horas de transporte, os frangos não conseguem se adaptar ao estresse gerando problemas diretos ao bem-estar e na qualidade da carne. Esses fatores e variáveis como densidade nas caixas transportadoras e condições climáticas irão influenciar no bem-estar das aves e em condições ideais é recomendado na prática no máximo 12 horas de duração de transporte (NIELSEN ET AL., 2022).

A legislação brasileira não determina um tempo máximo de duração de viagem, entretanto a Portaria SDA 365 de 16 de julho de 2021 (MAPA, 2021) determina um tempo máximo de 12 horas de jejum para aves que acaba limitando o tempo máximo de transporte. O regulamento europeu de transporte (CE 1/2005) determina que após 12 horas sem água, é necessário que os animais tenham acesso a esse recurso e esse ponto acaba limitando os tempos de viagem de aves pois a maioria dos transportes não consegue

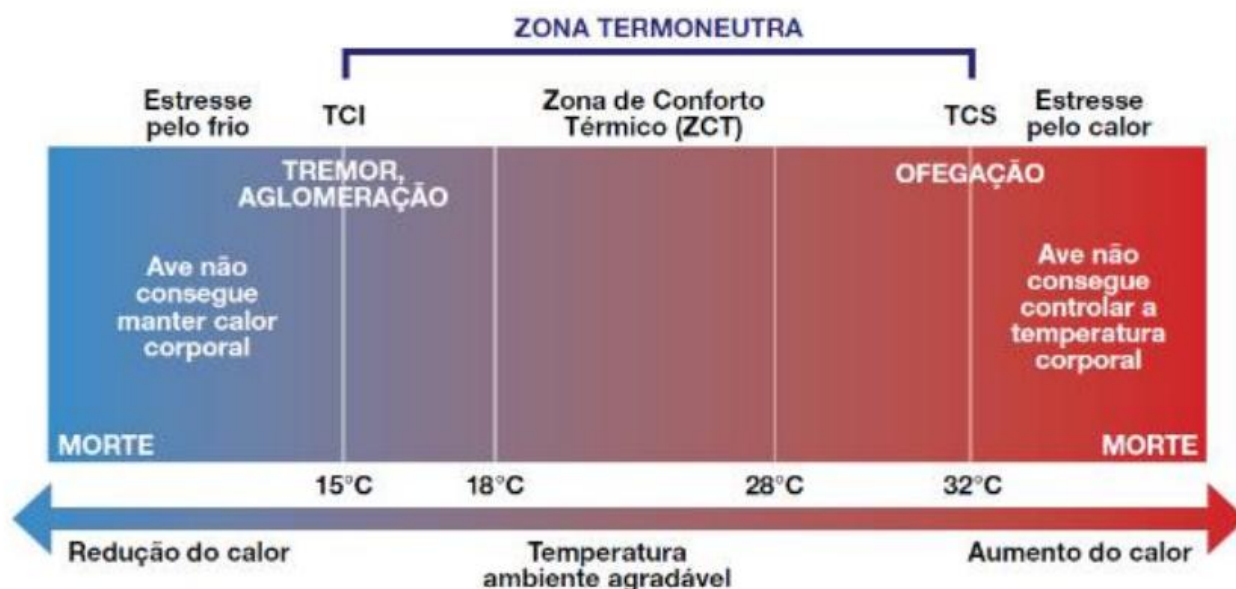
disponibilizar esse recurso. A ausência de água durante a viagem associada a dificuldade de perda de calor pode afetar de forma direta o bem-estar das aves.

### 2.1.3 Conforto térmico

O transporte de aves para o abate é realizado, em sua maioria, por veículos ventilados naturalmente e, durante a viagem, os animais estarão expostos a uma série de desafios (NIELSEN et al., 2022). As aves por não apresentarem glândulas sudoríparas e serem animais, no final de sua vida produtiva, homeotérmicos terão desafios para manter sua temperatura em intervalos adequados durante a etapa de transporte (LUDTKE et al., 2010).

A temperatura de frangos em uma situação inativa varia entre 42 e 43 graus Celsius (NIELSEN et al., 2022). O ambiente confortável para as aves deve apresentar temperaturas entre 18 e 28 °C e umidade relativa entre 50 e 70% e a partir da terceira semana de vida, locais com índice de temperatura do globo negro e umidade (ITGU) variando entre 65,0 e 77,0 são considerados os mais adequados para regiões tropicais (LUDTKE et al., 2010).

Figura 1 - Zona termoneutra de aves.



Fonte: LUDKE et al., 2010.

Em situações de ausência de controle da temperatura e umidade do ambiente, que acontecem principalmente durante o transporte em caminhões ventilados passivamente, as aves irão experimentar o estresse térmico. O estresse térmico significa que o animal

experimentará desconforto e angústia, podendo acontecer tanto em temperaturas efetivas altas como em baixas (NIELSEN et al., 2022).

Os principais mecanismos de troca de calor das aves são a condução, a radiação, a convecção e a evaporação realizada pelo processo de ofegação, entretanto esta última é realizada de forma eficiente apenas em condições de umidade relativa adequada (LUDTKE et al., 2010). Em condições de transporte em regiões tropicais, devido aos equipamentos, manejo e, na maioria das vezes, a temperatura elevada, as aves irão experimentar desafios relacionados a altas temperaturas (PINHEIRO et al., 2020).

Em desafios de temperatura as aves terão alterações na frequência cardíaca, frequência respiratória, taxa de transpiração e temperatura retal, além de mudanças comportamentais como aumentar ou diminuir a ingestão de alimento, tremores e ofegação (APALOWO et al, 2024). Segundo Apalowo et al, (2024), altas temperaturas ativam o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, aumentam os níveis de corticosterona e desregulam outros hormônios, podendo influenciar diretamente em processos como formação de penas, saúde reprodutiva e regulação da temperatura corporal impactando diretamente o desempenho das aves.

O acesso ao alimento e a água são fatores importantes para o transporte e acabam determinando os tempos máximos de duração de viagem em algumas legislações (NIELSEN et al., 2022).

A prática do jejum em etapas de transporte é recomendada (VIEIRA, et al., 2024). Entretanto é importante definir a palavra jejum pois existem divergências quanto a ingestão de alimentos e água. Segundo o dicionário Michaelis (MICHAELIS et al., 2021), jejum significa a abstinência de alimentos, voluntária ou forçada, por determinado tempo. Nesse conceito entende-se que no jejum existe a possibilidade do consumo de água e ao analisar a Portaria SDA 365 de 16 de julho de 2021 encontra-se tanto a palavra jejum quanto o termo dieta hídrica. Na etapa de transporte, tanto os tempos de retirada de ração, jejum, quanto os tempos de retirada de água, dieta hídrica, para frangos de corte influenciam no rendimento e na contaminação da carcaça (WABECK, 1972).

A redução do tempo entre a retirada da ração e o abate das aves pode reduzir mortes na chegada (DOA) e condenações (PIROPUDI et al. 2023). Entretanto um mínimo de tempo de retirada de ração é recomendado pois reduzirá o risco de contaminação fecal das carcaças no frigorífico, pois, esse tempo permitirá a eliminação desse conteúdo do

trato gastrointestinal (VIEIRA, 2024). Segundo ROSA et al. (2012), o tempo de jejum de oito horas é suficiente para o esvaziamento completo da moela e pode ser um caminho para a sustentabilidade da produção e melhores condições de bem-estar animal.

No caso da água, a ausência desse recurso por mais de 6 horas irá causar desidratação e pode estar associada a estados emocionais negativos (WURTZ et al. 2023). Como citado anteriormente, o regulamento europeu de transporte (EC 1/2005) determina que os animais não podem ficar mais de 12 horas sem acesso a água. O bem-estar das aves depende do acesso a nutrição adequada e água e até o momento nenhum estudo foi documentado demonstrando diferenças entre animais com e sem acesso, e mensurando as quantidades desses recursos, durante as viagens (NIELSEN et al., 2022).

Diversos destes desafios vem sendo estudados nessa etapa como, modificações na disposição das caixas transportadoras e instalação de protótipos de baixo custo nos veículos de transporte de aves e alterações no material do piso das carrocerias que contribuem com melhorias na circulação de ar no interior dos veículos, conforto térmico dos animais e qualidade de carne e carcaça no frigorífico (PINHEIRO, 2021; SPURIO et al., 2016, GUARDIA et al., 2004). Entretanto pouca inovação é observada nos equipamentos e nos veículos utilizados para o transporte de animais com o intuito de melhorar o bem-estar dos animais e a percepção dos consumidores.

#### **2.1.4 Bem-estar animal**

O interesse pelos métodos de criação, transporte e abate dos animais de produção está cada vez mais crescente entre os consumidores (ALONSO, *et al.* 2020). Apesar de ainda existir pessoas indiferentes ao tema, é possível encontrar consumidores preocupados que acreditam que é possível alcançar melhores práticas de produção animal (TOMASEVIC, *et al.* 2020).

A busca por produtos que apresentam melhores práticas ou considerados “amigos dos animais” e a disposição para pagar valores mais altos por esses produtos, quando comparados a produtos convencionais, está cada vez maior e vem atrelada ao fato dessa proteína animal ser considerada mais saudável, segura, autêntica e sustentável (ALONSO, *et al.* 2020).

Os consumidores, no geral, podem ser divididos entre sensíveis ao preço, que em função da diferença de valor não comprariam produtos com selo de bem-estar animal, e

consumidores preocupados, que se interessam pelos sistemas de produção e estão dispostos a pagar mais (GORTON, et. Al. 2023).

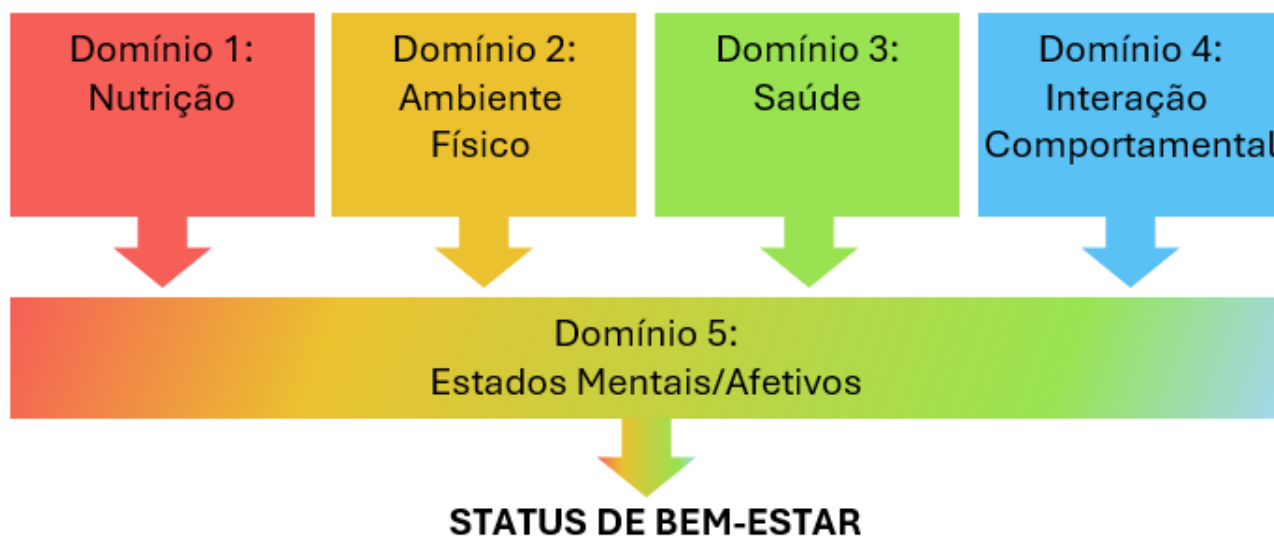
Segundo levantamento da World Animal Protection (WAP, 2016), mais de 90% dos entrevistados declararam que os animais produzidos em um sistema com altos graus de bem-estar produzem uma carne de melhor qualidade e 56% deles se preocupam com os métodos de abate. Entretanto, 66% declararam desconhecer a forma como os animais são criados para produção de carne.

Uma pesquisa conduzida on-line para entender a percepção dos brasileiros a respeito das condições de bem-estar animal nas cadeias produtivas mostrou que a maioria apresenta uma visão negativa sobre as condições de criação dos animais na avicultura e na bovinocultura de corte e de leite (QUEIROZ *et al.* 2018). Segundo Queiroz *et al.* (2018), pessoas com maior conhecimento e contato com a produção animal, consideram as condições de bem-estar animal ruim nesses sistemas.

As pesquisas científicas e a preocupação dos consumidores relacionadas ao bem-estar animal teve início em meados dos anos 60 e vem aumentando desde a década de 80 (BROOM, 2005). Segundo BROOM (1986), o bem-estar animal é o estado do indivíduo e como ele responde ao ambiente que vive por meio de suas tentativas de se adaptar ao local que ele está inserido. Um bom bem-estar animal é quando esse indivíduo está saudável, confortável, bem nutrido, seguro, expressa seu comportamento natural e apresenta estados emocionais positivos (OIE, 2016).

A partir da década de 90, com o conceito consolidado, surgiram diversos protocolos científicos de avaliação de bem-estar animal (BRAGA et al, 2018) e em 1994, foi apresentado por MELLOR & REID (1994) o modelo dos “Cinco domínios” do bem-estar animal. Nesse modelo o tema é avaliado de forma científica baseando-se em cinco domínios chamados de: domínio da nutrição, domínio do ambiente, domínio da saúde, domínio das interações comportamentais e domínio dos estados mentais; o que facilitou a mensuração da temática de forma sistemática e objetiva (BRAGA et al, 2018, MELLOR et al, 2020).

Figura 2 - Esquema dos 5 domínios.



Fonte: Adaptado de KELLS, 2021

Diferente da histórica abordagem das “cinco liberdades” do Farm Animal Welfare Council (FAWC, 1979), os “cinco domínios” apresentaram uma compreensão biológica mais detalhada do conceito bem-estar animal fornecendo uma base para o avaliador classificar a condição dos animais e propor melhores condições para que o animal, foco do estudo, tenha “uma vida que vale a pena ser vivida” (MELLOR, 2016).

Nessa avaliação o indivíduo é dinâmico e interage com os domínios gerando mudanças, positivas e negativas, que alteram o estado do seu bem-estar (BRAGA et al, 2018). Segundo BRAGA, et. al. (2018), em uma situação de alta densidade no transporte de aves por exemplo, inicialmente esse manejo pode ser considerado um desafio ambiental (Domínio do ambiente) que irá provocar uma alteração na temperatura dos animais envolvidos (Domínio da saúde), e isso irá influenciar tanto no domínio do comportamento e da nutrição, quanto no domínio do estado mental dos animais. Essa avaliação sistemática do bem-estar animal pode ser inserida em todos os processos de manejo e produção de animais, inclusive nos processos de transporte na produção avícola.

Com a evolução dos métodos de avaliação e do conceito de bem-estar, nos últimos anos surgiu a necessidade de, não só minimizar o sofrimento como, oferecer condições para promover experiências positivas, também chamado de bem-estar animal positivo (RAULT et al., 2025). Segundo RAULT et al., 2025, “o bem-estar animal positivo é

definido como o crescimento do animal através da experiência de estados mentais predominantemente positivos e do desenvolvimento de competência e resiliência. O bem-estar animal positivo vai além de garantir boa saúde física e a prevenção e alívio do sofrimento. Estados mentais positivos resultam de experiências gratificantes, incluindo ter escolhas e oportunidades para perseguir ativamente objetivos e atingir resultados desejados, de acordo com capacidades individuais e específicas da espécie.”

Em aves, por exemplo, é possível promover comportamentos positivos, como exploração, banho de poeira, limpeza e lúdico, por meio do enriquecimento ambiental. Nestes casos desenvolver ambientes de criação que permitam que os animais experimentem estados mentais positivos além de ser uma premissa para um bom bem-estar animal é um componente essencial para promover uma produção sustentável (PAPAGEORGIOU, M. et al, 2023).

A avicultura é um dos setores mais importantes e que mais cresce no Brasil com uma produção de 14.524 milhões de toneladas de carne de frango por ano e tem como um dos pilares e normas a serem seguidas as boas práticas de bem-estar animal (ABPA, 2024). Diante disso é fundamental que todo o setor avalie de forma sistemática a condição dos animais durante todo o processo de produção.

O manejo inadequado dos animais durante a criação gera perdas extremamente significativas de quantidade e qualidade de carne e aumento de mortalidade (LEANDRO et al. 2001). A mortalidade dos animais representa não só um problema de bem-estar animal como um problema de sustentabilidade para o setor e pesquisas estimam que diante dos inúmeros fatores que incidem nessa etapa, as porcentagens de mortalidade podem variar entre 0,146 e 0,862% (VIEIRA et al., 2024). Estimando a mortalidade de 0,862% no total de indivíduos abatidos no Brasil em 2023, isso representaria uma perda de mais de 45,6 milhões de aves.

Ao considerar que para se ter um desenvolvimento sustentável é necessário que a produção atenda às necessidades atuais sem comprometer as próximas gerações (World Commission on Environment and Development, 1987), é imprescindível se atender que a morte de uma ave gera perda de parte do capital investido e muito desperdício de recursos naturais. Um frango, consome em média 2,3 kg de ração, 5,1 litros de água potável e produz em média 2,12 kg de dejetos (cama de frango) em 42 dias de ciclo produção (AVILA et al., 1992; ANGELO et al., 1997). Existem gastos com energia elétrica, que irão variar em função do sistema de criação utilizado, custos de instalação,

depreciação da construção e de equipamentos, além do custo da ocupada pela granja (TURCO et al., 2002).

A mortalidade das aves gera um comprometimento nos recursos que poderiam ser utilizados pela população atual que conseqüentemente aumentariam o impacto para futuras gerações e, além dela, existem outras perdas no processo de transporte de frangos, como fraturas e hematomas, que comprometem parte dos produtos e se somadas trariam mais desafios, tanto de bem-estar como de sustentabilidade, para o setor (SARAIVA et al. 2020). Nesse sentido é importante buscar novas ferramentas para auxiliar no controle e melhoria dos processos de produção animal.

## **2.2 Zootecnia de precisão**

A zootecnia de precisão é uma ciência que estuda a criação de animais com tecnologias que possibilitam controlar os processos de produção de forma mais assertiva com potencial para melhorar o bem-estar animal e a sustentabilidade de todas as etapas de produção proporcionando maior lucratividade e estabilidade econômica das empresas e propriedades rurais (NILOOFAR et al., 2021).

O advento de novos recursos, como a modelagem de Desenho Assistido por Computador (Computer aided design, CAD) e da simulação de Dinâmica de Fluidos Computacional (Computational fluid dynamics, CFD), possibilitou a análise e teste de diversas inovações em todas as etapas dos sistemas de produção animal a partir do uso de softwares de computador e com baixo investimento financeiro (WEHMANN et al., 2018).

### **2.2.1 *Desenho assistido por computador (computer aided design, CAD)***

O CAD é uma técnica que teve início em 1960 com o intuito de oferecer suporte para design de produtos e evoluiu ao longo do tempo para softwares de sistemas de modelagem, design baseado em recursos, paramétrico e cinemático, e métodos de verificação como análise da dinâmica dos fluidos (KRAUSE et al., 2003).

Os sistemas CAD podem ser definidos em Low-end, utilizado para confeccionar objetos e formas geométricas em duas dimensões; Middle-end utilizado para objetos e formas geométricas em três dimensões e High-end que é um sistema de módulos para análises (PINHEIRO et al., 2021).

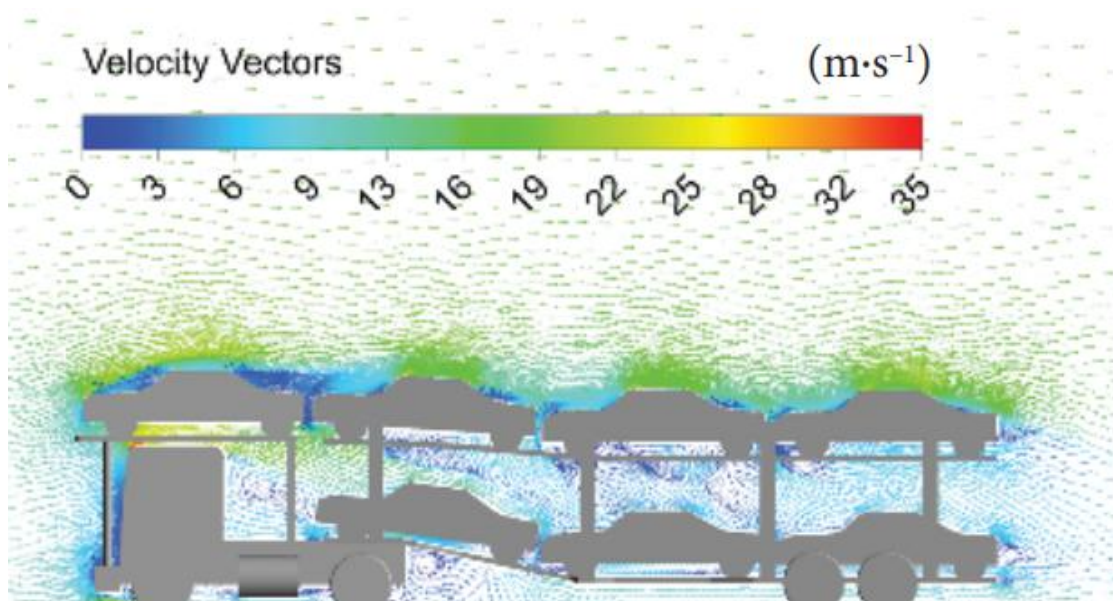
Segundo PINHEIRO et al. (2021), pode-se citar os softwares: AutoCAD, comercializado pela AUTODESK®, Solidworks desenvolvidos pela Dassault Systems e o Solid Edge da Siemens como ferramentas de CAD. Esses programas utilizam o processo de simulação computacional e colocam um determinado produto em funcionamento no ambiente virtual usando métodos matemáticos e com isso conseguem prever o funcionamento real. Segundo HUNDE et al. (2022), as tecnologias de CAD auxiliam na modelagem, análise, revisão e documentação de novos produtos em diversas áreas e promovem uma simulação interativa e integração direta do design à fabricação e aliada a outras tecnologias essa ferramenta pode alcançar novos níveis tecnológicos de produtos.

### ***2.2.2 Dinâmica de fluidos computacional (computational fluid dynamics, CFD)***

A mecânica dos fluidos, mais especificamente a dinâmica de fluídos, estuda o comportamento de substâncias, em estado líquido ou gasoso, em movimento e possibilita o entendimento do movimento dessas partículas, incluindo as perdas e ganhos de energia, dentro do sistema estudado (SOBRINHA et al., 2022). A CFD é uma ferramenta que possibilitou através de simulações computacionais analisar sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos como reações químicas (VERSTEEG & MALALASEKRA, 2007).

Na área automobilística existem inúmeros estudos com o objetivo de desenhar e encontrar veículos mais aerodinâmicos que melhorem a eficiência do uso do combustível e reduzam a resistência do vento durante o movimento (ACEVEDO-GIRALDO et al., 2018). Na ilustração de ACEVEDO-GIRALDO et al., 2018, é possível visualizar a velocidade do vento que passa em um veículo transportador de carros e com esses resultados sugerir formas de minimizar o empuxo e o atrito e conseqüentemente o uso de combustível. Entretanto essa ferramenta ainda não é explorada de forma extensiva no transporte de animais.

Figura 3 - Velocidade do vento em um veículo de carga.



Fonte: ACEVEDO-GIRALDO et al., 2018

Neste sentido, com uma análise integrada das simulações CAD e a CFD é possível trazer novas informações a respeito de equipamento e estruturas utilizadas em diversas áreas do conhecimento, inclusive na produção animal, e reduzir custos e tempo para análise de equipamentos convencionais e para o desenvolvimento de novos produtos (WEHMANN et al., 2018).

### 2.2.3 *Novas tecnologias*

No transporte de animais a análise, CAD e CFD, vem sendo empregada com sucesso demonstrando que existem diferenças significativas com relação ao fluxo de vento, temperatura e umidade relativa do ar entre veículos e no interior de um mesmo veículo transportador de carga viva (GILKESON, et al., 2016; SEEDORF & SCHMIDT, 2017; PINHEIRO et al., 2021). Em veículos de transporte de ovinos e suínos, comuns no Reino Unido, a simulação mostrou que há diferença entre o fluxo de ar entre os pisos dos compartimentos de carga, sendo que o piso superior recebe o dobro de ventilação quando comparado com o piso inferior devido a estrutura da tampa traseira, e com estes resultados os autores propuseram modificações estruturais nos veículos para promover melhorias de bem-estar durante a fase de transporte (GILKESON, et al., 2016).

Seedorf & Schmidt (2017) encontraram um padrão ao simular o fluxo de ar ao redor de veículos em movimento de transporte de suínos na Europa e também observaram diferenças internas e externas no fluxo de ar desses caminhões. As aberturas frontais nos veículos simulados apresentaram maior fluxo de ar para o exterior e foi observado recirculações das massas de ar entre o interior do veículo e o exterior, concluindo que mais estudos são necessários para entender a circulação de ar entre o veículo e o ambiente para otimizar o microclima durante o transporte de suínos.

Entretanto, poucos trabalhos com essa abordagem foram encontrados utilizando veículos de transporte de carga viva comumente utilizados no Brasil. No transporte de suínos, o uso dessa técnica possibilitou entender que nas carrocerias, de dois pisos, existe um bolsão térmico concentrado no piso inferior na região próxima da cabine do caminhão e que modificações nas estruturas dos veículos permitem melhorias na circulação de vento e conseqüentemente diminuição da temperatura e umidade relativa do ar nestes compartimentos (MACHADO, 2020).

No transporte de aves, PINHEIRO (2021), através desta análise integrada, CAD e CFD, observou que durante a viagem dos frangos em veículos brasileiros, a disposição das caixas transportadoras empilhadas não permite fluxo de vento ao longo da carga e sugeriu espaçadores entre os equipamentos para melhorar a ventilação durante o transporte. Além disso, observou que a caixa de transporte convencional não possibilita a entrada de ar no interior das caixas para a ventilação das aves e aconselhou que mais estudos fossem realizados para melhoria deste equipamento.

Nesse sentido observa-se uma carência de pesquisas dedicadas ao aprimoramento do projeto de caixas transportadoras visando proporcionar melhores condições de bem-estar animal, sendo necessário novos modelos que otimizem o perfil aerodinâmico das caixas, permitindo maior circulação de ar e reduzindo o estresse térmico das aves.

### **3 OBJETIVO**

Desenvolver modelos alternativos de caixas de transporte de aves aerodinamicamente mais eficientes, visando otimizar a ambiência das caixas.

#### **3.1 Objetivos específicos**

Caracterizar o perfil de ventilação interna e as condições microclimáticas em caixas de transporte convencionais utilizadas no Brasil.

Comparar e avaliar modelos alternativos de caixas de transporte com a caixa convencional por meio de simulações de dinâmica de fluidos computacional e ensaios em túnel de vento com modelos em escala reduzida.

### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram realizadas buscas de patentes de equipamentos e modelos utilizados, nacionalmente e internacionalmente, para o transporte de animais em 5 bancos de dados on-line (ESPACENET, PATENTSCOPE, PATENT LENS, GOOGLE PATENTS, INPI.GOV). Em seguida foram apresentados todos os modelos pré-existent em reunião inicial do projeto com integrantes da equipe de transporte do Núcleo de Estudos em Ambiência Agrícola e Bem-estar Animal (NEAMBE) da Universidade Federal do Ceará. Posteriormente foi realizada uma conversa informal sobre modelos e alternativas de caixas de transporte de aves com produtores, transportadores e especialistas na área de transporte de aves. Ao final foi proposto um “brainstorm”, com os integrantes do NEAMBE, reunindo todas as ideias discutidas anteriormente, para definição de novos modelos de caixas de transporte que poderiam trazer benefícios tanto para o manejo quanto para o bem-estar das aves.

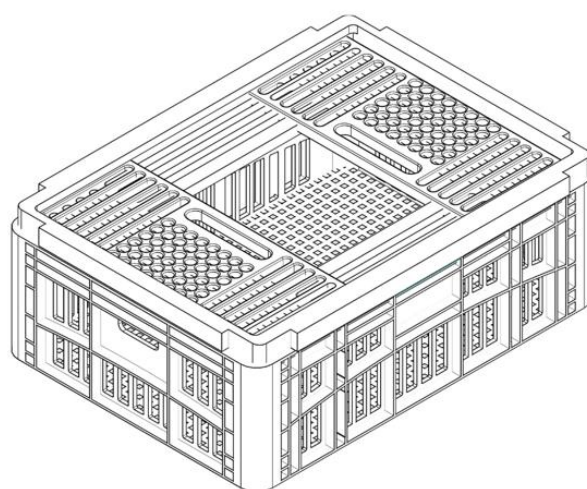
Foram propostos três modelos diferentes tendo em vista a viabilidade técnica e prática quanto ao manejo e transporte de aves, para a realização de testes em túnel de vento e comparações com o modelo convencional atualmente utilizado para transporte de frangos no Brasil.

O modelo convencional e os novos desígnios de caixa foram construídos virtualmente, por meio de Desenho Assistido por Computador (CAD), no software

AutoCAD versão 2023, respeitando as condições estabelecidas pela legislação de trânsito do Brasil e visando o melhor encaixe e melhor sustentação durante o manuseio e transporte.

A caixa convencional (CC), foi mensurada, baseada em uma caixa comercialmente usada e comercializada pela empresa Pisani Plasticos e seu desenho foi obtido no software (Figura 4).

Figura 4 - Modelo virtual da caixa convencional de transporte de aves (CC).



Para os protótipos de novos modelos foram definidas as dimensões, tanto do comprimento quanto da largura, semelhantes ao da caixa convencional (Tabela 1).

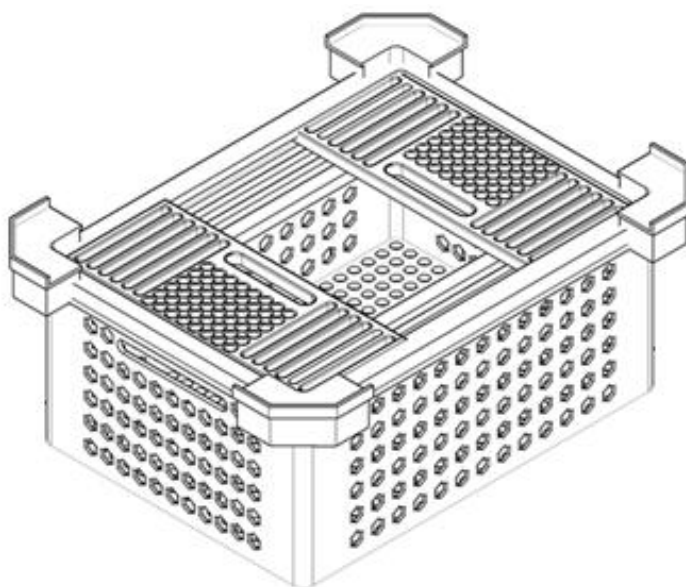
Tabela 1 - Dimensões da caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2) e caixa alternativa 3 (AC3)

	Dimensões externas (comprimento x largura x altura em cm)	Dimensões internas (comprimento x largura x altura em cm)
CC	77 x 57 x 32	71.5 x 54 x 24
AC1	79 x 59 x 31	74 x 54 x 25
AC2	79 x 59 x 31	74 x 54 x 25
AC3	77 x 57 x 32	71.5 x 54 x 24

O formato e tamanho dos furos foram escolhidos em função de observação prática e trabalhos científicos realizados pelo grupo e encontrados em literatura da área. Segundo Farouk et al. (2020), os estudos com simulações de dinâmica de fluídos computacional para coletores de ar mostraram que a vazão de ar é melhor em coletores com geometria hexagonal em comparação aos coletores quadrados.

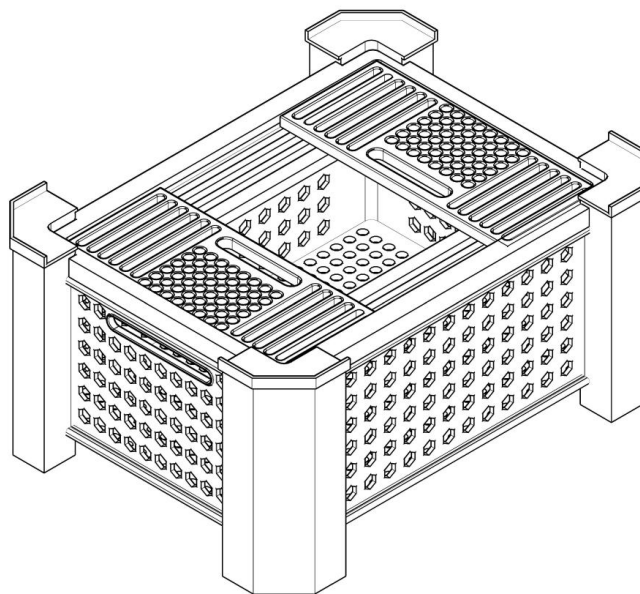
Os modelos alternativos de caixas transportadoras foram projetados das seguintes formas: o primeiro modelo alternativo (AC1), foi projetado com uma base retangular, quatro espaçadores verticais posicionados nas extremidades superiores e furos em formato hexagonal nas laterais

Figura 05 - Modelo virtual da caixa alternativa 1 (AC1) para transporte de aves.



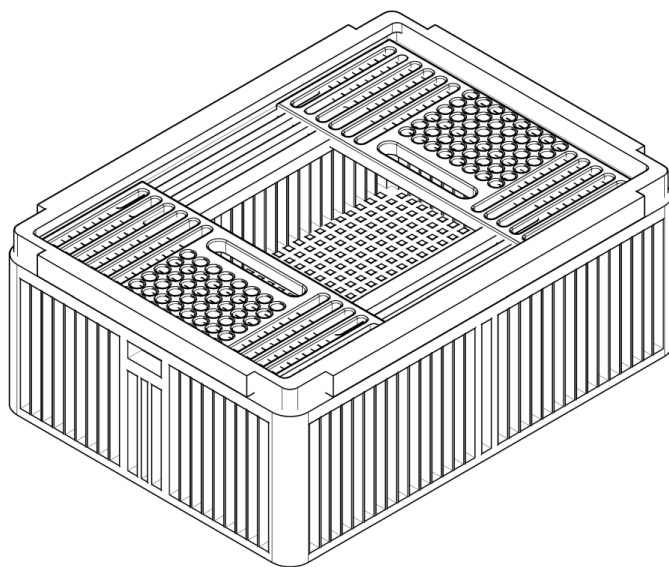
O segundo modelo alternativo (AC2) foi desenhado com uma base retangular e quatro pilares que se estendem do topo ao fundo, integrados com a caixa, e furos em formato hexagonal nas laterais.

Figura 06 - Modelo virtual da caixa alternativa 2 (AC2) para transporte de aves.



Por fim, o terceiro modelo alternativo (AC3) foi baseado na caixa convencional, porém, as arestas horizontais foram removidas, resultando em aberturas retangulares verticais maiores do que no modelo convencional.

Figura 07 - Modelo virtual da caixa alternativa 3 (AC3) para transporte de aves.



#### 4.1 Domínio computacional, malhas e simulação numérica

Foram realizadas simulações de CFD usando o ANSYS 2023 R1. O domínio computacional utilizado foi de 40,68 x 20,45 x 40,32 m (comprimento x largura x altura). Os modelos das caixas foram seccionados e posicionados no centro do domínio computacional, e o fluxo de ar foi direcionado para o vetor -Z. Malhas não estruturadas (células tetraédricas e prismáticas) foram utilizadas no domínio computacional. A dimensão do domínio computacional e a posição central de cada uma das caixas foram escolhidas para melhorar a qualidade da análise e facilitar a compreensão do fluxo de ar.

Devido às características do estudo e para obter resultados precisos, foram utilizados modelos viscosos em regime permanente. A modelagem da turbulência foi realizada pelo método RANS (Reynolds-Averaging Navier-Stokes). Para lidar com a geometria complexa, que apresentava curvas e pontos agudos e era pouco conhecida aerodinamicamente, foi escolhido o modelo k-ε SST, reconhecido por sua alta qualidade nessas situações (ILANGO VAN et al., 2021; LI et al., 2016; FOX et al., 2003). As paredes das caixas foram consideradas adiabáticas, com fluxo de calor nulo, e funções de parede padrão foram utilizadas para economizar recursos computacionais e viabilizar a análise. No modelo de solução, adotou-se um esquema do tipo acoplado, para obter resultados mais precisos, juntamente com uma discretização espacial de alta qualidade. Para avaliar a precisão dos resultados, foram estabelecidos critérios de erro, sendo aceito um erro máximo de 10<sup>-4</sup>% para o valor da energia e de 0,1% para as componentes de velocidade e densidade.

#### 4.2 Definições e cálculos de parâmetros

As velocidades de entrada foram definidas com base nas velocidades reais e usuais de um caminhão de transporte de aves. Três velocidades foram selecionadas: 8,33, 16,66 e 25 m/s (equivalentes a 30, 60 e 90 km/h). A temperatura absoluta de 300 Kelvin e a pressão de 1 atm foram definidas para as simulações. O número de Reynolds (Re) foi determinado usando a equação 1. O modelo k-ε SST, conforme definido, foi modelado de acordo com as equações 2 e 3 e sua formulação de limite de viscosidade turbulenta.

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (\text{equação 1})$$

onde  $V$  é a velocidade do fluido ( $m/s$ ),  $l$  é o comprimento característico (m) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática ( $m^2/s$ ).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (\text{equação 2})$$

$\rho$  é a densidade do fluxo,  $k$  é a energia cinética turbulenta,  $u$  é o vetor velocidade do fluxo,  $\Gamma_k$  representa a difusividade efetiva de  $k$ ,  $G$  é um termo de produção,  $Y$  é o termo de destruição  $S$  é um termo de fonte definido pelo usuário.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \quad (\text{equação 3})$$

onde  $\omega$  é a taxa de dissipação específica.

Para o tratamento próximo às paredes, foi adotado um modelo de função de parede e, para calcular a distância adimensional da parede, foi utilizada a equação 4, sendo a velocidade de fricção definida pela equação 5:

$$y^+ = \rho * ut * \frac{y}{\mu} \quad (\text{equação 4})$$

Onde  $y^+$  é a distância adimensional da parede,  $ut$  é a velocidade de fricção,  $y$  é a distância da parede  $\mu$  é a viscosidade molecular.

$$ut = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2} \quad (\text{equação 5})$$

Onde,  $\tau_w$ , é a tensão da parede.

Finalmente, a modelagem, incluindo a malha, foi definida de acordo com as equações 6, 7 e 8:

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (\text{equação 6})$$

$$U^* = \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (\text{equação 7})$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (\text{equação 8})$$

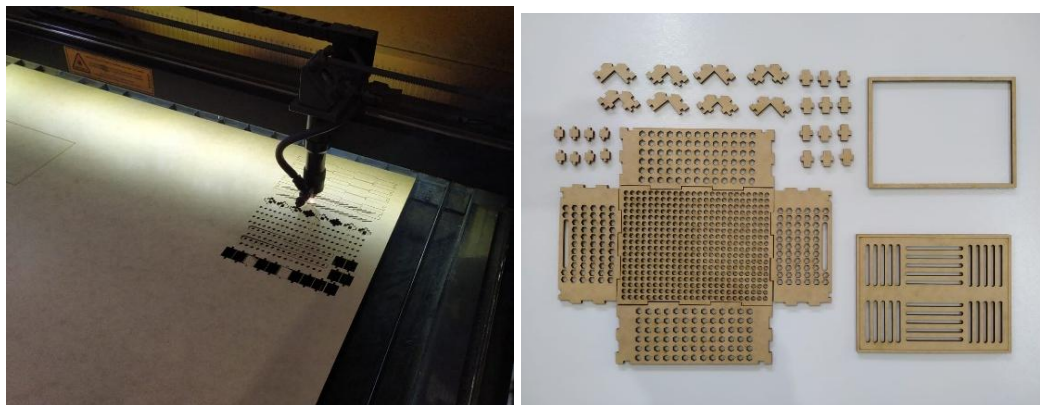
onde  $k$  é a constante *Von Karman*,  $E$  é uma constante empírica,  $U_p$  é a velocidade média do fluido no centroide da parede celular adjacente e as variáveis com índice  $p$  referem-se ao centroide da célula adjacente na parede.

### 4.3 Testes de túnel de vento

As caixas foram confeccionadas em escala 1:5, utilizando o equipamento de corte a laser TAICO Laser knowledge 1060, com madeira de fibra de média densidade (MDF) de 3 milímetros devido a qualidade, facilidade de manuseio e o custo do protótipo. Para o uso do equipamento a laser, os arquivos foram convertidos para o software CorelDraw e em seguida foram simplificados para a realização dos cortes adequados e foram criados encaixes, entre as peças, para fortalecer a estrutura das caixas para posterior teste em túnel de vento.

Os cortes foram feitos separadamente, ou seja, para cada caixa foram necessárias confeccionar as peças de encaixe e 6 placas de MDF, sendo elas, uma para cada lateral, tampa e fundo.

Figura 8 - Equipamento de corte e peças para confecção de um modelo de caixa.



Após cortadas as peças foram encaixadas e coladas e os espaçamentos entre os encaixes foram preenchidos com massa de modelar para impedir a circulação de ar nestes locais.

Figura 09 - Fotos do protótipo da caixa convencional CC confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.

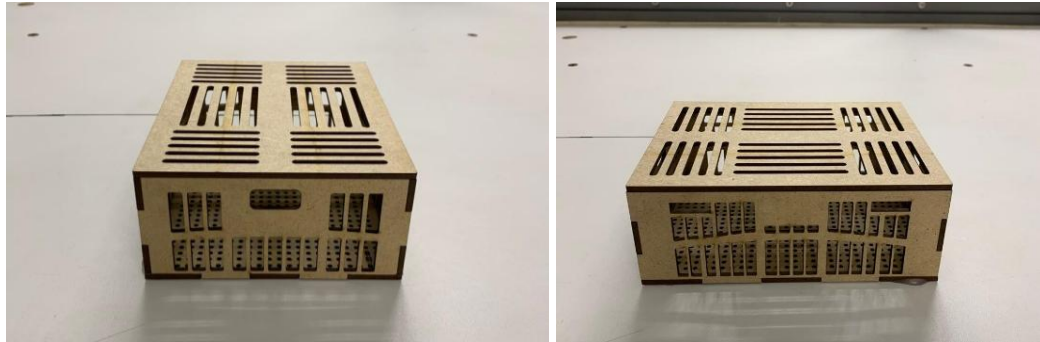


Figura 10 - Fotos do protótipo da caixa convencional AC1 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.

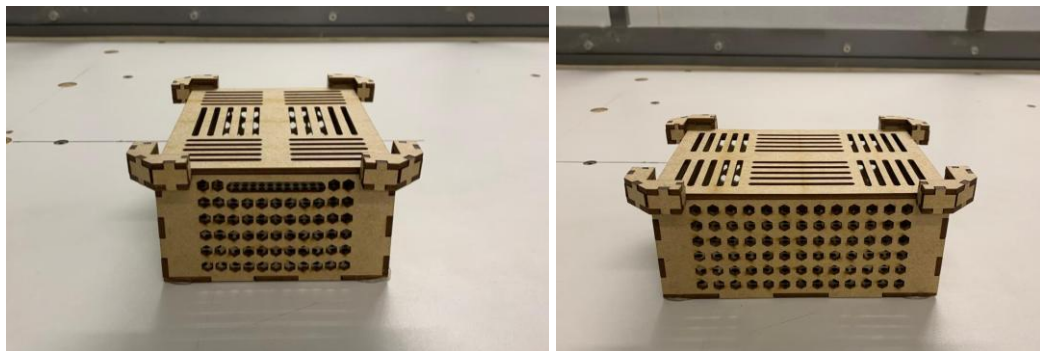


Figura 11 - Fotos do protótipo da caixa convencional AC2 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.

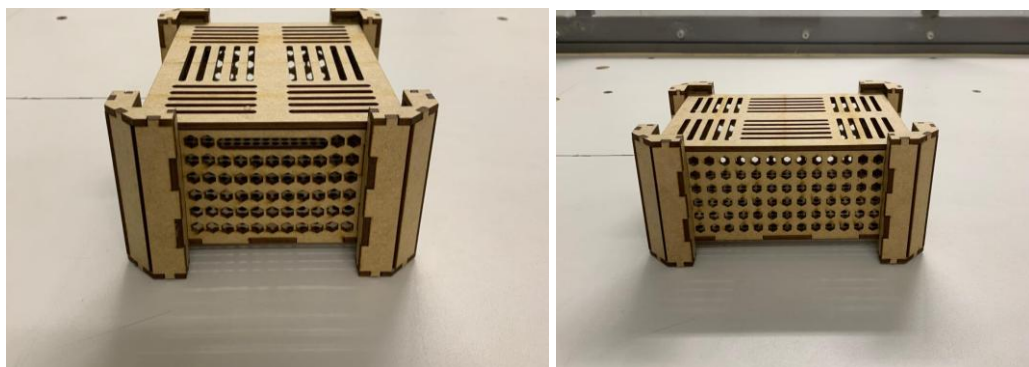
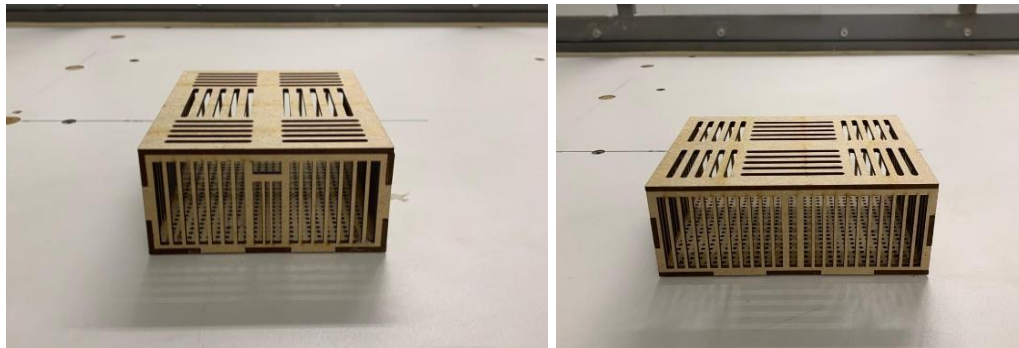


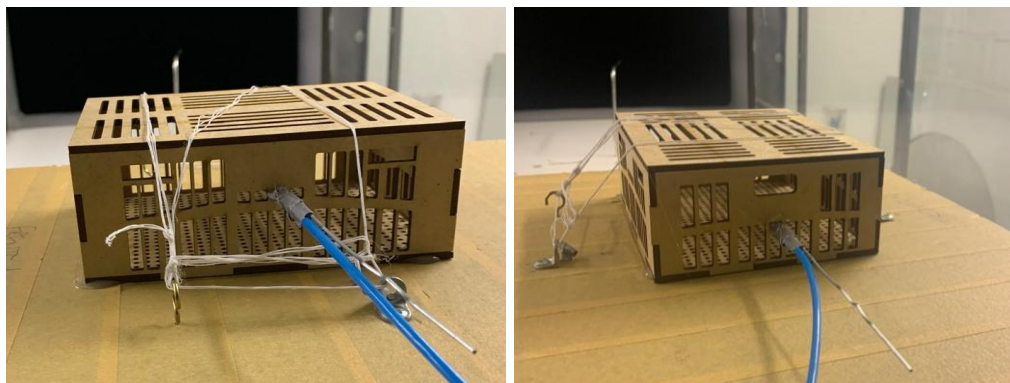
Figura 12 - Fotos do protótipo da caixa convencional AC3 confeccionado em MDF, a vista frontal e a vista lateral respectivamente.



Após a confecção dos modelos reais, eles foram encaminhados e testados no túnel de vento do Laboratório de Ensaios Aerodinâmicos (LEA) da Universidade Estadual do Ceara (UECE). O Túnel de Vento da UECE apresenta uma área de mais de 500m<sup>2</sup>, com uma seção de teste de 1 m<sup>2</sup>, para velocidade de escoamento até 150 km/h e com intensidade de turbulência menor que 2%.

Os quatro modelos de caixas para transporte de aves foram avaliados. Cada teste em túnel de vento durou dez minutos por equipamento. As medições foram feitas nas vistas frontal e lateral, nas mesmas velocidades de fluxo utilizadas nas simulações de CFD. Antes do teste, a temperatura e a pressão locais foram medidas e o sensor de pressão foi calibrado. As gaiolas foram então posicionadas e fixadas no túnel, seguido da colocação de um tubo de Pitot para leitura da pressão. Para iniciar os testes no túnel de vento, foi realizada a mensuração da temperatura e pressão local e a calibração do sensor de pressão. Após esses ajustes foi feito o posicionamento e ajuste do fixador da caixa e, em seguida, foi realizado o posicionamento do tubo de pitot para leitura de pressão. Foi utilizado apenas um tubo devido ao tamanho das caixas e do espaço hábil para inserir o equipamento e realizar esse posicionamento.

Figura 13 - Posicionamento, fixação da caixa e do tubo pitot com a vista lateral e com a vista frontal voltada para o curso do vento, respectivamente.



Cada caixa teve seu tubo posicionado em um local semelhante, mas não foi possível posicionar todos os tubos no mesmo local devido ao desenho diferente de cada equipamento. Entretanto, todos os tubos foram inseridos na caixa com uma profundidade de 31,4mm. Abaixo as ilustrações com o posicionamento do tubo em cada caixa.

Figura 14 - Posicionamento do tubo na caixa convencional (CC), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.

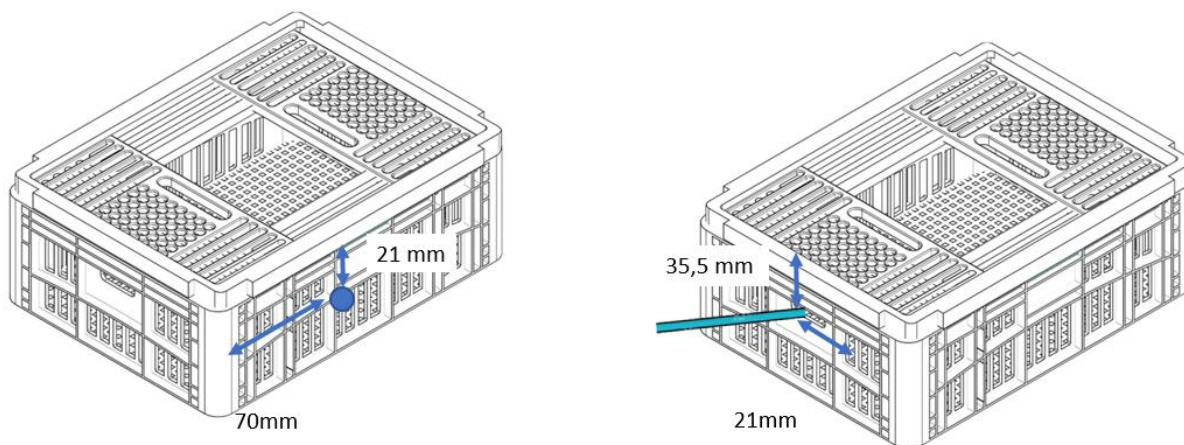


Figura 15 - Posicionamento do tubo na caixa alternativa 1 (AC1), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.

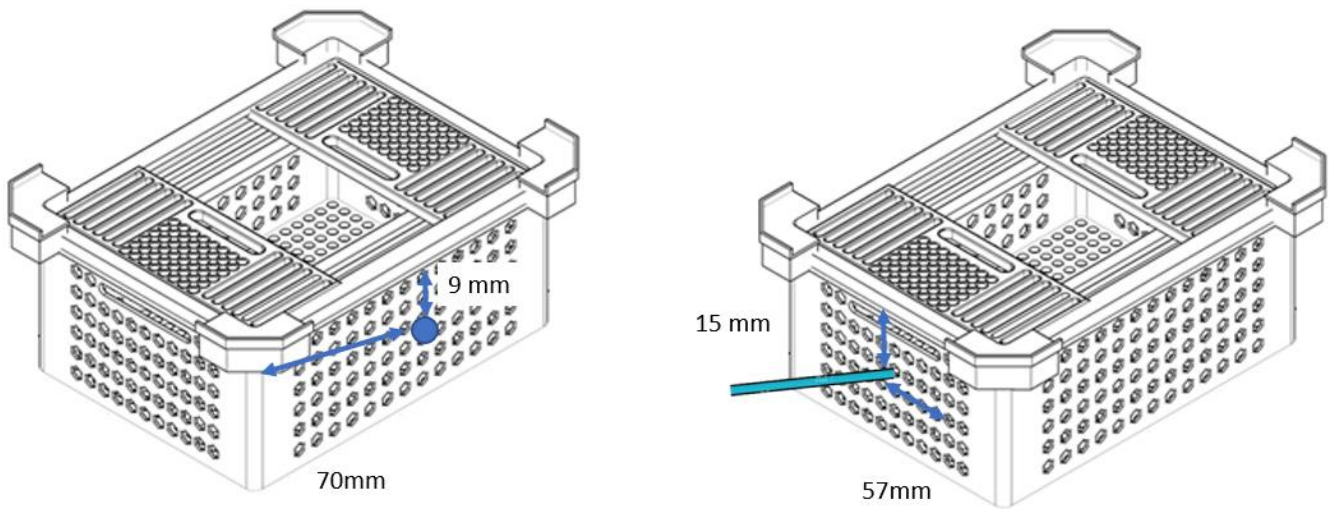


Figura 16 - Posicionamento do tubo na caixa alternativa 2 (AC2), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.

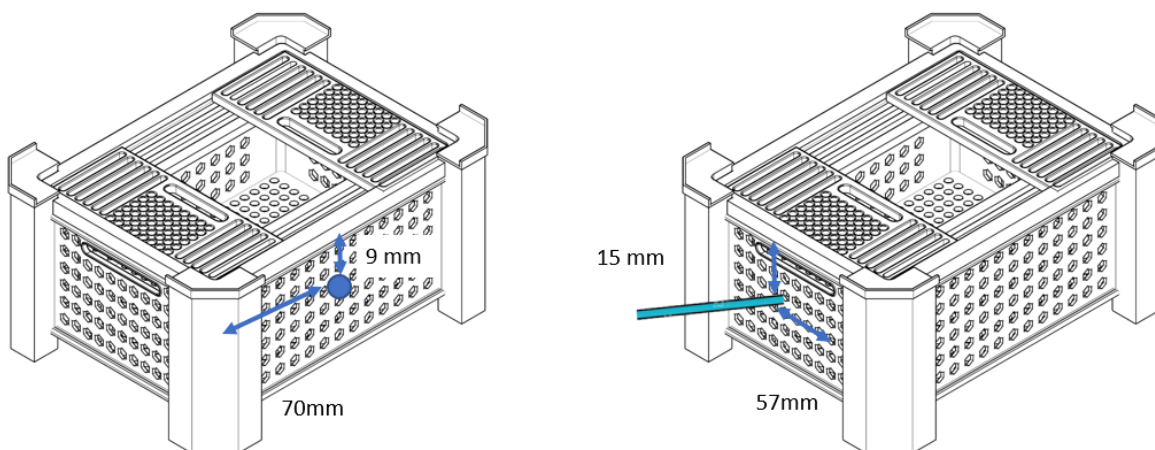
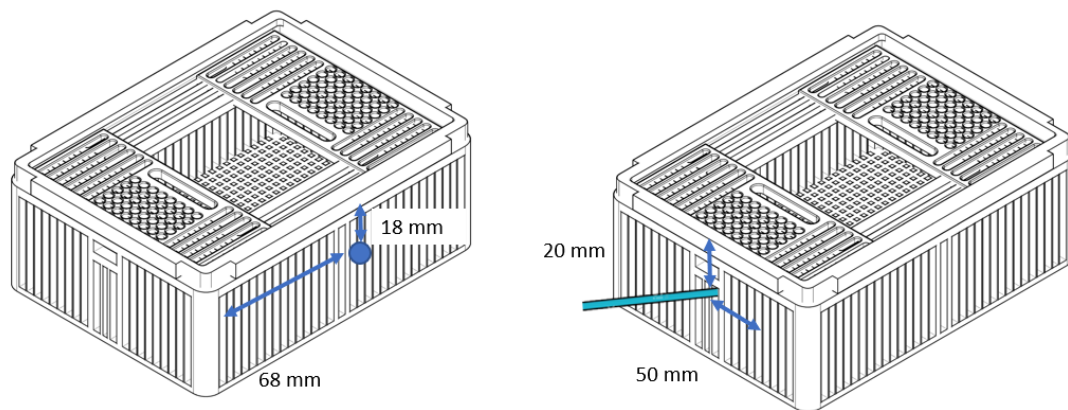


Figura 17 - Posicionamento do tubo na caixa alternativa 3 (AC3), na vista lateral e na vista frontal respectivamente.



Posteriormente, sensores adicionais foram instalados para medir os parâmetros microclimáticos descritos abaixo. Após a conclusão de todos os ajustes, o túnel de vento foi ativado e os dados de temperatura, umidade relativa, velocidade média do fluxo de ar interno e pressão dinâmica foram coletados. O microclima foi caracterizado utilizando o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), calculado de acordo com a Equação (9) proposta por Berman et al. (2016). Além disso, o Índice de Entalpia (H, kJ/kg de ar seco) foi calculado de acordo com a equação proposta por Rodrigues et al. (2011), a partir da Equação (10).

$$\text{THI} = 3.43 + (1.058 \times \text{AT}) - (0.293 \times \text{RH}) + (0.0164 \times \text{AT} \times \text{RH}) + 35.7 \quad (\text{equação 9})$$

$$\text{H} = 1.006 \times \text{AT} + \frac{\text{RH}}{\text{PB}} \times 10^{(7.5 \times \text{TA} / 237.3 + \text{TA})} \times (71.28 + 0.052 \times \text{AT}) \quad (\text{equação 10})$$

Onde AT é a temperatura do ar (°C), RH é a umidade relativa (%) e PB é a pressão barométrica local (mmHg), considerada como 1 atm.

## 5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As premissas de normalidade e homogeneidade das variâncias foram testadas utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Quando ambas as premissas foram atendidas (temperatura do ar, umidade relativa, THI, Índice de Entalpia, pressão dinâmica), as diferenças entre os quatro modelos de caixas foram analisadas utilizando ANOVA de uma via, seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey. Quando as premissas foram violadas (velocidades médias internas do fluxo de ar), o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post hoc de Dunn, foi aplicado. Valores discrepantes nos testes em túnel de vento foram identificados e descartados utilizando o método de Regressão Robusta e Remoção de Valores Discrepantes, com um critério de agressividade de 1%. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistical Analysis Software (SAS) OnDemand for Academics versão 9.4, adotando  $p < 0,05$  como limiar de significância estatística.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Desenho das caixas

A caixa AC3 apresentou uma área de aberturas maior, com 254,7% e 297,8% mais áreas abertas no lado maior do que as caixas CC e AC1 e AC2, respectivamente. No lado menor, a AC3 apresentou 260,9% e 223,9% mais áreas abertas do que as caixas CC e AC1 e AC2, respectivamente. (Tabela 2).

Tabela 2 - Áreas na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2) e caixa alternativa 3 (AC3).

	Área total da superfície do lado maior (cm <sup>2</sup> )	Área total da superfície das aberturas no lado maior (cm <sup>2</sup> )	Área total da superfície do lado menor (cm <sup>2</sup> )	Área total da superfície das aberturas no lado menor (cm <sup>2</sup> )
CC	4389	533.1	1824	345.8
AC1	4661	456	1829	403
AC2	4661	456	1829	403
AC3	4389	1358	1824	902.5

## 6.2 Desenho das malhas

A malha utilizada para as simulações apresentou uma suavização média de 0,85476, ou seja, muito próxima de 1, e a qualidade ortogonal apresentou uma média de 0,79781, indicando que os elementos simulados possuem uma geometria satisfatória.

Figura 18 - Malha da caixa convencional (CC) para transporte de aves.

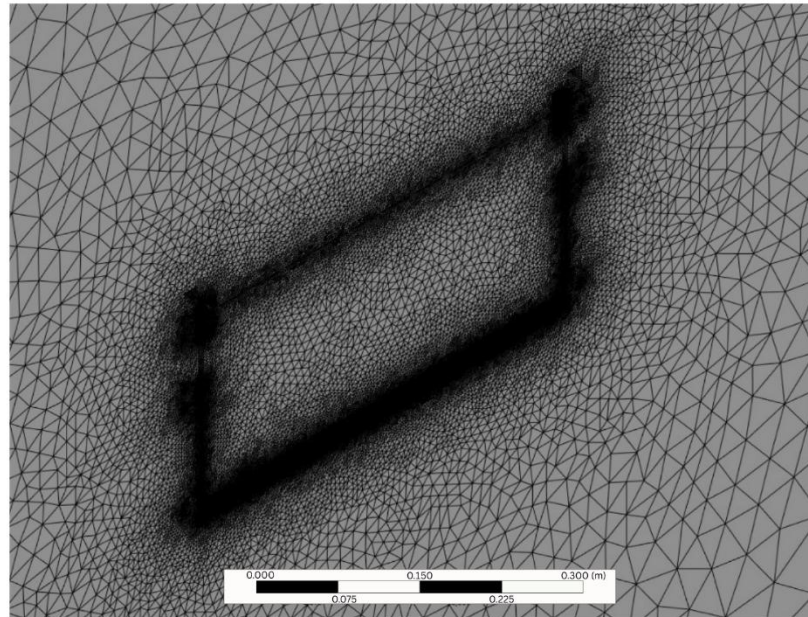


Figura 19 - Malha da caixa alternativa 1 (AC1) para transporte de aves.

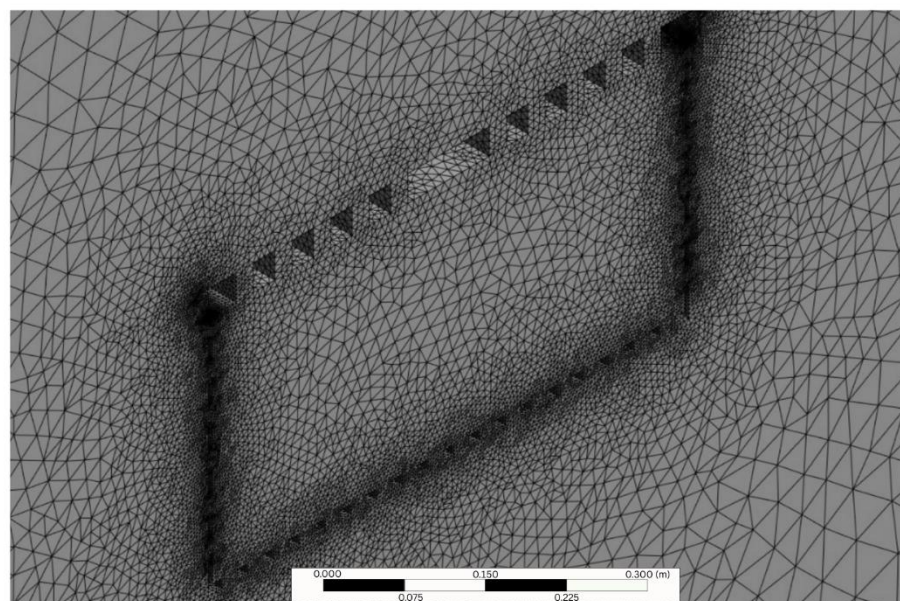


Figura 20 - Malha da caixa alternativa 2 (AC2) para transporte de aves.

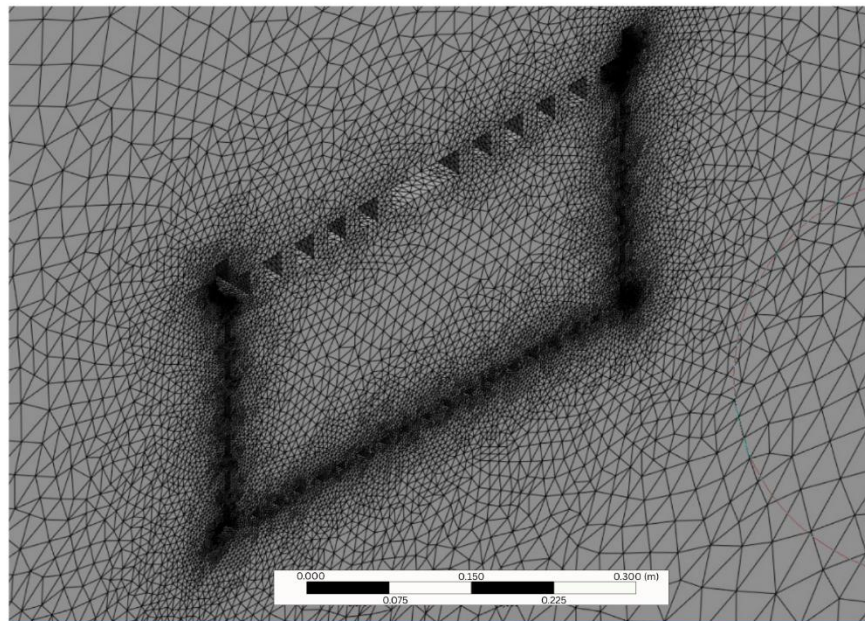
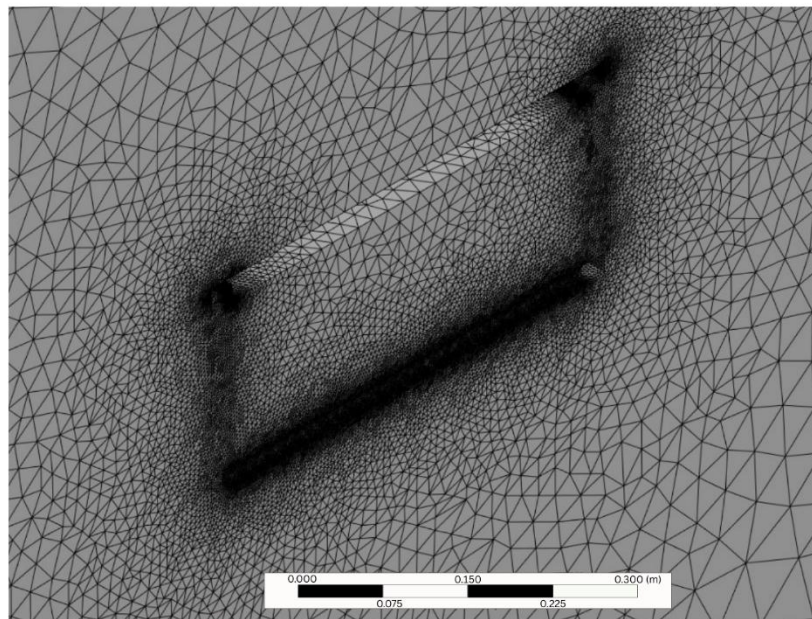


Figura 21 - Malha da caixa alternativa 3 (AC3) para transporte de aves.



### 6.3 Velocidades de fluxo interno de ar das caixas

Os números de Reynolds obtidos para velocidades simuladas de 8,33, 16,66 e 25 m/s foram 1.210.898, 807.265 e 403.632, respectivamente. A média interna das

velocidades do fluxo de ar (IAFV) através das caixas durante a simulação é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Velocidade simulada em m/s e as respectivas velocidades médias internas do fluxo de ar (IAFV, em m/s) e o erro padrão da média na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (AC1), caixa alternativa 2 (AC2) e caixa alternativa 3 (AC3).

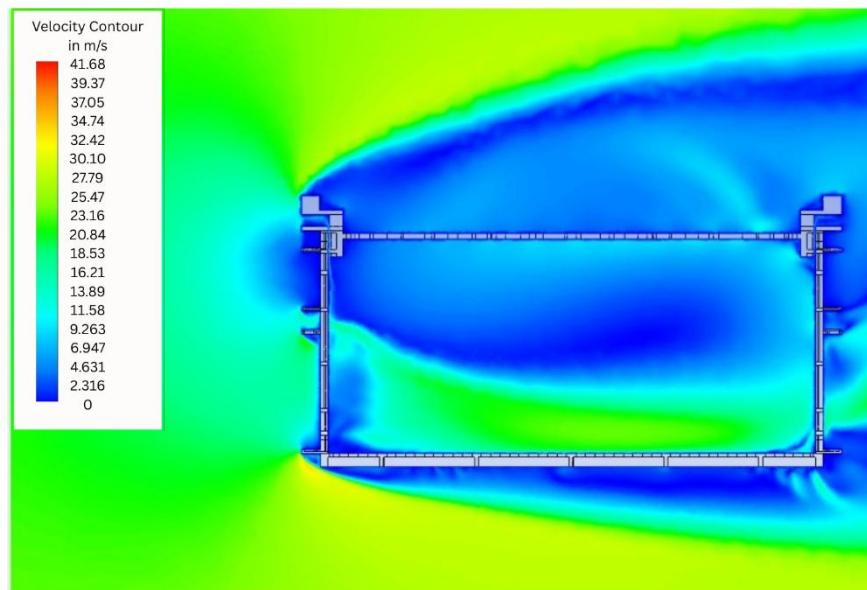
Velocidade simulada (m/s)	CC (m/s)	AC1 (m/s)	AC2 (m/s)	AC3 (m/s)
8.33	$3.2 \pm 0.11$	$1.83 \pm 0.05$	$1.69 \pm 0.07$	$4.99 \pm 0.15$
16.66	$7.58 \pm 0.23$	$3.51 \pm 0.11$	$3.64 \pm 0.14$	$10.07 \pm 0.30$
25	$11.37 \pm 0.34$	$6.43 \pm 0.19$	$5.09 \pm 0.15$	$14.92 \pm 0.45$

Os resultados mostraram que a CC apresentou IAFV mais elevado em comparação com as caixas alternativas AC1 e AC2 em todas as três velocidades de simulação. Foram observadas diferenças no IAFV entre AC1 e AC2, exceto na velocidade de 25 m/s, onde a AC1 apresentou um aumento de aproximadamente 26,33% no IAFV em comparação com a AC2.

Por outro lado, o modelo alternativo AC3 apresentou, em todas as velocidades de simulação, valores de IAFV mais elevados em comparação com a CC. Notavelmente, na velocidade de 16,66 m/s, que representa a velocidade média do veículo no transporte de aves vivas, a AC3 demonstrou um aumento de 32,85% no IAFV em comparação com a CC (Tabela 3).

No perfil de fluxo de ar da CC, observam-se áreas em azul que representam velocidade de fluxo de ar igual a zero (Figura 22), principalmente na parte superior da entrada de ar, no centro e na parte superior da saída de ar da caixa. Esses pontos de estagnação indicaram áreas de menor circulação de ar. De um modo geral, a maior parte do ar em movimento estava concentrada e se deslocava principalmente perto da parte inferior da caixa.

Figura 22 - Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Convencional (CC).



Ao analisar AC1 (Figura 23) e AC2 (Figura 24), o perfil simulado apresentou uma distribuição de ar mais ampla na entrada em comparação com a CC. No entanto, ainda havia obstáculos que impediam a entrada de ar na região inicial e a velocidade do ar dentro e na saída da caixa era praticamente zero na maioria dos pontos, como indicado pelas cores azul claro e escuro.

Figura 23 - Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 1 (AC1).

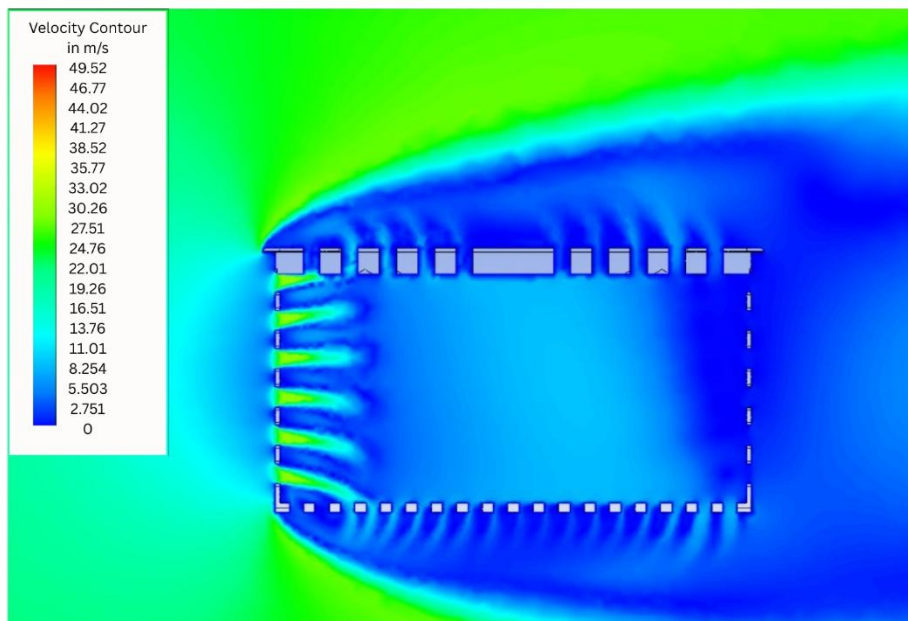
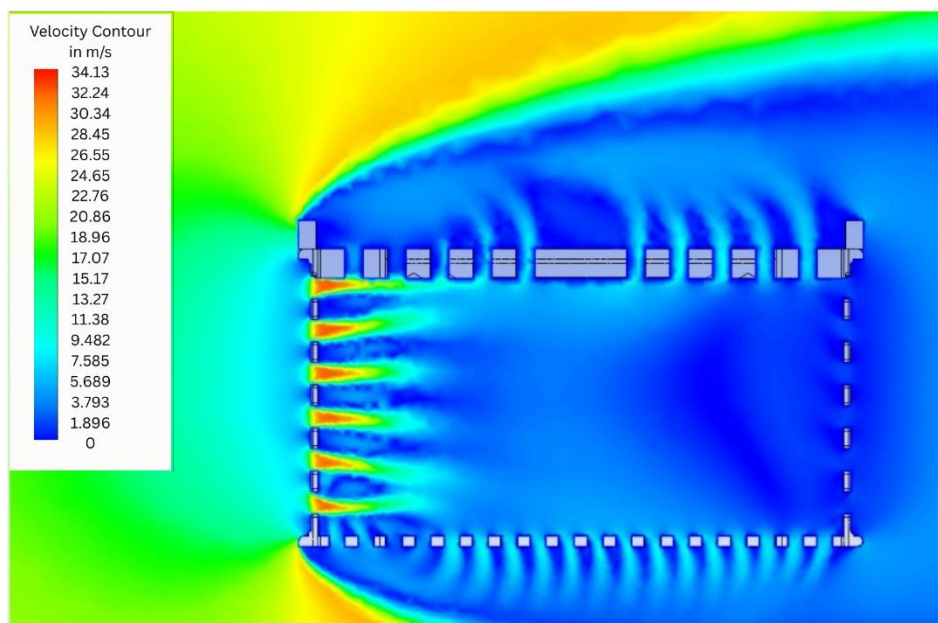


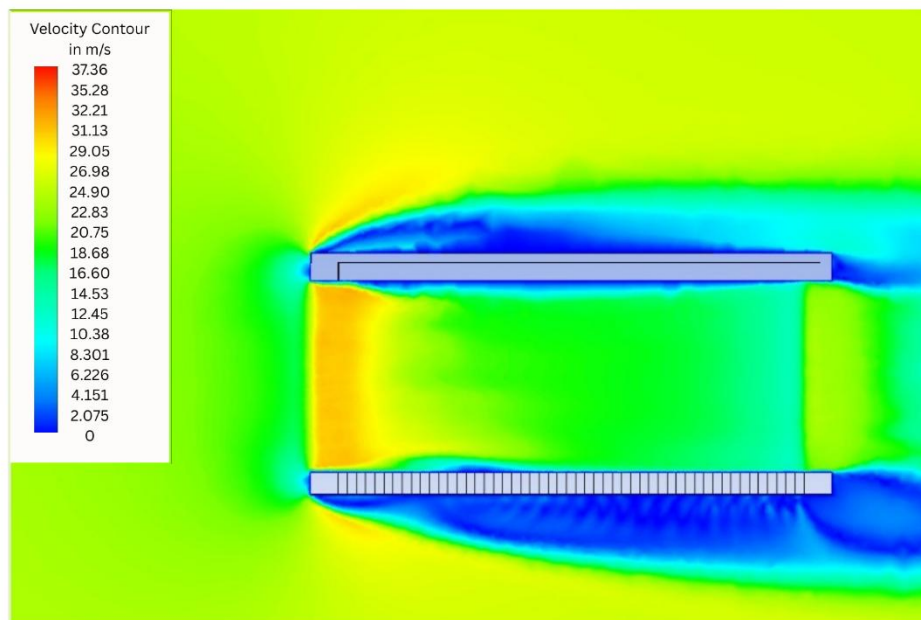
Figura 24 - Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 2 (AC2).



No AC3 (Figura 25), ficou evidente que o formato das laterais deste modelo permite uma entrada de ar fluida e desobstruída. Essa característica resulta em uma distribuição mais uniforme e eficiente do fluxo de ar interno e em uma maior velocidade

do fluxo de ar interno, superior à dos outros modelos testados e que pode ser visualizada nas áreas em verde, amarelo e vermelho.

Figura 25 - Resultados da simulação mostrando o perfil do fluxo de ar com cores indicando a velocidade do ar em m/s na Caixa Alternativa 3 (AC3).



#### 6.4 Protótipos das caixas de transporte

O uso de equipamento de corte a laser para a estruturação dos modelos de caixas em escala 1:5 permitiu a inclusão de todos os detalhes dos furos originais da caixa convencional como dos furos sugeridos nos novos modelos virtuais tanto nas laterais como nas tampas e no fundo das caixas de transporte. O material usado, as peças obtidas e a montagem das caixas tiveram resistência suficiente para suportar, sem deformar, os testes realizados em túnel de vento.

#### 6.5 Testes no túnel de vento

A análise estatística revelou diferenças significativas entre os diferentes modelos de caixas quando comparados à caixa convencional (CC) durante os testes em túnel de vento (Tabela 4).

Tabela 4 - Temperatura do ar (TA), umidade relativa (UR), índice de temperatura e umidade (ITU), índice de entalpia (H), velocidade média do fluxo de ar interno (VMFI) e pressão dinâmica (PD) registrados na caixa convencional (CC), caixa alternativa 1 (CA1), caixa alternativa 2 (CA2) e caixa alternativa 3 (CA3) durante os testes em túnel de vento.

Crate Design	TA (°C)	RH (%)	THI	H (kJ/kg)	IAFV (m/s)	DP (Pa)
CC	35.73 ± 0.21 <sup>ab</sup>	36.88 ± 0.34 <sup>a</sup>	87.03 ± 0.25 <sup>a</sup>	69.95 ± 0.32 <sup>b</sup>	16.14 ± 7.70 <sup>b</sup>	226.17 ± 75.71 <sup>b</sup>
AC1	36.02 ± 0.24 <sup>a</sup>	36.42 ± 0.36 <sup>ab</sup>	87.37 ± 0.34 <sup>a</sup>	70.35 ± 0.56 <sup>a</sup>	17.02 ± 7.94 <sup>b</sup>	244.33 ± 79.99 <sup>a</sup>
AC2	35.90 ± 0.20 <sup>ab</sup>	37.00 ± 0.43 <sup>a</sup>	87.34 ± 0.29 <sup>a</sup>	70.54 ± 0.51 <sup>a</sup>	19.27 ± 8.49 <sup>a</sup>	246.33 ± 79.32 <sup>a</sup>
AC3	35.35 ± 0.20 <sup>b</sup>	35.95 ± 0.31 <sup>b</sup>	86.13 ± 0.25 <sup>b</sup>	68.01 ± 0.32 <sup>c</sup>	19.30 ± 4.80 <sup>a</sup>	156.83 ± 51.79 <sup>c</sup>

Os valores são expressos como média ± erro padrão da média. Letras sobrescritas diferentes dentro de uma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ). A análise de variância (ANOVA) de uma via, seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, foi aplicada a todas as variáveis, exceto à velocidade média do fluxo de ar interno (IAFV), que foi analisada utilizando o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post hoc de Dunn.

A temperatura do ar foi significativamente menor na AC3 em comparação com a AC1. Em relação à umidade relativa, não foi observada diferença significativa entre a AC2 e a CC; no entanto, ambas as caixas apresentaram valores de UR significativamente maiores do que a AC3. Os valores de ITU não diferiram entre CC, AC1 e AC2. Em contrapartida, a AC3 apresentou um valor de ITU significativamente menor, indicando um microclima potencialmente menos estressante termicamente. Uma tendência semelhante foi observada para o índice de entalpia, com a AC1 e a AC2 apresentando os valores mais altos, seguidas pela CC e, por último, pela AC3, que apresentou a menor entalpia.

Em termos de fluxo de ar interno, a AC2 e a AC3 demonstraram desempenho de ventilação superior, com velocidades médias de fluxo de ar interno (VMFAI) de 19,27 ± 8,49 m/s e 19,30 ± 4,80 m/s, respectivamente. Esses valores foram significativamente maiores do que os registrados para CC e AC1, evidenciando a melhor distribuição do fluxo de ar nesses designs alternativos.

Além disso, os valores de pressão dinâmica (PD) revelaram importantes diferenças aerodinâmicas entre os modelos de caixa. O AC3 apresentou a menor pressão

dinâmica média, em comparação com os valores mais altos em CC, AC1 e AC2. Isso sugere que o AC3 oferece menor resistência ao fluxo de ar, facilitando uma passagem de ar mais suave e eficiente pela caixa.

## 7 DISCUSSÃO

Este estudo investigou os padrões de ventilação interna de quatro modelos de caixas de transporte de aves, combinando simulações CFD com experimentos em túnel de vento. Não foram encontrados estudos semelhantes a esse na literatura, sendo assim, este é o primeiro estudo a investigar a dinâmica do fluxo de ar dentro de caixas de transporte de aves combinando abordagens experimentais e numéricas, em que novos protótipos de caixas foram projetados, construídos e avaliados com o objetivo principal de otimizar a aerodinâmica da caixa transportadora para melhorar as condições térmicas e de ventilação experimentadas pelas aves durante o transporte. Ao simular a aerodinâmica da caixa em diferentes velocidades de deslocamento, os resultados demonstraram consistentemente que a caixa convencional (CC) apresentou área de superfície de abertura reduzida, levando a um fluxo de ar não uniforme e zonas de baixa velocidade, particularmente na região superior onde as cabeças das aves estão posicionadas.

Para frangos de corte, a zona de conforto recomendada é tipicamente entre 21–27 °C com umidade relativa entre 50 e 70%, condições que favorecem a termorregulação eficaz e reduzem o risco de mortalidade (NIELSEN, S.S. et al., 2022; RODRIGUES, M. et al., 2019). No entanto, a maioria das operações de transporte ocorrem frequentemente fora dessa faixa. Nessas circunstâncias, a renovação adequada do ar torna-se essencial, uma vez que a ventilação insuficiente leva ao acúmulo localizado de umidade e à formação de núcleos térmicos, que estão fortemente associados ao aumento da mortalidade durante o transporte (DOS SANTOS, V.M. et al., 2017; DOS SANTOS, V.M. et al., 2020; MACHADO, N.A.F. et al., 2021). Sendo assim, as restrições ao fluxo de ar observadas em caixas convencionais podem reduzir a troca de ar e comprometer a qualidade ambiental, promovendo a saturação (ou seja, o acúmulo de umidade relativa), uma condição que prejudica a termorregulação das aves (DOS SANTOS, V.M. et al., 2020; RUI, B.R. et al. 2011). Além disso, essas restrições aumentam a concentração de

gases (por exemplo, amônia, metano e dióxido de carbono), bem como poeira e material particulado (EMESU, P. et al., 2025).

As tentativas anteriores de melhorar a ventilação concentraram-se no fluxo de ar entre as caixas. Pinheiro et al. (2021) avaliaram o uso de espaçadores entre as caixas de transporte por meio de simulações CFD e experimentos em túnel de vento. O protótipo, composto por quatro colunas de suporte, duas barras de 230 mm, duas barras de 630 mm e quatro tampões de suporte de coluna, foi projetado para criar corredores de fluxo de ar horizontal e vertical. Embora essa configuração tenha melhorado a circulação entre as caixas, ela não aumentou significativamente a ventilação interna ao redor das aves. Em um estudo *in silico* complementar, Pinheiro et al. (2022) demonstraram que as configurações de empilhamento de caixas influenciam diretamente a ventilação do reboque. Os autores mostraram que arranjos com um corredor central promovem maior fluxo de ar entre as caixas em comparação com o empilhamento convencional. No entanto, essa configuração reduz a capacidade de carga em aproximadamente 20% e, não consegue melhorar substancialmente o fluxo de ar interno dentro das caixas ocupadas.

Em seu estudo, Vinco et al. (2016) compararam o transporte de frangos de corte em caixas convencionais e em caixas com o dobro da altura, observando *in vivo* que o aumento do espaço interno levou a maior estresse, agitação e lesões post-mortem, como hematomas e arranhões. Ao contrário da expectativa inicial de melhoria no bem-estar, as caixas modificadas não proporcionaram benefícios fisiológicos ou comportamentais e, em vários casos, intensificaram o estresse e as lesões. De forma crítica, esse cenário apoia a hipótese de que as aves estão sendo transportadas em caixas termodinamicamente ineficientes.

Em instalações avícolas, Ma et al. (2022) demonstraram que a redistribuição simétrica de ventiladores de exaustão melhorou a uniformidade térmica em até 88,3%. Emesu et al. (2025) mostraram que a ventilação natural em galpões de frangos de corte é fortemente influenciada pela orientação do edifício e pela geometria do telhado, com estruturas arqueadas e com telhado de duas águas superando os projetos em balanço. Esses estudos convergem para um princípio aerodinâmico fundamental: a eficiência do fluxo de ar é governada pela geometria, orientação e condições de contorno. Estendemos esse paradigma para gaiolas de transporte de aves vivas, visando desenvolver projetos que promovam um fluxo de ar uniforme em toda a área interna.

Ao analisar o perfil simulado do AC3, fica evidente que a geometria de abertura das laterais deste modelo, com aberturas retangulares verticais maiores e mais abertas, proporciona uma entrada de ar fluida e desobstruída em comparação com o CC. Simulações de CFD mostraram que o modelo AC3 proposto se destaca, apresentando, em média, 2,6 vezes mais área de aberturas em comparação com as outras caixas testadas e um melhor perfil de fluxo de ar interno durante as condições de transporte simuladas, quando comparado ao modelo CC e aos outros modelos propostos, AC1 e AC2.

Os experimentos em túnel de vento validaram os resultados da CFD e revelaram diferenças de desempenho entre os modelos das caixas. Análises estatísticas mostraram que o AC3 manteve uma umidade relativa significativamente menor do que a caixa convencional. Os índices térmicos reforçaram esses resultados: o AC3 apresentou os menores valores de THI e entalpia, indicando um microclima menos estressante termicamente.

Em termos de fluxo de ar, as caixas AC2 e AC3 alcançaram velocidades médias de fluxo de ar interno ( $IAFV = 19 \text{ m/s}$ ) significativamente maiores do que as caixas CC e AC1, o que demonstra sua maior eficiência de ventilação. Notavelmente, a caixa AC3 também apresentou a menor pressão dinâmica, sugerindo menor resistência ao fluxo de ar e um comportamento aerodinâmico mais suave. Em conjunto, esses resultados destacam a geometria das caixas como uma via promissora para pesquisas futuras com o objetivo de aprimorar os sistemas de transporte de aves.

Esses resultados estão em consonância com as descobertas de Farouk et al. (2020), que utilizou a dinâmica de fluidos computacional para investigar coletores de ar instalados no telhado de edifícios. Este estudo concluiu que os coletores de ar com aberturas quadradas têm maior velocidade média interna do ar. No caso de caixas de transporte, o modelo AC3, com um perfil de aberturas quadradas maiores, demonstrou maior eficiência na ventilação interna, provando ser mais promissor para melhorar o conforto térmico das aves.

Em estudo conduzido por Gilkeson et al. (2016), que analisaram o transporte de ovelhas, concluiu-se que o movimento do veículo durante o transporte é suficiente para promover a circulação de ar dentro dos compartimentos, e esse fator poderia ser usado para reduzir o impacto do estresse térmico nas aves durante o transporte. No entanto, os resultados do presente estudo demonstram que o desenho da caixa influencia diretamente

o fluxo de ar interno durante o transporte de aves, com a circulação de ar dependendo não apenas da velocidade do veículo, mas também do desempenho aerodinâmico determinado pela geometria e dimensões das aberturas da caixa.

Embora as velocidades medidas nos protótipos AC3 tenham sido muito maiores, esses valores refletem condições de túnel de vento em escala reduzida e não devem ser interpretados como equivalentes diretos aos ambientes de transporte comercial. Outro fator crítico é a presença de aves e a densidade de alojamento, que alteram drasticamente os microclimas internos. Estudos mostraram que animais vivos aumentam a produção de calor e umidade, modificam a distribuição do fluxo de ar e elevam as concentrações de gases (TABASE R.K., et al., 2020; MITCHELL, M.A. et al., 1998). As simulações e testes em túnel de vento, desse estudo, foram conduzidos com caixas vazias e, portanto, não podem capturar totalmente essas interações biológicas.

Além disso, o transporte comercial envolve caixas empilhadas dentro de reboques, onde zonas de recirculação, efeitos de empilhamento e aerodinâmica do veículo influenciam ainda mais a ventilação (GILKESON, C.A. et al., 2016). Pesquisas sobre o transporte de suínos e bovinos demonstraram que a geometria do reboque, os dispositivos de fluxo de ar e a orientação do veículo afetam significativamente os microclimas internos (MACHADO, N.A.F. et al., 2024; SEEDORF, J. et al., 2017; 43. NORTON, T. et al., 2013; BAKER, C.J. et al., 1994). Essas descobertas destacam a complexidade de ampliar as melhorias em nível de gaiola para sistemas de transporte completos. Estudos futuros devem incorporar aves vivas ou representações realistas, bem como simulações de reboques em escala real e medições *in situ*, para validar os benefícios para o bem-estar animal em condições comerciais.

## 8 CONCLUSÃO

Este estudo destaca o papel fundamental do desenho da caixa de transporte na dinâmica do fluxo de ar interno durante o transporte de aves. Utilizando simulações de CFD e experimentos em túnel de vento com protótipos em escala reduzida, foi demonstrado que a caixa de transporte brasileira convencional apresenta capacidade de ventilação limitada e distribuição desigual do fluxo de ar, particularmente em regiões críticas para a termorregulação.

Em contraste, o modelo alternativo AC3, com uma área de superfície maior de aberturas laterais, melhorou consistentemente a velocidade média do fluxo de ar interno em todas as velocidades de transporte simuladas. Embora os resultados ofereçam informações aerodinâmicas valiosas na escala da caixa, investigações adicionais que incorporem a fisiologia de aves vivas, cargas térmicas dinâmicas e cenários de transporte em escala real são essenciais para validar os resultados em termos de bem-estar animal e diferentes padrões de fluxo de ar.

## **9 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados encontrados nesse trabalho oferecem novas perspectivas para o uso de tecnologias de zootecnia de precisão no transporte de animais e propõe um novo modelo de caixa de transporte de aves que pode contribuir significativamente para o bem-estar dos animais e na diminuição da mortalidade durante a fase de transporte.

Durante o trabalho foi possível concluir que o uso de ferramentas computacionais CAD e CFD apresentam um grande potencial para inovação na produção animal, inclusive para elaboração de novos equipamentos.

O desenvolvimento de vários protótipos de caixa de transporte de aves só foi possível devido a essas técnicas apresentarem baixo custo em comparação com a confecção de protótipos reais.

Além disso, técnicas de desenvolvimento de protótipos reais em escala reduzida auxiliam na visualização e testes em pequenos tuneis de vento e o uso de equipamento de corte a laser e madeira de fibra de média densidade (MDF) são adequados e baratos para esses testes.

O protótipo AC3 apresentou resultados promissores para melhoria das condições de transporte das aves, entretanto testes em condições reais são fundamentais para a viabilização do protótipo em escala comercial.

## REFERENCIAS

- ABIDIN, Zulaikha Zainool et al. The effect of water shower spray on stress physiology and mortality in broiler chickens subjected to road transportation under the hot and humid tropical condition. **Tropical Animal Health And Production**, v. 54, n. 6, p. 354, 20 out. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11250-022-03360-y>.
- ABPA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL). **Relatório anual 2024**. Disponível em: [https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024\\_capa\\_frango.pdf](https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf). Acesso em: 30 jan. 2025.
- ACEVEDO-GIRALDO, Daniel et al. Aerodynamic Evaluation of Different Car Carrier Devices for Drag Reduction Using CFD. **Journal Of Aerospace Technology And Management**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 22 set. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v10.971>.
- ADAM, Saber Y. et al. Traditional Transportation Methods and Their Influence on Local Chicken Welfare, Behavior, and Blood Profiles: a policy considerations. **Veterinary Sciences**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 798, 23 ago. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/vetsci12090798>.
- BABADI, Keyvan Ahmadi; KHORASANIZADEH, Hossein; AGHAEI, Alireza. CFD modeling of air flow, humidity, CO2 and NH3 distributions in a caged laying hen house with tunnel ventilation system. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 193, p. 106677, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2021.106677>.
- ALLEN, V.M. et al. Evaluation of the performance of different cleaning treatments in reducing microbial contamination of poultry transport crates. **British Poultry Science**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 233-240, maio 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00071660802094206>.
- ALONSO, Marta E.; GONZÁLEZ-MONTAÑA, José R.; LOMILLOS, Juan M.. Consumers' Concerns and Perceptions of Farm Animal Welfare. **Animals**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 385, 27 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ani10030385>.
- ANGELO, João Carlos de, et al. Material de cama: qualidade, quantidade e efeito sobre o desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, 1997, v. 26, n. 1, p. 121-130.1997.
- APALOWO, Oluwabunmi O.; EKUNSEITAN, Deji A.; FASINA, Yewande O.. Impact of Heat Stress on Broiler Chicken Production. **Poultry**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 107-128, 29 abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/poultry3020010>.
- AVILA, Valdir Silveira de. et al. Produção e manejo de frangos de corte. Concórdia: **Embrapa-CNPSA**, p. 43, 1992. Embrapa ALICE.
- BAKER, C.J. Aerodynamics of poultry transporters: implications for environmental control. **World'S Poultry Science Journal**, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 62-63, 1 mar. 1994. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1079/wps19940008>.
- BARBOSA FILHO, José Antonio Delfino et al. Transporte de frangos: caracterização do microclima na carga durante o inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [S.L.], v.

38, n. 12, p. 2442-2446, dez. 2009. FapUNIFESP (SciELO).  
<http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982009001200021>.

BENINCASA, Natália Cristina et al. Animal welfare: impacts of pre-slaughter operations on the current poultry industry. **Journal Of Animal Behaviour And Biometeorology**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 104-110, 5 mar. 2020. Malque Publishing.  
<http://dx.doi.org/10.31893/jabb.20014>.

BERMAN, A. et al. A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress. **International Journal Of Biometeorology**, [S.L.], v. 60, n. 10, p. 1453-1462, 27 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-016-1136-9>.

BRAGA, Janaina da Silva; MACITELLI, Fernanda; LIMA, Victor Abreu de; DIESEL, Taciana. O modelo dos “Cinco Domínios” do bem-estar animal aplicado em sistemas intensivos de produção de bovinos, suínos e aves. **Revista Brasileira de Zootecias**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 204-226, 7 jun. 2018. Universidade Federal de Juiz de Fora.  
<http://dx.doi.org/10.34019/2596-3325.2018.v19.24771>.

BRAGA, Janaina da Silva et al. Transporte Legal Bovinos. **Funep**, v. 1. 133p. 2020, Jaboticabal: Funep.

BROOM, Donald M.. Animal Welfare Education: development and prospects. **Journal Of Veterinary Medical Education**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 438-441, dez. 2005. University of Toronto Press Inc. (UTPress). <http://dx.doi.org/10.3138/jvme.32.4.438>.

BROOM, D.M.. Indicators of poor welfare. **British Veterinary Journal**, [S.L.], v. 142, n. 6, p. 524-526, nov. 1986. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0007-1935\(86\)90109-0](http://dx.doi.org/10.1016/0007-1935(86)90109-0).

CE 1/2005, **Regulamento (CE) N.º 1/2005, de 22 de dezembro de 2004**, sobre a proteção dos animais durante o transporte e operações afins, e que altera as Diretivas 64/432/CEE e 93/119/CEE e o Regulamento (CE) n.º 1255/97. Jornal Oficial da União Europeia, L 3, 5.1.2005, p. 1-44.

MARTINO, G. et al. Factors associated with pre-slaughter mortality in turkeys and end of lay hens. **Animal**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2295-2300, 2017. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1017/s1751731117000970>.

SANTOS, Vinícius M. dos et al. Effect of transportation distances, seasons and crate microclimate on broiler chicken production losses. **Plos One**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 1-22, 22 abr. 2020. Public Library of Science (PLoS).  
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0232004>.

SANTOS, V M dos et al. Effects of season and distance during transport on broiler chicken meat. **Poultry Science**, [S.L.], v. 96, n. 12, p. 4270-4279, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex282>.

EICHLER, Fabienne et al. Opportunities to Improve Animal Welfare during Transport and Slaughter of Cattle and Pigs through Staff Training—Results of a Delphi Survey. **Animals**, [S.L.], v. 13, n. 24, p. 3859, 15 dez. 2023. MDPI AG.  
<http://dx.doi.org/10.3390/ani13243859>.

EMESU, Pius; CHEPETE, Justin Hakgamalang; THIPE, Ellen Letsogile. Computational fluid dynamics assessment of natural ventilation in three types of large-

scale broiler poultry houses in Botswana. **Scientific African**, [S.L.], v. 27, p. 02587, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02587>.

FAROUK, Mohamed. Comparative study of hexagon & square windcatchers using CFD simulations. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 31, p. 101366, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101366>.

FAWC, **Farm Animal Welfare Council**, 1979. Disponível em: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20121010012427/http://www.fawc.org.uk/freedoms.htm> Acesso em: 13 de nov. 2023

FOX, Robert W. et al. Viscous and Inviscid Flows. In: FOX, Robert W. et al. Introduction to Fluid Mechanics. 6. ed. [S. l.]: **John Wiley and Sons**, chapter. 2, p. 35-35, 2003.

FU, Yajie et al. Effects of transport time and feeding type on weight loss, meat quality and behavior of broilers. **Animal Bioscience**, [S.L.], v. 35, n. 7, p. 1039-1047, 1 jul. 2022. Asian Australasian Association of Animal Production Societies. <http://dx.doi.org/10.5713/ab.21.0381>.

GILKESON, Carl A. et al. Quantifying passive ventilation within small livestock trailers using Computational Fluid Dynamics. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 124, p. 84-99, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.028>.

GORTON, Matthew et al. Consumers' willingness to pay for an animal welfare food label. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 209, p. 107852, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107852>.

GUÀRDIA, Maria Dolors et al. Risk assessment of PSE condition due to pre-slaughter conditions and RYR1 gene in pigs. **Meat Science**, [S.L.], v. 67, n. 3, p. 471-478, jul. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.11.020>.

HE, Xiangli et al. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 149, p. 16-25, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>.

HUNDE, Bonsa Regassa; WOLDEYOHANNES, Abraham Debebe. Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. **Results In Engineering**, [S.L.], v. 14, p. 100478, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100478>.

HUSSNAIN, Faisal et al. Effect of transportation distance and crating density on preslaughter losses and blood biochemical profile in broilers during hot and humid weather. **Turkish Journal Of Veterinary And Animal Sciences**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 418-426, 6 abr. 2020. The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK-ULAKBIM) - DIGITAL COMMONS JOURNALS. <http://dx.doi.org/10.3906/vet-1905-85>.

ILANGOVAN, Adhiyaman et al. CFD Modelling of the Thermal Performance of Fruit Packaging Boxes—Influence of Vent-Holes Design. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 23, p. 7990, 30 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14237990>.

JACOBS, Leonie et al. Effect of post-hatch transportation duration and parental age on broiler chicken quality, welfare, and productivity. **Poultry Science**, [S.L.], v. 95, n. 9, p. 1973-1979, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew155>.

KELLS, Nikki J.. Review: the five domains model and promoting positive welfare in pigs. **Animal**, [S.L.], v. 16, p. 100378, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.animal.2021.100378>.

KRAUSE, Frank-Lothar et al.. Computer aided conceptual design. In **Proceedings of the 36th CIRP international seminar on manufacturing systems**, Saarbru. 2003.

LEANDRO, Nadja S. Mogyca; ROCHA, Patrícia Tironi; STRINGHINI, José Henrique; SCHAITL, Mônica; FORTES, Rogério M. Efeito do tipo de captura dos frangos de corte sobre a qualidade da carcaça. **Ciência Animal Brasileira / Brazilian Animal Science**, Goiânia, v. 2, n. 2, p. 97–100, 2006.

LI, Hao; RONG, Li; ZHANG, Guoqiang. Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 123, p. 203-210, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.027>

LIMA, Victor Abreu de et al.. Transporte legal de aves. . Jaboticabal, SP: **FUNEP**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/arquivos-publicacoes-bem-estar-animal/ebookTransportelegalaves.pdf/view>.

LIMA, Victor Abreu de et al. Effect of different catching practices during manual upright handling on broiler welfare and behavior. **Poultry Science**, [S.L.], v. 98, n. 10, p. 4282-4289, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez284>.

LUDTKE, Charli Beatriz et al. Abate humanitário de aves. **WSPA Brasil**, Rio de Janeiro. 2010

MA, Haoyan et al. Influence of tunnel ventilation on the indoor thermal environment of a poultry building in winter. **Building And Environment**, [S.L.], v. 223, p. 109448, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109448>.

MACHADO, Nitalo. A. F. **Transporte de suínos em clima tropical: bem-estar animal, estresse térmico e ventilação na carga**. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/56266/3/2020\\_tese\\_nafmachado.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/56266/3/2020_tese_nafmachado.pdf)  
Acesso em: 06 de fev. 2021.

MACHADO, Nitalo A.F. et al. Identification of trailer heat zones and associated heat stress in weaner pigs transported by road in tropical climates. **Journal Of Thermal Biology**, [S.L.], v. 97, p. 102882, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102882>.

MACHADO, Nitalo A. F. et al. Numerical evaluation of aerodynamic devices in mitigating heat stress in pigs during transport. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 20230162, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v44nepe20230162/2024>.

MACHADO, Nitalo A. F. et al. Trailer heat zones and their relation to heat stress in pig transport. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 41, n. 4, p. 427-437, ago. 2021.

FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n4p427-437/2021>.

MACHADO, Nítalo A.F. et al. Identification of trailer heat zones and associated heat stress in weaner pigs transported by road in tropical climates. **Journal Of Thermal Biology**, [S.L.], v. 97, p. 102882, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102882>.

MELLOR, David J. et al. The 2020 Five Domains Model: including human animal interactions in assessments of animal welfare. **Animals**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1870, 14 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ani10101870>.

MELLOR, David. Updating Animal Welfare Thinking: moving beyond the "five freedoms" towards "a life worth living". **Animals**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 21, 14 mar. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ani6030021>.

MELLOR, David. J. et al.. Concepts of animal well-being and predicting the impact of procedures on experimental animals. **Improving the well-being of animals in the research environment**, p. 3-18, 1994.

MICHAELIS, M.; MICHAELIS, H. **Dicionário brasileiro da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 2024. Software. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/palavra/xRLWv/jejum/> Acesso em: 05 de jan. 2025.

MIFTAKHUTDINOV, A. V. et al. Heat and Transport Stress in Industrial Poultry: problems and solution. **Russian Agricultural Sciences**, [S.L.], v. 48, n. 5, p. 405-412, out. 2022. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s1068367422050032>.

**MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA)**. Portaria nº 365, de 16 de julho de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 12, 23 jul. 2021

MITCHELL, Malcolm A; KETTLEWELL, Peter J.. Physiological stress and welfare of broiler chickens in transit: solutions not problems!. **Poultry Science**, [S.L.], v. 77, n. 12, p. 1803-1814, dez. 1998. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1093/ps/77.12.1803>.

NIELSEN, Søren Saxmose et al.. Welfare of broilers on farm. **EFSA Journal**, [S. L.], v. 21, n. 2, e07788, 236 p., 21 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7788>.

NIELSEN, Søren Saxmose et al. Welfare of Domestic Birds and Rabbits Transported in Containers. **EFSA Journal**. [S. L.], v. 20, n. 9, e07441, p. 1-188, set. 2022. DOI: 10.2903/j.efsa.2022.7441.

NILOOFAR, Parisa et al. Data-driven decision support in livestock farming for improved animal health, welfare and greenhouse gas emissions: overview and challenges. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 190, p. 106406, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2021.106406>.

NORTON, Tomás; KETTLEWELL, Peter; MITCHELL, Malcolm. A computational analysis of a fully-stocked dual-mode ventilated livestock vehicle during ferry transportation. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 93, p. 217-228, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.005>.

OIE (WORLD ORGANIZATION FOR ANIMAL HEALTH). **Terrestrial Animal Health Code**. Session 7.0, Animal Welfare. 2016. Disponível em:

[https://www.oie.int/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/?id=169&L=1&htmfile=chapitre\\_aw\\_introduction.htm](https://www.oie.int/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/?id=169&L=1&htmfile=chapitre_aw_introduction.htm) Acesso em 10 de jun. 2021.

PAPAGEORGIU, Maria et al. Positive Welfare Indicators and Their Association with Sustainable Management Systems in Poultry. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 14, p. 10890, 11 jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su151410890>.

PINHEIRO, Daniel Gurgel; BARBOSA FILHO, José Antonio Delfino; MACHADO, Nítalo André Farias. Effect of wetting method on the broiler transport in Brazilian Northeast. **Journal Of Animal Behaviour And Biometeorology**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 168-173, 21 abr. 2020. Malque Publishing. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.20022>.

PINHEIRO, Daniel G.; MACHADO, Nítalo A. F.; BARBOSA FILHO, José A. D.; SILVA, Iran J. O. da. Computational analysis of load ventilation in broiler transport. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 9-18, fev. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n1p9-18/2021>.

PINHEIRO, Daniel G.; BARBOSA FILHO, José A. D.; MACHADO, Nítalo A. F.. Impact of load layout on internal ventilation during the transport of broilers. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 42, n. 3, p. 20220017, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v42n3e20220017/2022>.

PIROMPU, Pranee et al. Preslaughter handling factors affecting dead on arrival, condemnations, and bruising in broiler chickens raised without an antibiotic program. **Poultry Science**, [S.L.], v. 102, n. 8, p. 102828, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psj.2023.102828>.

QUEIROZ, Ricardo Guimarães de et al. How do Brazilian citizens perceive animal welfare conditions in poultry, beef, and dairy supply chains? **Plos One**, [S.L.], v. 13, n. 12, p. 0202062, 19 dez. 2018. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0202062>.

RANDALL, J.M. et al. Vibration on poultry transporters. **World'S Poultry Science Journal**, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 64-65, 1 mar. 1994. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1079/wps19940009>.

RAULT, Jean-Loup et al. A consensus on the definition of positive animal welfare. **Biology Letters**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 20240382, jan. 2025. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2024.0382>.

RODRIGUES, Mayara et al. Techniques to minimize the effects of acute heat stress or chronic in broilers. **Brazilian Journal Of Poultry Science**, [S.L.], v. 21, n. 3, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2018-0962>.

RODRIGUES, Valéria Cristina et al. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal Of Biometeorology**, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 455-459, 7 jul. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-010-0344-y>.

ROSA, Paulo Sergio et al.. Effect of broiler fasting time during pre-slaughter. In: **WORLD´ S POULTRY CONGRESS**, 24., 2012, Salvador. Abstract... Salvador: WSPA, 2012. 1 CD-ROM. *World's Poultry Science Journal*, v. 68, supl. 1, 2012.

RUI, Bruno Rogério; ANGRIMANI, Daniel de Souza Ramos; SILVA, Marcos Augusto Alves da. Pontos críticos no manejo pré-abate de frango de corte: jejum, captura, carregamento, transporte e tempo de espera no abatedouro. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 41, n. 7, p. 1290-1296, 22 jul. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782011005000092>.

SAEED, Muhammad et al. Heat stress management in poultry farms: a comprehensive overview. **Journal Of Thermal Biology**, [S.L.], v. 84, p. 414-425, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.07.025>.

SANGOREMI, Abidemi Anthony et al. Management of Poultry and Poultry Wastewater. In *Strategic Management of Wastewater from Intensive Rural Industries*; **Springer Nature**: Cham, Switzerland, pp. 233–255, 2025.

SARAIVA, Sónia et al. Impact of pre-slaughter factors on welfare of broilers. **Veterinary And Animal Science**, [S.L.], v. 10, p. 100146, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vas.2020.100146>.

SCHWARTZKOPF-GENSWEIN, Karen Shelley G. et al. Road transport of cattle, swine and poultry in North America and its impact on animal welfare, carcass and meat quality: a review. **Meat Science**, [S.L.], v. 92, n. 3, p. 227-243, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.010>.

SEEDORF, Jens; SCHMIDT, Ralf-Gunther. The simulated air flow pattern around a moving animal transport vehicle as the basis for a prospective biosecurity risk assessment. **Heliyon**, [S.L.], v. 3, n. 8, p. 00358, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00358>.

SOBRINHA, Lôide Angelini et al. Dinâmica dos fluidos para engenheiros em formação. **Editora da UFGD**, Dourados, MS, v. 1, 178p, 2022.

SPURIO, Rafael S. et al. Improving transport container design to reduce broiler chicken PSE (pale, soft, exudative) meat in Brazil. **Animal Science Journal**, [S.L.], v. 87, n. 2, p. 277-283, 24 ago. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/asj.12407>.

TABASE, Raphael Kubeba et al. CFD simulation of airflows and ammonia emissions in a pig compartment with underfloor air distribution system: model validation at different ventilation rates. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.L.], v. 171, p. 105297, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2020.105297>.

TOMASEVIC, Igor et al. Attitudes and Beliefs of Eastern European Consumers Towards Animal Welfare. **Animals**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 1220, 17 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ani10071220>.

TURCO, José E. P.; FERREIRA, Luiz F. S. A.; FURLAN, Renato L.. Consumo e custo de energia elétrica em equipamentos utilizados em galpão de frangos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 519-522, dez. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662002000300023>.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. **Pearson**, 2nd Edition, London, 2007.

VIEIRA, Frederico Márcio Corrêa et al. Poultry Preslaughter Operations in Hot Environments: the present knowledge and the next steps forward. **Animals**, [S.L.], v. 14, n. 19, p. 2865, 4 out. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ani14192865>.

- VINCO, Leonardo James et al. Influence of crate height on the welfare of broilers during transport. **Journal Of Veterinary Behavior**, [S.L.], v. 14, p. 28-33, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jveb.2016.06.006>.
- WABECK, Charles J.. Feed and Water Withdrawal Time Relationship to Processing Yield and Potential Fecal Contamination of Broilers. **Poultry Science**, [S.L.], v. 51, n. 4, p. 1119-1121, jul. 1972. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3382/ps.0511119>.
- WANG, Peng et al. Effects of water-misting spray combined with forced ventilation on heat induced meat gelation in broiler after summer transport. **Poultry Science**, [S.L.], v. 95, n. 10, p. 2441-2448, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew203>.
- WAP - **WORLD ANIMAL PROTECTION**. Consumo às cegas - Percepção dos consumidores sobre bem-estar animal. 2017. Disponível em: [https://www.worldanimalprotection.org.br/sites/default/files/media/br\\_files/consumo\\_as\\_pegas\\_latam.pdf](https://www.worldanimalprotection.org.br/sites/default/files/media/br_files/consumo_as_pegas_latam.pdf) Acesso em: 06 de jan. 2021.
- WEEKS, Claire A.; TUYTTENS, Frank A.M.; GRANDIN, Temple. Poultry handling and transport. In: **Livestock handling and transport**. Wallingford UK: CABI, p. 404-426, 2019.
- WEHMANN, Claus Franz et al. Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor - Parte II: problemas clássicos de transmissão de calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 40, n. 2, p. 2313, 30 nov. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0221>.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, WECD**, 1987 Our common future. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> Acesso em: 06 de jan. 2021.
- WURTZ, Kaitlin E. et al.. Water deprivation in poultry in connection with transport to slaughter—a review. **Poultry Science**, [S.L.], v. 103, n. 5, p. 103419, maio 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psj.2023.103419>.